

2021

Kumpulan Pidato
Pengukuhan Guru Besar
Universitas Negeri Malang (UM)

Sains dan Teknologi



**Excellence in
Learning Innovation**

**Kumpulan Pidato Pengukuhan Guru Besar
Universitas Negeri Malang (UM)**

Sains Dan Teknologi

Tim Editor

Nabhan F. Choiron

Hendra Susanto

Indria Santy

Arda Purnama Putra – Fakultas Ilmu Pendidikan

Novi Eka Susilowati – Fakultas Sastra

Meyga Evi Ferama Sari – Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Rizky Firmansyah – Fakultas Ekonomi

Yanuar Rohmat Aji Pradana – Fakultas Teknik

Rama Kurniawan – Fakultas Ilmu Keolahragaan

Nailul Insani – Fakultas Ilmu Sosial

Gamma Rahmita Ureka Hakim – Fakultas Pendidikan Psikologi

Andy Joko Sulistyو

Samsul Arifin

Novita Wulaning Asri

Didik Anggiantoro



Penerbit & Percetakan

Universitas Negeri Malang

Anggota IKAPI No. 059/JTI/89, Anggota APPTI No.002.103.1.09.2019

Jl. Semarang 5 Malang, Kode Pos 65145

Telp. (0341) 562391, 551312 psw 1453

Choiron, N. F., dkk.

Kumpulan Pidato Pengukuhan Guru Besar Universitas Negeri Malang (UM) Sains dan Teknologi – Oleh: Nabhan F. Choiron, dkk. – Cet. I – Malang: Penerbit Universitas Negeri Malang; 2021.

x, 386 hlm; 18,2 x 25,7 cm

ISBN: 978-602-470-747-7 (PDF)

Kumpulan Pidato Pengukuhan Guru Besar Universitas Negeri Malang (UM) Sains dan Teknologi

Penanggung Jawab

Prof. Ibrahim Bafadal

Koordinator

Juharyanto

Tim Editor

Nabhan F. Choiron

Hendra Susanto

Indria Santy

Arda Purnama Putra – Fakultas Ilmu Pendidikan

Novi Eka Susilowati – Fakultas Sastra

Meyga Evi Ferama Sari – Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Rizky Firmansyah – Fakultas Ekonomi

Yanuar Rohmat Aji Pradana – Fakultas Teknik

Rama Kurniawan – Fakultas Ilmu Keolahragaan

Nailul Insani – Fakultas Ilmu Sosial

Gamma Rahmita Ureka Hakim – Fakultas Pendidikan Psikologi

Andy Joko Sulistyono

Samsul Arifin

Novita Wulaning Asri

Didik Anggiantoro

Desain Sampul

Yon Ade Lose Hermanto

Andreas Syah Pahlevi

Tata Letak

Samsul Arifin

- Hak cipta yang dilindungi :
Undang-undang pada : Penulis
Hak Penerbitan pada : Universitas Negeri Malang
Dicetak oleh : Universitas Negeri Malang

Dilarang mengutip atau memperbanyak dalam bentuk apapun tanpa izin tertulis dari penulis.
Isi diluar tanggung jawab Penerbit.

- Universitas Negeri Malang
Anggota IKAPI No. 059/JTI/89
Anggota APPTI No. 002.103.1.09.2019
Jl. Semarang 5 Malang, Kode Pos 65145
Telp. (0341) 562391, 551312; psw. 1453
-

- Cetakan I: 2021
-

SAMBUTAN KETUA SENAT AKADEMIK

Puji syukur kita panjatkan ke hadirat Allah SWT, Tuhan Yang Maha Kuasa atas terbitnya Buku Kumpulan Pidato Guru Besar Universitas Negeri Malang (UM). Apresiasi tertinggi saya sampaikan kepada semua pihak, khususnya para Guru Besar yang telah bersedia memberikan naskah pidatonya untuk dibukukan oleh UM. Buku ini bukan sekadar kumpulan dokumen semata, melainkan kumpulan berbagai ide besar yang cemerlang, sebagai bentuk kepedulian dan komitmen kuat untuk menebar sumbangsih terbaik bagi pembangunan dalam melahirkan insan-insan unggul harapan bangsa tercinta ini. Ide-ide besar tersebut diharapkan menjadi inspirasi bermakna bagi pengembangan dan penguatan tri-darma semua dosen dalam berkiprah bersama UM mengawal terbentuknya insan-insan unggul yang kapabel menghadapi tantangan disrupsi (disruption) dan ketidakpastian (uncertainty) era industri global saat ini dan masa depan.

Kita tahu bahwa era ini menawarkan produk serba kejut. Kualitas sumber daya manusia (SDM) sangat ditentukan oleh kapabilitas kreatif dan inovatif yang melahirkan berbagai opsi-opsi solutif yang efisien dan efektif. SDM yang tidak berbekal dengan hal tersebut, tidak akan sanggup hidup dengan layak, tidak memiliki kemanfaatan bagi kehidupan, bahkan akan musnah ditelan jaman. Menjadikan sumber daya manusia yang layak survive, tentu menjadi tanggungjawab semua pihak, yang secara umum digantungkan kepada dunia pendidikan, terutama pendidikan tinggi, dimana UM berada di dalamnya. Karena itu, dosen dan seluruh sivitas UM memiliki peran strategis dalam proses-proses ini. Ide-ide gemilang para guru besar, yang tertuang dalam pidato-pidatonya, setidaknya akan menjadi rujukan yang sangat baik, untuk mengawal ide-ide baik kita semua selanjutnya.

Kami berpikir bahwa pidato guru besar saat pengukuhan yang tercecer dan tersebar di mana-mana, penting untuk disatukan dalam bentuk naskah buku. Tujuan utamanya adalah agar masyarakat mudah mengaksesnya, terinspirasi darinya, merujuknya, dan memanfaatkannya dalam berbagai keperluan pengembangan akademik dan non akademik dengan tetap kukuh berpegang pada regulasi yang berlaku. Melalui kumpulan naskah pidato ini, diharapkan diperoleh pula adanya benang merah perbedaan gagasan, alur perkembangan, dan inspirasi pemikiran lanjutan yang bisa dikembangkan baik pada masa sekarang maupun yang akan datang, oleh insan akademik secara keseluruhan, tidak terkecuali para guru besar, khususnya di UM. Buku Kumpulan Pidato Guru Besar ini dikemas ke dalam empat (4) tema besar, antara lain: (1) Sains dan Teknologi; (2) Diskursus Ilmu Sosial dan Budaya Indonesia; (3) Wawasan Pendidikan Indonesia; dan (4) Mereka Pembelajaran Inovatif.

Menyadari pentingnya buku ini, maka dokumen ini akhirnya dicetak ke dalam dua versi, yakni hard copy dan soft copy. Dengan dua versi cetak tersebut, diharapkan tidak ada alasan lagi, khususnya bagi insan akademik UM untuk tidak mengaksesnya. Silakan dimanfaatkan sebaik-baiknya demi kelanjutan pemikiran hebat dan temuan-temuan bermartabat berikutnya. Karya ini menjadi bagian penting bagi perwujudan mimpi UM sebagai “GuRu Indonesia, Asia, dan dikenal Dunia”, terutama dalam konteks perluasan amanah baru UM sebagai Perguruan Tinggi Badan Hukum sejak tanggal 25 November 2021, sesuai dengan PP nomor 115 tahun 2021 tentang PTNBH Universitas Negeri Malang.

Terima kasih atas kerjakeras semua guru besar yang telah mengikhlaskan naskah pidato pengukuhan guru besarnya untuk dicetak dan dibukukan serta pihak-pihak lain yang telah banyak membantu penyelesaian buku ini. Secara khusus, saya sampaikan terima kasih kepada Rektor UM, yang telah berhasil menggenjot penambahan guru besar melalui berbagai kebijakannya yang luar biasa, termasuk kebijakan riset skema percepatan guru besar. Hingga saat ini, UM telah memiliki 98 guru besar aktif. Insya Allah akan hadir guru-guru besar yang lebih banyak lagi. Artinya, inspirator-inspirator akademik akan semakin bertambah dan UM semakin layak menjadi unggulan serta rujukan terbaik.

Terima kasih.

Malang, Desember 2021
Ketua,

Sukowiyono
Profesor Bidang Hukum Tata Negara
Jurusan Hukum dan Kewarganegaraan
Fakultas Ilmu Sosial

SAMBUTAN REKTOR

Segala puji kita haturkan ke Hadirat Allah, Tuhan Yang Maha Kuasa atas tuntasnya penyusunan dan penerbitan Buku Kumpulan Pidato Guru Besar Universitas Negeri Malang (UM). Di samping sebagai apresiasi atas capaian jabatan akademik tertinggi bagi para Guru Besar yang kukuhkan, kumpulan pidato ini juga dapat menjadi sumber inspirasi yang berkelanjutan, khususnya bagi sivitas Universitas Negeri Malang dan masyarakat pada umumnya. Lebih dari itu, Kumpulan Buku Pidato Guru Besar ini dapat dimaknai sebagai wujud ide-ide kreatif dan inovatif serta sumbangsiah Universitas Negeri Malang dalam melaksanakan tugas Tridharma Perguruan Tinggi.

Hingga Desember 2021, UM telah memiliki 93 Guru Besar yang aktif. Setidaknya UM telah memiliki sekurang-kurangnya 84 gagasan besar yang dapat dimanfaatkan sebagai rujukan pengembangan sumber daya UM dan institusi lainnya, dalam khasanah pembangunan Sumber Daya Manusia Indonesia unggul. Terutama relevan dengan Amanah baru UM sebagai Perguruan Tinggi Badan Hukum sejak tanggal 25 November 2021, sesuai dengan PP nomor 115 tahun 2021 tentang PTNBH Universitas Negeri Malang, maka gagasan besar yang bersifat akademis dengan keunggulan inovatif menjadi main support bagi sustainabilitas UM untuk terus semakin menguatkan kiprah keunggulannya bagi masyarakat. Karya ini menjadi bagian penting bagi perwujudan mimpi UM sebagai “GuRu Indonesia, Asia, dan dikenal Dunia”.

Gagasan akademis yang dituangkan melalui pidato-pidato yang bagus dan penuh makna dari para Guru Besar ini kiranya dapat disebarluaskan ke seluruh masyarakat, khususnya masyarakat kampus agar dapat dikembangkan sebagai upaya turut membangun kualitas kampus dan masyarakat pada umumnya. Agar gagasan besar tersebut mudah diakses dengan baik, maka UM berkepentingan untuk mendokumentasikannya ke dalam Buku Kumpulan Pidato Guru Besar yang dikategorisasikan ke dalam empat (4) tema besar, antara lain: (1) Sains dan Teknologi; (2) Diskurus Ilmu Sosial dan Budaya Indonesia; (3) Wawasan Pendidikan Indonesia; dan (4) Mereka Pembelajaran Inovatif.

Buku Kumpulan Pidato Guru Besar tersebut dikemas dalam bentuk hard copy dan soft copy. Harapannya, masyarakat akan lebih mudah mengakses bahkan mengunduhnya secara langsung melalui laman um.ac.id. Dengan fasilitasi tersebut, masyarakat akan dengan mudah membaca, mengutipnya dan mengembangkannya ke dalam karya-karya yang lebih adaptif, tentu tetap berpegang teguh pada etika penulisan yang baik dan benar sesuai dengan peraturan perundangan yang berlaku.

Akhirnya, saya menyampaikan terima kasih kepada para Guru Besar UM yang telah memberikan hak akses kepada UM untuk dituangkan ke dalam Buku Kumpulan Pidato Guru Besar ini. Terima kasih pula kepada semua pihak yang telah membantu mewujudkan buku ini. Insya Allah, upaya ini menjadi bagian dari intervensi kita dalam membesarkan kualitas UM dan masyarakat pada umumnya. Semoga Allah Tuhan Yang Maha Esa, senantiasa memudahkan kita untuk terus bermanfaat bagi sesama.

Terima kasih.

Malang, Desember 2021
Rektor

AH. Rofi'uddin
Profesor Bidang Pengajaran Bahasa Indonesia
Jurusan Sastra Indonesia
Fakultas Sastra

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmaanirrahiim.
Assalamualaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah rabbil 'alamin, puja dan puji kami panjatkan kehadiran Allah SWT yang selalu melimpahkan nikmat dan karunia-NYA hingga hari ini dan nanti. Serta, rasa syukur dan terima kasih pula atas semua jerih payah Universitas Negeri Malang dalam meningkatkan kualitas sivitas akademika di semua unit kerja, termasuk penguatan, percepatan dan pemberdayaan Guru Besar atau Profesor.

Tidak bisa dipungkiri, keberadaan Profesor bukan hanya penting dan berharga bagi Universitas Negeri Malang, tetapi juga penting peranannya bagi bangsa dan negara untuk mencerdaskan masyarakat, serta mendesiminasikan pikiran, ide, temuan, dan inovasi untuk mendukung perkembangan IPTEKS. Oleh karena itu, Profesor bukan hanya jenjang kepangkatan tertinggi dalam dunia akademik, namun lebih membumi dan mengakar untuk bisa memberi peranan lebih dan berkarya lebih bagi kemaslahatan umat manusia dan alam semesta.

Sebagai bagian barometer kemajuan profesionalitas dalam pencapaian akademik dan expertise di Universitas Negeri Malang, Pengukuhan Guru Besar merupakan special ceremony yang sekaligus mempromosikan kepakaran Profesor dalam bidangnya. Sehingga prosesi ini menjadi salah satu agenda utama yang mampu memberi warna tersendiri bagi atmosfer akademik melalui pidato yang relevan kepakarannya. Oleh karena itu, dengan semakin banyaknya Profesor di Universitas Negeri Malang, maka semakin beragam naskah pidato tersebut dengan variasi yang luas atas state of the art. Dimana dari naskah tersebut, dapat pula terkandung pemikiran, gagasan, dan inovasi yang masih dapat dikembangkan dikemudian hari dalam merespon kekinian global scientific issues.

Oleh karena itu, langkah tepat untuk menyatukan dalam satu frame bersama berbagai naskah pengukuhan Guru Besar di lingkungan Universitas Negeri Malang, menjadi tonggak baru Literasi Profesor untuk publik dalam bentuk digital atau printed. Hal ini sekaligus memberi peluang luas bagi semua kalangan untuk studi dan mengeksplorasi temuan-temuan baru didalamnya. Oleh karena itu, produktifitas positif Profesor menjadi salah satu trigger untuk menumbuhkembangkan keunggulan Universitas Negeri Malang dalam berbagai kinerja yang terukur.

Selanjutnya, mengutip sebagaimana diriwayatkan dari Abu Hurairah: “Ketika seseorang telah meninggal dunia, maka terputuslah amalannya kecuali 3 (perkara): shadaqah jariyah, ilmu yang bermanfaat, dan anak saleh yang berdoa baginya.” Maka, kumpulan naskah pidato pengukuhan Guru Besar ini diharapkan menjadi referensi untuk pendidikan, penelitian, dan pengabdian dalam konteks yang relevan, dan berharap pula menjadi amalan ilmu pengetahuan.

Semoga semua Guru Besar atau Profesor di Universitas Negeri Malang, terus mampu berkarya dengan produktif, dan semakin berdaya saing nasional atau internasional dengan terus menanamkan, memupuk, dan menjaga kematangan jiwa dan integritas, baik sebagai pendidik, peneliti, ataupun insan personal di masyarakat.

Terima kasih.
Wassalamualaikum Wr. Wb.

Malang, Desember 2021

Arif Nur Afandi
Profesor Bidang Teknik Tenaga Listrik
Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik

DAFTAR ISI

| | Halaman |
|---|------------|
| Sambutan Ketua Senat Akademik..... | iii |
| Sambutan Rektor | V |
| Kata Pengantar | vii |
| Daftar isi | ix |
| Efek Substituen Terhadap Basicity Berdasarkan Data Kristalografi..... | 1 |
| Prof. Drs. Effendy, M.Pd, Ph.D. | |
| Pencemaran Bahan Makanan dan Makanan Hasil Olahan oleh Berbagai Spesies Kapang Kontaminan serta Dampaknya bagi Kesehatan | 13 |
| Prof. Dr. Dra. Utami Sri Hastuti, M.Pd | |
| Memahami Perilaku Ekstrem Gelombang Permukaan Air | 23 |
| Prof. Dr. Toto Nusantara, M.Si. | |
| Integrasi Pendekatan Morfologi dan Molekuler DNA (Deoxyribonucleic Acid) dalam Taksonomi | 33 |
| Prof. Dr. Siti Zubaidah, S.Pd., M.Pd. | |
| Model Fotosensitivitas Serat Optik Germanium Silikat Kaitannya dengan Stabilitas Termal Bragg Grating | 65 |
| Prof. Dr. Arif Hidayat. M.Si. | |
| Menggali Potensi Sumber Daya Hayati Lokal Melalui Kajian Biokimia | 87 |
| Prof. Dr. Subandi, M.Si. | |
| Kiprah Nanomaterial Dalam Kehidupan Manusia dan Dampaknya | 101 |
| Prof. Dr. Fauziatul Fajaroh, M.S. | |
| Menyelami Kesederhanaan Struktur, Memanfaatkan Derajat Kompleksitas Material | 111 |
| Prof. Dr. Markus Diantoro, M.Si. | |
| Potensi Kekayaan Hayati Indonesia sebagai Alternatif Terapi Diabetes Mellitus dalam Sudut Pandang Biologi Reproduksi | 127 |
| Prof. Dr. Abdul Gofur, M.Si. | |
| Pengelolaan Sampah Terpadu melalui Pendidikan Masyarakat Berbasis Pembudayaan 6M | 147 |
| Prof. Dr. Hj. Mimien Henie Irawati Al Muhdhar, M.S. | |
| Mengembangkan Literasi Sains Anak Indonesia Melalui Pembelajaran Berorientasi Nature of Science (NOS)..... | 177 |
| Prof. Dra. Sri Rahayu, M.Ed., Ph.D. | |
| Memfasilitasi Siswa Memahami Fisika Secara Bermakna Koheren: Tantangan dan Alternatifnya | 201 |
| Prof. Dr. Sutopo, M.Si. | |
| Pembelajaran Deteksi Kualitas Air Sederhana dengan Indikator Biologi Bentos Makroinvertebrata..... | 217 |
| Prof. Dr. Susriyati Mahanal, M.Pd | |
| Ilmu Perilaku Sebagai Strategi Mencegah Kecelakaan Kerja | 231 |
| Prof. Dr. Ir. Djoko Kustono H.M., M.Pd. | |

| | |
|---|------------|
| Keselamatan dan Kesehatan Kerja di Bidang Otomotif: Teknologi, Keamanan dan Polusinya | 239 |
| Prof. Dr. Marji, M.Kes | |
| Fatigue Failure Merupakan Penyebab Utama Kegagalan Material pada Konstruksi | 255 |
| Prof. Dr. Andoko, S.T., M.T. | |
| Intelligent Computation dalam Sistem Tenaga Listrik Menyongsong Era Super Grid Indonesia..... | 293 |
| Prof. Arif Nur Afandi, S.T., M.T., Ph.D. | |
| Rekayasa Interface, Kunci Keberhasilan Manufaktur Material Komposit Polimer-Serat Alam | 319 |
| Prof. Dr. Heru Suryanto S.T., M.T. | |
| Strategi Desain Manufaktur, dan Aplikasi Teknologi Tepat Guna (Appropriate Technology) dalam Peningkatan Daya Saing Nasional | 337 |
| Prof. Dr. Muhammad Alfian Mizar, M.P. | |
| Pengendalian Keseimbangan Air Tanah di Kota dengan Pendekatan Geografi..... | 355 |
| Prof. Dr. Sugeng Utaya, M.Si. | |
| Bahan Bakar Terbarukan dari Mikroalga: Peluang dan Tantangan untuk Pasokan Energi Masa Depan | 367 |
| Prof. Dr. Sukarni, S.T., M.T. | |

Efek Substituen Terhadap *Basicity* Berdasarkan Data Kristalografi

Prof. Drs. Effendy, M.Pd, Ph.D.

Bismillahirrahmannirrahim

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Yth. Ketua Senat Universitas Negeri Malang

Yth. Ketua dan Anggota Komisi Guru Besar Universitas Negeri Malang

Yth. Para Anggota Senat Universitas Negeri Malang

Yth. Rektor Universitas Negeri Malang

Yth. Pimpinan Universitas, Fakultas, Pascasarjana, Lembaga, dan Jurusan di lingkungan Universitas Negeri Malang

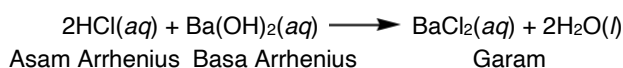
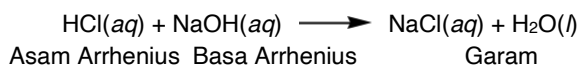
Yth. Para Sejawat Dosen, Karyawan, Mahasiswa

Yth. Para Undangan serta dan Hadirin yang mulia

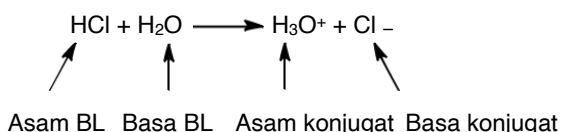
Puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat, taufiq, hidayah, dan karunia kepada kita semua sehingga pada kesempatan ini kita dapat menghadiri Sidang Terbuka Senat Universitas Negeri Malang dalam rangka Pengukuhan saya sebagai Guru Besar di Bidang Kimia Anorganik Fisik. Sholawat dan salam semoga selalu terlimpah pada Rosulullah Muhammad SAW dan para nabi dan rosul sebelumnya. Dalam kesempatan ini saya memohon perkenan pada Bapak, Ibu, dan saudara semuanya untuk memaparkan sebagian dari hasil penelitian saya yang telah dipublikasi dalam beberapa jurnal internasional terindeks, khususnya hasil penelitian yang diterbitkan di "*The Journal of Chemical Society, Dalton Transactions (UK)*" dan "*Inorganica Chimica Acta (Itali)*". Judul pidato pengukuhan ini adalah "***Efek Substituen Terhadap Basicity berdasarkan Data Kristalografi***".

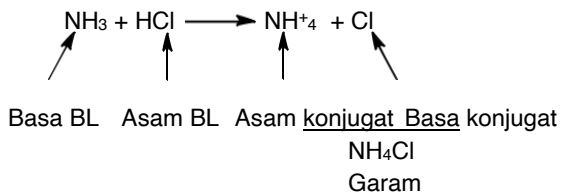
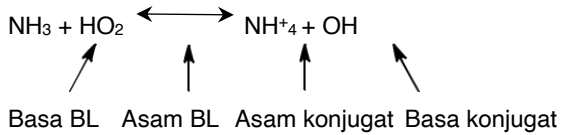
Konsepsi Tentang Hasil Reaksi Antara Asam dan Basa

Pada beberapa kesempatan ketika saya diminta untuk menjadi pembicara dalam seminar dan *workshop* yang dihadiri oleh mahasiswa, guru, dan dosen, seringkali saya mengajukan pertanyaan berikut: "*Apa yang diperoleh bila asam direaksikan dengan basa?*" Pada umumnya jawaban yang diberikan oleh peserta seminar dan *workshop* adalah garam. Mengapa timbul jawaban seperti itu? Penyebabnya tidak lain karena pembelajaran materi Asam-Basa yang dilakukan di sekolah dan perguruan tinggi cenderung tidak mendasar. Apabila yang direaksi-kan adalah asam dan basa Arrhenius seperti ditunjukkan dengan dua contoh reaksi berikut:



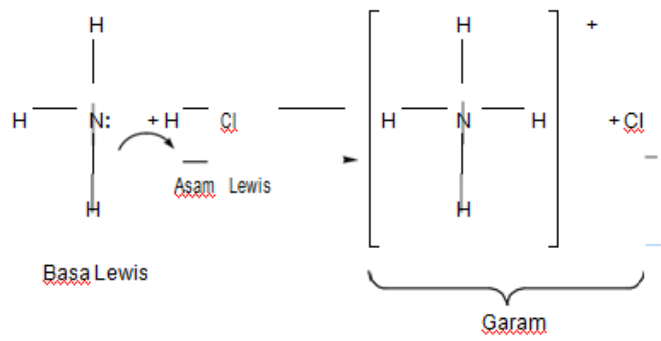
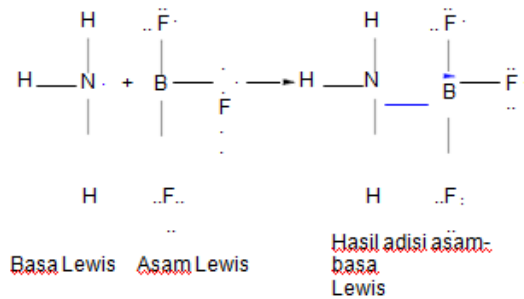
memang akan dihasilkan garam. Namun, apa yang terjadi apabila yang direaksikan adalah asam dan basa Brønsted-Lowry (BL) atau asam dan basa Lewis? Tiga contoh reaksi berikut dapat menjawab pertanyaan pertama.





Dari 3 reaksi di atas dapat kita simpulkan bahwa hasil reaksi antara asam dan basa Brönsted-Lowry selalu merupakan asam konjugat dan basa konjugat. Hanya reaksi antara asam dan basa Brönsted-Lowry tertentu yang menghasilkan garam.

Dua contoh reaksi berikut dapat menjawab pertanyaan kedua.

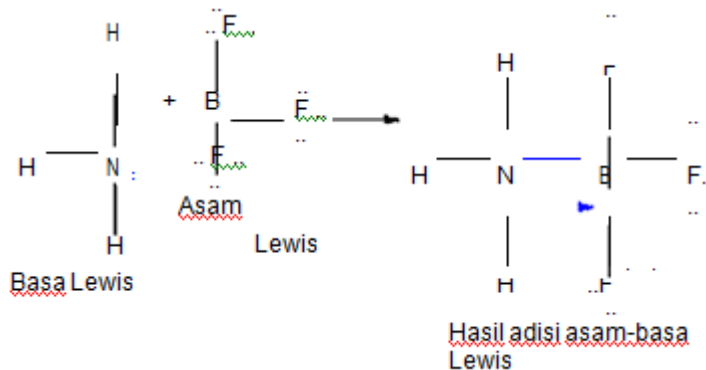


Dari 2 reaksi diatas dapat kita simpulkan bahwa hasil reaksi antara asam Lewis dan basa Lewis selalu merupakan hasil adisi asam-basa Lewis (*Lewis acid-base adduct*). Hanya reaksi antara asam dan basa Lewis tertentu yang menghasilkan garam.

Dari uraian di atas maka dapat kita simpulkan bahwa hasil reaksi antara asam dan basa tidak selalu garam. Tergantung pada asam dan basa apa yang direaksikan. Hanya reaksi antara asam dan basa Arrhenius yang selalu menghasilkan gram.

Pada interaksi antara asam dan basa Lewis, basa Lewis mendonorkan pasangan elektron bebasnya pada asam Lewis.

Kemampuan basa Lewis dalam mendonorkan pasangan elektron bebas (PEB) tergantung pada *basicity* atau kebasaannya. Makin besar kebasaan suatu basa Lewis maka semakin mudah ia mendonorkan PEB dan semakin mudah ikatan kovalen koordinasi terbentuk antara asam dan basa Lewis.



Basicity dan Acidity

Basicity atau kebasaaan merupakan suatu konsep yang erat hubungannya dengan Teori Asam-Basa Lewis. Berdasarkan Teori Asam-Basa Lewis, asam didefinisi sebagai spesies kimia yang dapat menerima pasangan elektron bebas, sedangkan basa adalah spesies kimia yang dapat mendonorkan pasangan elektron bebas. Sebagaimana diberikan di atas, salah satu contoh interaksi antara asam dan basa Lewis adalah reaksi berikut.

Pada BF_3 atom B merupakan atom pusat sedangkan atom F merupakan substituen; pada NH_3 atom N merupakan atom pusat sedangkan atom H merupakan substituen. Persamaan reaksi di atas merupakan contoh klasik dari pembentukan ikatan kovalen koordinasi dan digunakan pada pembelajaran asam-basa Lewis di seluruh dunia. Ironinya banyak guru, dosen, dan mahasiswa yang tidak mengetahui nama dari senyawa hasil reaksi, F_3BNH_3 .

Basicity merupakan karakter negatif dari suatu spesies kimia yang dapat dikurangi akibat reaksinya dengan suatu asam (Huheey *et al.*, 1994). NH_3 , sebagai basa Lewis, memiliki *basicity* atau kebasaaan tertentu.

Karakter negatif pada NH_3 disebabkan oleh adanya pasangan elektron bebas (*lone pair*) yang terdapat pada *basic center* atau pusat basanya, yaitu atom N yang dapat mendonorkan pasangan elektron bebas. BF_3 , sebagai asam Lewis memiliki *acidity* atau keasamaan tertentu. *Acidity* atau keasamaan merupakan karakter positif dari suatu spesies kimia yang dapat dikurangi akibat reaksinya dengan suatu basa (Huheey *et al.*, 1994). Karakter positif dari BF_3 disebabkan oleh adanya atom boron (B) yang merupakan pusat asam (*acid center*) yang dapat menerima pasangan elektron bebas.

Pengukuran Kekuatan Interaksi Asam-Basa Lewis

Pada waktu terjadi interaksi antara asam dan basa Lewis selalu terbentuk ikatan kovalen koordinasi. Terjadinya ikatan tersebut menyebabkan interaksi asam dan basa Lewis berlangsung secara eksotermik atau disertai dengan pelepasan energi sehingga perubahan entalpi reaksi, H_r , selalu berharga negatif. Oleh karena itu harga ΔH_r seringkali digunakan sebagai parameter kekuatan interaksi antara asam dan basa Lewis. Dalam hal ini semakin besar energi yang dilepaskan atau semakin negatif harga ΔH_r maka interaksi antara asam dan basa Lewis semakin kuat.

Pengukuran kekuatan interaksi antara asam dan basa Lewis dapat juga didasarkan atas data Spektroskopi Infra Merah. Terbentuknya ikatan kovalen koordinasi antara pusat asam dan pusat basa memungkinkan untuk diukurinya frekuensi vibrasi ulur (*stretching vibration*) dari ikatan tersebut. Frekuensi vibrasi ikatan tersebut semakin besar dengan semakin kuatnya interaksi antara asam dan basa Lewis.

Pengukuran kekuatan interaksi antara asam dan basa Lewis dapat juga didasarkan atas data kristalografi, yaitu panjang ikatan kovalen antara pusat asam dan pusat basa. Interaksi antara asam dan basa Lewis semakin kuat dengan semakin pendeknya ikatan antara pusat asam dan pusat basa.

Efek substituen terhadap kebasaaan suatu basa Lewis dapat ditentukan berdasarkan harga ΔH_r , frekuensi vibrasi ikatan antara pusat asam dan pusat basa atau panjang ikatan antara pusat

asam dan pusat basa. Dari studi literatur yang telah dilakukan, penelitian tentang efek substituen terhadap kebasaaan suatu basa Lewis berdasarkan data kristalografi dapat dianggap belum pernah dilakukan. Makalah ini akan membahas hal tersebut.

Data Kristalografi

Data kristalografi merupakan data yang diperoleh dari percobaan menggunakan metode difraksi sinar-X, difraksi elektron, atau difraksi neutron. Selama ini data yang paling banyak adalah data dari difraksi sinar-X. Data difraksi sinar-X dapat diperoleh dari sampel yang merupakan kristal tunggal (*single crystal*) dan sampel bubuk (*powder*). Data difraksi yang diperoleh dari sampel kristal tunggal adalah lebih lengkap dan lebih akurat dibandingkan data yang diperoleh dari sampel bubuk. Data yang diperoleh dari difraksi sinar-X kristal tunggal diperlukan dalam mempelajari efek substituen terhadap kebasaaan.

Data yang diperoleh dari difraksi sinar-X kristal tunggal meliputi banyak hal, mulai dari data *refinement* kristal, koordinat atom-atom, vibrasi termal atom-atom, panjang ikatan, sudut ikatan, sudut torsi, gambar ORTEP, dan lain-lain. Contoh data *refinement* kristal diberikan di bawah ini:

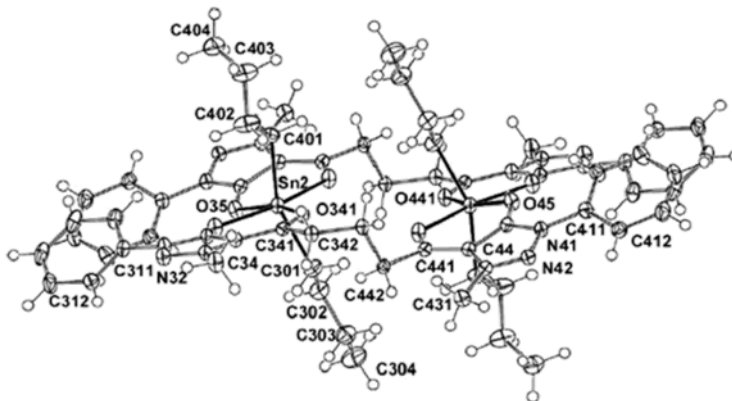
Refinement data for [(Q3Q)SnBu₂]₂: C₆₆H₈₀N₈O₈Sn₂.

$M = 1350.8$. Triclinic, space group $P-1$, $a = 10.9201(4)$, $b = 13.0884(5)$, $c = 22.4207(9)$ Å, $\alpha = 91.948(1)^\circ$, $\beta = 96.998(1)^\circ$, $\gamma = 102.841(1)^\circ$, $V = 3094.9(2)$ Å³. D_{calc} ($Z = 2$) = 1.449 g cm⁻³, $\mu_{No.} = 0.87$ mm⁻¹; specimen: 0.24 x 0.16 x 0.14 mm; $T_{min/max} = 0.87$. $N_t = 63606$, $N = 31704$ ($R_{int} = 0.051$), $No. = 21681$, $R1 = 0.031$, $wR2 = 0.072$ ($a = 0.034$); $S = 0.9s$.

(Effendy *et. Al*, 2011)

Di sekolah-sekolah kita disajikan matapelajaran-mata pelajaran seperti: Pendidikan Agama, Pendidikan Pancasila (PPKn), Budi Pekerti, Akhlaq, Pendidikan Adab, dan sejenisnya. Namun, dalam praktiknya cenderung terpeleset pada mementingkan aspek kognisi (*overcognitive*), terlalu berat pada upaya mempertajam daya pikir daripada mempertajam matahati dan agak mengabaikan afeksi dan konasi. Praktik pendidikan kita kurang sesuai dengan prinsip-prinsip dalam pendidikan karakter.

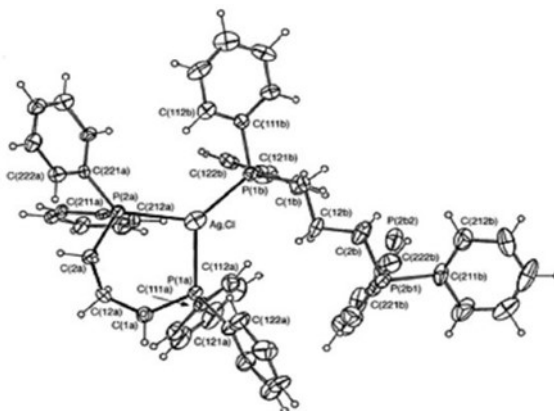
Gambar ORTEP dari senyawa di atas adalah seperti di bawah ini:



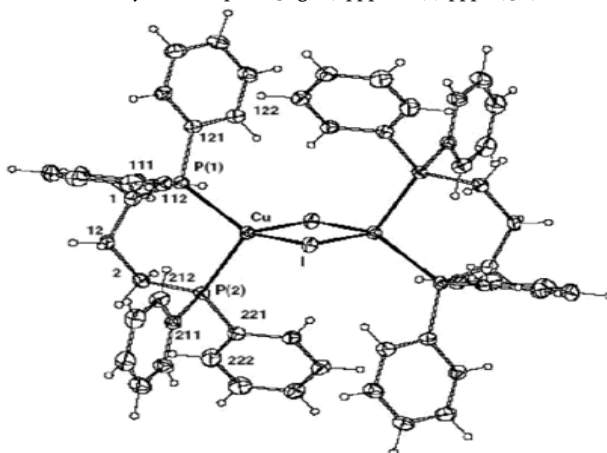
Gambar 1. Gambar ORTEP senyawa C₆₆H₈₀N₈O₈Sn₂. (Effendy *et al.*, 2011: 388)

Data kristalografi, khususnya gambar ORTEP, dapat digunakan sebagai sumber informasi dapatnya suatu senyawa memiliki aktifitas tertentu. Sebagai contoh dua senyawa pada Gambar 2 dan 3 menunjukkan sifat antitumor terhadap *i.p* P338 leukemia pada tikus, sifat antijamur, dan antibakteri. Cirinya, senyawa tersebut memiliki atom pusat unsur tembaga atau perak, dan mengandung ligan bidentat dengan atom donor fosfor yang membentuk septit. Sifat-sifat sebagaimana

diberikan di atas cenderung meningkat apabila atom pusat pada senyawa kompleks adalah atom emas dan platina.



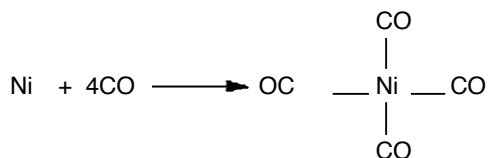
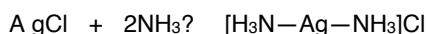
Gambar 2. Gambar ORTEP senyawa kompleks $[AgCl(dppp-P,P')(dppp-P)]$. (Affandi *et al.*, 1997: 1411)



Gambar 3. Senyawa kompleks dimer $[(dppp)Cu(m-I)_2Cu(dppp)]$. (Effendy *et al.*, 2005: 763)

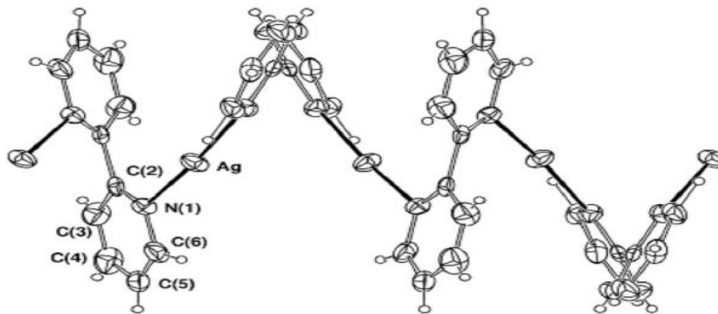
Setiap Spesies Kimia Memiliki Kebasaan yang Berbeda

Setiap spesies kimia memiliki kebasaaan yang berbeda. Sebagai contoh adalah kebasaaan ion perklorat dan ion nitrat. Kebasaaan ion perklorat (ClO_4^-) dan ion nitrat (NO_3^-) dapat diidentifikasi dalam senyawa kompleks atau senyawa koordinasi yang mengandung ion-ion tersebut. Senyawa kompleks adalah senyawa yang pembentukannya melibatkan pembentukan ikatan kovalen koordinasi antara atom pusat, yang berupa atom logam atau ion logam, dengan atom nonlogam yang terdapat pada ligan. Atom nonlogam pada ligan tersebut disebut dengan atom donor karena ia mendonorkan PEB ke atom pusat. Contoh pembentukan senyawa kompleks di berikan dengan dua reaksi berikut.



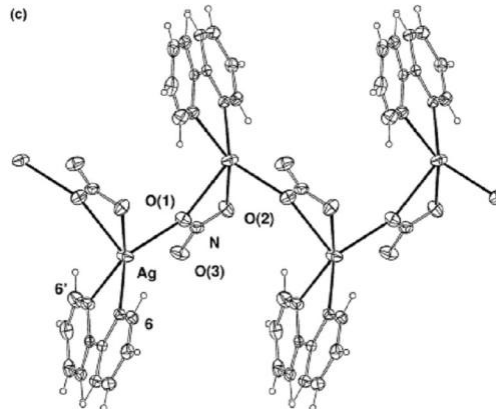
Dalam dua reaksi di atas ion Ag^+ dan atom Ni merupakan atom-atom pusat, sedangkan NH_3 dan CO merupakan ligan. Atom N pada NH_3 dan atom C pada CO merupakan atom-atom donor.

Dalam senyawa koordinasi, ion perklorat (ClO_4) dan ion nitrat (NO_3) dapat berlaku sebagai anion pengimbang (*counter anion*) apabila tidak terikat pada atom pusat. Ion nitrat dan ion perklorat berlaku sebagai ligan apabila terikat pada atom pusat melalui atom oksigennya. Kebasaan dari dua anion tersebut dapat ditentukan berdasarkan dua kriteria. *Pertama*, bila salah satu anion terikat pada atom pusat sedangkan anion yang lain tidak terikat pada atom pusat maka anion yang tidak terikat pada atom pusat kebasaannya lebih rendah dibandingkan anion yang tidak terikat pada atom pusat. *Kedua*, bila dua anion tersebut terikat pada atom pusat maka anion yang ikatannya lebih pendek merupakan anion yang memiliki kebasaan lebih tinggi dan sebaliknya. Untuk mempelajari fenomena di atas diperlukan senyawa koordinasi yang memiliki atom pusat dan ligan yang sama. Fenomenon pertama dapat diidentifikasi dari dua senyawa koordinasi $[\text{Ag}(\text{bpy})]_n\text{ClO}_4$ dan $[\text{Ag}(\text{bpy})(\text{NO}_3)]_n$ ($\text{bpy} = 2,2'$ -bipiridina) yang merupakan senyawa polimer. $[\text{Ag}(\text{bpy})]_n\text{ClO}_4$ merupakan senyawa polimer ionik dengan kation kompleks $[\text{Ag}(\text{bpy})]_n^{n+}$ yang strukturnya diberikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Kation $[\text{Ag}(\text{bpy})]_n^{n+}$ yang merupakan kompleks linear. (Bowmaker *et al.*, 2005: 4371)

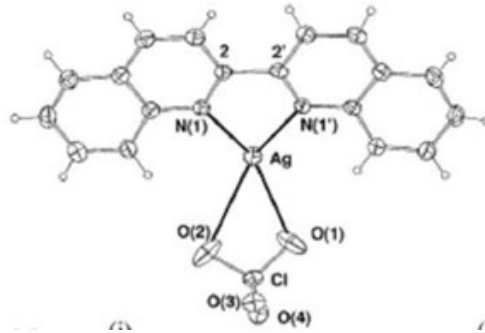
$[\text{Ag}(\text{bpy})(\text{NO}_3)]_n$ merupakan senyawa kompleks polimer molekuler. Struktur $[\text{Ag}(\text{bpy})(\text{NO}_3)]_n$ diberikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Struktur senyawa kompleks $[\text{Ag}(\text{bpy})(\text{NO}_3)]_n$ yang merupakan polimer molekuler linear. (Bowmaker *et al.*, 2005: 4371)

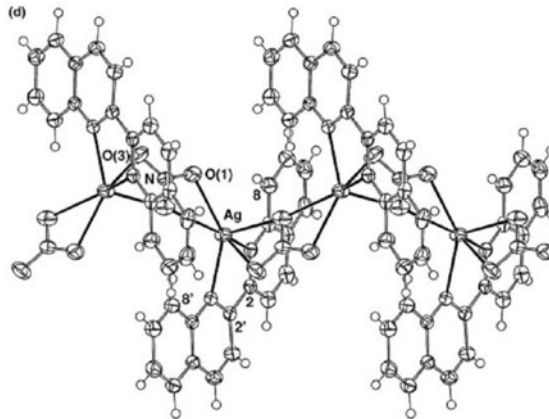
Gambar 4 menunjukkan bahwa ion perklorat tidak terikat pada atom pusat sedangkan Gambar 5 menunjukkan bahwa ion nitrat terikat pada atom pusat. *Fakta tersebut menunjukkan bahwa ion perklorat kebasaannya lebih rendah dibandingkan ion nitrat.*

Kebasaan ion perklorat dan ion nitrat juga dapat ditunjukkan pada senyawa kompleks molekuler $[\text{Ag}(\text{bq})\text{O}_2\text{ClO}_2]$ dan $[\text{Ag}(\text{bq})\text{NO}_3]$ ($\text{bq} = 2,2'$ -biquinolina). $[\text{Ag}(\text{bq})\text{O}_2\text{ClO}_2]$ merupakan senyawa kompleks molekuler dengan dua atom oksigen dari ion perklorat terikat pada atom pusat membentuk suatu septet. Struktur dari $[\text{Ag}(\text{bq})\text{O}_2\text{ClO}_2]$ diberikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Senyawa kompleks molekuler $[Ag(bq)O_2ClO_2]$. (Bowmaker *et al.*, 2005: 4371)

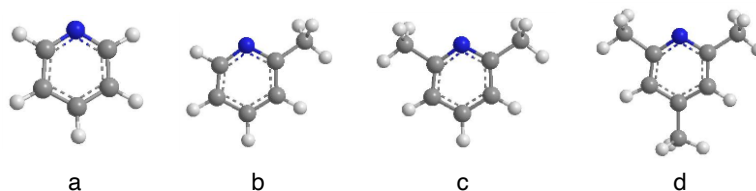
$[Ag(bq)NO_3]_n$ merupakan senyawa kompleks polimer dengan tiga atom oksigen terikat pada atom pusat yang berbeda. Dalam senyawa kompleks tersebut ion nitrat berlaku sebagai ligan jembatan (*bridging ligand*).



Gambar 7. Struktur senyawa kompleks $[Ag(bpy)(NO_3)]_n$ yang merupakan polimer linear. (Bowmaker *et al.*, 2005: 4371)

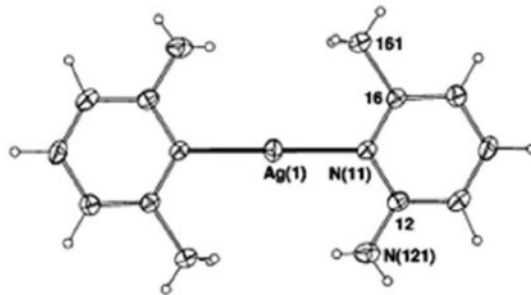
Pada senyawa-senyawa kompleks yang strukturnya ditunjukkan di Gambar 6 dan 7 baik ion perklorat maupun ion nitrat adalah terikat pada atom pusat. Oleh karena itu perbedaan kebasaaan dari dua ion tersebut harus ditentukan berdasarkan panjang ikatan rata-rata antara atom perak dan atom oksigen. Panjang ikatan $Ag \times O$ rata-rata pada $[Ag(bq)O_2ClO_2]$ adalah 271.0(5) pm, sedangkan pada $[Ag(bq)NO_3]_n$ adalah 265.3(2) pm. Berdasarkan data tersebut dapat disimpulkan bahwa *kebasaaan ion perklorat adalah lebih rendah dibandingkan kebasaaan ion nitrat*.

Perbedaan kebasaaan dari ion perklorat dan nitrat juga dapat diidentifikasi pada senyawa-senyawa kompleks dari $AgClO_4$ dan $AgNO_3$ dengan ligan-ligan turunan dari piridina, yaitu 2-metilpiridina atau 2-pikolina (2-pic), 2,6-dimetilpiridina atau 2,6-lutidina (2,6-lut), dan 2,4,6-trimetilpiridina atau 2,4,6-kolidina (2,4,6-col). Struktur dari ligan-ligan tersebut diberikan pada gambar 8



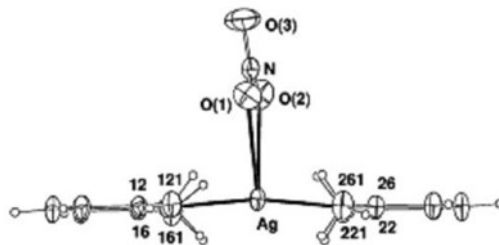
Gambar 8. (a) Piridina; (b) 2-metilpiridina; (c) 2,6-dimetilpiridina, dan (d) 2,4,6-trimetilpiridina.

Perak perklorat dan 2,6-lutidina membentuk senyawa kompleks $[\text{Ag}(\text{2,6-lut})_2]\text{ClO}_4$ yang merupakan senyawa ionik. Kation dari senyawa tersebut adalah $[\text{Ag}(\text{2,6-lut})_2]^+$ yang strukturnya diberikan pada Gambar 9.



Gambar 9. $[\text{Ag}(\text{2,6-lut})_2]^+$ dengan struktur linear. (Bowmaker *et al.*, 2005: 4342)

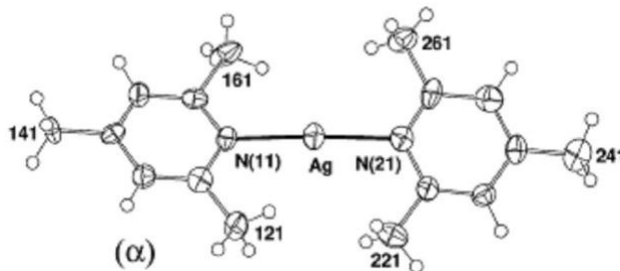
Perak nitrat dan 2,6-lutidina membentuk senyawa kompleks $[\text{AgO}_2\text{NO}(\text{2,6-lut})_2]$ yang merupakan senyawa sept molekuler. Struktur dari senyawa tersebut diberikan pada Gambar 10.



Gambar 10. $[\text{AgO}_2\text{NO}(\text{2,6-lut})_2]$ dengan struktur tetrahedral terdistorsi. (Bowmaker *et al.*, 2005: 4342)

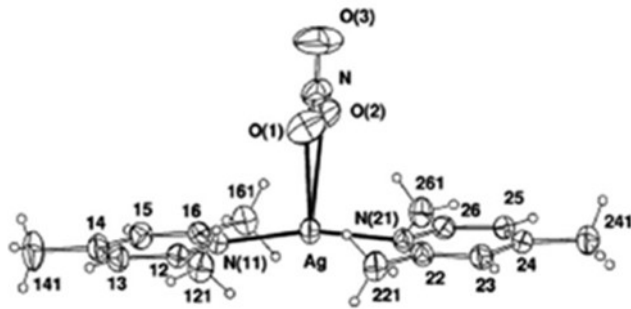
Gambar 9 menunjukkan bahwa ion perklorat tidak terikat pada atom Ag sedangkan Gambar 10 menunjukkan bahwa ion nitrat terikat pada atom Ag. *Fakta tersebut menunjukkan bahwa ion perklorat kebasaannya lebih rendah dibandingkan ion nitrat.*

Perak perklorat dan 2,4,6-kolidina membentuk senyawa kompleks $[\text{Ag}(\text{2,4,6-col})_2]\text{ClO}_4$ yang merupakan senyawa ionik. Kation dari senyawa tersebut adalah $[\text{Ag}(\text{2,4,6-col})_2]^+$ yang strukturnya diberikan pada Gambar 11.



Gambar 11. $[\text{Ag}(\text{2,4,6-col})_2]^+$ dengan struktur linear. (Bowmaker *et al.*, 2005: 4342)

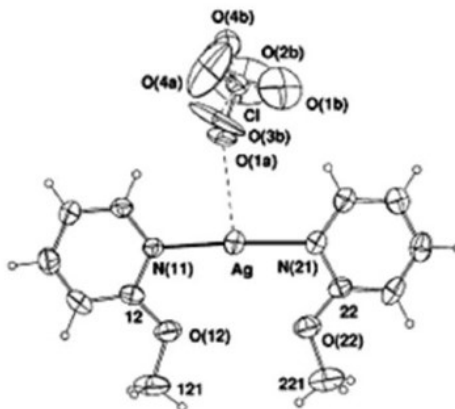
Perak nitrat dan 2,4,6-kolidina membentuk senyawa kompleks $[\text{AgO}_2\text{NO}(\text{2,4,6-col})_2]$ yang merupakan senyawa sept molekuler. Struktur dari senyawa kompleks tersebut diberikan pada Gambar 12.



Gambar 12. $[AgO_2NO(2,6-lut)_2]$ dengan struktur tetrahedral terdistorsi. (Bowmaker *et al.*, 2005: 4342)

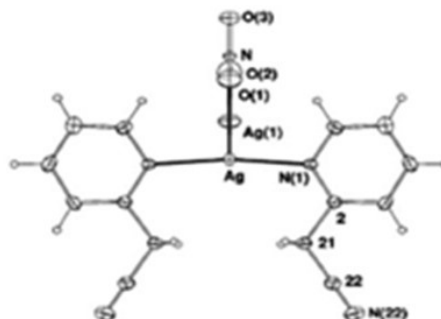
Gambar 11 menunjukkan bahwa ion perklorat tidak terikat pada atom Ag sedangkan Gambar 12 menunjukkan bahwa ion nitrat terikat pada atom Ag. Fakta tersebut menunjukkan bahwa ion perklorat kebasaannya lebih rendah dibandingkan ion nitrat.

Perak perklorat dan 2-metoksipiridina (2-meop) membentuk senyawa kompleks $[Ag(2-meop)_2]ClO_4$ dengan ion perklorat terikat secara lemah pada atom perak seperti ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13. $[Ag(2-meop)_2]ClO_4$ dengan ion perklorat terikat secara lemah pada atom perak yang ditunjukkan dengan garis putus-putus. (Bowmaker *et al.*, 2005: 4342)

Perak nitrat dan 2-aminoetilpiridina (2-aep) membentuk senyawa kompleks $[AgO_2NO(2-aep)_2]$ yang merupakan senyawa septet molekuler. Struktur dari senyawa tersebut diberikan pada Gambar 14.



Gambar 14. $[AgO_2NO(2-aep)_2]$ dengan struktur tetrahedral terdistorsi. (Bowmaker *et al.*, 2005: 4342)

Fakta-fakta yang diberikan di atas menunjukkan bahwa kebasaan ion nitrat adalah lebih besar dibandingkan kebasaan ion perklorat.

Pengaruh substituen terhadap kebasaaan

Pengaruh substituen pada kebasaaan suatu basa Lewis dapat dibagi dalam dua kategori. *Pertama*, pengaruh substituen yang terikat langsung pada pusat basa. *Kedua*, pengaruh substituen yang tidak terikat langsung pada pusat.

Pengaruh substituen yang terikat langsung pada pusat basa

Untuk mempelajari pengaruh substituen yang terikat langsung pada pusat basa diperlukan senyawa pembanding. Salah satu senyawa yang dapat dijadikan sebagai senyawa pembanding adalah NH_3 . Kebasaaan dari NH_3 dapat berubah apabila atom H yang merupakan substituen diganti dengan atom atau gugus yang lain. Kebasaaan suatu basa Lewis dapat berkurang apabila ada substituen yang dapat menarik rapatan elektron pada pusat basa. Substituen tersebut biasanya merupakan atom yang keelektronegatifannya tinggi yang terikat pada pusat basa. Penggantian tiga atom H pada NH_3 oleh tiga atom F menghasilkan NF_3 yang kebasaaannya lebih rendah dibandingkan NH_3 . Sebaliknya, penggantian satu atom H oleh gugus metil (CH_3) menghasilkan NH_2CH_3 yang kebasaaannya lebih tinggi dibandingkan NH_3 . Atom F yang memiliki keelektronegatifan tinggi akan mengurangi rapatan elektron pada pusat basa sehingga kebasaaan berkurang. Sebaliknya, gugus CH_3 yang memiliki keelektronegatifan lebih rendah, dibandingkan atom H, dan merupakan gugus pendorong elektron akan meningkatkan rapatan elektron pada pusat basa sehingga dapat meningkatkan kebasaaan.

Kelima, landasan sosiologis. Secara sosiologis, manusia Indonesia hidup di tengah-tengah masyarakat dan bangsa-bangsa yang sangat heterogen dan terus berkembang. Mereka berada di tengah-tengah masyarakat yang berasal dari suku, etnis, agama, golongan, status sosial dan ekonomi yang berbeda-beda. Di samping itu, bangsa Indonesia juga hidup berdampingan dan melakukan pergaulan dengan bangsa-bangsa lain. Untuk itu, upaya mengembangkan karakter yang saling menghargai dan toleran pada bermacam-macam tatanan kehidupan dan aneka ragam perbedaan itu menjadi sangat mendasar.

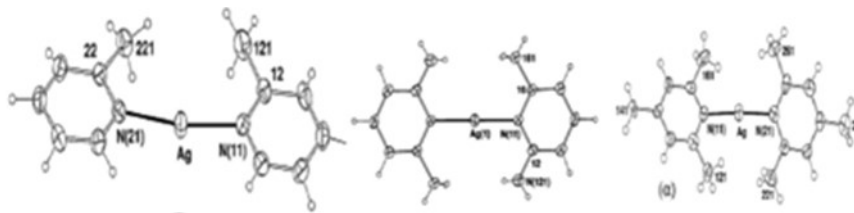
Acidity suatu asam Lewis dapat berkurang apabila ada substituen yang dapat mendorong rapatan elektron pada pusat asam. Penggantian tiga atom F pada BF_3 oleh tiga gugus metil menghasilkan $\text{B}(\text{CH}_3)_3$ yang keasamannya lebih rendah dibandingkan BF_3 . Gugus metil akan meningkatkan rapatan elektron pada atom B sehingga menurunkan keasaman. Berdasarkan uraian di atas dapat diketahui adanya pengaruh substituen pada kebasaaan dan keasaman dari asam dan basa Lewis.

Pengaruh substituen yang tidak terikat langsung pada pusat basa

Pengaruh substituen yang tidak terikat langsung pada pusat basa terhadap kebasaaan suatu basa Lewis dapat dipelajari dari senyawa-senyawa kompleks yang memenuhi persyaratan-persyaratan sebagai berikut:

1. Senyawa-senyawa kompleks yang digunakan harus berasal dari garam yang sama.
2. Atom pusat pada senyawa-senyawa kompleks yang digunakan harus memiliki bilangan koordinasi yang sama.
3. Senyawa-senyawa kompleks yang digunakan harus memiliki struktur yang sama.

Pengaruh dari substituen ditunjukkan dengan perbedaan panjang ikatan antara atom pusat dan atom donor pada ligan. Tiga senyawa kompleks dari garam perak perklorat yang memenuhi persyaratan-persyaratan tersebut adalah $[\text{Ag}(\text{2-pic})_2]\text{ClO}_4$, $[\text{Ag}(\text{2,6-lut})_2]\text{ClO}_4$, dan $[\text{Ag}(\text{2,4,6-col})_2]\text{ClO}_4$. Tiga senyawa kompleks tersebut merupakan senyawa kompleks ionik. Atom pusatnya memiliki bilangan koordinasi dua dan struktur kation-kation kompleksnya adalah linear seperti ditunjukkan pada Gambar 15.



Gambar 15. Kation kompleks $[Ag(2-pic)_2]^+$, $[Ag(2,6-lut)_2]^+$, dan $[Ag(2,4,6-col)_2]^+$ dengan struktur linear.

Karion-kation kompleks pada Gambar 15 adalah tidak sentro-simetrik sehingga dua ikatan Ag-N pada masing-masing kation kompleks tidak dihubungkan oleh pusat simetri. Meskipun demikian, pada masing-masing kation kompleks, dua ikatan Ag-N yang ada tidak berbeda panjang. Panjang ikatan Ag-N pada tiga kation kompleks tersebut diberikan pada tabel berikut.

Tabel 1. Perbedaan panjang ikatan pada kation $[Ag(2-pic)_2]^+$, $[Ag(2,6-lut)_2]^+$, dan $[Ag(2,4,6-col)_2]^+$

| Senyawa | Panjang ikatan Ag-N (pm) |
|---------------------------|--------------------------|
| $[Ag(2-pic)_2] ClO_4$ | 213.8(6); 214.0(6) |
| $[Ag(2,6-lut)_2] ClO_4$ | 216.6(4); 216.6(4) |
| $[Ag(2,4,6-col)_2] ClO_4$ | 216.2(3); 216.2(3) |

Adanya substituen gugus metil pada posisi 2, 4 atau 6 seharusnya dapat meningkatkan rapatan elektron pada atom nitrogen dalam ligan sehingga kebasaaan ligan meningkat. Namun, data pada tabel di atas menunjukkan bahwa ikatan Ag-N pada $[Ag(2,6-lut)_2]ClO_4$ adalah lebih panjang dibandingkan ikatan Ag-N pada $[Ag(2-pic)_2]ClO_4$. Hal ini menunjukkan bahwa kebasaaan dari 2,6-lutidina lebih rendah dibandingkan kebasaaan 2-pikolina. Fenomenon yang sama terjadi pada $[Ag(2,4,6-col)_2]ClO_4$. Kebasaaan 2,4,6-kolidina juga lebih rendah dibandingkan kebasaaan 2-pikolina. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada waktu terjadi dua ikatan kovalen koordinasi antara atom perak dan dua atom nitrogen, dua ligan yang ada saling bertolakan. Tolakan antara dua ligan 2,6-lutidina dan tolakan antara dua ligan 2,4,6-kolidina adalah lebih kuat dibandingkan tolakan antara dua ligan 2-pikolina. Timbulnya tolakan ini akan mengurangi kestabilan senyawa kompleks yang terbentuk. Kondisi yang lebih stabil dapat dicapai melalui pengurangan tolakan antara ligan-ligan. Hal ini terjadi bila dua ligan yang terikat pada atom Ag saling menjauh sehingga ikatan Ag-N menjadi lebih panjang. Panjang ikatan Ag-N pada $[Ag(2,6-lut)_2]ClO_4$ dan $[Ag(2,4,6-col)_2]ClO_4$ adalah sama karena tolakan antara ligan-ligan dianggap tidak dipengaruhi oleh adanya substituen pada posisi 4.

Kesimpulan

Berdasarkan uraian di atas dapat ditarik dua kesimpulan:

1. *asicity* suatu spesies kimia (molekul atau ion) berkurang bila pusat basa dari spesies tersebut mengikat substituen yang keelektronegatifannya tinggi.
2. Substituen metil pada posisi 2 dan 6 akan mengurangi kebasaaan dari ligan-ligan turunan piridina.

Wassalamu'alaikum Warohmatullahi Wabarokatuh

DAFTAR PUSTAKA

- Affandi, D., Berners-Price, S.J., Effendy, Harvey, P.J., Healy, P.C., Ruch, B.E., & White, A.H. Influence of anion on the solution and solid-state structures of some 1:2 adducts of silver(I) with 1,3-bis(diphenylphosphino)propane, *The Journal of Chemical Society, Dalton Transactions*, 1997, 1411-1420.
- Bowmaker, G.A., Effendy, Marfuah, S., Skelton, B.W., & White, A.H. Syntheses, structures and vibrational spectroscopy of some 1:1 and 1:2 adducts of silver(I) oxyanion salts with 2,2'-bis(pyridine)chelates, *Inorganica Chimica Acta*, 2005, 358, 4371-4388.
- Effendy, Nicola, C.D., Fianchini, M., Pettinari, C., Skelton, B.W., Somers, N., & White, A.H. The structural definition of adducts of stoichiometry MX:dppx (1:1) M = Cu^I, Ag^I; X = simple anion, dppx = Ph₂P(CH₂)_xPPh₂, x = 3-6, *Inorganica Chimica Acta*, 2005, 358, 763-795.
- Effendy, Marchetti, F., Marinelli, A., Pettinari, C., Skelton, B.W., & White, A.H. Binuclear diorganotin(IV) complexes with bis(O,O'-4-acyl-5-pyrazolonato)bis(bidentate) ligands, *Inorganica Chimica Acta*, 2011, 366, 388-393.
- Huheey, J.E., Keiter, E.A., and Keiter, R.L. 1993. *Inorganic Chemistry, Principles of Structure and Reactivity*, 4th Ed. New York: Harper Collins College Publishers.

Pencemaran Bahan Makanan dan Makanan Hasil Olahan oleh Berbagai Spesies Kapang Kontaminan serta Dampaknya bagi Kesehatan

Prof. Dr. Dra. Utami Sri Hastuti M.Pd

Bismillahirrohmanirrohim

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarokatuh,

Selamat pagi, Salam sejahtera,

Yth. Rektor Universitas Negeri Malang, selaku ketua Senat Universitas Negeri Malang
Yth. Para anggota senat, ketua dan para anggota Komisi Guru Besar Universitas Negeri Malang
Yth. Para pejabat struktural Universitas Negeri Malang
Yth. Para dosen, mahasiswa, dan karyawan Universitas Negeri Malang
Yth. Para hadirin yang saya muliakan

Pada kesempatan yang baik ini perkenankanlah saya mengucapkan puji syukur kehadiran Allah SWT, atas rakhmat, hidayah, dan ridho-Nya saya dikaruniai kesempatan untuk mencapai jabatan Guru Besar bidang Mikrobiologi dan pada hari ini saya menyampaikan pidato pengukuhan Guru Besar dalam Sidang Terbuka Senat Universitas Negeri Malang. Pada hari ini, saya sangat bahagia dan terharu, karena dapat menyampaikan pidato pengukuhan jabatan Guru Besar. Pidato ini merupakan sebagian dari tanggung jawab jabatan akademik tertinggi dari rangkaian perjalanan karier saya sebagai dosen di Universitas Negeri Malang yang tercinta ini.

Ketua Senat dan hadirin yang saya muliakan,

- **Pendahuluan**

Berbagai macam bahan makanan dan makanan hasil olahan merupakan sumber gizi bagi manusia, namun bahan makanan juga merupakan sumber nutrisi bagi mikroorganisme. Oleh karena itu mikroorganisme dapat tumbuh dan berkembang biak pada berbagai macam bahan makanan, a.l. : jagung, kacang tanah, beras, kedelai, rempah-rempah, sayuran, buah-buahan. Mikroorganisme juga dapat tumbuh dan berkembang biak pada makanan hasil olahan, misalnya : roti, nasi, dodol, ikan dan hasil olahannya.

Pertumbuhan mikroorganisme kontaminan, baik pada bahan makanan maupun makanan hasil olahan dapat menyebabkan perubahan tekstur, warna, aroma, dan rasa, sehingga menjadi tidak layak dikonsumsi. Selain itu beberapa spesies kapang kontaminan dapat menghasilkan racun yang disebut : mikotoksin, sehingga bahan makanan atau makanan hasil olahan menjadi tidak layak dikonsumsi dan dapat membahayakan kesehatan konsumen berupa keracunan makanan.

- **Kerusakan Bahan Makanan dan Makanan Hasil Olahan Akibat Aktivitas Kapang Kontaminan.**

Berbagai macam biji-bijian, a.l. : kacang tanah, kedelai, jagung, beras, dll dapat mengalami kerusakan. Kerusakan dapat terjadi pada masa pertumbuhan, karena diserang oleh serangga hama atau pada saat pasca panen akibat pemanenan yang kurang cermat, sehingga mengakibatkan kerusakan pada kulit biji. Kerusakan pada biji-bijian juga dapat terjadi pada saat disimpan dalam gudang penyimpanan, karena dimakan oleh serangga hama gudang; sehingga biji-bijian menjadi berlubang-lubang atau kulit biji terkelupas.

Kerusakan pada biji-bijian tersebut secara tidak langsung dapat menjadi jalan masuk bagi spora-spora kapang kontaminan. Di dalam biji, spora-spora kapang berkecambah membentuk hifa-hifa dan anyaman miselium. Selanjutnya kapang-kapang tumbuh dan berkembangbiak serta melakukan metabolisme. Salah satu macam metabolit sekunder yang dihasilkan oleh kapang ialah

mikotoksin. Apabila mikotoksin tertelan bersama-sama makanan yang telah terkontaminasi oleh kapang kontaminan penghasil mikotoksin, maka dapat menyebabkan keracunan, yang disebut mikotoksikosis. Kualitas makanan yang tercemar oleh kapang penghasil mikotoksin akan berkurang sehingga tidak layak dikonsumsi.

Berbagai macam bahan makanan yang dijual di pasar tidak selalu berkualitas baik dan aman untuk dikonsumsi. Sebagai contoh: jagung, beras, kacang tanah, kemiri, lada dll yang telah mengalami kerusakan tetap dijual kepada para konsumen dengan harga yang lebih murah. Apabila bahan makanan tersebut disimpan di tempat yang lembab, maka sangat rentan terkontaminasi oleh kapang kontaminan yang berasal dari lingkungan sekitarnya. Masyarakat konsumen yang kurang memperhatikan kualitas bahan makanan akan memilih bahan makanan yang murah harganya, walaupun telah mengalami kerusakan.

Bahan makanan yang telah terkontaminasi oleh kapang akan mengalami perubahan tekstur, misalnya : berserbuk pada permukaannya, berserabut halus, hancur sebagian (lihat Gbr 1, Gbr 2, Gbr.3, dan Gbr.4). Warna bahan makanan juga dapat mengalami perubahan karena tertutup oleh spora-spora kapang yang berwarna-warni. Aroma bahan makanan ataupun makanan hasil olahan juga dapat mengalami perubahan akibat pertumbuhan kapang kontaminan yang menghasilkan senyawa-senyawa tertentu. Kapang kontaminan melakukan biodegradasi terhadap senyawa-senyawa kompleks dalam bahan makanan menjadi senyawa-senyawa yang lebih sederhana. Melalui proses biodegradasi tersebut dapat dihasilkan senyawa-senyawa yang menimbulkan aroma yang kurang sedap pada bahan makanan sehingga tidak layak dikonsumsi. Bahan makanan yang telah terkontaminasi oleh kapang penghasil mikotoksin dapat membahayakan kesehatan, bila tetap dikonsumsi.



Gambar 1. Foto biji-biji jagung yang telah mengalami kerusakan dan terkontaminasi oleh kapang kontaminan



Gambar 2. Foto beras merah yang mengalami kerusakan dan terkontaminasi oleh kapang kontaminan.



Gambar 3. Foto roti yang telah mengalami kerusakan dan terkontaminasi oleh kapang kontaminan



Gambar 4. Foto wortel yang telah mengalami kerusakan dan terkontaminasi oleh kapang kontaminan

Gambar-gambar 1, 2, 3, dan 4 menunjukkan beberapa macam bahan makanan dan makanan hasil olahan yang mengalami kerusakan dan terkontaminasi oleh kapang kontaminan, sehingga tidak layak untuk dikonsumsi. Nampak bahan makanan telah pecah-pecah, berserbuk, diselubungi oleh miselium kapang, sehingga tidak layak dikonsumsi.

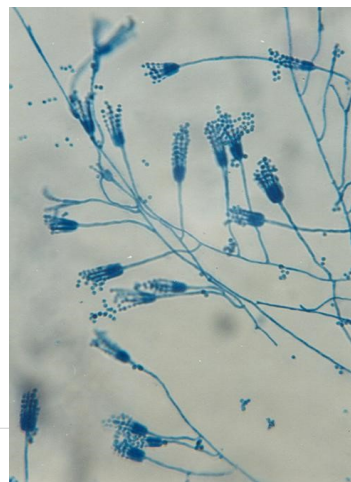
- **Beberapa Spesies Kapang Kontaminan Pada Makanan yang Mempunyai Potensi Sebagai Penghasil Mikotoksin**

Salah satu spesies kapang yang telah banyak dikenal sebagai penghasil aflatoksin ialah *Aspergillus flavus* (lihat Gambar 5). Spesies kapang tersebut sering terdapat pada kacang tanah, kedelai, jagung. Aflatoksin merupakan mikotoksin yang bersifat hepatotoksik dan karsinogenik. Kapang *Penicillium citrinum* (lihat Gambar 6) sering mengkontaminasi a.l. beras, jagung, kacang tanah. Spesies kapang ini dapat menghasilkan citrinin yang bersifat nephrotoksik (Makfould, 1993) dan hepatotoksik (Hastuti, 2001)

Kapang *Aspergillus clavatus* (lihat Gambar 7) dapat mengkontaminasi jagung dan gandum (Wallace, *et al*, 1976, Hesseltine, *et al*, 1981 dalam Pitt and Hocking, 1985). Kapang ini juga dapat mengkontaminasi kacang tanah dan kenari (Jimenez, *et al*, 1991) dan biji lada rusak (Hastuti, 1996). Spesies kapang ini dapat menghasilkan patulin yang bersifat nephrotoksik, neurotoksik, dan hepatotoksik (Betina, 1989).



Gambar 5. Foto mikroskopis kapang *Aspergillus flavus* (perbesaran 400x)



Gambar 6. Foto mikroskopis kapang *Penicillium citrinum* (perbesaran 400x)



Gambar 7. Foto mikroskopis kapang *Aspergillus clavatus* (perbesaran 400x)

Di samping ketiga macam mikotoksin tersebut, ada bermacam-macam mikotoksin lainnya, a.l.: fumonisin, ochratoksin, zearalenon sterigmatosistin yang dihasilkan oleh spesies-spesies kapang kontaminan pada berbagai macam bahan makanan dan makanan hasil olahan. Beberapa hasil penelitian membuktikan bahwa berbagai macam bahan makanan dapat terkontaminasi oleh kapang kontaminan. Munfarida (2003) menyatakan bahwa berdasarkan hasil identifikasi kapang kontaminan pada biji jagung dan beras jagung yang dijual di beberapa pasar di kota Malang menunjukkan bahwa terdapat 26 spesies kapang kontaminan pada biji jagung dan 28 spesies pada beras jagung. Di antaranya terdapat beberapa spesies kapang penghasil mikotoksin, yaitu: *Aspergillus flavus*, *A. parasiticus*, *A. niger*, *A. ustus*, *A. candidus*, *A. tamari*, *Penicillium citrinum*, *P. frequentans*, *P. fellutanum*, *Fusarium sp*, *Cladosporium sp*.

Hasil penelitian tentang mikoflora pada biji-biji kacang tanah yang dijual di beberapa pasar di kota Malang menunjukkan bahwa di antara berbagai spesies kapang yang ditemukan dalam kacang tanah terdapat beberapa spesies kapang penghasil mikotoksin, yaitu : *Aspergillus flavus*, *A. parasiticus*, *A. ochraceus*, *Penicillium fellutanum*, *P. citrinum*, *P. implicatum*, dan *P. expansum*.

Biji-biji lada yang dijual di pasar juga sering mengalami kerusakan, yang ditandai dengan ciri-ciri a.l. : biji berlubang, keriput, atau berserbuk (lihat Gambar 8). Hasil observasi terhadap biji-biji lada yang dijual di sepuluh pasar di kota Malang menunjukkan bahwa dalam tiap 100 gram biji lada terdapat antara 60,87% biji lada yang mengalami kerusakan (Hastuti, 1996). Kerusakan pada biji-biji lada secara tidak langsung dapat mempermudah spora-spora kapang kontaminan untuk masuk ke dalam biji lada. Selanjutnya kapang kotaminan akan tumbuh dan berkembang biak dalam biji lada tersebut.

Hasil identifikasi terhadap spesies-spesies kapang kontaminan dalam biji-biji lada rusak yang dijual di beberapa pasar di kota Malang menunjukkan bahwa terdapat spesies-spesies kapang : *A. flavus*, *A. clavatus*, *A. tamari*, *A. niger*, *A. fumigatus*, *A. oryzae*, *P. citrinum*, *P. fellutanum*, dan *Cephalosporium sp*. Kapang *A. flavus* terdapat dalam jumlah tertinggi, yaitu $3,6 \times 10^5$ cfu/g sampel biji lada rusak (Hastuti, 1996). Spesies kapang tersebut dapat menghasilkan aflatoksin, yang bersifat hepatotoksik dan karsinogenik (Makfoeld, 1993). Kapang *A. clavatus* dapat menghasilkan mikotoksin patulin, sedangkan *P. citrinum* dan *P. fellutanum* dapat menghasilkan mikotoksin citrinin. Patulin bersifat nephrotoksik dan neurotoksik (Betina, 1989). Hasil penelitian terhadap mencit membuktikan bahwa patulin dan citrinin juga bersifat hepatotoksik, dapat menyebabkan kerusakan struktur hepatosit dan gangguan fungsi hepar (Hastuti, 2001).



Gambar 8. Foto biji-biji lada utuh (kiri) dan biji-biji lada rusak (kanan). Biji-biji lada utuh tidak mengalami kerusakan sedangkan biji lada rusak nampak dengan ciri-ciri: berlubang, keriput atau berserbuk.

Biji-biji kemiri digunakan oleh masyarakat untuk bumbu penyedap masakan. Biji-biji kemiri yang dijual di pasar juga dapat mengalami kerusakan yang ditandai dengan ciri-ciri antara lain : biji tidak utuh, lunak , atau hancur sebagian. Biji-biji kemiri yang telah mengalami kerusakan biasanya dijual dengan harga yang lebih murah jika dibandingkan dengan biji-biji kemiri utuh. Hasil penelitian

membuktikan bahwa biji-biji kemiri rusak yang diperoleh dari beberapa pasar di Malang terkontaminasi oleh sebanyak 36 spesies kapang kontaminan. Di antara spesies-spesies kapang kontaminan tersebut, beberapa spesies merupakan penghasil mikotoksin, yaitu : *Aspergillus flavus*, *A. ochraceus*, *A. clavatus*, *A. parasiticus*, *A. rugulosus*, *A. versicolor*, *Penicillium citrinum* (Hastuti dan Lina, 2003).

Berdasarkan uraian ini dapat dijelaskan bahwa berbagai spesies kapang kontaminan dapat mengkontaminasi beberapa macam bahan makanan yang dijual bebas kepada para konsumen. Bahan makanan yang disimpan dalam gudang juga dapat terkontaminasi oleh kapang kontaminan. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, a.l.: serangga hama gudang yang merusakkan biji-bijian yang disimpan dalam gudang sehingga mudah terkontaminasi oleh kapang, kelembaban udara yang tinggi, kebersihan gudang kurang mendapat perhatian.

Hasil penelitian terhadap kapang kontaminan pada beras yang disimpan selama 1-2 bulan dalam gudang beras di Surabaya, Malang, Mojokerto, Kediri, Nganjuk, Madiun, Cirebon, dan Jakarta menunjukkan bahwa terdapat tiga genus kapang kontaminan yang paling dominant pada beras, yaitu : *Aspergillus*, *Penicillium*, dan *Fusarium*. (Siagian, Harsojo, dan Lidia; 1983). Berdasarkan hasil identifikasi ditemukan 12 spesies kapang dan di antaranya merupakan spesies-spesies penghasil mikotoksin, yaitu: *Aspergillus ochraceus*, *A. versicolor*, *A. flavus*, *A. nidulans*, *A. niger*, *Penicillium citrinum*, dan *P. islandicum*.

- **Dampak Konsumsi Bahan Makanan yang Terkontaminasi oleh Mikotoksin Terhadap Kesehatan**

Berbagai macam bahan makanan dan makanan hasil olahan yang kita konsumsi sehari-hari tidak selalu aman bagi kesehatan tubuh. Apabila makanan kita telah mengalami kerusakan, khususnya akibat aktivitas kapang kontaminan penghasil mikotoksin, maka dapat mengakibatkan makanan tidak layak dikonsumsi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aflatoxin telah terdeteksi keberadaannya dalam sampel serum darah orang normal sehat dan penderita penyakit hati di Rumah Sakit Dr. Sarjito – Yogyakarta (Lestariana, dkk, 1988). Hasil penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa berbagai macam bahan makanan dengan sampel yang diperoleh dari berbagai tempat penjualan di Daerah Istimewa Yogyakarta dan sekitarnya, a.l. : jagung, kacang hijau, kacang tolo merah, kecap, gaplek, kemiri, lombok merah, kulit melinjo telah tercemar oleh aflatoxin (Lestariana, dkk, 1988).

Kondisi lingkungan di pasar-pasar tempat penjualam berbagai macam bahan makanan, a.l. : jagung, beras, kacang tanah, kedelai, rempah-rempah dll yang kurang higienis akan memudahkan terjadinya penyebaran spora-spora kapang antar bahan makanan tersebut. Sekanjutnya kapang akan tumbuh dan berkembangbiak dalam berbagai macam bahan makanan yang dijual kepada para konsumen.

Biasanya berbagai bahan makanan yang sudah kurang layak dikonsumsi, misalnya: biji-bijian yang telah berlubang-lubang, berserbuk, mulai hancur, permukaannya telah ditumbuhi oleh kapang, masih tetap dijual dengan harga yang lebih murah dan masih laku. Ada beberapa alasan yang menyebabkan para konsumen tetap membeli bahan makanan yang kurang layak dikonsumsi tersebut, a.l.: harga yang relatif murah akan menguntungkan, sikap hidup yang sangat hemat tetapi kurang memperhatikan kualitas makanan, ketidaktahuan akan resiko mengkonsumsi bahan makanan yang kurang layak dikonsumsi terhadap kesehatan.

Biji-biji yang telah mengalami kerusakan mudah dimasuki oleh spora-spora kapang yang akan tumbuh, berkembangbiak, dan menghasilkan mikotoksin di dalam biji-bijian tersebut. Pada umumnya mikotoksin mempunyai titik lebur tinggi. Titik lebur aflatoxin B₁ ialah antara 269^o – 271^oC, titik lebur citrinin ialah antara 170^o-175^oC, titik lebur patulin ialah antara 105^o – 108^oC. Oleh karena mikotoksin mempunyai titik lebur di atas 100^oC, maka walaupun biji-bijian yang telah terkontaminasi oleh mikotoksin diolah melalui pemanasan, namun mikotoksin yang telah berada dalam biji-bijian tidak dapat terurai. Mikotoksin tersebut akan tetap membahayakan kesehatan, bila terpapar ke dalam tubuh bersama-sama makanan yang dikonsumsi.

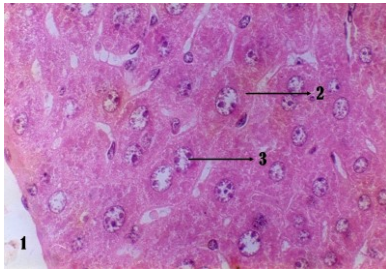
Apabila mikotoksin terpapar ke dalam tubuh bersama-sama makanan yang telah terkontaminasi oleh spesies-spesies kapang penghasil mikotoksin, maka mikotoksin akan masuk ke

dalam sistem pencernaan makanan. Selanjutnya akan masuk melalui vena porta hepatica menuju ke hepar. Di dalam hepar, mikotoksin masuk bersama-sama darah ke dalam sinusoid-sinusoid yang terletak berbatasan dengan hepatosit-hepatosit. Zat-zat yang terkandung dalam darah, termasuk mikotoksin dapat terabsorbsi ke dalam hepatosit-hepatosit di sekitar sinusoid. Selanjutnya mikotoksin yang telah masuk ke dalam hepatosit akan menyebabkan kerusakan struktur hepatosit dan gangguan fungsi hepar.

Jenis mikotoksin yang paling banyak dikenal dan mendapat perhatian khusus dari para pakar dalam bidang kesehatan dan kedokteran ialah : aflatoksin, walaupun masih banyak lagi jenis-jenis mikotoksin lain yang dapat mengkontaminasi berbagai macam bahan makanan, a.l. : citrinin, patulin, ochratoxin, fumonisin, zearalenon. Citrinin merupakan salah satu jenis mikotoksin yang sering mengkontaminasi bahan makanan, a.l. : beras, jagung, kacang tanah, biji-biji lada rusak,; sehingga dapat menimbulkan masalah kesehatan. Di Jepang, kapang *Penicillium citrinum*, penghasil citrinin sering mengkontaminasi beras dan menyebabkan warna beras menjadi kuning. Oleh karena itu citrinin dinamakan racun beras kuning (Makfoeld, 1993).

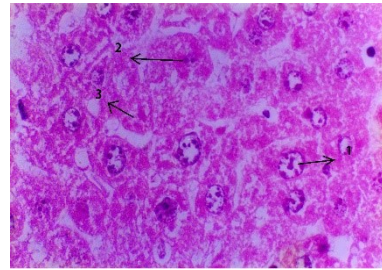
Citrinin bersifat nephrotoksik terhadap tikus dan babi, yang ditandai dengan efek pembengkakan ginjal, perubahan degeneratif pada tubulus proksimal, nucleus mengalami piknosis (Betina, 1989). Di samping itu hasil penelitian membuktikan bahwa citrinin juga bersifat hepatotoksik pada mencit; mikotoksin ini terbukti dapat menyebabkan kerusakan struktur dan ultra struktur hepatosit serta gangguan fungsi hepar (Hastuti, 2001). Hasil penelitian ini membuktikan bahwa perlakuan pemberian citrinin per oral kepada mencit selama 4 hari, berdasarkan hasil pemeriksaan histopatologik menunjukkan bahwa hepatosit-hepatosit normal (lihat Gambar 9) mengalami kerusakan struktur yang ditandai dengan perubahan-perubahan morfologi yang terdiri atas: degenerasi keruh, degenerasi hidropik, degenerasi lemak dan nekrosis (lihat Gambar 10). Nukleus hepatosit mencit yang terpapar oleh citrinin mengalami karyoreksis dan karyolisis (Hastuti, 2001). Hasil penelitian tersebut juga membuktikan bahwa perlakuan pemberian citrinin kepada mencit menyebabkan kerusakan ultra struktur pada hepatosit mencit. Pemeriksaan dengan mikroskop elektron menunjukkan bahwa hepatosit normal mencit (lihat gambar 11) mengalami kerusakan ultra struktur pada membran sel, mitochondria, membran nukleus, endoplasmic reticulum, serta pembengkakan dan pecahnya mitochondria (lihat Gambar 12).

Paparan citrinin pada hepatosit dapat menyebabkan hambatan terhadap aktivitas beberapa enzim yang berperan dalam respirasi seluler, yaitu *malat dehydrogenase* dan enzim *2-oxoglutarat dehydrogenase* yang berperan dalam siklus asam sitrat, serta enzim *NADH cytochrom c reductase* dalam sistim transfer electron (Chagas, *et, al*, 1995) sehingga mengakibatkan penurunan ATP. Selanjutnya fungsi pompa Natrium yang memerlukan ATP untuk mengatur keluar masuknya ion-ion Na^+ dan K^+ dari dan keluar hepatosit dengan cara transport aktif terhambat. Hal ini mengakibatkan terjadinya akumulasi ion-ion Na^+ di dalam sel, sehingga nilai osmosis plasma sel meningkat. Keadaan ini menyebabkan air di sekitar hepatosit masuk ke dalam hepatosit, sehingga terjadi pembengkakan sel dan organela-organela sel, termasuk mitochondria dan endoplasmic reticulum. Hal ini mengakibatkan kerusakan struktur serta penurunan fungsi organela-organela tersebut. Mitochondria berfungsi untuk respirasi seluler. Bila mitochondria, khususnya membran luar, membran dalam, dan krista mitochondria mengalami kerusakan, maka enzim-enzim yang berperan dalam siklus asam sitrat dan sistim transfer electron keluar dari mitochondria. Selanjutnya respirasi seluler tidak dapat berlangsung, akibatnya terjadi penurunan energi yang diperlukan untuk berbagai aktivitas hepatosit. Akhirnya hepatosit-hepatosit mengalami nekrosis dan mati. Apabila banyak hepatosit yang mengalami nekrosis, maka dapat terjadi gangguan fungsi hepar.



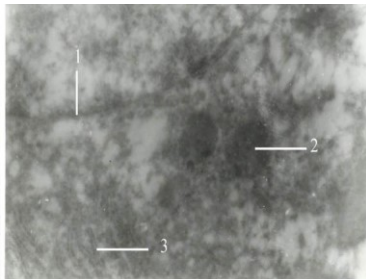
Gambar 9. Foto mikroskopis hepatosit mencit normal dalam pewarnaan dengan haematoxylin-eosin (perbesaran 1000X)

Keterangan: 1. Vena sentralis
2. Hepatosit
3. Nukleus



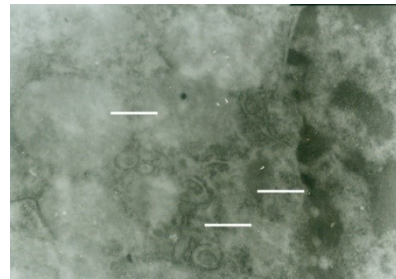
Gambar 10. Foto mikroskopis hepatosit mencit yang terpapar citrinin dalam pewarnaan dengan haematoxylin-eosin (perbesaran 1000X)

Keterangan: 1. Hepatosit yang mengalami karioreksis
2. Hepatosit yang mengalami kariolisis
3. Hepatosit yang mengalami nekrosis



Gambar 11. Electron micrograph hepatosit mencit normal (perbesaran 15.000X)

Keterangan: 1. Membran nukleus
2. Mitochondria
3. Endoplasmic reticulum



Gambar 12. Electron micrograph hepatosit mencit yang terpapar citrinin (perbesaran 15.000X)

Keterangan: 1. Membran nukleus rusak
2. Mitochondria membengkak dan krista nampak kabur.
3. Endoplasmic reticulum mulai rusak

• Kesimpulan

Berdasarkan uraian ini dapat dipahami bahwa baik bahan makanan maupun makanan yang kita konsumsi dapat terkontaminasi oleh berbagai spesies kapang kontaminan. Di antara spesies-spesies kapang kontaminan terdapat spesies kapang penghasil mikotoksin yang dapat membahayakan kesehatan konsumen. Hasil-hasil penelitian telah membuktikan bahwa mikotoksin dapat menyebabkan kerusakan struktur sel penyusun organ-organ tubuh, terutama hepar, dan ginjal dan gangguan fungsi pada organ-organ tersebut pada mencit. Hal ini juga dapat terjadi pada manusia, walaupun dalam jangka waktu lama.

Mikotoksin dapat terpapar sedikit demi sedikit bersama-sama makanan yang telah terkontaminasi oleh kapang penghasil mikotoksin, sehingga terkontaminasi dalam hepar atau ginjal. Efek mikotoksin terhadap tubuh bersifat kronis, sehingga baru nampak setelah beberapa tahun. Sehubungan dengan hal tersebut, maka perlu dilakukan penyuluhan kepada masyarakat konsumen agar selalu memilih bahan makanan dan makanan hasil olahan yang berkualitas baik dan tidak mengalami kerusakan, agar aman untuk dikonsumsi. Sikap hidup yang baik, khususnya dalam memilih makanan yang dikonsumsi sehari-hari perlu mendapat perhatian agar harapan tercapainya masyarakat yang sehat dapat segera terwujud.

Daftar Rujukan

- Aleo, M. D., Wyatt, R.D and Schnellmann, R.G. 1991. *The Role of Altered Mitochondrial Function in Citrinin- Induced Toxicity to Rat Renal Proximal Tubule Susceptions, Toxicology and Applied Pharmacology*. 109:455-463.
- Betina, V. 1989. *Mycotoxins-Chemical, Biological and Environmental Aspects*. Elsevier Science Publishing Company, Inc. pp. 174-265.
- Braunberg, R.C., Gantt, O., Barton, C., and Friedman, L. 1992. *In Vitro Effects of The Nephrotoxins Ochratoxin A and Citrinin Upon Biochemical Function of Procine Kidney*. Arch. Environ. Contam, 22: 464-470.
- Budiarso, I.T. Toksin Jamur: Dampaknya terhadap Kesehatan Manusia. Makalah disajikan pada KONAS III PAMKI. Jakarta: 3-5 Juli 1995.
- Chagas, G.M., Champello, A.P and Ma. Kluppel, L.W. 1992a. *Mechanism of Citrinin Induced Dysfunction of Mitochondria. I. Effects on Respiration, Enzyme Activities and Membrane Potential of Renal Cortical Mitochondria*. Journal of Applied Toxicology. 12(2): 123-129.
- Chagas, G.M., Champello, A.P and Ma.Kluppel, L.W. 1992b. *Mechanism of Citrinin Induced Dysfunction of Mitochondria. II. Effects on Respiration, Enzyme Activities and Membrane Potential of Liver Mitochondria*. Cell Biochem. Func. 10: 209-216.
- Chagas, G.M., Champello, A.P and Ma.Kluppel, L.W. 1995. *Mechanism of Citrinin Induced Dysfunction of Mitochondria. III. Effects on Renal Cortical and Liver Mitochondria Swelling*. Journal of Applied Toxicology. 15(2): 91-95.
- Cotran, R.S., Kumar, V. and Collins, T. 1999. *Patologic Basis of Disease*. Philadelphia: W.B. Saunders Company. Pp. 1-28.
- Eaton, D.L. and Groopman, J.D. 1994. *The Toxicology of Aflatoxins: Human Health, Veterinary and Agricultural Significance*. California: Academic Prss, Inc. pp. 3-84
- Eley, A,R. 1994. Microbial Food Poisoning. London: Chapman & Hall. pp. 73-90
- Escoula, L., Thomsen, M., Bourdiol, D., Pipy, B., Peuriere, S., and Roubinet, F. 1988. *Patulin Immunotoxicology, Effect on Phagocyte Activation and The Celluler and Humoral Immune System of Mice and Rabbits*. J. Immunopharmacol, 10(8): 983-9.
- Fardiaz, s. 1989. *Penuntun Praktek Mikrobiologi Pangan*. Bogor. Penerbit IPB. hal 49-58.
- Gitnick, G., Douglas, R., La Breque and Moody, F..G. 1992. *Disease of the Liver and Biliary Tract*. St. Louis: Mosby-Year Book, Inc.
- Hastuti, U.S. *Mikoflora pada Biji Lada Utuh dan Biji Lada Rusak di Kota Madya Malang*. Malang disajikan pada PIT dan Seminar Nasional Mikrobiologi PERMI, tanggal 12-13 November 1996 di Malang.
- Hastuti, U.S. 2001. *Hepatotoksisitas Citrinin, Patulin, dan Aflatoksin B₁ pada Mencit (Mus musculus) – Penelitian Eksperimental Laboratoris*. Disertasi. Tidak diterbitkan.
- Hastuti U.S, dan Lina K, 2003. *Studi tentang Mikoflora dan Jumlah Total Koloni Kapang Kontaminan dalam Biji Kemiri (Aleurites moluccana Willd) dari Beberapa Pasar Kota Malang*. Jurnal Agristek II (4): 557-564.
- Imono, A.D. dan Makfoeld, D. 1990. *Toksin Pangan*. Yogyakarta: PAU Pangan dan Gizi Universitas Gadjah Mada.
- Jimenez M., Mateo, R., Querol, A., Huerta, T., and Hernandez, E. 1991. *Mycotoxins and Mycotoxigenic Moulds in Nuts and Sunflower Seeds for Human Consumption*. Mycopathologia. 115 (2): 121-127.
- Lestariana, W.B.S., Anggrahini, S., Madyan, N., dan Hastuti, P. 1988. *Cemaran Aflatoksin pada Bahan Makanan yang Beredar di Yogyakarta*. Yogyakarta: PAU Pangan dan Gizi Universitas Gadjah Mada.
- Mac Sween, R.N.M., Antony, P.P. and Scheuer, P.J. 1979. *Patology of The Liver*. New York: Churchill Livingstone. pp 1-39.

- Madhyasta, M.S., and Bhat, R.V. 1984. *Aspergillus parasiticus* Growth and Toxin Production on Black and White Pepper and the Inhibitory Action of Their Chemical Constituents. *Appl-Environ-Microbiol.* 48 (2): 376-379.
- Makfoeld, D. 1993. *Mikotoksin Pangan*. Yogyakarta: Penerbit Kanisius. Hal. 15-205.
- Munfarida, Anna, 2003. *Studi tentang Mikoflora dan Jumlah Total koloni kapang Kontaminan pada Biji Jagung dan Beras dari Berbagai Pasar di Kota Malang*. Skripsi. Tidak diterbitkan.
- Pitt, J.I., and Hocking, A.D. 1985. *Fungi and Food Spoilage*. Sidney: Academic Press.
- Rahayu, K., dan Sudarmadji, S. 1989. *Mikrobiologi Pangan*. Yogyakarta: PAU Pangan dan Gizi Universitas Gadjah Mada. hlm. 73-180.
- Richard, J.I., Bennett, G.A., Ross, P.F., and Nelson P.E. 1993. *Analysis of Naturally Occurring Mycotoxins in Feedstuffs and Food*. *J-Anim Sci.* 71 (9): 2563-74.
- Samson, R.A., Hoekstra, E.S., and Van Oorscot, C.A.N. 1984. *Introduction to Food Borne Fungi*. Delft: Central Bureau voor Schimmelcultures.
- Siagian, E.G., Harjono, dan Lidia A.S., 1983. *Pemberantasan Kapang Perusak Beras dengan Radiasi. Risalah Seminar Nasional Pengawetan Makanan dengan Radiasi*. Jakarta, 6-8 Juni 1983.
- Youssef, N., Rifai, N.K., Kand, S., El Mollia, A.H., and El Gamal, H. 1986. *Contamination of Spices by Fungi and Their Mycotoxin*. *Journal of the Egyptian Public Healty Association.* 61:211-223.
- Zakim, D., and Boyer, T.D. 1990. *Hepatology-A Textbook of Liver Disease*. Philadelphia: W.B. Saunders Company. pp. 737-744.

Memahami Perilaku Ekstrem Gelombang Permukaan Air

Prof. Dr. Toto Nusantara, M.Si.



Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Yth. Bapak Rektor selaku Ketua Senat Universitas Malang
Yth. Bapak/ Ibu Anggota Senat Universitas Negeri Malang
Yth. Bapak/Ibu Pejabat, Dosen, Karyawan, Mahasiswa Universitas Negeri Malang
Yth. Para Undangan dan Hadirin yang saya muliakan

Sebagai awal dari pidato pengukuhan guru besar yang saya sampaikan ini, perkenankan saya memohon hadirin untuk bersama-sama memanjatkan puji syukur ke hadirat *ilahi Robbi* Allah SWT, karena atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya kita semua dapat hadir di hari yang berbahagia ini. Kesempatan seperti ini, merupakan kehormatan yang sangat luar biasa bagi saya pribadi untuk dapat berdiri di hadapan seluruh anggota senat yang mulia, oleh karena itu sepatutnyalah apabila saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Rektor yang telah memberikan kesempatan ini.

Alhamdulillah Robbil Atamin, Puji dan syukur, saya panjatkan ke hadirat Ilahi Robbi yang telah memberikan nikmat yang tiada terhingga kepada saya dan keluarga khususnya, dan keluarga besar UM pada umumnya, setelah melalui jalan berliku-liku dan panjang, dalam kurun waktu 4 tahun dapat menyelesaikan S-3 dan tak terbayangkan pada hari ini diberi kepercayaan menyandang jabatan fungsional tertinggi dosen, Guru Besar, Universitas Negeri Malang.

Bapak, Ibu, dan Hadirin yang saya hormati, perkenankanlah saya menyampaikan pidato ilmiah pengukuhan guru besar saya yang berjudul "Memahami Perilaku Ekstrem Gelombang Permukaan Air", dengan harapan semoga pidato pengukuhan saya ini dapat memberikan sedikit sumbangan pemikiran bagi pengembangan ilmu-ilmu matematika, khususnya matematika terapan. Semoga sidang terbuka ini menjadi forum ilmiah yang penuh barokah dan hidayah Allah SWT.

Bapak Rektor, Anggota Senat, dan Hadirin yang saya muliakan.

Salah satu dari tak hingga banyaknya fenomena alam yang menarik adalah gerakan permukaan air yang berupa riak yang kecil sampai ke gelombang yang sangat besar. Fenomena alam ini telah menarik perhatian banyak ilmuwan selama abad yang lalu sampai saat ini. Banyak penelitian yang dilaksanakan telah memberikan pemahaman secara fisis yang lebih baik. Di pihak lain penelitian-penelitian itu juga telah memberikan kontribusi bagi matematika dalam pengembangan metode-metode matematika untuk menganalisis permasalahan dalam kajian fenomena gelombang tersebut.

Bapak Rektor, Anggota Senat, dan Hadirin yang saya muliakan.

Kajian gelombang khususnya tentang gelombang permukaan air sangat penting mengingat negara kita dikenal sebagai negara kepulauan terbesar di dunia. Dengan luasnya lautan yang kita miliki, banyak potensi kekayaan laut yang dapat kita manfaatkan untuk kesejahteraan rakyat Indonesia. Akan tetapi kita ketahui bahwa kekayaan yang begitu melimpah ini belum dimanfaatkan secara maksimal. Penyebabnya adalah kurang berkembangnya industri sarana kelautan sehingga eksplorasi kelautan tidak dapat dilakukan dengan maksimal. Di samping itu mengingat luasnya wilayah kelautan Indonesia, perhitungan terakhir jumlah pulau di Indonesia adalah 18.108 pulau, dengan luas tanah 1.937 juta Km², luas laut kedaulatan 3.1 juta km², luas laut ZEE 2.7 juta km², panjang pantai 81,000 Km, yang merupakan garis pantai terpanjang kedua setelah Kanada di dunia, maka diperlukan fasilitas sarana prasarana yang memadai untuk menjaga kedaulatan negara tersebut.

Bapak Rektor, Anggota Senat, dan Hadirin yang saya muliakan.

Banyak sekali kekayaan laut yang dimiliki negara kita. Laut kita mengandung banyak sumber daya yang beragam baik yang dapat diperbaharui seperti perikanan, terumbu karang, hutan mangrove, rumput laut, dan plasma nutfah lainnya ataupun sumber daya yang tidak dapat diperbaharui seperti minyak dan gas bumi barang tambang, mineral, serta energi kelautan seperti gelombang, angin, dan OTEC (*Ocean Thermal Energy Conversion*) yang sedang giat dikembangkan saat ini.

Berdasarkan sumber yang didapat (*Kompas*, 15 Desember 2004), ada 7,5 persen (6,4 juta ton/tahun) dari potensi lestari total ikan laut dunia berada di Indonesia. Kurang lebih 24 juta hektar perairan laut dangkal Indonesia cocok untuk usaha budidaya laut (*marine culture*) ikan kerapu, kakap, baronang, kerang mutiara, dan biota laut lainnya yang bernilai ekonomis tinggi dengan potensi produksi 47 ton/tahun. Selain itu, lahan pesisir (*Coastal land*) yang sesuai untuk usaha budidaya tambak udang, bandeng, kerapu, kepiting, rajungan, rumput laut, dan biota perairan lainnya diperkirakan 1,2 juta hektar dengan potensi produksi sebesar 5 juta/tahun. Secara keseluruhan nilai ekonomi total dari produk perikanan dan produk bioteknologi perairan Indonesia diperkirakan mencapai 82 miliar dollar AS per tahun. Hampir 70 persen produksi minyak dan gas bumi Indonesia berasal dari kawasan pesisir dan laut. Selain itu, Indonesia juga memiliki keanekaragaman hayati laut pada tingkatan genetik, spesies, maupun ekosistem tertinggi di dunia. Akan tetapi, saat ini baru 4 juta ton kekayaan laut Indonesia yang baru dimanfaatkan. Jika kita telusuri kembali sebenarnya masih banyak potensi kekayaan laut yang dimiliki Indonesia.

Bapak Rektor, Anggota Senat, dan Hadirin yang saya muliakan.

Dengan kekayaan laut yang melimpah ini, sayangnya belum termanfaatkan secara optimal. Sumber daya kelautan yang begitu melimpah ini hanya dipandang “sebelah mata”, Kalaupun ada kegiatan pemanfaatan sumber daya kelautan, maka dilakukan kurang profesional dan ekstraktif, kurang mengindahkan aspek kelestariannya. Bangsa Indonesia kurang siap dalam menghadapi segala konsekuensi jati dirinya sebagai bangsa nusantara atau negara kepulauan terbesar di dunia karena tidak disertai dengan kesadaran dan kapasitas yang sepadan dalam mengelola kekayaannya.

Di satu sisi Indonesia memosisikan diri sebagai negara kepulauan dengan kekayaan lautnya yang melimpah, tetapi di sisi lain Indonesia juga memosisikan diri secara kultural sebagai bangsa agraris dengan puluhan juta petani yang masih berada di bawah garis kemiskinan, sedangkan dalam industri modern, negara kita kalah bersaing dengan negara lain. Semua ini berdampak juga terhadap sektor industri kelautan sehingga menimbulkan banyak masalah berkaitan dengan pemanfaatan kekayaan laut. Di antaranya para nelayan Indonesia masih miskin dan tertinggal dalam perkembangan teknologi kelautan. Selain itu, banyak nelayan asing yang mencuri ikan di wilayah perairan kita, tiap tahunnya jutaan ton ikan di perairan kita dicuri oleh nelayan asing yang rata-rata peralatan tangkapan ikan mereka jauh lebih canggih dibandingkan para nelayan tradisional kita. Kerugian yang diderita negara kita mencapai Rp 18 trilyun-Rp36 trilyun tiap tahunnya.

Hal ini memang kurang bisa dicegah oleh TNI AL sebagai lembaga yang berwenang dalam mengamankan wilayah laut Indonesia, karena seperti kita ketahui keadaan alat sista (alat utarffe sistem senjata) seperti kapal perang yang dimiliki TNI AL jauh dari mencukupi. Untuk mengamankan seluruh wilayah perairan Indonesia yang mencapai 5,9 juta km², TNI AL setidaknya harus memiliki 500 unit kapal perang berbagai jenis, akan tetapi kekuatan operasional TNI AL saat ini baru ada 116 kapal perang. Itupun dengan kemampuan tempur di bawah standar karena rata-rata usianya di atas 20 tahun.

Bapak Rektor, Anggota Senat, dan Hadirin yang saya muliakan.

Berkenaan dengan semua permasalahan di atas, pemerintah hendaknya harus bekerja lebih keras dalam mencari penyelesaian masalah ini agar eksplorasi serta pemanfaatan kekayaan laut kita dapat dilaksanakan secara optimal dan terarah. Negara kita perlu mempunyai kebijakan kelautan yang jelas dan bervisi ke depan karena menyangkut geopolitik dan kebijakan-kebijakan dasar tentang pengelolaan sumber daya kelautan. Kebijakan mengenai berbagai terobosan untuk mendayagunakan sumber daya kelautan secara optimal dan lestari sebagai keunggulan kompetitif bangsa.

Untuk persoalan pengembangan sarana kelautan di Indonesia perkembangannya belum terlalu menjanjikan dan masih perlu perhatian kita semua. Salah satu indikator kurang seriusnya pengembangan industri sarana kelautan di Indonesia adalah masih banyaknya terjadi kecelakaan di laut. Berdasarkan data dari Direktorat Penjagaan dan Penyelamatan, Ditjen. Hubungan laut, untuk tahun 2007 dan 2008 diperoleh data kecelakaan sarana kelautan yang terjadi di perairan Indonesia adalah sebagai berikut.

Tabel 1. Data Kecelakaan Laut di Perairan Indonesia Tahun 2007-2008

| No | Jenis Kapal | 2007 | 2008 |
|---------------|-----------------------|------------|-----------|
| 1 | Kapal Cargo | 48 | 9 |
| 2 | Kapal Cargo Penumpang | 1 | • |
| 3 | Kapal Container | 5 | 1 |
| 4 | Kapal Curah | - | - |
| 5 | Kapal Ikan | 10 | 4 |
| 6 | Kapal Layar Motor | 21 | 4 |
| 7 | Kapal Motor Kayu | 17 | 15 |
| 8 | Kapal Negara | - | - |
| 9 | Kapal Penumpang | 6 | - |
| 10 | Kapal Perang | 1 | - |
| 11 | Kapal Ro Ro Penumpang | 3 | 3 |
| 12 | Kapal Tanker | 6 | 6 |
| 13 | Kapal Supply | 2 | - |
| 14 | LCT | 6 | 1 |
| 15 | Speed Boat | 10 | 1 |
| 16 | Tongkang | 10 | 1 |
| 17 | Tug Boat | 11 | - |
| ▶ 18 | Yacht | 2 | - |
| Jumlah | | 159 | 45 |

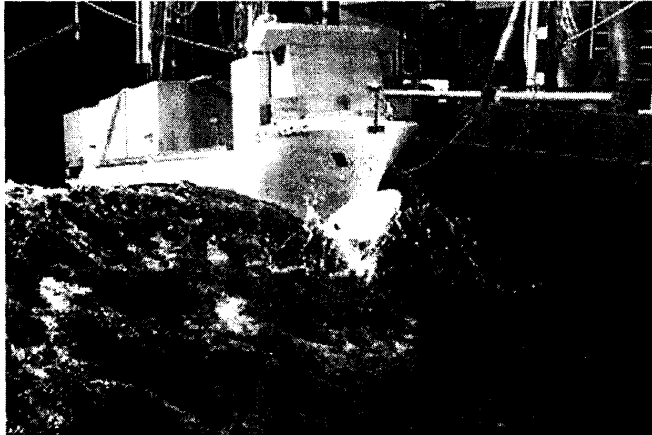
Sementara apabila ditinjau dari penyebab kecelakaan, yang paling dominan terjadi adalah karena tenggelam 63 untuk tahun 2007 dan 18 untuk tahun 2008. Melihat penyebab kecelakaan tersebut, mengindikasikan bahwa perancangan dan pembuatan sarana kelautan belum optimal dilakukan. Kalau pun sudah optimal dilakukan, akan tetapi untuk kondisi-kondisi kelautan tertentu, kapal tidak mampu untuk berlayar dikondisi ekstrem yang kadang kala kurang bersahabat dengan munculnya gelombang besar (gelombang ekstrem) akibat perubahan cuaca yang mendadak.



Gambar 1. Large cargo ship approaches a rogue wave: image courtesy BBC Horizon, Freak Waves (sumber: <http://earthfrenzyradio.blogspot.com/2007/10/kuala-muda-folks-panic-expecting.html>)

Bapak Rektor, Anggota Senat, dan Hadirin yang saya muliakan.

Pembuatan sarana-prasarana kelautan dilakukan melalui proses permodelan yang dikembangkan dalam skala laboratorium. Model-model tersebut merupakan representasi fisik sarana dalam skala yang lebih kecil yang selanjutnya diuji di Laboratorium Hidrodinamika. Indonesia memiliki laboratorium hidrodinamika; yaitu Laboratorium Hidrodinamika Indonesia (LHI) yang terletak di Ketintang Surabaya. Laboratorium tersebut merupakan salah satu asset yang dimiliki bangsa Indonesia dibawah koordinasi Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT)



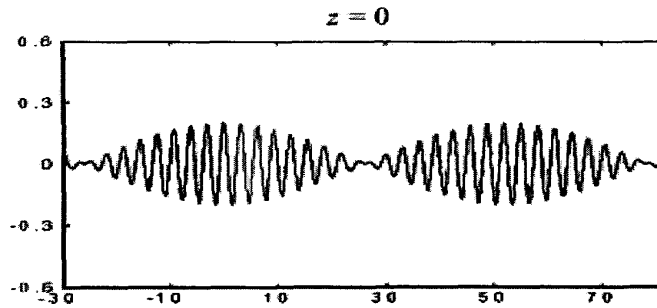
Gambar 2. Pengujian model kapal laut di Laboratorium Hidrodinamika Sumber: <http://www.w3.org/TR/html4/strict.dtd>

Dalam laboratorium hidrodinamika terdapat kolam pengujian tempat model ditempatkan untuk diuji. Untuk membangkitkan gelombang tertentu yang sesuai kondisi medan nantinya sarana kelautan ditempatkan, laboratorium menggunakan peralatan yang membutuhkan energi listrik yang cukup besar. Pemenuhan akan kebutuhan listrik ini tentu saja membuat laboratoium tidak dapat setiap saat melakukan pengujian secara bebas, misalnya untuk riset pengembangan yang tidak ada sponsornya. Selain itu, laboratorium hidrodinamika sebagai industri infrastruktur kelautan belum sepenuhnya mampu menunjang keingingan menjadikan industri kelautan sebagai andalan. Salah satu kendala yang dihadapi Laboratorium Hidrodinamika ini adalah kemampuan melakukan pengetesan sarana dan prasarana kelautan pada kondisi ekstrem di lautan. Pada kondisi ini, gelombang yang dibangkitkan berada di luar sistem yang dipunyai atau berada di luar batas kolam yang dimiliki.

Kondisi di atas tentu saja akan menghambat perkembangan riset kelautan di Indonesia. Oleh karena itu, diperlukan upaya-upaya riset analitik dan simulasi yang tidak berbasis kegiatan laboratorium untuk mengoptimalkan sarana penelitian kelautan yang ada.

Bapak Rektor, Anggota Senat, dan Hadirin yang saya muliakan

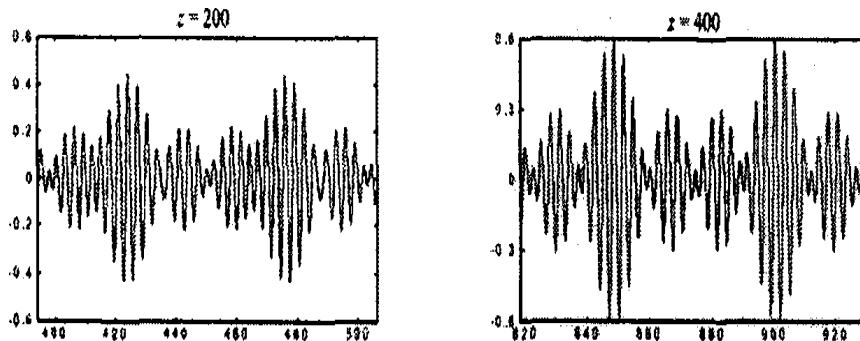
Hasil penelitian yang dipublikasikan oleh Stansberg (1998) memberikan arahan baru tentang pembangkitan gelombang ekstrem yang dapat dilakukan di laboratorium. Stansberg melakukan penelitian tentang pembangkitan gelombang bikromatik di laboratorium hidrodinamika dan menunjukkan hasil yang menakjubkan tentang perubahan gelombang bikromatik menjadi gelombang ekstrem, seperti yang direka ulang oleh penulis sebagai berikut.



Gambar 3. Profil signal gelombang bikromatik pada posisi dekat pembangkit gelombang

Saya berpendapat, dengan tanpa mengabaikan teori behavioristik dan kognitivistik, untuk keperluan pendidikan karakter dipandang lebih tepat jika menggunakan teori-teori yang berorientasi pada komprehenship (holistik) yang mengimplementasikan secara seimbang antara kekuatan internal dan eksternal, antara kekuatan skemata dengan lingkungan, antara kekuatan pikiran dengan hati, dan antara (*ngerti, ngroso, nglakoni*; atau *moral knowing, moral feeling, dan moral action*; atau antara *fikir, dzikir, dan ikhtiar*). Secara metodologis (misalnya persoalan: perumusan tujuan, pilihan sumber dan media pembelajaran, penciptaan situasi/kultur pembelajaran, pilihan model-model pembelajaran, evaluasi dan penilaian pendidikan, hendaknya juga menyesuaikan dengan orientasi teori komprehensif yang digunakan untuk memandu praktik pendidikan karakter.

Pada posisi dekat pembangkit gelombang (*wavemaker*) terbentuk signal bikromatik sebagaimana yang diinginkan. Akan tetapi pada pengukuran pada posisi yang menjauhi *wavemaker*, profil signal bikromatik mengalami perubahan seperti yang diperlihatkan pada gambar berikut.



Gambar 4. Profil signal gelombang bikromatik pada posisi 200 dan 400 meter dari pembangkit gelombang

Apa yang dikaji dari hasil penelitian Stansberg ini ternyata memiliki aspek penerapan yang sangat penting, yaitu perubahan profil signal gelombang bikromatik ternyata dibarengi dengan amplifikasi dari amplitudo. Hasil ini memiliki manfaat yang cukup penting dalam pembangkitan gelombang ekstrem di laboratorium, maupun pengembangan pengetahuan tentang gelombang ekstrem itu sendiri.

Gelombang ekstrem bukan gelombang Tsunami, gelombang ini memiliki tinggi gelombang 4-5 meter bahkan lebih. Banyaknya kecelakaan laut akhir-akhir ini yang terjadi kemungkinan disebabkan oleh gelombang ekstrem.

Bapak, Ibu, Hadirin yang saya hormati.

Fenomena Stansberg menjadi issue yang menarik bagi pengembangan keilmuan tentang gelombang ekstrem. Beberapa peneliti kelautan yang tergabung di KPP MIT - ITB seperti [2,3, 4, 9, 13], MARIN seperti [10, 11, 14], dan di Universitas Twente Belanda seperti [14,16] melakukan kajian yang intensif untuk mereka ulang dan mengkaji lebih jauh untuk implementasi di laboratorium hidrodinamika. Perhatian yang besar terhadap penelitian gelombang ekstrem ini terkait dengan manfaat dan pentingnya untuk pengembangan ilmu, khususnya pembangkitan gelombang terskala di

laboratorium hidrodinamika dan umumnya untuk industri yang berbasis maritim serta pada industri yang berbasis optik, seperti yang diperlihatkan dalam [1,14].

Bapak, Ibu, Hadirin yang saya hormati.

Mengingat pentingnya kajian gelombang ekstrem untuk pengembangan sarana dan prasarana kelautan di Indonesia, beberapa kajian dilakukan penulis sebagai bentuk peran aktif mendukung kajian tentang gelombang ekstrem. Dalam disertasi yang berjudul "Paket Gelombang Tak Linear dari Persamaan Gelombang Permukaan", penulis melakukan kajian tentang perilaku ekstrem gelombang dalam sudut pandang paket gelombang. Dalam penelitian tersebut penulis mengkaji dari sudut pandang penjalaran gelombang satu arah (1 D). Beberapa hasil kajian yang dipresentasikan dalam forum ilmiah diantaranya adalah:

1. Penulis juga mengkomunikasikan model awal interaksi paket gelombang dari penyelesaian persamaan Korteweg de Vries yang telah dimodifikasi sifat dispersifnya, dalam forum ilmiah ISASTI tahun 1998 dengan judul makalah "*Wave group interaction in nonlinear surface wave model with exact dispersion*".
2. Model interaksi dua paket gelombang juga dikomunikasikan dalam forum LABMATH MEETING di MARIN Wageningen Belanda, tahun 1998, dengan judul makalah "*Two wave group interaction*".
3. Bagaimana model awal struktur interaksi dipresentasikan pada forum LABMATH MEETING di University of Twente Belanda, tahun 1999, dengan judul makalah "*On the interaction structure of two wave groups*".
4. Profil maupun karakteristik interaksi linear dari interaksi paket gelombang dikomunikasikan dalam forum ICOSTI (*International Conference on Ocean Science Technology and Industry*) 1999 di Jakarta, dengan judul makalah "*Linear Interaction of two wave groups in surface water waves*".
5. Profil dan sifat gelombang amplitudo paket gelombang dikomunikasikan dalam LABMATH MEETING di ITB tahun 1999, dengan judul makalah "*Exact Solutions of NLS Equation*".
6. Struktur interaksi paket gelombang dikomunikasikan dalam forum Conference PDE and Their Applications di Hanoi Vietnam tahun 1999, dengan judul makalah "*Interaction structure of two wave groups in surface water waves*".

Selain itu hasil kajian yang dipublikasikan dalam jurnal ilmiah, diantaranya:

1. *Modeling waves in a towing tank*, yang dipublikasikan pada Jurnal MIHMI, tahun 1998 [18]. Dalam kajian ini disampaikan bahwa model persamaan Korteweg de Vries standar tidak cukup baik untuk memodelkan gelombang di laboratorium. Salah satu penyebabnya adalah sifat dispersive persamaan yang tidak dapat mewakili sifat dispersive gelombang permukaan air.
2. *Relative propagation of wave groups*, yang dipublikasikan pada Jurnal Matematika dan Sains, tahun 1999. Dalam kajian ini diuraikan tentang cara pandang terhadap interaksi paket gelombang, karena tiap paket gelombang memiliki kecepatan dan frame yang berbeda.
3. *Large variations in NLS bi soliton wave groups*, Journal OQE, tahun 2001. Artikel ini menjelaskan secara detail apa yang terjadi pada fenomena Stansberg dari sudut pandang pake gelombang, dalam artikel juga diuraikan hubungan-hubungan parameter gelombang terhadap keadaan ekstrem gelombang.
4. *Coupled bright soliton in a double mode optical fiber*, Journal NOPM, tahun 2001. Dalam artikel ini dijabarkan relevansi kajian Stansberg terhadap bidang optic. Bagaimana perilaku gelombang amplitudo paket gelombang di sekitar daerah interaksi.

Bapak, Ibu, Hadirin yang saya hormati.

Selain penelitian disertasi, penulis juga aktif mengikuti perkembangan tentang penelitian gelombang ekstrem, khususnya penelitian pengembangan pada gelombang multiarah. Beberapa hasil penelitiandilakukan oleh penulis setelah selesai program doktor, di antaranya:

1. Kajian tentang Maximum Temporal Amplitude (MTA) gelombang regular. Dengan mengetahui MTA gelombang ini diharapkan dapat diketahui kapan gelombang mengalami keadaan ekstrem, baik waktu maupun posisi. Hasil ini diterbitkan pada Jurnal Natural tahun 2003.
2. Kajian tentang deformasi gelombang regular, penelitian ini mengkaji secara khusus bagaimana karakter deformasi gelombang akibat sifat tak linear dari medium. Hasil ini diterbitkan di Jurnal MIPA tahun 2003.

Tahun 2004 penulis memperoleh dana penelitian Pekerti untuk kajian tentang “studi interaksi gelombang dan aplikasinya pada pembangkitan gelombang ekstrem”. Secara khusus tujuan penelitian ini adalah : (a) Memperoleh deskripsi yang baik tentang parameter-parameter gelombang yang menghasilkan gelombang ekstrem (b) Memperoleh model interaksi gelombang yang menghasilkan gelombang ekstrem.

Berbeda dengan kajian yang ada dalam disertasi, dalam kajian penelitian pekerti, fokus kajian pada penalaran gelombang multiarah. Beberapa hasil kajian diperoleh dari penelitian ini antara lain adalah:

1. Kajian gelombang multiarah dengan model persamaan Kadomsev-Petviashvili standar memiliki keterbatasan apabila harus dibangkitkan di kolam percobaan, karena tidak sesuainya bilangan gelombang. Oleh karena itu perlu adanya modifikasi model persamaan gelombang multiarah, modifikasi persamaan tersebut dikomunikasikan penulis dalam Jurnal Matematika tahun 2005, dengan judul artikel “Modifikasi Model Penalaran Multiarah”. Model yang dihasilkan dalam bentuk persamaan Improved Kadomsev-Petviashvili, yang menjelaskan persamaan gelombang multiarah dengan bagian gelombang dominan memiliki relasi dispersi yang eksak.
2. Model interaksi gelombang multiarah dikomunikasikan pada *International Conference on Mathematics and Statistics*, Bandung tahun 2006, dengan judul makalah “Multidirectional surface water wave interaction”. Dalam makalah tersebut diuraikan model-model interaksi yang mungkin dapat dikerjakan secara analitis, dengan model persamaan gelombang multiarah dinyatakan oleh persamaan Improved Kadomsev Petviashvili.
3. Bagaimana evolusi spasial gelombang permukaan multiarah dikomunikasikan dalam Jurnal MIHMI tahun 2006, dengan judul artikel “Evolusi Spasial Gelombang Permukaan Multiarah Berdasarkan Solusi Orde Ke Tiga Persamaan IKP”.
4. Posisi ekstrem gelombang yang dihasilkan dari pembangkit gelombang multiarah sangat dipengaruhi arah penalaran gelombang. Hasil ini dikomunikasikan dalam Jurnal Forum Penelitian, tahun 2006, dengan judul artikel “Pengaruh arah penalaran gelombang multiarah terhadap posisi ekstrem gelombang”.
5. Beberapa faktor yang mendominasi deformasi gelombang bikromatik multiarah menjadi gelombang ekstrem dikomunikasikan pada Jurnal Limits tahun 2006, dengan judul, Faktor dominan pada deformasi gelombang bikromatik multiarah”.

Bapak, Ibu, Hadirin yang saya hormati.

Hasil kajian tentang perilaku gelombang ekstrem yang saya lakukan ternyata masih jauh dalam mengungkap fenomena alam tentang perilaku gelombang ekstrem, masih diperlukan kajian yang lebih komprehensif dan mendalam untuk tujuan pembangkitan gelombang ekstrem terskala di laboratorium. Masih diperlukan kerja keras lagi untuk mendukung keinginan menjadikan Negara Indonesia sebagai negara kepulauan yang tangguh dan disegani oleh bangsa lain.

Sebagai kata akhir dari pidato ini, saya ingin mengungkapkan bahwa ternyata hanya sedikit tentang tanda-tanda kekuasaan Allah yang dapat kita kaji, seperti yang tertulis dalam Al Quran

أَلَمْ تَرَ أَنَّ الْفُلْكَ تَجْرِي فِي الْبَحْرِ بِنِعْمَتِ اللَّهِ لِيُرِيَكُمْ مِنْ آيَاتِهِ إِنَّ فِي ذَلِكَ لَآيَاتٍ لِكُلِّ صَبَّارٍ شَكُورٍ

Tidakkah kamu memperhatikan bahwa Sesungguhnya kapal itu berlayar di laut dengan nikmat Allah, supaya diperlihatkan-Nya kepadamu sebahagian dari tanda-tanda (kekuasaan)-Nya. Sesungguhnya pada yang demikian itu benar-benar terdapat tanda-tanda bagi semua orang yang sangat sabar lagi banyak bersyukur. (Q.S. 31 (Luqman):31)

DAFTAR RUJUKAN

- [1]. Andonowati & E. van Groesen, Optical Pulse Deformation in Second Order Non-Linear Media, *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, v. 12, n.2 (2003) 221-234.
- [2]. Andonowati, Marwan, E. van Groesen, Maximal temporal amplitude of generated wave groups with two or three frequencies, submitted to *Proceeding of 2nd ICPMREiDT*.
- [3]. Andonowati, Wuryansari, M.K, E, van Groesen, Steepness of extreme waves caused by wave focusing in the Benjamin-Feir instability regime, *Proceedings of International Symposium on Shallow Flows*, TUDelft, June 16-8,2003.
- [4]. Marwan & Andonowati, Perubahan bentuk pada perambatan signal bi-kromatik dan pengaruhnya terhadap amplitud maksimum, to appear in *Journal of Mathematics & Science, FMIPA ITB*.
- [5]. C.T. Stansberg, On the nonlinear behaviour of ocean wave groups, *Ocean Wave Measurement and Analysis, Proc. Of the Third International Symposium WAVES 97* Editor: B.L. Edge, J.M. Hemsley, American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, V.A, USA2n.2 (1998).
- [6]. H. Segur and A. finkel, *Studies in Applied Mathematics*, 73 (1985) 183-220.
- [7]. Toto Nusantara, MTA Gelombang Regular, *Jurnal Natural v. 7n. 2*, Juli 2003.
- [8]. Toto Nusantara, Deformasi Gelombang Regular, *Jurnal MIPA tahun 32 n. 2*, Juli 2003.
- [9]. Wuryansari M.K & Andonowati, Dinamika tinggi gelombang maksimum selubung paket gelombang permukaan bikromatik, *Proceeding ITB, seri A, v.34, 2003*.
- [10]. J. Westhuis, E. van Groesen, R.H.M. Huijsmans, 'Experiments and Numerics of Bichromatic Wave Groups, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 127 (2001) 334-342.
- [11]. J. Westhuis, R.H.M. Huijsmans, *Unstable bichromatics wave groups*, AAARIN, report No. 15309.152. Wageningen, The Netherlands (2000).
- [12]. E. van Groesen, Wave Groups in Uni-directional Surface Wave Models, *J. Eng. Math.*, 4(1998) 215-226.
- [13]. E. van Groesen, Andonowati, E. Soewono, Nonlinear Effects in Bichromatic Surface Waves, *Proc. Estonian Acad. Sci., Mathematics and Physics* 48 (1999) 206-229.
- [14]. E. van Groesen, E. Cahyono, & A. Suryanto, Unidirectional Models for Narrow and Broad Pulse Propagation in Second Order Nonlinear Media, *Optical Quantum Optics* 34 (2002) 577-595.
- [15]. E. van Groesen, J. Westhuis, Modeling and simulation of surface water waves, *Journal Mathematics and Computer in Simulation*, 59 (2002)341-360.
- [16]. E. van Groesen, N. Karyanto, P. Peterson & Andonowati, Wave dislocation and non-linear amplitude amplification for extreme fluid surface waves, submitted.
- [17]. E. van Groesen, F.S. Widoyono, T. Nusantara. Modeling waves in a towing tank. *Journal MIHMI*,v. 5 (1998), 55-68.

Integrasi Pendekatan Morfologi dan Molekuler DNA (*Deoxyribonucleic Acid*) dalam Taksonomi

Prof. Dr. Siti Zubaidah, S.Pd., M.Pd.

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Yang saya hormati,

Rektor Universitas Negeri Malang selaku Ketua Senat Universitas Negeri Malang,
Ketua dan Sekretaris Komisi Guru Besar Universitas Negeri Malang,
Para Anggota Senat Universitas Negeri Malang,
Para Pejabat Struktural Universitas Negeri Malang,
Para Sejawat Dosen, Karyawan, dan Mahasiswa Universitas Negeri Malang
Para Undangan dan Hadirin semuanya.

Mari kita panjatkan puji syukur ke hadirat Allah *subhanahu wa ta'ala*, yang telah memberikan segala rahmat dan karuniaNya, sehingga kita dapat hadir dalam sidang majelis yang berbahagia ini, seraya memohon agar kegiatan ini mendapat ridhaNya. Amiin. Semoga shalawat dan salam selalu terlimpah kepada junjungan kita, Rasulullah Muhammad SAW, beserta keluarga, sahabat dan para pengikutnya.

Bapak Rektor, Anggota Senat serta Para Hadirin yang saya hormati,

Merupakan kehormatan yang tinggi bagi saya pribadi untuk dapat berdiri pada sidang ini, di hadapan seluruh anggota senat dan hadirin semuanya, untuk menyampaikan pidato pengukuhan saya sebagai Guru Besar di Bidang Ilmu Genetika. Pidato ini adalah salah satu bentuk perwujudan saya dalam melaksanakan perintah Allah SWT yaitu iqra' dan qalam, seperti termaktub dalam Qur'an Surat *Al 'Alaq* dan *Al Qalam*. Membaca dan menulis adalah dua konsep penting yang diwahyukan Allah lewat perantaraan Malaikat Jibril kepada yang mulia Rasulullah Muhammad SAW, sebagai dua aktivitas yang merupakan "Kunci Ilmu Pengetahuan". Semoga Allah membimbing saya dan kita semua untuk terus dapat melakukan perintah tersebut. Amiiin....

Materi pidato yang akan saya sampaikan ini adalah tentang taksonomi, yang selama ini dikenal sebagai ilmu untuk menggolonggolongkan makhluk hidup. Sebagai suatu ilmu, taksonomi tidak berdiri sendiri, namun memerlukan dukungan ilmu lain. Salah satu ilmu yang berperan sangat penting dalam taksonomi adalah genetika, karena morfologi makhluk hidup ditentukan oleh gen dan dipengaruhi oleh lingkungan, sehingga taksonomi sangat erat kaitannya dengan gen yang dipelajari dalam bidang ilmu genetika.

Bapak, Ibu, Hadirin yang saya hormati

Genetika pada umumnya diartikan sebagai cabang ilmu biologi yang mempelajari tentang cara menurunnya sifat pada makhluk hidup, atau ilmu yang mempelajari sifatsifat keturunan (hereditas). Pengertian umum tersebut saat ini sudah kurang memadai lagi mengingat kajian dalam bidang genetika cukup luas, di antaranya 1) struktur materi genetik (gen, kromosom, DNA (*deoxyribonucleic acid*), RNA (*ribonucleic acid*), *plasmid*, *episom*, dan *elemen tranposabel*); 2) reproduksi materi genetik (reproduksi sel, replikasi DNA, *reverse transcription*, *rolling circle replication*, *cytoplasmic inheritance*, dan *Mendelian inheritance*); 3) kerja materi genetik (transkripsi, modifikasi pasca transkripsi, kode genetik, translasi, konsep *one gene one enzyme*, interaksi kerja gen, kontrol kerja gen pada prokariotik, kontrol kerja gen pada eukariotik, kontrol genetik terhadap respon imun, kontrol genetik terhadap pembelahan sel, ekspresi kelamin); 4) perubahan materi genetik (mutasi dan rekombinasi); 5) genetika dalam populasi; dan 6) perekayasa materi genetik (Corebima, 2009).

Hampir atau tidak satupun ilmu biologi yang dapat berkembang tanpa konsep genetika, dengan kata lain genetika adalah ilmu biologi yang melingkupi seluruh ilmu hayati. Tidak salah kiranya jika Ayala (1984) mengutip pernyataan seorang ahli genetika terkenal, Theodorus Dobzhansky: *"It is even more certain that nothing in biology is understandable except in the light of genetics. Genetics is the core biological science; it provides the framework within which the diversity of life and its processes can be comprehended as an intellectual whole"*.

Taksonomi sebagai Salah Satu Ilmu yang Didasari Genetika

Salah satu ilmu yang didasari genetika adalah taksonomi, sebagai disiplin ilmu yang mencakup identifikasi, memberi nama dan mengklasifikasikan organisme. Taksonomi berperan penting dalam menyediakan perangkat pengetahuan untuk mengkarakterisasi organisme dan sekaligus merekognisinya dalam rangka memahami keanekaragaman. Taksonomi juga diartikan sebagai ilmu yang mendefinisikan dan mendokumentasikan keanekaragaman biologi, yang mengungkap kesamaan dan perbedaan di antara kelompok organisme sebagai dasar pengetahuan berbagai aspek lain dalam biologi (*National Biological Information Infrastructure*, 2010).

Salah satu tugas taksonomi adalah mendokumentasikan perubahan-perubahan yang terjadi selama evolusi dan merubahnya ke dalam sebuah sistem klasifikasi yang mencerminkan hubungan evolusi (*evolutionary relationship*) dari kelompok-kelompok organisme biologi. Banyak organisme memiliki karakter yang homolog karena memiliki nenek moyang yang sama. Sebagai contoh, suatu spesies yang memiliki lebih banyak kesamaan genetik, jalur metabolisme, dan protein struktural dengan spesies lain akan memiliki hubungan kekerabatan yang lebih dekat dibandingkan dengan spesies lain yang berkerabat jauh. Hubungan evolusi yang direkonstruksi dengan baik dapat digunakan sebagai landasan untuk melakukan penelitian-penelitian komparatif misalnya dalam bidang ekologi dan biogeografi.

Sejarah evolusi dari sekelompok organisme dapat digambarkan dengan diagram bercabang yang disebut pohon filogeni. Terdapat dua pendekatan untuk merekonstruksi hubungan evolusi, yaitu fenetik dan kladistik. Pendekatan fenetik menaksir hubungan evolusi berdasarkan kepemilikan karakter atau ciri yang sama (*overall similarity*) dari anggota-anggota suatu kelompok, sedangkan pendekatan kladistik berdasarkan pada hubungan perjalanan evolusi karakter atau ciri dari setiap anggota suatu kelompok yang sedang dipelajari. Kladistik sering dikenal sebagai filogenetika dan merupakan pendekatan yang umum digunakan di dalam banyak penelitian taksonomi.

Peranan genetika, pada awalnya hanya dipandang sebagai penunjang taksonomi melalui kriterium yang sangat penting, yaitu jumlah dan konstelasi kromosom. Organisme sejenis mempunyai jumlah dan konstelasi kromosom yang sama. Hal ini berarti seorang taksonom diharapkan dapat menghitung jumlah kromosom yang dimiliki suatu organisme, sehingga tidak hanya berdasarkan pendekatan morfologi semata. Pada perkembangannya, genetika tidak saja dipakai sebagai penunjang taksonomi, namun sebagai dasar yang cukup kuat bahkan tidak sedikit taksonom molekuler yang menggunakannya sebagai satu-satunya pijakan kajiannya, melalui aspek yang lebih mendasar yaitu DNA (*deoxyribonucleic acid*), yang akan diulas pada bagian lain pada tulisan ini.

Cara Pandang Taksonom yang Bersandar pada Data Morfologi dan Molekuler

Dari berbagai sumber, Dayrat (2005) menyatakan bahwa taksonomi sedang menghadapi permasalahan kritis dan harus dapat ditentukan bagaimana masa depannya, mengingat diperkirakan masih ada 10 juta spesies yang harus ditangani. Terdapat kebutuhan yang penting untuk melakukan deliniasi spesies, tidak hanya untuk keperluan inventori spesies semata, tetapi yang lebih penting, karena sebagian besar pertanyaan dalam biologi evolusioner (misalnya spesiasi), ekologi (misalnya untuk pengembangan ekosistem), konservasi biologi (misalnya prioritas konservasi) atau biogeografi (misalnya proses diversifikasi) tergantung pada inventori spesies dan pengetahuan tentang spesies. Kebutuhan akan inventori spesies menjadi tanggungjawab tidak hanya oleh para taksonom yang sudah mumpuni tetapi juga berbagai pihak sekalipun dengan pengetahuan yang terbatas, dan untuk lingkup yang terbatas pula. Dalam kaitan keterbatasan tersebut, kajian taksonomi sudah dapat dilakukan beberapa hal, misalnya berdasar morfologi untuk tingkatan inventori (Sulamsi et al., 1994;

Zubaidah, 1996; Zubaidah et al., 2001), pada pengkajian taksonomi yang melibatkan aspek kromosom (Zubaidah, 1997a, 2001; Zubaidah dan Sunarmi, 1998), terkait dengan pengkajian molekuler (Zubaidah dan Kuswantoro, 2007), dan untuk penyusunan filogeni sederhana (Zubaidah, 1997b).

Hadirin yang saya hormati,

a. Pro Kontra antara pendekatan morfologi dan molekuler

Mari kita cermati ayatayat berikut.

- *"Dia menundukkan pula apa yang Dia ciptakan untuk kamu di bumi ini dengan berlainlainan macamnya...." (QS. An Nahl:13).*
- *".... Kami tumbuhkan padanya segala macam tumbuhan yang indah dipandang mata. Untuk menjadi pelajaran dan peringatan bagi tiap hamba yang kembali (mengingat Allah)." (QS. Qaaf: 7 8).*
- *".... Kami tumbuhkan dengan air itu bermacam-macam tumbuhan, kemudian Kami keluarkan daripadanya daun-daun menghijau. Kami keluarkan daripadanya bijibijian yang bersusun-susun, dari mayang pohon kurma. (Kami keluarkan) buah kurma dengan tangkainya yang berdekatan dan lagi (Kami tumbuhkan) kebun-kebun dari pokok-pokok anggur, zaitun dan delima, yang serupa dan tiada yang serupa. Kamu perhatikanlah buahnya, bila ia berbuah dan buahnya yang telah masak. Sesungguhnya yang demikian itu menjadi tandatanda bagi kaum mau beriman." (QS. AlAn'am: 99).*
- *"..., lalu Kami keluarkan dengan dia buah-buahan yang bermacam-macam warnanya" (QS. AlFaathir: 27).*
- *"Dan apakah mereka tidak memperhatikan bumi, berapa banyaknya Kami tumbuhkan di bumi itu pelbagai pasangan dari tumbuh-tumbuhan yang baik?" (QS. AsySyu'ara: 7).*
- *"Dan Allah menciptakan semua jenis hewan dari air, maka sebagian ada yang berjalan di atas perutnya, dan sebagian berjalan dengan dua kaki, sedangkan sebagian yang lain berjalan dengan empat kaki. Allah menciptakan apa yang Dia kehendaki. Sungguh, Allah Maha Kuasa atas segala sesuatu (QS. AnNur:45).*

Ayat-ayat tersebut, dan masih banyak ayat lagi, yang menunjukkan bahwa di alam terdapat keanekaragaman makhluk hidup. Tidak ada satupun yang sama persis. Begitu banyak jumlah manusia, hewan, tumbuhan, dan jasad renik, tetapi tidak ditemukan dua individu yang sama persis. Manusia berusaha mempelajari keanekaragaman makhluk hidup tersebut untuk memenuhi kepentingannya. Dalam bidang taksonomi, manusia menemukan, mengidentifikasi, memberi nama dan mengklasifikasikan makhluk-makhluk tersebut, baik yang masih hidup maupun yang sudah menjadi fosil. Pada bagian lain dari tulisan ini terungkap bahwa masih terdapat sekitar 1,5 sampai 2 juta spesies yang telah dideskripsikan dan terdapat sekitar 5 sampai 10 juta lebih yang masih menunggu dideskripsikan dan diberi nama. Inilah masalah yang sedang dihadapi dunia taksonomi, terutama masalah deliniasi spesies.

Penyelesaian masalah deliniasi spesies seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, menimbulkan perbedaan pendapat antara penyelesaian melalui pendekatan taksonomi berbasis morfologi atau berbasis molekuler (Nudds & Villard, 2010). Perbedaan pendapat tersebut dapat ditemukan dalam berbagai publikasi, di antaranya dalam Ebach & de Carvalho (2010) yang mengutip beberapa pernyataan berikut.

- *"...morfologi semata tidak adekuat untuk identifikasi tingkat spesies..." (Packer et al., 2009).*
- *"...harusnya dipertanyakan cara modern untuk sharing data terutama internet, bagaimana taksonomi molekuler digunakan secara efisien dan meningkatkan keterkaitannya dengan pengguna akhir taksonomi...." (Godfray et al., 2008).*
- *"...para taksonom harus menguasai perangkat baru yang berpotensi berguna (seperti DNA barcode untuk penemuan dan identifikasi spesies) dan merangkul para ahli yang lain..." (Agnarsson & Kuntner, 2007).*

Holynski (2010) menyatakan bahwa pendekatan molekuler seperti DNA barcoding tidak efisien untuk penelitian dasar dan tidak qualified. Ebach & de Carvalho (2010) juga menyatakan kalimatkalimat yang menunjukkan adanya “permusuhan” antara taksonom morfologi dan molekuler, seperti berikut ini.

- *“DNA barcoding does not adhere to best practice in taxonomy simply because it is not taxonomic in nature. Taxonomy, for instance, is purely morphological and not molecular.”*
- *DNA barcoding, by its own admission, is unable to completely do or replace taxonomy, how then, can it discover new species?”*

Para ilmuwan biologi nontaksonomi merasa frustrasi dengan pendekatan tipologis 'kuno' dalam taksonomi spesies. Mereka mempertanyakan apakah saat ini morfologi masih tetap mempunyai peran dalam penyusunan filogeni. Salah satu sumber kefrustasian adalah berlimpahnya perulangan nama spesies karena satu spesies mempunyai lebih dari satu nama, termasuk nama yang meragukan, atau nama yang tidak diketahui penerapannya, yang disebut nomina dubia. Scotland et al. (2003) berpendapat bahwa penggunaan morfologi secara aktif untuk rekonstruksi filogeni sudah mati, tidak diperlukan lagi, dan bahwa filogeni seharusnya hanya menggunakan data molekuler saja. Sejalan dengan pendapat tersebut, Rokas et al. (2003) menyatakan bahwa kita hidup di abad comparative genomics, dan nampaknya tidak cukup banyak nilai jika melakukan rekonstruksi filogeni dengan menggunakan data morfologi lagi. Semakin banyak gen dan genom yang disekuens, yang menghasilkan ribuan atau milyaran informasi, akan memungkinkan munculnya karakter molekuler yang independen untuk memecahkan masalah filogenetika. Sangat cepatnya diperoleh sekuens data dan cepatnya inovasi proses pengolahan data, nampak bahwa tidak akan terlalu lama lagi akan dapat disusun filogeni dari hampir semua spesies yang ada di bumi dengan hanya menggunakan data molekuler saja.

Pernyataan-pernyataan yang ‘mengagungkan’ pendekatan molekuler tersebut dianggap Mishler (2010) kurang bijaksana dan merendahkan nilai karakter morfologi, padahal karakter molekuler juga memiliki ketidakpastian yang sama dalam hal homologi dan analisis karakter, bahkan mungkin cukup homoplastik. Kurang bijaksana juga apabila sebagian komunitas ilmiah menolak penggunaan ideide inovatif dalam taksonomi molekuler seperti DNA barcode, yang aplikasinya dianggap bertentangan dengan penggunaan morfologi.

Cortese et al. (2010) memandang dari sudut lain, yang berpendapat bahwa kedua pendekatan, baik morfologi maupun molekuler samasama diperlukan untuk memperjelas kekerabatan genetik di dalam spesies. Pendapat tersebut didasari pada kenyataan bahwa setiap perangkat data memberikan informasi yang komplemen dengan kekuatan yang lebih besar untuk analisis keanekaragaman genetik, dibandingkan apabila hanya digunakan secara terpisah. Lain halnya dengan Wiens (2004) dan Smith & Turner (2005), dengan keras mereka menepis pendapat yang ‘mendewakan’ pendekatan molekuler, sebab meskipun tak dapat disangkal kelebihan data molekuler, mutlak tetap diperlukan penambahan data morfologi untuk analisis filogeni. Banyak hasil yang “mengejutkan”, di mana berbagai kajian filogenetika molekuler ternyata hasilnya sama dengan kajian berdasar morfologi beberapa dekade yang lalu (Endress et al., 2000), sehingga tidak peduli seberapa kekuatan data molekuler, data morfologi sangat penting untuk kajian filogenetika.

b. Karakter morfologi sebagai penyusun filogeni dalam taksonomi

Para taksonom morfologi, memandang bahwa morfologi semata dapat digunakan sebagai dasar dalam taksonomi. Mengapa data morfologi masih diperlukan? Ada banyak alasan untuk melakukan filogenetika morfologi. Alasan yang paling kuat untuk terus mengumpulkan data morfologi dalam jangka panjang ke depan adalah untuk menyelesaikan hubungan filogenetika taksa fosil dan hubungannya dengan taksa yang masih hidup. Rekonstruksi Tree of Life harus mencakup taksa fosil, dengan mempertimbangkan semua spesies yang pernah mengalami evolusi yang kebanyakan sekarang sudah punah (> 99% berdasarkan perkiraan). Banyak kelompok yang punah tersebut beragam macamnya, dengan lingkup ekologis yang sangat penting dan memiliki perbedaan kekerabatan di lingkungan mereka hidup. Pada masa sekarang dan yang akan datang, hubungan

dari taksa fosil hanya dapat ditentukan melalui analisis filogenetika dengan data morfologi (sekalipun studi molekuler taksa fosil saat ini sangat mengesankan). Pengetahuan tentang kecepatan dan waktu proses makroevolusi taksa hidup dan taksa fosil juga memerlukan informasi filogenetika dari fosil. Meskipun metode yang tersedia memungkinkan diperolehnya data divergensi melalui estimasi data molekuler, namun masih tetap membutuhkan kalibrasi eksternal yang berasal dari bukti fosil. Oleh karena fosil tua jarang yang sama atau sejenis dengan spesies hidup, maka penetapan fosil ke dalam kelompok hidup tidak bisa dilakukan hanya berdasarkan keseluruhan kesamaannya. Estimasi filogeni taksa fosil dan taksa hidup hanya dapat dilakukan dengan menggunakan data morfologi. Berbagai informasi tersebut dipaparkan Wiens (2004) dari berbagai sumber.

Smith (1997) memberi perbandingan kelebihan dan kelemahan analisis filogeni menggunakan data morfologi dan data molekuler. Kelebihan dan kelemahan data morfologi adalah berikut ini. (1) Definisi karakter sulit dan subyektif, tidak jelas petunjuknya untuk penyusunan postulat bahwa homologi adalah bervariasi di antara taksa. (2) Karakter informatif secara filogeni terdapat dalam jumlah yang terbatas, khususnya karakter fosil karena hanya terdapat struktur kerasnya. (3) Karakter morfologi umumnya membentuk suatu kompleks fungsi terintegrasi. Hal tersebut mengakibatkan terbatasnya partisi data. (4) Karakter morfologi fosil tetap bertahan meski dalam kurun waktu lama. Pelibatan data fosil yang berkerabat dapat digunakan untuk penentuan divergensi. Dengan demikian, data morfologi dapat diperoleh sehingga hampir bebas dari post divergence virtually. (5) Karakter morfologi seringkali kompleks dan terbuka evolusi dari berbagai arah. Hal tersebut mengakibatkan penyusunan modeling evolusi secara virtual tidak mungkin tetapi dapat menurunkan kemungkinan konvergensi kecuali pada kasus kehilangan karakter. (6) Terdapat data yang sangat luas pada morfologi dari spesies pada taksa yang lebih tinggi, karakter-karakter tersebut tidak reliabel (karena menunjukkan variabilitas yang ekstrim di antaranya termasuk spesies), dan lebih mudah dikenali.

Wiens (2004) mengasumsikan bahwa untuk masa depan kemungkinan kekerabatan di antara spesies hidup akan dapat dilakukan dengan baik oleh data molekuler, terutama jika tingkat sekuensing genom dan kepunahan spesies terjadi secara cepat. Namun demikian, saat ini hal tersebut belum diketahui dengan jelas, oleh karena itu terdapat sejumlah alasan kuat untuk melanjutkan rekonstruksi filogeni menggunakan data morfologi. Pertama, ada banyak taksa hidup yang masih sulit untuk dipelajari secara molekuler. Misalnya, banyak spesies reptil dan amfibi dikenal dari jumlah spesimen yang sangat terbatas, yang diawetkan sehingga untuk memperoleh data molekuler sangat sulit (misalnya karena fiksasi formalin), dan mungkin tidak pernah dapat dikumpulkan kembali (misalnya karena distribusinya terbatas, perusakan habitat, dan faktor lainnya). Mengingat hal tersebut, satusatunya cara supaya diketahui tentang hubungan spesies ini adalah melalui analisis filogenetika morfologi. Situasi yang sama mungkin ada pada taksa lain, misalnya serangga dan tanaman, dan masih banyak spesies yang yang diketahui hanya dari sebuah spesimen tunggal yang dikumpulkan puluhan tahun yang lalu. Kedua, sampai dicapai tahap di mana semua filogeni molekuler dapat direkonstruksi tanpa kesalahan, masih diperlukan analisis filogeni berbasis morfologi yang teliti sebagai reality check terhadap hasil analisis molekuler. Ada banyak faktor yang menjadi penyebab analisis molekuler untuk rekonstruksi clades yang baik, benar dan didukung dengan statistik yang cukup baik. Faktor tersebut antara lain panjangcabang, deviasi antara gen dan species tree, dan masalah lain seperti adanya kontaminasi dan kesalahan identifikasi spesimen. Membandingkan hasil analisis molekuler dengan filogeni berbasis morfologi

dapat membantu mencegah kesalahan dalam kasus tersebut. Ketiga, secara molekuler masih jauh gambaran semua spesies yang hidup di bumi karena masih kurang data sekuensingnya. Diperkirakan baru sekitar 1,5 juta spesies telah dideskripsikan dan 5 sampai 10 juta lebih yang masih menunggu dideskripsikan.

Wiens (2004) membantah berbagai pendapat yang menyatakan bahwa data morfologi jauh lebih homoplasi dibanding data molekuler. Kajian terbaru menunjukkan bahwa data morfologi rata-rata hanya menunjukkan sedikit homoplasi dibanding data sekuens DNA. Hal tersebut telah banyak dibuktikan, antara lain oleh survai empirik analisis filogenetika data morfologi dan molekuler, meskipun hal tersebut juga bergantung pada posisi genom, gen, atau nukleotida yang

dipertimbangkan. Salah satu bukti diberikan oleh Baker *et al.* (1998) yang menemukan dalam 26 dari 31 kajian menunjukkan bahwa indeks konsistensi data morfologi lebih tinggi yang sangat signifikan ($P = 0,0002$), dibandingkan data molekuler. Yassin *et al.* (2010) juga membuktikan bahwa data nonmolekuler seperti morfologi, geografi, isolasi reproduksi, dan lainnya, jauh lebih relevan dibandingkan data molekuler pada kajian *Drosophila*.

Secara umum, kajian morfologi cenderung murah biayanya, sampling taksonomi dapat lebih banyak, dapat diskoring berbagai karakternya tanpa merusak spesimen, dan satusatunya metode analisis untuk taksa yang sudah punah dari rekaman fosil. Namun demikian, Wiens (2001) juga memaparkan berbagai permasalahan analisis karakter morfologi berdasarkan berbagai sumber. Permasalahan tersebut di antaranya meliputi bagaimana cara mengkonstruksi karakter, apakah variasi karakter interspesies dapat dimasukkan, bagaimana variasi di dalam spesies dikodekan, bagaimana *character states* diurutkan, dan bagaimana pembobotan karakter morfologi yang berbeda tipenya. Perbedaan-perbedaan pilihan dan asumsi sangat penting karena akan mengarahkan pada pohon filogeni yang berbeda. Atas berbagai permasalahan tersebut (seleksi, definisi, delimitasi, dan pengurutan karakter), Wiens's juga telah mengusulkan alternatif pemecahannya seperti berikut ini. Sebagian besar atau beberapa karakter morfologi dideskripsikan variasinya secara kuantitatif (misalnya perbedaan ukuran, bentuk, atau jumlah struktur homolog yang serial) tanpa memperhatikan apakah ahli sistematik akan memilih pengkodean secara kuantitatif atau kualitatif). Dengan demikian, tiga permasalahan mendasar pada analisis karakter (definisi, delimitasi, dan pengurutan karakter) berpotensi untuk terjawab dengan pengkodean karakter kuantitatif, yang dapat dianalisis secara langsung sebagai variabel kontinyu. Terhadap permasalahan penskalaan atau pembobotan karakter kuantitatif secara relatif terhadap karakter kualitatif dan terhadap sesamanya, Wiens mengusulkan tiga alternatif metode pembobotan, yang disebut *betweencharacter scaling*, *betweenstate scaling*, dan *statistical scaling*. Secara detail, ketiga cara tersebut dapat dikaji pada tulisan Wiens (2001).

c. Karakter molekuler sebagai penyusun filogeni dalam taksonomi

Hou *et al.* (2007) menjelaskan bahwa para taksonom molekuler memandang bahwa taksonomi tradisional seringkali gagal merekonstruksi filogenetik karena morfologi hanya menyediakan karakter informatif yang terbatas terutama untuk organisme dengan morfologi tereduksi. Morfologi juga seringkali melewati proses seleksi intensif sehingga umumnya mengalami evolusi paralel dan konvergen. Sebagai konsekuensinya, saat ini taksonom menggunakan teknik molekuler pada kajian mereka dengan tujuan untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan yang tidak dapat dijawab oleh morfologi saja. Perkembangan teknologi molekuler yang cepat dan biaya yang relatif murah, telah menjadikan sekuen DNA sebagai pilihan data yang populer untuk menyusun filogeni. Data DNA berpotensi menyediakan karakter informatif hampir tidak terbatas dan terdapat pilihan untuk menjawab filogeni yang beragam karena gen mempunyai tingkat variabilitas yang berbeda.

Sekuen molekuler menyediakan informasi-informasi baru yang sangat penting yang menyumbang filogeni. Sekuen molekuler tersebut menyediakan sejumlah besar informasi karakter yang tidak dapat disediakan karakter morfologi (Lee, 2004). Vanderpoorten & Shaw (2010) menyatakan bahwa filogenetika molekuler merupakan alat yang sangat berguna untuk memperbaiki hipotesis taksonomi, terutama untuk takson dengan morfologi tereduksi seperti bryofit. Pendekatan molekuler berguna pada kasus variasi morfologi terbatas. Bagianbagian dari genom berevolusi pada tingkat yang berbeda, karena itu dapat digunakan untuk menjawab pertanyaan tentang evolusi pada tingkat hirarki taksonomi yang berbeda.

Smith (1997) menjelaskan kelebihan dan kelemahan data molekuler berikut ini. (1) Definisi karakter sederhana dan objektif, jelas petunjuknya untuk penerimaan suatu proposisi bahwa suatu karakter di antara suatu taksa adalah homolog. (2) Karakter informatif yang potensial secara filogenetika dapat ditemukan dalam jumlah yang banyak dari suatu genom. (3) Variasi gen yang sangat besar dengan fungsi berbeda, memungkinkan partisi data dan dapat digunakan secara terpisah untuk menyusun kekerabatan filogenetika. (4) Data molekuler dapat diperoleh untuk sebagian besar organisme yang masih ada. Evolusi sekuens yang kontinyu dari waktu ke waktu, menghasilkan overprinting dan degradasi sinyal filogenetika dari cabangcabang dalam filogeni. (5)

Perubahan nukleotida terjadi dengan kecepatan yang tinggi sehingga sering terjadi pembalikan. Hal tersebut mempermudah penyusunan modeling evolusi sekuens nukleotida, tetapi juga dapat meningkatkan terjadinya homoplasi. (6) Hanya sebagian kecil taksa yang sudah disekuensing sehingga satu spesies seringkali digunakan untuk mewakili keseluruhan kelompok besar. Pada beberapa kasus tidak mungkin untuk membedakan antara karakter apomorfik yang variabelnya sangat tinggi di antara anggotanya, dan hal itu menunjukkan konsistensi dan stabilitas yang tinggi, juga lebih reliabel. Kelebihan lain dari analisis molekuler adalah meliputi sejumlah besar karakter yang tersedia sehingga analisisnya dapat menghasilkan resolusi yang lebih baik dari analisis morfologi. Lebih penting lagi, data molekuler memperbolehkan pemilihan di antara hipotesis atau kekerabatan dan memperkenankan penempatan taksa yang dipermasalahkan.

DNA *Barcoding* dalam Taksonomi Molekuler

a. DNA *barcoding*

DNA *barcode* adalah sekuens atau urutan basa nukleotida dari DNA atau gen tertentu yang ukurannya pendek, diambil dari bagian satu atau beberapa genom yang terstandar, digunakan untuk identifikasi dan penemuan spesies secara cepat dan praktis (Petit & Excoffier, 2009; Spooner, 2009). Sekuens yang paling banyak digunakan adalah DNA mitokondria untuk hewan dan eukariot lainnya; gen *matK* dan *rbcL* untuk tanaman darat. Contoh sekuens lain, diberikan pada bagian berikutnya dalam tulisan ini. DNA *barcode* dihasilkan oleh kemajuan bidang sekuensing (pengurutan DNA) dan teknologi komputasi. Urutan atau sekuens DNA tersebut digunakan sebagai sumber utama dalam pemahaman evolusi atau kekerabatan genetika. Istilah DNA *barcode* mengisyaratkan bahwa setiap spesies dicirikan oleh suatu sekuens atau urutan DNA unik, sehingga dapat menunjukkan variasi genetik di dalam setiap spesies, juga di antara spesies (Dasmahapatra & Mallet, 2006). Pada akhir dekade ini, sekuens DNA yang lengkap dari berbagai genom telah diperoleh dan telah terkumpul informasi puluhan juta sekuens dari berbagai spesies pada NCBI Genbank (Kumar & Filipski, 2008). Selanjutnya Kumar & Filipski (2008) menjelaskan analisis filogenetika molekuler, setidaknya melalui tahap berikut.

1) *Pemilihan data sekuens DNA*

Sekuens DNA yang akan dibandingkan adalah harus dipastikan memiliki homologi pada setiap organisme yang diteliti, juga harus memenuhi kondisi kuat memiliki orthologous, yaitu memiliki divergensi melalui spesiasi dan bukan melalui duplikasi gen. Terdapat banyak hal yang harus dipertimbangkan untuk tujuan ini. Sebagai contoh, untuk organisme yang berkerabat jauh, sekuens asam amino lebih sering digunakan, sebab sekuens nukleotida berevolusi jauh lebih cepat dari asam amino. Pada sisi lain, sekuens nukleotida dapat lebih informatif, karena memungkinkan adanya perbedaan yang disebabkan substitusi nukleotida yang tidak mengubah asam amino yang dikodekan (*silent substitution*) atau adanya substitusi pengganti. Untuk kajian populasi genetik intraspesifik dan antarspesies yang berkerabat dekat, DNA mitokondria sering digunakan karena bagian dari itu berevolusi lebih cepat dari gen inti sehingga dapat memberikan variasi lebih banyak untuk merekonstruksi sejarah evolusi.

2) *Sequencing dan sequence alignment*

Tahap berikutnya adalah *sequencing* atau pengurutan sekuens DNA dari gen yang telah diperoleh atau gen yang sudah tersedia, serta *alignment* atau penyesuaian posisi (contohnya pada Gambar 1.). *Sequence's alignment* untuk menentukan apakah satu sekuens DNA adalah homolog dengan yang lainnya. *Alignment* yang melibatkan dua sekuens yang homolog disebut *pairwise alignment*, sedangkan yang melibatkan banyak sekuens yang homolog disebut *multiple alignment*. Keberhasilan analisis filogenetika sangat tergantung kepada akurasi proses *alignment*.



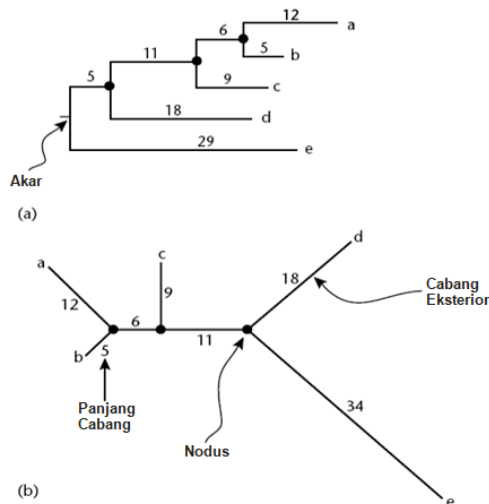
Gambar 1. Suatu alignment sebagian sekuen gen g fibrinogen dari lima mamalia. Mutasi insersidelesi ditunjukkan dengan tanda (-) dan data hilang dengan tanda tanya (?) (Kumar & Filipiski, 2008)

Saat ini, banyak program komputer tersedia secara gratis di internet untuk membantu proses alignment, misalnya ClustalX. Pada studi filogenetika molekuler, tahap ini akan menjadikan, misalnya setiap basa nukleotida (A,C,T,G), menjadi site tertentu yang ekuivalen dengan karakter, seperti karakter lebar daun atau sifat permukaan batang ketika menggunakan data morfologi. Jadi, misalnya diperoleh ukuran sekuen DNA sepanjang 600 pasang basa, maka jumlah karakter yang digunakan adalah sebanyak 600 karakter. Pada proses *alignment* sering ditemukan adanya *gap*, yang ditandai oleh garis putus-putus. *Gap* terjadi karena adanya insersi dan atau delesi. Pada prakteknya, gap bisa dianggap sebagai data yang hilang, walaupun pada banyak kasus *gap* dapat dilibatkan dalam analisis karena bisa bersifat informatif.

3) Rekonstruksi pohon filogenetik

Tahap berikutnya adalah penyusunan pohon filogenetik, yang struktur pentingnya diberikan oleh topologinya, yaitu nodus yang terhubung ke yang lainnya (Gambar 2). Hampir semua metode rekonstruksi menghasilkan pohon filogenetik tanpa akar (Gambar 2b). Beberapa metode rekonstruksi pohon filogenetik telah tersedia, di antaranya *distance method* (DM), *likelihood method* (LM), *Bayesian method* (BM), dan *parsimony method* (PM). Ratusan *software* tersedia untuk semua metode tersebut, baik yang gratis dengan *open source code* maupun yang membayar dengan biaya relatif murah. Sebagai contoh, Joseph Felsenstein menyediakan ratusan daftar program filogeni pada <http://evolution.genetics.washington.edu/phylip/software.html> dan pada referensi Hall (2007) menunjukkan cara melakukan analisis filogenetika molekuler.

Prinsip DM adalah jumlah perbedaan nukleotida antara dua sekuen DNA menunjukkan jarak evolusi yang terjadi. Jarak evolusi dihitung untuk semua pasang sekuen DNA dan sebuah pohon filogenetika direkonstruksi dari jarak atau perbedaan pasangan basa nukleotida tersebut dengan menggunakan kriteria *least square*, *minimum evolution*, *neighbor joining*, dan *distance measure*. Prinsip LM ini adalah bahwa perubahan-perubahan di antara semua basa nukleotida adalah sebanding. Masalah serius dari metode ini adalah waktu perhitungan yang lama, walaupun telah dikembangkan algoritma baru yang dianggap dapat mempercepat proses perhitungan. BM pada dasarnya sama dengan LM, hanya berbeda dalam penghitungan distribusi *prior* untuk membangun pohon filogenetika. Salah satu metode untuk menghitung distribusi *prior* adalah metode MCMC (Markov Chain Monte Carlo). PM berdasar anggapan bahwa perubahan mutasional berlangsung pada semua arah di antara empat basa nukleotida atau 20 asam amino yang berbeda dan, berbeda dengan ketiga metode yang lain, hanya jumlah perubahan basa nukleotida atau asam amino yang terkecil yang dapat memberikan penjelasan yang baik mengenai keseluruhan proses evolusi yang terjadi. Topologi pohon yang dipilih sebagai yang terbaik adalah yang mengalami jumlah perubahan yang paling kecil. Dari keempat metode di atas, PM lebih sering dipilih, antara lain karena pohon yang dibentuk lebih menggambarkan perubahan evolusioner yang terjadi setiap waktu, mengandung asumsi bahwa proses evolusi akan menempuh jalan yang paling singkat (*parsimonious*), dan perhitungan relatif lebih sederhana dan cepat dengan tingkat realibilitas yang tinggi. Penjelasan tentang perhitungan-perhitungan estimasi jarak pada berbagai model dan petunjuknya dapat ditelusuri lebih lanjut pada berbagai sumber, misalnya Saitou & Nei (1987), Nei & Kumar (2000), atau referensi lainnya.



Gambar 2. Pohon evolusi dari lima sekuen (a) dengan akar dan (b) tanpa akar. Panjang cabang digambarkan proporsional sesuai jarak evolusi, yang dapat diekspresikan dalam unit waktu atau jumlah substitusi (Kumar & Filipski, 2008).

4) Uji reliabilitas pohon filogenetika

Tahap berikutnya dari rekonstruksi filogeni adalah menguji reliabilitas pola percabangan yang sudah disusun dan uji topologi antara dua atau lebih pohon yang berbeda berdasarkan perangkat data yang sama. Banyak metode telah dikembangkan untuk menguji reliabilitas, di antaranya *interior branch test* (IB) dan *Felsenstein's bootstrap test* (FB). Prinsip IB adalah estimasi pohon dengan menguji reliabilitas setiap cabang sebelah dalam (*interior branch*). Pada FB, reliabilitas diuji dengan menggunakan metode Efron's *bootstrap*. Penjelasan rinci tentang bootstrap test dan macammacam uji pohon filogenetik lainnya dapat dilihat pada Nei & Kumar (2000) dan Felsenstein (2004).

Terkait dengan alignment data sekuen DNA, Blair & Murphy (2010) mengingatkan para penggunanya bahwa filogenetika yang kuat tergantung pada kualitas MSA (*multiple sequence alignment*). Akurasi determinasi karakter homologi cukup penting untuk mengambil kesimpulan sejarah evolusi, sehingga metode yang optimal harus ditemukan untuk *alignment* sekuen yang divergen. Adanya daerah intronik dan intergenik memerlukan asesmen yang akurat terhadap homologi pasangan basa. Hal tersebut akan menjadi masalah, sekalipun permasalahan data multilokus telah tersedia. Secara tradisional, MSA diperiksa secara manual atau dengan bantuan algoritme komputer. *Alignment* manual (misalnya dengan mata) seringkali relatif lebih baik pada saat mengambil kesimpulan kekerabatan yang menggunakan sekuen pengkode terkonservasi. Namun demikian, *alignment* secara manual pada sekuen nonkoding akan menjadi masalah jika terdapat insersi atau delesi. Stamatakis & Carrasco (2011) mengusulkan adanya program verifikasi agar tidak terjadi kesalahan penyimpulan hasil yang fatal.

b. Sumber data DNA *barcoding*

Sumber karakter DNA yang digunakan dalam taksonomi molekuler dapat diperoleh dari inti (nDNA), kloroplas (cpDNA), dan mitokondria (mtDNA). Beragam wilayah gen telah digunakan untuk taksonomi tingkat spesies, di antaranya ditunjukkan pada Tabel 1 (Hajibabaei *et al.*, 2007). Selain gen *rbcL* yang terdapat dalam genom plastida, yaitu pengkode subunit besar ribulose 1,5biphosphate carboxylase/oxygenase, masih banyak gen lain yang digunakan untuk taksonomi, antara lain: (1) gen *atpβ* yang mengkode ATP synthase βsubunit, (2) *matK* yang mengkode maturase pada proses *slicing* intron tipe II dari RNA transkrip, (3) gen *rpl16* dan *rpl14* yang mengkode subunit besar protein ribosom, dan (4) gengen *noncoding* seperti *trnLF*, gen *accD*, dan *rps16*. Selain telah dicontohkan pada Tabel 1, gen lain dalam inti yang digunakan dalam taksonomi adalah gen 26S rDNA dan 5.8S rDNA, dan

gen mitokondria yang lain adalah *nad1*. Namun demikian, Roy *et al.* (2010) menyatakan bahwa meskipun gen *matK* dan *rbcl* disarankan sebagai *barcode universal*, ternyata tidak dapat digunakan untuk semua genus tumbuhan.

Tabel 1. Beberapa contoh penanda molekuler tingkat spesies yang digunakan dalam kajian filogenetika molekuler (Hajibabaei *et al.*, 2007)

| Gen ^a | Lokasi Genom | Jumlah Sekuen | | | |
|---------------------------------|--------------|-----------------|----------|----------|--------|
| | | Hewan | Tumbuhan | Protista | Jamur |
| COI <i>barcode</i> ^b | Mitokondria | 195.777 | 520 | 1.931 | 410 |
| 16SrDNA | Mitokondria | 41.381 | 221 | 2.059 | 285 |
| <i>Cytb</i> | Mitokondria | 88.324 | 165 | 1.920 | 1.084 |
| ITS1 rDNA | Inti | 12.175 | 57.693 | 68.839 | 56.675 |
| ITS2 rDNA | Inti | 13.923 | 58.065 | 67.332 | 56.349 |
| 18SrDNA | Inti | 21.063 | 17.121 | 32.290 | 33.327 |
| <i>rbcl</i> | Plastida | NA ^c | 30.663 | 37.328 | TD |

Keterangan

- Singkatan Gen a: COI: *cytochrome c oxidase I*; *cytb*, *cytochrome b*; ITS, *internal transcribed spacer*; *rbcl*, *large subunit of ribulose 1,5bisphosphate carboxylase/oxygenase*.
- *bCOIbarcode*: statistik diperoleh dari Barcode of Life Data systems (<http://www.barcodinglife.org>). Statistik untuk lokus yang lain diperoleh dari GenBank. TD= tidak dapat digunakan

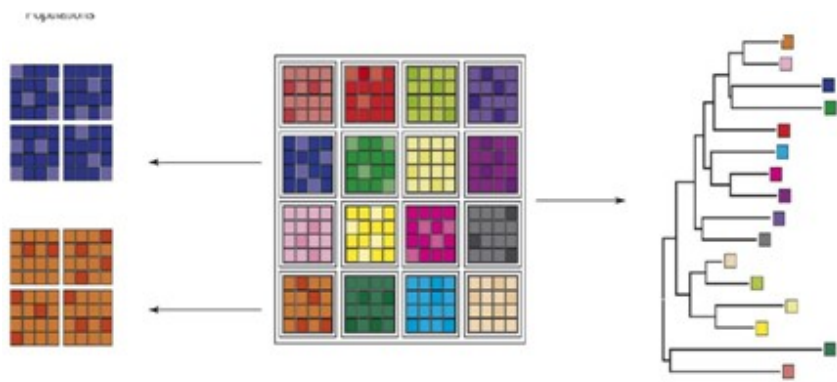
c. Mengapa DNA *barcoding*

Dari berbagai sumber, Casiraghi *et al.* (2010) menjelaskan bahwa DNA *barcoding* adalah alat atau sarana molekuler dan bioinformatika untuk identifikasi spesies biologi. Ide dasar pemanfaatan DNA *barcoding* adalah bahwa melalui analisis variabilitas pada satu (atau beberapa) penanda molekuler terstandar, memungkinkan untuk membedakan entitas biologi (sangat diharapkan merupakan tingkat taksonomi spesies). Metode ini didasarkan pada asumsi bahwa variasi genetik di antara spesies melebihi variasi di dalam spesies. Sebagai konsekuensinya, analisis DNA *barcoding* yang ideal mencerminkan distribusi variabilitas intraspesies dan interspesies yang dipisahkan oleh suatu jarak yang disebut ‘DNA *barcoding gap*’. DNA *barcoding* sesuai untuk dua tujuan, yaitu untuk identifikasi molekuler spesies yang sudah terdeskripsikan maupun untuk spesies yang belum terdeskripsikan.

Hidayat dan Pancoro (2006) memberikan ulasan dari berbagai sumber, bahwa pemikiran dasar penggunaan sekuen DNA dalam studi filogenetika adalah bahwa terjadi perubahan basa nukleotida menurut waktu, sehingga dapat diperkirakan kecepatan evolusi yang terjadi dan dapat direkonstruksi hubungan evolusi antara satu kelompok organisme dengan yang lainnya. Beberapa alasan mengapa digunakan sekuen DNA: (1) DNA merupakan unit dasar informasi yang mengkode organisme; (2) relatif lebih mudah untuk mengekstrak dan menggabungkan informasi mengenai proses evolusi suatu kelompok organisme, sehingga mudah untuk dianalisis; (3) peristiwa evolusi secara komparatif mudah untuk dibuat model; dan (4) menghasilkan informasi yang banyak dan beragam, dengan demikian akan ada banyak bukti tentang kebenaran suatu hubungan filogenetika. Beberapa fakta tentang DNA untuk filogenetika. *Pertama*, sekuen DNA menawarkan data yang akurat melalui pengujian homologi yang lebih baik terhadap karakterkarakter yang ada. *Kedua*, sekuen DNA menyediakan *character states* karena perbedaan laju perubahan basabasa nukleotida di dalam lokus yang berbeda adalah besar. *Ketiga*, sekuen DNA telah terbukti menghasilkan sebuah hubungan kekerabatan yang lebih alami (*natural*).

Analisis perbandingan sekuen DNA saat ini digunakan pada hampir semua bidang ilmu biologi, dari biologi perkembangan sampai epidemiologi (Tibayrenc, 2005), namun dua cabang biologi yang telah mengembangkan alat dan aplikasi yang digunakan untuk menilai kekerabatan biologi dengan sekuen DNA adalah filogenetika molekuler dan genetika populasi (Hajibabaei *et al.*, 2007). Bidang tersebut berfokus pada tingkat organisasi yang berbeda. Kajian filogenetika molekuler

biasanya berurusan dengan hubungan evolusioner antara *clades* yang lebih rendah, sedangkan target genetika populasi adalah variasi di dalam dan di antara populasi dari spesies tunggal. Jika dibandingkan, DNA *barcode* menempati posisi tengah dengan fokus pada penggambaran mereka daripada kekerabatannya (Gambar 3). Perangkat data DNA *barcode* pada dasarnya terdiri dari sekuenseku DNA berukuran pendek dari beberapa individu sejumlah besar spesies (biasanya lima sampai sepuluh individu tiap spesies, tetapi angka ini akan meningkat di masa depan) (Gambar 3). DNA *barcode* telah diketahui efektivitasnya pada kajian beberapa hewan, seperti burung, ikan, lembu, labalaba, udangudangan (Hou *et al.*, 2007), semut (Steiner *et al.*, 2010), kelelawar (Galimberti, *et al.*, 2010), porifera (Reveillaud, *et al.*, 2011), odonata (Damm, *et al.*, 2010), dan beberapa anggota Lepidoptera (Craft, *et al.*, 2010). Sistem DNA *barcode* juga telah dimanfaatkan untuk kelompok organisme lainnya, termasuk berbagai tanaman (misalnya kapas, buncis, mentimun, kacang tanah, *switchgrass* [Cortese *et al.*, 2010]), lilililian (Shiwari & Shinwari, 2010), makroalga, jamur, protista dan bakteri.



Gambar 3. Posisi relative DNA barcode terletak di antara genetika populasi dan filogenetika (Hajibabaei et al., 2007). Setiap kotak kecil mewakili satu individu. Perbedaan warna menunjukkan perbedaan spesies dan perbedaan di dalam spesies ditunjukkan dengan variasi bayangan warna.

Frezal & Leblois (2008) merinci kegunaan DNA *barcode* sebagai berikut. (1) DNA *barcode* menjadi pendukung berbagai domain sains (misalnya ekologi, biomedik, epidemiologi, biologi evolusi, biogeografi, biologi konservasi, dan bioindustri). (2) DNA *barcode* meningkatkan kemampuan survai yang bertujuan untuk deteksi spesies dan identifikasi spesies patogen yang berperan dalam bidang medik, ekologi, dan agronomi. (3) Dapat mengenali, mendeteksi, dan melacak keberadaan organisme paten pada agrobioteknologi atau untuk perlindungan hak kekayaan intelektual *bioresources*. (4) DNA *barcode* berguna untuk determinasi identitas taksonomi pada organisme yang telah rusak atau terfragmentasi seperti pada makanan dan ekstrak dalam perut, sehingga DNA *barcode* berguna bagi industri makanan, analisis diet, forensik, pencegahan perdagangan spesies *illegal* dan spesies yang membahayakan. (5) Identifikasi molekuler diperlukan jika tidak ada alat untuk membandingkan spesimen dewasa dengan spesimen *immature* (misalnya larva ikan, amfibi, coleoptera atau tahap seksual jamur), sementara karakter morfologinya tidak jelas digunakan untuk membedakan spesiesnya, atau spesies mempunyai daur hidup yang polimorf dan/atau menunjukkan plastisitas fenotip. Hajibabaei *et al.* (2007) menyimpulkan bahwa DNA *barcode* dapat memberikan kontribusi yang kuat untuk penelitian taksonomi dan keanekaragaman hayati, jika sekuens DNA *barcode* terakumulasi, maka data tersebut akan memberikan perspektif genomik 'horizontal' yang unik dengan implikasi luas.

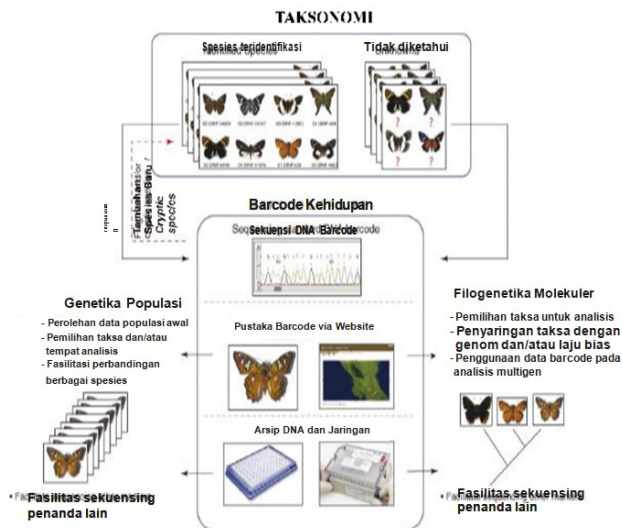
d. Alur kerja DNA *barcode*

Identifikasi spesies melalui DNA *barcode* biasanya dilakukan dengan pengambilan sekuens DNA pendek – sebagai '*barcode*' – dari suatu bagian genom yang terstandar (yaitu wilayah gen yang spesifik) dari spesimen yang diteliti (sebagai contoh, lihat kembali Tabel 1.). Sekuens *barcode* dari

masingmasing spesimen yang tidak diketahui kemudian dibandingkan dengan pustaka sekuen *barcode* yang berasal dari individu yang sudah diketahui identitasnya (Gambar 4). Pada gambar tersebut ditunjukkan diagram yang menunjukkan bagaimana pustaka DNA *barcode* dapat mendukung alur kerja taksonomi melalui *highthroughput identification* spesimen yang belum diketahui dan melalui bantuan pemberian gambaran spesies baru atau spesies *cryptic*. Sekuensekuen *barcode* dan data tambahan untuk setiap spesimen dapat diakses melalui database secara online (misalnya BOLD: <http://www.barcodinglife.org>). Informasi tersebut dapat berguna untuk konteks lain seperti filogenetika (proyek *Tree of Life*) dan kajian tingkat populasi. Sebagai tambahan, arsip DNA dan jaringan spesimen dikoleksi oleh proyek *barcoding* guna menyediakan sumber daya untuk penelitian lain. Pada gambar tersebut ditunjukkan, sebuah spesimen dapat diidentifikasi jika sekuen cocok dengan salah satu pustaka *barcode*. Jika tidak, akan menjadi catatan sekuen *barcode* baru pada spesies tertentu (yaitu suatu haplotype baru atau varian geografis), atau dapat diduga sebagai suatu spesies baru (Hajibabaei *et al.*, 2007).

Prinsip Gambar 4., DNA *barcoding* berkontribusi terhadap penelitian taksonomi, genetika populasi, dan filogenetika. Pada taksonomi, DNA *barcoding* dapat digunakan untuk rutinitas identifikasi spesimen, juga untuk memperjelas atau memperkuat penelitian taksonomi yang komprehensif. Pada penelitian filogenetika, DNA *barcoding* dapat digunakan sebagai *starting point* untuk pemilihan taksa secara optimal, selain itu sekuen DNA *barcode* juga dapat ditambahkan kepada perangkat data sekuen untuk analisis filogenetika. Pada penelitian genetika populasi, DNA *barcoding* menyediakan suatu *first signal* untuk kajian divergensi populasi dan memfasilitasi kajian perbandingan diversitas populasi pada berbagai spesies.

Hajibabaei *et al.* (2007) berpendapat bahwa meskipun perannya dalam mengidentifikasi spesimen ke tingkat spesies cukup penting pada alur kerja taksonomi (Gambar 4), DNA *barcode* bukan pengganti untuk analisis taksonomi yang komprehensif. Sebagai contoh, apabila sebuah spesimen yang belum diketahui tidak ada catatan yang sesuai pada pustaka *barcode*, sekuen *barcode* tersebut tidak memenuhi syarat untuk menjadi spesies baru. Sebaliknya, spesimen perlu dianalisis taksonomi secara menyeluruh. Bila dilihat dalam konteks kerangka kerja taksonomi tradisional yang biasanya jauh lebih lambat dibandingkan analisis *barcode* spesimen tersebut sangat berpotensi menjadi temuan spesies baru. Dengan demikian, meskipun banyak keuntungan dari data molekuler, maka pemikiran kritis yang sistematis terus dikembangkan dalam taksonomi morfologi, terutama bagi kelompok kurang diketahui (Wiens, 2004).



Gambar 4. Komponen proyek Barcode of Life dan kontribusinya terhadap taksonomi, rekonstruksi filogeni molekuler dan penelitian genetika populasi (Hajibabaei *et al.*, 2007). Gambar kupukupu diambil dari database Daniel Janzen and Winnie Hallwachs (<http://janzen.sas.upenn.edu/>)

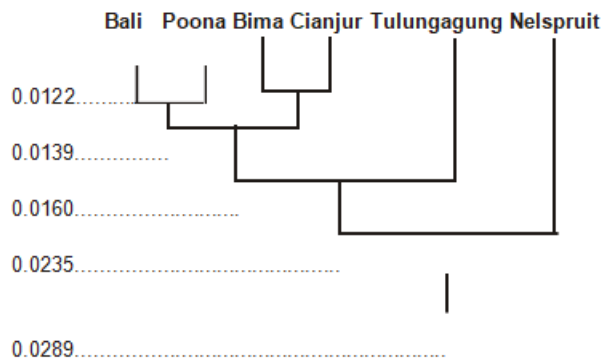
Pembandingan Hasil Kajian Morfologi dan Molekuler

Pada bagian sebelumnya, dapat diketahui bahwa pendekatan morfologi maupun molekuler sebenarnya samasama mempunyai kelebihan maupun kekurangan dalam proses kerjanya, maupun pada hasil yang diperolehnya. Permasalahan lain yang ditemukan pada hasil yang didapatkan dari kedua pendekatan tersebut dicontohkan berikut ini. Pada kajian filogenetika molekuler, permasalahan pada hasil yang ditemukan adalah sangat kecilnya jumlah sekuen dibandingkan jumlah total genom, acaknya perubahan sekuen DNA, netralitas evolusi molekuler, perbedaan laju perubahan karakter, dan ketiadaan jam molekuler yang universal. Didukung pendapat berbagai ahli, DeSalle (2006) menyatakan bahwa tidak cukup kuat bukti jika sekuen pendek DNA digunakan sebagai karakter untuk diagnostik karakter. Spesies harus didiagnosis melalui berbagai karakter yang berbeda dan tetap. Ditandaskan pula, informasi sekuen DNA tanpa dukungan bukti lain, tidak akan dapat digunakan sendiri sebagai indikator delimitasi spesies. Begitu pula dengan kajian morfologi, hasilnya tidak dapat digunakan sendiri tanpa dukungan buktibukti lain. Hal ini yang menyebabkan hipotesis tentang unit spesies memerlukan pengujian sains. Jika hanya dilihat dari sekuen DNA kemudian suatu organisme disebut sebagai suatu spesies tanpa pengujian suatu hipotesis secara menyeluruh, akan dikesampingkan oleh ahli sains dalam taksonomi. Sekuen DNA akan dapat digunakan untuk taksonomi dan delimitasi spesies jika didukung buktibukti lain untuk memperkuat hipotesis atau sebagai *starting point* untuk pengujian lebih lanjut dengan bantuan berbagai cara lainnya.

Pembandingan data molekuler dan morfologi juga akan menghindari dari 'kesesatan'. Wiens (2004) memberikan contoh, yang akan dipaparkan berikut ini. Sites *et al.* (1996) menunjukkan filogeni kadal iguanid berdasarkan urutan mtDNA dari gen ND4, yang ternyata bertentangan dengan *pohon kehidupan* yang didasarkan pada morfologi (de Queiroz, 1987). Sumber penting inkongruensinya adalah posisi *Cyclura*. Data ND4 menempatkan *Cyclura* pada posisi dasar *pohon* iguanid, sedangkan data de Queiroz menempatkan *Cyclura* bersama iguana. Studi morfologi berikutnya dengan menggunakan banyak karakter tambahan, ternyata sangat mendukung clade *Cyclura* + Iguana (Hollingsworth, 1998). Analisis yang didasarkan pada dua perangkat data mtDNA tambahan memberikan hasil yang bertentangan, yaitu sitokrom b mendukung *pohon* berdasar ND4 (Petren dan Case, 1997), sedangkan sekuen ribosom (12S, 16S) mendukung clade *Cyclura* + Iguana (Rassmann, 1997). Analisis lebih lanjut dan parametrik simulasi (Wiens dan Hollingsworth, 2000) menunjukkan bahwa penempatan dasar *Cyclura* kemungkinan berdasar pada artefak *longbranch attraction* di antara gengen pengkode protein yang cepat berkembang di antara keduanya, yang berhubungan dengan laju percepatan perubahan dalam gen *Cyclura*. Nampaknya masalahnya terdapat pada sitokrom b yang mempunyai tingkat divergensi lebih tinggi (Meyer, 1994). Dari hasil tersebut diperoleh beberapa hal menarik: (1) ketidaksesuaian hasil antara dua perangkat data molekuler, dan analisis gabungan dari ketiga perangkat data molekuler oleh *longbranch attraction*; (2) *longbranch attraction* bisa menimbulkan masalah bahkan dalam sampel kelompok spesies berkerabat dekat, dan (3) analisis data molekuler semata, nampaknya menyebabkan kesalahan penempatan filogenetika *Cyclura*, yang terdeteksi karena ketidakcocokan dengan analisis filogenetika morfologi.

Contoh lain yang memerlukan kajian lebih lanjut adalah hasil penelitian Zubaidah (2004) yang menunjukkan bahwa analisis gen 16S rDNA bakteri *Liberibacter asiaticus* dari empat daerah di Indonesia (Bali, Bima, Cianjur, dan Tulungagung), dibandingkan dengan *type strain* *L. asiaticus* strain Poona (India) dan *L. africanus* strain Nelpruit (Afrika Selatan), menghasilkan dendrogram hubungan kekerabatan seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Dendrogram tersebut menunjukkan bahwa berdasarkan sekuens 16S rDNA, bakteri CVPD dari Bali mempunyai hubungan kekerabatan dengan bakteri strain Poona dengan jarak 0,0122. Bakteri dari Bima mempunyai hubungan kekerabatan dengan bakteri dari Cianjur dengan jarak 0,0139. Bakteri kelompok Bali dan India mempunyai hubungan kekerabatan dengan bakteri kelompok Bima dan Cianjur dengan jarak 0,0160. Kelompok bakteri Bali, Poona, Bima, dan Cianjur, mempunyai hubungan kekerabatan dengan bakteri dari Tulungagung dengan jarak sebesar 0,0235. Bakteri dari Bali, Poona, Bima, Cianjur dan Tulungagung merupakan satu kelompok yang mempunyai hubungan kekerabatan dengan bakteri strain Nelspruit dengan jarak sebesar 0,0289. Hal tersebut sebenarnya menunjukkan 'keanehan'. Secara logis, bakteri yang berasal samasama dari Indonesia sebenarnya berpeluang lebih dekat kekerabatannya

karena mendiami wilayah yang lingkungannya tidak jauh berbeda bila dibandingkan dengan bakteri asal Poona (India). Namun demikian, analisis gen tersebut menunjukkan justru bakteri dari Bali lebih berkerabat dengan bakteri dari Poona (India).



Gambar 5. Dendrogram hubungan kekerabatan bakteri dari Bali, Bima, Cianjur, Tulungagung, Poona (India), dan Nelspruit (Afrika Selatan) berdasarkan analisis sekuens 16S rDNA

Pembandingan juga telah dilakukan untuk macam organisme yang lain, dengan hasil yang beragam seperti contoh berikut. Galimberti *et al.* (2010) mengkaji spesies spesies kelelawar di Italia yang telah teridentifikasi dengan pendekatan morfologi, kemudian dibandingkan dengan data molekuler (DNA *barcoding*) menggunakan sekuens *cox1*. Hasilnya menunjukkan bahwa kedua pendekatan identifikasi mempunyai koherensi yang kuat untuk hampir semua spesies yang diteliti; DNA *barcoding* mempunyai reliabilitas tinggi dan efisien untuk pembedaan spesies spesies kelelawar tersebut. Hasil tersebut serupa dengan Pereira *et al.* (2010), bahwa analisis morfologi dan molekuler ternyata meningkatkan penilaian tentang keanekaragaman dan pengembangan taksonomi nematoda laut. Agak berbeda dengan kedua hasil tersebut, Spooner (2009) menggunakan DNA *barcoding* dengan ITS (*internal nontranscribed spacer of nuclear ribosomal DNA*), gen *trnHpsbA*, dan *matK*, ternyata tidak berhasil membedakan antar spesies pada marga *Petota* (kentang liar). Hal tersebut disebabkan ITS mempunyai terlalu banyak variasi intraspesifik dan penanda plastid kurang memiliki cukup polimerisme. Dinyatakan bahwa ternyata penggunaan DNA *barcoding* dalam hal ini kurang cukup untuk delimitasi spesies. Contoh lain, Kadkhodaei *et al.* (2011) membandingkan matriks similaritas antara data yang diperoleh dengan data morfologi dan data molekuler tanaman almond di Iran. Hasilnya menunjukkan koefisien korelasi yang rendah antara dua macam data tersebut, namun demikian para peneliti dapat mengetahui adanya keanekaragaman genetik sebagai dasar seleksi untuk pembentukan kultivar baru, konservasi dan program pemuliaan.

Pembandingan data molekuler untuk taksa hidup dan data morfologi untuk taksa fosil juga pernah dilakukan Wiens (2009, 2010) melalui serangkaian simulasi kombinasi data dengan tujuan meningkatkan akurasi filogenetik secara tidak langsung. Selanjutnya dilakukan pembandingan sebelum dan sesudah ditambahkan data molekuler, yang hasilnya cukup beragam. Pertama, akurasi taksa fosil mengalami **peningkatan** dengan penambahan data molekuler sampai 100%. Kedua, **tidak terjadi peningkatan** akurasi karena taksa fosil jauh lebih banyak dibandingkan taksa hidup dalam analisisnya. Ketiga, terdapat beberapa kasus di mana akurasi justru mengalami **penurunan** secara signifikan dengan penambahan data molekuler. Dengan demikian jelas bahwa kombinasi data morfologi dan molekuler hasilnya terentang dari akurasi tinggi sampai rendah, namun secara umum menunjukkan peningkatan potensi untuk rekonstruksi filogenetik taksa fosil.

Sudut Pandang Genetika terhadap Taksonomi

Pada bagian sebelumnya telah kita ketahui bahwa terdapat 'hiruk pikuk', perbedaan pendapat atau pandangan mengenai dasar yang dapat digunakan untuk taksonomi makhluk hidup. Semua pandangan tersebut tidak dapat dilepaskan dari genetika. Seperti telah dijelaskan pada awal

tulisan ini, genetika mendasari segala ilmu hayati termasuk taksonomi, baik taksonomi yang berpegang pada pendekatan morfologi maupun pendekatan molekuler. Dukungan atau penjelasan dari sudut ilmu genetika tentang kedua pendekatan tersebut akan dipaparkan pada bagian ini, yang diambil pada berbagai bagian dari tulisan Corebima (1997, 2011) berdasarkan referensi-referensi pendukung.

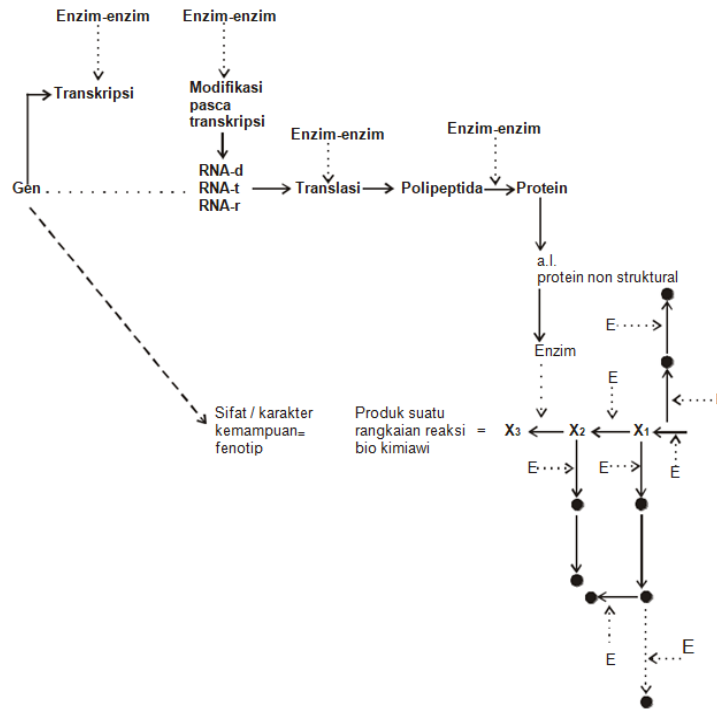
Morfologi adalah salah satu bentuk fenotip makhluk hidup, selain fisiologi dan tingkah laku, sebagai suatu kenampakan makhluk hidup. Selain fenotip, makhluk mempunyai genotip, yaitu konstitusi genetik yang telah diwarisi makhluk hidup. Fenotip juga diartikan sebagai “*karakter-karakter yang dapat diamati pada suatu individu (yang merupakan hasil interaksi antara genotip dan lingkungan tempat hidup dan berkembang)*”; dan genotip diartikan sebagai “*keseluruhan jumlah informasi genetik yang terkandung pada suatu makhluk hidup*”, ataupun “*konstitusi genetik dari suatu makhluk hidup dalam hubungannya dengan satu atau beberapa lokus gen yang sedang menjadi perhatian*”. Selama hidupnya suatu makhluk hidup, fenotip dapat berubah tetapi genotip tetap konstan.

Penampakan morfologi yang merupakan fenotip dari suatu organisme adalah hasil proses metabolisme yang terjadi di dalam setiap sel penyusun organisme tersebut. Keragaman morfologi di antara individu anggota suatu populasi sangat tergantung dari keragaman proses dan hasil metabolisme yang terjadi pada masing-masing individu, misalnya perbedaan warna bunga dari satu varietas dengan varietas lain tergantung dari proses metabolisme yang terjadi di dalam sel dari varietas yang bersangkutan. Proses metabolisme di dalam sel merupakan reaksi biokimia yang dikatalisis oleh enzim tertentu, sehingga keragaman proses dan hasil metabolisme ditentukan oleh enzim yang terlibat dalam reaksi tersebut. Keragaman enzim (baik struktur maupun susunan asam aminonya) itu sendiri sangat ditentukan oleh susunan cetaknya yaitu DNA. Ruas DNA yang menjadi cetakan untuk mensintesis enzim (protein) disebut dengan **gen**, sehingga gen merupakan pengendali proses metabolisme atau pengendali kehidupan. Keragaman morfologi suatu organisme merupakan penampakan keragaman gennya.

Gen adalah suatu segmen DNA yang terlibat dalam pembentukan suatu rantai polipeptida; termasuk daerah yang mendahului dan mengikuti daerah pengkode (*leader* dan *trailer*) maupun sekuen *intervening* (intron) di antara segmen pengkode (*exon*) (Lewin, 1998). Keseluruhan atau sebagian dari segmen DNA tersebut dapat diurutkan, dan urutan atau sekuen DNA itulah yang dijadikan dasar oleh taksonom molekuler terutama melalui DNA *barcoding*nya.

Seperti telah dipaparkan, karakter atau sifat ditentukan oleh unit karakter yang disebut faktor (gen). Karakter atau sifat tersebut muncul sebagai produk rangkaian reaksi biokimiawi, yang setiap tahap reaksinya dikatalisis oleh enzim; dan protein enzim itu tersusun dari polipeptida–polipeptida yang pembentukannya dikontrol oleh faktor (gen). Terdapat karakter atau sifat makhluk hidup yang dikontrol oleh hanya satu faktor (gen), karakter atau sifat yang dikontrol oleh lebih dari satu faktor (gen), dan ada pula faktor yang ternyata mengontrol lebih dari satu karakter (sifat).

Perhatikan Gambar 6. Pada gambar itu terlihat bahwa bagan reaksi biokimiawi merupakan reaksi yang bercabang-cabang. Satu hasil reaksi di suatu tahap akan menjadi substrat pada tahap reaksi berikutnya. Dalam hubungan ini konsepsi yang menyatakan bahwa karakter (sifat) ditentukan oleh satu unit karakter (faktor atau gen) dipandang benar dalam batas tingkat (tahap) reaksi biokimiawi tertentu yang memunculkan karakter (sifat) seperti termaksud. Namun demikian, “*Harus digarisbawahi bahwa gengen tidak bekerja dalam keadaan terisolasi (sendirisendiri). Fenotip akhir dari suatu makhluk hidup merupakan hasil dari kerja, dan interaksi antara sejumlah besar gen*”. Pada dasarnya sifat atau kemampuan (fenotip) apapun dikendalikan oleh lebih dari satu gen (pada lokus yang berbeda), tersebar atau tidak tersebar. Dengan demikian sifat atau kemampuan (fenotip) apapun, sesungguhnya adalah hasil interaksi antara gen (pada lokus yang berbeda) pada mekanisme ekspresinya.



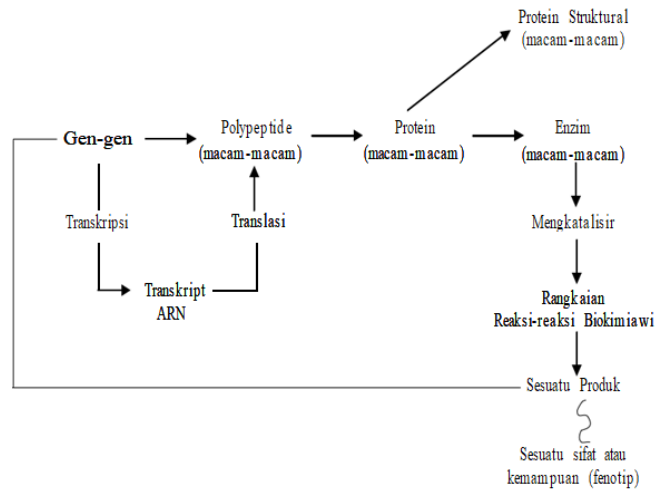
Gambar 6. Contoh bagan urutan reaksi biokimiawi pada eukariotik yang memperlihatkan bagaimana faktor (gen) mengontrol karakter makhluk hidup (Corebima, 1997).

Karakter atau sifat individu makhluk hidup menunjukkan variasi yang tinggi, yang kemudian dikelompokkelompokkan dalam taksonomi. Di antara individuindividu sejenis atas dasar sifatsifat tertentu yang dimiliki, dikenal dua macam variasi yaitu variasi terputusputus (*discontinuous variation*) dan variasi tidak terputusputus (*continuous variation*). Pada variasi yang terputusputus berdasarkan sifatsifat tertentu, individuindividu sejenis mudah dibedakan dalam kelompokkelompok yang terlihat berbeda tegas satu sama lain; sedangkan pada variasi yang tidak terputusputus, berdasarkan sifatsifat tertentu yang lain, individuindividu sejenis tidak mudah dibedakan dalam kelompokkelompok karena batas antara kelompok tidak tegas. Sifat yang memperlihatkan variasi yang tidak terputusputus disebut juga sebagai sifat kuantitatif (*quantitative traits*). Variasi sifat atau karakter yang dapat diindera inilah yang digunakan oleh taksonom dengan pendekatan morfologi dalam kerjanya.

Terdapat hipotesis bahwa variasi yang tidak terputusputus dijumpai pada tiap sifat yang dikontrol oleh beberapa faktor (gen), atau bahkan oleh banyak faktor (gen) sekaligus; dan tiap faktor (gen) termaksud memiliki efek kumulatif. Dalam hubungan ini terlihat pula bahwa tiap faktor secara individual mempunyai sedikit peranan terhadap sesuatu sifat, tetapi bersama faktor lain secara kumulatif akan mengontrol suatu sifat bersama sehingga “tampak” berkisar dalam satu rentangan. Faktorfaktor yang demikian disebut *polygene*. Sesuatu sifat atau kemampuan (fenotip) apa pun sebenarnya **tidak hanya** ditentukan oleh ekspresi gengen (pada lokus yang berbeda) yang saling berinteraksi; akan tetapi ditentukan pula oleh kondisi lingkungan yang melingkupi seluruh proses ekspresi gengen tersebut. Secara umum, mekanisme gen mengendalikan sifat atau kemampuan (fenotip) ditunjukkan pada Gambar 7.

Pada Gambar 7, terungkap aneka ragam peristiwa yang lain; dan tiap peristiwa itu sesungguhnya adalah tahaptahap reaksi biokimia. Dalam hubungan ini peristiwa transkripsi dan translasi, masingmasingnya sudah merupakan proses rumit yang secara teknis merupakan reaksi biokimia tersendiri. Demikian pula pembentukan protein dari polipeptida (jika protein itu tidak hanya terdiri dari satu polipeptida). Protein berubah menjadi enzim juga tergolong reaksi biokimia; dan pada akhirnya rangkaian reaksi reaksi biokimia seperti yang jelas tertulis (terbaca) pada bagan itu. Berpegang pada telaah terakhir ini, makin jelas terlihat bahwa, jumlah gen yang mengendalikan

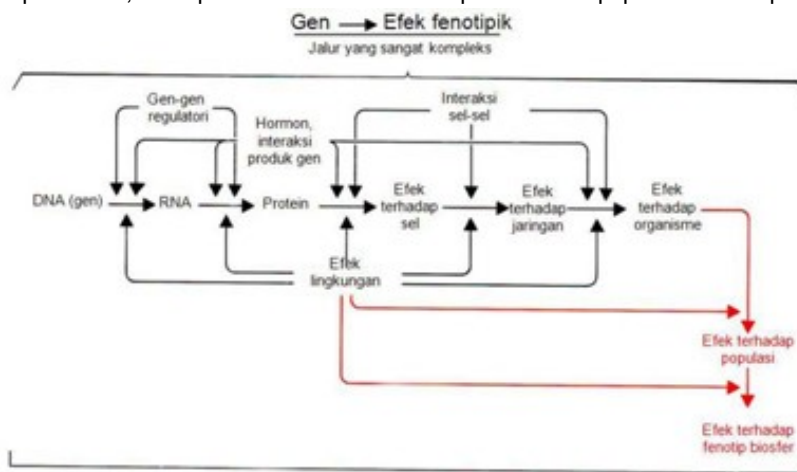
sesuatu sifat atau kemampuan (fenotip), sesungguhnya banyak dan mungkin sangat banyak; dan bahkan barangkali dapat dikatakan pula bahwa tidak ada satupun sifat atau kemampuan (fenotip) makhluk hidup yang dikendalikan hanya oleh satu gen.



Gambar 7. Bagan umum rangkuman tentang mekanisme gen-gen mengendalikan sesuatu sifat atau kemampuan (fenotip) (Corebima, 2011).

Secara faktual metabolisme dalam sel adalah proses-proses reaksi biokimia yang terjadi susulmenyusul, melalui urutan-urutan reaksi kimia; tiap tahap reaksi kimia itu dikatalisasi oleh suatu enzim spesifik di bawah kontrol gen. Dalam hubungan ini secara sederhana dapat dinyatakan bahwa alur kontrol gen terhadap reaksi biokimia dalam sel (metabolisme) adalah gen mengontrol pembentukan polipeptida (protein) enzim, sebagai katalisator tiap tahap reaksi biokimia. Pada sudut pandang tertentu produk reaksi biokimia itu adalah tampilan fenotip dari ekspresi gen.

Pada Gambar 8. ditunjukkan alur kontrol atau bagian dari ekspresi gen (pada tumbuhan dan hewan tinggi) dalam tampilan yang lebih rumit. Untuk tumbuhan dan hewan bersel satu maupun makhluk hidup aseluler, bagan pada Gambar 8. itu harus dimodifikasi. Sebagai gambaran, untuk hewan dan tumbuhan bersel satu, tentu saja fenotip terakhir adalah efek pada sel; sedangkan untuk makhluk hidup aseluler, fenotip terakhir bukanlah efek pada sel tetapi pada struktur/partikel aseluler.



Gambar 8. Jalur kompleks pada tumbuhan dan hewan tinggi, yang bermula dari gen menuju ke fenotip yang dipengaruhi oleh gen itu (Corebima 2011, memodifikasi Gardner, dkk., 1991).

Alur kontrol atau bagian dari ekspresi gen seperti tersebut (pada makhluk hidup seluler maupun aseluler) dapat dipilah-pilah menjadi tahap-tahap ekspresi gen. Tahap ekspresi gen yang pertama adalah transkripsi dan tahap yang kedua adalah translasi. Dengan demikian jika diperhatikan bagan pada Gambar 8., maka tahap ekspresi gen yang pertama tersebut adalah antara DNA (gen) → RNA; dan tahap yang kedua adalah antara RNA → protein.

Selepas tahap kedua ekspresi gen tersebut, masih ada tahap-tahap ekspresi gen lanjutan. Pada makhluk hidup eukariotik bersel banyak (tumbuhan dan hewan tinggi), maupun yang prokariotik atau yang eukariotik bersel satu, tahap ke tiga adalah antara protein → efek pada sel. Pada makhluk hidup aseluler, tahap ke tiga adalah antara protein → efek pada struktur/partikel aseluler. Pada makhluk hidup prokariotik, yang eukariotik bersel satu maupun yang aseluler, tahap ke tiga ini sekaligus merupakan tahap terakhir dari ekspresi gen. Setelah tahap ke tiga masih ada tahap keempat dan kelima, tetapi kedua tahap ini hanya ditemukan pada makhluk hidup bersel banyak (tumbuhan dan hewan tinggi). Tahap keempat ekspresi gen pada kelompok makhluk hidup tersebut adalah antara efek pada sel → efek pada jaringan; dan tahap kelima adalah antara efek pada jaringan → efek pada organisme (Perhatikan kembali Gambar 8.).

Keseluruhan tahap ekspresi gen maupun tiap tahap ekspresi gen adalah proses metabolisme; dan dengan demikian sebagaimana yang telah dikemukakan keseluruhan tahap maupun tiap tahap ekspresi gen itu hanya terdapat satu macam proses reaksi biokimia. Hal yang lebih realistis dibayangkan adalah bahwa pada tiap tahap ekspresi gen itu terdapat lebih dari satu (mungkin banyak) macam proses reaksi biokimia; dan setiap proses reaksi biokimia selalu dikontrol oleh gen-gen tertentu yang terkait dalam hubungannya dengan peranan enzim sebagai katalisator. Oleh karena itu jika tahap-tahap ekspresi gen (Gambar 8.) ditampilkan berupa berbagai macam proses reaksi biokimia yang dilengkapi enzim-enzim maupun gen-gen yang terkait, sudah tidak dapat lagi dibayangkan bagaimana rumitnya tampilan tersebut; dan sebenarnya memang demikianlah keseluruhan proses ekspresi gen, atau (pada sudut pandang lain) memang demikianlah proses reaksi biokimia metabolisme.

Para hadirin yang saya hormati,

Jika kita mempelajari berbagai hal yang terkait dengan genetika (dan mungkin pada ilmu lain), akan sering kita dapatkan pada referensi-referensi yang kita baca, terdapat kalimat-kalimat seperti *"The genetic basis of ... is still largely unknown"*, *"The function of ... is still unknown. It is also unclear"*, *"The genetic basis is still not well understood...."*, *".... These processes are still unclear."*, dan semacamnya. Hal tersebut paling tidak bisa kita ketahui dengan melihat rumitnya proses terjadinya atau munculnya morfologi yang beranekaragam seperti telah dipaparkan (yang mungkin juga masih sulit dipahami karena kompleksnya) dan masih banyaknya hal yang tidak atau belum dipahami bahkan belum terungkap. Hal-hal tersebut seharusnya menjadikan kita berpikir, betapa **sedikit yang kita ketahui**. Itulah sebabnya, kita harus tetap belajar memahami bagaimana penciptaan alam ini. Bahwa pengetahuan kita sangat sedikit, memang demikianlah adanya, dan hal tersebut sudah tercantum seperti ayat berikut.

"... dan tidaklah kamu diberi pengetahuan melainkan sedikit" (QS. AlIsra': 85).

"Dan seandainya pohon-pohon di bumi menjadi pena dan lautan menjadi tinta, ditambahkan kepadanya tujuh lautan lagi setelah keringnya, niscaya tidak akan habishabisnya dituliskan kalimat-kalimat Allah. Sesungguhnya Allah Mahaperkasa, Mahabijaksana" (QS. Luqman: 27).

Taksonomi Integratif: Pendekatan yang Lebih Komprehensif

a. Taksonomi integratif

Taksonomi integratif merupakan sebuah cara untuk mengintegrasikan taksonomi tradisional dan DNA *barcode* (Pires Marinoni, 2010). Taksonomi integratif sebagai jalan tengah adanya inkonsistensi dari perdebatan yang melibatkan DNA versus morfologi. Pada taksonomi integratif, pentingnya morfologi diakui dan revitalisasi taksonomi tradisional dicapai dengan penambahan teknologi untuk mengatasi hambatan taksonomi. Taksonomi integratif juga didasari pemikiran bahwa hambatan-hambatan dalam taksonomi diharapkan dapat diatasi dengan adanya berbagai kemajuan

teknologi, seperti akses virtual ke museum koleksi, *highthroughput DNA sequencing*, tomografi komputer, sistem informasi geografis, dan beberapa fungsi dari internet (Vogler & Monaghan, 2007). Informasi taksonomi sudah didigitalkan dan tersedia melalui beberapa inisiatif global, seperti Species2000, The Encyclopaedia of Life (EOL), The Global Biodiversity Information Facility (GBIF), atau ZooBank. Diharapkan masa depan menjadi sebuah "cybertaxonomy" interaktif dengan deskripsi *online* dan publikasi spesies baru yang dinamis, dan tempat di mana informasi taksonomi akan dapat diperbarui dan diakses semua orang dari manapun (Schram, 2004).

b. Mengapa taksonomi integratif

Taksonomi integratif ditujukan untuk menjawab dua tantangan utama taksonomi (Padial *et al.*, 2010), yaitu tantangan kualitatif dan tantangan kuantitatif. Tantangan kualitatif adalah untuk pencapaian konsensus ilmiah tentang kategori dasar bangunan taksonomi spesies dan selanjutnya melakukan delimitasi spesies. Tantangan kuantitatif, adalah banyaknya spesies di bumi yang membutuhkan penemuan dan deskripsi, diperkirakan sedikitnya 10 juta eukariot, dan baru sebagian kecil yaitu sekitar 2 juta yang sudah diberi nama (May & Harvey, 2009). Pendekatan yang paling menjanjikan untuk delimitasi dan identifikasi spesies adalah mengintegrasikan berbagai informasi pada kajian yang sama (Seppa *et al.*, 2011).

Dayrat (2005) menyatakan bahwa pendekatan integratif pada bidang taksonomi diperlukan karena kompleksitas biologi suatu spesies membutuhkan pembatasan spesies yang dipelajari dari berbagai perspektif. Tingkat kepercayaan juga akan didukung jika didasarkan atas bermacam data dibandingkan jika hanya berdasar satu macam data saja. Berbagai metode yang ada untuk deliniasi spesies memerlukan berbagai data tersebut. Kolaborasi berbagai disiplin ilmu seperti filogeografi, anatomi perbandingan, genetika populasi, ekologi dan biologi perilaku harus menjadi praktek standar dalam taksonomi. Secara ideal, tugas taksonomi terutama identifikasi seharusnya dapat dilakukan dengan mudah dan efisien karena pengguna seperti farmasi, fisiologi, konservasi biologi dan ekologi, perlu untuk melakukan identifikasi spesies.

Taksonomi integratif dimunculkan karena sangat dibutuhkan alat identifikasi yang sederhana dan dapat diandalkan membantu memecahkan perselisihan terbaru atas 'DNA *barcode*'. Menurut Hajibabaei (2007), pendukung DNA *barcode* (misalnya Hebert *et al.*, 2003; Tautz *et al.*, 2003; Blaxter, 2004; Gaston & O'Neill, 2004) berpendapat bahwa urutan DNA dari satu (atau beberapa gen tertentu) harus digunakan untuk identifikasi spesies, berdasarkan gagasan bahwa setiap spesies memiliki urutan 'diagnostik' sendiri, yaitu adanya suatu mutasi pasangan basa yang unik, yang mungkin mempunyai beberapa variasi pada suatu urutan DNA tersebut. Pada kasus di mana dapat ditunjukkan adanya urutan penanda molekuler tertentu yang dapat disediakan lebih cepat dan lebih dapat diandalkan daripada identifikasi morfologi, maka tidak ada alasan untuk tidak menggunakan data molekuler. Namun demikian, dalam kasus di mana data morfologi dapat disediakan lebih cepat dan lebih dapat diandalkan, maka tidak ada alasan untuk membuang data morfologi. Kedua sistem identifikasi tidak harus dilihat sebagai saling bersaing atau eksklusif, tetapi lebih sebagai pendekatan untuk tujuan yang sama yang hanya berbeda dalam karakter yang dimanfaatkan.

Sistem identifikasi berbasis DNA hanya dapat bekerja jika urutan 'diagnostik' semua spesies terdapat dalam database. Database yang tidak lengkap hanya akan dapat menentukan apakah urutan DNA yang diberikan pengguna, berbeda dari urutan lain yang sudah tersimpan. Hasil tersebut tidak akan mengidentifikasi spesimen tersebut sendiri dan tidak akan secara otomatis menyiratkan bahwa spesimen tersebut adalah suatu spesies baru. Hal tersebut merupakan 'peringatan' bahwa, pada semua tahapan identifikasi, sistem identifikasi berbasis DNA akan bergantung pada keahlian taksonom 'nonDNA'. Namun demikian, pertanyaan yang paling mendasar dari taksonomi bukan cara untuk mengidentifikasi spesies, melainkan bagaimana **delineasi** mereka.

Istilah *barcoding* menjelaskan bahwa DNA digunakan sebagai suatu *barcode* untuk identifikasi spesies, namun demikian untuk menemukan suatu *barcode* unik untuk identifikasi spesies tertentu, ahli biologi molekuler harus tahu spesies yang dikaji. Biasanya yang telah ditentukan sebelumnya oleh taksonom berdasarkan kriteria morfologi. Alternatif lain seharusnya konsep spesies morfologi secara penuh diabaikan dan kajian keanekaragaman didasarkan pada keanekaragaman sekuen DNA. Permasalahan DNA *barcoding* pada deskripsi spesies baru, andaikata *barcode* spesies

pada genus tertentu sudah diketahui, apakah spesimen baru dengan *barcode* berbeda akan dikatakan sebagai spesies yang baru? Jawabnya adalah tidak, karena konsep spesies bervariasi yaitu memerlukan anggota-anggota individu yang mempunyai *clear gap* karakter tertentu, yang berbeda dengan karakter morfologi dan biologi, dan atau yang berasal dari suatu *common ancestor*. *Barcoding* semata mungkin menunjukkan adanya *clear gap* pada satu karakter. *Barcoding* tidak dapat menentukan dengan jelas hubungan kekerabatan di antara tingkatan divergensi genetik dan reproduktif pada entitas yang terisolasi. Data molekuler dapat sangat berguna pada kasus suatu spesies yang menunjukkan variabilitas morfologi di bawah kondisi lingkungan karena DNA tidak dipengaruhi oleh lingkungan, oleh karenanya *barcoding* tidak dapat digunakan untuk menjawab semua kasus. *Barcoding* memang dapat membandingkan dengan cepat sekuen baru dan yang sudah diketahui dan menentukan jumlah similaritas atau divergensi di antara spesimen atau populasi atau spesies, tetapi *barcoding* tidak dapat menentukan “apakah suatu spesies”?

Donoghue & Sanderson (1992) menyatakan bahwa adalah suatu kesalahan apabila rekonstruksi filogeni mengesampingkan data morfologi dan hanya didasarkan pada bukti molekuler semata. Integrasi data mikromorfologi dan data molekuler telah memperkuat filogeni angiospermae. Data molekuler telah mendukung kelompok monofil yang dikenali berdasarkan morfologi, sehingga mengkombinasikan perangkat data adalah hal yang terbaik. Karakter morfologi dan molekuler masing-masing mempunyai kelebihan dan kekurangan jika digunakan dalam rekonstruksi filogeni atau penilaian variasi di antara populasi. Adanya perbedaan-perbedaan tersebut, meningkatkan penggunaan kedua tipe data tersebut untuk memaksimalkan sejumlah informasi, oleh karenanya akan semakin memperkuat estimasi hubungan kekerabatan. Kedua macam data tersebut berperan penting dalam memperjelas pengetahuan sejarah evolusi dan filogeni.

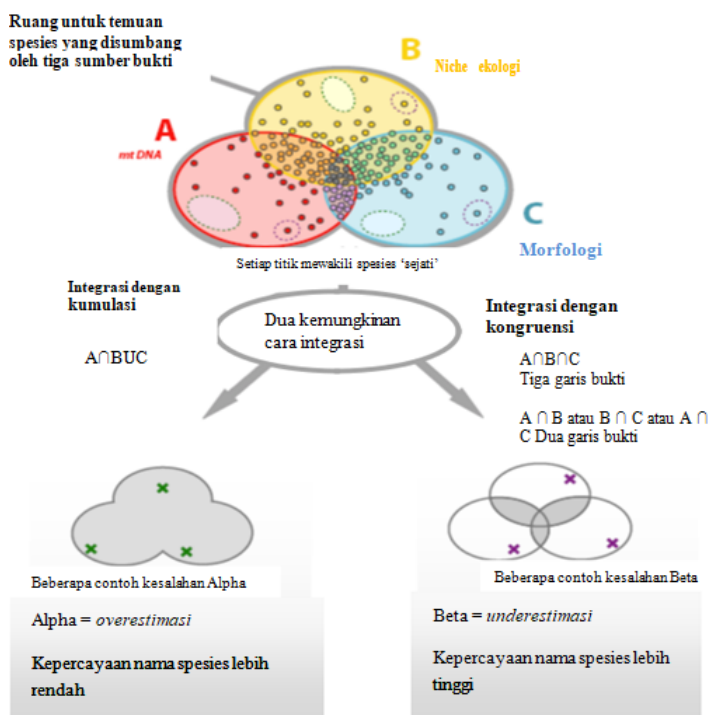
Data molekuler, khususnya data sekuen DNA berguna untuk kajian filogenetika didasarkan pada asumsi bahwa similaritas antara genom individu dapat membantu taksonomi kekerabatan di antara spesies. Data molekuler hanya mempunyai sedikit permasalahan dengan konvergensi dan homologi adaptif, dan dapat mengidentifikasi pola evolusi di antara taksa yang tidak dapat dibedakan, misalnya karena jarak garis keturunan yang cukup jauh (Wiens, 2004). Namun demikian, perbedaan kecepatan evolusi genom dapat menghasilkan rentangan yang cukup luas pada kemungkinan hubungan kekerabatan. Permasalahan perangkat data molekuler individu juga dapat dideteksi dengan cara perbandingan dengan data molekuler lain. Mungkin juga terdapat kasus-kasus di mana perangkat data molekuler dapat memberikan jawaban yang salah (misalnya, sekuensing gen yang berbeda pada *misidentified specimen*). Lebih lanjut, gen yang terkait dengan ciri morfologi yang tertentu harus dikumpulkan sebanyak mungkin informasinya, karena karakter yang diberikan oleh perangkat data molekuler seringkali dihubungkan dan diwariskan sebagai satu unit (yakni, posisi nukleotida dalam gen tunggal).

Beberapa taksonom sama sekali mengabaikan pendekatan morfologi namun secara penuh menggunakan pendekatan molekuler, padahal kajian molekuler semata seringkali hanya memunculkan organisme yang berpotensi sebagai spesies baru yang harus dibenarkan oleh pendekatan terintegrasi dengan menggunakan tipe data yang lain (Luc *et al.*, 2010), seperti data ekologi, fisiologi, tingkah laku dan lainnya, termasuk data morfologi. Data molekuler dapat sangat berguna untuk petunjuk identitas dan kekerabatan di antara spesies, tetapi keanekaragaman keseluruhan organisme dan interaksinya dengan lingkungannya tidak dapat dikurangi oleh keanekaragaman sekuen DNA. DeSalle (2006) juga menjelaskan bahwa pada evaluasi informasi perangkat suatu data, tidak cukup untuk menghitung semua karakter atau sebagai karakter – namun penting untuk mempelajari sejumlah karakter yang relevan terhadap permasalahan yang dikaji. Hasil yang ditunjukkan oleh suatu kriteria yang diaplikasikan, perangkat data morfologi tidak akan dijumpai sebagai data yang lebih kecil atau kurang bila dibandingkan dengan perangkat data molekuler. Kombinasi analisis molekuler dan struktural mungkin akan memberikan hasil yang lebih baik dalam pohon filogeni. Meski dinyatakan bahwa perangkat data morfologi lebih homoplasi dibandingkan perangkat data DNA, jika dikombinasikan dengan perangkat data molekuler akan menghasilkan filogenetika yang lebih kuat dibandingkan dengan kedua macam perangkat data tersebut jika digunakan sendiri-sendiri.

c. Alur kerja taksonomi integratif

Padial *et al.* (2010) menunjukkan dua macam kerangka kerja taksonomi integratif, yaitu "integrasi dengan kongruensi" dan "integrasi dengan kumulasi" beserta kelebihan dan keterbatasannya (Gambar 9). Integrasi dengan kumulasi mengidentifikasi batas spesies dengan divergensi pada satu atau lebih karakter taksonomi yang tidak selalu *overlapping* (misalnya mtDNA atau morfologi).

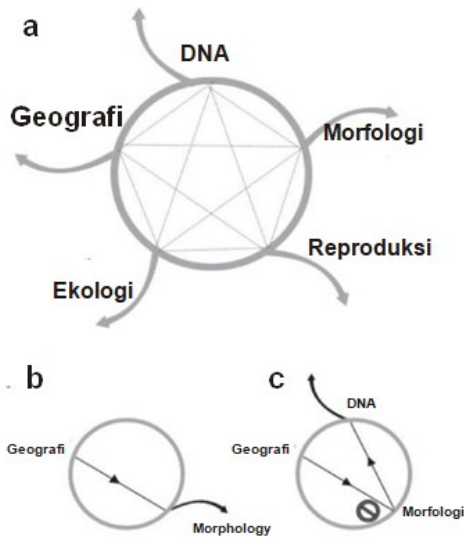
Integrasi dengan kongruensi mengidentifikasi batas spesies melalui interseksi bukti dari dua atau lebih karakter taksonomi independen (misalnya mtDNA dan morfologi). Kedua metode integrasi mempunyai keterbatasan. Integrasi dengan kumulasi dapat mengakibatkan *overestimate* perkiraan jumlah spesies karena identifikasi spesies yang berbeda hanya didasarkan pada variasi karakter intraspesifik. Sebagai contoh, populasi sejenis bisa sangat berbeda morfologinya namun akan keliru dianggap sebagai spesies yang berbeda (kesalahan alfa atau *false positive*). Sebaliknya, integrasi dengan kongruensi adalah pendekatan yang sangat ketat, yang dapat mengakibatkan *underestimate* perkiraan jumlah spesies karena tidak mampu mendeteksi *cryptic species* atau *young species* (kesalahan beta atau *false negative*, pada Gambar 9. diwakili oleh tiga spesies dalam lingkaran, di antara semua yang tidak terdeteksi).



Gambar 9. Skema dua pendekatan taksonomi integrative, integrasi dengan kumulasi (kiri) dan integrasi dengan kongruensi (kanan) (Padial *et al.*, 2010). Latar belakang kuning, merah, dan biru mewakili spectrum variasi karakter, setiap titik menunjukkan sebuah garis evolusi independen, yang memerlukan identifikasi dan pembatasan spesies secara terpisah.

Integrasi dengan kongruensi mengikuti asumsi bahwa polapola yang sesuai pada divergensi di antara beberapa karakter taksonomi menunjukkan pemisahan garis keturunan secara penuh. Para taksonom juga mengharapkan bahwa spesies yang ditemukan akan lebih sering sesuai dengan unit evolusi yang berbeda karena sangat mustahil bahwa pola koheren karakter yang sesuai akan muncul secara kebetulan. Sebagai contoh, DeSalle *et al.* (2005) memberikan ilustrasi dalam diagram kerja bahwa kongruensi antara dua karakter taksonomi adalah faktor penting untuk mencapai suatu kesimpulan tentang status spesies (Gambar 10a10c). Perbedaan kombinasi karakter taksonomi dapat dianggap perlu oleh peneliti yang berbeda untuk mengusulkan dan mendukung spesies (Gambar 11a), seperti kongruensi karakter molekuler dan morfologi (Dayrat, 2005; Cardoso *et al.*,

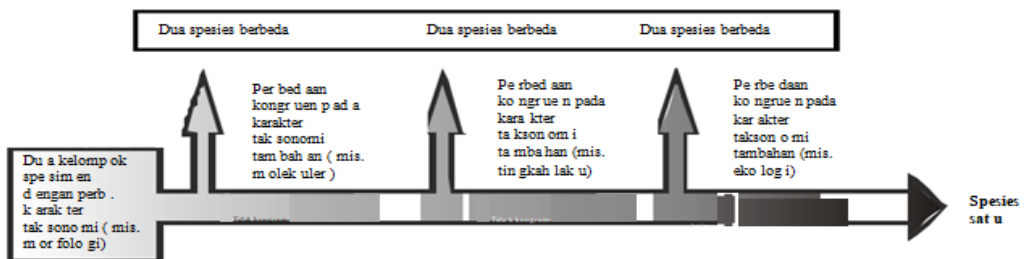
2009), atau bahkan kombinasi lebih ketat membutuhkan bukti tentang isolasi reproduksi (Meiri & Mace, 2007; Alstrom et al., 2008).



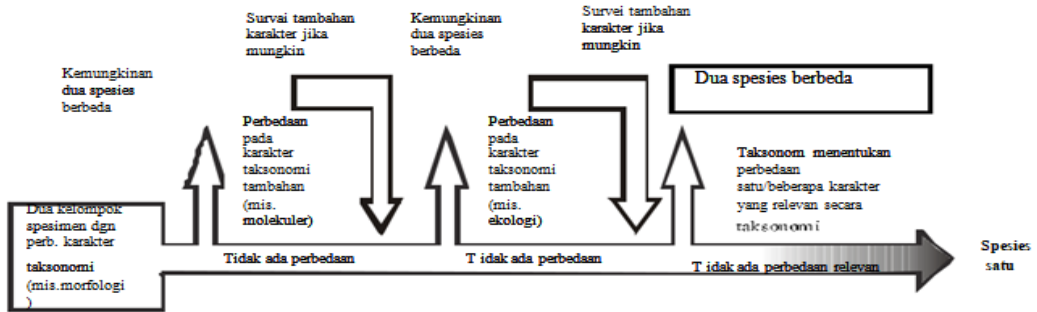
Gambar 10. "Lingkaran taksonomi", merupakan protokol pengakuan spesies pada pendekatan kongruensi (DeSalle, 2005). Garis putus-putus pada (a) menghubungkan buktibukti yang digunakan untuk penemuan spesies atau mendukung hipotesis sebelumnya. Pengakuan spesies dipertimbangkan apabila terdapat kongruensi antara karakter taksonomi dan geografi yang memungkinkan keluar dari lingkaran (panah). Sebagai contoh, pada taksonomi klasik (b) spesimen yang berbeda secara morfologi di lokasi yang berbeda dapat digunakan untuk pengusulan dan mendukung suatu hipotesis spesies. Pada kasus cryptic species (c), morfologi gagal mendukung hipotesis tetapi karakter lain (misalnya molekuler) dapat mendukungnya.

Keuntungan utama pendekatan kongruensi adalah adanya peningkatan stabilitas taksonomi: sebagian besar taksonom akan setuju pada validitas suatu spesies yang didukung oleh beberapa perangkat karakter, asalkan jelas bahwa mereka tidak terpaud dan terfiksasi. Keterbatasan utama yang melekat pada kongruensi antara karakter taksonomi adalah resiko taksiran jumlah spesies yang rendah (*underestimate*) (Gambar 9.), karena proses spesiasi tidak selalu disertai dengan perubahan karakter pada semua tingkatan (Misalnya Adams, 2009). Beberapa studi empiris mendukung pandangan bahwa kurangnya kongruensi karakter sering dihasilkan dari modus dan keadaan yang berbeda pada spesiasi (Degnan & Rosenberg, 2009; Presgraves, 2010). Risiko lebih lanjut integrasi dengan kongruensi adalah bias dalam pengungkapan spesies yang lebih tua.

a. Taksonomi integrative dengan kongruensi

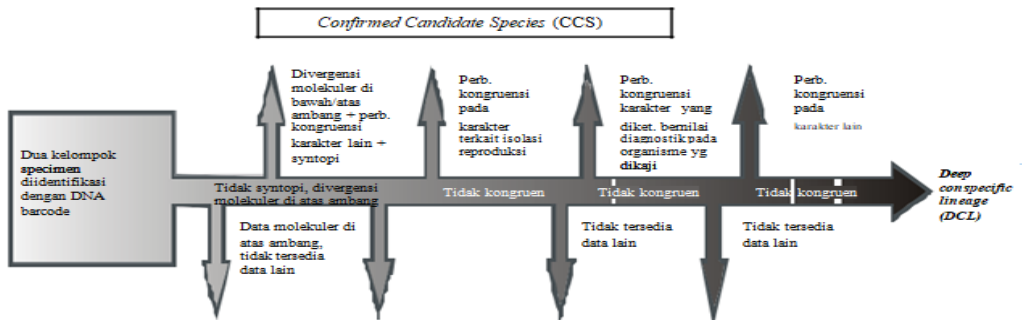


b. Taksonomi integrative dengan kumulasi

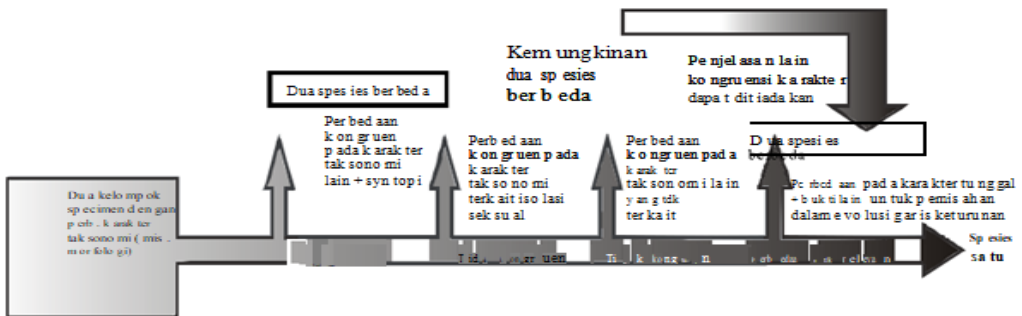


Gambar 11. Skema kerja taksonomi (Vieites, 2009). Alur kerja (a) taksonomi integratif dengan kongruensi dan (b) taksonomi integratif dengan kumulasi.

c. Pendekatan spesies *candidate*



d. Protokol consensus untuk taksonomi integratif



Gambar 11. (lanjutan). Skema kerja taksonomi (Vieites, 2009). Alur kerja (c) alur untuk mendefinisikan Unconfirmed Candidate Species (UCS), Confirmed Candidate Species (CCS) dan Deep Conspecific Lineages (DCL) pada pendekatan menggunakan DNA barcode, dan (d) alur kerja taksonomi integratif yang menggabungkan keunggulan pendekatan kumulasi dan kongruensi. Peningkatan intensitas warna hitam pada (a) – (d) menunjukkan peningkatan ketidakpastian tentang status spesies, yang memerlukan evaluasi data secara lebih menyeluruh.

Integrasi melalui kumulasi didasarkan pada asumsi bahwa perbedaan dalam setiap atribut organisme yang merupakan karakter taksonomi dapat memberikan bukti adanya spesies (de Queiroz, 2007). Pendekatan ini mendukung pandangan bahwa karena semua karakter taksonomi adalah suatu kesatuan eksistensi, tingkatan penampakan, dan besarnya perbedaan selama spesiasi, maka satusatunya cara untuk integrasi yang sebenarnya adalah memungkinkan setiap sumber bukti **bahkan satu saja** untuk membentuk dasar penemuan spesies. Pada prakteknya, bukti dari semua perangkat karakter dirakit secara kumulatif, kesesuaian dan ketidaksesuaian dijelaskan dari perspektif evolusi pada populasi yang diteliti, dan keputusan dibuat berdasarkan informasi yang tersedia, yang dapat mengarahkan pengakuan suatu spesies berdasarkan satu perangkat karakter

jika karakter-karakter tersebut dianggap sebagai indikator yang baik pada divergensi garis keturunan (Gambar 11b) (SchlickSteiner *et al.*, 2010; Padiál *et al.*, 2009).

Keuntungan utama pendekatan integrasi dengan kumulatif adalah bahwa tidak ada ikatan delimitasi spesies pada identifikasi karakter biologi tertentu, sehingga taksonom dapat memilih dan terfokus pada perangkat karakter yang paling tepat untuk setiap kelompok organisme. Integrasi dengan kumulasi telah menjadi pendekatan tradisional taksonomi morfologi (Gambar 11b) sebelum penggabungan dengan karakter lainnya. Integrasi dengan kumulasi juga mungkin paling sesuai untuk mengungkap penyimpangan spesies dalam radiasi adaptif karena proses spesiasi bertahap sepanjang gradien ekologi (Nosil *et al.*, 2009). Keterbatasan utama dari integrasi dengan kumulasi adalah bahwa penggunaan satu baris bukti (misalnya lokus tunggal mtDNA) dapat mengakibatkan perkiraan jumlah spesies yang terlalu tinggi (*overestimate*) (Gambar 9.). Sebagai contoh, karena pergeseran genetik (*genetic drift*), populasi kecil yang terisolasi hanya untuk waktu yang singkat sudah bisa menjadi *reciprocally monophyletic* yang berhubungan dengan beberapa karakter sehingga bisa dilakukan diagnosis. Situasi seperti ini tidak mewakili keragaman jenis yang penting bagi ahli ekologi dan biologi evolusi dan tetap menjadi pertanyaan apakah populasi tersebut harus diakui dan dinamakan sebagai spesies atau tidak. Pada Gambar 11d. menunjukkan alur kerja taksonomi integratif yang menggabungkan keunggulan pendekatan kumulasi dan kongruensi.

Pada praktik saat ini, kajian sistematika molekuler, filogeografi dan DNA *barcoding* terhadap eukariot menunjukkan sekian banyak unit yang berpotensi sebagai spesies baru, namun belum mampu ditindaklanjuti oleh taksonom dengan segera. Hal tersebut memerlukan panduan untuk mengungkap individu-individu yang masih *undescribed* tersebut. Bakteriologi mempunyai konsep untuk penyebutan kondisi seperti itu, yang kemudian diaplikasikan pada dunia vertebrata, yang dikenal sebagai *candidate species*. Pada Gambar 11c. merupakan gambaran langkah kerja untuk pengenalan tiga macam spesies *candidate*. Kelompok-kelompok individu yang menunjukkan jarak genetik yang besar, tetapi tanpa informasi lebih lanjut, disebut sebagai *unconfirmed candidate species* (UCS) dan selanjutnya perlu dikaji lebih lanjut. Jika data tambahan menunjukkan bahwa unit-unit *genealoginya* tidak dapat dibedakan pada tingkat spesies, maka dinyatakan sebagai *deep conspecific lineages* (DCL). Kategori ketiga adalah *confirmed candidate species* (CCS), yang diaplikasikan untuk DCL yang sudah dinyatakan sebagai spesies dengan mengikuti standar divergensi untuk kelompok yang dikaji, namun secara formal belum dideskripsikan dan diberi nama.

Murray & Schleifer (1994) mengusulkan sistem nama formal untuk *candidate* prokaryot dengan menempatkan epithet *Candidatus* sebelum nama spesies, misalnya *Candidatus Liberobacter asiaticus*. Sistem ini kemudian dapat diterima secara luas dan digunakan dalam Bacteriological Code. Namun demikian, sistem tersebut tidak dapat diaplikasikan untuk eukariot karena Zoological Code dan Botanical Code tidak menentukan kriteria minimum untuk pengenalan nama spesies yang valid. Padiál (2010) mengusulkan Codes of Nomenclature untuk menghindari konflik penamaan *candidate* tersebut, dengan mengkombinasikan nama spesies binomial, diikuti penambahan dalam kurung siku, singkatan "Ca" (untuk *candidate*), diikuti kode numerik spesies *candidate* tertentu, dan diakhiri dengan nama author beserta tahun publikasi artikel. Sebagai contoh, *Hirudo medicinalis* [Ca3 Siddal et al. 2007]. Contoh-contoh lain beserta penjelasan yang lebih rinci tentang usulan sistem nama tersebut dapat dipelajari pada Padiál (2010).

d. Implikasi taksonomi integratif

Alur kerja taksonomi integratif seperti diuraikan sebelumnya, membawa implikasi perlunya panduan bagaimana cara penamaan spesies. Hal tersebut sudah diantisipasi oleh Dayrat (2005) dengan menyertakan *guideline* penamaan spesies apabila mengikuti pendekatan taksonomi integratif. Padiál (2010) juga mengusulkan sistem nama untuk individu-individu yang *undescribed* (lihat bagian sebelumnya). Chakrabarty (2010) mengusulkan istilah "genotype" untuk memberi label pada setiap data dari berbagai tipe (termasuk holotype, topotype, dan lainnya). Pada penamaan sekuen genetik dari suatu holotipe, dapat dinyatakan sebagai suatu "hologenotype" (dari: **holotype** dan **genotype**), sekuen dari suatu topotype dinyatakan sebagai suatu "topogenotype," dan seterusnya. Sebagai tambahan, penanda genetik yang digunakan juga dimasukkan dalam penamaan, misalnya

paragenotype ND2. Secara lebih rinci, Dubois (2011) memberikan rekomendasirekomendasi sesuai standar dan petunjukpetunjuk penamaan spesies di bidang zoologi. Sedangkan untuk rekonstruksi pohon filogeni, Rasmussen & Kellis (2011) juga telah mengembangkan metodologinya.

Jauh sebelum Dayrat (2005) mengusulkan taksonomi integratif, Huelsenbeck *et al.* (1996) sudah mengusulkan pentingnya mengkombinasikan data morfologi dan molekuler pada analisis filogenetika. Pada waktu itu, Huelsenbeck dan koleganya mengusulkan analisis data yang terpartisi melalui alternatif tiga metode, yaitu *total evidence*, *separate analysis*, dan *conditional combination*. Keuntungan dan kelemahan, langkahlangkah analisis, dan contohcontohnya dapat dicermati pada pustaka tersebut.

Pires & Marinoni (2010) menyatakan bahwa usulan Dayrat (2005) dan pemikiran pentingnya mengkombinasikan data yang diulas oleh Huelsenbeck *et al.* (1996) diharapkan dapat mengungkap kelompokkelompok spesies yang belum tertangani jika hanya dideskripsikan berdasarkan morfologi semata. Penambahan data DNA terhadap data morfologi akan membantu merekognisi spesies *cryptic* yang hasilnya akan berbeda jika dianalisis berdasarkan masingmasing data. Taksa yang diusulkan berdasarkan data integrasi akan lebih baik dan lebih kuat mendukung hipotesis untuk pengembangan kajiankajian yang lain, selain itu spesies yang kurang baik identifikasinya dapat menyebabkan kesalahan pada kajiankajian lainnya.

Implikasi lebih lanjut, perhatian terhadap taksonomi integratif seharusnya didasarkan pada suatu konteks pengembangan metodologi terintegrasi untuk penelitian dan pendidikan biologi. Penelitian dalam bidang biologi seharusnya berbasis multidisiplin, melibatkan berbagai bidang yang berbeda, dan berfokus pada permasalahan yang kompleks. Suatu hal yang sangat penting adalah mendukung *alpha taxonomy* dengan cara mempertahankan deskripsi berdasar morfologi dalam suatu *equilibrium* atau keseimbangan dengan perkembangan teknologi untuk mengatasi kesukaran taksonomi. Pada konteks ini, perkembangan teknologi semacam DNA dan internet seharusnya dimanfaatkan sebaikbaiknya melalui taksonomi integratif, untuk “membangunkan” kembali taksonomi tradisional dan untuk mengatasi segala permasalahan pada bidang taksonomi yang selama ini menghalangi kajian keanekaragaman makhluk hidup dan hasilhasilnya untuk kepentingan manusia.

Penutup

Adanya taksonomi dengan pendekatan morfologi dan taksonomi dengan pendekatan molekuler untuk karakterisasi spesies dan analisis kekerabatan filogenetik telah menimbulkan pertentanganpertentangan. Kajian molekuler memang telah memberikan dukungan dan kebanggaan terhadap taksonomi tetapi pendekatan tersebut mempunyai berbagai keterbatasan sehingga tidak dapat digunakan secara sendirian untuk memperoleh kesimpulan taksonomi. Sulit dibayangkan apabila seorang taksonom hanya bekerja dengan pustaka dan peralatan saja untuk mendeskripsikan spesies dan mempublikasikan hasilnya pada jurnal tertentu tanpa aktifitas dengan tangan dan mata. Kontak langsung dengan organisme yang dikaji sangat penting, melalui observasi struktur, bentuk, dan pengukuranpengukuran untuk mendeskripsikan identitasnya, seperti yang dilakukan oleh taksonom morfologis.

Pendekatan morfologi dan molekuler memiliki kelebihan dan keterbatasan, sehingga sangat penting mengkombinasikannya untuk memperoleh kekerabatan evolusi yang komprehensif. Pada akhirnya belum ada pengelompokan baru organisme berdasarkan data molekuler semata, tetapi perlu didukung pula oleh data morfologi, anatomi, dan fisiologi. Jelas bahwa deskripsi terbaik adalah melibatkan keseluruhan data tersebut, yang disebut pendekatan terintegrasi.

Mewujudkan taksonomi integratif mungkin tidak akan semudah membalik tangan, membutuhkan upaya dari berbagai pihak. Para ahli ‘nontaksonomi’ (baca: taksonom molekuler) harus mengakui bahwa pencapaian taksonomi berdasar morfologi sangat besar perannya, dan bahwa kajiankajian morfologi sangat bernilai dan penting. Para taksonom (baca: taksonom morfologi) juga harus menerima perubahan radikal terhadap kreasi penamaan spesies untuk mencegah berlimpahnya *nomina dubia* dan sinonimsinonim. Taksonomi integratif juga diharapkan dapat mengatasi masalah frustasinya para ahli ‘nontaksonomi’ dalam mendeskripsikan dan menciptakan nama spesies baru, dan masalah adanya anggapan terisolirnya disiplin taksonomi dari ilmu sains.

Pada akhirnya diharapkan, taksonomi integratif dapat mengatasi masalah kesenjangan komunikasi para taksonom dan 'nontaksonom', dan selanjutnya para peneliti meyakini bahwa delimitasi spesies hendaknya melibatkan berbagai perspektif yang berbeda.

“An integrative approach is the best possible future for taxonomy, and the sooner this future arrives be better”

DAFTAR RUJUKAN

- Abdo, Z. and Golding, G.B. 2007. A step toward barcoding life: a model-based, decision theoretic method to assign genes to preexisting species groups. *Systematic Biology*. 56:1–13.
- Adams, D.C., Chelsea, M., Kozak, K.H., and Wiens, J.J. 2009. Are rates of species diversification correlated with rates of morphological evolution? *Proc R Soc Lond*. 276:27292738.
- Alström P., Rasmussen P.C., Olsson U., Sundberg, P. 2008. Species delimitation based on multiple criteria: the Spotted Bush Warbler *Bradypterus thoracicus* complex (Aves: Megaluridae). *Zool J Linn Soc*.154:291307.
- Ayala, F.J. and Kiger, J.A. 1984. *Modern Genetics*. Sec. ed. Menlo Park: Benjamin/Cummings.
- Blair, C. and Murphy, R.W. 2010. Recent trends in molecular phylogenetic analysis: Where to Next? *Journal of Heredity*. The American Genetic Association. DOI:10.1093/jhered/esq092
- Cardoso, A., Serrano A., Vogler, A.P. 2009. Morphological and molecular variation in tiger beetles of the *Cicindela hybrida* complex: is an 'integrative taxonomy' possible? *Mol Ecol*. 18:648664.
- Casiraghi, M., Labra., M., Ferri, E., Galimberti, A. and De Mattia, F. 2010. DNA barcoding: a sixquestion tour to improve user's awareness about the method. *Briefings in Bioinformatics Advance*. Oxford University Press. DOI:10.1093/bib/bbq003.
- Chakrabarty, P. 2010. Genetypes: a concept to help integrate molecular phylogenetics and taxonom. *Zootaxa*. 2632: 67–68.
- Corebima, A.D. 1997. *Genetika Mendel*. Surabaya: Airlangga University Press. Corebima, A.D. 2009. *Pengalaman Berupaya menjadi Guru Profesional*. Pidato Pengukuhan Guru Besar dalam Bidang Genetika pada Fakultas MIPA Universitas Negeri Malang, 30 Juli 2009.
- Corebima, A.D. 2011. *Genetika Ekspresi Gen*. Diktat Genetika Biologi UM. Cortese, L.M., Honig, J., Miller, C., and Bonos, S.A. 2010. Genetic Diversity of Twelve Switchgrass Populations Using Molecular and Morphological Markers. *Bioenerg. Res*. Springer Science+Business Media. DOI 10.1007/s1215501090782.
- Craft, K.J., Pauls, S.U., Darrow, K., Miller, S.E., Hebert, P.D.N., Helgen, L.E., Novotny, V., and Weiblen, G.D. 2010. Population genetics of ecological communities with DNA barcodes: an example from New Guinea Lepidoptera. *PNAS*. March. 16(107):5041–5046.
- Damm, S., Schierwater, B., and Hadrys, H. 2010. An integrative approach to species discovery in odonates: from character-based DNA barcoding to ecology. *Molecular Ecology*. 19:3881–3893.
- Dasmahapatra, K.K. and Mallet, J. 2006. DNA barcodes: recent successes and future prospects. *Heredity*. 12.
- Dayrat, B. 2005. Towards integrative taxonomy. *Biological Journal of the Linnean Society*. 85: 407–415.
- de Queiroz, K. 2007. Species concepts and species delimitation. *Syst Biol*. 56:879886.
- Degnan, J. and Rosenberg, N. 2009. Gene tree discordance, phylogenetic inference and the multispecies coalescent. *Trends Ecol Evol*. 24:332340.
- DeSalle R. 2006. Species discovery versus species identification in DNA barcoding efforts: response to Rubinoff. *Conservation Biology*. 20 (5):1545–1547
- DeSalle R., Egan, M.G., and Siddal, M. 2005. The unholy trinity: taxonomy, species delimitation and DNA barcoding. *Phil Trans R. Soc. B*. 360:19051916.
- Dubois, A. 2011. The International Code of Zoological Nomenclature must be drastically improved before it is too late. *Bionomina*, 2:1104. www.mapress.com/bionomina/
- Ebach, M.C. and de Carvalho, M.R. 2010. Antiintellectualism in the DNA barcoding enterprise. *Zoologia*. 27 (2):165178.
- Felsenstein, J. 2004. *Inferring Phylogenies*. Sunderland, MA: Sinauer Associates.
- Fitzpatrick, B.M. 2002. Molecular correlates of reproductive isolation. *Evolution*. 56:191198.
- Frezal, L. and Leblois, R. 2008. Four years of DNA barcoding: Current advances and prospects. *Infection, Genetics and Evolution*. 8:727–736.

- Galimberti, A., Martinoli, A., Russo, D., Mucedda, M., and Casiraghi, M. 2010. Molecular Identification of Italian Mouseeared Bats (genus *Myotis*). In Nimis P. L., Vignes Lebbe R. (eds.). *Tools for Identifying Biodiversity: Progress and Problems*. pp. 289-294.
- Hajibabaei, M., Singer, G.A.C., Hebert, P. D.N. and Hickey, D.A. 2007. DNA barcoding: how it complements taxonomy, molecular phylogenetics and population genetics, *Trends Genet.* DOI:10.1016/j.tig.2007.02.001
- Hall, B. 2007. *Phylogenetic Trees Made Easy*. 3rd Ed. Sunderland. MA: Sinauer Associates.
- Hebert, P.D.N. 2003. Biological identifications through DNA barcodes. *Proc. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 270: 313–321.
- Hidayat, T. dan Pancoro, A. 2006. *Sistematika dan Filogenetika Molekuler*. Kursus Singkat Aplikasi Perangkat Lunak PAUP dan MrBayes untuk Penelitian Filogenetika Molekuler SITHITB.
- Holynski, R.B. 2010. Taxonomy and the mediocrity of DNA barcoding – some remarks on Packer et al. 2009: DNA barcoding and the mediocrity of morphology. *Arthropod Systematics Phylogeny*. 68(1):143 – 150.
- Hou, Z., Fu, J., and Li, S. 2007. A molecular phylogeny of the genus *Gammarus* (Crustacea: Amphipoda) based on mitochondrial and nuclear gene sequences. *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 45: 596–611.
- Huelsenbeck, J.P., Bul, J.J., and Cunningham, C.W. 1996. Combining data in phylogenetic analysis. *Tree*. 11(4):152-158.
- Kadkhodaei, S., Shahnazari, M., Nekouei, M.K., Ghasemi, M., Etmnani, H., Imani, A., and Ariff, A.B. 2011. A comparative study of morphological and molecular diversity analysis among cultivated almonds (*Prunus dulcis*). *Australian Journal of Crop Science* 5(1):8291.
- Kumar, S., and Filipski, A. 2008. Molecular phylogeni reconstruction. In: *Encyclopedia of Life Science (ELS)*. Chicester: John Wiley & Sons, Ltd. DOI:10.1002/9780470015902.a0001523.pub2.
- Lewin, B. 1998. *Genes*. Oxford: University Press.
- Luc, M., Doucet, M.E., Fortuner, R., Castillo, P., Decraemer, W., and Lax, P. 2010. Usefulness of morphological data for the study of nematode biodiversity. *Nematology*. Vol. 12(4): 495-504.
- Mallet, J. 2008. Hybridization, ecological races and the nature of species: empirical evidence for the ease of speciation. *Philos Trans R Soc Lond B*. 363:297-298.
- Mani, G.S, and Clarke, B.C. 1990. Mutational order: a major stochastic process in evolution. *Proc R Soc Lond B*. 240:293-297.
- May, R.R., and Harvey, P.H. 2009. Species uncertainties. *Science*.323:687.
- Meiri, S. and Mace, G.M. 2007. New taxonomy and the origin of species. *PLoS Biol*. 5:e194. DOI:10.1371/journal.pbio.0050194 e194
- Mishler, B.D. 2010. *Integrative Biology 200A:Principles of Phylogenetics, Spring Feb. 9 2010.* , (http://ib.berkeley.edu/courses/ib200a/lect/ib200a_lect06_Mishler_ontogen_y_plants.pdf), 16 Jan. 2011.
- Murray, R.G.E. and Schleifer, K.H. 1994. Taxonomic notes: a proposal for recording the properties of putative taxa of prokaryotes. *Int. J. Syst. Bacteriol.* 44:174-176.
- National Biological Information Infrastructure. 2010. ITIS: The Integrated Taxonomic Information System. <http://www.nbi.gov>. July 2010. Diakses 20 Maret 2011.
- Nei, M. and Kumar, S. 2000. *Molecular Evolution and Phylogenetics*. New York: Oxford University Press.
- Nielsen, R. and Matz, M. 2006. Statistical approaches for DNA barcoding. *Syst. Biol.* 55: 162–169.
- Nosil, P., Harmon, L.J., and Seehausen, O. 2009. Ecological explanations for (incomplete) speciation. *Trends Ecol Evol*. 24:145-156.
- Nudds, T.D. and Villard, M.A. 2010. Traditional taxonomy vs. the “dark side”: what’s the fuss? *Avian Conservation and Ecology*. 5(1): 6.
- Padial J.M., Castroviejo Fisher, S., Köhler, J., Vilà, C., Chaparro, J.C., De la Riva, I. 2009. Deciphering the products of evolution at the species level: the need for an integrative taxonomy. *Zool Script*. 38:431-447.

- Padial, J.M., Miralles, A., De la Riva, I., and Vences, M. 2010. The integrative future of taxonomy. *Frontiers in Zoology*. 7: 114.
- Pereira, T.J., Fonseca, G., MundoOcampo, M., Guilherme, B.C., and RochaOlivares, A. 2010. Diversity of freeliving marine nematodes (Enoplida) from Baja California assessed by integrative taxonomy. *Mar. Biol.* 157:1665–1678.
- Petit, R.J. and Excoffier, L. 2009. Gene flow and species delimitation. *Trends in Ecology and Evolution*. 24(7):386393.
- Pires, A.C. and Marinoni. 2010. DNA barcoding and traditional taxonomy unified through Integrative Taxonomy: a view that challenges the debate questioning both methodologies. *Biota Neotrop.* 10(2).
- Presgraves, D.C. 2010. The molecular basis of species formation. *Nature Rev Gen.* (advance online publication) DOI:10.1038/nrg2718.
- Rasmussen, M.D. and Kellis, M. 2011. Accurate genetree reconstruction by learning gene and speciesspecific substitution rates across multiple complete genomes. *Genome Res.* 2007 17: 19321942, published by Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2011.
- Reveillaud, J., van Soest, R., Derycke, S., Picton, B., Rigaux, A., van Reusel, A. 2011. Phylogenetic relationships among NE Atlantic Plocamionida topsent (1927) (Porifera, Poecilosclerida): underestimated diversity in reef ecosystems. *PLoS ONE* 6(2): e16533. doi:10.1371/journal.pone.0016533.
- Rokas, A., B. L. Williams, N. King, and S. B. Carroll. 2003. Genomescale approaches to resolving incongruence in molecular phylogenies. *Nature* 425:798804.
- Roy, S., Tyagi, A., Shukla, V., Kumar, A., and Singh, U.M. 2010. Universal plant DNA barcode loci may not work in complex groups: a case study with Indian Berberis species. *PLoS ONE*. 5(10) e13674. doi:10.1371/journal.pone.0013674.
- Rueffler, C., Van Dooren, T.J.M., Leimar, O., Abrams, P.A. 2006. Disruptive selection and then what? *Trends Ecol Evol.* 21:238245.
- Saitou, N. and Nei, M. 1987. The neighborjoining method: a new method for reconstructing phylogenetic trees. *Mol. Biol. Evol.* 4: 406–425.
- SchlickSteiner, B.C., Steiner, F.M., Seifert, B., Stauffer, C., Christian, E., and Crozier, R.H. 2010. Integrative taxonomy: a multisource approach to exploring Biodiversity. *Annu Rev Entomol.* 55:421438.
- Schluter, D. 2009. Evidence for ecological speciation and its alternative. *Science.* 323:737741.
- Schram, F. 2004. The truly new systematics megascience in the information age. *Hydrobiologia.* 519:17.
- Scotland, R.W., Olmstead, R.G. and Bennett, J.R. 2003. Phylogeny reconstruction: the role of morphology. *Systematic Biology* 52(4): 539 – 548.
- Seehausen, O., Terai, Y., Magalhaes, I.S., Carleton K.L., Mrosso, H.D.J., Miyagi, R., Sluijs I van der, Schneider, M.V., Maan, M.E., Tachida, H., Imai, H., Okada, N. 2008. Speciation through sensory drive in cichlid fish. *Nature.* 455:620626.
- Seppa, P., Helanterä, H., Trontti, K., Puntala, P., Chernenko, A., Martin, S.J. and Sundstrom, L. 2011. The many ways to delimit species: hairs, genes and surface chemistry. *Myrmecol News.* 15:3141.
- Shinwari, Z.K. and Shinwari, S. 2010. Molecular data and phylogeny of family smilacaceae. *Pak. J. Bot.* 42: 111116.
- Smith, A.B. 1997. Echinoderm Phylogeny: How Congruent Are Morphological and Molecular Estimates? *Paleontological Society*, 3, 1997: 337355.
- Smith, A.B. 1997. Echinoderm phylogeny: how congruent are morphological and molecular estimates? *Paleontological Society*, 3, 1997: 337355.
- Smith, N.D. and Turner, A.H. 2005. Morphology's role in phylogeny reconstruction: perspectives from paleontology. *Syst. Biol.* 54(1):166–173.
- Spooner, D.M. 2009. DNA barcoding will frequently fail in complicated groups: an example in wild potatoe. *American Journal of Botany.* 96(6):1177–1189.

- Stamatakis, A. and Carrasco F.I., 2011. Result verification, code verification and computation of support values in phylogenetics. *Briefings in Bioinformatics Advance Access*. January 21. doi:10.1093/bib/bbq079.
- Steiner, F.M., Seifert, B., Moder, K., and SchlickSteiner, B.C. 2010. A multisource solution for a complex problem in biodiversity research: Description of the cryptic ant species *Tetramorium alpestre* sp.n. (Hymenoptera: Formicidae). *Zoologischer Anzeiger* 249:223–254.
- Streelman, J.T. and Danley P, D. 2003. The stages of vertebrate evolutionary radiation. *Trends Ecol Evol*. 18:126131.
- SulasmI, E.S. Sulisetijono, dan Zubaidah, S. 1994. Membandingkan Ciriciri Jenisjenis *Porophyllum* yang terdapat di Daerah Malang dengan *Porophyllum ruderale* Cass. UM: Lembaga Penelitian.
- Tibayrenc, M. 2005. Bridging the gap between molecular epidemiologists and evolutionists. *Trends Microbiol*. 13: 575–580.
- Uy, J.A., Moyle, R.G., Filardi, C.E., and Cheviron, Z.A. 2009. Difference in plumage color used in species recognition between incipient species is linked to a single amino acid substitution in the melanocortin1 receptor. *Am Nat*. 174:244254.
- Vanderpoorten, A. and Shaw, J. 2010. The application of molecular data to the phylogenetic delimitation of species in bryophytes: A note of caution. *Phytotaxa* 9:229–237.
- Vieites D.R., Wollenberg K.C., Andreone F., Köhler, J., Glaw, F, and Vences, M. 2009. Vast underestimation of Madagascar's biodiversity evidenced by an integrative amphibian inventory. *Proc Nat Acad Sci USA*. 106:82678272.
- Vogler, A.P., and Monaghan, M.T. 2007. Recent advances in DNA taxonomy. *J Zool Syst Evol Res*. 45:110.
- Wiens, J.J. 2001. Character analysis in morphological phylogenetics: problems and solutions. *Syst. Biol*. 50(5):689–699.
- Wiens, J.J. 2004. The role of morphological data in phylogeny reconstruction. *Systematic Biology*. 53(4): 653661.
- Wiens, J.J. 2009. Paleontology, genomics, and combined data phylogenetics: can molecular data improve phylogeny estimation for fossil taxa? *Systematic Biology Advance*. DOI:10.1093/sysbio/syp012.
- Wiens, J.J., Kuczynski, C.A., Townsend, T., Reeder, T.W., Mulcahy, D.G., and Sites, J.W. 2010. Combining phylogenomics and fossils in higher level squamate reptile phylogeny: molecular data change the placement of fossil taxa. *Syst. Biol*. 59(6):674–688.
- Wood, T.E., Takebayashi, N., Barker, M.S., Mayrose, I., Greenspoon, P.B., Rieseberg, L.H. 2009. The frequency of polyploid speciation in vascular plants. *Proc Natl Acad Sci USA*. 106:1387513879.
- Yassin, A., Markow, T.A., Narechania, A., O'Grady, P.M., and DeSalle, R. 2010. The genus *Drosophila* as a model for testing tree and characterbased methods of species identification using DNA barcoding. *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 57:509–517.
- Zubaidah, S. 1996. Pemanfaatan tumbuhan pakupakuan Hutan Wisata Alam Cangar sebagai sumber belajar biologi. *Pendidikan Humaniora dan Sains*. No. 1 & 2 Sept. 1995 & April 1996. Hal. 125138.
- Zubaidah, S. 1997a. Tipe reproduksi *Pteris biaurita* L. di daerah berketinggian berbeda. *Jurnal MIPA*. No. 1 Januari. Hal. 6066.
- Zubaidah, S. 1997b. Hubungan kekerabatan anggota marga *Pteris* di kampus IKIP MALANG. *Chimera*. No. 3. Hal. 4455.
- Zubaidah, S. 2001. Tipe sitologi dua spesies *Pteris* dalam hubungannya dengan ketinggian tempat. *Berkala Penelitian Hayati*. Vol 7 No. 1 Desember 2001 (diterbitkan Februari 2002). Hal. 2528.
- Zubaidah, S. 2004. Identifikasi, Variasi Genetik, Distribusi, dan Upaya Eliminasi Bakteri Penyebab Penyakit CVPD (*Citrus Vein Phloem Degeneration*). Disertasi Tidak Diterbitkan. Malang: Universitas Brawijaya.

- Zubaidah, S. dan Kuswanto, H. 2007. Identifikasi penanda molekuler RAPD untuk ketahanan genotipe plasma nutfah kedelai terhadap CPMMW (Cowpea Mild Mottle Virus). *Jurnal Forum Penelitian*, Tahun 19, Nomor 2 Desember. 294308.
- Zubaidah, S. dan Sunarmi, 1998. Studi Tipe Sitologi *Dryopteris sparsa* di Hutan Wisata Cangar Kabupaten Malang Jatim. UM: Lembaga Penelitian.
- Zubaidah, S., Balqis, dan Effendi, Y. 2001. Survei keanekaragaman tumbuhan paku epifit di kotamadya dan kabupaten Malang. *Forum Penelitian, Jurnal Teori dan Praktik Penelitian*. Tahun 13 No. 2 Desember. Hal 152-162

Model Fotosensitivitas Serat Optik *Germanium Silikat* Kaitannya dengan Stabilitas *Termal Bragg Grating*

Prof. Dr. Arif Hidayat. M.Si.

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Yang saya hormati

Rektor Universitas Malang selaku Ketua Senat Universitas Negeri Malang,
Ketua dan Sekretaris Komisi Guru Besar Universitas Negeri Malang,
Para Anggota Senat Universitas Negeri Malang
Para Pejabat Struktural Universitas Negeri Malang
Para Sejawat Dosen, Karyawan, dan Mahasiswa Universitas Negeri Malang
Para Undangan dan Hadirin semuanya

Marilah kita panjatkan syukur ke hadirat Allah *subhailliu wa ta'ala*, yang telah memberikan segala rahmat, ridha dan hidayah-Nya, sehingga kita dapat hadir dalam majelis yang mulia ini, seraya memohon agar kegiatan ini dapat berjalan lancar. Amiin. Semoga shalawat dan salam selalu tercurah kepada junjungan kita, Rasulullah Muhammad SAW, beserta keluarga, sahabat dan para pengikutnya.

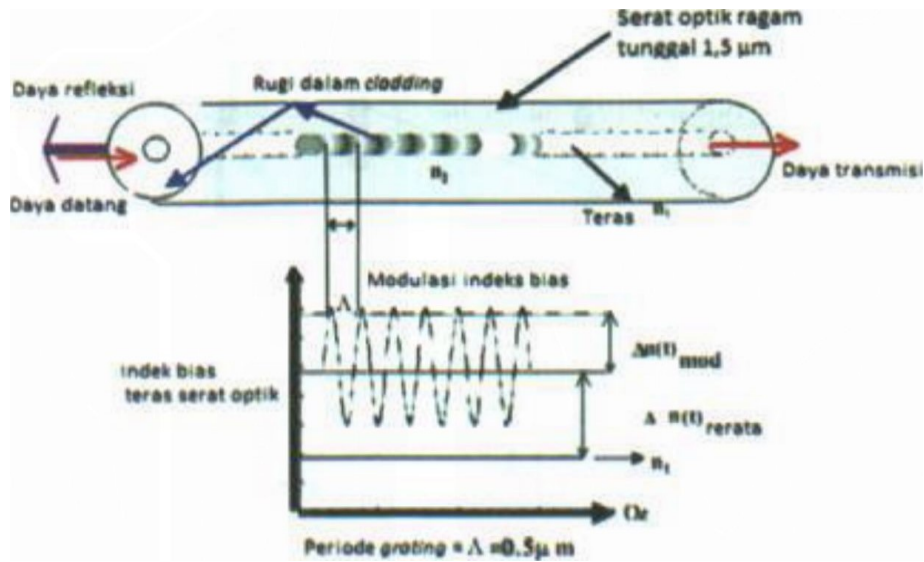
Bapak Rektor, Anggota Senat, serta Para Hadirin yang saya hormati

Saya ingin mengucapkan rasa terima kasih saya, karena telah diberi kepercayaan untuk dapat menyampaikan pidato pengukuhan saya sebagai Guru Besar di Bidang Optika di hadapan sidang Senat Universitas Malang. Pidato ini melupakan salah satu wujud komitmen saya untuk selalu berusaha menuntut ilmu dan mengamalkannya.

Materi Pidato yang akan saya sampaikan adalah tentang fotosensitivitas gelas germanosilikat yang mempunyai aplikasi luas di dalam bidang telekomunikasi berbasis cahaya. Materi ini masuk dalam domain optika *non-linier* yang mengkaji interaksi cahaya berintensitas kuat dengan medium. Pemahaman mengenai model-model fotosensitivitas dalam tahrikasi Bragg Grating akan memberi informasi mengenai mekanisme terjadinya Bragg grating di dalam serat optik dan parameter-parameter yang mempengaruhi stabilitas jangka panjang Bragg grating selama penggunaannya.

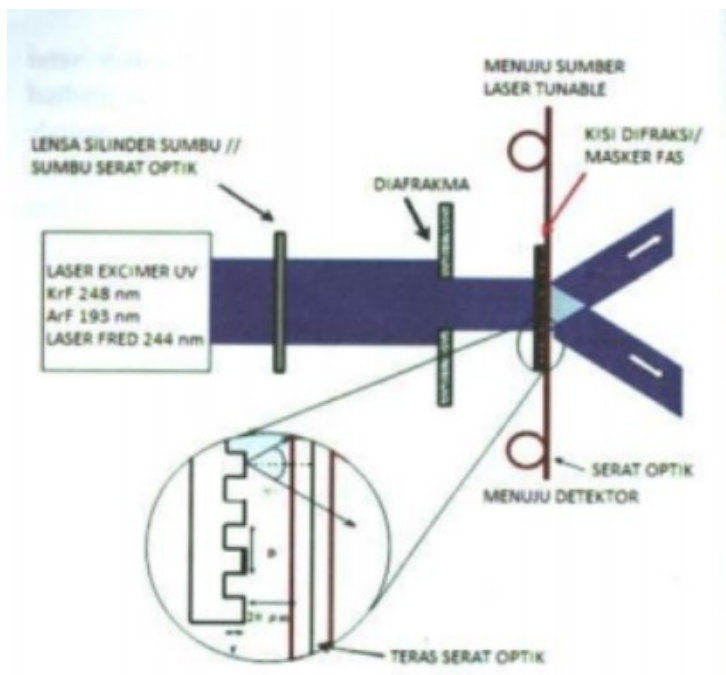
Bapak Rektor, Anggota Senat, serta Para Hadirin yang saya hormati

Efek iradiasi ultraviolet pada material gelas silikat dapat mengubah indeks bias secara permanen. Efek ini dikenal sebagai fotosensitivitas gelas [Hill,1978; Mcltz, 1989). Fotosensitivitas adalah perubahan indeks bias permanen yang diinduksi oleh penyinaran radiasi ultraviolet. Gejala ini sangat menarik untuk aplikasi telekomunikasi optik dalam kanannya dengan kemungkinan memfabrikasi piranti optik pasif di dalam core serat optik atau didalam film tipis. Piranti optik yang dimaksud berwujud suatu modulasi indeks bias *core* serat optik secara periodik spasial yang disebabkan oleh iradiasi medan frinji interferensi sinar ultraviolet dengan periode tertentu. Modulasi indeks bias seperti ini disebut *Bragg grating*. Gambar 1 menunjukkan modulasi periodik indeks bias core serat optik.



Gambar 1. Modulasi indeks bias di dalam core serat optik. Modulasi ini membentuk profil fiber Bragg Grating (FBG).

Bragg grating difabrikasi dengan menyinari core serat optik ragam tunggal dengan frinji cahaya UV berintensitas kuat dikenal sebagai *Fiber Hragg Grating* (FBG). Penyinaran UV ini menginduksi suatu perubahan indek bias permanen di dalam core serat optik. Gambar 2 menunjukkan salah satu teknik fabrikasi menggunakan kisi difraksi UV atau masker fase UV.



Gambar 2. Menunjukkan teknik fabrikasi menggunakan kisi difraksi UV.

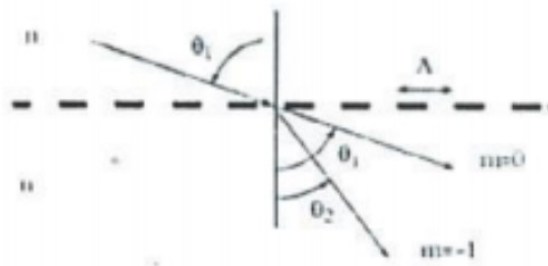
Perambatan cahaya sepanjang sebuah pandu gelombang dapat dideskripsikan dengan sekumpulan gelombang syarat batas *core-cladding* menyebabkan *coupling* antara komponen medan listrik dan magnet. Setiap ragam mempunyai konstanta perambatan spesifik. Jika gangguan periodik dikenakan sepanjang serat, ragam akan bertukar dayanya. Gejala ini dikenal sebagai *coupling* ragam.

Bragg grating dapat diklasifikasikan dalam dua jenis: *Fiber Bragg grating* (FBG); disebut juga grating refleksi dan berperiode pendek, dalam mana *coupling* terjadi antara ragam-ragam yang merambat berlawanan arah; dan grating transmisi (disebut juga grating periode panjang), dalam mana *coupling* terjadi antara ragam-ragam yang merambat dalam arah yang sama.

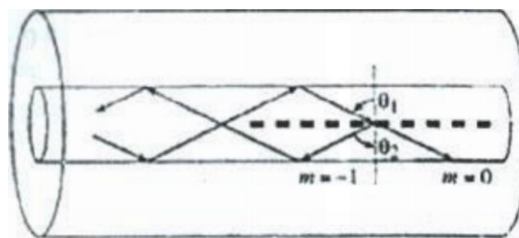
Sebuah Bragg grating sebenarnya adalah sebuah kisi difraksi optik, sehingga efeknya pada sebuah gelombang datang pada grating pada suatu sudut dapat dideskripsikan oleh persamaan grating:

$$n \sin \theta_2 = n \sin \theta_1 + m \left(\frac{\Lambda}{\lambda} \right)$$

Dimana θ_1 , adalah sudut gelombang difraksi dan bilangan bulat m menentukan orde difraksi (lihat gambar 3). [Ugale,2010].



Gambar 3. Difraksi gelombang cahaya oleh sebuah grating



Gambar 4. Ragam pantul di dalam core serat optic Fiber Bragg grating (FBG)

Gambar 4 mengilustrasikan pemantulan oleh FBG sebuah ragam cahaya dengan sudut θ , dengan ragam sama bergerak dalam arah berlawanan dengan sudut pantul $\theta_2 = \theta_1$. β adalah komponen z konstanta perambatan gelombang i dan merupakan parameter utama dalam mendeskripsikan ragam-ragam serat optik, secara sederhana berbentuk

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}}$$

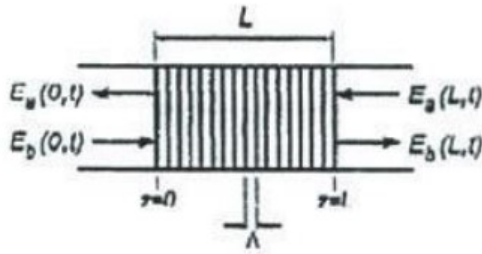
Dimana $n_{\text{eff}} = n_{\text{core}} \sin \theta$. Ragam tetap terpandu selama β memenuhi syarat $n_2 k < \beta < n_1 k$. Dimana n_1 dan n_2 adalah indeks bias core dan *cladding* dan $k = 2\pi/\lambda$. Batas antara ragam-ragam terpandu dalam core dan ragam ragam yang bocor ke *cladding* didefinisikan oleh syarat *cutoff* $\beta = n_2 k$. Ketika β menjadi lebih kecil dari pada $n_2 k$, daya bocor keluar core masuk ke daerah *cladding* [Ugale, 2010; Arora, 2010]

Mengacu pada gambar 5, FBG sepanjang L dan perimle sama A di difabrikasi di dalam core serat optik. Medan listrik gelombang yang merambat maka dapat dinyatakan sebagai berturut-turut, untuk gelombang yang merambat maka dapat dinyatakan sebagai

$$E_{z,+}(z,t) = A(z) e^{i(\omega t - \beta z)} \tag{1}$$

$$E_{z,-}(z,t) = B(z) e^{i(\omega t + \beta z)} \tag{2}$$

Berturut-turut, untuk gelombang yang merambat balik dan maju.



Gambar 5. Gelombang yang merambat di dalam Bragg grating

Persamaan ragam pasangan mendeskripsikan amplitude kompleksnya, $A(z)$ dan $B(z)$

$$\begin{aligned} \frac{dA(z)}{dz} &= i\kappa B(z)e^{-2i\beta z} \\ \frac{dB(z)}{dz} &= -i\kappa^* A(z)e^{+2i\beta z} \end{aligned} \quad 0 \leq z \leq L \quad (3)$$

Jika kita mengasumsikan bahwa baik gelombang maju dan balik masuk grating, kemudian mengasumsikan syarat batas $B(0) = B_0$ dan $A(L) = A_L$. Dengan mensubstitusi syarat batas ini ke dalam persamaan (3), kita dapat menyelesaikan untuk penyelesaian bentuk tertutup dan maka keagutan z kedua gelombang didapatkan:

$$\begin{aligned} a(z) &= A(z)e^{-i\beta z} \\ b(z) &= B(z)e^{+i\beta z} \end{aligned}$$

Gelombang refleksi, $a(0)$, dan gelombang transmisi dapat dinyatakan menggunakan matrik hamburan

$$\begin{bmatrix} a(0) \\ b(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(L) \\ b(0) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Dengan mensubstitusi $a(L)$ dan $b(0)$ dari persamaan 4 ke dalam persamaan 5 diperoleh

$$\begin{aligned} S_{11} = S_{22} &= \frac{iS e^{-i\beta_0 L}}{-\Delta\beta \sinh(SL) + iS \cosh(SL)} \\ S_{12} = \frac{\kappa}{\kappa^*} S_{21} e^{2i\beta_0 L} &= \frac{\kappa \sinh(SL)}{-\Delta\beta \sinh(SL) + iS \cosh(SL)} \end{aligned} \quad (6)$$

Berdasar pada 5 dan 6, matrik hamburan, kita dapat memperoleh matrik transfer, atau persamaan matrik-T

$$\begin{bmatrix} a(0) \\ b(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(L) \\ b(L) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Dimana

$$\begin{aligned} T_{11} = T_{22}^* &= \frac{\Delta\beta \sinh(SL) + iS \cosh(SL)}{iS} e^{-i\beta_0 L} \\ T_{12} = T_{21}^* &= \frac{\kappa \sinh(SL) + iS \cosh(SL)}{iS} e^{-i\beta_0 L} \end{aligned} \quad (8)$$

Pendekatan matrik ini adalah efektif pada saat memperlakukan sebuah grating tunggal sebagai sebuah deret gratng-grating terpisah masing-masing mempunyai panjang keseluruhan tereduksi dan panjang periode berbeda, dan mendeskripsikan masing-masing dengan matrik-T sendiri.

Dengan mengombinasikan semua matrik menghasilkan sifat grating non uniform awal. Sistem matrik resultan diperlakukan sebagai sebuah matrik individual

$$[T_i] = [T_1][T_2] \dots [T_M]$$

Cahaya yang melewati elemen-elemen optic berurutan dapat dihitung deretan matrik, seperti

$$\begin{bmatrix} a(0) \\ b(0) \end{bmatrix} = [T_M][T_{M-1}] \dots [T_1] \begin{bmatrix} a(L) \\ b(L) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Respon karakteristik FBG secara utuh dapat dideskripsikan oleh

1. Panjang gelombang pusat grating λ_B disebut panjang gelombang Bragg.
2. Reflektivitas puncak grating yang terjadi di λ_B
3. Panjang fisik grating L
4. Indeks bias core serat optic n_{co}
5. amplitude gangguan indeks bias terindukan Δn

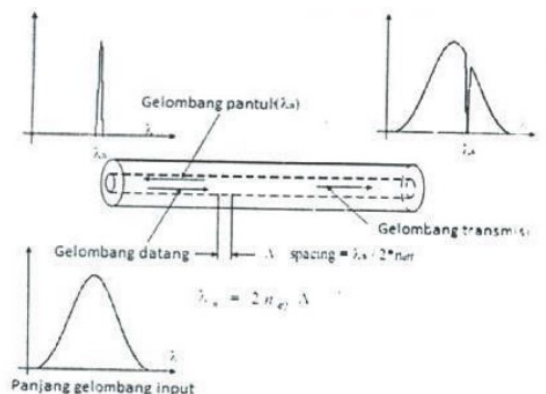
Untuk sebuah grating dengan modulasi indek bias dan periode seragam, reflektivitasnya dinyatakan oleh

$$R(L, \lambda) = \frac{\kappa^2 \sinh^2(SL)}{\Delta\beta^2 \sinh^2(SL) + \kappa^2 \cosh^2(SL)} \quad (11)$$

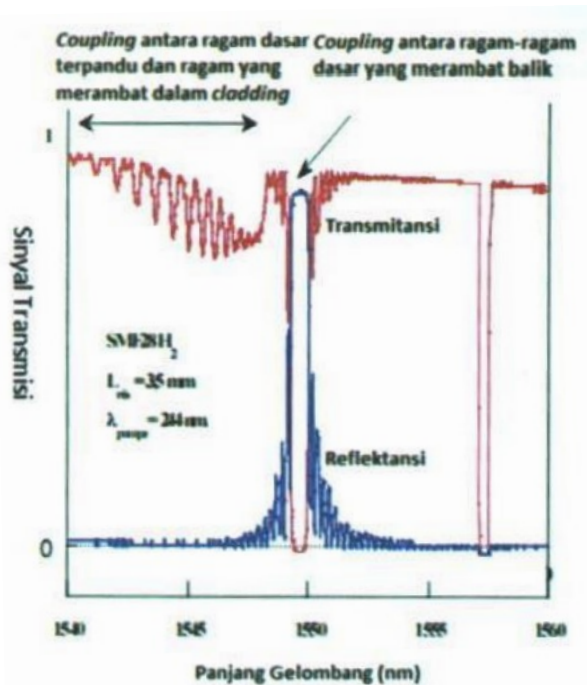
Dimana R adalah reflektivitas sebagai fungsi panjang grating dan panjang gelombang, L adalah panjang grating total, K adalah konstanta coupling dinyatakan oleh $k = \frac{\pi\Delta n}{\lambda}$, $\Delta\beta = \beta - n/\Lambda$, β adalah konstanta perambatan core serat, dinyatakan oleh $\beta = 2\pi n_0/\lambda$, dan $\sqrt{k^2 - \Delta\beta^2}$ Untuk cahaya pada panjang gelombang Bragg, tidak terdapat vektor gelombang yang tidak sesuai dan maka $A' = 0$. Fungsi reflektivitas kemudian menjadi

$$R(L, \lambda_B) = \tanh^2(SL) \quad (12)$$

Modulasi indeks bias di dalam core serat optik akan berfungsi sebagai reflector cahaya yang diijeksikan di dalam core saat optik. Seberkas cahaya input berpita lebar yang diinjeksikan ke dalam core serat optik akan dipantulkan secara maksimum pada panjang gelombang Bragg yang memenuhi relasi $\Lambda = L/n$, dimana L dan n berturut-turut adalah periode grating dan indeks bias efektif ragam dasar yang merambat di dalam core. Respon FBG yang difabrikasi di dalam core serat optik terhadap cahaya yang merambat didalamnya ditunjukkan dalam gambar 6. Sedangkan spektrum reflektansi dan transmisi untuk grating yang difabrikasi dalam serat optik standar telekomunikasi menggunakan laser kontinu 244 nm dan panjang grating 35 mm ditunjukkan dalam gambar 7.



Gambar 6. Karakteristik FBG yang difabrikasi di dalam core serat optik terhadap cahaya yang merambat di dalamnya [Kang, 2005].



Gambar 7. Spektrum reflektansi dan transmitansi untuk fiber Bragg grating seragam

Sejumlah aplikasi Bragg grating (seperti kompensator dispersi kromatik atau perata gain dari amplifier optik) memerlukan variasi indeks bias berorde $\Delta n \sim 10^{-4}$. Untuk mendapatkan orde setinggi itu, perlu upaya meningkatkan fotosensitivitas bahan gelas. Metode fotosensitisasi yang paling sering digunakan adalah proses hidrogenasi dengan mendifusikan molekul hidrogen pada tekanan tinggi (100 sampai 200 bar) ke dalam core serat optik atau ke dalam gelas germanosilikat sebelum iradiasi. [Lemaire, 1993]. Namun demikian, metode ini mempunyai beberapa kelemahan: fabrikasi Bragg grating di dalam serat optik germanosilikat selalu diikuti oleh pembentukan spesies kimia, seperti hidroksil, yang menimbulkan loss melalui proses absorpsi pada rentang ultraviolet [Atkins, 1992] hingga inframerah [Atkins, 1993][Lino, 1990][Grubsky, 1999], prediksi stabilitas grating yang difabrikasi di dalam serat optik hidrogenasi lebih sulit dilakukan dari pada yang difabrikasi di dalam serat optik non hidrogenasi, selain itu fabrikasi grating di dalam pandu gelombang planar hidrogenasi yang umumnya mempunyai ketebalan beberapa mikro menyebabkan hidrogen yang didifusikan dalam pandu akan keluar secara cepat. Sebagai contoh, waktu karakteristik difusi hidrogen keluar dari sebuah lapisan setebal μm adalah berorde 45 menit. Waktu tersebut sebanding dengan waktu yang diperlukan untuk memfabrikasi grating. Oleh karena itu, fotosensitivitas gelas berkurang selama fabrikasi. Parameter tersebut menurunkan reprodutivitas karakteristik spektral grating.

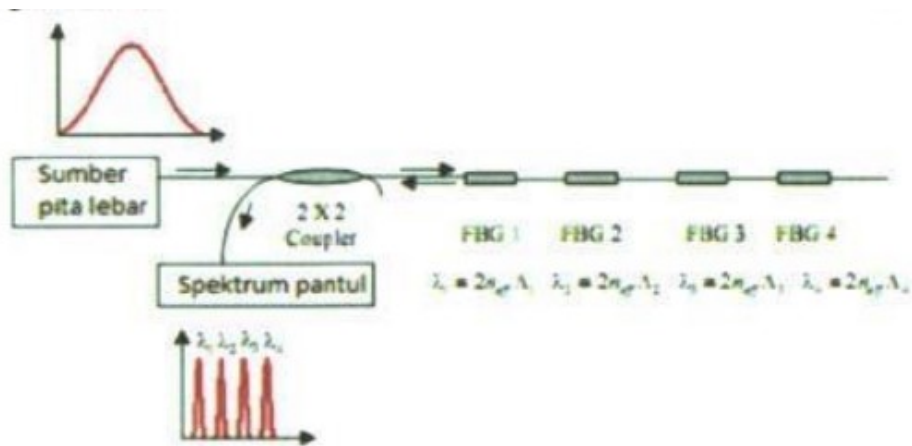
Fiber Bragg Grating merupakan komponen penting dalam jaringan telekomunikasi serat optik, FBG telah menjadi kajian secara mendalam selama beberapa dekade terakhir [Hill et al, 1978][Meltz et al, 1989]. Reflektivitas, R , dan panjang gelombang resonansi, λ_B (disebut juga panjang gelombang Bragg) merupakan parameter penting dalam kajian karakteristik mengenai spektrum Bragg grating. Untuk FBG seragam sempurna, λ_B dinyatakan oleh persamaan (13), sedangkan koefisien refleksi di λ_B yaitu ($R(\lambda_B)$) dinyatakan oleh persamaan (12) dapat dituliskan dalam persamaan (14)

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (13)$$

$$R(\lambda_B) = \tanh^2 \left(\frac{\pi \Delta n_{\text{mod}}}{\lambda_B} \eta L_G \right) \quad (14)$$

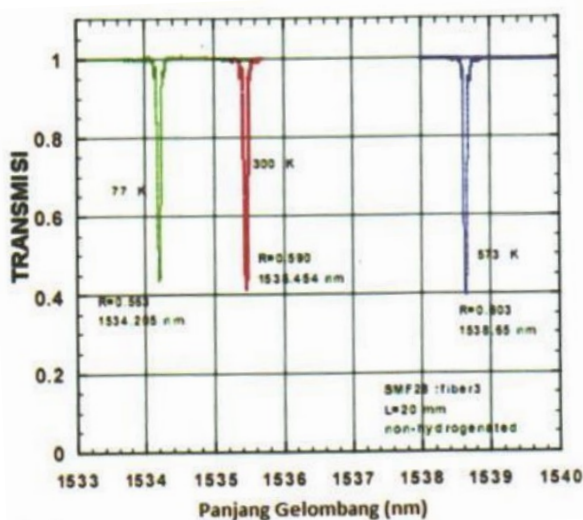
Dalam (13) A dan n_{eff} berturut-turut adalah periode grating dan indeks bias efektif ragam dasar yang merambat melewati core. Dalam (14), L_G adalah panjang grating, η adalah fraksi daya optik yang merambat melalui core serat optik dan Δn_{mod} adalah amplitudo modulasi indeks bias terinduksi UV.

Aplikasi fiber Bragg grating dalam teknologi berbasis optik pada saat ini adalah sangat luas. Perkembangan teknologi telekomunikasi menempatkan FBG sebagai komponen penting sebagai penjamak atau pengurai berkas sinyal berbasis panjang gelombang dalam sistem telekomunikasi WDM (wavelength division multiplexing) dan sebagai kompensator dispersi. Diagram prinsip kerja sistem telekomunikasi WDM (wavelength division multiplexing) berbasis grating ditunjukkan dalam gambar 8.

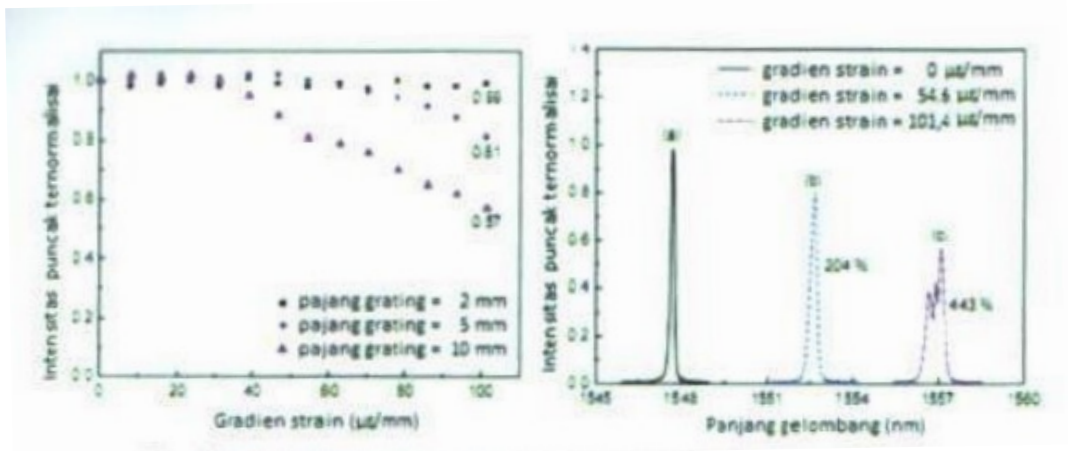


Gambar 8. Diagram prinsip penggunaan Bragg grating dalam sistem telekomunikasi WDM

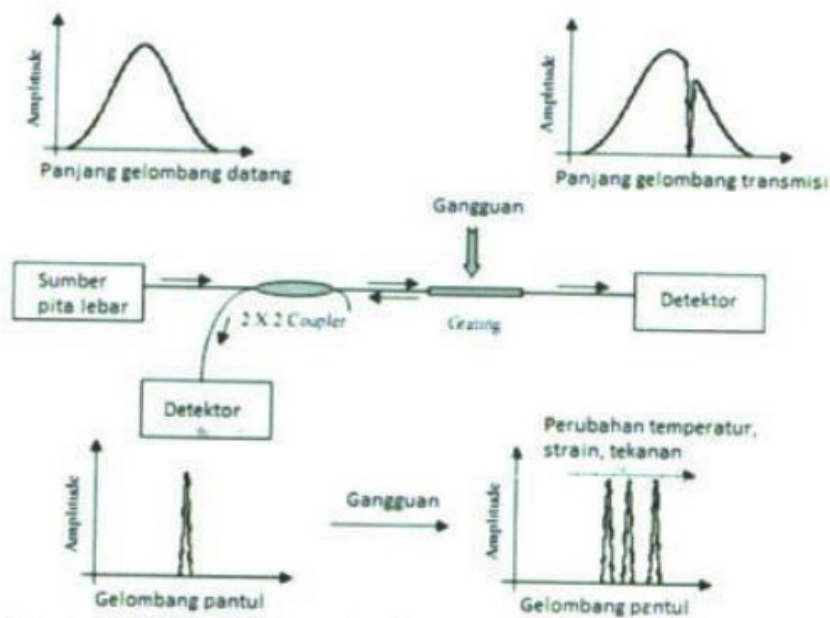
Kepekaan spektrum Bragg grating terhadap gangguan berupa perubahan temperature, strain, dan tekanan pada grating, menyebabkan pergeseran panjang gelombang dan reflektivitas secara reversible. Sifat ini sangat potensial diterapkan dalam teknologi sensor berbasis grating. Pergeseran panjang gelombang Bragg spektrum transmisi FBG karena pengaruh perubahan suhu ditunjukkan dalam gambar 9. Sedangkan pengaruh strain pada spectrum refleksi FBG ditunjukkan oleh gambar 10.



Gambar 9. Spectrum transmisi grating yang difabrikasi di dalam serat optic standar telekomunikasi SMF 28 untuk tiga variasi temperature (77K, 300 K, 573 K) [Hidayat, 2000].



Gambar 10. Perubahan reflektivitas dan pergeseran panjang gelombang Bragg dari spectrum FBG sebagai fungsi perubahan strain grating [Ugale, 2010].



Gambar 11. Diagram dasar sebuah FBG yang digunakan dalam sistem sensor. Panjang gelombang cahaya yang dipantulkan dari Bragg grating berubah ketika fiber Bragg grating diberi gangguan fisis. Gangguan fisis ini dapat berupa temperature, strain, dan tekanan.

Aplikasi FBG dalam sistem telekomunikasi menghendaki waktu hidup grating yang panjang dan stabilitas spektrum FBG yang baik sebagai fungsi temperatur. Sebagai contoh, dalam teknologi WDM, piranti berbasis grating seharusnya bertahan fungsinya sesuai spesifikasinya selama 25 tahun dalam rentang temperatur range $-40^{\circ}\text{C} < 0 < 80^{\circ}\text{C}$. Berkaitan dengan hal itu, beberapa kajian teori dan eksperimen yang berkaitan dengan uji waktu hidup dipercepat dilaksanakan dengan tujuan memprediksi degradasi yang mungkin terjadi pada indeks bias terinduksi UV. Keluaran utama dari kajian ini yaitu metode *pre-anneal* sebuah piranti FBG untuk menghapus bagian modulasi indeks yang akan meluruh secara irreversible selama waktu hidup komponen dan hanya mempertahankan bagian yang sangat stabil dari variasi indeks [Erdogan,1994][Poumellec, 1998]. Namun demikian, diketahui bahwa suatu perubahan temperatur grating yang di *pre-anneal* menyebabkan pergeseran panjang gelombang Bragg (λ_{B}) piranti FBG [Hidayat, 2001]. Pergeseran

λ_B mendekati 1 nm pada rentang temperatur 100° C dapat menimbulkan masalah yang serius untuk aplikasi seperti dalam penjamakan atau pengurai berbasis grating dalam sistem WDM. $\Delta\lambda_B$ sangat terkait dengan koefisien termal-optik dan ekspansi termal [Hidayat, 2001] dan mengakibatkan perubahan distribusi stress terinduksi temperatur melalui koefisien stress-optik. Oleh karena itu, piranti pasif untuk mengimbangi temperatur dirancang untuk mengurangi pergeseran panjang gelombang Bragg $\Delta\lambda_B$. Hasil penelitian kami menunjukkan bahwa peningkatan temperatur grating tipe I yang fabrikasi di dalam serat optiksilika» yang didadah B, Ge, dan Sn menyebabkan perubahan reversible dan ireversibel reflektivitas grating (R) [Hidayat, 2001]. Peningkatan R secara reversibel terinduksi temperatur adalah merugikan karena mengganggu data eksperimen *annealing isothermal* yang dilakukan dengan tujuan untuk memonitor evolusi R terinduksi-temperatur secara irreversible [Hidayat, 2001].

Stabilitas karakteristik spektrum Bragg grating (reflektivitas dan panjang gelombang Bragg) tergantung pada sejumlah parameter di antaranya: jenis serat optik dimana grating difabrikasi, hidrogenasi serat optik, karakteristik sinar laser yang digunakan, kontras frinji pada saat fabrikasi, temperatur dan tegangan serat optik pada saat fabrikasi grating, intensitas UV, amplitude variasi indeks bias fotoinduksi dan kondisi

penggunaan grating (temperatur dan lingkungan penggunaan grating) Parameter tersebut di atas menyumbang kompleksitas proses prediksi yang tepat mengenai evolusi jangka panjang (20 tahun) karakteristik grating. Menyiasati masalah kompleksitas ini, para peneliti menggunakan metode aging dipercepat dengan meningkatkan temperatur grating [Erdogan et al, 1994]. Metode ini memungkinkan memisahkan parameter-parameter yang muncul secara lebih cepat dibanding grating dipertahankan secara tetap dalam kondisi penggunaannya.

Berbagai upaya untuk menafsirkan asal mula fotosensibilitas gelas secara mikroskopik karena pengaruh penyinaran ultraviolet telah dijelaskan dalam berbagai publikasi [Sceats et al, 1993][Campbell et al, 1994][Poumellec et al, 1996][Douay et al, 1997]. Upaya-upaya tersebut baru bersifat model yang berlaku pada gelas germanosilikat [Atkins et al, 1993][Fertrin, 1995][Digonnet, 1996]. Secara sistematis, model-model tersebut dapat dikelompokkan dalam dua kategori:

- Model lokal yang menerapkan mekanisme fisika-kimia yang terjadi di bagaian bahan yang disinari tanpa melibatkan gejala perpindahan antara bagaian yang disinari dan tidak disinari.
- Model non-lokal yang menerapkan proses perpindahan muatan-muatan atau atom-atom.

Model-model yang menghipotesiskan pembentukan *color centre* [Hand et al, 1990] atau pembentukan dipol-dipol di sekitar pusat cacar (*color centre*) dari bahan [Bernadin et al, 1990], model densifikasi [Friori et al, 1986] masuk dalam kategori model lokal. Model non lokal mengelompokkan model muatan berpindah [Payne et al, 1989], model relaksasi constraint [Sceat et al, 1993], model densifikasi foto-elastik yang diusulkan oleh B. Poumellec et al (1996) dan model difusi spesies kimia [Fonkine et al, 1997][Kherbouche, 2000]. Dalam pidato ini, tiga model utama yang sering digunakan untuk menganalisis variasi indeks bias induksi: model *color centre*, model densifikasi fotoelastik, dan model difusi spesies kimia akan dalam mengkaji stabilitas grating.

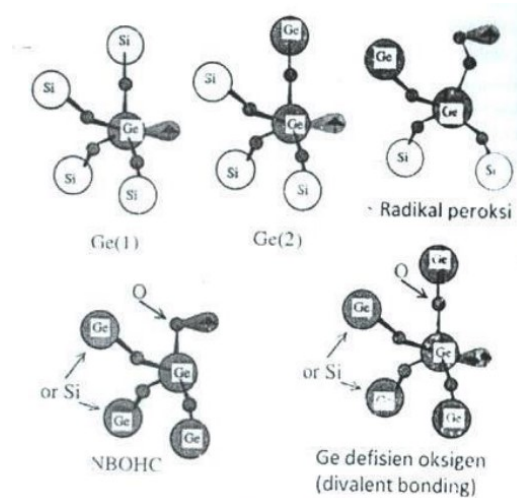
Anggota Senat, serta Para Hadirin yang saya hormati

Berikut dijelaskan beberapa implikasi model-model fotosensitivitas pada stabilitas grating. Model yang pertama adalah Model *Color Centre*.

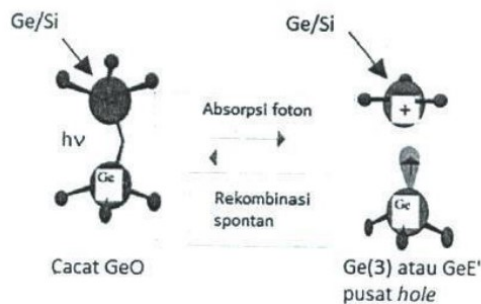
Model ini disajikan secara khusus untuk kasus serat optik germanosilikat. Pada saat fabrikasi serat optik jenis ini UH nggun ikan proses MCVD (modified chemical vapor depositmu), suatu oksidasi berbagai unsur (SiCl₄, PCl₃, BCl₃, t.ct l()) pada temperatur tinggi menyebabkan pembentukan oksida. Pada temperatur terjadinya reaksi ini, spesies GeO jauh lebih stabil daripada spesies GeO₂. Campuran gelas menyajikan sebuah komposisi non-stekiometri karena kekurangan oksigen. Maka di dalam bahan SiO₂:GeO₂, terjadi ikatan jenis oksigen seperti ikatan Ge-Si atau Ge-Ge (GODC) atau Ge-O (GLPC) [Hosono et al, 1992]. Keberadaan ikatan ini ditunjukkan oleh

kemunculan pita absorpsi UV terpusat di dekat 244 nm [Hosono et al, 1992]. Gambar beberapa cacat dalam gelas germanosilikat ditunjukkan dalam gambar 12.

Penyinaran sebuah serat optik oleh suatu radiasi UV (244 nm) atau cahaya tampak (514,5 nm) menginduksi suatu pemutusan ikatan Ge-X (X = Si atau Ge, atau O) oleh sebuah proses absorpsi berturut-turut satu atau dua foton (Gambar 1.1). Pemutusan ikatan ini terjadi dengan membebaskan salah satu elektron yang berperan dalam ikatan kovalen Ge-X (foto-ionsasi). Hal ini menyebabkan terciptanya beberapa *color centre* yaitu Ge(E'), Ge(I), Ge(2) yang berhubungan dengan pita absorpsi yang berturut-turut berpusat di 193 nm, 281 nm, 213 nm [Hand et al, 1990][Anoikin et al, 1991][Tsai et al, 1994].



Gambar 12. Skema cacat Ge (atau Si) gelas germanosilikat. Absorpsi karakteristik dari Ge (1) adalah 280 nm (4,4 eV) dan merupakan sebuah electron terjebak di posisi Ge (atau Si); Ge(2) mempunyai sebuah pita absorpsi di 213 nm (5,8 eV) dan merupakan sebuah pusat hole. Radikal peroksi mempunyai absorpsi di 163 nm (7,6 eV) dan di 325 nm (3,8 eV). [15,16].



Gambar 13. Cacat GeO gelas germanosilikat, atom yang bersebelahan dengan germanium adalah sebuah silikon atau bisa juga germanium. Ia dapat menyerap sebuah foton untuk membentuk sebuah cacat GeE*. Gc(0) atau Gc(3) adalah pusat GeE* [20]. Cacat GeE* menunjukkan elektron ekstra (berkait dengan atom Ge), yang mungkin bebas bergerak di dalam matrik gelas sehingga ia terjebak kembali di posisi cacat semula, di posisi hole GeE' lainnya, atau di pusat cacat Gc(n) manapun.

Efek penyinaran UV atau cahaya tampak pada sebuah serat optik ditunjukkan oleh modifikasi populasi cacat atau *color centre* dan oleh variasi intensitas pita absorpsi yang terkait. Intensitas loss yang besar dalam UV disebut fotokromisme UV. Dalam beberapa kasus, terdapat intensitas pita serapan karena penyinaran UV yang menyatakan transformasi spesies absorpsi. Hal ini berarti polaritas bahan dimodifikasi oleh penyinaran. Berangkat dari observasi ini, sejumlah peneliti telah menghitung modifikasi indeks bias yang berkaitan dengan fotokromisme dengan

bantuan relasi Kramers-Kronig (persamaan 15) [Hand et al, 1990] [Atkins et al, 1993] [Fertein, 1995] [Digonnet, 1996]. Relasi ini menjelaskan konjugasi yang ada antara variasi koefisien absorpsi bahan dan variasi indeks biasnya. Rekaman spektrum absorpsi terinduksi ($D_a(l, F)$), yang berkaitan dengan color centre, umumnya dicatat di dalam domain spektral antara l , dan l_r Rumusan yang disederhanakan dari relasi Kramers-Kronig dapat ditulis sebagai berikut.

$$\Delta n(\lambda', F) = \left(\frac{1}{2\pi^2}\right) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\Delta\alpha(\lambda, F)}{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^2} d\lambda \quad (15)$$

Dalam relasi (15), F menyatakan satu atau beberapa parameter fabrikasi grating dan A' adalah panjang gelombang dimana Δn dihitung. Uji validitas model Kramers-Kronig terdiri atas menghitung Δn dengan bantuan relasi (15) kemudian membandingkan hasilnya dengan harga modulasi indeks bias Δn^A yang disimpulkan dari pengukuran reflektivitas grating (persamaan 14) (Hand et al, 1990) [Atkins et al, 1993] [Fertein, 1995].

Secara umum, spektrum loss, yang diperoleh setelah satu selang waktu penyinaran uniform pada gelas germanosilikat, diukur pada sebuah rentang spektrum yang terentang dari 180 nm sampai 400 nm [Atkins et al, 1993]. Selanjutnya, harga dari Δn dihitung dengan bantuan relasi Kramers-Kronig. Δn kemudian dibandingkan dengan Δn_{nioid} yang diukur dari reflektivitas grating yang dicetak di dalam serat optik yang difabrikasi dari bahan gelas germanosilikat sama. Eksperimen fabrikasi FBG dan penyinaran uniform direalisasikan dengan rerata intensitas UV sama dan dengan durasi penyinaran yang sebanding. Perbandingan ini hanya mempunyai arti jika intensitas spektrum loss ($A_a(X)$) adalah sebuah fungsi linier dari intensitas lokal cahaya UV Di dalam kasus sebaliknya, iradiasi serat optik dengan medan frinji dengan profil intensitas sinusoida yang direalisasi untuk mencetak FBG ditunjukkan oleh bagian non sinusoida dari $D_a(l)$ sepanjang sumbu serat optik. B. Leconte et al (1997) telah menunjukkan keberadaan gejala siiiurasi di dalam spektrum loss dan mengajukan sebuah model lebih teliti menggunakan relasi Kramers-Kronig. Mereka menunjukkan 1) bahwa spektrum loss yang terbentuk oleh antara 200 nm dan 800 nm oleh penyinaran serat optik nonhidrogenasi hanya menjelaskan bagaian lemah dari modulasi indeks yang berkaitan dengan pembentukan Bragg grating dan 2) bahwa loss yang ditandai oleh pembentukan cacat Ge(I) dan Ge(2) berkontribusi terutama pada variasi indeks bias rerata Δn_{wm} .

T.E. Tsai et al (1997)(1998) telah menggunakan spektroskopi RPE untuk mempelajari evolusi konsentrasi cacat paramagnetik Ge(I), Ge(2), Ge(E') dan Ge(E'dl) yang dibentuk selama penyinaran serat optik germanosilikat hidrogensi di mana penyinaran direalisasikan menggunakan laser pulsa KrF 248 nm. Marilah kita tinjau model ini dalam kasus serat optik

a). Serat Optik nonhidrogenasi

T.E. Tsai et al telah menunjukkan bahwa $[\text{Ge}(E')]$ dan n mengikuti sebuah hukum kuasa a ($0 < a < 1$) sebagai fungsi intensitas kumulatif yang diterima oleh serat optik mm hidrogenasi. Maka kita dapat merumuskan hipotesis bahwa $\text{Ge}(E')$ bertanggung jawab pada variasi indeks bias yang disebabkan oleh penyinaran serat optik germanosilikat non hidrogenasi. Beberapa hasil penelitian menunjukkan kebenaran hipotesis ini. Begitu pula, M. Essid et al (1998) telah membandingkan spektrum loss terinduksi dalam domain UV et VUY (3.5 - 6.5 eV) pada saat penyinaran gelas germanosilikat menggunakan laser ArF dan KrF. Sampel-sampel yang disinari merupakan gelas yang didoping germanium (3 GeO, : 97 SiO, dalam mol %) yang difabrikasi dengan metode VAD. Mereka juga menyimpulkan bahwa kedua radiasi laser menghapus absorpsi pada pita yang terletak di 5.14 eV. Pita ini berkaitan dengan defec Ge = 0 [Hosono et al, 1992], laser ArF nampak kurang efektif daripada laser KrF [Essid et al, 1998]. Tidak semua dari hasil ini yang sesuai dengan hasil yang diperoleh B. Leconte : B. Leconte (1998) membandingkan spektrum loss yang diinduksi oleh penyinaran gelas germanosilikat (7 mole % GeO₂), menggunakan laser ArF maupun KrF B. Leconte (1998) hanya mengamati penghapusan pita yang terletak di sekitar 5,1 eV pada saat penyinaran oleh laser ArF Di lain pihak, M. Essid et al (1998) melaporkan bahwa penyinaran oleh laser KrF membangkitkan sebuah spektrum loss yang terpusat di 6,4 eV (dinamai Gc(E')) dua kali lebih kuat daripada yang diperoleh dengan menggunakan ArF (intensitas kumulatif de 9 kJ/cm²). Hasil ini sulit dijelaskan jika spektrum loss yang dibentuk di sekitar 6.4 eV (cacat Ge(E')) adalah penanggung

jawab dari seberapa besar dari perubahan indeks bias fotoinduksi. Sebenarnya, perubahan indeks bias fotoinduksi di dalam sebuah serat optik dengan doping germanium (seperti SME 28) adalah lebih besar ketika fabrikasi grating dilakukan dengan laser ArF daripada dengan laser KrF [Leconte, 1998]. Di lain pihak, T.E. Tsai *et al* (1998) menunjukkan bahwa cacat-cacat Ge(I) dan Ge(2) tidak terletak pada fringi terang. Hal ini sama dengan kesimpulan yang diperoleh B. Leconte *et al* (1997); Loss terletak antara 210 nm dan 300 nm berkontribusi terutama pada indeks rerata. Sebagai kesimpulan, terlihat bahwa model *color centre* yang bertanggung jawab pada loss di dalam domain spektral {190 nm - 400 nm) hanya menjelaskan totalitas modulasi indeks bias yang diciptakan oleh penyinaran serat optik germanosilikat non hidrogenasi. Dari uraian di atas dapat disimpulkan bahwa mekanisme pembentukan *color centre* dapat menjelaskan terbentuknya cacat-cacat dalam gelas yang bertanggung jawab pada proses fotosensitivitas gelas germanosilikat.

b) Serai Optik hidrogenasi

Di dalam artikel mengenai metode fotosensitivitas serat optik dengan ipetodc hidrogenasi, R.M. Atkins *et al* (1993) menunjukkan bahwa penyinaran gelas germanosilikat hidrogenasi oleh radiasi laser UV 248 nm menyebabkan 1) penghapusan pita absorpsi di sekitar 244 nm dan 2) pembentukan spektrum loss di dalam daerah spektrum {175 nm - 220 nm) dengan intensitas lebih besar dan pada di dalam gelas non hidrogenasi. Atkins *et al* menjelaskan bahwa pembentukan *color centre* harus diperhitungkan untuk menjelaskan peningkatan fotosensitivitas. K. Awazu *et al* (1997) menunjukkan bahwa terdapat suatu korelasi linier antara penurunan (disebabkan oleh penyinaran UV) konsentrasi cacat $G_c = 0$ dan peningkatan konsentrasi cacat $Ge(E')$. B. Leconte (199K) mengkonfirmasi pengamatan R.M. Atkins *et al* (1993) dengan menunjukkan bahwa loss yang tercipta disekitar 220 nm oleh penyinaran gelas germanosilikat hidrogenasi adalah kira-kira lima kali lebih kuat daripada di dalam gelas germanosilikat non hidrogenasi. Sebaliknya Leconte tidak mengamati penghapusan pita disekitar 244 nm pada saat penyinaran yang dilakukan dengan sinar laser ArF [Leconte, 1998].

T.E. Tsai *et al* (1997) menggunakan spektroskopi HI' untuk memastikan peranan hidrogenasi pada peningkatan foto sensitivitas serat. Mereka menunjukkan bahwa 1) konsentrasi cacat yang dibentuk oleh penyinaran serat optik hidrogenasi $Ge(E')$ adalah lebih besar daripada cacat yang terbentuk di dalam serat optik non hidrogenasi; 2) $G_c(E')$ dan A_n mengikuti hukum evolusi yang sama sebagai fungsi intensitas kumulatif yang diterima oleh serat optik hidrogenasi (hukum eksponensial saturasi); 3) konsentrasi cacat $Ge(E')$ yang terbentuk pada saat penyinaran serat optik hidrogenasi terganggu sedikit pada intensitas awal pita absorpsi terpusat di sekitar 244 nm [Tsai *et al*, 1997]. Kesimpulan di atas disandarkan pada fakta bahwa penyinaran serat optik hidrogenasi menyebabkan terbentuknya spesies GeH [Greene *et al*, 1994] untuk mengajukan hipotesis bahwa perubahan indeks bias yang dibentuk oleh penyinaran dapat dinyatakan oleh relasi:

$$A_n = k_{GcE}[Ge(E')] + k_{OeH}[GeH] + k_x[x] \quad (16)$$

Dalam relasi di atas X menyatakan sebuah spesies diamagnetik yang mungkin berkaitan dengan mekanisme densifikasi dan k , $(I - Ge(E'))$, GeH atau X adalah perubahan indeks bias yang dibentuk oleh satu satuan konsentrasi spesies I .

C. Dalle *et al* (1999) menggunakan spektroskopi inframerah di dalam daerah spektrum $\{2000 \text{ cm}^{-1} - 4000 \text{ cm}^{-1}\}$ untuk mempelajari evolusi konsentrasi spesies hidrogenasi yang terbentuk oleh penyinaran gelas germanosilikat yang dihidrogenasi. Penyinaran dilakukan dengan menggunakan laser panjang gelombang 244 nm pulsa [Dalle, 2000]. Penyinaran memicu pembentukan spesies hidroksil air dan spesies GeH . Sebuah hasil penting yang diperoleh dalam penelitian ini adalah dinamika evolusi $[GeH]$ sebagai fungsi jumlah pulsa tidak tergantung intensitas per pulsa ($30 \text{ mJ/cm}^2 < F < 140 \text{ mJ/cm}^2$) sedangkan dinamika evolusi $A_{n_{m,x}}$ tergantung pada intensitas per pulsa. Di lain pihak, korelasi pada intensitas per pulsa tertentu antara dinamika evolusi spesies hidroksil dan dinamika evolusi Δn_{mod} terlihat tidak ada korelasinya. Hasil ini menunjukkan bahwa kontribusi spesies GeH pada fotosensitivitas gelas hidrogenasi adalah kecil.

Kesimpulannya, identifikasi semua spesies yang bertanggung jawab terhadap perubahan indeks bias fotoinduksi di dalam serat hidrogenasi belum tuntas. Spektrum rugi yang terbentuk di

dalam ultraviolet masih sangat kuat dan memberi sumbangan yang berarti pada perubahan indeks bias (relasi Kramers-Kronig). Meskipun identifikasi semua pita rugi di dalam daerah ultraviolet belum lengkap, namun telah diketahui bahwa center paramagnetik Ge(E') disekitar 193 nm bertanggung jawab pada sebagian besar variasi indeks bias.

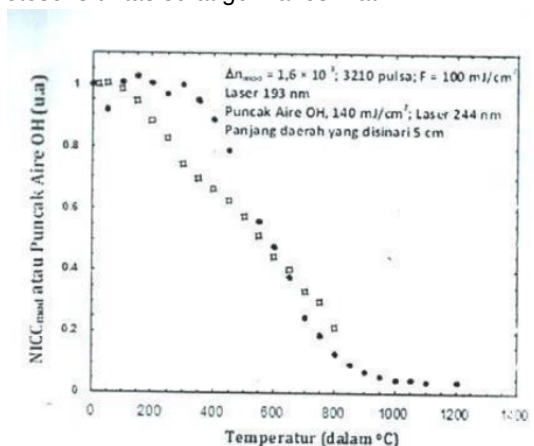
Para Hadirin yang saya hormati

Relasi konjugasi Kramers-Kronig menunjukkan pentingnya menentukan stabilitas cacat yang terbentuk oleh penyinaran UV gelas germanosilikat untuk memperkirakan stabilitas perubahan indeks bias.

Pada 1986, E.J. Friebele et D. Griscom melakukan eksperimen destruksi isokron cacat paramagnetik Gc(I), Ge(2) dan Ge(E') yang dibentuk oleh iradiasi gamma gelas germanosilikat. Mereka menggunakan spektroskopi RIE untuk mengikuti evolusi konsentrasi cacat sebagai fungsi temperatur. Stabilitas termal cacat Ge(I) dan Ge(2) secara signifikan lebih lemah daripada cacat Ge(E') [Tsai et al, 1993]. Sebenarnya, cacat-cacat Ge(I), Gc(2) dan Ge(E') terhapus oleh peningkatan temperatur gelas germanosilikat berturut-turut 200°C, 350°C ct 600°C [Friebele et al, 1986]. Relasi antara [Ge(I)], [Gc(2)] dan Δn_{mod} menunjukkan bahwa stabilitas komponen Δn_{mod} adalah lebih kecil daripada stabilitas Δn_{mod} , atau dengan kata lain, bahwa stabilitas panjang gelombang grating adalah lebih kecil daripada stabilitas reflektivitas grating (modulasi kontras grating selama anealing). Pada 1993, T. Tsai et al meneliti korelasi antara destruksi isokron reflektivitas Bragg grating dan penghapusan cacat Ge(E'). Bragg grating difabrikasi di dalam serat optik germanosilikat dengan bantuan laser pulsa 244 nm. Cacat Ge(E') dibentuk oleh penyinaran gelas germanosilikat dengan laser KrF. Evolusi konsentrasi cacat-cacat ini direkam menggunakan spektroskopi RPE selama destruksi isokron. T. Tsai et al (1993) menunjukkan adanya hubungan antara penurunan Δn_{mod} dan [Ge E'] pada saat temperatur dinaikkan sampai 650° C. Mereka mengajukan hipotesis bahwa cacat Gc(E') secara langsung bertanggung jawab pada pembentukan grating. Pada 1998, M. Ohama et al mempelajari penurunan isotermal spektrum absorpsi UV yang berkaitan dengan cacat Ge(E'). Cacat dihasilkan oleh penyinaran ($\lambda_p = 191$ nm) gelas VAD germanosilikat (15.7 GeO, - 84.3 SiO, dalam mol %) non hidrogenasi. Mereka menunjukkan bahwa evolusi loss $A_a(Ge(E'))$ mengikuti hukum peluruhan eksponensial

$$\Delta\alpha(t) = \Delta\alpha_0 \exp\{- (t/\tau)^\beta \} \quad 0 \leq \beta \leq 1 \quad (17)$$

1/r mengikuti hukum Arrhenius sebagai fungsi temperatur. Stabilitas grating yang difabrikasi di dalam serat optik nonhidrogenasi, T. Erdogan et al (1994) menunjukkan sebuah hukum ripe eksponensial berupa penurunan secara isothermal modulasi indeks bias. Dari fakta ini, hukum evolusi $\Delta\alpha$ (Ge(E')) sesuai dengan model yang menyatakan bahwa cacat Ge(E') merupakan salah satu penanggung jawab dari fotosensibilitas serat germanosilikat



Gambar 14. Perbandingan antara stabilitas termal grating yang dicetak di dalam serat optik SMF28 hidrogenasi (kotak kosong) dan stabilitas puncak absorpsi OH (lingkaran) (NICC – Nortnalutd integrated Coupling Constant) (Dallc, 200).

Pendifusian hidrogen di dalam sebuah serat optik germanosilikat (untuk meningkatkan fotosensibilitas gelas) menyebabkan grating di dalam serat optik hidrogenasi kurang stabil pada temperatur pada temperatur kamar [Patrick *et al*, 1995] [Kannan *et al*, 1997]. Efek ini di tafsirkan sebagai hasil destruksi spesies hidrogen kurang stabil yang dibentuk pada saat penyinaran gelas yang dimuati hidrogen [Grubsky, 1999] [Dalle, 2000]. C. Dalle (2000) menggunakan spektroskopi IR di dalam daerah spectrum (2000 cm⁻¹-4000 cm⁻¹) untuk mempelajari stabilitas spesies T-OH (T = Si ou Gc), GeH et H₂O pada saat pemanasan isokron (30 min) gelas germanosilikat hidrogenasi yang mula-mula disinari. Terlihat bahwa spesies H₂O dan GeH adalah kurang stabil dari pada spesies T-OH. Sebenarnya, konsentrasi spesies H₂O memulai turun begitu suhu diturunkan setiap 100° C, spesies tidak lagi turun setelah 300°C [Dalle *et al*, 1999]. 650°C. Konsentrasi spesies T-OH turun secara perlahan mulai dari 450°C, spesies terdeteksi sampai 1200°C (lihat gambar 14).

Sebuah penelitian analog dengan yang dilakukan oleh C. Dalle (2000) dilakukan oleh V. Grubsky (1999) menggunakan spektroskopi inframerah serapan pada serat optik hidrogenasi yang disinari kemudian dipanaskan setelah hidrogen dikeluarkan selama 10 menit pada temperatur semakin meningkat (destruksi isokron). Domain spektral {1300 nm -1500 nm } yang dianalisis memungkinkan memperkirakan absorpsi yang dipicu oleh pita harmonik air dan spesies T-OH. Pengukuran V Grubsky (1999) tidak hanya membenarkan hasil yang diperoleh C. Dalle (2000) tetapi dapat memastikan mekanisme penurunan indeks bias yang diamati pada saat temperatur grating dicetak di dalam serat optik hidrogenasi dinaikkan di atas 100°C. V. Grubsky (1999) mengajukan hipotesis bahwa spesies H₂O bereaksi dengan cacat Ge(E') menurut reaksi



Dapat disimpulkan, efek pemanasan gelas atau serat optik yang sebelumnya disinari mengakibatkan suatu modulasi intensitas loss yang dinyatakan oleh beberapa macam spesies cacat yang terbentuk pada saat penyinaran. Konsentrasi cacat Ge(E'), Gc(I) dan Ge(2) dan konsentrasi spesies GeH dan H₂O berkurang karena kenaikan temperatur, konsentrasi spesies T-OH meningkat sedikit di awal siklus pemanasan kemudian menurun [Grubsky, 1999] [Dalle, 2000]. Korelasi yang terbangun antara penurunan modulasi indeks bias dan konsentrasi cacat menyimpulkan bahwa model color center bertanggung jawab pada modulasi.

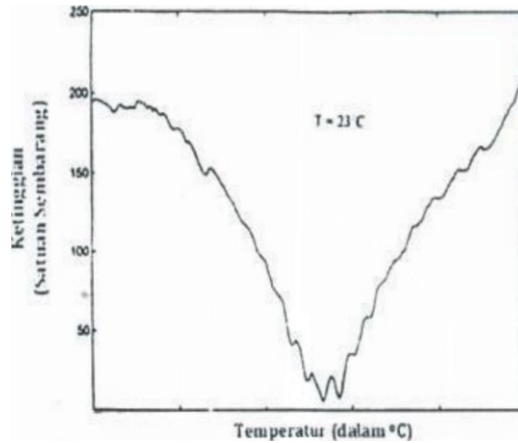
Para Hadirin yang saya hormati

Model yang kedua adalah Model densifikasi foto-elastik. Keberadaan variasi indeks bias yang diinduksi oleh gejala densifikasi telah ditunjukkan oleh Fiori *et al* (1986), pada saat penyinaran UV 248 nm gelas tipis SiO₂. Pengamatan ini dapat dijelaskan berkat relasi Lorenz/Lorentz yang menghubungkan variasi relative indeks bias $\Delta n/n$ sebuah bahan dengan variasi relative kerapatannya $\Delta \rho/\rho$:

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{(n^3-1)(n^2+1)}{6n^2} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \quad (19)$$

Di dalam persamaan (19), variasi fotosensibilitas yang diinduksi oleh densifikasi medium tidak diperhitungkan. Linieritas relasi yang menghubungkan $\Delta n/n$ dengan $\Delta \rho/\rho$ telah dibuktikan secara eksperimental oleh Fiori *et al* (1986) untuk variasi relatif kerapatan sampai 22%. Fiori juga menunjukkan bahwa gejala densifikasi yang diinduksi oleh penyinaran UV adalah sama dengan densifikasi gelas yang dikenai gaya tekan hidrostatik. Mereka mengansumsikan terjadi sebuah perubahan struktur lokal gelas dan penurunan orde kerapatan molekul-molekul SiO₂.

Pembuktian secara eksperimen densifikasi di dalam gelas germanosilikat pertama kali dilakukan oleh P. Cordier *et al* (1994). Cordier melakukan pengamatan sebuah plat gelas yang disinari oleh frinji UV dengan menggunakan mikroskop elektron transmisi (TEM). B. Pommellec *et al* (1995) telah menafsirkan orde besarnya densifikasi menggunakan mikroskop atomik (AFM). Cordier memfabrikasi Bragg grating menggunakan penyinaran frinji UV dengan periode A di dalam inti sebuah preform gelas germanosilikat menggunakan laser pulsa 244 nm (Gambar 10)



Gambar 15. Topografi transversal permukaan preform di sekitar tempat dimana grating dicetak. Grating dicetak dengan bantuan laser kontinu 244 nm (intensitas rerata medan frinji = 70 W/cm², selang penyinaran = 650 s, periode grating = 55 gm). (Douay et al, 1997)

Pengujian menggunakan mikroskop atomik (AFM) membuktikan bahwa suatu korugasi dengan periode A tercetak di dalam sebuah cekungan [Poumellec *et al*, 1995]. Pencetakan grating di dalam gelas preform dengan bantuan laser kontinu 244 nm menghasilkan juga sebuah densifikasi gelas (Poumellec *et al*, 1996). Sebagai gambaran, gambar 1-2 menyajikan profil transversal permukaan sebuah gelas preform di tempat dimana grating dicetak [Douay *et al*, 1997]. Grating dicetak menggunakan laser kontinu 244 nm ($I = 70 \text{ W/cm}^2$, $t = 650 \text{ s}$, $A = 5 \text{ gm}$). B. Poumellec *et al* (1996) menunjukkan bahwa evolusi (sebagai fungsi jumlah N pulsa) kedalaman rerata cekungan d dapat dinyatakan oleh hukum eksponensial: $d = d_0(1 - \exp(-\alpha N))^P$ dimana $P = 0.67$. Harus diperhatikan bahwa evolusi sebagai fungsi N dari Δn_{mod} yang tercipta oleh penyinaran serat optik germanosilikat (244 nm, pulsa) dapat disajikan oleh sebuah hukum eksponensial tipe ini ($\alpha = 0.5$) [Leconte, 1998].

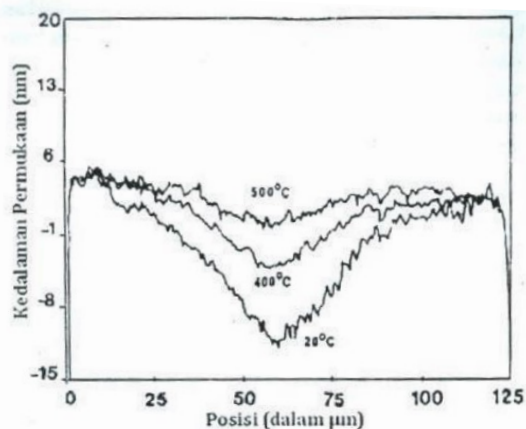
Pada 1996, B. Poumellec *et al* mengemukakan sebuah model densifikasi foto-elastik dengan memperhitungkan perubahan polarisasi medium (gelas preform) yang diinduksi oleh deformasi permanen dan elastik yang dipicu oleh densifikasi (efek fotoelastik). Dengan menentukan kedalaman cekungan dapat dihitung perubahan indeks bias yang terkait dengan efek fotoelastik dan densifikasi. Model tersebut mengasumsikan secara sederhana bahwa penyinaran terjadi secara selang-seling: distribusi intensitas cahaya sepanjang vektor gelombang grating tidak sinusoidal tetapi berbentuk sebuah undak. Sebuah deformasi permanen (densifikasi) terbentuk di dalam daerah yang disinari, reaksi elastik medium terhadap densifikasi berwujud suatu deformasi elastik di daerah yang disinari dan yang tidak disinari. Model tersebut mengasumsikan juga bahwa perubahan polarisasi medium hanya berasal dari konstrain elastik sedangkan densifikasi mengubah volume gelas. Sebuah perkiraan kedalaman ternormalisasi dari cekungan e_z ; dapat dihitung dengan menganggap bahwa ketebalan efektif grating adalah sama dengan ketebalan preform. e_z secara pendekatan didefinisikan oleh relasi [Poumellec *et al*, 1996]:

$$e_{zz} = \frac{2d}{e} \quad (20)$$

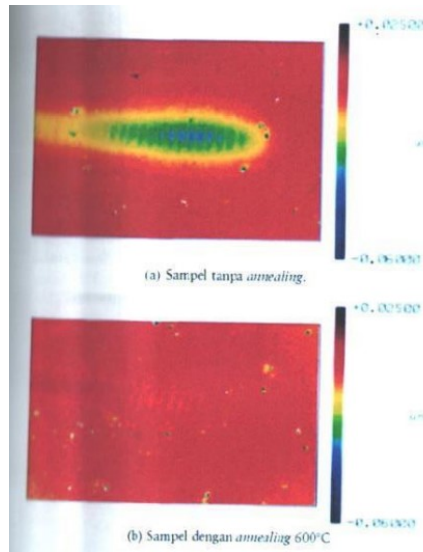
dimana J adalah kedalaman cekungan, e ketebalan sampel, Dengan menganggap, $e_u = e_{yt} = E_M$, (densifikasi isotrop) model ini memungkinkan untuk memenghirung amplitudo modulasi indeks bias rerata menggunakan relasi:

$$\Delta n_{\text{mod}}^{\text{cal}} \approx \epsilon_{zz} \quad (21)$$

Dengan menggunakan model ini, M. Douay *et al* (1997) menunjukkan bahwa densifikasi gelas dan efek foto-elastik terkait memberi kontribusi 60% pada modulasi indeks bias di dalam gelas germanosilikat oleh penyinaran dengan laser kontinu 244 nm. Model densifikasi foto-elastik dijelaskan oleh B. Pommellec *et al* (1996) untuk mengestimasi besar modulasi yang berkaitan dengan densifikasi di dalam kasus penyinaran preform gelas germanosilikat. Model ini selanjutnya digeneralisir oleh E Kherbouche (1999) dalam kasus grating yang dicetak di dalam serat optik. Dalam hal ini, F. Kherbouche (1999) menggunakan metode elemen hingga untuk menghitung medan konstram yang diinduksi di dalam core dan *cladding* serat optik oleh profil densifikasi yang berbeda-beda. Hasil perhitungan membenarkan kesimpulan yang diperoleh dari model B. Pommellec. N.F. Borrelli *et al* (1999) melakukan penyinaran plat gelas germanosilikat menggunakan cahaya yang difokuskan dari laser ArF dan juga laser KrF. Tujuan eksperimen Borrelli adalah 1) untuk menentukan hukum yang merkaitan penurunan relatif volume gelas dengan jumlah pulsa yang digunakan untuk menyinari dan dengan intensitas per pulsa dan 2) untuk membandingkan amplitudo densifikasi yang diinduksi oleh laser ArF dengan yang diinduksi oleh laser KrF. Dalam hal ini harus dicatat bahwa dalam eksperimen ini absorpsi disekitar 244 nm yang menyatakan cacat tipe defisiensi oksigen telah diminimalisir ($\alpha < 3 \text{ cm}^{-1}$) dengan bantuan pemanasan sampel gelas oksigenasi. Koefisien absorpsi dari sampel yang digunakan di dalam eksperimen B. Pommellec *et al* (1996) adalah lebih besar dari 100 cm^{-1} di dalam daerah spektrum yang sama. N.F. Borrelli *et al* (1999) menunjukkan bahwa penyinaran sampel menggunakan laser KrF menghasilkan suatu densifikasi relatif yang berarti amplitudo naik secara linier sebagai fungsi jumlah pulsa. Pada jumlah pulsa tertentu, amplitudo diukur oleh N.F. Borrelli *et al* (1999) terlihat lebih kecil daripada yang diukur oleh B. Pommellec *et al* (1996). Pada saat penyinaran dilakukan dengan laser ArF, N.F. Borrelli *et al* (1999) memperoleh hasil lebih klasik. Densifikasi relatif mengikuti hukum kuasa a ($a = 0.7$) sebagai fungsi N . Amplitudonya lebih besar daripada dengan yang diukur pada saat penyinaran dilakukan dengan laser KrF (dosis = $(I/cni^2)N$). N.F. Borrelli *et al* (1999) menunjukkan bahwa gejala densifikasi merupakan penanggung jawab fotosensibilitas serat optik non hidrogenasi oleh laser KrF. Sebaliknya, N.F. Borrelli *et al* (1999) menunjukkan bahwa serat optik yang difabrikasi dari preform gelas sampel penelitiannya tidak fotosensitif pada saat disinari dengan cahaya 248 nm. Sebaliknya, J. Albert *et al* (1999) menunjukkan bahwa serat optik tersebut adalah fotosensitif pada saat serat disinari dengan laser ArF artinya dalam kasus ini suatu densifikasi yang kuat diciptakan oleh penyinaran. Sebaliknya, H.I. Imberger *et al.* (1994) mengamati modifikasi keadaan konstrain pada saat penyinaran UV Pembentukan kristal tegangan ditafsirkan sebagai pemampatan core serat optik [Pommellec *et al*, 1996][Limberger *et al*, 1996]. Hidrogenasi meningkatkan fotosensitivitas UV tetapi tidak menungkatkan densifikasi (Douay *et al*, 1997).

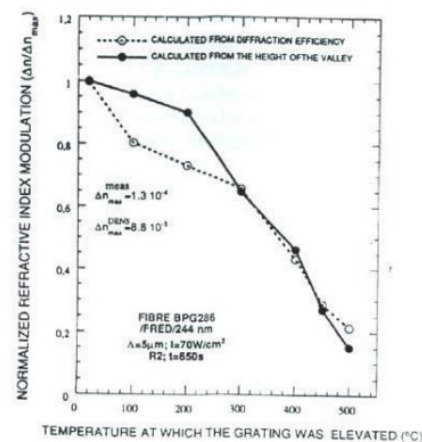


Gambar 16. Evolusi topografi transversal permukaan preform gelas germanosilikat setelah peningkatan temperatur sampel. Rekaman topografi dilakukan menggunakan mikroskop AFM di tempat grating dicetak di dalam core plat preform non hidrogenasi. Pencetakan dilakukan dengan bantuan laser kontinu 244 nm (latrasi penyinaran 650 s, intensitas rerata medan frinji: 70 W/cm²)(Douay *et al*, 1997)



Gambar 17. Gambar topografi sebuah permukaan preform dimana grating difabrikasi menggunakan laser UV kontinyu 244 nm, intensitas 200 W/m², waktu iradiasi 20 menit, periode grating 5 mm. (Douay et al, 1997)

Douay *et al* (1997) melakukan eksperimen peluruhan dipercepat menggunakan pemanasan secara isokron grating (yang dicetak di dalam gelas preform germanosilikat yang didoping dengan boron menggunakan laser kontinyu 244 nm, 70 W/cm²) dan membandingkan evolusi An_r , dengan evolusi kedalaman d permukaan daerah vanr disinari [37]. Douay *et al.* (1997) menunjukkan bahwa kedalaman bekuianj secara monoton sebagai fungsi peningkatan temperatur. Sebagai contoh penurunan kedalaman ini ditunjukkan pada gambar 16. Gambar topografi yang ditunjukkan dalam gambar 16 dan 17 direkam di awal dan selama pemanasan. Selain itu, mereka membandingkan variasi dari modulasi ternormalisasi sebagai fungsi T yang dihitung 1) dari pengukuran efektivitas difraksi dan 2) kedalaman cekungan. Perbandingan ini disajikan dalam gambar 18. Berangkat dari hasil tersebut, adalah mungkin menganggap bahwa korelasi yang baik terbangun antara gejala densifikasi dengan penurunan efektivitas difraksi grating karena pengaruh pemanasan menunjukkan bahwa bagian yang tidak dapat diabaikan dari modulasi indeks bias berasal dari densifikasi gelas dan perubahan polarisasi karena efek fotoelastik.



Gambar 18. Evolusi modulasi indeks bias ternormalisasi selama destruksi termal isokron grating yang dicetak di dalam core sebuah plat gelas germanosilikat nonhidrogenasi. Kondisi penyinaran adalah identik dengan yang dilaporkan dalam keterangan gambar 18. Simbol lingkaran penuh dan lingkaran kosong berturut-turut menyatakan modulasi indeks bias yang dihitung dengan model densifikasi fotoelastik dan yang menggunakan efektivitas difraksi grating [Douay et al, 1997].

Bapak Rektor, Anggota Senat, serta Para Hadirin yang saya hormati

Model ketiga adalah Model Grating Kimia. M.A. Fokine *et al* (1996) mengusulkan sebuah model untuk mencetak grating yang sangat stabil di dalam serat optik germanosilikat. Metode ini terdiri dari penggunaan sebuah serat optik yang core-nya didoping oleh Flor yang dihidrogenasi kemudian disinari menggunakan medan frinji UV. Pada posisi frinji terang, penyinaran UV menyebabkan pembentukan spesies T-OH (Si, Ge = T). Temperatur serat optik kemudian secara progresif dinaikkan sampai 900°C. Pada temperatur ini spektrum orde satu grating lenyap, kemudian muncul kembali untuk saturasi pada suatu harga reflektivitas 30% di akhir beberapa menit.

M.A. Fokine *et al.* menunjukkan bahwa grating yang baru ini sangat stabil, reflektivitas tetap ada sampai pemanasan isothermal mencapai temperatur 810" selama 550 h. Peneliti menafsirkan hasil penelitiannya dengan menganggap bahwa flor di dalam core bereaksi pada temperatur tinggi dengan spesies hidroksil untuk membentuk asam florhidrik. Asam florhidrik kemudian terdifusi keluar serat optik. Maka grating yang dimunculkan oleh peningkatan termal berhubungan dengan sebuah grating kimia dimana konsentrasi flor turun di daerah frinji terang. Hipotesis ini dapat menjelaskan peningkatan reflektivitas grating yang dicetak di dalam serat optik yang dihidrogenasi yang diamati pada saat pemanasan isokron grating yang dicetak di dalam serat optik yang corenya mengandung flor [B. Leconte, 1998].

Eksperimen pertama yang menunjukkan keberadaan grating kimia yang terbentuk pada saat penyinaran sebuah plat gelas menggunakan sistem frinji UV dipublikasikan oleh F. Kerbouche *et al* (2000). Dalam eksperimen ini sebuah plat gelas germanosilikat yang didoping boron disinari oleh 10' pulsa yang berasal dari laser pulsa 244 nm dengan intensitas per pulsa 200 mj/cm². Periode frinji sama dengan 5 mm hingga 10 mm. Analisis kimia grating dilakukan dengan teknik fluoresen dengan dispersi panjang gelombang. Konsentrasi oksida germanium ditemukan berubah dengan periode sama dengan periode grating, dan berkurang pada daerah frinji terang, konsentrasi oksigen berubah berlawanan fase dengan modulasi germanium. F. Kherbouche memperkirakan bahwa modulasi konsentrasi germanium mungkin berasal dari sebuah modulasi indeks bias berorde 8×10^{14} . Memperhitungkan kesulitan pengukuran, tidak ada eksperimen yang ditujukan untuk mengukur stabilitas modulasi konsentrasi telah dilakukan. Namun demikian kita dapat memperkirakan bahwa stabilitas grating jenis ini yang berkaitan dengan gejala difusi adalah besar.

Kesimpulan

Pemanasan grating (atau gelas yang disinari) telah dilakukan untuk membuktikan model-model fotosensibilitas. r.ksperimen-eksprimen tersebut mengkonfirmasi pentingnya *cacat* Ge(E') dan densifikasi untuk menjelaskan fotosensibilitas gelas germanosilikat non hidrogenasi. Pengaruh spesies hydrogen juga harus dipastikan menggunakan eksperimen tambahan.

Peran loss ultraviolet yang terbentuk di dalam gelas hidrogenasi (hidroksil dan hidrur) nampak lemah. Stabilitas termal relatif yang lemah dari *cacat* Ge(l) dan Ge(2) menyebabkan perbedaan antara stabilitas panjang gelombang X_{B} dan A_n dan memantapkan karatr lokal stabilitas indeks bias Namun demikian, kontribusi *cacat-cacat* pada variasi indeks bias tetap lemah (* 10^1) [Leconte, 1998] [Wang, 2000].

DAFTAR RUJUKAN

- K.O.Hill et al. 1978, *Photosensitivity in optikal waveguides: application to reflection filter fabrication*, Appl. Phys. Lett., Vol. 32, N°10, 647-649
- G. Mcltz et al. 1989, *Formation of Bragg gratings in optikal fibers by a transverse holographic method*, Opt. Lett., Vol 14, N°15, 823-825
- D. H.Kang, S.O.Park, C.S.Hong, C.G.Kim, *The signal characteristics of reflected spectra of fiber Bragg grating sensors with strain gradients and grating lengths*, NDT&E International 38(2005), 712 -718
- S. Ugale and V Mishra, *Fiber Bragg Grating Modeling, Characterization and Optimization with different index profiles*, International Journal of Engineering Science and Technology Vol. 2(9), 2010, 4463-4468
- D. Arora, J.Prakash, H.Singh and A.Wason, *Reflectivity and Braggs Wavelength in FBG*, International Journal of Engineering (IJE), Volume (5): Issue (5): 2011, 341-348
- R. Kasyhap, *Fiber Bragg Grating, Optiks and Photonics*, Edited by Paul L. Kelly, I. Kaminow, G. Agrawal, ACADEMIC PRESS, (1999).
- A. Hidayat, Q.Wang, M.Doauy, P.Niay, B.Poumellec, F. Kherbouche, and I. Riant, *Temperature-induced reversible changes in the spectral characteristics of fiber Bragg gratings*, APPLIED OPTICS, Col 40, NO.16/1 June 2001
- K.O. Hill et al. 1993, *Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optikal fiber by UV exposure through a phase mask*, Appl. Phys. Lett., Vol. 62, N°10, 1035-1037
- R.J. Lemaire et al. 1993, *High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optikal fibers*, Electr. Lett., Vol. 29, N°13, pg 1191-1193
- R.M. Atkins et al. 1993, *Mechanisms of enhanced UV photosensitivity via hydrogen loading in germanosilicate glasses*, Electron. Lett., Vol 29, N°14, 1234-1235
- R.M. Atkins and R J. Lemaire. 1992, *Effects of elevated temperature hydrogen exposure on short-wavelength optikal losses and defect concentrations in germanosilicate optikal fibers*, J. Appl. Phys., Vol 72, N°2, 344-348
- A. Lino et al. 1990, *Mechanism of Hydrogen-Induced Losses in Silica Based Optikal Fibers*, J. Lightwave Technol. Vol 8, N° 11, 1675-1679
- V. Grubsky et al. 1999, *Photochemical reaction of hydrogen with germanosilicate glass initiated by 3.4-5.4 eV ultraviolet light*, Opt. Lett., Vol 24, N°11, 729
- M.G. Sceats, G.R. Atkins, and S.B. Poole, *Photolytic index changes in optikal fibers*, Ann. Rev. Mater. Sci. 23, p. 381-410, (1993)
- R.J. Campbell, R. Kashyap, *The properties and applications of photosensitive germanosilicate fibres*, Int. J. of Opto-electron. 9, p. 33-57, (1994)
- B. Poumellec and F. Kherbouche, *The Photorefractive Bragg Grating in the fibers for telecommunication*, J. Phys. 111 France. 6, p. 1595-1624, (1996)
- M. Douay, W.X. Xie, B. Leconte, T. Taunay, R. Bernage, R. Niay, R. Cordier, J.F. Bayon, H. Poignant, E. Deleuaque, *Progress in silica optikal fiber photosensitivity*, J. Annals Telecommunications, (1997)
- R.M. Atkins, V. Mizrahi, T. Erdogan, *248 nm induced vacuum UV spectral changes in optikal fibre preform cores: support for a color centre model for photosensitivity*, Elect. Lett. 29, 4, p. 385-387, (1993)
- E. Fenein, *Contribution d l'aide des mecanismes de la photorefraction dans des fibres optiques dopées d l'oxyde de germanium*, Thèse de doctorat d'Universiti Lille, Fdvrier, (1995)
- M.J.F. Digonnet, *A Kramers-Kronig analysis of the absorption change in fiber gratings*, Proceed. SPIE Vol. 2841, p. 109-120, (1996)
- D.P. Hand, P.St.J. Russel, *Photo-induced refractive index changes in germanosilicate fibers* Opt. Lett. 15, 2, p. 102-104, (1990)
- J.P. Bernardin, N.M. Lawandy, *Dynamics of the formation of Bragg gratings in germanosilicate optikal fibres*, Opt. Comm. 79, p. 194-199, (1990)

- C. Fiori, R.A.B. Devine, *Ultraviolet irradiation induced compaction and photobleaching in amorphous thermal SiO_p*, Mat. Res. Soc. Symp. 61, p/ 188-195, (1986)
- F. P. Paync, *Photorefractive gratings in single mode optikal fibres*, Elcct. Lett. 25, 8, p. 498-499, (1989)
- M.G. Sceats, PA. Krug, *In Photosensitivity and Self-Organization in Optikal Fibers and Waveguides*, F. Oullete, Editor, Proc. SpIE 2044, p. 113-120, (1993) « Photoviscous annealing – Dynamics and stability of photorefractive in optikal fibers »
- B. Pournellec, R Niay, M. Douay, J.F. Bayon, *The UV induced refractive index grating in Ge: SiO₂ preforms: additional CW experiments and the macroscopic origin of the change in index*, J. of Phys. D: Appl. Phys. 29, p. 1842-1856, (1996)
- M.A. Fokine, B.E. Sahlgren, R. Stubbe, *The UV induced refractive index grating in Ge :SiO₂ preforms: additional CW experiments and the macroscopic origin of the change in index*, Proceeding of the BGPP Meeting at Williamsburg, paper BsuD5, p. 58-60, (October 1996)
- F. Kherbouche, B. Pournellec. F. Charpentier, R Niay, *Chemical migration during UV writing of Bragg grating in germanium doped silica optikal fibers*, J. Phys. D: Appl. Phys, p 3233-3238, (2000)
- F. Kherbouche, *Modifications chimiques et des contraintes mécaniques induites par irradiation UV des fibres optiques Germanosilicates*, These, Université Paris Sud, Orsay, (1999)
- H. Hosono, Y. Abe, D.L. Kinser, R.A. Weeks, K. Muta, H. Kawazoe, *Nature and Origin of the 5-eV band in SiO₂:GeO₂ glasses*, Phys. Rev. B. 46, 18, p. 11445-11451, (1992)
- J. Albrcht, K.O. Hill, D.C. Johnson, F. Bilodeau, S.J. Milailov, N.F. Borelli, J. Amin, *Bragg gratings in defect-free germanium doped optikal fibers*, Opt. Lett. 24, 18, (1999)
- T.E. Tsai, E.J. Friebele, M. Rajaram.S. Mukhapadhyay, *Structural origine of the 4.16 eV optikal absorption band in silica and Ge-doped silica*, App. Phys. Lett. 64, p. 1481-1483, (1994),
- E.V. Anokin, A.N. Guryanov, D.D. Gusovskii, VM. Mashinskii, S.I. Miroshinskii, S.L. Miroshnichenko, V.B. Neustreuv, V.A. Tikhomirov, YU B. Zverev, *Photoinduced defects in silica glass doped germanium and cerium*, Sov. Lightwac. Commun. 1, p. 123-131, (1991)
- B. Leconte, WX. Xie, M. Douay, R Bernage, P. Niay, J.F. Bayon, E. Delevaque and H. Poignant, *Analysis of color center related contribution to Bragg grating formation in Ge :SiO₂ fibers based on a local Kramerz-Kronig transformation of excess loss/spectra* Appl. Optiks. 36, 24p. 5923-5930, 1997.
- T.E. Tsai, G.M. Williams, E.J. Friebele, *Index structure of fiber bragg grating/ in Ge-SiO₂ fibres*, Opt. Lett. 22, 224 (1997)
- T.E. Tsai, G.M. Williams, E.J. Friebele, *Uniform component of index induced in Ge-SiO₂ fiber/ by partially modulated ultraviolet light*, Appl. Phys. Lett. 72, p. 3243, (1998)
- M. F. ssid, J.L. Brubner, J. Albrcht, K. Awazu, *Difference in the behavior of oxygen deficient defect/ in Ge-doped silica optikal fiber pre- form/ under ArF and KrF excimer laser irradiation*, J. Appl. Phy». 84, 8, p. 4193-4197, (1998)
- B. Leconte, *Contribution d l'étude de la photosensibilité des fibres en silice /ou/ l'effet d'une insolation par un laser d ArF*, Thèse Université Lille 1, (1998)
- R.M. Atkins, RJ. Lemaire, T.E. Erdogan, V. Mizrahi, *Mechanisms on enhanced UV photosensitivity via hydrogen loading germano/silicate glasses*, Elect. Lett. 29, 14, 1231-1235, (1993)
- K. Awazu, *Thermal and photo-initiated reaction/ of H₂ with germano- silicate optikal fiber/* J. Non-Cryst. Solids. 201, 267 (1997)
- T.E. Tsai, E.J. Friebele, *Kinetic/ of defect center/ formation and photo- sensitivity in Ge-SiO₂ fiber/ of various compositions, Bragg Grating, Photosensitivity, and Poling in Glass Fibers and Waveguides : Applications and Fundamentals*, Williamsburg, Tech. Digest, Vol. 17, J M A4-1, p. 101, (1997)
- I. Greene, D.M. Krol, S.G. Kosinski, RJ. Lemaire, P.N. Sacta, *Thermal and photo-initiated reaction/ of H₂ with germano/silicates optikal/ fibers*, J. Non-Cryst. Solid. 168, p. 195-199, (1994)
- Dalle, R Cordier, C. Dpeckcr, R Bernage, M. Douay, R Niay, *Growth kinetic/ and thermal annealing of UV-induced H-bearing defect/ in hydrogen loaded germano/silicate fibre preforms* J. Non-Cryst. Solid. 260, p. 83-98, (1999)

- C. Dalle, *Contribution d l'étude de/ mtcantsmes micro/structuraux lids d la photosensibilit de type I et de type HA des verres de silice par /pectroscopie infrarouge et microscopie electronujue en transmission*, These, Univcrsit< de Lille 1, (2000)
- E.J. Fricbelc, D.L. Griscom, *in Cacats in Glasses*, edited by F.L. Galeencr, L. Griscom, M.J. Weber. Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 61, 319, (1986)
- T.E. Tsai, E.J. Fricblc, D.L. Griscom, *Thermal stabihty of photoinduced gratings and paramagnetic centers in Ge and Ge/P doped silica optikal fibers*, Opt. Lett. 18, p. 935 (1 193)
- M. Ohama, T. Fujiwara, and A.J. Kushima, *Decay of ultraviolelte induced optikal absorption in Ge-doped SiO₂ glass*, Appl. Physics. Lett. 73, 11, p. 1481-1483, (1998)
- T. Erdogan, V Mizrahi, R.J. Lemaire, D. Monroc, *Decay of ultraviolet induced fiber Bragg gratings*, J. Appl. Phys. 76, 1, p. 73-80, (1994)
- S. Kannan, J.Z.Y. Guo, R.J. Lemaire, *Thermal stability analysis of UV induced fiber Bragg grating*, J. Lightwave. Technology. 15, 8, p.1478-1483,(1997)
- H. Patrick, S.L. Gilbrct, A. Lidgard, M.D. Gallagher, *Annealling of Bragg grating in hydrogen loaded optikal fiber*, J. Appl. Phvs. 78, p. 2940-2945,(1995)
- V. Grubsky, *Photosensitivity of germanium doped silica glass and fibers and its applications*, PhD disertation, University of Southern California, (1999)
- P. Cordier, J.C. Doukhan, E. Fertien, R. Bcrnagc, R. Niay, J.F. Bayon, T. Gcorges, *TEM ebaraetementation of densification associated to Bragg grating inscription in a germanosilicate optikal fibers*, Opt. Comin. 111, p. 269-276, (1994)
- B. Pommellec, I. Riant, R. Niay, R. Bemage, J.F. Bayon, *UV ind'iced densification dunng Bragg grating inscription i n Ge :SiO. pre- forms : interferometnc microscopy investigation*, Opt. Mater. 4, p.404-409, (1995)
- M. Douay, WX. Xie, T. Taunay, R. Bemage, R. Niay, P. Cordier, B. Pommellec, L. Dong, J.F. Bayon, H. Poignant, and E. Delevaque, *Densification imolved m the UV-based photosensitivity of silica glasses and optikal fibers*,]. of Lightwave. Tech. 15, 8, p. 1329- 1342,(1997)
- N. F. Rorrelli, Douglass C. Allan, Robert A. Modavis, *Direct measurementn of 248- and 19J- nm exctmer-inducdd densification tnsihca-germania uaveguide blanks*, J. Opt. Soc. Am B, Vol. 16,10, p. 1672-1679,(1999)
- I I.G. Linibrcrger, RY. Fonjallaz, R.R. Salath6, F. Cochet, B. Leuenberger, *Correlation of index changes with stress changes in fibers contaming UV-ivrittcn Bragg gratings in XX'''* Eurepean Conference on Optikal Comunication, Florence, p. 1005-1008, (1984)
- H.G. Limbrcgr, P.Y. Fonjallaz, R.R. Salathe, F. Cochct, *Compaction end photoelastic-induced index changes in fiber Bragg gratings*, Appl. Phys. Lert. 68,22, p. 3069-3071, (1996)
- J. J. Russell, M. A. Davis, J. Sirkis, A. D. Kersey, and H. Lira, *Adaptive-Filter Based Bragg Grating Detnodulator*, *The 16th International Conference on Optical Fiber Sensors*, Nara Japan, October 13th, 2003.
- A.Hidayat, *Contribution a l'etude de la Stabile de Reseaux d'indice inscrits dans des fibres optiques gennanosilicates a l'aide d'un laser a ArF ou d'uit laser Titarte-Sapbire fonetionnant en regime femtoseconde*, These, (2001) Universite des Science et Technologies de Lille,
- Q.Wang, A.Hidayat, P. Niay, M. Douay, *liiflience of Blanket post-e.posure on the thermal stability of the spectral ebaraetensties o/ gratings written in a telecommunication fiber asing hght at 1V1 nm*, Journal of Lightwave Technology, 2000.
- A.Hidayat, Q.Wang, M.Doany, P.Niay, *Influence of Strain and Temperature on grating reflectivity*, CLEO/Europc 2000 Conference on Laser and Elcctro-Optics, Nice, France.
- A.Hidayat, P. Niay, M. Douay, *Stabilite' des caracte'ristniues spectrales des re'seaux de Bragg photo-incnts dans une fibre uptnpie de te'le'communication au moyen d'un laser a' ArF*, 20' Journees Nacionales D'Optique Guidee, Toulousc, France, 20-22 Novembre 2000.
- A.Hidayat, P. Niay, M. Douay, C. Przygodzky, H. Dclbarrc, E.Fertcin, *Changes in refractive index of Standard telecommunication fiber through exposure to femtosecond laser pulses at SIO nm*, *Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides*, Optical Society of America, Srscsa, Italy, 4-6 July 2001.

Menggali Potensi Sumber Daya Hayati Lokal Melalui Kajian Biokimia

Prof. Dr. Subandi, M.Si.

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Yang saya hormati,

Rektor Universitas Negeri Malang selaku Ketua Senat Universitas Negeri Malang
Ketua dan Sekretaris Komisi Guru Besar Universitas Negeri Malang
Para Anggota Senat Universitas Negeri Malang
Para Pejabat Struktural Universitas Negeri Malang
Para Sejawat Dosen, Karyawan, dan Mahasiswa Universitas Negeri Malang, serta segenap
Undangan dan Hadirin yang berbahagia

Mari kita panjatkan puji syukur ke hadirat Allah subhanahu wa ta'ala, yang telah memberikan segala rahmat dan karuniaNya, sehingga kita dapat hadir dalam sidang majelis yang berbahagia ini, seraya memohon agar kegiatan ini mendapat ridhoNya. Amiin. Shalawat dan salam Semoga selalu tercurah kepada Rasulullah Muhammad SAW, beserta keluarga, sahabat dan para pengikutnya.

Bapak Rektor, serta Hadirin yang saya muliakan,

Merupakan kehormatan bagi saya untuk dapat berdiri di hadapan seluruh anggota senat dan hadirin semuanya, dalam menyampaikan pidato pengukuhan saya sebagai Guru Besar di Bidang Biokimia. Pidato ini bukan hanya pertanggung jawaban akademik saya sebagai pemangku jabatan Guru Besar, tetapi mudah-mudahan juga wujud dari ibadah saya dalam melaksanakan perintah Allah SWT untuk selalu menimba ilmu yang bermanfaat dan menyampaikannya demi kemaslahatan sesama. Semoga Alloh selalu membimbing dan memberi kekuatan kepada saya dan kita semua dalam melaksanakannya.

Hadirin sekalian yang saya hormati,

Materi pidato yang akan saya sampaikan ini berjudul:

Menggali Potensi Sumber Daya Hayati Lokal Melalui Kajian Biokimia

Materi ini merupakan bagian dari hasil penelitian kami dengan para mahasiswa bimbingan dalam kurun waktu 5 tahun terakhir, sebagai upaya untuk menggali dan memanfaatkan sumber daya hayati lokal melalui kajian biokimia. Ada 5 topik besar yang akan dibahas pada kesempatan ini, yaitu tentang:

- A. Tempe dan limbahnya,
- B. Mikroorganisme termofilik lokal dan enzim termostabil,
- C. Isolat bakteri pendegradasi fenol dari Kefir Grain,
- D. Potensi sari mesokarp buah sebagai minuman penurunan kadar lemak darah,
- E. Potensi kulit melinjo sebagai obat anti asam urat.

Tempe dan Limbah

Hadirin yang kami muliakan,

Biokimia merupakan bagian dari kimia yang bertujuan untuk memahami struktur organisasi dan fungsi sistem hidup pada tingkat molekuler (Mathews et al, 2000). Dibandingkan dengan reaksi kimia biasa reaksi-reaksi biokimia mempunyai ciri khusus yaitu melibatkan sejenis protein yang disebut enzim. Dengan kata lain proses-prose kimia dalam sistem hidup adalah reaksi-reaksi enzimatik. Oleh karena ada ribuan jenis reaksi-reaksi kimia didalam tubuh makhluk hidup dimana setiap reaksi memerlukan suatu jenis enzim tertentu, maka dapat dipahami bahwa didalam tubuh makhluk hidup terdapat ribuan jenis enzim yang berbeda. Sebagai contoh Proses penghantaran sinyal sel saraf di tubuh serangga difasilitasi oleh enzim Asetilcolin Esterase, proses pencernaan

lemak dilakukan oleh enzim Lipase, terbentuknya asam urat dikendalikan oleh enzim Xantin Oksidase dan lain sebagainya. Oleh sebab itu, jika kita mampu mengendalikan enzimnya maka proses-proses kimia dalam sistem hidup tersebut akan terkendali. Misalnya kerja Asetin colin esterase dapat diblokir oleh insektisida, lipase pankreas dapat dihambat oleh obat penurun kadar lemak darah (orlistat) dan Xantin oksidase dapat dihambat oleh Alupurinol.

Hadirin yang kami muliakan,

Salah satu sumber daya hayati lokal di daerah Malang Raya adalah tempe. **Mungkin tidak ada diantara kita disini yang belum pernah makan tempe, bahkan mungkin tempelahan makanan favorit kita. Masalahnya adalah: seberapa besar manfaat tempe dan industri tempe bagi kita ?**

Di Kota Malang, sentra industri tempe berada di Sanan dengan jumlah perajin tempe dan tahu sebanyak 396 perajin. Mereka tergabung dalam Primer Koperasi Tempe dan Tahu Indonesia (Primkopti) Bangkit Usaha Sanan Kota Malang. Kebutuhan Primkopti Bangkit Usaha Sanan, per hari sebanyak 10 ton (Afandi, 2012). Sementara itu secara nasional, **Indonesia merupakan negara produsen tempe terbesar di dunia dan menjadi pasar kedelai terbesar di Asia. Sebanyak 50% dari konsumsi kedelai Indonesia digunakan untuk produksi tempe, 40% tahu, dan 10% dalam bentuk produk lain (seperti tauco, kecap, dan lain-lain). Konsumsi tempe rata-rata per orang per tahun di Indonesia saat ini diduga sekitar 6,45 kg (Astawan, 2003)**

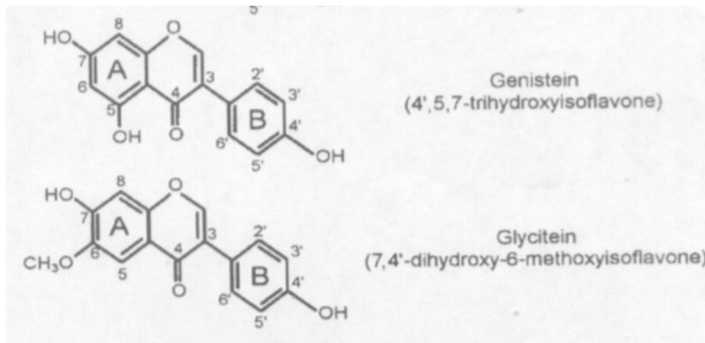
Tempe sebagai makanan sudah dikenal sejak tahun 1805, karena sudah tertulis dalam serat Centhini; dan saat Perang Dunia ke-2, tempe menjadi penyelamat bangsa Eropa yang ditawan Jepang. Dalam penjara mereka dikasih makan tempe, yang ternyata membuat para interniran Eropa itu dapat bertahan hidup, sebab tempe memiliki kandungan protein yang tinggi (**Nugrahanto, 2012**). Kapang yang tumbuh selama proses pembuatan tempe, menghasilkan enzim-enzim yang menghidrolisis senyawa-senyawa kompleks, terutama protein, menjadi senyawa sederhana (oligopeptida atau asam amino) yang lebih mudah dicerna oleh manusia. Di samping itu juga terjadi sintesis senyawa-senyawa berguna, yang semula tidak ada dalam kedelai.

Enzim-enzim yang diproduksi selama pembuatan tempe mampu mensintesis Vitamin B12, sehingga tempe menjadi satu-satunya sumber vitamin B12 yang potensial dari bahan pangan nabati. Kadar vitamin B12 meningkat hingga 33 kali selama fermentasi dari kedelai, riboflavin naik sekitar 8-47 kali, piridoksin 4-14 kali, niasin 2-5 kali, biotin 2-3 kali, asam folat 4-5 kali, dan asam pantotenat 2 kali lipat. Vitamin ini memang tidak diproduksi oleh kapang tempe, tetapi oleh bakteri kontaminan seperti *Klebsiella pneumoniae* dan *Citrobacter freundii*. Kadar vitamin B12 dalam tempe berkisar antara 1,5 sampai 6,3 mikrogram per 100 gram tempe kering. Jumlah ini telah dapat mencukupi kebutuhan vitamin B12 seseorang per hari. Dengan adanya vitamin B12 pada tempe, para vegetarian tidak perlu merasa khawatir akan kekurangan vitamin B12, sepanjang mereka melibatkan tempe dalam menu hariannya (Wikipedia, 2012).

Selain sebagai sumber vitamin B12 ternyata tempe juga bersifat sebagai antioksidan. Sifat anti oksidan ini juga telah kami buktikan dengan penelitian dengan menggunakan sampel tempe Malang. Hasil penelitian kami menunjukkan bahwa:

1. Dari 500 g tempe segar dapat dihasilkan 200 g tepung tempe yang mengandung senyawa isoflavon Genestein sebanyak 1,590 µg. Struktur Genestein dapat dilihat pada Gambar 1 (a).
2. Dengan menggunakan DPPH, daya antioksidan tempe segar dan tepung tempe (setelah diekstrak) relatif terhadap Genistein masing-masing adalah 0,006% dan 0,011%.
3. Ada senyawa-senyawa antioksidan lain dalam tempe, selain Genistein.

Hasil ini sejalan dengan penelitian berikutnya bahwa kandungan senyawa antioksidan dalam tempe bukan hanya Genistein tetapi juga isoflavon yang lain yaitu glycitein dan faktor II yang hanya ada dalam tempe (Nurrahman dkk, 2012:2). Struktur Glycitein dapat dilihat pada Gambar 1 (b).



Gambar 1. Struktur Isoflavon Utama Pada Kedelai (a) Genistein; (b) Glycitein
(Sumber: Alrasyid, 2007)

Senyawa-senyawa isoflavon ini dapat berfungsi sebagai anti tumor, karena sifat antioksidannya itu. Khusus untuk Genistein yang merupakan phytoestrogen, juga bersifat estrogenik, anti-estrogenik, antikarsinogenik, antiviral, antifungal dan antioksidan (Nurrahman dkk, 2012:2). Sifat esterogenik ini, diduga menyebabkannya mampu menggantikan hormon esterogen, sehingga perlu dikonsumsi para wanita pasca menopause, untuk mencegah osteoporosis.

Hilangnya estrogen pada saat menopause memiliki efek yang kritis pada kepadatan tulang. Sebelum masa menopause, hilangnya massa tulang pada wanita sama dengan yang terjadi pada pria (sekitar 3-5% per dekade) dan lebih berkaitan dengan gaya hidup yang bersifat menetap. Meskipun demikian, hilangnya massa tulang meningkat dengan cepat seiring hilangnya estrogen selama masa menopause, dimana seorang wanita mungkin akan kehilangan sebesar 10% hingga 15% pada tulang apendikular serta antara 15% dan 20% dari tulang belakang. Tulang-tulang akan kehilangan massa tulang sekitar 2% setiap tahunnya selama 5-10 tahun setelah masa menopause dan bersifat tetap sekitar 3% per dekade setelah usia 75 tahun (Anonim, 2008) . Khasiat isoflavon dalam kedelai atau tempe untuk kesehatan tulang juga didukung penelitian Wahyuni (2009), yang menunjukkan bahwa pemberian sari kedelai basah (sumber isoflavon) dengan volume 4 ml pada tikus putih usia muda dapat memacu pertumbuhan panjang tulang hingga 14% , sedangkan berat tulang meningkat hingga 29%. Daya antioksidan ini juga dipunyai oleh kedelai hitam (paling tinggi), koro hitam, koro kratok serta kedelai kuning, maupun produk tempennya, terutama setelah fermentasi hari ke-3. Daya antioksidannya lebih tinggi dibanding dengan senyawa lain seperti α -karoten, β -tokoferol, vitamin C maupun BHT sebagai antioksidan sintetis. Dengan demikian kedelai hitam serta produk tempe hasil fermentasi pada hari ke-3 potensial untuk dimanfaatkan sebagai antioksidan alami (Sulistiani dkk, 2010).

Tempe sebagai Penurun Kadar Lemak Darah

Hadirin yang kami muliakan,

Disamping sebagai sumber vitamin B-12 dan antioksidan, tempe juga punya potensi untuk menurunkan kadar lemak darah. Berdasarkan hasil penelitian kami dapat disimpulkan bahwa ekstrak dari 56 g tempe segar mempunyai kemampuan yang sama dengan 1 tablet orlistat (harga sekitar Rp 10.000) dalam menghambat lipase pankreas, suatu enzim yang diperlukan untuk mencerna lemak sehingga dapat masuk kedalam aliran darah. Oleh karena itu Orlistat adalah obat anti obesitas yang juga digunakan untuk menurunkan kadar lemak darah, maka dengan hasil penelitian ini tempe juga memiliki khasiat itu. Dengan perkiraan konsumsi rata-rata **6,45 kg pertahun (Astawan, 2003), berarti konsumsi tempe rata-rata orang Indonesia adalah 17,6 gram perhari, sehingga supaya berkhasiat sebagai anti obesitas, setidaknya kita harus mengkonsumsi tempe tiga kali konsumsi rata-rata orang Indonesia.**

Berdasarkan hasil-hasil penelitian diatas kiranya tidak salah jika WHO menyarankan agar tepung tempe digunakan sebagai bahan makanan bayi dan orang yang kekurangan gizi. Tepung tempe ini mudah dicampur dengan tepung lain untuk meningkatkan nilai gizi dan cita rasanya serta lebih mudah untuk disimpan.

Limbah cair tempe

Hadirin yang berbahagia,

Proses produksi tempe, memerlukan banyak air yang digunakan untuk perendaman, perebusan, pencucian serta pengupasan kulit kedelai. Limbah yang diperoleh dari proses tersebut diatas dapat berupa limbah cair maupun limbah padat. Sebagian besar limbah padat berasal dari kulit kedelai, kedelai yang rusak dan mengambang pada proses pencucian serta lembaga yang lepas pada waktu pelepasan kulit, banyak yang dimanfaatkan untuk makanan ternak. Limbah cair berupa air bekas rendaman kedelai dan air bekas rebusan kedelai masih dibuang langsung diperairan disekitarnya (Anonim, 1989).

Jika limbah tersebut langsung dibuang keperairan maka dalam waktu yang relatif singkat akan menimbulkan bau busuk dari gas H₂S, amoniak ataupun fosfin sebagai akibat dari terjadinya fermentasi limbah organik tersebut (Wardojo, 1975).

Dengan kebutuhan kedelai sebanyak 10 ton perhari (Afandi, 2012), dengan produksi limbah cair 1,5-2 m³ perkwintal kedelai, maka setiap hari Primkopti Bangkit Usaha Sanan Kota Malang akan menghasilkan 150-200 m³ limbah cair tempe, suatu jumlah limbah cair yang cukup besar. Namun dibalik masalah itu hasil penelitian kami memberikan harapan bagi pemanfaatan limbah tersebut. Ternyata limbah cair tempe dapat digunakan sebagai pembasmi larva atau jentik-jentik nyamuk demam berdarah. Larva nyamuk demam berdarah dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Larva Nyamuk Demam Berdarah Dengue

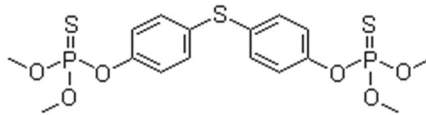
Hasil penelitian kami menunjukkan bahwa selama 48 jam dan pada konsentrasi $\geq 80\%$, limbah cair tempe sudah dapat membunuh 100% larva *Aedes aegypti*, seperti yang terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Pengaruh Konsentrasi Limbah Cair Tempeh terhadap Kematian Larva *Aedes Aegypti*.

| No. | Konsentrasi (%) Limbah cair tempeh | Pesentase kematian rata-rata pada (jam) ke | | | |
|-----|------------------------------------|--|--------|--------|--------|
| | | 12 | 24 | 36 | 48 |
| 1 | Kontrol Negative | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 20 | 15 | 16,25 | 16,25 | 17,50 |
| 3 | 40 | 77,50 | 77,50 | 77,50 | 97,50 |
| 4 | 60 | 88,75 | 92,50 | 92,50 | 96,25 |
| 5 | 80 | 80,00 | 81,25 | 90,00 | 100,00 |
| 6 | 100 | 86,25 | 90,0 | 91,30 | 100,00 |
| 7 | Kontrol Positive (Abate) | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

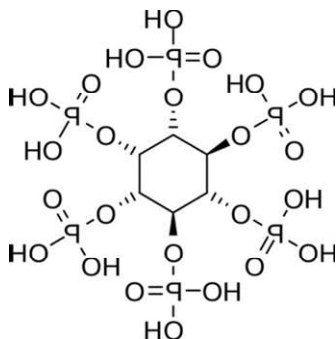
Penyimpanan limbah cair tempe hingga 7 hari, relatif tidak berpengaruh terhadap aktivitas larvaside, sedangkan pendinginan dan penggunaan autoclave menyebabkan aktivitas larvaside menurun.

Data pada Tabel 1 diatas menunjukkan bahwa limbah cair tempe bersifat larvasida. Dibandingkan dengan kontrol positif (Abate 0,1 g / L), Kemampuan larvaside limbah cair tempe lebih rendah 10-13%. Struktur Temephos/Abate dapat dilihat pada Gambar 3. Mengingat beberapa insektisida adalah senyawa organofosfat (Gambar 5), dan senyawa organofosfat yang ada dalam kedelai adalah asam fitat, maka kami juga telah melakukan uji asam fitat dalam bentuk-Na-fitat, sebagai larvasida.

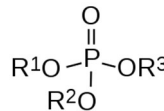


Gambar 3. Struktur Temephos/Abate
(Sumber: CAS, 2012)

Uji aktivitas larvasida menggunakan asam fitat menunjukkan bahwa asam fitat (Gambar 4) merupakan salah satu senyawa aktif sebagai larvasida dalam limbah cair tempe. Pada konsentrasi $\geq 2,5\%$ Na-fitat dapat membunuh sekitar 75% dari larva *Aedes aegypti*. Oleh karena aktivitas larvasida limbah cair tempe lebih tinggi dari pada larutan fitat dengan konsentrasi yang setara dalam limbah tempe, maka diduga masih ada senyawa lain dalam limbah cair tempe, selain asam fitat, yang memiliki sifat larvasida.



Gambar 4. Struktur Asam Fitat



Gambar 5. Struktur Organophosphate

(Sumber: www.chemistry.about.com) (sumber: wikipedia)

Hasil penelitian ini setidaknya mengangkat 'martabat' limbah cair tempe, sehingga tidak hanya menjadi limbah yang membuat masalah, tetapi mempunyai potensi untuk digunakan sebagai pembasmi jentik nyamuk DBD maupun malaria.

Data Kementerian Kesehatan (Kemenkes) RI mencatat jumlah kasus Demam Berdarah Dengue (DBD) pada tahun 2009 mencapai sekitar 150 ribu. Angka ini cenderung stabil pada tahun 2010, sehingga kasus DBD di Indonesia belum bisa dikatakan berkurang. Demikian juga dengan tingkat kematiannya, tidak banyak berubah dari 0,89 pada tahun 2009 menjadi 0,87 pada pada 2010. Ini berarti ada sekitar 1.420 korban tewas akibat DBD. Dari data inilah Kementerian Kesehatan mengungkapkan Indonesia menjadi negara dengan jumlah pengidap demam berdarah dengue (DBD) tertinggi di ASEAN.

• Mikroorganisme Termofilik Lokal dan Enzim Termostabil

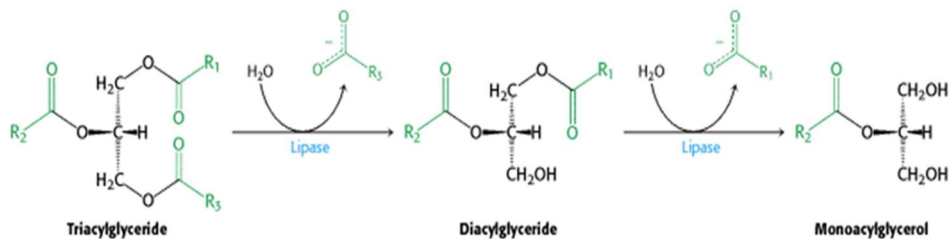
Bapak Rektor dan Hadirin yang Mulia,

Sumber daya hayati lokal berikutnya adalah bakteri termofilik dan enzim termostabil yang dapat diperoleh dari sumber air panas dan kawah gunung berapi yang banyak ditemui di sekitar Malang raya ini.

Mikroorganisme termofilik memiliki suhu pertumbuhan antara 45 hingga 65°C (Volk dan Wheeler, 1988). Kondisi ini biasanya ditemui di daerah vulkanik (kawasan gunung berapi), *hot spring* (sumber air panas) dan sumber api abadi. Penelitian tentang mikroorganisme yang bersifat termofilik semakin prospek dan banyak dikembangkan, karena mikroba ini mampu menghasilkan enzim termostabil yang bisa dimanfaatkan di industri terutama yang melibatkan proses panas tinggi (Tika et al. 2007). Kelebihan lain dari enzim termostabil adalah lebih resisten serta aktif dalam pelarut organik serta bisa mengurangi kontaminasi dari mikroba mesofil (hidup pada suhu kamar). Dalam proses reaksinya, enzim termostabil memiliki suhu optimum yang tinggi, reaksi yang dihasilkan lebih cepat serta dapat meningkatkan kelarutan dari reaktan non gas dan produk (Isnaini, 2009).

Sudah ada beberapa penelitian mikroba termofilik yang menghasilkan enzim termostabil yang memiliki banyak manfaat dan sudah dikomersialisasi, salah satu diantaranya adalah *DNA polymerase* yang digunakan dalam reaksi *Polymerase Chain Reaction* (PCR) yang sudah sangat banyak aplikasinya di dunia rekayasa genetika dan medis. Selain itu juga sudah banyak dikembangkan enzim protease yang merupakan 60% dari total enzim yang sudah tersebar di seluruh dunia dan banyak digunakan pada industri makanan, detergen, industri farmasi, industri kulit, analisis dan pengolahan limbah (Bauzaz et al, 2006). Masih banyak hasil eksplorasi yang sangat prospektif untuk dikembangkan dari mikroorganisme termofilik, salah satu di antaranya adalah enzim Lipase dan Amilase yang bersifat termostabil.

Lipase (E.C 3.1.1.3) merupakan salah satu enzim dari kelas hidrolase yang dapat menghidrolisis trigliserida menjadi asam lemak dan gliserol (Tika et al, 2007). Lipase juga digunakan untuk hidrolisis triasilgliserol menjadi diasilgliserol dan asam lemak (Dali et al, 2009). Reaksi hidrolisis trigliserida dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Reaksi Hidrolisis Trigliserida

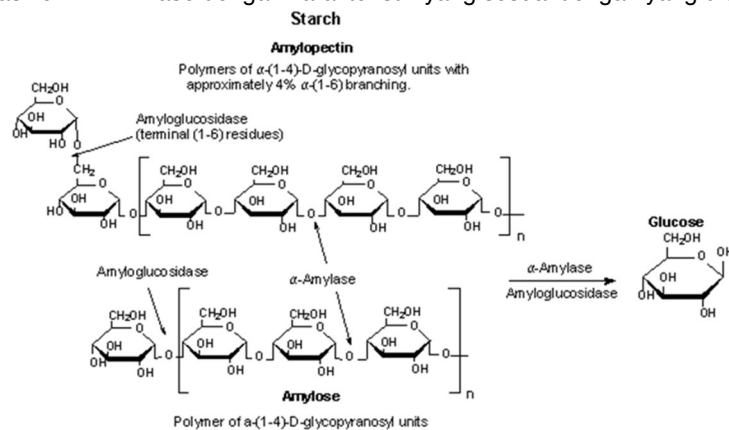
Diasilgliserol adalah ester gliserol yang digunakan sebagai bahan pengemulsi dan penstabil produk makanan, kosmetika dan farmasetika. Sedangkan asam lemak merupakan prekursor bagi berbagai industri kimia sehingga dibutuhkan dalam jumlah besar. Asam lemak dan gliserol merupakan bahan dasar bagi industri oleokimia. Di pasaran dunia, asam lemak dibutuhkan sekitar 1.000.000 ton per tahun (Natalia et al, 2004). Lipase juga dapat digunakan sebagai biokatalisator untuk meningkatkan kualitas crude palm oil (CPO) menjadi minyak sehat (healty oil).

Lipase dapat diisolasi dari hewan, tanaman, dan mikroba, namun dalam sektor industri umumnya berasal dari mikroorganisme. Hal ini karena mikroorganisme relatif lebih mudah untuk ditumbuhkan, kecepatan pertumbuhannya relatif lebih cepat, kondisi selama produksi tidak tergantung oleh pergantian musim, waktu yang dibutuhkan dalam proses produksi lebih pendek, serta mutunya lebih seragam (Hafsah, 2007).

Mikroorganisme yang unggul merupakan salah satu faktor penting dalam usaha produksi enzim. Oleh karena itu isolasi dan identifikasi mikroorganisme lokal penghasil Lipase perlu dilakukan di Indonesia, karena keragaman hayati yang tinggi akan memberikan peluang yang besar untuk mendapatkan mikroorganisme yang potensial sebagai sumber Lipase.

Lipase digunakan dalam proses industri untuk mempercepat reaksi hidrolisis trigliserida. Proses di industri membutuhkan kondisi khusus seperti suhu tinggi, tahan terhadap denaturasi dan proteolisis (Yuneta & Putra, 2010). Suhu tinggi dapat menyebabkan molekul enzim bervibrasi terlalu kuat sehingga mampu memutuskan ikatan hidrogen pada enzim. Putusnya ikatan hidrogen mengakibatkan struktur α -helix dan β -sheet rusak sehingga struktur sekunder mengalami denaturasi. Lipase yang terdenaturasi menjadi suatu kendala dalam proses industri, karena aktivitasnya jauh menurun. Lipase termostabil merupakan enzim yang sangat potensial untuk mengatasi kendala akibat pemanasan.

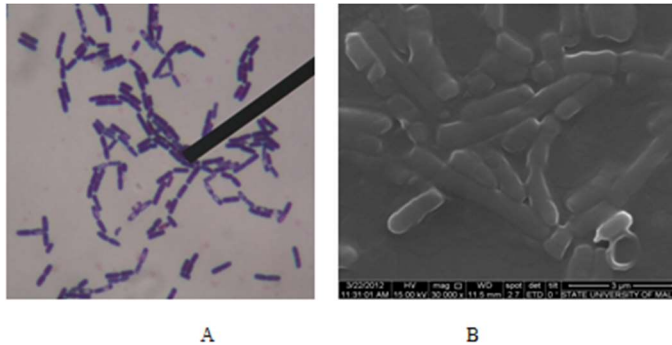
Sementara itu enzim Amilase secara konstitusi merupakan kelompok enzim yang sangat dibutuhkan dalam bidang industri, dengan pangsa pasar mencapai hampir 25% dari pasaran enzim di dunia (Carvalho et al, 2008). Persamaan reaksi hidrolisis polisakarida oleh α -amilase dapat dilihat pada Gambar 7. Penggunaan enzim Amilase dalam industri sangat luas mulai dari industri pembuatan roti, sirup, pemanis, campuran oligosakarida, dekstrin, industri tekstil, pembuatan ethanol, pengujian limbah cair yang mengandung amilum, industri detergen, industri obat dan suplemen enzim (Van der Maarel et al, 2002). Oleh karena enzim ini bernilai komersil maka perlu ditemukan banyak sumber-sumber penghasil enzim Amilase dengan karakteristik yang sesuai dengan yang dibutuhkan.



Gambar 7 Persamaan Reaksi Hidrolisis Polisakarida oleh α -Amilase
(sumber: www.sigmaaldrich.com)

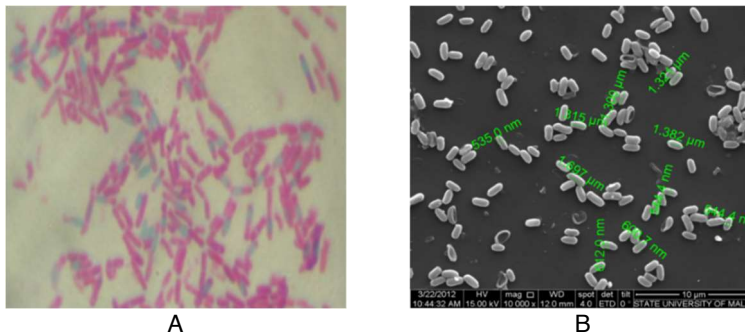
Hasil eksplorasi penelitian kami terhadap mikroba yang tumbuh di sumber air panas Cangar Batu menghasilkan temuan sebagai berikut.

1. Baik bakteri termofilik lipolitik maupun termofilik amilolitik telah berhasil diisolasi dari sumber air panas Cangar menggunakan media selektif Lipase dan selektif Amilase pada suhu inkubasi 55 °C selama 96 jam
2. Aktifitas rata-rata ekstrak kasar Lipase termostabil dari bakteri termofilik lipolitik isolat Cangar adalah 0,16 (U/mL), sedangkan aktivitas ekstrak kasar Amilase termostabil adalah 2,175 Unit/ml, dan
3. Hasil identifikasi secara fenotip menunjukkan bahwa isolat bakteri termofilik lipolitik yang berhasil diisolasi adalah *Baccillus lentus* dengan ukuran panjang rata-rata 2,7 μm dan lebar rata-rata 0,6 μm (Gambar 8), sedangkan bakteri termofilik amilolitik yang berhasil diisolasi adalah *Bacillus alvei* dengan ukuran panjang rata-rata 1,403 μm dan lebar rata-rata 0,567 μm (Gambar 9).
4. Waktu produksi optimum amilase termostabil dari bakteri termofilik isolat Cangar adalah pada suhu 55°C, pH 6,5 dengan waktu inkubasi selama 72 jam yaitu pada fase stasioner dengan aktivitas enzim sebesar 13,33 U/mL.
5. Pada pemurnian dengan ammonium sulfat amilase termostabil paling banyak terdapat pada fraksi 20-40% hal ini ditandai dengan aktivitas spesifik enzim yang paling tinggi yaitu 7,02 U/mg.
6. Kondisi optimum amilase termostabil isolat Cangar terjadi pada pH 6,5 dan suhu 55°C dengan aktivitas spesifik amilase termostabil adalah 108,70 U/mg



Gambar 8 Isolat Bakteri Penghasil Lipase Termostabil dari Cangar

- A. Hasil pewarnaan gram bakteri termofilik lipolitik
- B. Foto bakteri menggunakan mikroskop elektron



Gambar 9. Isolat Bakteri Penghasil Amilase Termostabil dari Cangar

- A. Hasil pewarnaan gram bakteri termofilik amilolitik
- B. Foto bakteri menggunakan mikroskop elektron

• **Isolat Bakteri Pendegradasi Fenol dari Kefir Grain,**

Zat warna banyak digunakan pada proses pencelupan dan pencapan industri tekstil. Limbah cair dari kedua proses ini merupakan salah satu sumber pencemaran air yang cukup tinggi jika tidak dilakukan pengolahan limbah. Teknologi pengolahan limbah cair baik secara biologi, kimia, fisika, maupun kombinasi antara ketiga proses tersebut dapat digunakan untuk mengolah limbah cair Industri tekstil. Kefir sama dengan zat pewarna tekstil memiliki cincin benzena yang tidak mudah didegradasi, namun hasil penelitian kami memberikan harapan untuk dapat mengatasinya.

Berdasarkan penelitian yang telah kami lakukan, diperoleh beberapa simpulan yang dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. ada tiga spesies bakteri yang dapat diisolasi dari kefir grains yaitu *Staphylococcus koagulase negative*, *Actinobacillus sp*, dan *Bacillus megaterium*,
2. *Actinobacillus sp* dapat mendegradasi fenol, dan
3. pada inkubasi 37°C selama 24 jam bakteri *actinobacillus sp* dapat mendegradasi fenol dengan konsentrasi 2700, 4000, 6000, dan 8000 ppm sehingga menyebabkan turunnya konsentrasi fenol rata-rata untuk masing-masing konsentrasi sebesar 72,66%, 68,18%, 68,60%, dan 60,60%.

Fenol adalah salah satu senyawa yang punya cincin benzena dan biasanya justru bersifat anti bakteri, namun bakteri yang kami temukan malah bisa ‘menyantap’ fenol dan kemungkinan juga turunannya termasuk zat warna.

• **Potensi Sari Mesokarp Buah Sebagai Minuman Penurun Kadar Lemak Darah**

Hadirin yang kami muliakan,

Obesitas atau kegemukan adalah suatu keadaan di mana kuantitas jaringan lemak tubuh dibanding dengan berat badan total lebih besar dari keadaan normalnya, atau suatu keadaan di mana terjadi penumpukan lemak tubuh yang berlebih sehingga berat badan seseorang jauh di atas normal.

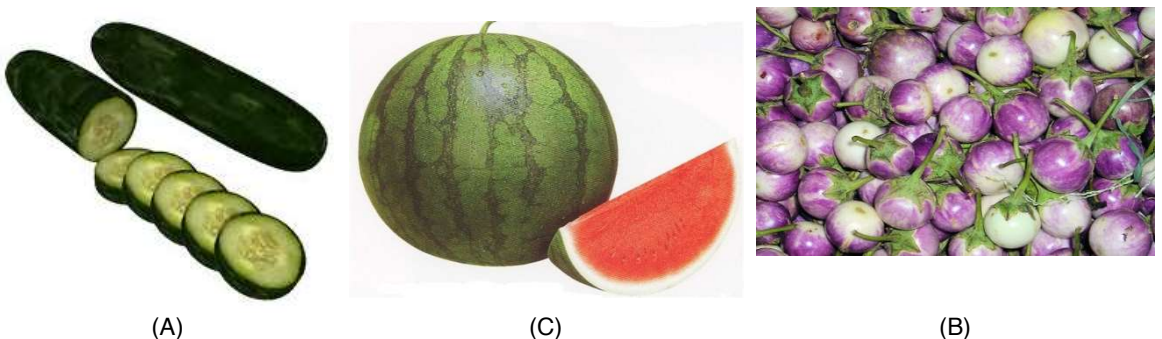
Sedangkan gizi lebih atau overweight adalah keadaan di mana berat badan seseorang melebihi berat badan normal (Sandjaja dan Sudikno 2005). Klasifikasi Obesitas dan Overweight ditentukan berdasarkan Indeks massa tubuh (IMT), dimana IMT adalah nilai perbandingan antara berat badan (Kg) dibagi dengan tinggi badan kuadrat (M^2). Dikategorikan obesitas jika IMT lebih besar dari 27,0 dan Overweight jika IMT antara 25,0 sampai dengan 27,0 (Depkes, 2003)

Gizi lebih dan obesitas merupakan faktor risiko terjadinya penyakit jantung koroner disamping faktor risiko lainnya, seperti hipertensi, diabetes melitus, merokok, stres, dan kurang olah raga (Supari F, 2003). Hasil penelitian Harahap, dkk (2005) menunjukkan bahwa prevalensi hipertensi, hiperkolesterol, dan diabetes mellitus (kencing manis) cenderung semakin meningkat dengan semakin meningkatnya IMT

Berdasarkan data WHO, terdapat 1,6 miliar orang dewasa yang memiliki berat badan berlebih (overweight) dan 400 juta diantaranya mengalami obesitas atau kegemukan (WHO, 2011). Menurut data dari American Heart Association (AHA) pada tahun 2011, terdapat 12 juta (16,3%) anak di Amerika yang berumur 2-19 tahun sebagai penyandang obese (AHA, 2011). Sekitar satu pertiga (32,9%) atau 72 juta orang dewasa warga negara Amerika Serikat adalah obese. Sedangkan di Indonesia, menurut data Riset Kesehatan Dasar (Riskesmas) pada tahun 2007, prevalensi nasional obesitas umum pada penduduk berusia ≥ 15 tahun adalah 10,3% (laki-laki 13,9%, perempuan 23,8%) (Depkes RI, 2009).

World Health Organization (WHO) melansir persentase orang kegemukan atau overweight yang mencengangkan. Data selama 2010, di Indonesia tercatat 32,9 persen atau sekitar 78,2 juta penduduk dengan kondisi kegemukan. Persentase tadi bisa dibandingkan dengan data obesitas WHO pada 2008 yang hanya 9,4 persen. Dengan peningkatan jumlah penduduk yang kegemukan ini, ikut mendorong peningkatan faktor risiko penyakit kronis (Equator News, 2012)

Salah satu cara untuk mengurangi dan mencegah kegemukan ialah dengan menghambat enzim-enzim pencernaan, terutama enzim Lipase dan Amilase (Tucci et al, 2010). Berdasarkan mitos bahwa kulit mesokarp semangka dapat mengurangi kadar lemak darah, maka perlu diuji coba daya hambatnya terhadap Lipase pankreas secara in vitro. Hasil penelitian kami menunjukkan bahwa: 26 mL (50 gram) sari kulit semangka dapat menurunkan aktivitas enzim Lipase dengan efektivitas sebesar 70,34%. Efektivitas ekstrak kulit semangka setara dengan 85% efektivitas orlistat sebagai salah satu obat penurun kadar lemak darah. Uji pendahuluan terhadap beberapa buah yang lain (Gambar 10) juga menunjukkan hasil yang serupa, meskipun tidak sebesar mesokarp semangka. Hasil penelitian kami juga membuktikan bahwa perebusan bisa mempengaruhi aktivitas inhibisi sari buah tersebut. Misalnya perebusan labu air akan mengurangi daya hambat Lipase hampir setengahnya, tapi perebusan mentimun justru meningkatkan aktivitasnya. Hasil uji fitokimia terhadap sari mesokarp buah tersebut menunjukkan kandungan senyawa metabolit sekunder yaitu alkaloid, flavonoid, dan saponin.



Gambar 10. Buah dengan Mesokarp Sebagai Penurun Kadar Lemak Darah

A. Cucumis sativus (Mentimun), B. Solanum melongena (Terong lalap), C. Citrulus lanatus (Semangka)

Di duga zat-zat itulah, baik secara sendiri maupun bersama-sama berperan sebagai penghambat Lipase pankreas.

• **Potensi Kulit Melinjo sebagai Obat Anti Asam Urat**

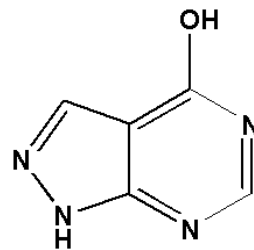
Hadirin yang kami muliakan,

Sumberdaya hayati lokal berikutnya adalah ekstrak tanaman anti asam urat, salah satunya adalah kulit melinjo. Seperti diketahui penyakit asam urat dari tahun ke tahun semakin banyak diderita oleh masyarakat. Di Inggris antara tahun 1999-2000 ada 2.369 pasien yang menjalani rawat inap karena asam urat, jumlah ini meningkat menjadi 4.421 pada tahun 2008-2009 (Prasasty, 2012). Berdasarkan data The National Institutes of Health (NIH) pada 2002, jumlah penderita asam urat di Amerika Serikat mencapai 2,1 juta orang. Sebagian besar penderita adalah pria berusia 40-50 tahun (90 persen) dan perempuan di saat menopause (10 persen) (Utoro, 2006)

Penyakit asam urat atau hyperurecemia, terjadi karena sintesis asam urat berlebih, sehingga kadarnya asam urat dalam darah melebihi batas normal. Senyawa asam urat, sebetulnya kelarutannya dalam air kecil, sehingga mudah mengendap, terutama di jaringan persendian. Kristal-kristal asam urat yang tajam (Gambar 11) dapat melukai jaringan sendi, yang menyebabkan gejala asam urat dan bahkan dapat membentuk batu ginjal.



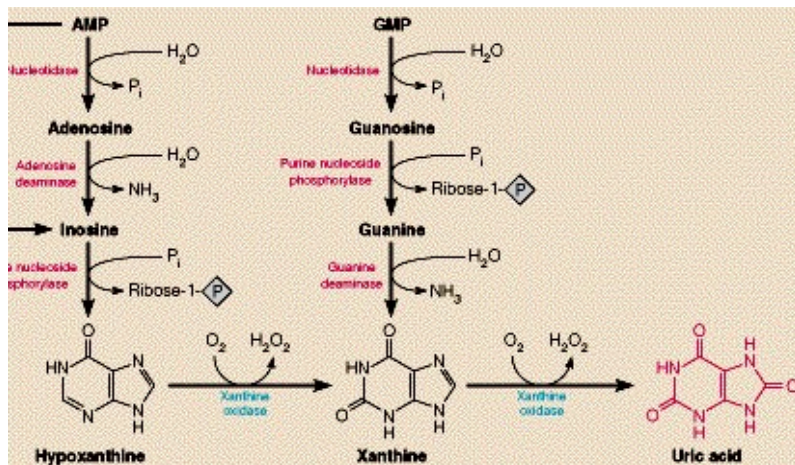
Gambar 11 Kristal Asam Urat dan Struktur Allopurinol



Gambar 12 Allopurinol

(Sumber: <http://www.gout-info.org>) (Sumber: Mathews et al, 2000)

Salah satu pemicu penyakit asam urat adalah makanan yang banyak mengandung basa purin (adenin atau guanin), salah satunya adalah biji melinjo. Tetapi mitos yang berkembang di masyarakat justru mempercayai bahwa rebusan biji melinjo beserta kulitnya, berkhasiat mencegah asam urat. Berdasarkan kenyataan ini, kami berusaha untuk menguji kebenaran mitos tersebut. Dengan menguji daya hambat ekstrak kulit melinjo terhadap aktivitas enzim Xanthin oksidase, yaitu enzim mengubah xanthin menjadi asam urat (Gambar 13) (Mathews et al, 2000). Sebagai pembanding digunakan obat asam urat yang sudah terkenal yaitu Allopurinol (Gambar 12).



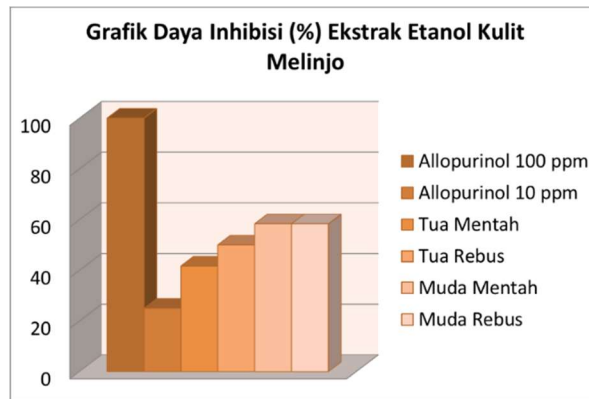
Gambar 13 Sintesis Asam Urat dari Purin (AMP dan GMP)

(Sumber: Mathews et al, 2000)

Hasil penelitian pendahuluan kami menunjukkan bahwa ekstrak kulit melinjo mempunyai daya hambat terhadap enzim xanthin oksidase, seperti terlihat pada Tabel 2 dan Gambar 14.

Tabel 2. Daya Inhibisi (%) Ekstrak Etanol Kulit Melinjo

| Allopurinol | | Ekstrak Etanol Kulit Melinjo 100ppm | | | |
|-------------|--------|-------------------------------------|-----------|-------------|------------|
| 100 ppm | 10 ppm | Tua Mentah | Tua Rebus | Muda Mentah | Muda Rebus |
| 100 | 25 | 41,67 | 50 | 58,33 | 58,33 |



Gambar 14. Grafik Daya Inhibisi (%) Ekstrak Etanol Kulit Melinjo

Berdasarkan Tabel 2. tersebut dapat diketahui bahwa daya hambat ekstrak melinjo berada diantara Allopurinol 10 dan 100 ppm. Berdasarkan penelitian itu juga terungkap bahwa perebusan kelihatannya tidak berpengaruh terhadap daya hambatnya, tetapi daya hambat kulit melinjo muda lebih besar daripada kulit melinjo yang tua. Hasil uji fitokimia terhadap ekstrak kulit melinjo menunjukkan bahwa dalam kulit melinjo terkandung senyawa golongan flavonoid, alkaloid, saponin dan polifenol. Diduga senyawa-senyawa itulah yang secara sendiri atau bersama-sama bertindak sebagai inhibitor Xanthin oksidase. Masih diperlukan penelitian lanjutan untuk mengangkat ekstrak kulit melinjo ini menjadi pengganti Allopurinol, yang menurut IAI (2011) mempunyai beberapa efek samping. Namun demikian bahwa rebusan kulit melinjo, terutama yang muda, bersifat anti asam urat, kelihatannya ada benarnya.

Bapak rektor serta hadirin yang kami muliakan,

Apa yang kami uraikan dimuka, hanya sebagian kecil saja dari demikian banyak potensi sumber daya hayati disekitar kita yang dapat digali dengan kajian biokimia. Masih banyak sumberdaya hayati lainnya yang menunggu untuk kita gali potensinya dan selanjutnya dimanfaatkan untuk kemaslahatan kita bersama. Sebagai tambahan contoh data, hasil penelitian kerjasama kami dengan pemkot batu tahun 2010 yang lalu, menunjukkan bahwa berdasarkan survai kotoran ternak dan tinja manusia (dari hotel, asrama dan pondok pesantren) yang mungkin digunakan sebagai bahan baku biogas; potensinya minimal 5.500 m³ biogas per hari; sementara instalasi biogas yang sudah terpasang baru bisa menghasilkan 177 m³ biogas per hari. Itu artinya baru 3,2% dari potensi yang ada, masih ada 97% lagi yang menunggu untuk dimanfaatkan.

Hadirin yang berbahagia,

Berdasarkan uraian kami terdahulu maka dapat kami simpulkan hal-hal sebagai berikut:

- 1) Tempe adalah makanan yang sehat, paling tidak merupakan sumber vitamin B12, bersifat anti-oksidan dan anti obesitas; sehingga tidak perlu malu untuk menjadikannya sebagai makanan favorit,

- 2) Limbah cair tempe berpotensi untuk digunakan sebagai pembasmi jentik-jentik nyamuk Demam Berdarah Dengue (DBD) dan nyamuk lainnya,
- 3) Dari sumber air panas Cangar telah berhasil diisolasi bakteri termofilik yang dapat menghasilkan lipase termostabil dan amilase termostabil, dan tidak mustahil juga enzim termostabil yang lain,
- 4) Telah berhasil diisolasi bakteri pendegradasi fenol dari Kefir Grain, yang juga berpotensi untuk digunakan sebagai pendegradasi polutan yang mengandung inti benzen yang lain,
- 5) Sari mesokarp berbagai buah, termasuk, semangka, labu air dan mentimun, mempunyai daya hambat terhadap lipase pankreas, sehingga berpotensi digunakan sebagai minuman kesehatan anti obesitas,
- 6) Meskipun melinjo dapat memicu pembentukan asam urat, ekstrak kulit melinjo justru berpotensi anti asam urat.

DAFTAR PUSTAKA

- Afandi, A. S. 2012. *Kebutuhan Kedelai, 90% Dipenuhi dari Impor.* (online), (<http://mediacenter.malangkota.go.id/?tag=tempe-sanan#ixzz2D2QVH2Kq>), diakses 25 November 2012.
- Alrasyid, A. 2007. *Peranan Isoflavon Tempe Kedelai, Fokus Pada Obesitas dan Komorbid.* *Majalah kedokteran Nusantara*, (Online), 40 (3), (<http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/18729/1/mkn-sep2007-40%20%286%29.pdf>), diakses tanggal 26 November 2012.
- Anonim, 1989. *Tahu Tempe, Pembuatan, Pengawetan dan Pemanfaatan Limbah.* Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Pangan IPB. Bogor.
- Anonim. 2008. *Peran Hormon Estrogen dan Kalsium Dalam Proses Metabolisme*, Makalah Biokimia, Jurusan Kesehatan Masyarakat, Fakultas Kedokteran dan Ilmu-Ilmu Kesehatan, Universitas Jendral Sudirman. (Online) (<http://kesmasunsoed.blogspot.com/2011/02/makalah-pengaruh-hormon-estrogen-dan.html>), diakses tanggal 26 November 2012.
- Astawan, M. (2003), Kompas 3 juli 2003.
- Bouzas, T., Velazquez, J. B., & Villa, T. G. 2006. *Industrial Applications of Hyperthermophilic Enzymes: A Review.* *Protein and Peptide Letters*, 13 (645-651).
- Carvalho R.V., Correat & da Silva J. 2008. *Properties of an Amylase From Thermophilic Bacillus Sp.* *J. Microbiol.* 39:102-107. (online) (<http://www.scielo.br/pdf/bjm/v39n1/a23v39n1.pdf>, diakses tanggal 8 Agustus 2010).
- CAS.3383-96-8 temephos. (Online), (<http://www.chemnet.com/dict/dict--3383-96-8--id.html>), diakses tanggal 25 November 2012.
- Dali, S., Patong, A. R., Jalaluddin, M. N., & Pirman, A. P. November 2009. *Pengaruh Substrat dan Ion Logam terhadap Aktivitas Enzim Lipase dari Aspergillus Oryzae pada Kopra Berjamur.* *Majalah Farmasi dan Farmakologi*, halm. 77-88.
- Departemen Kesehatan RI (2003): *Petunjuk Teknis Pemantauan Status Gizi Orang Dewasa dengan Indeks Massa Tubuh (IMT)*, Jakarta.
- Equator News. 2012. (online), (<http://www.equator-news.com/utama/kesehatan/20110815/orang-gemuk-di-indonesia-meningkat-782-juta-jiwa>), diakses 27 November 2012.
- Hafisah. 2007. *Pengaruh Suhu dan pH Terhadap Aktivitas Protease Bakteri Termofilik dari Sumber Air Panas Lejja Kabupaten Sopeng Sulawesi Selatan Sebagai Sumber Belajar Mikrobiologi.* Tesis tidak diterbitkan. Malang: Program Pascasarjana UM.
- Harahap, H; Yekti W. dan Ria S. (2005). *Penggunaan Berbagai Cut-off Indeks Massa Tubuh sebagai Indikator Obesitas Terkait Penyakit Degeneratif.* Jakarta, Badan Litbangkes.
- Ikatan Apoteker Indonesia (IAI). 2011. *ISO Informasi Spesialite Obat volume 46-2011 s/d 2012.* Jakarta: Penerbit Ikatan Apoteker Indonesia.
- Mathews, C. K., K.E. Van Holde, K. H. Ahern. 2000. *Biochemistry Third Editon.* New York: Wesley Longman.
- Natalia, D., Widiasta, I.N., & Wanten, I. G. 2004. *Studi Awal Konversi Enzimatik Secara In-Situ untuk Hidrolisis CPO dari Buah Segar Kelapa Sawit.* Makalah disajikan dalam Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses, Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang. Semarang.
- Nugraharto, A. H. 2012. *Sejarah Tempe : dari Bangsa Tempe Sampai Hilangnya Tempe.* (Online), (<http://sejarah.kompasiana.com/2012/07/25/sejarah-tempe-dari-bangsa-tempe-sampai-hilangnya-tempe/>), diakses 25 November 2012.
- Nurrahman., Astuty, M., Suparmo., Soesatyo, M. 2012. *Peran Tempe Kedelai Hitam Dalam Meningkatkan Aktivitas Enzim Antioksidan dan Daya Tahan Limfosit Tikus Terhadap Hidrogen Peroksida In Vivo.* Makalah disajikan dalam Seminar Hasil-Hasil Penelitian LPPM UNIMUS. (Online), (jurnal.unimus.ac.id/index.php/psn12012010/article/view/492/541), diakses tanggal 25 November 2012.

- Prasasty, R.A. 2012. *Awas "Penyakit Orang Kaya" Terus Meningkat*. Okezone. <http://health.okezone.com/read/2012/10/04/482/699086/awas-penyakit-orang-kaya-terus-meningkat>.
- Sandjaja dan Sudikno. 2005. *Prevalensi Gizi Lebih Dan Obesitas Penduduk Dewasa Di Indonesia*, Gizi Indonesia, 31.
- Sulistiani, H. R., Handayani, S., & Artini. 2010. *Esktraksi, Karakterisasi Senyawa Isoflavon dan Uji Aktivitas Antioksidan Dari Tempe Berbahan Baku Kedelai Hitam (Glycine soja), Koro Hitam (Lablab purpureus L.) dan Koro Kratok (Phaseolus lunatus L.)*. Thesis. (Online), (<http://pasca.uns.ac.id/en/?p=390>), diakses tanggal 25 November 2012.
- Supari, Fadillah (2003): *Penyakit Jantung Koroner dan Pencegahannya*, Seminar Gizi dan Kesehatan Populer, Bogor, 12 Juni 2003.
- Tika, I. N., Redhana, I. W. & Ristiati, N. P. 2007. *Isolasi Enzim Lipase Termostabil dari Bakteri Termofilik Isolat Air Panas Banyuwedang Kecamatan Gerogak, Buleleng Bali*. Akta Kimia Indonesia. 2 (2): 109-112.
- Tucci, S.A., Emma, J. B., Jason, C. G. H. 2010. *The Role of Lipid and Carbohydrate Digestive Enzyme Inhibitors in The Management of Obesity: A Review of Current and Emerging Therapeutic Agents*. Dovepress Journal, an Open Access Journal, 3 (125-143).
- Utoro, A. 2006. *Jamu masih menengah bawah*. Suara karya. <http://www.suarakarya-online.com/news.html?id=135316>.
- Van der Maarel, M., Van der Veen, B., Uitdehaag, H., Leemhuis, H. and Dijkhuizen, L. 2002. *Properties and application of starch converting enzymes of the α -amylase family*. J. Biotechnol. 94: 137-155. (online) (<http://gbb.eldoc.ub.rug.nl/FILES/root/2002/JBiotechnolvdMaarel/2002JBiotechnolvdMaarel.pdf>, diakses tanggal 8 mei 2010).
- Volk, W. A. & Wheeler, M. F.. 1984. *Mikrobiologi Dasar*. Terjemahan oleh Markham. 1988. Jakarta: Erlangga.
- Wardoyo, S.T.H. 1975. *Pengelolaan Kualitas Air*. IPB. Bogor.
- Wahyuni, S. 2009. *Peran Isoflavon Kedelai (Glycine max L. Merr) Dalam Memacu Pertumbuhan Tulang*. Naskah Publikasi, (Online), (http://research-report.umm.ac.id/index.php/researchreport/article/viewFile/195/263_umm_research_reportfulltext.pdf), diakses tanggal 26 November 2012.
- Wikipedia. 2012. (online), <http://id.wikipedia.org/wiki/Tempe>, diakses 25 November 2012.
- Yuneta, R. & Putra, S. R. 2010. *Pengaruh Suhu pada Lipase dari Bakteri Bacillus Subtilis*. Prosiding Skripsi. Surabaya. Jurusan Kimia FMIPA ITS.

Kiprah Nanomaterial Dalam Kehidupan Manusia dan Dampaknya

Prof. Dr. Fauziatul Fajarah, M.S.

Bismillahirrahmaanirrohiim

Assalaamu'alaikum warahmatullaahi wabaraakatuh.

Yth. Bapak Rektor beserta para wakil Rektor Universitas Negeri Malang,
Yth. Bapak Ketua, Sekretaris, dan para anggota Senat Akademik Universitas Negeri Malang,
Yth. Bapak/Ibu Dekan, Direktur Pascasarjana, dan Ketua Lembaga di lingkungan Universitas Negeri Malang
Yth. Bapak/Ibu pejabat struktural di lingkungan Universitas Negeri Malang,
Yth. Bapak/Ibu para Guru Besar di lingkungan Universitas Negeri Malang,
Yth. Ketua Jurusan dan rekan sejawat (dosen dan tendik) di lingkungan Universitas Negeri Malang
Yth. Para hadirin dan undangan yang berbahagia

Pertama-tama izinkan saya memanjatkan puji syukur ke hadirat Allah SWT, atas segala nikmat yang dikaruniakan kepada saya beserta keluarga, dan kepada hadirin sekalian, sehingga pada hari ini kita bisa berkumpul dalam suatu majelis yang insyaAllah diridloi oleh Allah SWT. Terimakasih saya sampaikan kepada semua hadirin atas kesediaannya menghadiri acara pengukuhan saya hari ini. Mudah-mudahan Allah SWT senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya kepada kita semua di sepanjang sisa usia kita ke depan, *Aamiin*

Hadirin yang saya muliakan,

Sebelum menyampaikan pidato pengukuhan ini, perkenankan saya menyampaikan ucapan terimakasih kepada Rektor dan Senat Universitas Negeri Malang yang telah berketetapan menganugerahi saya gelar Guru Besar dalam bidang Ilmu Kimia Material, yang secara formal telah ditetapkan oleh Kemenristek - Dikti tanggal 1 Mei 2019 yang lalu. Sungguh suatu kehormatan bagi saya dan keluarga atas penghargaan ini. Saya sangat menyadari bahwa penganugrahan ini hanya bi idnillah semata. Mudah-mudahan penghargaan ini bisa memicu saya untuk berkarya lebih baik lagi di masa mendatang. Pada kesempatan yang berbahagia ini izinkan saya untuk mengulas secara ringkas obyek yang selama ini menjadi kajian riset saya, yakni tentang nanomaterial, kiprahnya dalam kehidupan manusia dan dampaknya serta sekilas uraian tentang riset di bidang pengembangan nanomaterial yang telah kami lakukan baik Bersama tim dari Laboratorium Elektrokimia dan Korosi Jurusan Teknik Kimia ITS, maupun dengan tim Kelompok Bidang Keahlian (KBK) Kimia Fisik Jurusan Kimia FMIPA Universitas Negeri Malang.

Hadirin yang saya muliakan,

Pada dekade terakhir ini, sebagaimana istilah-istilah berawalan “nano” lainnya, istilah nanomaterial telah demikian populer, tidak hanya terbatas dalam karya-karya ilmiah tetapi juga dalam kehidupan bermasyarakat (Pal, 2011). Hal ini membuktikan bahwa teknologi nano telah menjadi bagian penting dari masyarakat. Bersama-sama dengan nanosain dan nanoteknologi, Istilah nanomaterial pertama kali diperkenalkan oleh Norio Taniguchi pada tahun 1974 dalam suatu tulisan tentang teknologi penciptaan obyek berskala nanometer. Nanometer adalah suatu satuan dalam sistem internasional yang menggambarkan ukuran sebesar 10^{-9} meter. Nanomaterial digambarkan sebagai bahan dengan panjang 1 - 1000 nm dalam setidaknya-tidaknya satu dimensinya; Namun, umumnya nanomaterial didefinisikan sebagai material yang berdiameter dalam kisaran 1 hingga 100 nm. Definisi lain tentang nanomaterial menurut organisasi Internasional untuk Standardisasi (ISO) adalah material dengan dimensi eksternal dalam Untuk itu, dalam proses perkembangan-

nya dan dalam sepanjang hidupnya, manusia masih memerlukan bantuan secara terus-menerus melalui pendidikan. Pendidikan hadir tidak lain adalah dalam kerangka memberikan skala nano atau material dengan struktur internal atau struktur permukaan dalam skala nano. Definisi dari Komisi Eropa menyebutkan bahwa nanomaterial dapat berupa material alamiah, insidental, atau sintesis yang mengandung komponen yang tersusun atas partikel bebas atau sebagai agregat atau aglomerat, di mana 50% atau lebih dari komponennya merupakan partikel yang memiliki minimal satu dimensi eksternalnya berada dalam kisaran ukuran 1–100 nm (Sudha *et al.*, 2018).

Dari definisi di atas dapat dinyatakan tanpa kita sadari bahwa nano-material itu sendiri telah lahir bersamaan dengan penciptaan alam semesta beserta isinya (Sudha *et al.*, 2018). Nanomaterial di alam amatlah berlimpah, baik sebagai segmen biotik maupun abiotik ciptaan Allah SWT. Nanomaterial alamiah diproduksi oleh spesies biologis atau melalui aktivitas antropogenik. Tubuh kita sendiri adalah contoh sempurna dari rakitan nanomaterial. Setiap bagian dari tubuh kita dibangun dari nanomaterial yang memiliki pengaturan struktural tertentu yang berbeda satu dengan lainnya sesuai fungsi masing-masing. Fungsi-fungsi logika, memori, gerak, sintesis, konversi energi, bahkan kesadaran diri kita adalah hasil langsung dari kompleksitas struktur berskala nano. Sebagai contoh DNA yang ada di dalam inti sel yang ikut bertanggung jawab dalam fungsi sintesis yang memiliki tugas utama menyimpan dan mereplikasi informasi adalah merupakan suatu struktur nano. Contoh lain, energi dalam sistem sel juga disimpan dalam struktur nano yang dibentuk oleh Adenosine TriFosfat (ATP) dan Adenosin Di-Fosfat (ADP) yang mudah dimanipulasi (Jeevanandam *et al.*, 2108). Kebesaran Allah SWT dalam penciptaan nano-material yang lain adalah keajaiban pada tanaman teratai. Daun dan bunga teratai yang memiliki permukaan yang ditutupi oleh papillae berukuran mikrometer dan dihiasi cabang berukuran nanometer yang membentuk tonjolan-tonjolan, menyebabkan sifat hidropobitas yang super serta dapat melakukan *self cleaning service*, sehingga teratai tetap bersih walaupun tumbuh keluar dari dalam lumpur. Meskipun banyak tanaman lain memiliki permukaan superhidropobik dengan sudut kontak yang hampir sama, namun tanaman teratai menunjukkan stabilitas dan kesempurnaan yang lebih baik sebagai penangkis air (Ensikat *et al.*, 2011). Masih banyak contoh nanomaterial alamiah lainnya dengan keunikan dan kelebihan masing-masing, misalnya kulit kerang yang begitu kokoh, nanostruktur sisik pada permukaan kulit ikan hiu yang tertata sedemikian rupa sehingga terbebas dari alga. Begitu melimpah keunikan dan keajaiban di alam, sehingga manusia terinspirasi oleh struktur-struktur fungsional yang telah diciptakan oleh-Nya tersebut sehingga berkembang nanoteknologi dalam batas-batas kemampuan manusia (Fajaroh, 2018).

Hadirin yang saya hormati,

Dalam beberapa tahun terakhir, pengembangan nanoteknologi termasuk nanomaterial telah menarik minat dan perhatian yang luar biasa dari para peneliti di seluruh dunia. Hal ini karena nanomaterial mampu menunjukkan sifat-sifat optik, mekanik, magnetik, konduktif, dan kereaktifan yang lebih unggul dibanding material sejenis yang berukuran lebih besar. Pemahaman yang lebih baik tentang sifat-sifat nanomaterial akan membuka peluang untuk mensintesis material baru di masa depan yang memiliki potensi untuk meningkatkan kualitas hidup. Nanomaterial perlahan-lahan mulai dikomersialkan, mulai muncul sebagai komoditas, dan digunakan dalam banyak aplikasi dan produk teknologi inovatif, termasuk beragam produk konsumen.

Untuk memahami keanekaragaman nanomaterial, diperlukan beberapa bentuk klasifikasi. Klasifikasi ini antara lain dapat didasarkan atas dimensi dan komposisinya. Perbedaan dimensi maupun komposisi ini akan menampilkan karakteristik fisik, kimia, dan biologis yang berbeda, yang dapat dimanfaatkan untuk aplikasi spesifik. Pada tahun 2007, Pokropivny dan Skorokhod membuat skema klasifikasi nanomaterial sebagai dimensi-0 (0D), dimensi-1 (1D), dimensi-2 (2D), dan dimensi-3 (3D). Klasifikasi ini sangat tergantung pada gerakan elektron di sepanjang dimensi dalam material. Elektron dalam nanomaterial 0D terjebak dalam ruang tanpa dimensi, sedangkan nanomaterial 1D memiliki elektron yang dapat bergerak di sepanjang sumbu x, yang kurang dari 100 nm. Demikian juga, nanomaterial 2D dan 3D memiliki pergerakan elektron di sepanjang sumbu x-y, dan x, y, z (Jeevanandam, 2018). Material yang termasuk dalam tiga dimensi antara lain

nanopartikel, bubuk, multilayer, yang termasuk dalam dua dimensi di antaranya adalah film tipis, *nanosheets*, yang termasuk satu dimensi contohnya adalah kawat nano, *nanotube*, dan yang nol dimensi di antaranya adalah titik kuantum, *nanospheres*, dan *cluster* (Sajanlal *et al.*, 2011).

Hadirin yang saya muliakan,

Berdasarkan komposisinya, nanomaterial disusun menjadi empat golongan, nanomaterial yang berbasis: (1) karbon, (2) organik, (3) anorganik, dan (4) komposit (Sudha *et al.*, 2018). Termasuk dalam golongan nanomaterial berbasis karbon adalah Fullerene (C60), carbon nanotube (CNTs), carbon nanofibers, carbon black, dan graphene (Gr). Nanomaterial berbasis anorganik di antaranya berupananopartikel logam dan oksida logam. Nanomaterial berbasis-organik sebagian besar terbuat dari bahan organik, tidak termasuk yang berbasis karbon atau berbasis-anorganik, di antaranya adalah dendrimer, misel, liposom, dan polimer. Nanomaterial berbasis komposit dibangun oleh nanopartikel multifase atau nanopartikel yang dikombinasikan dengan bahan yang lebih besar atau struktur yang lebih rumit, misalnya sebagai kerangka metalorganik. Komposit dapat berupa kombinasi dari nanomaterial berbasis karbon, berbasis logam, atau berbasis organik dengan segala bentuk logam, keramik, atau bahan polimer.

Hadirin sekalian yang saya hormati,

Selain dua klasifikasi di atas, dikenal juga klasifikasi dengan sudut-sudut pandang yang berbeda, di antaranya adalah klasifikasi berdasarkan asal muasal nanomaterial (Sajanlal *et al.*, 2011). Berdasarkan sudut pandang ini nanomaterial diklasifikasikan sebagai nanomaterial alami (seperti telah disinggung di bagian awal pidato ini) dan nanomaterial sintesis.

Terkait dengan nanomaterial sintesis, kemajuan besar sedang terjadi dalam pengembangan nanomaterial, dengan munculnya penemuan-penemuan dan harapan baru terhadap nanoteknologi hampir di setiap hari di banyak sektor. Salah satu contoh adalah pengembangan biosensor, nanoteknologi telah memainkan peran yang semakin penting dalam pengembangan biosensor. Sensitivitas dan kinerja biosensor semakin meningkat dengan menggunakan nanomaterial dalam strukturnya. Penggunaan nanomaterial ini memungkinkan pengenalan banyak sinyal baru teknologi transduksi dalam biosensor. Pengembangan ini sekaligus memungkinkan analisis sederhana dan cepat secara *in vivo*. Instrumen-instrumen yang portable yang mampu menganalisis berbagai komponen menjadi tersedia (Jianrong *et al.*, 2004).

Contoh lain adalah pengembangan partikel berbasis besi yang digunakan melawan jaringan kanker. Diagnosis dini dan skrining kanker dapat dilakukan dengan menggunakan nanopartikel magnetik dalam teknik pencitraan resonansi magnetik (MRI) dan atau sistem sensor. Sensor-sensor ini dirancang untuk biomarker spesifik, yakni senyawa yang dapat dikaitkan dengan permulaan atau evolusi kanker, selama dan setelah pengobatan penyakit ini. Selanjutnya, nanopartikel magnetik dapat dieksploitasi dalam terapi kanker sebagai agen pengiriman obat atau terapi hipertermia dengan memanfaatkan medan magnet eksternal (Hosu *et al.*, 2019).

Contoh berikutnya adalah pengembangan nanomaterial pada pengolahan limbah cair, baik sebagai adsorben, fotokatalis, nanofiltrasi, ataupun sebagai agen antibakteri (Roy & Bhattacharya, 2016). Luas permukaan spesifik nanopartikel yang jauh lebih besar dibanding *bulk* material sejenis meningkatkan potensinya dalam berbagai aplikasi tersebut. Sebagai gambaran hubungan antara ukuran dan luas permukaan spesifik partikel dicontohkan berikut ini. Fe₃O₄ yang berdiameter 10 nm memiliki luas permukaan spesifik sekitar 100 m² g⁻¹, sedangkan dengan partikel sejenis dengan ukuran 80 nm menunjukkan luas permukaan spesifik 6,8 m² g⁻¹ (Iconaru *et al.*, 2016).

Pengembangan nano-catalytic converter yang mengubah gas-gas polutan menjadi gas ramah lingkungan, seperti yang telah dilakukan oleh Durairajan *et al.* (2012) yang mengembangkan nanopartikel palladium dan rhodium (90-100 nm) dengan menggunakan metode deposisi uap kimia dan diaplikasikan sebagai konverter katalitik nano yang secara efisien mengurangi emisi komponen NO_x, HC dan CO dari gas buang kendaraan bermotor.

Contoh terakhir adalah aplikasi nanomaterial di bidang pengembangan kosmetika dan kesehatan, yakni pengembangan tabir surya nano yang transparan dan efektif (Osmond & McCall.,

2010). Penambahan nanopartikel ZnO dan TiO₂ dalam sunscreen memberikan perlindungan terhadap efek karsinogenik, immunosupresan, dan penuaan dari pengaruh UV A dan UV B. Tabel 1 menampilkan aplikasi nanopartikel di beberapa bidang.

Tabel 1 Beberapa Aplikasi Nanomaterial (<http://www.understandingnano.com/nanoparticles.html>)

| No. | Bidang | Nanopartikel | Fungsi |
|-----|----------------------------------|-------------------------------------|--|
| 1 | Kedokteran | Polimer | Penghantar obat |
| | | Oksida besi bersalut polimer | Penyembuh infeksi bakteri |
| | | Serium oksida | antioksidan |
| | | Nanointan | pertumbuhan tulang, terapi leukimia |
| | | Nanointan bersalut obat | Kemoterapi |
| | | Au | Diagnosis, penghantar obat, hyperthermia |
| 2 | Industri dan Material Konstruksi | Fe ₃ O ₄ | MRI, drug delivery, hyperthermia |
| | | SiC, | Menambah kekuatan bahan |
| | | Ni-Polimer | Kulit sintetis |
| | | Si | Melindungi makanan dalam kemasan |
| | | ZnO | Pelindung terhadap sinar UV, antibakteri |
| 3 | Lingkungan | Ag | Antibakteri pada tekstil |
| | | CuOW | Fotokatalis |
| | | Au <i>embended</i> MnO ₂ | Katalis polutan organic |
| | | Fe | Adsorben CCl ₄ |
| | | Oksida besi | Adsorben |
| | | Pt, Pd | Katalis |
| 4 | Energi dan Elektronik | C | Electrode |
| | | Ag (dalam tinta) | garis konduktif di papan sirkuit. |
| | | Pt-Co | Katalis pada Fuel Cell |
| | | Pd | Sensor hydrogen |

Hadirin yang saya muliakan,

Dari uraian di atas tampak bahwa nanomaterial berperan penting hampir di semua sektor kehidupan. Revolusi nanoteknologi yang menghasilkan nanomaterial merambah berbagai disiplin ilmu dan hampir di semua bidang kehidupan dan melibatkan berbagai disiplin ilmu. Bidang pengembangan nanomaterial sangat luas mulai dari biologi molekuler hingga elektronik. Minat di bidang ini pun telah meningkat di kalangan ilmiah maupun di lembaga pemerintahan dan dalam komunitas investasi, ditandai dengan peningkatan pendanaan di sektor pengembangan nanomaterial dari tahun ke tahun di berbagai negara di dunia. Ditandai pula dengan dikembangkannya pusat-pusat unggulan inovasi di bidang material maju di universitas-universitas, termasuk UM. Pertumbuhan minat dalam ilmu sains dan rekayasa nanomaterial adalah karena konjungsi dari beberapa faktor: antara lain peningkatan nanofabrikasi dan teknik mikroskopi serta pengakuan bahwa sifat baru akan muncul dalam struktur nano sintetik.

Hadirin sekalian yang berbahagia,

Daya tarik nanomaterial itu pula yang menarik minat kami untuk turut berkontribusi pada pengembangan nanomaterial. Obyek yang menjadi kajian kami hanyalah satu di antara ribuan atau bahkan jutaan atau milyaran obyek kajian. Kami bersama tim kami baru berhasil mengembangkan nanopartikel yang dikenal sebagai ferrit dan komposisinya (Fajaroh, et al., 2012; Setyawan et al., 2012; Fajaroh et al., 2013; Setyawan et al., 2014; Fajaroh, et al., 2018) serta mengaplikasikannya sebagai agen pengolah limbah (Fajaroh & Sutrisno, 2014); Mumtazah et al, 2016; Fajaroh, et al., 2019), agen antibakteri (Fajaroh et al., 2018), serta katalis pada produksi biodiesel (Primadi et al., 2019).

Ketertarikan kepada ferrite, khususnya magnetit adalah karena bahan ini merupakan salah satu bahan magnet paling penting dan banyak digunakan di industri. Dalam beberapa tahun ter-

akhir, nanopartikel magnetit yang mono-dispers telah menarik perhatian karena memiliki biokompatibilitas yang baik, sifat super-paramagnetik yang kuat, toksisitas rendah dan proses pembuatannya yang mudah. Magnetit memiliki potensi yang cukup besar untuk digunakan dalam industri biomedis, seperti pemberian obat yang ditargetkan, pengobatan hipertermia, pemisahan sel, pencitraan resonansi magnetik, immunoassay dan pemisahan produk biokimia. Mereka juga berguna untuk proses lingkungan, seperti pengolahan air dan air limbah (Fajaroh et al., 2012). Di samping itu ferrite secara umum, termasuk magnetit, juga berpotensi sebagai katalis heterogen dalam beberapa reaksi kimia, termasuk fotokatalisis, reaksi-reaksi organik seperti degradasi fenol, oksidasi alkena, dan reaksi transesterifikasi (Kooti et al., 2012; Falcao et al., 2017).

Berbagai metode sintesis nanopartikel magnetit telah dikembangkan, di antaranya kopresipitasi, solgel, dan hidrotermal. Di antara metode-metode tersebut, kopresipitasi merupakan metode yang paling sederhana. Namun dengan metode ini sulit untuk mendapatkan nanopartikel magnetit monodisperse, karena reaksi yang berlangsung cepat dalam campuran menyebabkan sulit untuk mengontrol proses kristalisasi. Partikel yang monodisperse dapat dihasilkan melalui metode kopresipitasi, tetapi dengan penambahan suatu surfaktan dalam proses sintesisnya. Surfaktan yang menempel pada produk akhir kemungkinan mempengaruhi sifat partikel. Kombinasi surfaktan dengan partikel mungkin tidak cukup kuat, dan mereka dapat sangat mengganggu aplikasi tertentu, seperti penggunaan biomedis. Metode solgel dan teknik hidrotermal dapat secara efektif memang dapat mengontrol morfologi dan komposisi kimia dari nanopartikel magnetit yang disiapkan, namun metode solgel biasanya membutuhkan reaktan berupa alkoksida yang mahal dan suhu kalsinasi yang tinggi, serta waktu yang lama untuk menghasilkan produk akhir. Metode hidrotermal juga membutuhkan suhu tinggi dan periode waktu yang lama untuk mendapatkan produk akhir. Metode ini biasanya juga dilakukan dengan penambahan surfaktan untuk menghindari agregasi partikel (Fajaroh et al., 2012).

Metode elektrokimia kemudian menjadi pilihan, dengan pertimbangan: (1) kemudahan dalam mengontrol sifat-sifat partikel yang diharapkan melalui pengaturan parameter sel elektrokimia, seperti jenis electrode, jenis dan konsentrasi elektrolit, rapat arus, jarak antar electrode, dan variasi sumber arus (*Continuous Direct Current*, CDC, atau *Pulsed Direct Current*, PDC); (2) mengingat magnetite adalah produk korosi besi, maka metode elektrokimia menjadi pilihan berikutnya yang patut dipertimbangkan. Pertimbangan kedua inipun didukung oleh hasil-hasil penelitian sebelumnya, di antaranya oleh Marques *et al.* (2008) mendapatkan nanopartikel magnetite yang bersifat superparamagnetis yang ukurannya homogen dari elektrolisis larutan $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ dalam etanol dengan elektroda karbon. Untuk menghindari terbentuknya hidroksida besi sebagai kontaminan, elektrolisis harus bebas air. Dengan demikian metode ini cenderung menghasilkan partikel yang hidropobik, sehingga membatasi aplikasinya. Franger *et al.* (2004;2007) mensintesis nanopartikel magnetite yang ukurannya seragam melalui elektro-oksidasi besi, yakni proses elektrolisis yang memposisikan besi sebagai anoda. Elektrolit yang digunakan adalah larutan alkali yang mengandung ion-ion Cl^- , SO_4^{2-} , SCN^- , dan $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$. Ukuran partikel yang dihasilkan berkisar antara 74 sampai 88 nm. Dengan rentang tersebut dispersi partikel dalam suatu medium akan mudah terpengaruh oleh gaya gravitasi. Melalui elektro-oksidasi besi pula Cabrera *et al.* (2008) berhasil mendapatkan nanopartikel magnetite yang berbentuk bola dengan ukuran hampir seragam dan bersifat feromagnetis. Elektrolit yang digunakan adalah larutan encer tetrametil ammonium klorida yang tidak lain merupakan surfaktan.

Berdasarkan pertimbangan di atas, sintesis nanopartikel magnetit kami kembangkan dengan elektro-oksidasi besi dalam air, suatu metode yang lebih ramah lingkungan. Pengembangan ini berhasil mendapatkan nanopartikel magnetit yang monodisperse yang berdiameter rata-rata 22,5 nm dengan. Tetapi produk ini masih mengandung *impurities* FeOOH yang merupakan zat *intermediate* dalam pembentukan magnetit. Yang menggembarakan adalah bahwa mekanisme pembentukan magnetite yang kami usulkan kemudian dipelajari secara lebih intensif oleh Lozano *et al.*, (2017) dengan kesimpulan bahwa mekanisme yang kami usulkan adalah yang paling sesuai di antara mekanisme-mekanisme lainnya.

Riset berikutnya dilakukan untuk menjawab tantangan bagaimana mendapatkan magnetit yang murni yang bebas dari FeOOH. Dua metode yang kemudian dilakukan adalah metode isolasi (Setyawan *et al.*, 2012) dan osilasi (Setyawan *et al.*, 2014). Kedua metode ini berhasil menghasilkan nanopartikel magnetit dengan kemurnian tinggi.

Pengembangan berikutnya adalah riset-riset yang bertujuan untuk mendapatkan *yield* yang lebih besar (Fajaroh *et al.*, 2016), membuat komposisinya dengan silika, perak, dan PEG, pengembangan ferrite dan juga aplikasinya (Fajaroh & Sutrisno, 2014; Mumtazah *et al.*, 2016; Fajaroh, *et al.*, 2019, Fajaroh *et al.*, 2018; Primadi *et al.*, 2019)

Hadirin yang saya hormati,

Terkait dengan pengembangan nanomaterial yang seolah-olah dapat mengatasi berbagai problema kehidupan dengan penuh kesempurnaan, istilah "Nano-material" pun identik untuk hal-hal yang inovatif dan sangat menjanjikan, Al-Qur'an Surat Al-Baqarah ayat 255 (ayat kursi) menyatakan bahwa hanya Allah dzat yang Maha sempurna. Dan itu terbukti antara lain melalui fakta bahwa ternyata pengembangan nanomaterial selain menunjukkan dampak positif bagi kehidupan, ternyata juga dikhawatirkan menimbulkan dampak negatif. Ukuran partikel yang demikian kecil membuat nanomaterial memiliki potensi paparan yang tidak diinginkan dalam jangka panjang terhadap kesehatan manusia dan lingkungan baik ketika diproduksi, saat digunakan, maupun limbahnya. Paparan ini dapat terjadi melalui inhalasi, konsumsi atau pun penyerapan. Penanggulangan atau bahkan pencegahan terhadap dampak negatif ini mulai menjadi kajian bagi peneliti dan pemerhati lingkungan. Hanya beberapa penelitian yang telah dilakukan dengan tujuan menemukan paparan langsung dan tidak langsung untuk bahan nano dan belum ada pedoman yang jelas untuk mengukur efeknya. Untuk itu perlu dievaluasi dan ditanggulangi dampak paparan nanomaterial terhadap manusia dan lingkungan (Green & Ndegwa, 2011).

Sebagai contoh, Titanium dioksida (TiO₂) selama ini dianggap sebagai bahan inert dan aman dan telah digunakan dalam banyak aplikasi selama beberapa dekade. Namun, studi toksikologis mekanistik menunjukkan bahwa nanopartikel TiO₂ secara dominan menyebabkan efek buruk melalui induksi stres oksidatif yang mengakibatkan kerusakan sel, genotoksisitas, peradangan, respons imun, dll. Berdasarkan bukti eksperimental dari studi inhalasi hewan nanopartikel TiO₂ diklasifikasikan memiliki "kemungkinan karsinogenik bagi manusia" oleh Badan Internasional untuk Penelitian Kanker dan sebagai karsinogen kerja oleh Institut Nasional untuk Keselamatan dan Kesehatan Kerja. Studi tentang paparan kulit untuk nanopartikel TiO₂, yang pada manusia substansial melalui penggunaan tabir surya, umumnya menunjukkan penetrasi transdermal yang dapat diabaikan; namun data diperlukan untuk paparan jangka panjang dan efek samping potensial dari produk foto-oksidasi. Belum diketahui data yang dapat diandalkan tentang penyerapan, distribusi, ekskresi, dan toksisitas pada paparan oral. TiO₂ juga dapat masuk ke lingkungan, dan meskipun toksisitas akut rendah bagi organisme akuatik, jika terpapar dalam jangka panjang, TiO₂ menginduksi serangkaian efek mematikan. Dengan demikian nanopartikel TiO₂ harus digunakan dengan sangat hati-hati (Skocaj *et al.*, 2011).

Tabel 2 berikut ini menampilkan beberapa temuan terkait paparan nanomaterial bagi manusia (Ray *et al.*, 2009).

| Nanomaterial | Kemungkinan Resiko |
|---|--|
| Nanomaterial karbon, nanopartikel silika | Peradangan paru, granuloma, dan fibrosis |
| Nanomaterial karbon, perak dan emas | Terdistribusi ke organ lain termasuk sistem saraf pusat |
| Titik kuantum, Nanopartikel karbon dan TiO ₂ | Penetrasi melalui kulit |
| Nanopartikel MnO ₂ , TiO ₂ , dan karbon | Memasuki otak melalui neuron penciuman epitel hidung |
| Nanopartikel TiO ₂ , Al ₂ O ₃ , karbon hitam, Co, dan Ni | Mungkin lebih beracun daripada partikel berukuran mikron |

Upaya yang bisa dilakukan untuk menghadapi tantangan ini antara lain adalah mencegah dampak buruk nanomaterial terhadap manusia dan lingkungannya melalui penerapan prinsip-prinsip kimia hijau (Anastas & Warner, 1998) pada proses sintesis, produksi nanomaterial, dan pengelolaan limbah, sehingga paparan yang tidak diinginkan bisa direduksi atau bahkan dihindari. Kimia hijau menerapkan prinsip-prinsip baru dalam proses sintesis, pengolahan, dan aplikasi bahan-bahan kimia sedemikian rupa sehingga dapat menurunkan ancaman terhadap keselamatan lingkungan dan manusia. Kimia hijau, sering juga disebut kimia ramah lingkungan (*Environmental benign Chemistry*), kimia bersih (*Clean Chemistry*), ekonomi atom (*atom economy*), kimia yang dirancang jinak/ramah (*benign-by-design chemistry*) (Wardencki *et al*, 2004). Penerapan kimia hijau diharapkan dapat memfasilitasi jaminan kesehatan manusia dan lingkungan, dengan tetap memperhatikan efisiensi dan keuntungan. Aplikasi kimia hijau berpedoman pada dua belas prinsip (Anastas & Warner, 1998) sebagai berikut:

1. **Pencegahan:** mencegah dampak negatif limbah lebih diutamakan daripada meremediasi limbah;
2. **Ekonomis:** pemakaian bahan-bahan sintesis dirancang stoikiometris sehingga menjamin semua bahan baku menjadi produk;
3. **Pengurangan penggunaan zat kimia berbahaya:** Sintesis menggunakan dan menghasilkan zat-zat dengan toksisitas serendah mungkin;
4. **Perancangan Proses sintesis yang aman:** proses sintesis didesain sedemikian rupa hingga diperoleh hasil yang sesuai yang diinginkan namun dengan seminimal mungkin menghasilkan bahan toksik
5. **Penggunaan pelarut dan bahan penunjang yang aman:** menghindari penggunaan zat tambahan berbahaya
6. **Efisiensi energi:** meminimalkan kebutuhan energi dari proses kimia, jika memungkinkan, proses sintesis dilakukan pada suhu dan tekanan ambient;
7. **Penggunaan bahan mentah terbarukan:** pengembangan SDA terbarukan lebih diutamakan;
8. **Pengurangan pemakaian zat derivatif :** menghindari penggunaan bahan-bahan tambahan yang hanya akan menambah jumlah limbah;
9. Penggunaan **Katalis:** menggunakan katalis yang selektif;
10. **Perancangan degradasi bahan:** Produk kimia harus dirancang sedemikian rupa sehingga mudah diuraikan di akhir fungsinya;
11. **Pemantauan keamanan secara real-time:** Harus dilakukan pemantauan pencegahan terbentuknya zat berbahaya secara langsung pada setiap tahap dari proses sintesis.
12. **Penerapan kimia aman:** meminimalkan potensi kecelakaan, seperti timbulnya emisi zat berbahaya, ledakan, dan kebakaran.

Kedua belas prinsip ini diharapkan dapat menjiwai perancangan proses kimia, baik sintesis, aplikasi, maupun pengelolaan limbah. Prinsip pertama merupakan ruh kimia hijau, didukung oleh prinsip-prinsip berikutnya yang pada dasarnya menekankan pada efisiensi bahan dan energi, memaksimalkan penggunaan bahan terbarukan, pemanfaatan limbah, menghindari bahan beracun dan atau berbahaya, mengurangi emisi zat berbahaya, dan mengutamakan memperoleh bahan yang mudah terurai dan aman jika dibuang ke lingkungan.

Upaya-upaya berikutnya yang dapat dilakukan untuk mencegah dampak buruk nanomaterial terhadap manusia dan lingkungannya adalah:

- ~ meningkatkan pengetahuan masyarakat sehingga mengenal sifat-sifat nanomaterial yang digunakan dalam aktivitas kehidupan sehari-hari serta meningkatkan kesadaran masyarakat untuk turut berpartisipasi melakukan pengelolaan limbah dengan benar.
- ~ memperluas fokus pengembangan nanomaterial, dengan tidak hanya terbatas pada kegiatan eksplorasi bahan baku, pengembangan metode sintesis, fungsionalisasi, karakterisasi, fabrikasi, dan aplikasi saja, tetapi ada kebutuhan mendesak untuk mengembangkan metode pengelolaan limbah yang aman serta menilai tingkat paparan populasi terhadap bahan nano, dari waktu ke waktu dan untuk berbagai sub-kelompok populasi. Beberapa pertanyaan penting yang terkait dengan hal ini adalah jawaban terhadap pertanyaan: (1) Apakah nanomaterial

lebih beracun daripada rekan non-nano? (2) Akankah partikel nano berubah menjadi bentuk yang lebih beracun di lingkungan?.

- ~ mengembangkan penelitian nanotoksikologi untuk mengungkap dan memahami bagaimana nanomaterial mempengaruhi lingkungan sebelum nanomaterial diizinkan untuk digunakan dalam aktivitas kehidupan sehari-hari, sehingga sifat-sifatnya yang tidak diinginkan dapat dihindari.
- ~ mengembangkan teknik-teknik analisis dan *smart sensor* untuk pemantauan paparan bahan-bahan beracun berbahaya di lingkungan, termasuk nanomaterial.

DAFTAR RUJUKAN

- Anastas, P. T., and Warner, J. C. (1998). *Green Chemistry: Theory and Practice* Eds. Oxford University Press: Oxford, UK.
- Arup Roy, A. and Bhattacharya, J., (2015). *Nanotechnology in Industrial Waste-water Treatment* , IWA Publishing Alliance House 12 Caxton Street London SW1H 0QS, UK
- Cabrera, L., Gutierrez, S., Menendes, N., Morales, M.P., Herrasti, P. (2008) *Magnetite nanoparticles: Electrochemical synthesis and characterization, Electrochem. Acta* 53: 3436-3441.
- Durairajan A., Kavitha T., Rajendran A. (2012) *Experimental investigation and control the toxic emissions in IC engines by nano materials*, *Discovery Sci.*, 1(1), 3-9
- Ensikat, H.J., DitscheKuru P., Neinhuis C., and Barthlott W. (2011) *Beilstein J. Nanotechnol.* 2, 152–161. doi:10.3762/bjnano.2.19
- Fajarah, F., Setyawan, H., Widiyastuti, W., Winardi, S. (2012) Synthesis of magnetite nanoparticles by surfactant-free electro-chemical method in an aqueous system *Advanced Powder Technology* 23, 328–333
- Fajarah, F., Setyawan, H., Lenggono, I.W., Nur, A. (2013) Thermal stability of silica coated magnetite synthesized by electrochemical method, *Advanced Powder Technology*, 24, 507-511
- Fajarah, F & Sutrisno (2014), *Catalytic Performance of Fe₃O₄ Nanoparticles Prepared by Coprecipitation in Oxidation of Methylene Blue and Rhodamine B by H₂O₂*, *International Seminar on Chemical Engineering in Minerals and Materials Processing 2014*.
- Fajarah, F., Sutrisno, Nazriati (2016) To Enhance The Yield of Magnetite Nanoparticles Using Isolation Method, *Proceeding Seminar Basic 2016* Fajarah, F. & Nazriati (2017), Factors influence the Structural and magnetic Properties of Ag-Fe₃O₄ Nanocomposites synthesized by reduction method, *IOP conference series: Material science and engineering*, 202 (2017) doi 10.1088/1757-899X/202/1/012064, 202 (2017) doi 10.1088/1757-899X/202/1/012064.
- Fajarah, F., Aisyah, S.N., Nazriati, Yahmin, Marfu'ah, S., Suryadharna, I.B. (2017) *Pengaruh Perbandingan Komposisi Ag@Fe₃O₄ – asam oleat terhadap daya hambat Pertumbuhan Bakteri S. Aureus dan E. Coli. SNKP 2017*
- Fajarah, F. (2018) Sintesis Nanopartikel dengan Prinsip Kimia Hijau. *Prosiding SNKP 2018*.

Menyelami Kesederhanaan Struktur, Memanfaatkan Derajat Kompleksitas Material

Prof. Dr. Markus Diantoro, M.Si.

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh,

إِنَّ الْحَمْدَ لِلَّهِ نَحْمَدُهُ وَنَسْتَعِينُهُ وَنَسْتَغْفِرُهُ وَنَسْتَهْدِيهِ وَنَعُوذُ بِاللَّهِ مِنْ شُرُورِ أَنْفُسِنَا
وَمِنْ سَيِّئَاتِ أَعْمَالِنَا، مَنْ يَهْدِهِ اللَّهُ فَلَا مُضِلَّ لَهُ وَمَنْ يَضِلَّ فَلَا هَادِيَ لَهُ. أَشْهَدُ أَنْ لَا
إِلَهَ إِلَّا اللَّهُ وَأَشْهَدُ أَنَّ مُحَمَّدًا عَبْدُهُ وَرَسُولُهُ. اللَّهُمَّ صَلِّ وَسَلِّمْ وَبَارِكْ عَلَى مُحَمَّدٍ وَعَلَى
آلِهِ وَصَحْبِهِ وَمَنْ اهْتَدَى بِهَدَاهُ إِلَى يَوْمِ الْقِيَامَةِ. أَمَّا بَعْدُ؛

Segala puji bagi Allah, kita memuji-Nya dan meminta pertolongan, pengampunan, dan petunjuk-Nya. Kita berlindung kepada Allah dari kejahatan diri kita dan keburukan amal kita. Barang siapa mendapat dari petunjuk Allah maka tidak akan ada yang menyesatkannya, dan barang siapa yang sesat maka tidak ada pemberi petunjuknya baginya. Aku bersaksi bahwa tidak ada Tuhan selain Allah dan bahwa Muhammad adalah hamba dan Rasul-Nya. Ya Allah, semoga doa dan keselamatan tercurah pada Muhammad dan keluarganya, dan sahabat dan siapa saja yang mendapat petunjuk hingga hari kiamat.

Surat An-Nur 35

اللَّهُ نُورُ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ مِثْلُ نُورِهِ كَمِشْكُوتٍ فِيهَا مِصْبَاحٌ الْمِصْبَاحُ فِي زُجَاجَةٍ
الزُّجَاجَةُ كَأَنَّهَا كَوْكَبٌ دُرِّيٌّ يُوقَدُ مِنْ شَجَرَةٍ مُبْرَكَةٍ زَيْتُونَةٍ لَا شَرْقِيَّةٍ وَلَا غَرْبِيَّةٍ يَكَادُ زَيْتُهَا
يُضِيءُ وَلَوْ لَمْ تَمْسَسْهُ نَارٌ نُورٌ عَلَى نُورٍ يَهْدِي اللَّهُ لِنُورِهِ مَنْ يَشَاءُ وَيَضْرِبُ اللَّهُ الْأَمْثَالَ
لِلنَّاسِ ۗ اللَّهُ نَكَّارٌ عَلِيمٌ

Allah (pemberi) cahaya (kepada) langit dan bumi. Perumpamaan cahaya-Nya, seperti sebuah lubang yang tidak tembus, yang di dalamnya ada pelita besar. Pelita itu di dalam tabung kaca (dan) tabung kaca itu bagaikan bintang yang berkilauan, yang dinyalakan dengan minyak dari pohon yang diberkahi, (yaitu) pohon zaitun yang tumbuh tidak di timur dan tidak pula di barat, yang minyaknya (saja) hampir-hampir menerangi, walaupun tidak disentuh api. Cahaya di atas cahaya (berlapis-lapis), Allah memberi petunjuk kepada cahaya-Nya bagi orang yang Dia kehendaki, dan Allah membuat perumpamaan-perumpamaan bagi manusia. *Ban Allah Maha Mengetahui segala sesuatu.*

Yth. Ketua Senat beserta jajarannya

Yth. Rektor UM beserta jajarannya

Yth. Para guru, seluruh kolega sejawat, para tamu undangan yang berbahagia

Puji syukur kami panjatkan atas segala rahmat, nikmat dan hidayah yang tak kurang. Hari ini kami bersyukur dapat berdiri dihadapan para hadirin untuk dikukuhkan sebagai salah satu profesor di UM. Bukanlah suatu kebetulan, Allah telah memberikan rahmat tak hingga, hingga SK Profesor turun, saat kami juga diundang ke rumah Allah, Makkah Al Mukaromah, meski bukan milik pribadi ada juga mobil dinas baru, dan tak kalah penting KPRI Lunas persis pulang dari Makkah. Jika boleh berandai, kami ingin menatap mata kebahagiaan orang tua kami tak pernah lelah berjuang dan berdoa untuk anakmu ini. Kalau orang bilang, dibalik kesuksesan seorang suami, ada srikandi yang baik hati, istriku, telah kupercaya dari dulu, Ada dua insan buah hati, nan jauh namun tetap di hati.

Hadirin, sekelumit tentang Judul

Judul ini dipilih bukan tanpa tiada kesengajaan. Kami mengangkat pentingnya memahami struktur mikro untuk mengenal sifat yang nampak, demikianlah lugasnya. Dalam keseharian struktur mikroskopis, mesoskopis, intrinsik ataupun jenis *superstructure* dengan berbagai elemen fase tak selalu tampak dan kerap bukan menjadi acuan dalam jangkauan untuk diacuhkan manusia. Selain dari padanya, struktur material, walaupun di kaji mendalam, tampak statis atau dipandang bersahaja dalam kererataan. Tentu ini bukanlah kesungguhannya. Oleh karenanya patut saya tuangkan dalam terma “kesederhanaan”. Sebaliknya, manusia dalam keseharian lebih memandangi sifat makroskopis material yang beragam. Sifat makro itu antara lain transparan, lunak, mengkilap, mudah menghantar arus listrik, dan lainnya. Sejatinya, mono material dapat menampakkan sifat khas yang ragamnya bergantung varian pada pemicu dan lingkungan. Bahkan dengan pengganggu tunggal, masih dapat memunculkan ragam eksistensi sifat fisis dan tingkatnya. Oleh karenanya, dalam kesempatan ini cukup adil mengedepankan “derajat kompleksitas sifat material”. Pun, tatanan mikro, sifat makro sebenarnya terajut erat dengan pengukuran. Dan, kemiripan yang elegan eksis di kehidupan kita.

Hadirin yang berbahagia

Ijinkan kami lintaskan pengalaman riset dan membangun tim penelitian di bidang material dalam bingkai yang sederhana.

Selain mengerjakan skripsi kependidikan semasa S1 di IKIP Malang judul skripsi *Pengaruh sikap dan minat siswa terhadap prestasi belajar*, penulis sempat mengkaji material dalam karya mahasiswa dengan judul *Pengukuran emisivitas kawat wolfram dari radiasi bola lampu pijar menggunakan hukum Stefan Boltzmann*.



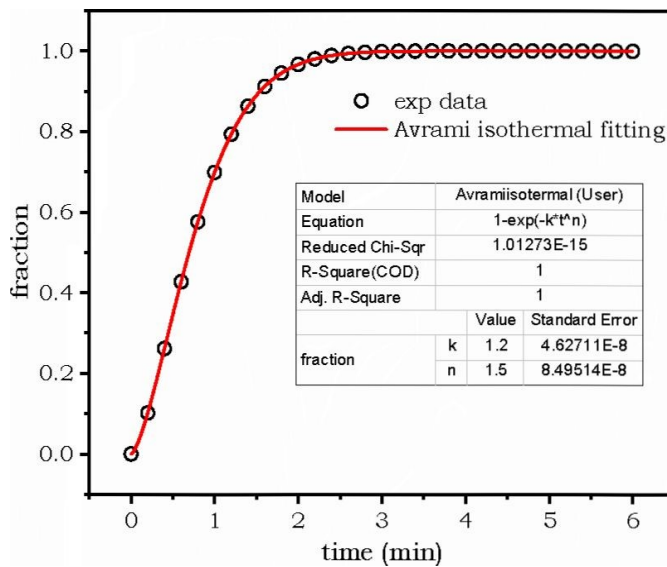
Gambar 1. Bola lampu pijar (Sumber: fucapi.info)

Setelah menjadi dosen muda di IKIP Malang penulis meneliti secara empiris *Analisis laju respons termometer alkohol dan termometer raksa*



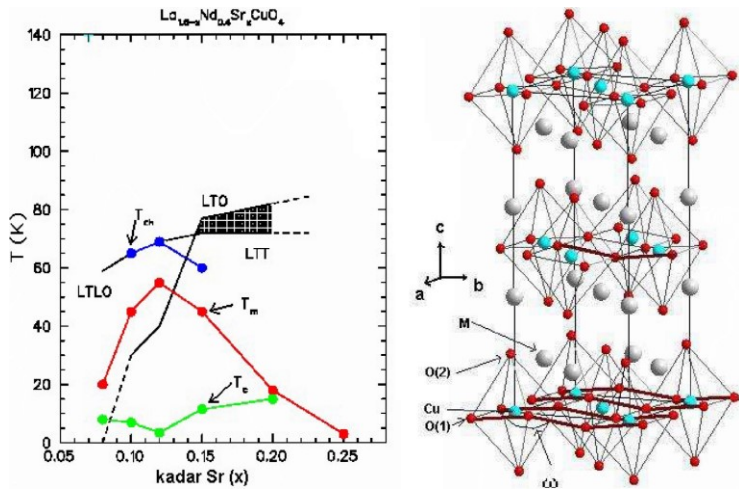
Gambar 2. Mengukur menggunakan termometer batang (sumber: www.alamy.corri)

Pengalaman riset terus berlanjut semasa kuliah S2 di KBK MFM (material Fungsional dan Magnetik) dengan bimbingan Prof. Tjia May On (Alm.) ITB dengan mengkaji Evolusi fase superkonduktor $\text{Bi}_{2-x}\text{Pb}_x\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+d}$ (disingkat dengan fase Bi-2223), Bi-2212, dan Bi-4435 berbagai doping dan waktu isotermdan temperatur. Dengan bekerjasama dengan lab keramik Kimia ITB, lab fisika mampat BATAN, Pusat keramik, Pusat Selulosa dan Pusat Geologi Bandung.

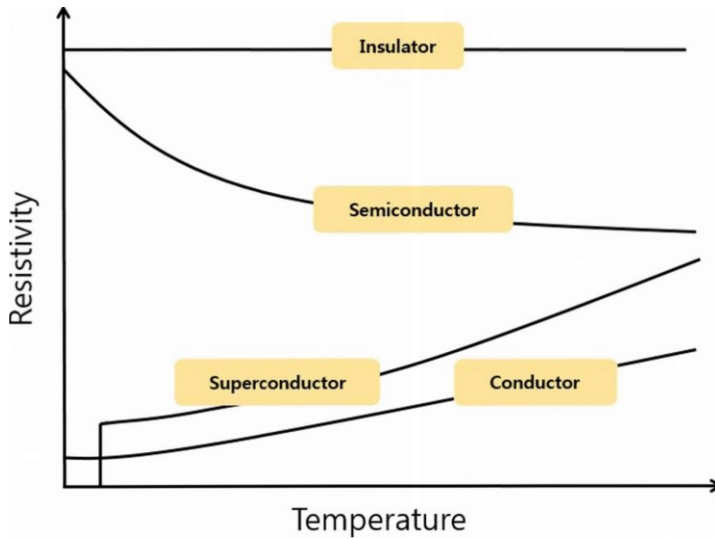


Gambar 3. POLA AVRAMI (sumber: pribadi)

Selanjutnya semasa kuliah S3 di Fisika ITB masih melanjutkan bidang superkonduktor dengan judul Efek doping pada struktur kristal RE-214 dan Efek Adisi pada struktur mikro BSCCO/Ag: Kajian struktur dengan sifat superkonduktivitas dan mekanisme pinning. Berbagai institusi yang mendukung antara lain Fisika UI kampus Depok, Zat Mampat Batan Serpong, UvA Amsterdam, dan SAS Bratislava Slovakia. Semakin menyadarkan betapa pentingnya mengenali struktur untuk mengatur sifatnya.



Gambar 4. Superkonduktor LNSCO



Gambar 5. Resistivitas konduktor, isolator, semi konduktor, dan superkonduktor (R-T) [sumber: www.e-sciencecentral.or[^]



Gambar 6. Superdiamagnetik levitasi superkonduktor {sumber: www.cam.ac.uty}

- Sandwich di UvA, Amsterdam
- Visiting researcher di SAS, Bratislava-superconducting tapes BSCCO-2223
- Postdoc di RUG, Groningen-Crystal growth of $\text{Cu}_{1-x}\text{M}_x\text{Cr}_x\text{O}_2$ defect site system
- Training dasar X-RD dan kristalografi di Almelo

Dan, berbagai pendanaan riset terus diperoleh dengan sumber pendanaan dari pemerintah/ lembaga: PDUPT, PTUPT, RUT, PD, PT, PTM, INSINAS (pertama di UM), Hi-Link (pertama di UM).

Meskipun bukan ahli kependidikan, bukantah berarti tidak membantu proses pendidikan dan pencapaian tuaran riset pendidikan. Fokus kajian yang biasa dibantu pada bidang evolusi dan distribusi penguasaan konsep fisika, model mentat fisika dan konsistensi fisika.

Dalam kondisi keterbatasan ketangkasan peratatan dan biaya, selanjutnya penulis fokus pada pemuliaan bahan atom. Beberapa topik yang memperoleh pendanaan dari kementerian adalah (1) pengotahan pasir sitika menjadi gelas fungsional, (2) ekstraksi setulus acetat dari eceng gondok sebagai bahan *flexible cage electrode supercapacitor*, (3) ekstraksi flavonoid dari pohon angsa *pterocarpus indicus wild (PIW)* dan *jarakjathropa multifida linn (JML)* sebagai bahan optoelectronic, (A) ekstraksi betakaroten, klorofil, sebagai *dye sensitizer solar cell (DSSC)*, (5) pemanfaatan berbagai karbon sebagai bahan superkapasitor dan solar cell, (6) pengembangan berbagai *low dimensional materials* seperti nano silver, nano Cu, dan *metallic based bioelectronic complex materials* sebagai *biodegradable antibacterial adjustable dielectric*, dan (7) pengembangan nano material termoelektrik. Selain itu ide penggabungan double layer DSSC, tandem DSSC, Solar-supercapacitor telah didanai (INSINAS dan PTUPT) dan upaya menjadi pionir di Indonesia. Oleh karenanya, dengan menampilkan judul di halaman ini diniati untuk memberikan inspirasi dan motivasi generasi berikutnya yang lebih bermanfaat dan memberi dampak.

Hadirin yang berbahagia.

Dalam kesempatan ini, iijinkan saya berbagi pengalaman bersama mahasiswa dan perkuliahan.

Ada tantangan sejak saya kembali dari Bandung 2005. Mengapa yang banyak memperoleh pendanaan PKM hanya mahasiswa FT dan kalau di FMIPA hanya mahasiswa Biologi. Banyak kolega yang bilang bahwa fisika sudah mentok tidak ada permasalahan lagi. Sejenak juga hati ini pernah mengiyakan. Namun, dengan kesempatan sebagai pembina mata kuliah metode penelitian fisika, belenggu itu mulai aku pudarkan. Sejak 2006 fisika mulai memperoleh pendanaan dan terus meningkat dan dapat mengungguli yang lain meskipun data statistik menunjukkan input mahasiswa fisika merupakan kelompok sepuluh terendah selama bertahun-tahun. Nikmat mana lagi yang kamu dustakan.

Dalam merombak tatanan kenyamanan sebagai jurusan tak mampu meraih dana PKM, kami terus berusaha memotivasi dan bersama menapaki peningkatan peringkat kapabilitas. Kami bentuk MSC (materials science club), kelompok bahasa Inggris Fisika (bersama HMJ), Saya sampaikan bahwa mahasiswa UM dapat menyamai atau mengungguli mahasiswa Fisika ITB sekalipun (sebagai contoh saja). Kenapa karena dosen saudara yang S2 dan S3 di ITB selalu menjadi pamuncak di ITB bahkan mengungguli dosen ITB. Beberapa kalimat yang sering saya lontarkan kepada mahasiswa adalah "Apakah penelitian yang saudara ajukan memang benar penelitian?" Saya sering menggunakan tiga komponen yang harus dipenuhi sebagai penelitian (tidak dibahas dalam buku ini). Saya terus mencoba menggaungkan untuk menggunakan tiga komponen *problems statements* atau *state of the art* guna menilai kebaruan penelitian atau karya ilmiah lain (tidak dibahas dalam buku ini). Untuk mendasari penguasaan tentang penelitian, menilai proposal atau karya ilmiah lain, dalam kuliah atau kesempatan lain, saya cenderung menggunakan metode ilmiah Norman W. Edmund. Tahapan-tahapan sistematis dalam riset dapat dilakukan sebagai berikut. 1) *Observing*, 2) *Searching; exploring; and gathering evidence*, 3) *Evaluating evidence*, 4) *Generating creative and logical alternative solutions*, 5) *Determining if there is a problem*, 6) *Setting goals and planning*, 7) *Forming the hypothesis*, 8) *Using motivation and sensitivity as supporting ingredients*, 9) *Applying thinking skills, methods, and processes*, 10) *Taking action*, 11) *Using personal attributes in the process*, 12) *Challenging the hypothesis*, 13) *Suspending*

judgment, 14) Reaching a conclusion. Tidaklah mudah memahami dan menerapkan ke-14 langkah tersebut (tidak dibahas dalam buku ini).

Para pimpinan dan hadirin yang kami hormati,

Untuk mengetahui besaran fisika kita perlu melakukan pengukuran. Mengukur jarak, massa, waktu tempuh adalah contoh yang lazim. Contoh lain pengukuran adalah pengukuran konduktivitas listrik, konduktivitas panas, kemagnetan, transparansi, dan banyak sifat fisika lain baik yang mono maupun yang multi seperti sifat optoelektrik, magnetooptik, elektotermomekanik dan sebagainya. Dalam kehidupan sehari-hari kita juga sering melakukan pengukuran, misalnya mengukur masa tunggu, mengukur berat badan, mengukur kesetiaan atau mengukur kedermawanan. Mengukur adalah membandingkan sesuatu dengan standar. Tentu, tidak semua sifat dapat dibandingkan langsung, namun perlu dilakukan bantuan dan perlu beberapa tahap dan inferensi. Cara mengetahui sifat fisis yang terahir ini lazim dikatakan sebagai mengkarakterisasi (*characterize*). Untuk mengetahui sifat fisis bahan maka perlu dilakukan gangguan atau dites, diuji, dengan menerapkan bahan coba. Misal menempatkan muatan sangat kecil dalam medan listrik untuk mengetahui kuat medan listrik tersebut. Mirip dengan ini, dalam kehidupan sehari-hari juga demikian. Jika ingin mengetahui kesetiaan cinta, maka perlu diberi gangguan orang lain dalam berbagai usia, situasi, lalu lihatlah responsnya. Jika ingin mengetahui kedermawanan perlu diberi gangguan peminta yang meminta atau takmmeminta dengan derajat kefakiran, dan lihatlah responnya. Respons merupakan interaksi antara benda, manusia, sistem masyarakat terhadap gangguan. Itulah sifat nya.



Gambar 7. Mengukur panjang, menimbang (sumber: www.wikihow.com)

A Woman's Loyalty
is Tested When Her
Man Has Nothing...
A Man's Loyalty is
Tested When He
Has Everything....

Gambar 8. Menguji kesetiaan, menguji kedermawanan dlsb (hbuku2 psikoogi/ web www.nidokidos.org)

Keserupaan dan analogi lanjutan

Selama kuliah baik S2, maupun S3 telah berjumpa dan beinteraksi dengan berbagai orang hebat, para guru dan kolaborator nasional dan dunia. Setelah turun gunung, saya merasa perlu mendirikan padepokan ilmu bidang material dengan merek “MD Production”. Awalnya semua saya jalankan sendiri, dan mahasiswa hanya sebagai objek (maafkan aku ya). Tahapan berikutnya, kesadaran bekerja kelompok dalam struktur dan orientasi khas mulai dibangun. Alhamdulillah, bersama MSC, dan kelompok 4 Serangkaian, MD_Production terus bertumbuh. Saat ini telah terbangun komponen dan struktur serta media nya. Sebagaimana material pada umumnya, elemen (unsur), struktur (keteraturan dan periodesitias), media (medan, lingkungan dan kondisi) menentukan performa (sifat fisis). Pun, ini juga eksis dalam diri manusia, atau kelompok manusia, atau organisasi, termasuk UM sebagai institusi. Elemen, struktur, media akan menentukan respons, gangguan, tantangan, kemauan dan unjuk kerja UM. Grup riset “MD Production” (kalau boleh jujur) aktif bersama dan mendorong mahasiswa aktif untuk melakukan penelitian serta menyelesaikan tugas akhir baik, skripsi, tesis, maupun disertasi. Selain itu, bangga juga rasanya mahasiswa berani tampil aktif dalam pertemuan ilmiah nasional maupun internasional, Sehingga grup penelitian “MD Production” mewajibkan semua tim harus memiliki passport. Sehingga, mahasiswa memiliki bekal untuk tahap kehidupan selanjutnya, memiliki wawasan dunia, tidak hanya dalam hal wawasan keilmuan saja.



Gambar 9. MD Production



Gambar 10. MD Production

Hadirin berbahagia,

Guna mengantar ke material maju untuk energi terbarukan akan kami kenalkan dengan fase dan struktur bahan. Secara umum sebuah sistem yang terdiri atas penyusun serba sama dinamakan fase (*phase*). Dalam kondisi berbeda para ahli menyebut sebagai keadaan (*state*). Jadi boleh kita menyebut padat (*solid*), cair (*liquid*), atau gas adalah berdasarkan jarak atau kuatnya ikatan antar elemen.

Dalam kehidupan sehari-hari maupun dalam berbagai ilmu kita sering mendengar kata fase. Dalam ilmu fisika banyak definisi yang bisa kita sebutkan berhubungan dengan fase sebagai berikut.

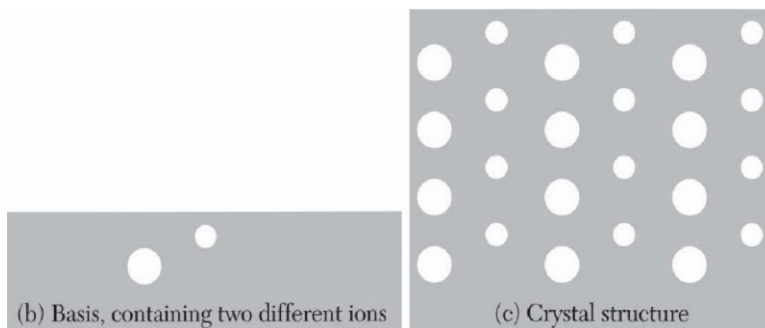
1. Fase yang berhubungan dengan bentuk zat yaitu padat, cair, gas, plasma
2. Fase yang berhubungan dengan kristalinitas yaitu amorf, glass, kristal
3. Fase yang berhubungan dengan kemurnian zat yaitu murni (*single phase*), atau *multi-phase*.

Fisika zat padat merupakan bagian ilmu fisika yang mempelajari sifat dan perilaku fisika dari zat dalam fasa padat yang disusun oleh atom-atom atau gugus atom dalam ruang. Sebenarnya, atom-atom atau ion menempati posisi setimbang, namun dalam kenyataannya mereka bergetar (fonon). Bahan padat dapat diklasifikasikan berdasarkan keteraturan susunan atom-atom atau ion-ion penyusunnya.



Gambar 11. Kristal alam (kiri) dan kristal hasil sintesis (kanan) [1]

Berdasarkan susunan atom-atomnya bahan dapat diklasifikasikan menjadi kristal dan amorf. Bahan kristal adalah zat padat yang tersusun oleh deretan atom-atom yang letaknya teratur dan periodik. Sebaliknya, zat padat yang tersusun oleh atom-atom yang tidak beraturan disebut bahan amorf. Gambar 11 menunjukkan Kristal yang ada di alam dan hasil sintesis.

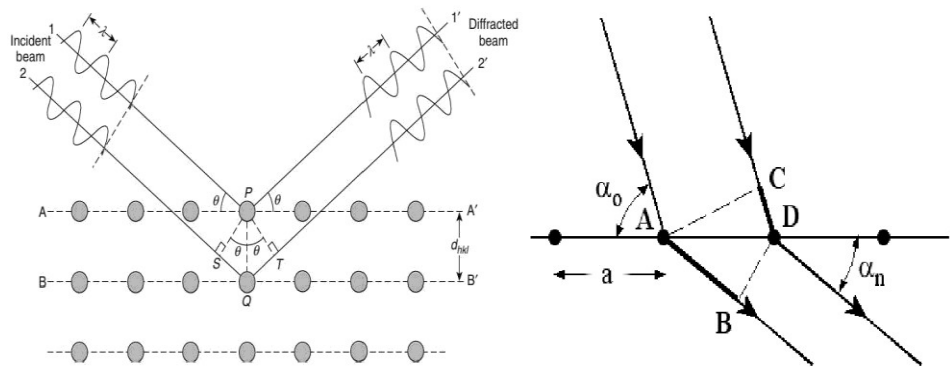


Gambar 12. Susunan atom dalam kristal [2]

Kristal merupakan zat padat yang dalam susunannya seperti pada Gambar 12. Di mana struktur kristal merupakan gabungan dari kisi dan basis. Banyak bahan di sekitar kita yang dipakai

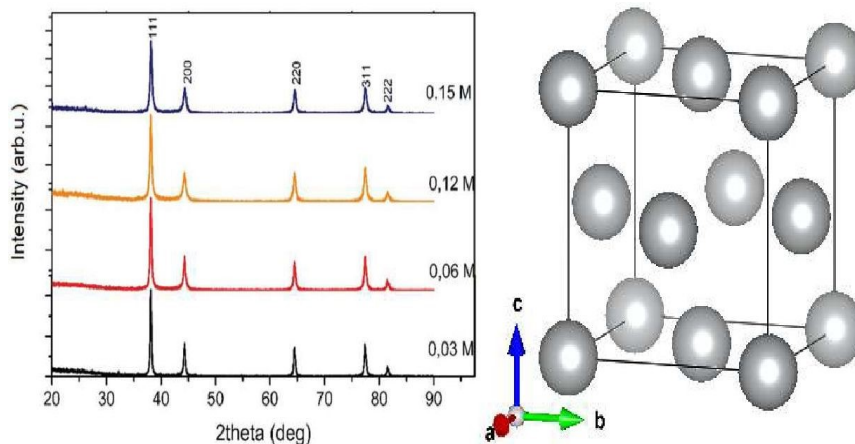
sehari-hari (logam, semikonduktor, atau isolator) memiliki merupakan zat padat yang memiliki struktur dalam penyusunan atom-atom nya. Setiap bahan dengan struktur susunan atom-atomnya yang menjadikannya sebagai sidik jari. Sidik jari material dapat diketahui melalui proses difraksi. Proses difraksi dapat terjadi asalkan terdapat kisi dan panjang gelombang yang digunakan setara atau lebih kecil dari jarak antar kisi.

Difraksi pada kristal dapat digunakan untuk menentukan jenis material kristal, parameter kisi, posisi atom, dan sebagainya. Terdapat dua teori yang menjelaskan proses difraksi untuk menentukan struktur kristal material yaitu metode Laue dan Bragg seperti pada Gambar 13



Gambar 13. Bragg (kiri) dan Laue (kanan) [3]

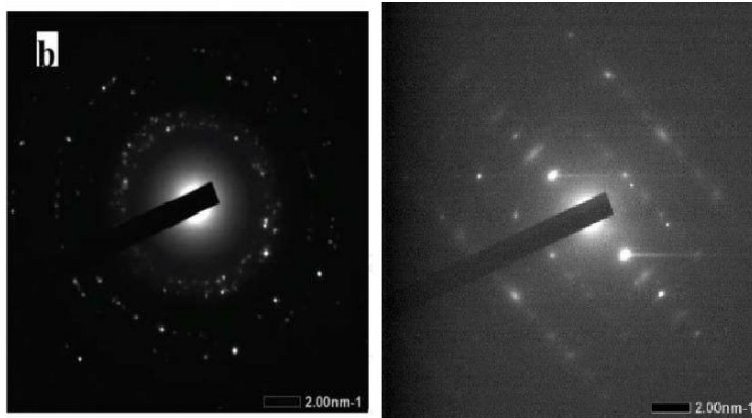
Banyak hasil penelitian dasar dilakukan untuk menentukan struktur kristal dari material baik pada superkonduktor, oksida logam semikonduktor, gelas, polimer, maupun bahan alam [4-9]. Karakterisasi dasar berkaitan dengan struktur kristal berkaitan dengan sifat fisika dari material tersebut. Karakterisasi difraksi pada kristal dapat dilakukan dengan berbagai metode seperti XRD (X-ray Diffraction) dan SAED (Selection Area Electron Diffraction). XRD merupakan metode karakterisasi pada material dengan memanfaatkan sinar X yang memiliki orde panjang gelombang yang kurang dari atau setara dengan jarak antar bidang. Sehingga peristiwa difraksi sesuai dengan persamaan Bragg terbentuk. Dengan melakukan variasi sudut datang didapatkan grafik XRD. Grafik XRD pada perak nanopartikel seperti pada Gambar 14. Berdasarkan hasil XRD diketahui perak nanopartikel memiliki sistem kristal kubus, dengan grup ruang $Fm-3m$ dan parameter kisi $a = 4.08721$



Gambar 14. Grafik XRD perak nanopartikel dan struktur kristal [10].

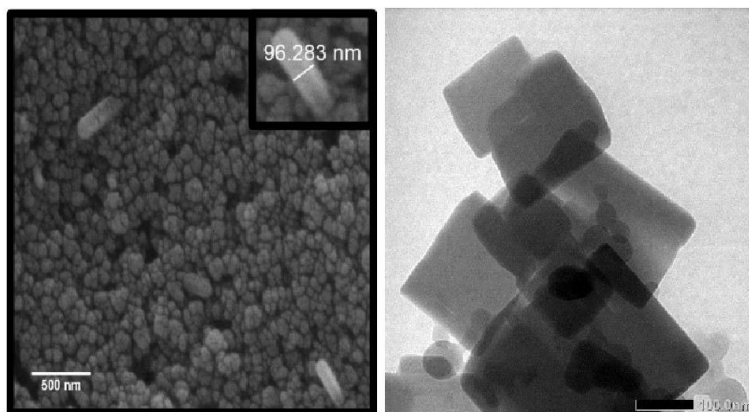
Sejauh ini, telah dilakukan berbagai penelitian untuk mengamati berbagai struktur dari material. tidak hanya menggunakan metode XRD, ada juga metode lain yang mirip yaitu SAED.

Karakterisasi ini memanfaatkan hasil karakterisasi TEM (Transmission Electron Microscopy) untuk mendapatkan hasil difraksi elektron. dapat diketahui material memiliki single kristal atau bukan. Gambar 15 menunjukkan hasil SAED untuk perak nanopartikel (polikristal) dan Ni-Co MOF (single kristal).



Gambar 15. SAED perak [10] (kiri) dan Ni-Co MOF (kanan)

Tidak hanya dari struktur atom saja yang dapat diamati. Morfologi material dapat diamati dengan bantuan mikroskop. Mikroskop yang digunakan untuk mengamati material harus mampu mengamati sampai ukuran nanometer. Terdapat berbagai mikroskop yang memanfaatkan berkas elektron untuk mengamati morfologi material seperti SEM (Scanning Electron Microscopy) dan TEM (Transmission Electron microscopy). Gambar 5 menunjukkan hasil SEM dan TEM



Gambar 16. Hasil SEM [7] (kiri) dan TEM (kanan)

Riset dalam bidang material tidak hanya berkutat dalam hal eksperimen saja, diperlukan kajian mendalam pada teori yang mendukung, selain itu dengan meningkatnya iptek dalam melakukan kajian tidak nya trial dan error saja, namun dengan mengkaji secara teoritis dan dimodelkan dalam persamaan matematis yang dapat disimulasikan dengan bantuan komputasi, dalam membantu dalam rekayasa material sehingga didapatkan sifat yang unggul. Ukuran dimensi material sangat berpengaruh terhadap sifat dari material tersebut. ukuran dalam skala nanometer menjadi kajian menarik karena ukuran membuat sifat yg awalnya tertutup menjadi keluar. seperti pada bahan Fe₃O₄ yang pada ukuran mikro sampai bulk memiliki sifat feromagnetik, namun pada skala nano meter dia bersifat superparamagnetik. Emas pada ukuran mikro memiliki warna kuning seperti emas yang kita tahu. Namun, dalam skala nano emas memiliki warna merah.

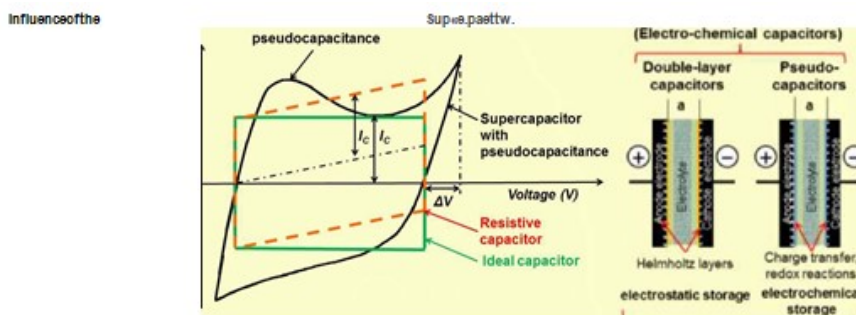
Memanfaatkan struktur dan bagi piranti elektronik.

Selain struktur atau tatanan penyusunan, ukuran butir juga penting. Telah dilakukan variasi morfologi dari material dalam 1D, 2D, dan 3D. dengan berbagai metode untuk meningkatkan sifat fisika dari material tersebut. Riset dalam bidang material dengan ukuran nano meter telah dimanfaatkan dalam mengembangkan prototipe piranti elektronik seperti DSSC, Superkapasitor, termoelektrik, atau paduannya.

Selain struktur, ukuran geometri nano misalnya, kita masih perlu memperhatikan hal teknis lain. Material yang digunakan haruslah memiliki sifat yang baik dan tersedia dalam jumlah banyak serta tidak beracun. Hal ini lah yang mendorong untuk melakukan kajian terhadap berbagai bahan alam khususnya tumbuhan atau bahan alam lain.

Kajian terhadap material alam khususnya dari tumbuhan menjadi fokus dalam penelitian. Bahan alam yang didapatkan seperti getah, batang, buah, maupun daun, diekstrak untuk mendapatkan material yang berpotensi seperti klorofil, betakaroten, selulosa, *flavonoid*, dan *quercetin*. Material yang berpotensi nantinya diaplikasikan pada material penyusun superkapasitor dan sel surya.

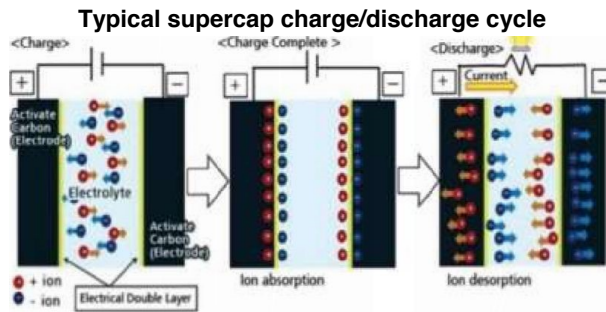
Superkapasitor merupakan salah satu penyimpan energi listrik dengan mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik. Konversi energi melalui mekanisme mekanisme adsorpsi ion elektrolit pada permukaan elektrodanya [11]. Superkapasitor merupakan devais penyimpanan energi listrik yang mampu digunakan berulang, pengisian-pengosongan cepat, rapat energi dan daya tinggi, prinsip pengisian yang mudah, dan sintesis murah dan sederhana [12]. Superkapasitor mampu menyimpan daya mencapai 1000 kali lipat dibandingkan dengan baterai [13].



Gambar 17. Superkapasitor (Sumber: www.supercondensateur.com)

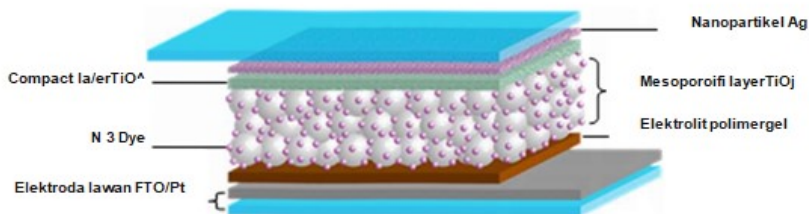
Superkapasitor tersusun dari beberapa elemen diantaranya elektroda, counter elektroda elektrolit dan sebuah pemisah (separator) diantara keduanya. Adanya separator berfungsi menyerap elektrolit dan mencegah adanya kontbaelak antara kedua elektroda tersebut. Separator harus bersifat *ion-permiable* sehingga proses transfer muatan dapat dilakukan. Selain itu, penggunaan separator harus menyesuaikan dengan pemakaian elektrolit. Separator polimer, kertas digunakan pada elektrolit organik. Disisi lain, separator serat digunakan pada elektrolit *aqueos M*.

Ketika superkapasitor diisi dengan muatan listrik (diberi beda potensial), elektron berpindah dari elektroda positif menuju elektroda negatif melalui sirkuit eksternal (*load*). Hasilnya, kation pada elektrolit menjadi terkonsentrasi elektroda negatif. Disisi lain, anion pada elektrolit menjadi terkonsentrasi di kutub positif. Ketika terjadi proses pengosongan muatan, elektron bergerak dari elektroda positif kembali menuju elektroda negatif melalui sirkuit eksternal (*load*). Hasilnya, kation dan anion dalam elektrolit menjadi tercampur lagi sampai proses pengosongan selesai [14].



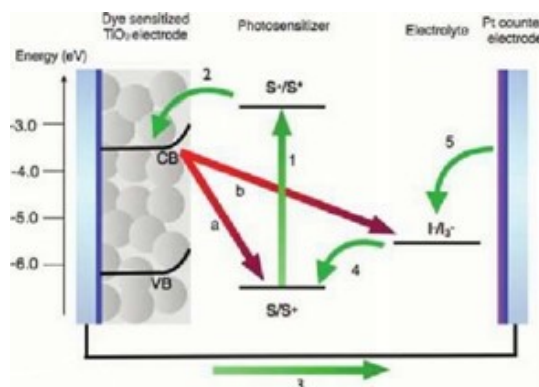
Gambar 18. Skema kerja superkapasitor

Berdasarkan proses penyimpanan energi listrik, superkapasitor terdiri dari tiga jenis. *Electric Double-Layer Capacitor (EDLC)* dan *Pseudocapacitor Hybrid Capacitor*. Pada sistem superkapasitor EDLC proses transfer muatan berlangsung secara elektrostatis (non redoks), tidak ada transfer muatan antara elektroda dengan elektrolit. Elektrolit yang digunakan terdiri dari ion positif dan negatif yang dilarutkan dalam pelarut seperti aquades. Elektroda yang digunakan pada EDLC berupa material nano dengan luas permukaan spesifik yang tinggi ($>1000 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$). Hal ini menyebabkan kapasitansi yang dihasilkan EDLC lebih tinggi jika dibandingkan dengan sistem kapasitor biasa. Kapasitansi yang mampu dihasilkan EDLC mencapai $20\text{-}50 \text{ pF/cm}$ [11]. Elektroda yang sering digunakan dalam sistem EDLC yaitu Carbon nano porous. Carbon nano porous memiliki keunggulan yaitu ekonomis, produksi industri yang melimpah dan tingkat *availability* yang tinggi [14].



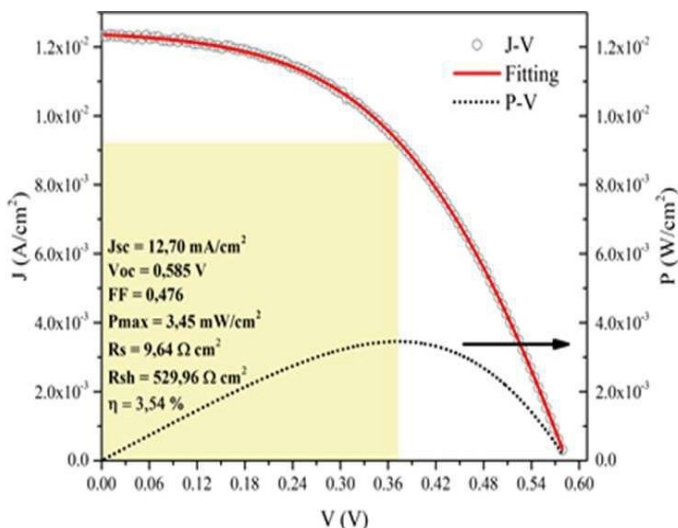
Gambar 19. Skema DSSC (sumber: dokumen pribadi)

DSSC merupakan sel surya diusulkan pertama kali oleh Michael Gratzel dan O'Regan pada tahun 1991 [15]. Saat ini efisiensi DSSC yang telah dikembangkan sebesar $11,9 \pm 0,4 \%$ [16]. Secara umum DSSC terdiri dari substrat kaca transparan konduktif, fotoanoda, dye sebagai fotosensitizer, elektrolit redoks, dan elektroda lawan (katoda) yang tersusun membentuk lapisan *sandwich* seperti pada Gambar [17]. DSSC memiliki bagian-bagian yaitu substrat transparan dengan logam oksida, fotosensitizer (dye), elektrolit, dan elektroda lawan [18,19].



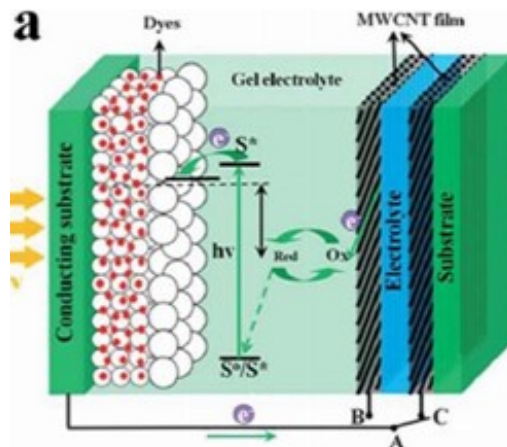
Gambar 20. Skema kerja DSSC [26]

Fenomena konversi cahaya pada DSSC diuraikan dalam persamaan (1)-(5) [20-25]. (1) Ketika foton (Z^0 dari cahaya matahari ditangkap oleh dye pada lapisan semikonduktor TiO_2 , maka S berpindah dari HOMO ke LUMO, sehingga terjadi peristiwa *photoexcitation*. -merupakan sensitizer/dye dan S^* adalah dye yang tereksitasi. (2) Sensitizer pada keadaan tereksitasi (S^*) akan berpindah dari LUMO menuju conduction band pada lapisan semikonduktor TiO_2 dan menghasilkan elektron bebas. Pada peristiwa ini, dye mengalami peristiwa oksidasi (S^+). (3) Elektron bebas dihasilkan, dan kemudian melewati substrat konduktif FTO dan menghasilkan arus pada rangkaian luar. (4) S^+ pada TiO_2 bereaksi dengan redox couple $3I^-$ sehingga terjadi peristiwa dye regeneration. Hole yang ditinggalkan S saat terjadi proses eksitasi kemudian terisi kembali pada keadaan semula S . (5) Elektron yang telah melewati rangkaian luar yang kemudian sampai pada counter electrode Pt kemudian bereaksi dengan redox couple I_3^- . Hasil capaian DSSC yang telah dikembangkan didapatkan nilai efisiensi konversi energi sebesar 3,54% seperti pada gambar.



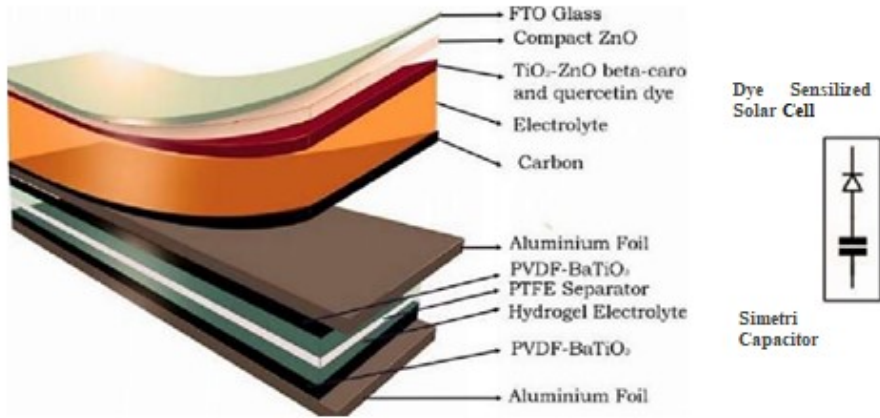
Gambar 21. Hasil pengujian DSSC (sumber: dokumen pribadi)

Fotosuperkapasitor merupakan devais sel surya yang terintegrasi secara simultan dengan superkapasitor. Salah satu jenis sel surya yang sedang dikembangkan menjadi superkapasitor adalah DSSC. DSSC berperan sebagai unit penyedia (*contributor*) elektron dan superkapasitor sebagai penyimpan energi listrik. Pada tahun 2004, untuk pertama kalinya Miyasaka dkk mengintegrasikan DSSC dan superkapasitor menjadi fotosuperkapasitor [27,28].



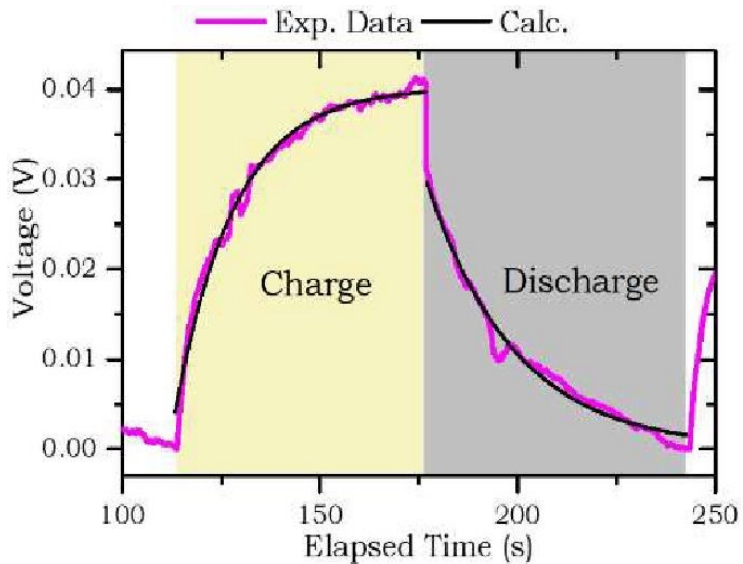
Gambar 22. Prinsip kerja fotosuperkapasitor oleh Sun dkk [29]

Skema kerja fotosuperkapasitor merupakan gabungan antara sel surya dan superkapasitor seperti pada gambar. Proses kerja pada bagian sel surya sesuai dengan skema pada gambar. sedangkan sistem kerja bagian superkapasitor sesuai dengan Gambar . Sehingga proses kerja fotosuperkapasitor akan melakukan pengisian ketika titik A dihubungkan dengan titik C dibawah perchayaan, sedangkan proses penggunaan listrik yang disimpan dengan titik B dan C sebagai elektroda superkapsaitor



Gambar 23. Desain skema fotosuperkapasitor [7]

Salah satu desain fotosuperkapasitor yang sudah dibentuk seperti pada gambar. Penelitian pada fotosuperkasitor dilakukan untuk membentuk perangkat yang efisien, kompak, dan mudah. Proses pengisian dan pengosongan dapat dilakukan seperti didapatkan gambar. Sehingga system fotosuperkapasitor dapat bekerja dengan baik.



Gambar 24. Pengisian dan pengosongan pada fotosuperkapasitor

Tim MD_Production telah berhasil memindahkan energi cahaya menjadi listrik dan meneruskan dalam penyimpanan. Selain itu, kapasitor telah berkembag dari mikro farad/ gram pada 2018, menjadi mili farad / gram pada 2018, dan awal 2019 meningkat menjadi 1 F/ g. uji coba lab telah dapat menyalakan 1 satu LED kecil selama 30 menit. pengalaman dalam melakukan pendidikan pada saat mengajar, masih banyak ditemukan inkonsistensi dalam kalimat, rumus, besaran, satuan, vektor, dsb. diperlukan pembenahan dalam konsep pengajaran fisika. Sebagai-

mana melihat material, kita perlu mengkaji dari berbagai kondisi, berbagai medan, berbagai gangguan. Sehingga dapat diperoleh informasi yang lengkap mengenai sifat bahann tersebut. Dus, dalam melakukan penilaian terhadap seseorang diperlukan berbagai aspek untuk mengamati, tidak hanya memandang dari satu sisi aspek saja. bisa jadi cara pandang kita tidak mampu mengungkap sifat asli mereka.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] Vainsthein B K 2013 *Fundamentals of crystals: symmetry, and methods of structural crystallography*
- [2] Kittel C 2004 *Introduction to solid state physics vol 6*
- [3] Leng Y 2013 *Materials characterization: Introduction to microscopic and spectroscopic methods: Second edition*
- [4] Diantoro M, Purwaningtyas D, Muthoharoh N, Hidayat A, Taufiq A and Fuad A 2012 *The influence of iron-and copper-doped of PANi thin film on their structure and dielectric properties* INTERNATIONAL CONFERENCE ON PHYSICS AND ITS APPLICATIONS:(ICPAP 2011) vol 1454 (AIP Publishing) pp 268-271
- [5] Diantoro M, Mustikasari A A, Wijayanti N, Yogihati C and Taufiq A 2017 *Microstructure and dielectric properties of cellulose acetate-ZnO/ITO composite films based on water hyacinth* J. Phys. Conf. Ser. 853 012047
- [6] Diantoro M, Tjia M O, Kovac P and Husek I 2001 *Pinning mechanisms in Bi-2223 tapes with reinforced Ag sheath and oxide additives in the core* Phys. C Supercond. 357-3601 182-5
- [7] Suprayogi T, Masrul M Z, Diantoro M and Taufiq A 2019 *The Effect of Annealing Temperature of ZnO Compact Layer and TiO₂ Mesoporous on Photo-Supercapacitor Performance* The Effect of Annealing Temperature of ZnO Compact Layer and TiO₂ Mesoporous on Photo-Supercapacitor Performance
- [8] Suryani S E I, Sa'adah U, Amini W N L, Suprayogi T, Mustikasari A A, Taufiq A, Sunaryono, Diantoro M and Nur H 2018 *Effect of ZnO and Annealing on the Hydrophobic Performance of x(ZnO)-CA-PLA* J. Phys. Conf. Ser. 1093 012003
- [9] Rynaldi Iqbal M, Asri I T, Harsipah, Rakhmah S, Diantoro M and Yudyanto 2018 *Dielectric Properties of TiO₂ Nanoparticles Doped Flavonoid Extract of Pterocarpus Indicus Willd (PIW) Latex* J. Phys. Conf. Ser. 1093
- [10] Diantoro M, Suprayogi T, Sa'adah U, Mufti N, Fuad A, Hidayat A and Nur H 2018 *Modification of Electrical Properties of Silver Nanoparticle* Silver Nanoparticles Fabrication, Characterization and Applications (InTech)
- [11] Salanne M, Rotenberg B, Naoi K, Kaneko K, Taberna P-L, Grey C P, Dunn B and Simon P 2016 *Efficient storage mechanisms for building better supercapacitors* Nat. Energy 116070
- [12] Lau S C, Lim H N, Ravooof T B S A, Yaacob M H, Grant D M, MacKenzie R C I, Harrison I and Huang N M 2017 *A three-electrode integrated photo-supercapacitor utilizing graphene-based intermediate bifunctional electrode* Electrochim. Acta 238 178-84
- [13] Miller J R and Simon P 2008 *Electrochemical capacitors for energy management* Sci. Mag. 321 651-652
- [14] Gonzalez A, Goikolea E, Barrena J A and Mysyk R 2016 *Review on supercapacitors:*

Potensi Kekayaan Hayati Indonesia sebagai Alternatif Terapi Diabetes Mellitus dalam Sudut Pandang Biologi Reproduksi

Prof. Dr. Abdul Gofur, M.Si.

Bismillahirrahmanirrahiim

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

- Yth. Bapak Rektor beserta Wakil Rektor Universitas Negeri Malang,
Yth. Bapak Ketua, Bapak Sekretaris, dan para Anggota Senat Akademik Universitas Negeri Malang,
Yth. Bapak/Ibu Dekan, Direktur Pascasarjana, dan Ketua Lembaga di Lingkungan Universitas Negeri Malang,
Yth. Bapak/Ibu Pejabat Struktural di Lingkungan Universitas Negeri Malang,
Yth. Bapak/Ibu para Guru Besar di lingkungan Universitas Negeri Malang,
Yth. Ketua Jurusan dan rekan sejawat (dosen dan tendik) Jurusan Biologi, Universitas Negeri Malang,
Yth. Para hadirin dan undangan yang bahagia Para undangan dan hadirin yang saya muliakan

Alhamdulillahirabbil'alamiin, marilah kita senantiasa memanjatkan puji syukur ke hadirat Allah SWT, karena atas limpahan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya kita sekalian dapat berkumpul dalam keadaan sehat wal'afiat. Shalawat dan salam semoga senantiasa selalu terlimpahkan kepada junjungan kita Rasulullah Muhammad SAW, beserta keluarganya, para sahabatnya, dan para pengikutnya hingga akhir zaman.

Pada hari ini perkenankan saya menyampaikan pidato pengukuhan Professor di Bidang Ilmu Biologi dengan Judul **“Potensi Kekayaan Hayati Indonesia Sebagai Alternatif Terapi Diabetes Mellitus dalam Sudut Pandang Biologi Reproduksi”**.

Para undangan dan hadirin yang saya muliakan,

Kita sering mendengar mengenai slogan empat sehat lima sempurna untuk mensosialisasikan tentang pola makan sehat. Slogan ini sudah sejak lama menjadi pedoman masyarakat Indonesia untuk menerapkan pola makan sehat. Saat ini, konsep makanan empat sehat lima sempurna sudah disempurnakan menjadi Pedoman Gizi Seimbang (PGS).

Perubahan ini didasari karena konsep makanan empat sehat lima sempurna tidak sesuai lagi dengan perkembangan ilmu dan permasalahan gizi saat ini. Bila kita melihat sejarah, anjuran empat sehat lima sempurna merupakan kampanye pola makan sehat yang dilakukan pemerintah sejak tahun 1955. Pola empat sehat lima sempurna dilakukan guna membuat masyarakat memahami pola makan yang benar.

Prinsip empat sehat lima sempurna ini diperkenalkan oleh Bapak Gizi Indonesia, Prof. Poerwo Soedarmo. Prinsip ini mengacu pada prinsip *Basic Four* Amerika Serikat yang mulai diperkenalkan pada era 1940an.

Makanan empat sehat lima sempurna meliputi menu makanan yang terdiri dari makanan pokok, lauk pauk, sayur dan buah-buahan, serta susu sebagai penyempurna menu tersebut.

Prinsip empat sehat lima sempurna menekankan pada pentingnya empat golongan makanan berupa:

1. Karbohidrat dan lemak sebagai penghasil tenaga yang terkandung pada makanan pokok.
2. Protein sebagai sumber pembangun yang terkandung pada lauk pauk.
3. Vitamin dan mineral untuk memelihara yang terkandung pada sayuran dan buah.

4. Pelengkap keseluruhan gizi yang terkandung pada susu.

Para undangan dan hadirin yang saya hormati,

Bagaimanapun, prinsip makanan empat sehat lima sempurna telah berhasil menanamkan pengertian tentang pentingnya gizi dan kemudian mengubah perilaku konsumsi masyarakat Indonesia. Sebagaimana yang dijelaskan sebelumnya, saat ini prinsip makanan empat sehat lima sempurna sudah diganti dengan Pedoman Gizi Seimbang.

Pedoman Gizi Seimbang didasarkan pada **Prinsip Nutrition Guide for Balanced Diet** yang merupakan hasil kesepakatan konferensi pangan sedunia di Roma Tahun 1992. Prinsip ini diyakini akan mampu mengatasi beban ganda masalah gizi, baik kekurangan maupun kelebihan gizi.

Menurut Pedoman Gizi Seimbang yang dirilis oleh Kementerian Kesehatan RI pada 2014 silam, Pedoman Gizi Seimbang bertujuan untuk menyediakan pedoman makan dan berperilaku sehat bagi seluruh lapisan masyarakat. Pedoman ini berdasarkan 4 prinsip yaitu:

1. Mengonsumsi beragam makanan
Nasi merupakan sumber utama kalori, tetapi miskin vitamin dan mineral. Sayuran dan buah-buahan kaya akan vitamin, mineral dan serat, tetapi miskin kalori dan protein. Ikan merupakan sumber utama protein, tetapi sedikit kalori. Kombinasi dari asupan-asupan tersebut sangat penting untuk memenuhi kebutuhan gizi agar dapat terhindar dari penyakit.
2. Membiasakan perilaku hidup bersih
Perilaku hidup bersih, terutama anak-anak sangat penting untuk dilakukan agar terhindar dari kuman, virus atau bakteri, yang dapat mencetuskan suatu penyakit. Penyakit infeksi merupakan salah satu faktor yang dapat memengaruhi status gizi seseorang. Seseorang yang menderita penyakit infeksi akan mengalami penurunan nafsu makan, sehingga jumlah dan jenis zat gizi yang masuk ke tubuh berkurang.
3. Melakukan aktivitas fisik
Aktivitas fisik yang meliputi segala macam kegiatan tubuh termasuk olahraga merupakan salah satu upaya untuk menyeimbangkan antara pengeluaran dan pemasukan zat gizi. Selain itu, aktivitas sehat ini juga dapat memperlancar sistem metabolisme di dalam tubuh, termasuk metabolisme zat gizi.
4. Mempertahankan dan memantau berat badan
Berat badan ideal merupakan indikator telah tercapai keseimbangan zat gizi di dalam tubuh bagi orang dewasa. Indikator tersebut dapat diketahui dengan menghitung Indeks Masa Tubuh (IMT).

Para undangan dan hadirin yang saya muliakan,

Terdapat perbedaan yang mendasar antara Pedoman Gizi Seimbang dengan empat sehat lima sempurna menurut Kementerian Kesehatan RI. Perbedaan tersebut disampaikan oleh Direktur Gizi Masyarakat Kemenkes RI, yakni, Ir Doddy Izwardy, MA diantaranya.

1. Penekanan Pesan
Konsep empat sehat lima sempurna menekankan pada konsum-si nasi, lauk pauk, sayur, buah dan susu sebagai bahan pangan yang menyempurnakan. Sementara, konsep Gizi Seimbang dimaknai se-bagai susunan makanan sehari-hari yang mengandung zat-zat gizi dalam jenis dan jumlah yang sesuai dengan kebutuhan tubuh. Selain itu, PGS memperhatikan empat prinsip, yaitu: 1) Membiasakan makan makanan yang beraneka ragam, 2) Menjaga pola hidup bersih, 3) Pentingnya pola hidup aktif dan olah raga, dan 4) Memantau berat badan.
2. Susu Bukan Penyempurna
Di dalam konsep empat sehat lima sempurna, susu menjadi konsumsi yang dikelompokkan tersendiri dan dianggap sebagai penyempurna. Sedangkan di dalam konsep PGS, susu termasuk ke dalam kelompok lauk-pauk dan bukan makanan penyempurna. Susu dapat digantikan dengan jenis makanan lainnya yang sama nilai gizinya. Kandungan gizi dalam susu adalah protein dan beragam mineral (Kalsium, Fosfor, Zat Besi). Sementara dalam

PGS, jika sudah cukup dan beragam konsumsi sumber protein seperti telur dan daging, daging dan ikan, tidak mengonsumsi susu juga tidak apa-apa.

3. Penjelasan Mengenai Porsi

Dalam konsep empat sehat lima sempurna tidak menyertakan informasi jumlah yang harus dikonsumsi dalam sehari. Sedangkan konsep PGS juga memasukkan penjelasan tentang kuantitas atau jumlah (por-si) yang harus dimakan setiap hari untuk setiap kelompok makanan. Seperti diketahui, setiap hari tubuh membutuhkan asupan protein nabati 2-3 porsi, protein hewani 2-3 porsi, makanan pokok 3-8 porsi, sayuran 3-5 porsi, buah 3-5 porsi dan minum air mineral minimal 8 gelas. Dalam PGS jika pola makan tinggi karbohidrat, tinggi lemak, sedikit protein, sedikit sayur dan buah, maka pola tersebut tidak bisa dikatakan sehat. Berbeda pada empat sehat lima sempurna, pola makan tersebut dihitung sehat meski protein, sayur dan buah porsinya sedikit.


4. Pentingnya Minum Air Mineral

Konsep empat sehat lima sempurna tidak menggambarkan bahwa tubuh perlu minum air mineral secara cukup, aman, dan bersih. Sementara konsep PGS sudah menjelaskan pentingnya mencukupi kebutuhan minum air mineral minimal dua liter, atau lebih kurang delapan gelas per hari (Sendari, 2019). Dalam PGS, pengganti makanan empat sehat lima sempurna juga terdapat panduan konsumsi sehari-hari yang disebut Tumpeng Gizi Seimbang, diantaranya:

- Membatasi asupan gula (4 sendok makan), garam (1 sendok teh), dan minyak (5 sendok makan).
- Mengonsumsi sumber protein seperti ikan, daging, ayam, telur, makanan laut, kacang-kacangan sebanyak 2-4 porsi.
- Minum air putih 8 gelas.
- Makan sayuran 3-4 porsi.
- Mengonsumsi buah-buahan 2-3 porsi.
- Mengonsumsi karbohidrat 3-4 porsi.
- Rutin berolahraga dan bergerak.
- Memantau berat badan.
- Menjaga kebersihan (Adrian, 2017).

Para undangan dan hadirin yang saya hormati,

Dalam sudut pandang agama Islam, Allah memerintahkan kita untuk memakan makanan yang bukan cuma halal, tapi juga baik (**Halalan Thoyyiban**) agar tidak membahayakan tubuh kita. Bahkan perintah ini disejajarkan dengan bertaqwa kepada Allah, sebagai sebuah perintah yang sangat tegas dan jelas. Perintah ini juga ditegaskan dalam ayat yang lain, seperti yang terdapat pada Surat Al Maidah: 88.

 **وَكُلُوا مِمَّا رَزَقَكُمُ اللَّهُ حَلَالًا طَيِّبًا وَاتَّقُوا اللَّهَ الَّذِي أَنْتُمْ بِهِ مُؤْمِنُونَ**

“Dan makanlah makanan yang halal lagi baik dari apa yang Allah telah rezezikkan kepadamu, dan bertakwalah kepada Allah yang kamu beriman kepada-Nya” (Q.S. Al-Maidah 5:88)

Pertama yang harus kita ketahui, halal itu bukan sekedar halal makanannya, tapi juga dari sumber bagaimana mendapatkannya pun harus halal. Kalau sumbernya haram seperti korupsi, mencuri, merampok, menggusur tanah rakyat dengan harga yang rendah, maka makanan yang dimakan pun meski sebetulnya halal, tetap haram. Dan akan membuat si pemakannya disiksa di api neraka. Nabi Muhammad SAW bersabda:

Tiap tubuh yang tumbuh dari (makanan) yang haram maka api neraka lebih utama membakarnya. (HR. Ath-Thabrani)

Rasulullah SAW juga menegaskan: *“Ketahuilah bahwa suapan haram jika masuk ke dalam perut salah satu kalian maka amalannya tidak diterima selama 40 hari”* (HR At-Thabrani)

Seorang muslim hendaknya sangat memperhatikan apa yang dia konsumsi, baik untuk dirinya sendiri maupun untuk keluarganya. Makanan halal dapat mempengaruhi akhlak seseorang. Makanan halal berpengaruh terhadap aspek akhlak yang berkaitan dengan 1) diterima atau tidaknya suatu amalan, 2) dikabulkan atau tidaknya suatu doa, 3) Amal ibadahnya seperti haji, sedekah, shalat dapat tertolak. Namun, yang terpenting adalah makanan halal sangat berpengaruh terhadap keimanan seseorang, karena keimanan seseorang dapat terkikis oleh makanan haram (termasuk bagaimana cara seseorang mendapatkannya) dan makanan haram dapat mengeraskan hati, sebagaimana makanan halal dapat melunakkan hati (Wisnuwardhana, 2018).

Para undangan dan hadirin yang saya muliakan,

Dewasa ini, penyakit yang timbul akibat pola hidup tak sehat terus meningkat selama beberapa dekade terakhir. Pola makan yang berubah “kebarat-baratan” akibat perubahan tingkat ekonomi merepresentasikan masalah kesehatan yang serius di negara barat dan di negara berkembang (Popkins, 2004). Masalah kesehatan yang muncul tersebut seringkali diter-minologikan sebagai sindrom metabolik. Sindrom metabolik diperkirakan menyerang sekitar 25% populasi manusia di dunia (Prasad dkk., 2012). Seseorang dapat dikatakan menderita sindrom metabolik jika setidaknya terdapat kombinasi faktor risiko kardiovaskular, yakni obesitas, dislipidemia, hipertensi, dan hiperglikemia atau diabetes mellitus tipe 2. dapat meningkatkan faktor resiko terhadap kardiovaskular dan diabetes mellitus (DM), sehingga meningkatkan mortalitas dan morbiditas secara signifikan (Alberti dkk., 2009; Alshehri, 2010).

Beberapa faktor risiko utama penyebab sindrom metabolik diantaranya diet tinggi lemak, pola hidup rendah aktivitas, kelebihan berat badan/ obesitas (Stone & Saxon, 2005). Secara tidak sadar, masyarakat zaman sekarang cenderung memilih makanan cepat saji sebagai makanan utama dan kurang beraktivitas. Contoh yang paling mudah di lingkungan kampus saja, baik dosen maupun mahasiswa lebih banyak menghabiskan waktu duduk di depan laptop saja. Bila aktivitas tersebut tidak diimbangi dengan olahraga, maka dalam jangka panjang dapat memicu timbulnya sindrom metabolik.

Pengobatan sindrom metabolik yang paling umum dilakukan adalah dengan cara mengubah pola hidup dan diikuti dengan terapi obat-obatan untuk mengurangi faktor penyebab timbulnya sindrom metabolik (Prasad dkk, 2012). Dalam ajaran Islam, kita dianjurkan untuk makan dan minum cukup. Hal ini tentu mengandung maksud supaya kita terhindar dari penyakit akibat makanan yang berlebihan seperti yang dipaparkan sebelumnya. Allah SWT berfirman dalam Al-Qur’an surat Al-A’Raaf:31

﴿يٰۤاٰدَمُ خُذْ وَاٰزِيۡنَكَرۡ عِنۡدَ كُلِّ مَسۡجِدٍ وَكُلُوۡا وَاَشۡرَبُوۡا وَلَا تُسۡرِفُوۡا اِنَّهٗ لَا يُحِبُّ الْمُسۡرِفِيۡنَ ﴿۳۱﴾

“Hai anak Adam, pakailah pakaianmu yang indah di setiap (memasuki) mesjid, makan dan minumlah, dan janganlah berlebih-lebihan. Sesungguhnya Allah tidak menyukai orang-orang yang berlebih-lebihan.”

Lebih lanjut lagi, Nabi Muhammad SAW bersabda dalam salah satu hadits-nya mengenai takaran dalam makan dan minum. Alangkah lebih baik bila selain menggunakan pedoman gizi seimbang, kita juga menerapkan anjuran Rasulullah SAW sebagai berikut.

ما ملأ آدميٌّ وعاءً شراً من بطن، بحسب ابن آدم أكلات يُقمن صلبه، فإن كان لا محالة، فثلث لطعامه. وثلث لشرابه، وثلث لنفسه

“Tidaklah anak Adam memenuhi wadah yang lebih buruk dari perut. Cukuplah bagi anak Adam memakan beberapa suapan untuk menegakkan punggungnya. Namun jika ia harus (melebihkannya), hendaknya sepertiga perutnya (diisi) untuk makanan, sepertiga untuk minuman dan sepertiga lagi untuk bernafas” (HR. Tirmizi, Ibnu Majah, Ahmad).

Para undangan dan hadirin yang saya hormati,

Ketika berbicara mengenai sindrom metabolik, salah satu faktor resikonya adalah *Diabetes Mellitus* (DM). DM disebut juga sebagai *the silent killer* karena penyakit ini dapat menyerang semua organ tubuh dan menimbulkan berbagai macam keluhan. Penyakit yang akan ditimbulkan antara lain gangguan penglihatan mata, katarak, penyakit jantung, sakit ginjal, impotensi seksual, luka sulit sembuh dan membusuk/gangren, infeksi paru, gangguan pembuluh darah, stroke dan sebagainya. Penderita DM yang sudah parah tidak jarang menjalani amputasi anggota tubuh karena terjadi pembusukan hingga terjadi kematian (Fatimah, 2015).

DM saat ini telah menjadi ancaman serius kesehatan global. Dikutip dari data WHO 2016, 70% dari total kematian di dunia dan lebih dari setengah beban penyakit. 90-95% dari kasus Diabetes adalah Diabetes Tipe 2 yang sebagian besar dapat dicegah karena disebabkan oleh gaya hidup yang tidak sehat. Indonesia juga menghadapi situasi ancaman diabetes serupa dengan dunia.

International Diabetes Federation (IDF) Atlas 2017 melaporkan bahwa epidemi Diabetes di Indonesia masih menunjukkan kecenderungan meningkat. Indonesia adalah negara peringkat keenam di dunia setelah Tiongkok, India, Amerika Serikat, Brazil dan Meksiko dengan jumlah penyandang Diabetes usia 20-79 tahun sekitar 10,3 juta orang.

Sejalan dengan hal tersebut, Riset Kesehatan Dasar (Riskesmas) memperlihatkan peningkatan angka prevalensi Diabetes yang cukup signifikan, yaitu dari 6,9% di tahun 2013 menjadi 8,5% di tahun 2018; sehingga estimasi jumlah penderita di Indonesia mencapai lebih dari 16 juta orang yang kemudian berisiko terkena penyakit lain, seperti: serangan jantung, stroke, kebutaan gagal ginjal bahkan dapat menyebabkan kelumpuhan dan kematian.

Para undangan dan hadirin yang saya hormati,

Upaya pengendalian dan pencegahan diabetes terus digalakkan oleh pemerintah Indonesia. Pencegahan dan pengendalian diabetes jelas membutuhkan perhatian semua orang dan juga kebijakan nasional dengan pendekatan revolusioner. Penyelesaian masalah diabetes terkait dengan perubahan perilaku dan membangun sinergi positif antar masyarakat untuk menumbuhkan iklim yang kondusif pada aspek pencegahan dan perubahan perilaku pada tingkat individu, keluarga dan masyarakat serta institusi seperti tempat kerja.

Menurut Menteri Kesehatan RI, upaya efektif untuk mencegah dan mengendalikan diabetes harus difokuskan pada faktor-faktor risiko disertai dengan pemantauan yang teratur dan berkelanjutan dari perkembangannya karena faktor risiko umum Penyakit Tidak Menular (PTM) di Indonesia relatif masih tinggi, yaitu 33,5% tidak melakukan aktivitas fisik, 95% tidak mengonsumsi buah dan sayuran, dan 33,8% populasi usia di atas 15 tahun merupakan perokok berat. Perubahan gaya hidup merupakan intervensi awal untuk komunitas berisiko

Tiga hal utama perlu dilakukan yakni (1) perubahan perilaku yang terkait makanan sehat dan berimbang, aktivitas fisik, menghindari diri dari rokok dan alkohol; (2) melakukan pemeriksaan kesehatan secara berkala; dan (3) perbaikan tatalaksana penanganan penderita dengan memperkuat pelayanan kesehatan primer, akan menjadi prioritas dalam beberapa tahun ke depan.

Pemerintah Indonesia juga menekankan pentingnya *food labelling* untuk peringatan kepada masyarakat mengenai makanan dan minuman yang tidak sehat (terlalu banyak mengandung gula, garam dan lemak). Saat ini, Indonesia telah mengeluarkan peraturan untuk industri makanan/minuman kemasan dan siap saji untuk mencantumkan kandungan gula, garam dan lemak dalam makanan olahan. Penting juga untuk memastikan ketersediaan lebih banyak pilihan dalam makanan sehat dan minuman di pasar untuk mendukung orang-orang mengalihkan konsumsi mereka dari pengolahan makanan dan minuman ringan ke makanan rumah tangga dan minuman sehat.

Inovasi dalam pencegahan dan pengendalian serta pengobatan diabetes juga dinilai sangat penting untuk dilakukan, diantaranya pentingnya *diabetes registry*, penggunaan aplikasi

pada telepon seluler untuk pencegah-an risiko dan kontrol, peringatan otomatis secara reguler untuk olah raga pada area publik (bandara, stasiun, pasar, super market). Inovasi juga perlu dilakukan pada aspek pembiayaan antara lain yang dikembangkan Spanyol dan Italia dalam model pelayanan kesehatan dan integrasi pelayanan kesehatan PTM oleh Belanda, Perancis, Jerman dan Inggris. Selain itu juga dibahas perlunya pengkajian lebih lanjut dalam rekayasa genetika untuk mengurangi penderita Diabetes Tipe 1. Menkes juga berupaya membangun kerja sama global, regional, dan peningkatan kapasitas masing-masing negara dengan pendekatan multisektor untuk pencegahan dan pengendalian Diabetes

Para undangan dan hadirin yang saya muliakan,

Pemerintah Indonesia telah membagi pencegahan DM dalam tiga tahap, yakni pencegahan primer, sekunder, dan tersier. Upaya pencegahan tersebut sangat penting untuk kita ketahui dan kita terapkan, diantaranya sebagai berikut:

1. Pencegahan Primer Terhadap Diabetes Melitus Tipe 2

Pencegahan primer adalah upaya yang ditujukan pada kelompok yang memiliki faktor risiko, yakni mereka yang belum terkena, tetapi berpo-tensi untuk mendapat DM dan kelompok intoleransi glukosa. Faktor Risiko Diabetes Melitus sama dengan faktor risiko untuk intoleransi glukosa yaitu:

A. Faktor Risiko yang Tidak Bisa Dimodifikasi

1. Ras dan etnik
2. Riwayat keluarga dengan DM
3. Umur: Risiko untuk menderita intoleransi glukosa meningkat seiring dengan meningkatnya usia. Usia >45 tahun harus dilakukan pemeriksaan DM.
4. Riwayat melahirkan bayi dengan BB lahir bayi >4000 gram atau riwayat pernah menderita DM gestasional (DMG).
5. Riwayat lahir dengan berat badan rendah, kurang dari 2,5 kg. Bayi yang lahir dengan BB rendah mempunyai risiko yang lebih tinggi dibanding dengan bayi yang lahir dengan BB nor-mal

B. Faktor Risiko yang Bisa Dimodifikasi

1. Berat badan lebih (IMT ≥ 23 kg/m²)
2. Kurangnya aktivitas fisik
3. Hipertensi (>140/90 mmHg)
4. Dislipidemia (HDL < 35 mg/dl dan/atau trigliserida >250 mg/dl)
5. Diet tak sehat (*unhealthy diet*). Diet dengan tinggi glukosa dan rendah serat akan meningkatkan risiko menderita prediabe-tes/intoleransi glukosa dan DMT2.

C. Faktor Lain yang Terkait dengan Risiko Diabetes Melitus

1. Penderita *Polycystic Ovary Syndrome* (PCOS) atau keadaan klinis lain yang terkait dengan resistensi insulin
2. Penderita sindrom metabolik yang memiliki riwayat toleransi glukosa terganggu (TGT) atau glukosa darah puasa tergang-gu (GDPT) sebelumnya.
3. Penderita yang memiliki riwayat penyakit kardiovaskular, seperti stroke, PJK, atau PAD (*Peripheral Arterial Diseases*)

Pencegahan primer DM dilakukan dengan tindakan penyuluhan dan pengelolaan yang ditujukan untuk kelompok masyarakat yang mem-punyai risiko tinggi dan intoleransi glukosa. Materi penyuluhan meliputi antara lain.

A. Program penurunan berat badan.

1. Diet sehat.
2. Jumlah asupan kalori ditujukan untuk mencapai berat badan ideal
3. Karbohidrat kompleks merupakan pilihan dan diberikan se-cara terbagi dan seimbang sehingga tidak menimbulkan pun-cak (peak) glukosa darah yang tinggi setelah makan.
4. Komposisi diet sehat mengandung sedikit lemak jenuh dan tinggi serat larut.

- B. Latihan jasmani.
1. Latihan jasmani yang dianjurkan dikerjakan sedikitnya selama 150 menit/minggu dengan latihan aerobik sedang (menca-pai 50-70% denyut jantung maksimal), atau 90 menit/ming-gu dengan latihan aerobik berat (mencapai denyut jantung >70% maksimal). Latihanjasmani dibagi menjadi 3-4 kali aktivitas/minggu.
- C. Menghentikan kebiasaan merokok.
- D. Pada kelompok dengan risiko tinggi diperlukan intervensi farmakologis.
2. Pencegahan Sekunder Terhadap Komplikasi Diabetes Melitus. Pencegahan sekunder adalah upaya mencegah atau menghambat tim-bulnya penyulit pada pasien yang telah terdiagnosis DM. Tindakan pencegahan sekunder dilakukan dengan pengendalian kadar glukosa sesuai target terapi serta pengendalian faktor risiko penyulit yang lain dengan pemberian pengobatan yang optimal. Melakukan deteksi dini adanya penyulit merupakan bagian dari pencegahan sekunder. Tinda-kan ini dilakukan sejak awal pengelolaan penyakit DM.
 3. Pencegahan Tersier.
Pencegahan tersier ditujukan pada kelompok penyandang diabetes yang telah mengalami penyulit dalam upaya mencegah terjadinya kecacatan lebih lanjut serta meningkatkan kualitas hidup. Upaya rehabilitasi pada pasien dilakukan sedini mungkin, sebelum kecacatan menetap. Pada upaya pencegahan tersier tetap dilakukan penyuluhan pada pasien dan keluarga. Materi penyuluhan termasuk upaya rehabili-tasi yang dapat dilakukan untuk men-capai kualitas hidup yang optimal. Pencegahan tersier memerlukan pelayanan kesehatan komprehensif dan terintegrasi antar disiplin yang terkait, terutama di rumah sakit rujukan. Kerjasama yang baik antara para ahli di berbagai disiplin (jantung, ginjal, mata, saraf, bedah ortopedi, bedah vaskular, radiologi, re-habilitasi medis, gizi, pediatri, dan lain-lain.) sangat diperlukan dalam menunjang keberhasilan pencegahan tersier.

Para undangan dan hadirin yang saya hormati,

Permasalahan utama yang mengiringi diabetes adalah komplikasi yang dapat menurunkan kualitas hidup penderita. Komplikasi lain yang tidak kalah penting selama perkembangan DM adalah gangguan fungsi seksual. Sejak abad ke-10, Avicenna telah menyatakan diabetes memiliki kaitan yang erat dengan gangguan seksual. Komplikasi yang turut menyertai diabetes turut berdampak pada organ reproduksi, sehingga Avicenna menyebutnya sebagai kolapsnya fungsi reproduksi (Amidu dkk., 2013). Pada abad ke-11, banyak penelitian yang dilakukan untuk mengungkap hubungan antara diabetes dengan fertilitas pria.

Kajian dalam bidang ini menjadi menarik, karena penderita diabetes terus mengalami peningkatan pada tiap tahun dan kebanyakan penderita masih berada pada usia muda/produktif (Lavizzo-Mourey, 2007; Harjutsa-lo dkk., 2008). Saat ini, diabetes diketahui banyak menyerang seseorang yang masih berada pada usia puncak reproduksi (Delfino dkk., 2007).

Sebuah pusat penelitian di Massachusetts melaporkan pria diabetes memiliki kemungkinan tiga kali lipat menderita gangguan ejakulasi dibandingkan pria non-diabetes. Survei epidemiologi menunjukkan sekitar 50-75% pria menderita ejakulasi dini (Melman dkk., 2016), libido rendah (Fa-bian dkk., 2016), dan pematangan sel kelamin yang buruk (Mulholland dkk., 2011).

Hiperglikemia yang berkepanjangan pada penderita diabetes menyebabkan terganggunya spermatogenesis (Mulholland dkk., 2011; Ghasemi dkk., 2015). Hasil survei lain menunjukkan sekitar 90% dari pasien DM pria memiliki gangguan fungsi seksual (Amaral dkk., 2008). Gejala lain dari gangguan seksual termasuk penurunan berat testis, jumlah, motilitas, abnormalitas dan viabilitas sperma (Hafez dkk., 2010).

Regulasi hormon seksual merupakan salah satu fungsi primer dari testis dan sistem endokrin reproduksi jantan yang berperan untuk memelihara fungsi reproduksi normal (Ayuob dkk., 2015). Testosteron merupakan androgen utama yang berperan penting dalam spermatogenesis.

Oligospermia dan azoospermia merupakan komplikasi sekunder pada individu diabetes yang berdampak serius pada fertilitas pasien diabetes (Hakim & Goldstein, 1996). Struktur spermatozoa pada penderita diabe-tes mengalami kerusakan seperti apoptosis, tidak berkembang

(immaturasi), malformasi akrosom, nukleus, mitokondria dan membran plasma (Ghasemi dkk., 2015).

Sebanyak kurang lebih 15% pasangan di dunia terdampak infertilitas, dan 40-50% penderita tersebut terkait dengan menurunnya kualitas sper-ma dan rendahnya spermatogenesis (Shi dkk., 2017). Radikal bebas yang meningkat selama metabolisme di testis, menjadi salah satu faktor turunnya kualitas spermatozoa (Lanzafame dkk., 2009).

Para undangan dan hadirin yang saya hormati,

Bila kita bicara mengenai reproduksi, maka pasti tak lepas dari haki-kat penciptaan manusia. Dalam ayat lainnya, Allah SWT juga menjelaskan tentang proses penciptaan manusia secara runtut. Misalnya dalam QS. Al-Mu'minin : 12-14 :

(12) Dan Sesungguhnya kami Telah menciptakan manusia dari suatu saripati (berasal) dari tanah. (13) Kemudian kami jadikan saripati itu air mani (yang disim-pan) dalam tempat yang kokoh (rahim). (14) Kemudian air mani itu kami jadikan segumpal darah, lalu segumpal darah itu kami jadikan segumpal daging, dan segumpal daging itu kami jadikan tulang belulang, lalu tulang belulang itu kami bungkus dengan daging. Kemudian kami jadikan dia makhluk yang (berbentuk) lain. Maka Maha sucilah Allah, Pencipta yang paling baik."

Ada beberapa fase tentang penciptaan manusia sebagaimana ayat di atas. Beberapa diantaranya seperti, pertama, 'Sulalah min thin' (saripati tanah). Saripati tanah yang dimaksud adalah suatu zat yang berasal dari bahan makanan (baik tumbuhan maupun hewan) yang bersumber dari tanah, yang kemudian dicerna menjadi darah, kemudian diproses hingga akhirnya menjadi sperma. Fase ini disebut juga sebagai fase 'turab' (tanah). Sebagaimana terdapat dalam Quran Surat Al-Hajj : 5

"Hai manusia, jika kamu dalam keraguan tentang kebangkitan (dari kubur), Maka (ketahuilah) Sesungguhnya Kami telah menjadikan kamu dari tanah, kemudian dari setetes mani, kemudian dari segumpal darah, kemudian dari segumpal daging yang sempurna kejadiannya dan yang tidak sempurna, agar Kami jelaskan kepada kamu dan Kami tetapkan dalam rahim, apa yang Kami kehendaki sampai waktu yang sudah ditentukan, kemudian Kami keluarkan kamu sebagai bayi, kemudian (dengan berangsur- angsur) kamu sampailah kepada kedewasaan, dan di antara kamu ada yang diwafatkan dan (adapula) di antara kamu yang dipanjangkan umurnya sampai pikun, supaya Dia tidak mengetahui lagi sesuatupun yang dahulunya telah diketa-huinya. dan kamu Lihat bumi ini kering, kemudian apabila telah Kami turunkan air di atasnya, hiduplah bumi itu dan suburlah dan menumbuhkan berbagai macam tumbuh-tumbuhan yang indah".

Kedua, 'Nuthfah' (air mani). Makna asal kata 'nuthfah' dalam bahasa Arab berarti setetes yang dapat membasahi. Dalam tafsir Al Misbah, yang dimaksud dengan nuthfah adalah pancaran mani yang menyembur dari alat kelamin pria yang mengandung sekitar enam ratus juta benih manu-sia, tetapi hanya satu yang berhasil bertemu dengan satu sel telur wanita. Sebagaimana yang telah dipaparkan sebelumnya, penting bagi kita untuk memakan makanan yang halal dan thayyib. Beberapa sumber makanan dapat menunjang kualitas spermatozoa selama proses fertilisasi. Sumber makanan yang halal dan thayyib serta dapat menunjang fungsi reproduksi diharapkan mampu meningkatkan kualitas keturunan kita. Berikut rang-kuman dari sumber bahan makanan yang bermanfaat untuk menunjang kualitas spermatozoa (Tabel 1.)

Tabel 1. Sumber Makanan dan Manfaat Utamanya bagi Kualitas Sperma Pria

| NO. | SUMBER MAKANAN | MANFAAT UTAMA | REFERENSI |
|-----|-----------------------|--|--------------------------|
| 1 | Sayur dan buah-buahan | Menunjang motilitas sperma | Salas-Huetos, dkk., 2017 |
| 2 | Sereal | Menunjang motilitas sperma | Salas-Huetos, dkk., 2017 |
| 3 | laut lain | Menunjang jumlah sperma terhitung, konsentrasi, dan morfologi. | Salas-Huetos, dkk., 2017 |
| 4 | Hasil Peternakan | Menunjang konsentrasi sperma dan motilitas | Salas-Huetos, dkk., 2017 |

| NO. | SUMBER MAKANAN | MANFAAT UTAMA | REFERENSI |
|-----|-----------------|---|--|
| 5 | Kacang-kacangan | Menunjang jumlah sperma terhitung, vitalitas, jumlah sperma norma dan motilitas total dan progresif | Robin, dkk., 2012; Gofur & Lestari, 2016; Gofur dkk., 2018; Salas-Huetos, dkk., 2018 |

Para undangan dan hadirin yang saya muliakan,

Pada beberapa dekade terakhir, penggunaan tanaman tradisional berkhasiat obat untuk penelitian mengalami peningkatan yang signifikan (Sen dkk., 2011). Tanaman tradisional berkhasiat obat banyak digunakan oleh berbagai suku di dunia dan dikonsumsi secara oral untuk menyembuhkan penyakit tertentu dengan formula atau komposisi tradisional khas daerah masing-masing. Tanaman berkhasiat obat memiliki keunggulan be-rupa murah, mudah diperoleh, sebagian besar tidak beracun, memiliki efek samping yang rendah, dan memiliki kompatibilitas yang baik dengan flora pencernaan.

Badan kesehatan dunia (WHO) memperkirakan sekitar 80% dari populasi di dunia sekarang lebih memilih pengobatan secara herbal menggunakan tanaman berkhasiat obat untuk menjaga kesehatan. WHO telah mendata sekitar 21.000 tanaman yang telah digunakan sebagai obat-obatan di seluruh dunia, dan 2.500 spesies diantaranya berasal dari India. Indo-nesia sebagai salah satu negara dengan keanekaragaman hayati tertinggi di dunia memiliki potensi yang sangat besar untuk ikut menyumbang peneli-tian yang berkaitan dengan tanaman berkhasiat obat.

Salah satu kebiasaan masyarakat lokal seperti mengkonsumsi jamu dapat menambah khazanah pengetahuan dan menjadi tugas peneliti ke depan untuk melakukan proses saintifikasi demi mengangkat potensi ta-naman lokal berkhasiat obat di Indonesia baik untuk pencegahan maupun penyembuhan penyakit tertentu, utamanya dari segi reproduksi.

Para undangan dan hadirin yang saya muliakan,

Tanaman tradisional berkhasiat obat diketahui mengandung senyawa aktif yang dapat membantu memelihara tubuh dari penyakit. Selain itu, ta-naman tradisional maupun senyawa aktif tunggal memiliki korelasi positif dengan fungsi reproduksi. Dosis konsumsi merupakan isu penting yang perlu diperhatikan dalam mengkonsumsi tanaman tradisional. Dosis yang tepat diharapkan mampu menunjang fungsi reproduksi untuk menghasil-kan keturunan yang berkualitas.

Beberapa penelitian menunjukkan senyawa aktif tanaman dapat me-lindungi fungsi reproduksi jantan pada kondisi DM. Sebagaimana yang kita ketahui, DM erat kaitannya dengan infertilitas. Konsumsi tanaman tradisional berkhasiat obat diharapkan mampu meningkatkan kualitas hidup seseorang. Beberapa tanaman berkhasiat obat maupun senyawa aktif tunggal yang berperan meningkatkan kualitas sperma pada kondisi DM terangkum dalam Tabel 2.

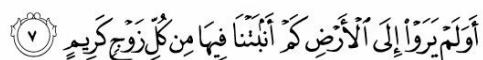
Tabel 2. Daftar tumbuhan dan senyawa aktif yang berkorelasi positif dengan fungsi reproduksi jantan

| NO. | TUMBUHAN/ SENYAWA AKTIF | DOSIS/ DURASI | EFEK PADA FUNGSI REPRODUKSI | REFERENSI |
|-----|-------------------------------|--|---|--------------------|
| 1. | Quercetin | 15 mg/kg/hari (intraperitoneal) selama 28 hari pada tikus DM | Meningkatkan sperma terhitung, motilitas, dan kadar testosteron secara signifikan. Membantu memperbaiki kerusakan sel testis pada kondisi DM. | Khaki dkk., 2010 |
| 2. | Curcumin | 100 mg/kg BB selama 8 minggu pada tikus DM | Melindungi sel testikular dari stress oksidatif pada kondisi DM. | Rashid & Sil, 2015 |

| NO. | TUMBUHAN/ SENYAWA AKTIF | DOSIS/ DURASI | EFEK PADA FUNGSI REPRODUKSI | REFERENSI |
|-----|---|--|--|--|
| 3. | Rutin | 200 dan 400 mg/ kg BW secara oral selama 28 hari pada tikus DM | Meningkatkan berat testis, jumlah dan viabilitas sperma, kadar LH, FSH, dan testosteron. | Al-Roujeaie |
| 4 | Minyak wijen | 5% atau 10% selama 56 hari pada tikus DM. | Memperbaiki motilitas sperma dan jumlah sel sperma hidup. Meningkatkan kadar hormon testosteron. | Zahra dkk., 2013 |
| 5 | Zingiber officinale (Zingiberaceae) | 100 mg/kg BB/ hari secara oral selama 4 minggu pada tikus DM | Meningkatkan jumlah sperma, motilitas dan total kapasitas antioksidan secara signifikan. | Shalaby & Hamowieh, 2019 |
| 6 | Madu | - | Memiliki efek protektif pada histologi seminiferus. | Anyakudo dkk., 2015 |
| 7 | Thymoquinone dan biji jinten hitam (Nigella sativa) | Thymoquinone: 4mg/kg selama 45 hari (intraperitoneal). Bubuk Nigella sativa: 300mg/ kg selama 45 hari secara oral pada mencit DM | Menormalkan kadar LH dan testosteron. | Aithal dkk., 2016 |
| 8 | Kayu manis (Cinnamon verum) | 250 atau 500 mg/kg selama 65 hari pada tikus DM | Meningkatkan jumlah dan motilitas spermatozoa secara signifikan. | Adeleye dkk., 2015 |
| 9 | Jeruk pahit (Citrus aurantium) | 100 and 200 mg/ kg/BB selama 56 hari pada tikus DM | Meningkatkan kadar FSH, LH, dan testosteron secara signifikan. | Komili dkk., 2015 |
| 10 | Air kelapa | - | Memperbaiki kualitas sperma | Putra dkk., 2012 |
| 11 | Minyak jinten hitam | - | Memperbaiki kualitas spermatozoa | Eliyaningsih dkk., 2014; Sulistyowati dkk., 2014 |
| 12 | Natto kedelai hitam | 200 mg/mL, 400 mg/mL, 800 mg/mL | Meningkatkan jumlah, motilitas, viabilitas, kadar testosteron, dan menurunkan sperma abnormal. | Gofur & Lestari, 2016 |
| 13 | Sirih merah (Piper crocatum) | Dosis 200 mg/ kg BB selama 30 hari pada mencit model rheumatoid arthritis | Meningkatkan kadar testosteron dan memperbaiki mikroanatomi tubulus seminiferus | Gofur & Lestari, 2018 |
| 14 | Susu kambing Ettawah | 0,25, 0,5, dan 0,75 mL selama 36 hari pada mencit | Meningkatkan jumlah dan motilitas sperma; Meningkatkan kadar testosteron | Sa'diyah, dkk., 2015; Gofur, 2018 |

| NO. | TUMBUHAN/ SENYAWA AKTIF | DOSIS/ DURASI | EFEK PADA FUNGSI REPRODUKSI | REFERENSI |
|-----|--|---|--|--------------------|
| 15 | Tempe kedelai hitam dan ubi jalar ungu | Rasio 1:1 | Meningkatkan jumlah, motilitas, viabilitas, kadar testosteron, dan menurunkan sperma abnormal. | Gofur dkk., 2018 |
| 16 | Bawang putih tunggal | 250 mg/ kg BB pada model hiperlipidemia | Menurunkan kadar Advanced Glycation Product (AGE) pada epididimis mencit model hiperlipidemia | Baroroh dkk., 2019 |
| 17 | Bawang putih tunggal | 250 mg/ kg BB pada model hiperlipidemia | Menurunkan kadar Receptor of Advanced Glycation End-Product (RAGE) pada epididimis mencit model hiperlipidemia | Miasih dkk., 2019 |

Dalam surat Asy-Syu'ara, Allah SWT berfirman:



“Dan apakah mereka tidak memperhatikan bumi, berapakah banyaknya Kami tumbuhkan di bumi itu pelbagai macam tumbuh-tumbuhan yang baik?”

Allah SWT telah menyediakan bagi kita berbagai macam tum-buh-tumbuhan yang baik, yang dapat kita manfaatkan tidak hanya sebagai makanan, namun juga untuk kesembuhan atau obat. Ringkasan pada Tabel 2. menunjukkan beberapa bahan yang dapat memperbaiki fungsi repro-duksi jantan. Tugas kita sekarang sebagai saintis adalah mengeksplorasi berbagai manfaat tanaman yang telah disediakan oleh Allah demi ke-maslahatan manusia. Indonesia sebagai negara dengan kekayaan hayati yang tinggi menyediakan sumber tanaman yang begitu besar untuk dapat dieksplorasi manfaatnya di berbagai bidang. Dengan menyinergikan antara ilmu pe-ngetahuan dengan agama, diharapkan kita tetap menjadi pribadi yang bijak dan tetap rendah hati.

Para undangan dan hadirin yang saya muliakan,

Grup penelitian kami selama beberapa tahun terakhir berfokus pada ta-naman-tanaman lokal untuk penanggulangan DM. Tanaman yang sudah tidak asing dikonsumsi bagi masyarakat Indonesia diharapkan dapat menjadi alternatif yang dapat dengan mudah diterima oleh masyarakat. Penelitian-penelitian yang sudah dan sedang kami lakukan fokus menggunakan ubi jalar ungu dan kedelai hitam. Khusus untuk kedelai hitam, kami mengembangkan dalam bentuk *natto*, yakni kedelai fermentasi tradisional Jepang (Gofur & Lestari, 2016). Hasil positif yang diperoleh membuat kami memiliki ide untuk mengembangkan kedelai fer-mentasi khas Indonesia, yakni tempe dengan bahan baku kedelai hitam.

Para undangan dan hadirin yang saya hormati,

Bahan baku yang kami teliti pertama adalah ubi jalar ungu. Ubi jalar ungu merupakan salah satu jenis ubi jalar yang banyak ditanam di Indone-sia. Ubi jalar ungu memiliki kandungan gizi yang kaya akan vitamin (B1, B2, C dan E), mineral (Ca, Mg, K dan Zn), serat makanan dan karbohidrat. Ubi jalar mengandung sumber karbohidrat yang efisien dibanding dengan tanaman sereal seperti padi. Ubi jalar mampu menghasilkan kalori 45% lebih tinggi dari padi.

Karbohidrat yang terdapat pada ubi jalar ungu termasuk karbohidrat kompleks dengan klasifikasi indeks glikemik yang rendah, yaitu 44 (Siagian, 2004). Suatu bahan makanan dikatakan memiliki indeks glikemik yang rendah jika nilai indeks glikemiknya kurang dari 55 (Jenkins, dkk., 1981). Tipe karbohidrat yang memiliki indeks glikemik rendah ini apabila dikonsumsi tidak akan menaikkan kadar gula darah secara drastis. Indeks glikemik yang rendah mendukung pemanfaatan tepung ubi jalar ungu sebagai alternatif sumber karbohidrat yang dapat dijadikan sebagai substitusi pada produk berbahan dasar terigu dan turunannya yang memiliki nilai tambah bagi kesehatan (Siagian, 2004).

Kandungan flavonoid terbanyak pada ubi jalar ungu adalah antosianin. Antosianin adalah senyawa antioksidan yang dapat menjadi *scavenger* radikal bebas (Montilla, dkk., 2011). Antosianin dari ubi jalar ungu sering dimanfaatkan sebagai pewarna alami karena kondisinya yang tetap stabil pada suhu tinggi (Cevallos-Casals & Cisneros-Zavallos, 2004). Aktivitas antioksidan ubi jalar ungu dilaporkan lebih tinggi dibandingkan kubis merah, kulit anggur, elderberry, dan jagung ungu bahkan lebih tinggi dibandingkan asam askorbat.

Dalam ubi jalar ungu juga terkandung dua komponen, yakni cyanidin 3-*O*-(2-*O*-(6-*O*-(*E*)-caffeoil- β -D-glucopyranocyl)- β -glucopyranoide)-5-*O*- β -D-glucopyranoside dan peonidin 3-*O*-(2-*O*-(6-*O*-(*E*)-caffeoil- β -D-glucopyranocyl)- β -glucopyranoide)-5-*O*- β -D-glucopyranoside yang menunjukkan aktivitas melindungi *low density lipoprotein* (LDL) dari oksidasi (Kano, dkk., 2005).

Para undangan dan hadirin yang saya muliakan,

Bahan baku berikutnya adalah kedelai hitam. Kedelai hitam merupakan salah satu varietas kedelai yang berwarna hitam dan telah digunakan secara luas sebagai makanan tambahan. Warna hitam tersebut disebabkan adanya kandungan antosianin yang memiliki beberapa manfaat tera-pi. Kedelai hitam kaya kandungan serat dan menyediakan delapan macam asam amino esensial bagi manusia yang bermanfaat meningkatkan fungsi pencernaan dan mengurangi rasa tidak nyaman akibat gas dalam saluran pencernaan.

Kedelai hitam merupakan sumber makanan kaya serat dan terbukti dapat menurunkan tingkat kolesterol jahat dalam darah. Kandungan serat yang tinggi pada kedelai hitam ini juga bermanfaat menjaga tekanan darah stabil, tidak meningkat secara tiba-tiba setelah makan, sehingga tak berlebihan jika kedelai hitam menjadi bahan konsumsi bagi mereka yang mengidap diabetes, penderita resistensi insulin atau hipoglikemia.

Kedelai hitam mengandung Antosianin yang berfungsi sebagai antioksidan yang aktivitasnya lebih tinggi dibanding vitamin E dan C. Antosianin juga mampu menghambat oksidasi LDL (*low density lipoprotein*) kolesterol dalam darah dan mampu menurunkan produksi *thiobarbituric acid reactive substance* (hasil oksidasi asam lemak) sebesar 37,10 nmol MDA/g protein LDL (Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, 2008). Kedelai hitam merupakan kedelai lokal yang belum dikenal luas dan belum dikembangkan di Indonesia.

Para undangan dan hadirin yang saya hormati,

Tempe adalah makanan asli Indonesia, yang merupakan salah satu makanan Nasional. Tempe merupakan makanan tradisional yang telah lama dikenal di Indonesia. Di dalam SNI No. 01-3144-1992 tempe didefinisikan sebagai produk makanan hasil fermentasi biji kedelai oleh kapang tertentu, berbentuk padatan kompak dan berbau khas serta berwarna putih atau sedikit keabu-abuan. Tempe dibuat dengan cara fermentasi atau peragian dengan menggunakan bantuan kapang golongan Rhizopus. Pembuatan tempe membutuhkan bahan baku kedelai. Melalui proses fermentasi, komponen-komponen nutrisi yang kompleks pada kedelai dicerna oleh kapang dengan reaksi enzimatik dan dihasilkan senyawa-senyawa yang lebih sederhana (Cahyadi, 2007).

Indonesia merupakan negara produsen tempe terbesar di dunia dan menjadi pasar kedelai terbesar di Asia. Sebanyak 50% dari konsumsi kedelai Indonesia dilakukan dalam bentuk tempe, 40% tahu, dan 10% dalam bentuk produk lain (seperti tauco, kecap, dan lain-lain). Konsumsi tempe rata-rata per orang per tahun di Indonesia saat ini diduga sekitar 6,45 kg.

Selama proses fermentasi tempe, terdapat tendensi adanya peningkatan derajat tidak-jenuhan terhadap lemak. Dengan demikian, asam lemak tidak jenuh majemuk (*polyunsaturated fatty acids* = PUFA) mening-kat jumlahnya. Dalam proses itu asam palmitat dan asam linoleat sedikit mengalamipenurunan, sedangkan kenaikan terjadi pada asam lemak oleat dan linolenat (asam linolenat tidak terdapat pada kedelai).

Kandungan protein tempe bisa dikatakan sama dengan daging. Tempe mengandung kesembilan asam amino esensial dalam jumlah cukup, kecua-li metionin yang sedikit berada di bawah pola acuan patokan FAO/WHO, yaitu 78 % (Almatsier, 2009). Kandungan lemak tempe jauh lebih rendah daripada daging. Ini dapat dimanfaatkan oleh mereka yang kegemukan atau untuk menurunkan dan mempertahankan kadar kolesterol darah.

Kalsium, yang diperlukan untuk pembentukan tulang dan mencegah kerapuhan tulang, lebih banyak ditemukan di dalam tempe daripada daging. Di samping itu, ketersediaan kalsium yang dapat diserap meningkat karena proses fermentasi. Kandungan zat besi tempe juga lebih tinggi daripada daging.

Seperti halnya kalsium, ketersediaan zat besi tempe juga lebih baik dari kedelai. Tempe juga mengandung mineral-mineral lain dengan ketersediaan yang baik seperti seng (Zn) dan tembaga (Cu). Kedua mineral ini merupakan bagian dari enzim-enzim yang berperan dalam berbagai as-pek metabolisme, fungsi kekebalan, pembentukan sel darah merah, dan sebagai antioksidan.

Tempe merupakan salah satu makanan tradisional Indonesia yang dibuat dengan cara fermentasi menggunakan jamur *Rhizopus oligosporus* maupun *Rhizopus oryzae*. Tempe yang dikonsumsi masyarakat berbahan baku dari kedelai kuning. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa kedelai hitam memiliki kandungan antioksidan lebih tinggi dari kedelai dengan varietas kuning, oleh karena itu kedelai hitam sangat baik jika digunakan sebagai bahan baku tempe. Tempe mengandung protein yang relatif tinggi. Protein yang terkandung pada tempe men-capai 40% dari masa kering. Tempe dapat digunakan sebagai pengganti daging pada orang vegetarian.

Kedelai hitam yang diolah menjadi tempe tidak mengurangi kandungan antioksidan didalamnya, menurut penelitian yang dilakukan oleh Nakajima dkk., (2005) kandugan antioksidan pada tempe lebih tinggi dan lebih banyak jenisnya. Hal tersebut dikarenakan aktivitas oganisme pada saat fermentasi tempe. Beberapa jenis antioksidan turunan isoflavon yang ditemukan dalam tempe adalah 3-hydroxyanthranilic (HAA) (Esaki dkk., 1996), 6-hydroxydaidzein (6- OHD), asam 2,3-Dihydroxybenzoic (2,3-DHBA), 8-hydroxydaidzein (8-OHD), dan 8-hydroxygenistein (8-OHG) (Cheng dkk., 2011).

Proses fermentasi pada tempe menyebabkan beberapa keunggulan dibandingkan kedelai, misalnya adalah zat gizi, daya cerna protein, kandungan asam amino esensial yang lebih tinggi dan zat anti gizi rendah (Nurrahman, 2005; Mutaslimah dkk., 2017). Enzim yang dihasilkan oleh kapang selama proses fermentasi tempe akan mengubah lemak, protein dan zat gizi lainnya menjadi molekul yang lebih sederhana, sehingga dapat dengan mudah dicerna dan diserap oleh tubuh (Astawan, 2004)

Para undangan dan hadirin yang saya muliakan,

Penelitian yang telah dan sedang kami lakukan bertujuan untuk men-cari alternatif makanan sehat bagi penderita DM. Penderita DM seringkali tidak bisa menghindari kebiasaan untuk makan (hiperfagia). Berdasarkan fakta tersebut, kami berusaha mengembangkan snack sehat dengan bahan dasar ubi jalar ungu dengan kedelai maupun tempe kedelai hitam. Berikut merupakan ringkasan hasil penelitian yang telah dikerjakan.

Tabel 3. Penelitian mengenai manfaat ubi jalar ungu, kedelai hitam, tempe kedelai hitam, dan kombinasi keduanya pada tikusnya model DM

| No | Bahan | Manfaat | Referensi |
|----|----------------------------------|--|----------------------------------|
| 1 | Kedelai hitam dan ubi jalar ungu | Menurunkan kadar ROS dan nekrosis sel β pankreas pada tikus model DM | memperbaiki Ningtiyas dkk., 2017 |

| No | Bahan | Manfaat | Referensi |
|----|--|---|---|
| 2 | Kedelai hitam dan ubi jalar ungu | Menurunkan kadar malondialdehid pada serum dan hepar tikus model DM | Setyowati dkk., 2017; Suhartini, dkk 2017 |
| 3 | Kedelai hitam dan ubi jalar ungu | Meningkatkan jumlah, motilitas, viabilitas, kadar testosteron, dan menurunkan sperma abnormal | Gofur dkk., 2018 |
| 4 | Tempe kedelai hitam dan ubi jalar ungu | Menurunkan kadar serum Advanced Glycation End- Product (AGE) pada tikus model DMT2 | Anam dkk., 2018 |
| 5 | Tempe kedelai hitam dan ubi jalar ungu | Menurunkan kadar ROS dan malondialdehid pada hepar tikus model DM | Putri dkk., 2018 |
| 6 | Tempe kedelai hitam dan ubi jalar ungu | Keterserapan yang tinggi senyawa antosianin pada ubi jalar ungu dan isoflavon pada tempe kedelai hitam pada serum, urin, dan feses tikus model DMT2 | Billah, dkk., 2018 |
| 7 | Tempe kedelai hitam | Menurunkan kadar interleukin-6 tikus model DM | Farid dkk., 2019 |
| 8 | Ubi jalar ungu | Menurunkan kadar malondialdehid tikus model DM | Probowati dkk., 2019 |
| 9 | Ubi jalar ungu | Meningkatkan kapasitas fagositosis makrofag pada tikus model DMT2 | Putri dkk., 2019 |
| 10 | Tempe kedelai hitam dan ubi jalar ungu | Menurunkan Kolesterol Total, Trigliserida, Dan LDL, Dan Meningkatkan HDL Tikus Model DM | Mawarti dkk., 2019 |
| 11 | Tempe kedelai hitam | Memperbaiki hematologi tikus model DM | Fidiya dkk., 2019 |
| 12 | Tempe kedelai hitam dan ubi jalar ungu | Menurunkan Serum Glutamic Oxaloacetic Transaminase (SGOT) tikus model DM | Pratiwi dkk., 2019 |
| 14 | Kedelai hitam dan ubi jalar ungu | Memperbaiki kerusakan sel β pankreas, meningkatkan kadar SOD, menurunkan kadar malondialdehid, dan memperbaiki sensitivitas insulin pada tikus model DM | Gofur dkk., 2019a |
| 15 | Kedelai hitam dan ubi jalar ungu | Menurunkan ekspresi Advanced Glycation End- Product (AGE) dan memperbaiki kerusakan ginjal tikus model DM | Gofur dkk., 2019b |

Hasil penelitian menunjukkan bahan lokal seperti ubi jalar ungu, kedelai hitam, tempe kedelai hitam, dan kombinasi antara ubi jalar ungu dengan kedelai hitam atau tempe memiliki efek yang positif terhadap tikus model DM. Tentunya apa yang sedang kami upayakan masih merupakan hal dasar yang masih jauh dari terapan. Harapan kami adalah masih dapat dilakukan penelitian berkelanjutan yang melibatkan instansi lain agar dapat diperoleh suatu produk yang bermanfaat bagi banyak orang, terutama penderita DM.

Para undangan dan hadirin yang saya muliakan,

Penutup

Diabetes mellitus tipe 2 merupakan jenis diabetes yang paling sering ditemukan. Diabetes mellitus tipe 2 umumnya timbul pada usia di atas 40 tahun. Saat ini, terjadi pergeseran usia penderita diabetes mellitus tipe 2, yakni hampir 90-95% masih berada di usia produktif. Komplikasi yang terkait dengan diabetes mellitus tipe 2 dapat menurunkan kualitas hidup penderita dan memerlukan biaya perawatan yang besar, karena komplikasi yang terkait terus berkembang secara progresif bila tidak segera ditangani. Penggunaan obat tradisional, mengatur

pola makan dan asupan yang masuk, serta olahraga merupakan upaya-upaya yang dianjurkan se-bagai bentuk pencegahan diabetes mellitus. Kekayaan hayati dan kearifan lokal berupa tanaman berkhasiat obat dapat digunakan sebagai suplemen pencegahan maupun pengobatan untuk memperbaiki fungsi reproduksi penderita diabetes mellitus tipe 2.

DAFTAR RUJUKAN

- Adeleye, O., O. Akinlabi, A. Adetomiwa, A. Adeleye. 2015. Enhanced spermio-gram in cinnamon verum treated male alloxan-induced diabetic wistar albi-no rats. *Proc. Physiological Soc.* 1–3 The Physiolog Soc.
- Adrian, K. 2017. Ganti Makanan 4 Sehat 5 Sempurna dengan Pedoman Gizi Seimbang. Online: <https://www.alodokter.com/ganti-makanan-4-sehat-5-sempurna-dengan-pedoman-gizi-seimbang> diakses tanggal 5 Oktober 2019
- Aithal, M., S. Haseena, K.K. Das, S.H. Saheb. 2016. Effect of nigella sativa seed and thymoquinone on reproductive parameters in streptozotocine induced diabetic and normal male albino rats. *Int. J. Intg. Med. Sci.* 3: 248–252.
- Alberti, K.G.M.M., Eckel, R.H., Grundy, S.M., Zimmet, P.Z., Cleeman, J.I., Do-nato, K.A., Fruchart, J.C., James, P.T., Loria, C.M., Smith, Jr, S.C. 2009. Har-monizing the Metabolic Syndrome. A Joint Interim Statement of the Inter-national Diabetes Federation Task Force on Epidemiology and Prevention; National Heart, Lung, and Blood Institute; American Heart Association; World Heart Federation; International Atherosclerosis Society; and Inter-national Association for the Study of Obesity. *Circulation.* 120:1640-1645.
- Almatsier, S. 2009. *Prinsip Dasar Ilmu Gizi*. Jakarta: Penerbit PT Gramedia Pus-taka Utama.
- Al-Roujeaie, A.S., H.M. Abuohashish, M.M. Ahmed, O.A. Alkhamees. 2016. Ef-fect of rutin on diabetic-induced erectile dysfunction: possible involvement of testicular biomarkers in male rats. *Andrologia:* 1–10.
- Alsehri, A.M. 2010. Metabolic syndrome and cardiovascular risk. *Journal of Family and Community Medicine*, 17(2): 73-78.
- Amaral, S., Oliveira, P.J. & Ramalho-santos, J., 2008. Diabetes and the Impair-ment of Reproductive Function: Possible Role of Mitochondria and Reac-tive Oxygen Species. 351(239), pp.1–9.
- Anam, M.A., **A. Gofur**, & S.R. Lestari. 2018. *Pengaruh Kombinasi Ekstrak Tempe Kedelai Hitam (Glycine Max (L.) Merrill) Dan Ubi Jalar Ungu (Ipomoea Batatas L.) Terhadap Kadar Advanced Glycation End-Product (AGE) Serum Darah Tikus Model Diabetes Mellitus Tipe 2*. Skripsi. Universitas Negeri Malang: Tidak Di-terbitkan.
- Anyakudo, M.M.C., A.J. Balogun, M.O. Adeniyi, 2015. Beneficial effects of hon-ey-based diet on glycemic control and reproductive potential in diabetic rats. *World J. Nutr. Heal.* 3: 41–46.
- Ardiansyah, E., **A. Gofur**, A. Witjoro. 2019. *Potensi Variasi Campuran Ekstrak Ubi Jalar Ungu (Ipomoea batatas L.) dan Kedelai Hitam (Glycine max L.) Terhadap Ka-dar Sitokin Proinflamasi TNF- α pada Tikus (Rattus novergicus) Galur Wistar Model DMT2*. Skripsi, Universitas Negeri Malang: Tidak Diterbitkan.
- Astawan, M. 2004. *Tetap Sehat dengan Produk Makanan Olahan*. Solo: Tiga Serang-kai.
- Ayuob, N.N., H.A. Murad, S.S. Ali. 2015 Impaired expression of sex hormone receptors in male reproductive organs of diabetic rat in response to oral antidiabetic drugs. *Folia Histochem. Cytobiol* 53: 35–48.
- Baroroh, A.R.E., S.R. Lestari., **A. Gofur**. 2019. *Pengaruh pemberian ekstrak bawang putih tunggal (Allium sativum) terhadap kadar advanced glycation end product (AGE) di epididimis mencit (Mus musculus) Galur balb/c model diet tinggi lemak dan Karbo-hidrat*. Skripsi, Universitas Negeri Malang: Tidak Diterbitkan.
- Billah, S.M.B., **A. Gofur**, & S.R. Lestari. 2018. *Pengembangan Handout Mata Kuli-ah Anatomi Fisiologi Manusia Berdasarkan Hasil Penelitian Potensi Tepung Tempe Kedelai Hitam Dan Ubi Jalar Ungu Pada Tikus Model DMT2*. Tesis. Universitas Negeri Malang: Tidak Diterbitkan.
- Cahyadi, W. 2007. *Kedelai Khasiat dan Teknologi*. Bumi Aksara. Bandung
- Cevallos-Casals, B.A. & Cisneros-Zevallos, L.C. 2004. Stability of Anthocy-anin-Based Aqueous Extracts of

- Andeanpurple Corn and Red-Fleshed Sweet Potato Compared to Synthetic and Natural Colorants. *Food Chemistry*, 2004(86): 69-77.
- Cheng, K.C., Lin, J.T., & Liu, W.H. 2011. Extract from Fermented Black Soybean Milk Exhibit Antioxidant and Cytotoxic Activities. *Food Technology and Biotechnology*, 49(1): 111-117.
- Delfino, M., Imbrogno, N., Elia, J., Capogreco, F., Mazzilli, F., 2007. Prevalence of diabetes mellitus in male partners of infertile couples. *Minerva Urol. Nefrol.* 59, 131–135.
- Eliyaningsih, N.D., Lestari, U. & **A. Gofur**. 2014. *Potensi Minyak JintanHitam (Ni-gella Sativa) Terhadap Kualitas Spermatozoa Mencit (Mus Musculus) Galur Balb-C Setelah Di Beri Minyak Jelantah*. Skripsi. Tidak diterbitkan. Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Malang.
- Esaki, H., Onozaki, H., Kawakishi, S. & Osawa, T. 1996. New antioxidant isolated from tempeh. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 44: 696–700
- Fabian, U.A., M.A. Charles-Davies, A.A. Fasanmade, J.A. Olaniyi, O.E. Oyewole, M.O. Owolabi, J.R. Adebuseyi, O.O. Hassan, B.M. Ajobo, M.O. Ebesunun. 2016. Male sexual dysfunction leptin, pituitary and gonadal hormones in Nigerian males with metabolic syndrome and type 2 diabetes mellitus. *J. Reprod. Infertil.* 17:17–25.
- Farid, U.M., S.R. Lestari., **A. Gofur**. 2019. *Pengembangan modul berbasis problem solving berdasarkan hasil penelitian pengaruh ekstrak tempe kedelai hitam terhadap kadar interleukin-6 (IL-6) untuk meningkatkan kemampuan berpikir kritis mahasiswa*. Tesis, Universitas Negeri Malang: Tidak Diterbitkan.
- Fatimah, R. N. 2015. Diabetes Mellitus Tipe 2. *J Majority*, 4(5): 101-93.
- Fidiya, B.R., **A. Gofur**, S.R. Lestari. 2019. *Pengembangan Modul Berdasarkan hasil penelitian ekstrak tempe kedelai hitam terhadap hematologi tikus diabetes mellitus tipe 2 untuk meningkatkan keterampilan pemecahan masalah*. Tesis. Universitas Negeri Malang: Tidak Diterbitkan.
- Ghasemi, H., J. Karimi, M.T. Goodarzi, I. Khodadadi, H. Tavilani, H. Moridi, N. Kheiripour. 2015. Seminal plasma zinc and magnesium levels and their relation to spermatozoa parameters in semen of diabetic men. *Int. J. Diabetes Develop. Countr.* 36:1–6.
- Gofur, A. 2018. *Susu Kambing Peranakan Etawa (PE) Dan Peranannya Pada Aspek Reproduksi Mamalia*. Monograf: UM Press.
- Gofur, A. & Lestari, S.R. 2016. Effect of black soybean natto extract (Glycine soja) on reproduction system of hypercholesterolemia male mice. *Asian Pacific Journal of Reproduction*. Volume 5 (5):387-390
- Gofur A, A. Witjoro, E. W. N. Tiyas, E. Setyowati, S.A. Mukharromah, M.F. Atho'illah, & S.R. Lestari. 2018. The ameliorative effect of black soybean and purple sweet potato to improve sperm quality through suppressing reactive oxygen species (ROS) in type 2 diabetes mellitus rat (*Rattus norvegicus*). *Science Asia* 44 (5): 303
- Gofur, A., A. Witjoro, E.W. Ning Tiyas, E. Setyowati, S.S. Mukharromah, M.F. Atho'illah, S.R. Lestari. 2019a. The Evaluation of Dietary Black Soybean and Purple Sweet on Insulin Sensitivity in Streptozotocin-Induced Diabetic Rats. *Pharmacognosy*. Vol. 11(4): 639-646.
- Gofur, A., Lestari, R.S., 2018. The role of red betel extracts (*piper crocatum* ruiz & pav.) against testicular assessment on mice model of rheumatoid arthritis. *International Journal of Complementary & Alternative Medicine*. Volume 1:1.
- Gofur, A., S.N. Arifah, Y. Annisa, A. Witjoro, M.F. Atho'illah, S.R. Lestari. 2019b. The Role of Black Soybean and Purple Sweet Potato Active Compound on Advanced Glycation End-Product in Streptozotocin-Induced Type 2 Diabetes Mellitus Rat. *Journal of Tropical Life Science*. Vol. 9, No. 2, 139 – 145
- Hafez, D.A., 2010. Effect of Extracts of Ginger Goots and Cinnamon Bark on Fertility of Male Diabetic Rats. 6(10), pp.940–947.

- Hakim, L.S., I. Goldstein. 1996. Diabetic sexual dysfunction. *Endocrinol. Metab. Clin. North Am.* 25: 379–400.
- Harjutsalo, V., Sjoberg, L., Tuomilehto, J., 2008. Time trends in the incidence of type 1 diabetes in Finnish children: a cohort study. *Lancet.* 371, 1777–1782.
- Jenkins, D.J., Wolever, T.M., Taylor, R.H., Barker, H., Fielden, H., & Baldwin, H.M. 1981. Glycemic Index of Foods: A Physiological Basis for Carbohydrate Exchange. *American Journal of Clinical Nutrition*, 34(3): 362-366.
- Kano, M., Takayanagi, T., Harada, K., Makino, K., & Ishikawa, F. 2005. Antioxidative Activity of Anthocyanins from Purple Sweet Potato, *Ipomoea batatas* Cultivar Ayamurasaki. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 69(5): 979-988.
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. 2018. CEGAH, CEGAH, dan CE-GAH: Suara Dunia Perangi Diabetes. Online: <https://www.depkes.go.id/article/view/18121200001/cegeh-cegah-dan-cegah-suara-dunia-perangi-diabetes.html> diakses tanggal 9 November 2019.
- Khaki, A., F. Fathiazad, M. Nouri, A. Khaki, N.A. Maleki, H.J. Khamnei, P. Ah-madi. 2010. Beneficial effects of quercetin on sperm parameters in streptozotocin-induced diabetic male rats. *Phytother. Res.* 24 (2010) 1285–1291.
- Komili, L., E. Abasfard, Z. Ghobadian. 2015. The effects of sour orange (citrus aurantium) extract on sex hormones in diabetic male rats (Wistar). *Walia J.* 31: 207–215.
- Lanzafame, F. M., S. La Vignera, E. Vicari and A. E. Calogero. 2009. "Oxidative stress and medical antioxidant treatment in male infertility." *Reproductive bio-medicine online* 19(5): 638-659
- Lavizzo-Mourey, R., 2007. Childhood obesity: what it means for physicians. *JAMA* 298, 920–922.
- Mawarti, K., **A. Gofur**, S.R. Lestari. 2019. *Pengaruh kombinasi ekstrak tempe kedelai hi-tam (Glycine max L merrill) dan ubi jalar ungu (Ipomoea batatas L) terhadap profil lip-id tikus model DMT2*. Skripsi, Universitas Negeri Malang: Tidak Diterbitkan.
- Melman, A., B. Mason, A.C. Leung, M.E. Disanto. 2016, *Male Sexual Dysfunction in Diabetes Mellitus*, Springer, pp. 401–417.
- Miasih, D.S., S.R. Lestari., **A. Gofur**. 2019. *Pengaruh pemberian ekstrak bawang putih tunggal (Allium sativum) terhadap kadar receptor of advanced glycation end product (RAGE) di epididimis mencit (Mus musculus) Galur Balb/c model diet tinggi lemak dan karbohidrat*. Skripsi, Universitas Negeri Malang: Tidak Diterbitkan.
- Modak M, Dixit P, Londhe J, Devasagayam. 2007. Indian herbs and herbal drugs used for the treatment of diabetes. *J Clin Biochem Nutr*, 40 (3): 163-173.
- Montilla, E.C., Hillebrand, S., & Winterhalter, P. 2011. Anthocyanins in Purple Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L.) Varieties. *Fruit, Vegetable, and Cereal Science and Biotechnology*, 5(12): 19-24.
- Mulholland, J., C. Mallidis, I. Agbaje, N. McClure. 2011. Male diabetes mellitus and assisted reproduction treatment outcome, *Reprod. Biomed. Online* 22:215–219.
- Mutaslimah, S., **A. Gofur**, Susilowati. 2017. *Analisis Proksimat Tempe Kedelai Hitam (Glycine soja) Berkulit Biji dan Tanpa Kulit Biji*. Skripsi. Tidak diterbitkan. Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Malang.
- N. Amidu, W.K. Owiredo, H. Alidu, C. Sarpong, C.K. Gyasisarpong, L. Quaye. 2013. Association between metabolic syndrome and sexual dysfunction among men with clinically diagnosed diabetes, *Diabetol. Metab. Syndr.* 5:242– 250.
- Nakajima, N., Nozaki, N., Ishihara, K., Ishikawa, A. & Tsuji, H. 2005. Analysis of isoflavone content in tempeh, a fermented soybean, and preparation of a new isoflavone-enriched tempeh. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 100:685–687
- Ningtiyas, E.W., **A. Gofur**, S.R. Lestari. 2017. *Pengaruh Tepung Ketela Ungu (Ipomoea batatas (L.) Lamb.) dan Kedelai Hitam (Glycine soja (L.)) Terhadap Ekspresi ROS dan Nekrosis Sel β Pankreas Pada Tikus (Rattus norvegicus) Model Diabetes Mellitus Tipe 2*. Skripsi, Universitas Negeri Malang: Tidak Diterbitkan.

- Nurrahman. 2005. Evaluasi Komposisi Zat Gizi Dan Senyawa Antioksidan Kedelai Hitam Dan Kedelai Kuning. *Jurnal Aplikasi Teknologi Pangan*. 3(4): 89-92
- Popkin, B. M. 2004. The nutrition transition: an overview of world patterns of change. *Nutrition Reviews*, 62(7 Pt 2), S140eS143.
- Prasad, H., Ryan, D. A., Celzo, M. F., & Stapleton, D. 2012. Metabolic syndrome: definition and therapeutic implications. *Postgraduate Medicine*, 124(1), 21e30.
- Pratiwi, C.K.A., **A. Gofur**, A. Witjoro. 2019. *Pengaruh Ekstrak Tempe Kedelai Hitam (Glycine soja (L.) dan Ubi Jalar Ungu (Ipomea batatas(L.)) Terhadap Kadar Serum Glutamic Oxaloacetic Transaminase (SGOT) Tikus Jantan (Rattus norvegicus) Galur Wistar Model Diabetes Mellitus Tipe 2*. Skripsi, Universitas Negeri Malang: Ti-dak Diterbitkan.
- Probowati, A., **A. Gofur**, B. Lukiat. 2019. *Pengembangan modul sistem pencernaan berbasis inkuiri terbimbing berdasarkan hasil penelitian pengaruh ekstrak ubi jalar ungu terhadap kadar MDA tikus DMT2*. Tesis, Universitas Negeri Malang: Tidak Diterbitkan.
- Putra, E.P., Lestari, U. & **A. Gofur**. 2012. *Pengaruh Air Kelapa Muda (Cocos nucifera) Terhadap Kualitas Spermatozoa Mencit (Musmusculus) Galur Balb C yang Terpapar Allethrin Sebagai Sumber Belajar Pada Mata Kuliah Fisiologi He-wan*. Tesis. Tidak diterbitkan. Program Studi Pendidikan Biologi, Universitas Negeri Malang
- Putri, E.P., **A. Gofur**, & S.R. Lestari. 2018. *Pengaruh Variasi Campuran Ekstrak Tempe Kedelai Hitam Dan Ubi Jalar Ungu Terhadap Aktivitas Peroksidasi Lipid dan Reactive Oxygen Species (ROS) Total Hepar Tikus Model Diabetes Mellitus Tipe 2*. Skripsi. Universitas Negeri Malang: Tidak Diterbitkan.
- Putri, M.I., **A. Gofur**, S.R. Lestari. 2019. *Pengembangan modul berbasis problem solving berdasarkan hasil penelitian potensi ubi jalar ungu (Ipomoea batatas) pada tikus DM Tipe 2 terhadap keterampilan pemecahan masalah dan hasil belajar kognitif mahasiswa*. Tesis, Universitas Negeri Malang: Tidak Diterbitkan.
- Rashid, K., P.C. Sil. 2015. Curcumin ameliorates testicular damage in diabetic rats by suppressing cellular stress-mediated mitochondria and endoplasmic reticulum-dependent apoptotic death. *Biochim. Biophys. Acta*. 1852:70–82.
- Robbins WA, Xun L, FitzGerald LZ, Esguerra S, Henning SM, Carpenter CL. 2012. Walnuts improve semen quality in men consuming a Western-style diet: randomized control dietary intervention trial. *Biol Reprod*. 87:1–8.
- Sa'diyah, H., Tenzer, A. & Handayani, N. 2015. *Pengaruh Susu Kambing Peranakan Etawa Terhadap Kualitas Spermatozoa Pada Mencit Galur Balb/C*. Skripsi. Tidak diterbitkan. Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Malang.
- Salas-Huetos A, Bulló M, Salas-Salvadó J. 2017. Dietary patterns, foods and nutrients in male fertility parameters and fecundability: a systematic review of observational studies. *Hum Reprod Update*. 23:371–89.
- Salas-Huetos A, Moraleda R, Giardina S, Anton E, Blanco J, Salas-Salvadó J. 2018. Effect of nut consumption on semen quality and functionality in healthy men consuming a Western-style diet: a randomized controlled trial. *Am J Clin Nutr*. 108:953–62
- Sen S, Chakraborty R, Biplab D. 2011. Challenges and opportunities in the advancement of herbal medicine. India's position and role in a global context. *J Herb Med*, 1: 67-75.
- Sendari, A.A. 2019. Makanan 4 Sehat 5 Sempurna yang Telah Berganti Menjadi Pedoman Gizi Seimbang. Online: <https://www.liputan6.com/health/read/3910868/makanan-4-sehat-5-sempurna-yang-telah-berganti-menjadi-pedoman-gizi-seimbang> diakses tanggal 5 Oktober 2019
- Setyowati, E., **A. Gofur**, & S.R. Lestari. 2017. *Efek Pemberian Kombinasi Tepung Ketela Ungu Dan Tepung Kedelai Hitam terhadap Kadar Malondialdehid (MDA) Serum Darah Pada Tikus (Rattus norvegicus) Model Diabetes Mellitus Tipe 2*. Skripsi. Tidak diterbitkan. Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Malang.

- Shalaby, M.A., A.R. Hamowieh, Safety and efficacy of zingiber officinale roots on fertility of male diabetic rats. *Food Chem. Toxicol.* 48: 2920–2924.
- Shi, G.J., Z.M. Li., Zheng, J., Chen, J., X.X. Han., J. Wu., G.Y. Li, Chang, Q., Y.X. Li, dan J.Q. Yu. 2017. Diabetes associated with male reproductive system damages: Onset of presentation, pathophysiological mechanisms and drug intervention. *Biomedicine & Pharmacotherapy.* 90: 562–574.
- Siagian, R.A. 2004. *Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Indeks Glikemik Pangan, Indeks Glikemik, dan Beban Glikemik Beberapa Jenis Pangan, Indeks Glikemik Pangan: Cara Mudah Memilih Pangan yang Menyehatkan.* Jakarta: Penebar Swadaya.
- Stone, N. J., & Saxon, D. 2005. Approach to treatment of the patient with met-abolic syndrome: lifestyle therapy. *American Journal of Cardiology*, 96(4A), 15Ee21E.
- Suhartini, S.R. Lestari, & N. Wulandari. 2017. *Pengaruh Tepung Kedelai Hitam dan Tepung Ketela Ungu Terhadap Kadar MDA Hepar Tikus Jantan (Rattus Novergi-cus) Model Diabetes Mellitus Tipe 2.* Skripsi. Tidak diterbitkan. Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Malang.
- Sulistyowati, A., Lestari, U. & **A. Gofur**. 2014. *Pengaruh Jintan Hitam (Nigella Sati-va) Terhadap Motilitas Dan Konsentrasi Spermatozoa Mencit (Mus Musculus) Galur Balb-C Setelah Diberi Minyak Jelantah.* Skripsi. Tidak diterbitkan. Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Malang.
- Wisnuwardhana, L. 2018. *Pengaruh Makanan Halal Terhadap Akhlak.* Online: <https://medium.com/@luthfiwisnuwardhana/pengaruh-makanan-halal-terhadap-akhlak-581dca840324> diakses tanggal 8 Oktober 2019
- Yahya, H. 2002. *Al-Quran dan Sains.* Bandung: Dzikra, klikquran, alhayat. Zahra, A., T.S.R. Fatemi, M. Yazdan. 2013. *Effects of sesame oil on the reproductive parameters of diabetes mellitus-induced male rats, World J. Mens Health* 31: 141–149.

Pengelolaan Sampah Terpadu melalui Pendidikan Masyarakat Berbasisi Pembudayaan 6M

Prof. Dr. Hj. Mimien Henie Irawati Al Muhdhar, M.S.

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Yth. Rektor dan para Pembantu Rektor Universitas Negeri Malang
Yth. Ketua dan Segenap Anggota Senat Universitas Negeri Malang
Yth. Segenap Jajaran Pimpinan Universitas Negeri Malang
Yth. Rekan-rekan Dosen Universitas Negeri Malang
Yth. Para Undangan dan Hadirin yang berbahagia

Pada kesempatan yang berbahagia ini, marilah kita panjatkan puji syukur ke Hadirat Allah SWT, karena atas rahmat, hidayah, dan inayahNya kita dapat berkumpul dalam keadaan sehat *wal 'afiat*. Sesungguhnya jika kita mensyukuri nikmat Allah, maka Allah akan menambah nikmatNya, tapi jika kita *kufur* nikmat, sesungguhnya adzab Allah sangatlah pedih.

Hadirin yang berbahagia,

Melalui pidato pengukuhan ini, saya berharap dapat memberikan sumbangan pikiran dan pengalaman saya dalam upaya mengatasi permasalahan lingkungan hidup, khususnya masalah sampah (yaitu sampah yang ditimbulkan oleh masyarakat, dan bukan sampah masyarakat). Banyak orang menjuluki saya sebagai Doktor sampah, atau Profesor sampah. Julukan tersebut tidak salah karena saya menggeluti sampah sejak tahun 1995. Pada tahun 1995 tersebut saya mulai mengumpulkan berbagai referensi tentang sampah sebagai bahan penyusunan disertasi saya. Ketertarikan saya di bidang kebersihan, khususnya sampah, diinspirasi dari pengalaman kecil saya. Waktu itu, orang tua saya, H. Mashoedi Al Muhdhar diberi amanah mejadi ketua RW. Program yang saya anggap menarik dan inovatif adalah keputusan beliau untuk menggerakkan masyarakat agar menanam tanaman sirsat di depan rumah masing-masing, sehingga kampung kami yang berada di tepi jalan raya, menjadi hijau, sejuk, dan asri. Didukung dengan program ibu saya, Hj. Oemi Syafa'atun untuk memilah sampah plastik dan kertas yang biasanya berserakan di halaman sekolah yang berada di sebelah rumah kami. Akhirnya halaman Sekolah Dasar yang sebelumnya sangat kotor berubah menjadi sangat bersih. Diinspirasi juga dari ibu saya ketika beliau mampu meraih juara satu Tingkat Karesidenan dalam Tata Laksana Rumah Tangga, kami anak-anaknya yang masih kecil diajari bagaimana cara menjaga kebersihan rumah, menata baju di almarnya masing-masing, dan bahkan diajari menata batu kerikil yang ada di pelataran sebelah rumah kami. Rumah kami padat dengan tanaman buah-buahan, sayur-sayuran, peternakan, dan bahkan perikanan. Maklum bapak kami adalah penyandang Juara Nasional Petani Teladan di Indonesia.

Hadirin yang berbahagia,

Perlu kita ketahui bersama bahwa dari studi dokumentasi kota-kota besar di Indonesia, sampah rumah tangga memberikan kontribusi terbesar kepada sampah kota. Sekitar 65-85% sampah yang diangkut ke TPA berasal dari rumah tangga. Itulah sebabnya pada penelitian yang saya geluti selama ini selalu berpijak pada penyelesaian masalah sampah dari tingkat sumber sampah terbesar yaitu rumah tangga.

Pada awal pidato saya ini, perkenankan saya sedikit memaparkan tentang dampak negatif sampah jika tidak dikelola dengan baik. Sampah memberikan berbagai dampak negatif antara lain pencemaran air, penurunan kesehatan penduduk, mengganggu keindahan, menyebabkan kecelakaan, dan berbagai dampak yang disebabkan oleh pencemaran udara. Menurut Sadono & Antonius (1996), sampah dapat menyebabkan pencemaran udara, misalnya bau busuk, asap, dan sebagainya. Menurut Goldberg dkk. (1995), sampah menimbulkan biogas yang mengandung banyak metan dan

karbondioksida serta bahan berbahaya lainnya. Ibu-ibu yang tinggal di sekitar TPA, yang terdedah biogas memiliki risiko tinggi kelahiran bayi dengan berat badan rendah dan memengaruhi umur kehamilan. Selanjutnya, Goulet dkk. (1991 dalam Goldberg dkk., 1995) menyatakan bahwa ibu-ibu yang terdedah biogas berhubungan dengan gangguan hipertensi pada saat kehamilan, "stillbirths" (kematian janin pada kehamilan tua), dan cacat bawaan. Dampak tersebut tergantung pada sifat, waktu, dan tingkat pendedahan.

Koskinen & Hemminiki (1985 dan Barlow & Sullivan, 1982 dalam Goldberg, 1995) menyatakan bahwa beberapa bahan dalam biogas dapat mengganggu perkembangan embrio, fetus, dan dapat menyebabkan kemandulan, kematian dalam uterus, aborsi spontan, berat badan kelahiran rendah, dan kelainan bawaan. Sebagai contoh tetra kloroetilen dan kloroform adalah fetotoksik, benzene dan metil etil keton adalah embriotoksik, dan 1,1,2 tri kloroetan, kloro benzene, dan metilen klorida dapat menyebabkan gangguan pada perkembangan (Koskinen & Hemminiki, 1985; RTECS, 1994 dalam Goldberg dkk., 1995). Menurut California Waste Management Board (1988; Young & Parker, 1984; Lisk, 1991; Armstrong & Kharrazi, 1994 dalam Goldberg dkk., 1995), biogas mengandung banyak metan, karbon dioksida, dan bahan-bahan lain seperti karbon disulfida, merkaptan, dan bahan menguap lainnya. Biogas tersebut dihasilkan oleh pencernaan anaerobik dari bahan organik.

Hiatt dkk. (1993 dalam Goldberg dkk., 1995) menyatakan bahwa biogas dapat lepas ke udara ambien dan dapat bermigrasi secara lateral melalui tanah dan batu. Selanjutnya O'Leary & Tansel (1986 dalam Goldberg dkk., 1995) menambahkan bahwa biogas tersebut kemudian mengalami infiltrasi ke dalam bangunan-bangunan dan mengalami akumulasi metan sehingga dapat menimbulkan ledakan yang berbahaya.

Menurut Japan International Cooperation Agency (1993a) melalui "sanitary landfill", dihasilkan substansi kimia dalam bentuk gas seperti CH_4 , CO_2 , NH_3 , dan H_2S . Perhatian khusus diberikan pada CH_4 karena dapat diubah menjadi bahan berbahaya (HCHO) kemudian dihasilkan CO_2 . Jalur perubahan CH_4 menjadi CO_2 ditunjukkan pada Gambar 2.4 (Boumans, 1989 dalam Japan International Cooperation Agency, 1993b). OH radikal dapat terbentuk oleh pelepasan NH_3 di udara. Gas CO_2 , NH_3 , dan H_2S dapat diubah menjadi H_2CO_3 , NH_4NO_3 , dan H_2SO_4 berturut-turut dalam sehari. Diperkirakan hal tersebut akan berpengaruh terhadap terjadinya hujan asam.

Aquino (1993) menyatakan bahwa bau busuk sampah memiliki dampak emosional terhadap penduduk yang tinggal di sekitar TPA di Port Washington. Bau digunakan sebagai alasan penduduk untuk mencegah dibangunnya TPA, dan bahkan pada bulan Juni 1991 masyarakat sekitar TPA Port Washington mengadu karena alasan bau yang ditimbulkan.

Hadirin yang kami muliakan,

Dari sedikit paparan tentang berbagai dampak negatif dari sampah tersebut, saya akan memulai mengajak para hadirin untuk memikirkan masalah sampah. Sampah merupakan masalah yang akan menjadi semakin rumit dipecahkan jika tidak segera ditangani secara benar. Masalah sampah tidak lepas dari faktor perilaku masyarakat. Saya tidak akan memaparkan berapa ton per hari timbulan sampah di kota kecil Lumajang, kota besar Malang, ataupun kota metropolitan Surabaya dan Jakarta. Sebagai gambaran, saat ini timbulan sampah kota metropolitan Jakarta adalah 6.500 ton per hari. Dari 6.500 ton tersebut 73% dibuang ke TPA Bantargebang dan 27% tidak terangkut. Artinya tertinggal di lingkungan. Jika sampah tersebut dibiarkan dalam satu minggu akan menumpuk 165 kali volume candi terbesar di dunia, yaitu candi Borobudur (seperti diberitakan Trans 7 pada 3 Mei 2011).

Hadirin yang dirahmati Allah,

Paradigma "sampah untuk dibuang" menyebabkan hampir seluruh *stakeholder* memperlakukan sampah untuk dibuang. Sebagai bukti banyak kita jumpai himbauan "Buanglah sampah pada tempatnya". Paradigma "sampah untuk dibuang" tersebut perlu segera diubah menjadi "sampah untuk dikumpulkan" dan paradigma "mengelola sampah memerlukan biaya besar" perlu segera diubah menjadi "mengelola sampah mendatangkan penghasilan besar". Untuk itu saya, Al Muhdhar (1998)

menemukan konsep pembudayaan 6M (mengurangi, menggunakan kembali, mengganti, memisahkan, mendaurulang, dan mengomposkan) sebagai salah satu alternatif pemecahan masalah sampah rumah tangga melalui perubahan perilaku masyarakat. Sebelum saya menyampaikan secara detail tentang konsep pembudayaan 6M, perkenankan saya memaparkan temuan saya tentang konsep Pengelolaan Sampah Terpadu sebagai variabel pertama dari topik pidato saya ini.

Konsep Pengelolaan Sampah Terpadu

Hadirin yang berbahagia, yang selalu mengamalkan ilmunya di Jalan Allah...

Saya akan menjelaskan penemuan saya yaitu konsep Pengelolaan Sampah Terpadu. Pengelolaan Sampah Terpadu merupakan sistem pengelolaan sampah yang memadukan antara pengelolaan sampah secara fisik maupun nonfisik.

Terpadu secara fisik yang saya maksud adalah keterpaduan dalam pengelolaan sampah yang terkait dengan sarana dan prasarana pengelolaan sampah. Penelitian tentang Penanganan Sampah Terpadu mulai saya rintis pada tahun 2002 dengan judul "Studi Penanganan Sampah di Wilayah Surabaya Metropolitan". Dimulai dari studi yang memanfaatkan Sistem Informasi Geografi dengan mempertimbangkan aspek topografi, penggunaan lahan, jarak lokasi LPA dari pemukiman, jenis batuan, struktur geologi lipatan, *water table*, aksesibilitas, dan keberterimaan masyarakat. Dari studi dengan beranggotakan bapak Drs. Rudi Hartono, M.Si Jurusan Pendidikan Geografi Universitas Negeri Malang tersebut ditemukan dua alternatif Lokasi LPA Terpadu untuk wilayah Surabaya, Sidoarjo, Mojokerto, dan Gresik. Alternatif pertama di desa Banyuurip kecamatan Kedamean kabupaten Gresik dan alternatif kedua adalah desa Lebanisuko kecamatan Wringinanom kabupaten Gresik. Jadi, satu lahan Lokasi LPA Terpadu tersebut diharapkan dapat dimanfaatkan untuk empat kota yaitu Surabaya, Sidoarjo, Mojokerto, dan Gresik.

Penentuan Lokasi LPA Terpadu ditindaklanjuti dengan studi analisis transportasi LPA Terpadu. Studi tersebut menemukan sebuah alternatif jalur pengangkutan sampah dari LPS ke LPA Terpadu melalui jalur tertentu yang tidak mengganggu kenyamanan lalu lintas serta Biaya Operasional Kendaraan (BOK) yang efisien. Jalur pengangkutan sampah dari sumber sampah menuju LPS dan LPA Terpadu dari beberapa kota yang telah membuat kesepakatan dalam manajemen terpadu, ditentukan oleh beberapa faktor, antara lain: jarak angkut, kecepatan dan waktu tempuh, kapasitas kendaraan pengangkut, serta tidak mengesampingkan aspek kenyamanan dan estetika. Jarak angkut, kecepatan dan waktu tempuh, serta kapasitas kendaraan pengangkut akan berpengaruh kepada Biaya Operasional Kendaraan (BOK) yang secara tidak langsung juga akan berpengaruh pada besarnya retribusi sampah. Sedang kenyamanan dan estetika akan mempertimbangkan jalur-jalur yang tidak mengganggu kenyamanan masyarakat yang dilalui serta tidak mengganggu estetika kota. Hasil penelitian tentang Jalur Pengangkutan Terpadu sampah dari wilayah kota Surabaya, Sidoarjo, Mojokerto, dan Gresik menuju LPA Terpadu dapat dibaca pada laporan penelitian saya bersama anggota tim peneliti saya yaitu Bapak Ir. Faiz Hadi, M.T. Jurusan Teknik Sipil Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Penelitian besar tersebut juga telah membuahkan sebuah perancangan konsep LPA Terpadu. Konsep rancangan LPA Terpadu yang saya usulkan merupakan sebuah desain LPA Terpadu yang memiliki komponen terdiri atas: Unit Pemilahan Sampah, Unit Pengomposan Sampah, Unit Daurulang Sampah, Unit Warung Bunga dan Kompos, serta Unit Penggemukan Ternak. LPA Terpadu bukan merupakan lahan yang kotor, melainkan layaknya tempat rekreasi. Di LPA Terpadu, kita dapat melihat ternak yang gemuk gemuk. Di LPA Terpadu itu pula kita dapat berjalan-jalan untuk membeli bunga, tanaman hias, dan pupuk kompos, atau sekedar berjalan-jalan menikmati indahnya pemandangan. Secara fisik itulah LPA Terpadu yang saya idealkan dalam rancangan penelitian saya pada tahun 2002 yang didanai oleh Balitbang Jatim. Penerapan konsep keterpaduan secara fisik tersebut perlu didukung oleh kesadaran masyarakat untuk telah menyediakan sarana fisik pemisahan sampah dari tingkat sumber sampah serta dilanjutkan dengan ketersediaan sarana fisik LPS yang mendukung. Dengan demikian ketersediaan sarana fisik LPA Terpadu merupakan alternatif terakhir hanya bagi sampah yang dengan berbagai alasan yang diterima terpaksa belum diolah di tingkat sumber sampah ataupun di LPS. Dengan demikian, satu LPA Terpadu dapat dimanfaatkan untuk

selamanya. Untuk itu kami sampaikan beribu terimakasih kepada yang terhormat ibu Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, MAppSc dosen Jurusan Teknik Lingkungan ITS yang sekarang sedang menjabat sebagai Direktur Program Magister Manajemen Teknik ITS, yang telah turut berperan dalam mensukseskan terlaksananya studi perancangan konsep LPA Terpadu tersebut yang selanjutnya kami sebut sebagai *Rotary Sanitary Landfill*.

Berikutnya saya akan menjelaskan konsep **terpadu secara nonfisik**. Terpadu secara nonfisik maksudnya adalah keterpaduan dalam pengelolaan sampah yang terkait dengan pengelolaan secara nonfisik. Selain konsep rancangan LPA Terpadu yang telah saya uraikan tersebut, saya sebagai *team leader* dibantu oleh Bapak Drs. Margono, M.Pd. Jurusan PKN dari Universitas Negeri Malang juga telah meneliti tentang Peraturan Perundang-undangan Pengelolaan Sampah Terpadu. Keterpaduan nonfisik dapat dikelola secara komprehensif dalam sistem perundang-undangan tentang pengelolaan sampah. Saya akan mulai dari penjelasan hasil penelitian kami tersebut pada tahun 2002 tentang Peraturan Perundang-undangan pengelolaan sampah di wilayah Surabaya metropolitan. Selama ini, peraturan daerah (Perda) sampah kota tersekat pada wilayah administrasi pemerintah daerah (Kota Surabaya, Kabupaten Sidoarjo, Kabupaten Gresik, Kabupaten Mojokerto). Ukuran bagi evaluasi peraturan perundang-undangan tentang pengelolaan sampah kota metropolitan adalah adanya peraturan yang mencerminkan kerjasama antar daerah yang termasuk dalam kawasan metropolitan, pengolahan sampah pada tingkat sumber sampah, usaha daur ulang, lahan pengolahan akhir, transportasi, dan sistem penguatan (*reinforcement*) yang memungkinkan ditegakkannya aturan.

Keterpaduan pengelolaan sampah berarti sinergi antar pemerintah daerah dalam mengelola sampah kota metropolitan. Prinsip ini juga berarti sinergi antar masyarakat sebagai sumber sampah, pengusaha daur ulang sampah, dan pemerintah daerah dalam perencanaan, pelaksanaan, dan penilaian kebijakan kebersihan dan penanganan sampah kota metropolitan. Secara khusus, keterpaduan ini tercermin pada lokasi dan konsep Lahan Pengolahan Akhir (LPA). Masyarakat sering keberatan jika wilayahnya dijadikan LPA. Konsep LPA secara tradisional berarti lahan pembuangan akhir, di mana sampah hanya ditumpuk dan akhirnya menimbulkan bau yang tidak sedap dan mengundang penyakit. LPA Terpadu tidak lagi diposisikan sebagai lahan pembuangan, tetapi lahan pengolahan yang harus memenuhi syarat teknis sehingga tidak berbau, menjadi pusat produksi dan bisnis barang-barang daur ulang, dan pemanfaatan sampah lainnya, sehingga memberi manfaat ganda bagi masyarakat.

Unsur-unsur yang terlibat pada permasalahan sampah kota adalah pemerintah propinsi Jawa Timur, pemerintah kota Surabaya, pemerintah Kabupaten Gresik, pemerintah kabupaten Sidoarjo, dan pemerintah kabupaten Mojokerto. Masalah sampah kota Surabaya metropolitan tidak dapat dibatasi oleh teritorial resmi pemerintah kota Surabaya. Oleh karena, sampah lebih merupakan persoalan sosiologis selalu lebih cepat dari pada perkembangan praktisnya. Daerah-daerah kabupaten yang dulu bercorak agraris tiba-tiba berubah menjadi industri, akibat perluasan pengaruh kota. Berdasarkan pertimbangan tersebut berbagai unsur pemerintah tersebut perlu melakukan kerja sama untuk mencari jalan keluar mengatasi masalah kerja sama. Pemerintah propinsi dapat berperan sebagai moderator dalam negosiasi antar pemerintah.

Kriteria lain adalah penegakan hukum (*rule of law*). Penegakan hukum tergantung pada beberapa faktor, yakni kepentingan masyarakat, kesesuaian hukum dengan sistem pengelolaan yang secara nyata berjalan, dan penguatan yang dilakukan penegak hukum. Hukum akan ditaati apabila hukum dibuat secara konsensus sehingga mewakili kepentingan kelompok-kelompok dalam masyarakat. Hukum yang adil adalah hukum yang dapat memenuhi kepentingan seluruh anggota masyarakat. Jika anggota masyarakat tersebut dilibatkan dalam proses pembuatan peraturan perundang-undangan tentang pengelolaan sampah, maka kepentingan mereka akan terwakili. Kondisi ini akan mendorong anggota masyarakat untuk menaati hukum. Aturan hukum juga harus secara riil sesuai dengan sistem pengelolaan sampah yang berjalan. Misalnya peraturan tentang pemisahan sampah basah dan sampah kering tidak akan bisa ditegakkan manakala tidak diikuti dengan sistem pengelolaan sampah basah menjadi pupuk dan sampah kering menjadi produk daur

ulang secara menyeluruh. Beberapa contoh peraturan yang bisa saya usulkan berkaitan dengan Pengelolaan Sampah Terpadu adalah sebagai berikut.

1. Keterpaduan antara industri daurulang dengan para pengusaha supermarket/mini market. Adanya peraturan agar memperpendek jalur pengelolaan sampah yang dimungkinkan dapat ditimbulkan dari adanya usaha supermarket/mini market baik secara langsung ataupun tidak langsung. Sebagai contoh nyata adalah pemberian discount bagi ibu-ibu yang berbelanja susu kemasan kardus, jika meninggalkan kardusnya di supermarket/mini market tersebut. Dengan demikian kardus tersebut dapat segera dikembalikan kepada perusahaan untuk didaur ulang. Peraturan tersebut hendaknya juga diterapkan untuk barang-barang komersial lainnya. Dengan memperpendek jalur perjalanan sampah berarti membantu pemerintah dalam menangani masalah sampah. Sebab menurut saya sampah adalah tidak masalah. Sampah akan menjadi masalah jika terlalu lama berada di lingkungan.
2. Keterpaduan antara pengembang area permukiman dengan masyarakat dan pemerintah. Materi ini sudah termaktup di Undang-undang No. 18 tahun 2008 tentang pengelolaan sampah, namun perlu didukung adanya peraturan serta penegakan peraturan tersebut. Peraturan agar setiap pengembang, wajib memiliki "*Green Corner*" sebagai upaya pengelolaan sampah mandiri, akan secara signifikan mengurangi jumlah sampah yang ditimbulkan oleh sebuah kota. Apalagi hasil telaah literatur menunjukkan bahwa permukiman memberikan kontribusi terbesar (65%-85%) kepada sampah kota.
3. Pemisahan antara sampah basah dan sampah kering hendaknya merupakan peraturan di tingkat bawah. Lembaga masyarakat yang tepat untuk memwadahi peraturan tersebut adalah Badan Keswadayaan Masyarakat (BKM). Dengan demikian monitoring dan evaluasi terhadap penerapan peraturan tersebut akan dilakukan oleh masyarakat sendiri. Hal ini selaras dengan program pemerintah yaitu Program Nasional Pemberdayaan Masyarakat (PNPM) Mandiri. Hasil penelitian saya pada tahun 2009 dan 2010 telah berhasil mengintegrasikan pembudayaan masyarakat dalam pengelolaan sampah berbasis 6M dengan PNPM Mandiri Perkotaan. Secara rinci hasil penelitian saya tersebut dijelaskan di bagian lain pada naskah pidato saya ini.
4. Setiap unit pendidikan harus memiliki kurikulum yang bermuatan pendidikan dalam pengelolaan sampah dan menerapkannya guna meningkatkan pengetahuan, sikap, dan perilaku para peserta didik dalam pengelolaan sampah.
5. Setiap unit usaha dan rumah tangga yang memungkinkan timbulan sampah dalam jumlah tertentu hendaknya menerapkan prosedur pengelolaan sampah berbasis 6M, tergantung pada kecenderungan jenis sampah yang ditimbulkan.

Penguatan (*reinforcement*) juga perlu dilakukan secara nyata oleh penegak hukum. Penguatan negatif (hukuman) harus betul-betul dilakukan secara adil. Sedangkan penguatan positif (hadiah) dapat dilakukan dengan penjadwalan yang tepat. Lomba kebersihan merupakan salah satu mekanisme yang terbukti ampuh untuk memberikan penguatan positif dalam rangka penegakan hukum.

Masalah sampah kota besar ataupun kota metropolitan seperti Surabaya telah menjadi masalah lintas daerah. Hal ini dapat dimengerti, mengingat percepatan perkembangan kota. Oleh karena itu, penanganan sampah ini memerlukan kerjasama antar daerah. Pemerintah propinsi dapat memfasilitasi kerjasama ini. Peranan pemerintah propinsi dalam memfasilitasi pengelolaan sampah kota metropolitan dimungkinkan oleh undang-undang pemerintah daerah dan undang-undang penataan ruang. Hasil akhir fasilitasi gubernur adalah nota kesepakatan antar kabupaten/kota. Perlu diingat bahwa masalah sampah terkait langsung dengan kepentingan masyarakat (menyangkut retribusi, penentuan lokasi LPA, dan partisipasi (otonom) masyarakat. Oleh karena itu berdasarkan undang-undang No.22 Tahun 1999 pasal 87 ayat 4, kerjasama tersebut perlu mendapat persetujuan DPRD masing-masing daerah.

Aspek-aspek penting yang harus diputuskan dalam kerjasama itu adalah penentuan lokasi dan desain teknis LPA Terpadu, mekanisme transportasi, retribusi, pengolahan sampah oleh masyarakat (pemisahan sampah, pengkomposan, produksi dan usaha daur ulang), dan mekanisme penyelesaian konflik dalam pengelolaan sampah. Lokasi LPA Terpadu dapat digunakan secara

bersama antar pemerintah daerah. Hal ini menuntut kesepakatan tentang biaya kompensasi dari lokasi tersebut kepada pemerintah daerah yang ditempati, biaya pembangunan bersama, dan bagi hasil jika LPA Terpadu tersebut memberikan “keuntungan”. Di samping itu, LPA harus memenuhi persyaratan teknis sebagai LPA Terpadu, yakni LPA bukan tempat pembuangan sampah, tetapi tempat pengolahan akhir sampah sehingga tidak berbau dan tidak mencemari lingkungan, memberi nilai tambah ekonomis bagi masyarakat mengingat di dalamnya terdapat usaha daur ulang, penggemukan ternak, dan pengomposan.

Mekanisme transportasi sampah, retribusi, dan pengolahan sampah harus mengikuti standar yang sama atas dasar kesepakatan, terutama pada daerah-daerah yang masyarakatnya tergolong masyarakat kota metropolitan. Hal tersebut akan menjadi sulit dan mendua bagi pemerintah kabupaten yang memiliki dualisme tipe masyarakat, yakni masyarakat pedesaan dan masyarakat perkotaan. Kedua tipe masyarakat tersebut perlu dibedakan dalam pengelolaan sampah agar tidak terjadi bias kota yang akhirnya membebani secara berlebihan pada komunitas pedesaan, baik secara ekonomis maupun sosiologis.

Kerjasama ini secara formal melibatkan unsur-unsur pemerintahan. Tetapi secara substansial, materi kerjasama hendaknya melibatkan masyarakat luas, terutama pihak sumber sampah dan pihak pengusaha daur ulang. Aspirasi masyarakat dapat diserap dengan memanfaatkan ruang publik yang tersedia (misalnya, media massa), sehingga terjadi pewacanaan terlebih dahulu. Pewacanaan tersebut sekaligus merupakan media sosialisasi untuk menghindari konflik penanganan sampah antar pemerintah daerah maupun antar masyarakat.

Keterpaduan pengelolaan sampah kota secara luas mencakup aspek kerjasama antar daerah. Secara khusus, keterpaduan berarti sinergi antara masyarakat sebagai sumber sampah, pelaku usaha, dan pemerintah.

Prinsip dasar keterpaduan terletak pada peranan sumber sampah sebagai pengolah sampah, tidak sekedar penghasil sampah. Setiap sumber sampah berkewajiban dan berkesadaran secara suka rela untuk mengolah sampah yang ditimbulkannya. Sebagai contoh adalah pemisahan sampah basah dan sampah kering. Rumah tangga, pengendara mobil, rumah makan, hotel, tempat umum, pasar, pertokoan, dan sebagainya minimal wajib berupaya untuk memisahkan sampah basah dan sampah kering. Setiap rumah tangga atau sekumpulan rumah tangga di samping memisahkan sampah, juga wajib melakukan pengkomposan.

Lahan Pengolahan Sementara (LPS) dan Lahan Pengolahan Akhir (LPA) harus didesain untuk menampung sampah basah dan sampah kering yang berasal dari sumber di luar rumah tangga. LPS dibangun dengan desain teknis untuk pengkomposan dan keperluan daur ulang, berdasarkan standar teknis guna menghindari pengaliran lindi ke sembarang tempat, menghindari serakan sampah, dan menghindari bau. LPA juga dibangun berdasarkan desain LPS dengan tambahan sarana produksi daur ulang, pengkomposan, perdagangan, pertanian, dan peternakan.

Pelaku usaha berperan membeli produk daur ulang dan kompos, serta menjualnya kepada konsumen yang membutuhkan. Selama ini usahawan terbatas pada kegiatan jual-beli bahan daur ulang seperti kertas, plastik, dan besi. Kegiatan ini perlu diperluas pada pemasaran kompos untuk keperluan pertanian dan pertamanan, sehingga membantu usaha rumah tangga dalam menghasilkan kompos. Bila mekanisme ini berjalan, maka pengkomposan pada sumber sampah tidak lagi dirasakan sebagai kewajiban, tetapi sudah merupakan bagian dari pekerjaan.

Hadirin yang dirahmati Allah.. amin..

Keterpaduan nonfisik lainnya yang tidak kalah penting ialah terpadu dalam pemberdayaan masyarakat. Banyak program unggul pemerintah telah gagal dilaksanakan disebabkan oleh lemahnya sumberdaya masyarakat. Hasil temuan dari penelitian saya pada saat penyusunan disertasi, menemukan terjadinya ketidakkonsistenan antara pengetahuan, sikap, dan manifestasi perilaku masyarakat dalam pengelolaan sampah. Pengetahuan yang tinggi tidak selalu diikuti oleh sikap yang tinggi, dan bahkan ditunjukkan dengan perilaku yang sangat rendah dalam pengelolaan sampah khususnya pengelolaan sampah rumah tangga. Untuk itu diperlukan sebuah program pemberdayaan masyarakat secara terpadu dan komprehensif. Dimulai dari revitalisasi kurikulum jalur pendidikan

formal yang ada dari tingkat pra sekolah hingga perguruan tinggi hendaknya mendukung program pemerintah dalam pengelolaan sampah. Berbagai program pemberdayaan masyarakat hendaknya juga ditempuh secara terpadu baik melalui jalur pendidikan formal, nonformal, dan juga informal. Berkaitan dengan program pemberdayaan masyarakat tersebut saya telah menemukan konsep pengelolaan sampah yang diharapkan merupakan materi pokok pada program pemberdayaan masyarakat baik melalui jalur pendidikan formal, non formal, ataupun informal. Konsep tersebut diharapkan diterapkan dalam kehidupan sehari-hari mulai dari tingkat sumber sampah baik rumah tangga, perkantoran, fasilitas umum, pasar, maupun industri. Konsep tersebut saya beri nama 6M.

Konsep 6M

Hadirin yang berbahagia..

6M, adalah suatu upaya pengelolaan sampah rumah tangga yang terdiri atas beberapa langkah yaitu mengurangi, menggunakan kembali, mengganti, memisahkan, mendaurulang, dan mengomposkan. **Mengurangi** berarti suatu upaya mengurangi jumlah sampah yang kita timbulkan; **Menggunakan kembali** berarti memakai atau memanfaatkan kembali sampah rumah tangga; **Mengganti** berarti mengganti jenis bahan kebutuhan rumah tangga tertentu dengan jenis bahan yang lain; **Memisahkan** berarti memisahkan sampah rumah tangga antara sampah basah dan sampah kering. yang sejenis; **Mendaurulang** berarti memanfaatkan kembali sampah rumah tangga dengan mengolahnya terlebih dahulu; **Mengomposkan** berarti suatu upaya mengolah sampah rumah tangga menjadi kompos.

Cara-cara mensukseskan 6M saya contohkan sebagai berikut.

1. Mengurangi

Cara mengurangi antara lain: (1) berbelanja lebih berhati-hati; (2) membuat lebih banyak makanan di rumah sebagai ganti membeli makanan jadi; (3) membuat hadiah dan kartu-kartu ucapan sendiri di rumah dengan memanfaatkan bahan-bahan sisa kegiatan kita sehari-hari, daripada membeli; (4) memperbaiki pakaian, mainan, peralatan, dan alat-alat daripada membeli baru; dan (5) menyewa daripada membeli jika memungkinkan.

Jika berbelanja cobalah mengikuti gagasan-gagasan berikut. (1) Bawalah tas, keranjang, atau kotak ketika berbelanja; (2) Bawalah daftar belanjaan. Belilah barang yang betul-betul diperlukan; (3) Hindari benda-benda dengan pembungkus yang berlebihan; (4) Pilihlah produk-produk yang dapat diisi ulang (contohnya ballpoint); (5) Jika membeli benda-benda berbungkus, pilihlah pembungkus yang terbuat dari bahan yang dapat didaurulang atau dapat digunakan kembali; (6) Belilah produk-produk yang terbuat dari bahan yang mudah didaurulang (contohnya kertas); (7) Jangan terlalu banyak membeli produk-produk yang mudah dapat dibuang seperti kertas tisu; (8) Jika ada berbagai ukuran yang tersedia, pilihlah ukuran yang paling besar yang dapat digunakan; dan (9) Tolaklah tas-tas plastik untuk pembelian satu barang saja.

2. Menggunakan kembali

Menggunakan kembali dapat ditempuh dengan cara: (1) gunakan kembali botol-botol plastik atau botol-botol gelas yang masih layak; (2) jika mempunyai banyak barang yang sudah tidak digunakan lagi, berikan kepada orang lain untuk menggunakan kembali; (3) gunakan kembali kertas-kertas yang telah digunakan pada satu sisinya untuk: kertas gambar bagi anak, draf surat, lembar belajar bagi anak, daftar belanjaan, pesan-pesan telepon, permainan anak, dan lain-lain; (4) berhati-hatilah dalam membuka amplop dan gunakan kembali; dan (5) gunakan kembali tas-tas plastik dan simpanlah untuk digunakan kembali pada lain waktu.

3. Mengganti

Gantilah pembungkus barang atau makanan dengan pembungkus yang dapat digunakan kembali, mudah didaurulang, atau dikomposkan, dan pisahkan pada saat memasukkan ke tempat sampah.

4. Memisahkan

Memisahkan berarti memisahkan sampah rumah tangga antara sampah basah dan sampah kering. Sampah basah adalah sampah yang mudah membusuk seperti sisamakanan

dan lainnya. Sampah kering adalah sampah yang tidak mudah membusuk seperti kertas, plastik, logam, gelas, karet, kain, baterai, dan sampah rumah tangga lain.

Cara-cara praktis pemisahan sampah rumah tangga adalah: (1) menyediakan dua tempat sampah, satu untuk sampah basah dan yang lain untuk sampah kering. Sangat disarankan untuk merancang almari kabinet di dapur yang dirancang untuk menunjang pemisahan sampah rumah tangga; (2) memisahkan antara sampah basah dan sampah kering pada saat memasak serta pada kegiatan sehari-hari; dan (3) sampah basah dimasukkan ke dalam tempat sampah basah dan sampah kering dimasukkan ke dalam tempat sampah kering.

5. Mendaurulang

Kegiatan memisahkan antara sampah basah dan sampah kering akan berarti memperlancar proses daurulang sampah kota, karena sampah yang akan didaurulang tidak tercampur aduk dengan sampah lainnya. Daurulang sampah merupakan kegiatan pemanfaatan sampah dengan proses tertentu. Daurulang meliputi daurulang sampah kertas, plastik, kaleng, gelas, dan lain-lain.

6. Mengomposkan

Pengomposan sampah rumah tangga dapat dilakukan bersamaan dengan pemadaman sampah basah. Sampah basah dimasukkan ke dalam lubang yang telah disediakan, dapat dicampur dengan sedikit tanah, dan diberi cacing tanah untuk mempercepat proses penguraian. Cacing tanah dapat diperoleh dari kebun sendiri atau membeli. Pengomposan juga dapat dilakukan tanpa menggunakan cacing tanah. Berbagai starter dapat diberikan pada proses pengomposan agar mempercepat penguraian sampah menjadi kompos. Starter tersebut dapat dibeli ataupun diproduksi sendiri secara teknik sederhana sehingga memungkinkan kemudahan dalam penerapannya. Setelah sampah terurai dan menjadi pupuk kompos, maka siap untuk dijual atau digunakan untuk memupuk tanaman di kebun sendiri.

Hadirin yang saya hormati,

Hasil penelitian saya (AI Muhdhar, 1998) menunjukkan bahwa karakter ibu-ibu rumah tangga di wilayah non-elit pedesaan berbeda dengan ibu-ibu rumah tangga di wilayah nonelit perkotaan, ataupun di wilayah elit dalam mengelola sampah. Timbulan sampah kertas terbesar berasal dari wilayah non-elit perkotaan, sedangkan timbulan sampah plastik terbesar berasal dari wilayah elit. Oleh karenanya saya menyusun berbagai sumber belajar yang sesuai dengan pola dan karakter tersebut, yaitu komik untuk masyarakat non-elit pedesaan, poster untuk masyarakat non elit perkotaan, dan leaflet untuk masyarakat elit.

Teknik penerapan pembudayaan 6M dari tingkat rumah tangga, diperlukan sebuah sosialisasi dan pendidikan masyarakat yang komprehensif. Untuk itu saya, AI Muhdhar (2002a) menyusun konsep model pendidikan kepada masyarakat dalam pengelolaan sampah rumah tangga khususnya di kota Surabaya metropolitan (Surabaya, Sidoarjo, Mojokerto, dan Gresik). Hasil penelitian dirangkum sebagai berikut.

Prinsip-Prinsip Pendidikan Masyarakat

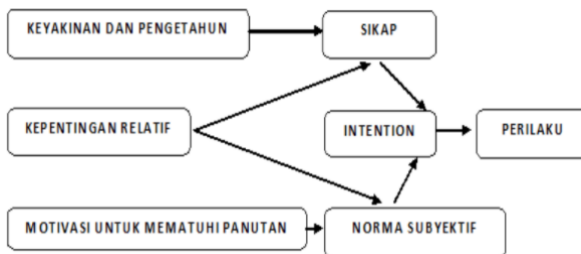
Hasil penelitian menunjukkan bahwa dalam rangka pendidikan kepada masyarakat diperlukan prinsip-prinsip pendidikan kepada masyarakat guna revitalisasi potensi-potensi masyarakat. Prinsip-prinsip tersebut ialah: (a) menumbuhkembangkan potensi masyarakat, (b) kontribusi masyarakat dalam pengelolaan sampah, (c) mengembangkan gotong royong, (d) bekerja bersama masyarakat, (e) program berbasis masyarakat, (f) kemitraan dengan organisasi masyarakat dan LSM, dan (g) desentralisasi.

Faktor-faktor yang Berpengaruh terhadap Keberhasilan Pengembangan Program Pendidikan kepada Masyarakat dalam Pengelolaan Sampah

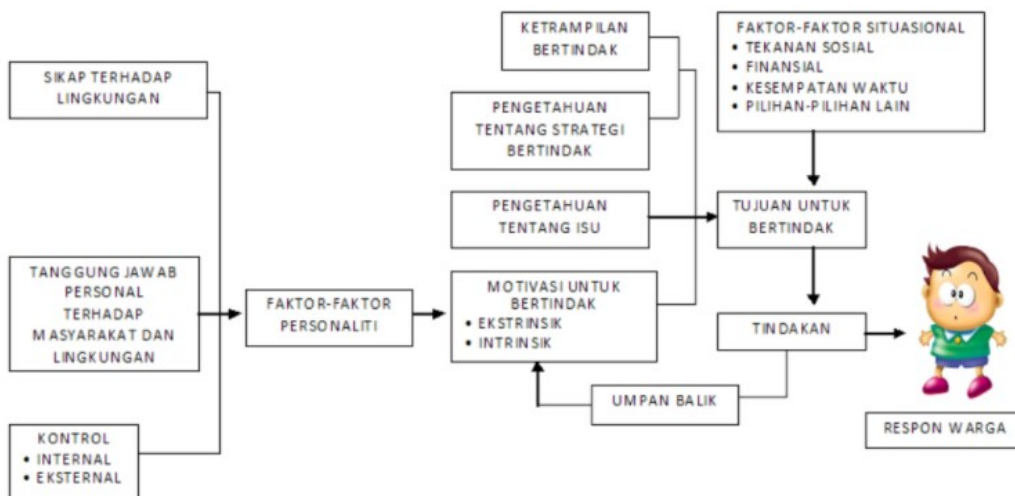
Hasil penelitian (AI Muhdhar, 2002a) menunjukkan bahwa dalam rangka pendidikan kepada masyarakat terdapat faktor-faktor yang mempengaruhi keberhasilan dalam program pengembangan

pendidikan yaitu: (1) faktor ekonomi, (2) faktor sosial, (3) faktor budaya, (4) faktor pengetahuan, dan (5) faktor sikap masyarakat.

Sehubungan dengan pengolahan sampah di rumah tangga, maka demoplot dan sosialisasi melalui berbagai forum dan media serta rentang waktu bertahap dan berkelanjutan akan memperkuat tahap “*keyakinan dan pengetahuan*” (Raven dan Rubin, 1983) (Gambar 1) atau tahap “*motivasi untuk bertindak*” (Armstrong, 1995) (Gambar 2).

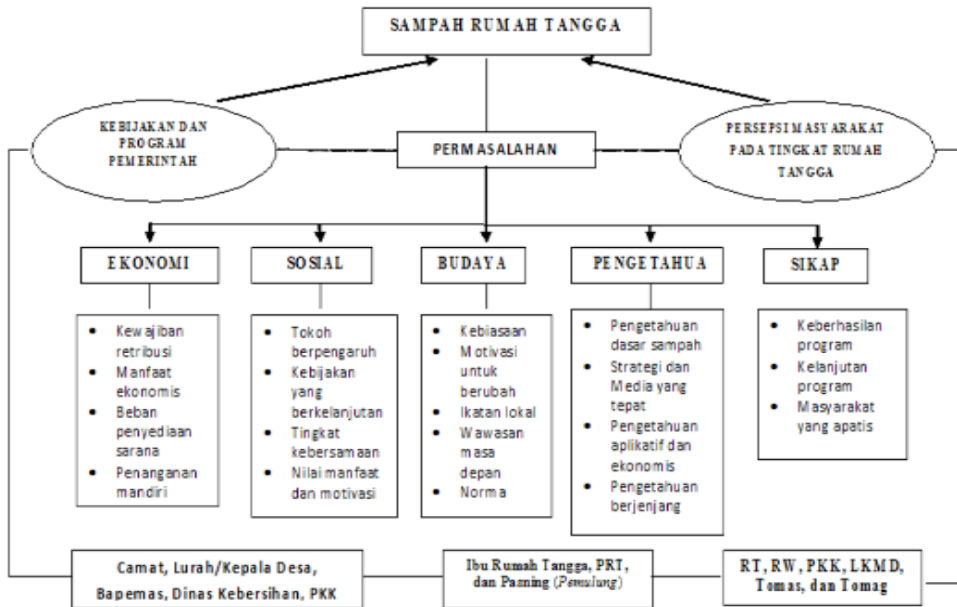


Gambar 1. Faktor-faktor Menentukan Perilaku dan Sikap (Raven & Rubin,1983)



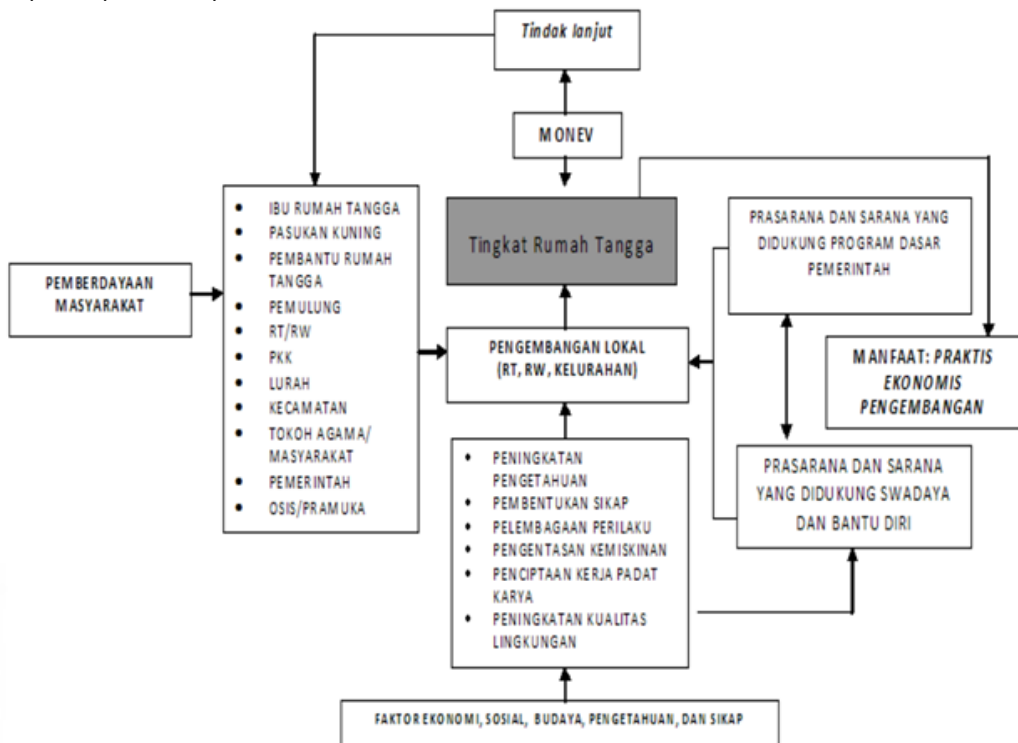
Gambar 2. Faktor-faktor Menentukan Perilaku Seseorang (Arsmtrong, 1995)

Gambaran Kerangka Model Pendidikan kepada masyarakat dapat dilihat pada Gambar 3. Berdasarkan data kualitatif di Surabaya, Sidorjo, Gresik, dan Mojokerto, sebagian besar masyarakat bergantung peran aktif dan bimbingan kelompok strategis di wilayahnya. Masyarakat kota, peran ibu rumah tangga, pembantu rumah tangga, Ketua RT, Ketua RW, Ketua Tim Penggerak PKK, dan kelompok akademisi masih sangat dominan. Masyarakat desa, para kepala desa atau lurah, RT, RW, LKMD dan sejenisnya masih sangat dominan. Oleh karena itu, sasaran program penanganan sampah dipilih menjadi tiga, yaitu: (1) sasaran umum 1 yang terdiri dari badan pemberdayaan masyarakat, dinas kebersihan, camat, dan lurah/kepala desa, serta PKK kota dan kecamatan, (2) sasaran umum 2 yang terdiri dari tokoh agama (tomag), tokoh masyarakat (tomas), BPD (desa), LKMD, PKK desa/kelurahan erta PKK RT/RW, dan (3) sasaran khusus yaitu ibu-ibu rumah tangga dan pembantu rumah tangga.



Gambar 3. Bagan Alir Model Identifikasi Permasalahan Sampah dalam Rangka Pendidikan Kepada Masyarakat (Al-Muhdhar, 2002)

Penyediaan sarana prasarana dari pemerintah diperlukan sebagai stimulan program penanganan sampah, dan program penguatan sikap serta perilaku mandiri dan bantu diri hendaknya mulai ditanamkan pada masyarakat. Secara garis besar pola strategi terpadu dalam penanganan sampah dapat dilihat pada Gambar 4.



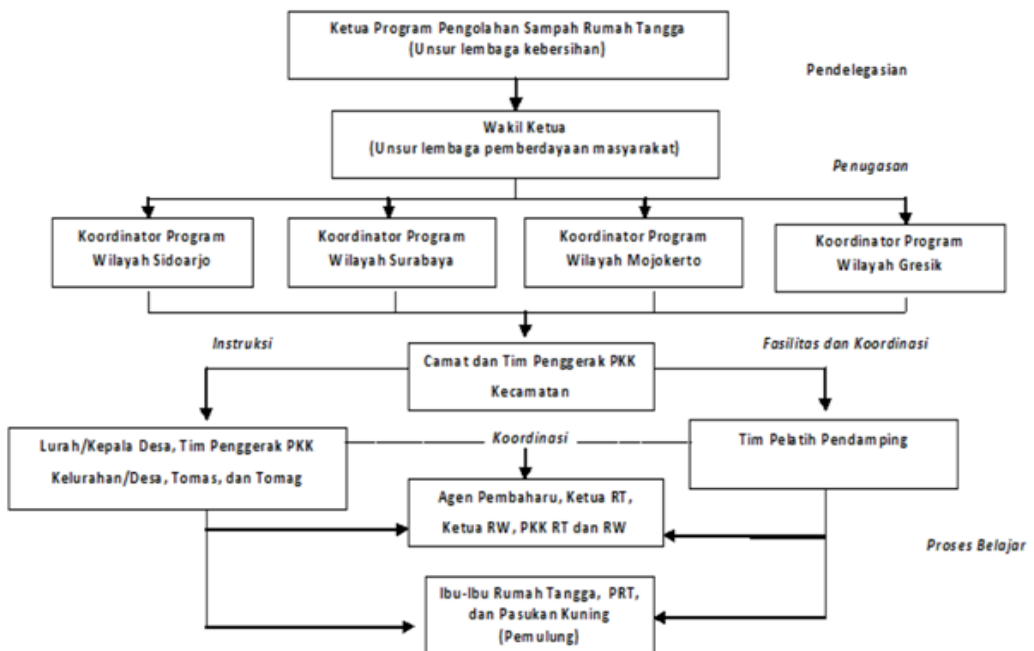
Gambar 4. Bagian Aliran Strategi Terpadu Penanganan Sampah Berdasarkan Pelibatan Komponen Pendukung dan Arah Pencapaian (Al Muhdhar, 2002)

Pelaksanaan Program

Bagan struktur organisasi beserta alir komando pelaksanaan program pemberdayaan masyarakat dalam pengelolaan sampah rumah tangga di Sidoarjo, Surabaya, Mojokerto, dan Gresik dapat diuraikan seperti tertera pada Gambar 5.

Strategi Pendidikan

Strategi pemberdayaan ditempuh melalui pola-pola pendidikan yang komprehensif, terpadu, bertahap, dan berkelanjutan dengan melibatkan berbagai komponen yang ada dalam masyarakat dan pemerintahan serta memaksimalkan prasarana dan sarana yang potensial, yang diakhiri dengan kegiatan *monitoring* dan evaluasi (*monev*). Strategi pemberdayaan masyarakat dalam pengelolaan sampah rumah tangga hendaknya mempehatikan hal-hal berikut. (1) proses penguatan kelembagaan dan kebijakan, (2) proses sosialisasi, dan (3) proses belajar baik secara mandiri maupun terbimbing.



Gambar 5. Bagian Alur Struktur Organisasi dan Alur Pelaksanaan Program Penanganan Sampah Rumah Tangga (Al-Muhdhar, 2002)

Hadirin yang berbahagia..

Hasil penelitian saya tersebut selanjutnya adalah sebagai berikut.

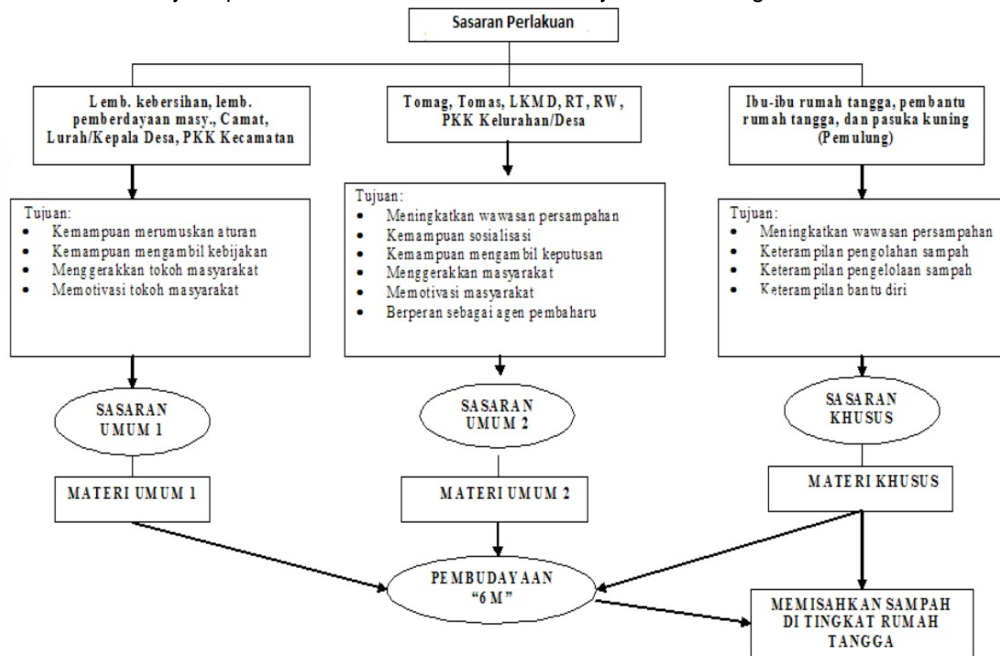
Materi Desain Model Pemberdayaan Masyarakat Melalui Pembudayaan “6M”

Materi pendidikan masyarakat lebih ditekankan pada kewenangan dan tanggung jawab pada setiap sasaran, baik pada sasaran yang berwenang untuk mengambil kebijakan maupun pada sasaran yang melaksanakan kebijakan. Bagan Alir Model Pemberdayaan Masyarakat Berdasarkan Paket Materi per Sasaran dapat dilihat pada Gambar 6.

Hadirin yang berbahagia,

Pada tahun 2009, 2010, dan 2011 saya (Al Muhdhar) bersama ibu Dra. Hj. Susilowati, M.S. telah berhasil mengembangkan 6 DVD 6M tentang pendidikan kepada masyarakat dalam pengelolaan sampah rumah tangga melalui jalur pendidikan formal dan nonformal. Hasil pengembangan adalah produk 6 DVD 6M meliputi: DVD Mengurangi, DVD Menggunakan kembali,

DVD Mengganti, DVD Memisahkan, DVD Mendaurulang, dan DVD Mengomposkan. Hasil ujicoba 6 DVD 6M melalui jalur pendidikan formal dan nonformal dijabarkan sebagai berikut.



Gambar 6. Bagan Alir Model Pendidikan Masyarakat Berdasarkan Materi pr Sasaran (Al Muhdhar, 2002)

Pemahaman Siswa Dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga *Pemahaman Siswa SD/MI dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga setelah Diberikan Tindakan DVD 6M*

Ujicoba Lapangan Skala Kecil melalui Jalur Pendidikan Formal telah dilaksanakan pada siswa kelas 5A SDN Percobaan 2. Hasil ujicoba yang telah dirancang menggunakan Penelitian Tindakan Kelas dengan model pembelajaran *Project* sederhana tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut. Berdasarkan Penilaian Acuan Patokan (PAP) IKIP MALANG nilai rata-rata siswa pada saat *pre test* (65) dan *post test* (67) tergolong cukup. Pada saat *pre test* yang mencapai KKK adalah 60% sedangkan pada saat *post test* adalah 63%. Dengan kata lain *E-Media DVD 6M* tergolong cukup dapat meningkatkan pemahaman siswa tentang pengelolaan sampah rumah tangga khususnya pada siswa kelas 5A di SDN Percobaan 2 Malang. Peningkatan yang cukup dari pemahaman siswa kelas

5A SDN Percobaan 2 tentang 6M tersebut dimungkinkan disebabkan oleh hal-hal berikut:

(1) *E-Media DVD 6M* berisi materi yang didominasi oleh orang dewasa, (2) Siswa SD memerlukan penguatan pemahaman yang lebih sering dan secara terus-menerus, (3) Materi *E-Media DVD 6M* kurang tepat untuk pemahaman siswa SD, dan (4) *E-Media DVD* belum di *dubbing* (pengisian suara) sehingga kurang menarik minat siswa SD. Dengan demikian disarankan untuk membuat *E-Media DVD 6M* yang lebih tepat untuk anak usia SD dan *dubbing* yang diberikan menggunakan bahasa yang lugas dan tepat untuk semua tingkat pendidikan.

Hasil analisis data terhadap pemahaman siswa kelas 5B MIN Malang I menunjukkan bahwa terjadi kecenderungan kenaikan rata-rata nilai pemahaman siswa antara sebelum diberi tindakan (74) dengan setelah diberi tindakan (75). Namun ketuntasan kelasikalnya tetap yaitu 81%. Ketuntasan kelasikal tetap tersebut dimungkinkan disebabkan sebelum tindakan ketuntasan kelasikal awal sudah tinggi.

Kecenderungan terjadinya peningkatan pemahaman siswa SD/MI melalui penerapan *E-Media DVD 6M* didukung oleh hasil penelitian lain (Suharmanto dalam Baisa, 2010a dan 2010b) yang menyatakan bahwa pembelajaran menggunakan media elektronik (komputer) berpengaruh lebih pada peningkatan kemampuan kognitif siswa daripada pembelajaran menggunakan media Lembar Kerja Siswa (LKS). Anak yang diberi pembelajaran dengan media elektronik (berbasis *Web*) oleh

Baisa (2010a dan 2010b) ditemukan memiliki kemampuan kognitif 14,33% lebih tinggi daripada yang diberi pembelajaran dengan LKS.

Pemahaman Siswa SMP/MTs dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga setelah Diberikan Tindakan DVD 6M

Ujicoba dengan model pembelajaran *Problem Based Learning* telah berhasil dilaksanakan pada siswa kelas 8J SMPN 2 Malang dan siswa kelas 7H MTsN Malang I. Hasil ujicoba dijelaskan sebagai berikut. Nilai seluruh siswa, nilai rata-rata, serta ketuntasan klasikal pemahaman siswa kelas 8J SMPN 2 Malang dapat dijelaskan sebagai berikut. Terjadi kecenderungan peningkatan nilai rata-rata pemahaman siswa kelas 8J SMPN 2 Malang antara sebelum dan sesudah diberi tindakan *E-Media DVD 6M*. Ditinjau dari ketuntasan klasikal, dapat dikatakan bahwa *E-Media DVD 6M* dapat meningkatkan ketuntasan klasikal siswa kelas 8J SMPN 2 Malang tentang pemahamannya dalam pengelolaan sampah rumah tangga. Jika dibandingkan dengan ketuntasan klasikal di SD/MI maka dapat dikatakan bahwa *E-Media DVD 6M* lebih tepat digunakan untuk siswa SMP/MTs dalam meningkatkan pemahaman siswa tentang pengelolaan sampah rumah tangga. Dengan demikian perlu dipikirkan bentuk media yang lebih tepat untuk anak usia SD/MI dalam meningkatkan pemahamannya tentang pengelolaan sampah rumah tangga. Sebagai contoh media permainan, simulasi, dan lain-lain.

Pemahaman siswa MTsN Malang I dalam pengelolaan sampah rumah tangga menunjukkan nilai tertinggi pada saat *pre test* adalah 83 dan meningkat sebesar 17% menjadi 97 pada saat *post test*. Nilai terendah pada saat *pre test* adalah 74 sedangkan pada saat *post test* adalah 75 serta rata-rata kelas pada saat *pre test* adalah 74 dan rata-rata pada saat *post test* cenderung meningkat menjadi 77. Dari data tersebut dapat dijelaskan bahwa terjadi peningkatan nilai tertinggi dan peningkatan nilai terendah, serta peningkatan nilai rata-rata. Berdasarkan PAP IKIP MALANG, maka Nilai rata-rata *pretest* tergolong cukup dan nilai rata-rata *post test* adalah tergolong tinggi. Dengan kata lain *E-Media DVD 6M* dapat meningkatkan pemahaman siswa kelas 7H MTsN Malang I tentang pengelolaan sampah rumah tangga.

Sangat tingginya peningkatan ketuntasan klasikal tersebut dimungkinkan disebabkan beberapa hal berikut. (1) Materi dalam *DVD 6M* mudah dipahami dan mudah diterapkan; (2) Model pembelajaran yang dipilih guru yaitu *Problem Based Learning* diberikan dengan berbagai langkah yang menuntut siswa aktif berpikir, bertanya apa? Mengapa? Siapa? Dan bagaimana? Dengan demikian dapat berpengaruh dalam penguatan penanaman konsep yang diperoleh dari *DVD 6M* tersebut. Jadi perpaduan antara *DVD 6M* yang dikembangkan dalam penelitian ini dengan model pembelajaran inovatif mampu meningkatkan pemahaman siswa tentang pengelolaan sampah rumah tangga secara efektif; dan (3) kemungkinan berikutnya adalah para pelaku di dalam *E-Media DVD 6M* kebanyakan adalah remaja yang usia dengan para siswa MTs. Kriteria Ketuntasan Klasikal (KKK) adalah 70%, sedangkan Kriteria Ketuntasan Minimal adalah 70. Pada saat *pre test* yang mencapai KKK adalah 40% dan meningkat tajam pada saat *post test* menjadi 96%.

Peningkatan pemahaman siswa SMP/MTs tersebut dimungkinkan juga disebabkan karena *E-Media DVD 6M* memberikan manfaat seperti dinyatakan oleh Sadman (1984 dalam Fandi, 2008) sebagai berikut: (1) memperjelas penyajian pesan, (2) mengatasi keterbatasan ruang, waktu, dan daya indera, (3) dapat mengatasi sifat pasif siswa, dan (4) membantu guru menyampaikan materi pelajaran. Dalam kaitannya dengan penggantian guru Baisa (2010a dan 2010b) menyatakan bahwa agar komunikasi antara guru dan siswa dapat berlangsung dengan baik dan informasi yang disampaikan guru dapat diterima siswa, guru dapat menggunakan media pembelajaran. Media pembelajaran tersebut antara lain adalah *E-Media DVD 6M*.

Pemahaman Siswa SMA/MA dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga setelah Diberikan Tindakan DVD 6M

Penelitian Tindakan Kelas dengan menerapkan perpaduan model pembelajaran *Learning Cycle* dengan *Group Investigation* berbantuan *DVD 6M* telah dilakukan dengan hasil sebagai berikut. Pemahaman siswa kelas X-B2 SMA Negeri 2 Malang dalam pengelolaan sampah rumah tangga dapat dijelaskan bahwa rata-rata nilai pemahaman awal siswa kelas X-B2 adalah 77 dengan

ketuntasan klasikal sebesar 95%. Sedangkan nilai rata-rata pemahaman setelah tindakan dengan *E-Media DVD 6M* meningkat menjadi 82 dengan ketuntasan klasikal sebesar 100%. Dari nilai rata-rata sebelum dan sesudah tindakan terjadi kecenderungan peningkatan hanya sebesar 1%. Kecilnya peningkatan nilai rata-rata tersebut disebabkan karena nilai rata-rata awal yang dimiliki siswa sudah tinggi yaitu 77. Ketuntasan klasikal awal yang dicapai oleh siswa kelas X-B2 SMAN 2 Malang juga tergolong sangat tinggi yaitu 95%, dengan demikian peningkatan yang dibutuhkan untuk bisa dicapai untuk mencapai ketuntasan klasikal 100% hanya kecil. Berdasarkan PAP IKIP MALANG nilai rata-rata *pre test* dapat digolongkan tinggi sedangkan pada *post test* tergolong tinggi. Dengan kata lain *DVD E-Media DVD 6M* tergolong mampu meningkatkan pemahaman siswa tentang pengelolaan sampah rumah tangga di SMA Negeri 2 Malang.

Tingginya ketuntasan klasikal awal pada siswa kelas X-B2 SMAN 2 Malang menunjukkan bahwa pemahaman siswa tentang pengelolaan sampah rumah tangga tergolong tinggi. Tingginya pemahaman awal dapat disebabkan oleh guru pelaksana penelitian tindakan kelas yaitu Rifngatun, S.Pd beserta guru Biologi lain telah sering terlibat sebagai peserta pelatihan persampahan di kota Malang. Terbukti dari pelatihan yang pernah diikuti mereka di Universitas Negeri Malang yaitu Pelatihan pengelolaan sampah rumah tangga melalui pembudayaan 6M bagi guru-guru Biologi se Kotamadia Malang tahun 2000. Pelatihan keterampilan daur ulang sampah di Surabaya juga telah diikutinya. Sistem pendidikan di SMAN 2 Malang juga mendukung tingginya pemahaman siswa tentang pengelolaa sampah karena telah termasuk sekolah Adiwiyata.

Tingginya nilai tersebut dimungkinkan juga disebabkan: (1) pemanfaatan *E-Media DVD 6M* sebagai media pemahaman serta sosialisasi pengelolaan sampah rumah tangga bagi siswa SMA Negeri 2 Malang cukup efektif, (2) para siswa kelas X-B2 SMA Negeri 2 Malang telah menyadari tentang pentingnya pengelolaan sampah rumah tangga sebagai salah satu langkah yang tepat guna membantu tugas pemerintah daerah menjaga kebersihan lingkungan.

Pemahaman siswa Madrasah Aliyah Negeri 3 Malang dalam pengelolaan sampah rumah tangga setelah diberikan tindakan dengan model pembelajaran *Project* dipadu dengan *Think Pair Share* berbantuan *DVD 6M* dapat diuraikan sebagai berikut. Nilai tertinggi pada saat *pre test* adalah 63, sedangkan nilai tertinggi pada saat *post test* adalah 24 lebih tinggi dari *pre test* yaitu 87. Nilai terendah pada saat *pre test* adalah 20 sedangkan pada saat *post test* adalah 67 dengan rata-rata kelas pada saat *pre test* adalah 41 dan rata-rata pada saat *post test* adalah 76. Berdasarkan data tersebut dapat dijelaskan bahwa terjadi peningkatan nilai tertinggi dan peningkatan nilai terendah, serta peningkatan nilai rata-rata kelas. Berdasarkan PAP IKIP MALANG nilai rata-rata *pre test* dapat digolongkan sangat rendah sedangkan pada *post test* digolongkan tinggi. Dengan kata lain *E-Media DVD 6M* memiliki efektivitas tergolong tinggi dalam meningkatkan pemahaman siswa tentang pengelolaan sampah rumah tangga di Madrasah Aliyah Negeri 3 Malang.

Berdasarkan PAP IKIP Malang, ketuntasan klasikal awal sebesar 0% meningkat tajam menjadi 96% setelah tindakan. Tingginya peningkatan ketuntasan klasikal tersebut didukung oleh penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa latar belakang pendidikan berpengaruh terhadap pemahaman masyarakat tentang pengelolaan sampah rumah tangga (Al Muhdhar, 2003c). Madrasah Aliyah merupakan jenjang paling tinggi di antara subyek penelitian ini. Tingginya peningkatan tersebut juga dimungkinkan disebabkan: (1) pemanfaatan *E-Media DVD 6M* sebagai media pemahaman serta sosialisasi pengelolaan sampah rumah tangga bagi siswa Madrasah Aliyah Negeri 3 Malang sangat efektif, (2) Para siswa menerima pengetahuan tentang berbagai cara pengelolaan sampah baik basah maupun kering melalui pelajaran biologi dan lingkungan hidup dengan bukti-bukti nyata, aktual, dan mudah dipahami siswa, dan (3) Para siswa mengerjakan tugas sekolah yang terkait dengan pengelolaan sampah baik sampah basah maupun sampah kering; (4) *DVD 6M* yang ditayangkan mampu menggali pengetahuan dan menggugah sikap siswa sehingga konsep yang dibawa dapat tertanam kuat dalam pikiran siswa. Didukung oleh pemilihan model pembelajaran oleh guru Biologi Drs. Sukri, M.Pd yang pernah terlibat dalam pelatihan sampah sebelumnya. Jabatan sebagai Wakil Kepala Sekolah bidang Kesiswaan yang pernah diampu memberikan banyak pengalaman dalam mendidik siswa.

Dengan demikian pemilihan metode *project* yang dipadu dengan *Think Pair Share* merupakan langkah inovatif sehingga media yang digunakan dapat bermanfaat untuk mencapai ketuntasan belajar siswa.

Keberhasilan penerapan tindakan menggunakan *E-Media DVD 6M* dalam meningkatkan pemahaman siswa SMA/MA didukung oleh Sadiman (1984 dalam Fandi, 2008) yang menyatakan bahwa keberadaan media pembelajaran akan mempermudah guru dalam menyampaikan materi, sehingga siswa akan lebih mudah dalam menerima materi pelajaran. Pemanfaatan media audio visual juga bermanfaat untuk dapat menghadirkan objek yang tidak bisa dijangkau oleh siswa. Melalui *E-Media DVD 6M* siswa dapat melihat kondisi beberapa Lahan Pengolahan Akhir sampah (yang biasa disebut sebagai Lahan Pembuangan Akhir sampah) dari berbagai kota metropolitan dan kota besar di Indonesia. Dengan demikian diharapkan dapat mempermudah pemahaman siswa tentang pengelolaan sampah yang baik. Peningkatan pemahan siswa SMA/MA setelah diberi pembelajaran menggunakan *E-Media DVD 6M* juga selaras dengan hasil penelitian lain yang menyatakan bahwa terjadi peningkatan tingkat pengetahuan siswa SMA/MA antara sebelum dan setelah diberi pembelajaran menggunakan multimedia pengelolaan sampah (Setyowati, 2011).

Keterampilan Siswa dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga setelah Diberikan Tindakan DVD 6M

Keterampilan Siswa SD/MI dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga setelah Diberikan Tindakan DVD 6M

Keterampilan siswa kelas 5A SDN Percobaan 2 Malang dalam pengelolaan sampah rumah tangga dijamin melalui pengisian *checklist* keterampilan dalam pengelolaan sampah. Penjarangan informasi tentang keterampilan sesudah tindakan dilaksanakan setelah siswa memiliki waktu untuk mengendapkan pengetahuannya dan memiliki waktu cukup untuk menerapkannya dalam kehidupan sehari-hari siswa. Hasil analisis keterampilan siswa dalam pengelolaan sampah rumah tangga sebelum dan sesudah tindakan dijelaskan sebagai berikut. Hampir seluruh siswa dalam menerapkan 6M mendapatkan nilai tertinggi (100). Untuk ketrampilan memisahkan, mendaurulang, dan mengomposkan baik pada saat sebelum maupun sesudah tindakan memiliki nilai rata-rata tergolong sangat tinggi yaitu di atas 95 (PAP IKIP Malang). Sangat tingginya nilai rata-rata untuk keterampilan memisahkan, mendaurulang, dan mengomposkan tersebut menunjukkan bahwa untuk tiga kegiatan tersebut para siswa SD Negeri Percobaan 2 Malang telah memahami sekali dan bahkan telah pula melakukan dan mempraktikkannya di sekolah dan dimungkinkan juga di rumah mereka masing-masing. Sedangkan untuk keterampilan mengurangi, menggunakan kembali, dan mengganti nilai terendah siswa pada saat *pre test* adalah 25 dan nilai tertinggi adalah 100, nilai terendah pada saat *post test* adalah 50 dan nilai tertinggi adalah 100. Berdasarkan data tersebut terjadi peningkatan dari nilai terendah dari 25 (sangat rendah) menjadi 50 (rendah).

Berdasarkan PAP IKIP MALANG menunjukkan bahwa nilai rata-rata kelas menunjukkan peningkatan dari 79 kriteria tinggi menjadi 87 kriteria sangat tinggi, hal ini kemungkinan disebabkan: (1) *E-Media DVD 6M* sangat efektif untuk meningkatkan keterampilan siswa SD Negeri Percobaan 2 Malang dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga, (2) Siswa SD Negeri Percobaan 2 Malang sebelum *pre test* telah mempunyai pemahaman yang cukup dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga khususnya 3 M (Memisahkan, Menggunakan kembali, dan Mengganti) sehingga dengan tambahan 3 M dari *E-Media DVD 6M* makin menambah pengetahuan serta pengalaman mereka dalam pengelolaan sampah rumah tangga.

Model pembelajaran yang dipilih guru juga dimungkinkan berpengaruh meningkatkan motivasi belajar siswa sehingga memiliki ketertarikan tinggi terhadap materi yang sedang dipelajari. Pembelajaran *Project* dengan mengajak siswa membuat mainan topeng dari kertas koran, dengan bahan balon karet, menjadikan siswa memiliki minat tinggi untuk mengikuti pelajaran. Kerjabakti di sekolah untuk membersihkan halaman sekolah, sambil mengumpulkan sampah di tempat terpisah merupakan strategi praktis menjadikan siswa mengalami langsung dan menerapkannya. Setelah

praktik pemisahan sampah, siswa menerapkan teknik pengomposan di sekolah dengan metode praktis, tidak menggunakan bahan kimia yang mungkin kurang aman untuk anak seusia SD.

Hasil analisis terhadap nilai rata-rata keterampilan siswa kelas 5B MIN Malang I dapat dijelaskan sebagai berikut. Terjadi peningkatan nilai rata-rata keterampilan siswa kelas 5B dalam pengelolaan sampah rumah tangga sebelum diberi tindakan (47 tergolong sangat rendah) dengan sesudah diberi tindakan *E-Media DVD 6M* (68 tergolong cukup). Dengan kata lain penerapan *E-Media DVD 6M* dapat meningkatkan keterampilan siswa kelas 5B MIN Malang I dalam pengelolaan sampah rumah tangga. Dibandingkan dengan perannya terhadap peningkatan pemahaman, ternyata *E-Media DVD 6M* lebih berdampak baik terhadap peningkatan keterampilan siswa dalam pengelolaan sampah rumah tangga.

Keterampilan Siswa SMP/MTs dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga setelah Diberikan Tindakan DVD 6M

Hasil analisis terhadap nilai keterampilan menunjukkan bahwa siswa kelas 8J SMPN 2 Malang. Hasil rata-rata nilai keterampilan siswa kelas 8J sebelum tindakan adalah 50 tergolong sangat rendah, meningkat menjadi 63 setelah tindakan penerapan *E-Media DVD 6M*. Artinya penerapan *E-Media DVD 6M* dapat meningkatkan keterampilan siswa kelas 8J SMPN 2 Malang dalam pembudayaan 6M pengelolaan sampah rumah tangga. Secara keseluruhan ditinjau dari tingkatan pendidikan, pada pendidikan dasar *E-Media DVD 6M* berperan lebih baik dalam meningkatkan keterampilan daripada pemahaman siswa SD/MI dan SMP/MTs dalam pengelolaan sampah rumah tangga.

Berdasarkan hasil analisis data dapat dijelaskan hal-hal sebagai berikut. Nilai rata-rata keterampilan sebelum tindakan dengan *E-Media DVD 6M* adalah 45 (tergolong sangat rendah), sedangkan keterampilan sesudah tindakan adalah 61 (tergolong cukup). Berarti terjadi peningkatan sebesar 35%. Dari data tersebut menunjukkan bahwa *E-Media DVD 6M* telah mampu meningkatkan keterampilan siswa MTs Negeri Malang I menjadi lebih baik dalam pengelolaan sampah rumah tangga. Untuk mengatasi kurang idealnya nilai rata-rata keterampilan dan pengelolaan sampah dapat disarankan sebagai berikut: (1) perlu adanya muatan lokal pada mata pelajaran yang terkait lingkungan hidup khususnya tentang pengelolaan sampah rumah tangga dan materi 6 M; (2) perlu dilakukan praktik lapangan yang dijalankan setiap hari secara rutin oleh para siswa MTs Negeri Malang I dalam menerapkan 6M di sekolah dan di rumah; (3) pemanfaatan *software E-Media DVD 6M* perlu diprogram dalam kurikulum baik secara monolitik sebagai muatan lokal maupun terintegrasi pada mata pelajaran IPA. Pada saat sebelum tindakan, hanya kegiatan M1 yaitu mengurangi dan M2 yaitu menggunakan kembali yang mencapai nilai diatas nilai rata-rata kelas yaitu secara berturut-turut sebesar 73, 71, dan 50. Setelah *tindakan* ternyata keterampilan siswa meningkat menjadi M1 sebesar 92, M2 sebesar 92, dan M3 sebesar 77. Fakta tersebut menunjukkan bahwa *E-Media DVD 6M* mampu meningkatkan keterampilan siswa dalam pengelolaan sampah rumah tangga khususnya M1, M2, dan M3. Untuk M4 yaitu memisahkan, M5 yaitu mendaurulang, dan M6 yaitu mengomposkan juga terjadi peningkatan nilai rata-rata sebelum dan sesudah tindakan. Namun nilai capaiannya masih rendah. Dengan kata lain *E-Media DVD 6M* cenderung dapat meningkatkan keterampilan siswa kelas 7H MTs Negeri Malang I. Disarankan kepada guru IPA untuk secara intensif memberikan keterampilan 6M baik secara terintegrasi maupun secara monolitik.

Keterampilan Siswa SMA/MA dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga setelah Diberikan Tindakan DVD 6M

Subyek penelitian tindakan kelas di SMAN 2 adalah kelas X-B2. Hasil analisis terhadap nilai keterampilan siswa sebelum dan sesudah tindakan tertera dijelaskan sebagai berikut. Rata-rata nilai keterampilan siswa kelas X-B2 SMAN 2 Malang dalam pengelolaan sampah rumah tangga sebelum tindakan adalah sebesar 76 (tergolong tinggi). Sesudah tindakan dengan pemanfaatan *E-Media DVD 6M* rata-rata tersebut meningkat menjadi 80 (tergolong tinggi). Dengan kata lain *E-Media DVD 6M* cenderung meningkatkan keterampilan siswa SMAN 2 Malang dalam pengelolaan sampah rumah tangga.

Keterampilan siswa MAN 3 Malang sebelum dan sesudah tindakan menunjukkan bahwa nilai rata-rata kelas per kegiatan M1, M2, M3, M4 yaitu mengurangi, menggunakan kembali, mengganti, dan memisahkan pada saat sebelum tindakan pada umumnya di atas rata-rata kelas, sedangkan kegiatan M4, dan M5 yaitu memisahkan dan mengomposkan belum banyak dilakukan oleh siswa. Pada saat sesudah tindakan nilai rata-rata kelas untuk masing-masing kegiatan umumnya naik secara nyata. Berdasarkan PAP IKIP MALANG dapat disimpulkan bahwa nilai rata-rata kelas pada saat sebelum tindakan adalah 65 tergolong cukup dan setelah tindakan adalah 76 tergolong tinggi. Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa perubahan keterampilan siswa dari cukup menjadi tinggi membuktikan bahwa *E-Media DVD 6M* dapat meningkatkan keterampilan siswa kelas X-Bilingual MAN 3 Malang dalam pengelolaan sampah rumah tangga. Peningkatan tersebut dimungkinkan disebabkan: (1) *E-Media DVD 6M* berisi contoh-contoh sederhana yang dapat dipahami dan dilaksanakan dengan mudah oleh para siswa MAN 3 Malang, (2) *E-Media DVD 6M* diperagakan oleh anak-anak muda yang mudah ditiru oleh kalangan siswa MAN 3 Malang, (3) Perpaduan antara model pembelajaran *Project* dan *Think Pair Share* menuntut siswa menyimak betul isi tayangan *DVD* tersebut, sebab siswa dituntut menjelaskan kepada teman lain di kelas tentang isi *DVD 6M*. Dengan demikian pengetahuan menjadi tinggi. Tingginya pengetahuan dimungkinkan berpengaruh meningkatkan sikap dan keterampilan siswa dalam pengelolaan sampah rumah tangga. Disarankan *E-Media DVD 6M* perlu disosialisasikan secara lebih luas di sekolah-sekolah yang lain. Diperlukan dukungan dari Pemerintah Daerah (Kota, Kabupaten, dan Provinsi) untuk mensosialisasikan *E-Media DVD 6M* di Kota, dan Kabupaten yang lain.

Secara keseluruhan hasil penelitian penerapan *E-Media DVD 6M* dalam meningkatkan pemahaman dan keterampilan siswa pada jalur pendidikan formal SD/MI, SMP/MTs, dan SMA/MA dirangkum pada Tabel 1 dan 2. Dari Tabel 1 dan 2 dapat disimpulkan bahwa terdapat kecenderungan peningkatan rata-rata nilai pemahaman dan keterampilan siswa pada jalur pendidikan formal SD/MI, SMP/MTs, dan SMA/MA setelah diberi tindakan penerapan *E-Media DVD 6M*. Peningkatan terhadap rata-rata nilai pemahaman siswa tertinggi terjadi pada siswa MAN 3 Malang sedangkan peningkatan nilai rata-rata keterampilan siswa tertinggi terjadi pada siswa MTsN Malang I.

Tabel 1. Rata-rata Nilai Pemahaman Sebelum dan Sesudah Tindakan pada Jalur Pendidikan Formal

| No | Lembaga Pendidikan | Rata-Rata Nilai Pemahaman | | Peningkatan Rata-rata Nilai |
|----|--------------------|---------------------------|-----------|-----------------------------|
| | | Sebelum | Sesudah | |
| 1 | SDNP 2 Malang | 65 Cukup | 67 Cukup | 3% |
| 2 | MIN Malang I | 74 Tinggi | 75 Tinggi | 2% |
| 3 | SMPN 2 Malang | 74 Tinggi | 77 Tinggi | 4% |
| 4 | MTsN Malang I | 69 Cukup | 83 Tinggi | 20% |
| 5 | SMAN 2 Malang | 77 Tinggi | 82 Tinggi | 7% |
| 6 | MAN 3 Malang | 41 Sangat Rendah | 76 Tinggi | 85% |

Tabel 2. Rata-rata Nilai Keterampilan Sebelum dan Sesudah Tindakan pada Jalur Pendidikan Formal

| No | Lembaga Pendidikan | Rata-Rata Nilai Keterampilan | | Peningkatan Rata-rata Nilai |
|----|--------------------|------------------------------|------------------|-----------------------------|
| | | Sebelum | Sesudah | |
| 1 | SDNP 2 Malang | 79 Tinggi | 87 Sangat Tinggi | 10% |
| 2 | MIN Malang I | 50 Rendah | 63 Cukup | 26% |
| 3 | SMPN 2 Malang | 52 Rendah | 54 Rendah | 4% |
| 4 | MTsN Malang I | 45 Sangat Rendah | 61 Cukup | 36% |
| 5 | SMAN 2 Malang | 76 Tinggi | 82 Tinggi | 8% |
| 6 | MAN 3 Malang | 60 Cukup | 67 Cukup | 12% |

Pemahaman Masyarakat dari Kelompok PKK RT, RW, Kelurahan, dan Kecamatan dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tanggasetelah Diberikan Tindakan DVD 6M

Pemahaman Ibu-ibu Perwakilan PKK RT, RW, Kelurahan, Kecamatan dan Kota di Kelurahan Karang Besuki dalam Pengelolaan Sampah RumahTangga setelah Diberikan Tindakan DVD 6M

Pemahaman Ibu-ibu Perwakilan PKK RT, RW, Kelurahan, Kecamatan, dan Kota di Kelurahan Karang Besuki dalam pengelolaan sampah Rumah Tangga dijelaskan sebagai berikut. Nilai tertinggi sebelum tindakan adalah 70, sedangkan nilai tertinggi sesudah tindakan adalah 16% lebih tinggi dari sebelumnya yaitu 93. Nilai rata-rata kelompok sebelum tindakan adalah 56 dan rata-rata sesudah tindakan adalah 65. Berdasarkan data tersebut dapat dijelaskan bahwa terjadi peningkatan nilai tertinggi serta peningkatan nilai rata-rata. Berdasarkan PAP IKIP MALANG nilai rata-rata pemahaman masyarakat kelompok PKK RT, RW, Kelurahan, Kecamatan, dan Kota tergolong rendah dan terjadi peningkatan sesudah tindakan menggunakan *E-Media DVD 6M* menjadi tergolong cukup. Dengan kata lain *Software DVD E-Media 6M* tergolong cukup dapat meningkatkan pemahaman ibu-ibu perwakilan PKK RT, RW, Kelurahan, Kecamatan, dan Kota di Kelurahan Karang Besuki tentang pengelolaan sampah rumah tangga. Cukupnya nilai tersebut dimungkinkan disebabkan: (1) pemanfaatan *software DVD E-Media 6M* sebagai media pemahaman serta sosialisasi pengelolaan sampah rumah tangga bagi ibu-ibu perwakilan PKK RT, RW, Kelurahan, dan Kecamatan di Kelurahan Karangbesuki cukup efektif, (2) Ibu-ibu perwakilan PKK di Kelurahan Karang Besuki ini sudah dapat memahami *software DVD E-Media 6M* sebagai bentuk media sosialisasi dalam pengelolaan sampah rumah tangga yang efektif. Pada sebelum tindakan, para ibu-ibu perwakilan PKK RT, RW, Kelurahan, Kecamatan, dan Kota di kelurahan Karang Besuki yang mencapai KKK sebesar 4% meningkat tajam sesudah tindakan menjadi sebesar 56%.

Pemahaman Ibu-ibu PKK RW Lingkungan Bukit Cemara Tidar di Kelurahan Karang Besuki Kota Malang dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga setelah Diberikan Tindakan DVD 6M

Uji coba produk *E-Media DVD 6M* juga diminta oleh masyarakat Ibu-ibu PKK RW Lingkungan Bukit Cemara Tidar, Kelurahan Karang Besuki, kota Malang. Nilai pemahaman sebelum dan sesudah tindakan dalam pengelolaan sampah Rumah Tangga dapat dijelaskan sebagai berikut. Nilai tertinggi pada saat sebelum tindakan adalah 87, sedangkan nilai tertinggi pada sesudah tindakan adalah 100. Rata-rata kelas pada saat sebelum tindakan adalah 56 dan rata-rata pemahaman masyarakat kelompok PKK RW Lingkungan Bukit Cemara Tidar sesudah tindakan adalah 65, meningkat sebesar 37%. Berdasarkan data tersebut dapat dijelaskan bahwa terjadi peningkatan nilai tertinggi, serta peningkatan nilai rata-rata. Berdasarkan PAP IKIP MALANG nilai rata-rata *pre test* dapat digolongkan rendah sedangkan pada *post test* digolongkan cukup. Dengan kata lain *software DVD E-Media 6M* tergolong cukup dalam meningkatkan pemahaman Ibu-ibu PKK RW Lingkungan Bukit Cemara Tidar, Kelurahan Karang Besuki, kota Malang.

Ditinjau dari ketuntasan kelompok, maka sebelum tindakan adalah sebesar 33%, meningkat tajam menjadi 95% sesudah tindakan. Artinya sejumlah 95% anggota kelompok PKK RW Lingkungan Bukit Cemara Tidar Kelurahan Karang Besuki memiliki nilai pemahaman minimal 70. Cukup tingginya nilai tersebut dimungkinkan disebabkan: (1) minat untuk mempelajari 6M menggunakan *DVD 6M* datang dari kelompok mereka sendiri. Minat yang tinggi tersebut secara tidak langsung akan berpengaruh terhadap keberhasilan tindakan karena minat yang tinggi berarti memiliki perhatian yang tinggi pula. Dengan demikian keingintahuan juga meningkat dan berdampak pada pemahaman yang meningkat pula. Dengan kata lain pemanfaatan *software DVD E-Media 6M* sebagai media pemahaman serta sosialisasi pengelolaan sampah rumah tangga bagi Ibu-ibu PKK RW Lingkungan Bukit Cemara Tidar, Kelurahan Karang Besuki, kota Malang dipandang cukup efektif. *Software DVD E-Media 6M* juga menggunakan contoh-contoh nyata dalam kehidupan sehari-hari sehingga cepat mudah dipahami oleh Ibu-ibu PKK RW Lingkungan Bukit Cemara Tidar, Kelurahan Karang Besuki, kota Malang.

Keterampilan Ibu-Ibu PKK RT, RW, Kelurahan, dan Kecamatan Dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga

Keterampilan Ibu-ibu PKK RT, RW, Kelurahan, Kecamatan, dan Kota di Kelurahan Karang Besuki dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga setelah Diberikan Tindakan DVD 6M

Keterampilan ibu-ibu PKK RT, RW, Kelurahan, Kecamatan, dan Kota di Kelurahan Karang Besuki dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dapat dijelaskan bahwa Keterampilan ibu-ibu PKK tersebut sebelum tindakan adalah 39 (tergolong sangat rendah) dan naik menjadi 90 sesudah tindakan dan tergolong sangat tinggi. Keterampilan Ibu-ibu PKK di bidang M3, M4, M5, dan M6 yang semula di bawah rata-rata menjadi sangat tinggi di atas rata-rata sesudah tindakan. Dari penilaian tersebut kemungkinan disebabkan karena (1) *software DVD E-Media 6M* mampu mengubah keterampilan ibu-ibu PKK RT, RW, Kelurahan, Kecamatan, dan Kota di Kelurahan Karang Besuki dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dari kemampuan sangat rendah menjadi sangat tinggi keterampilan mereka. Perlu diketahui bahwa pelaksana tindakan di kelompok PKK tersebut adalah seorang guru Ruchima Ahmad, S.Pd yang berprofesi sebagai guru. Jadi pada saat penayangan *DVD 6M* beliau sambil menjelaskan makna isi film tersebut. *Software DVD E-Media 6M* telah mampu meningkatkan keterampilan ibu-ibu PKK, RW, Kelurahan, Kecamatan, dan Kota di Kelurahan Karang Besuki di bidang M6 terutama kegiatan Mengganti, Memisahkan, Mendaurulang, dan Mengomposkan artinya *DVD 6M* yang dikembangkan sangat efektif dapat meningkatkan keterampilan ibu-ibu PKK dalam pengelolaan sampah rumah tangga.

Keterampilan Ibu-ibu PKK RW Lingkungan Bukit Cemara Tidar di Kelurahan Karang Besuki Kota Malang dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga setelah Diberikan Tindakan DVD 6M

Berdasarkan hasil analisis data sebelum dan sesudah tindakan maka keterampilan ibu-ibu PKK RW Lingkungan Bukit Cemara Tidar Kota Malang dalam pengelolaan sampah rumah tangga dapat dijelaskan bahwa rata-rata nilai keterampilan ibu-ibu PKK tersebut sebelum tindakan adalah sebesar 47, meningkat sebesar 68% menjadi 79 sesudah tindakan. Peningkatan yang tinggi tersebut menunjukkan bahwa *E-Media DVD 6M* dapat memberikan motivasi tinggi terhadap ibu-ibu PKK RW Lingkungan Bukit Cemara Tidar Kota Malang untuk menerapkan budaya 6M yaitu mengurangi, mengguakan kembali, mengganti, memisahkan, mendaurulang, dan mengomposkan. Dari keseluruhan data yang diperoleh pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa *E-Media DVD 6M* dapat meningkatkan pemahaman dan keterampilan masyarakat subyek ujicoba baik melalui jalur pendidikan formal maupun melalui jalur pendidikan non formal. Pada jalur pendidikan formal, peningkatan tertinggi adalah sebesar 68% dan 130 % dalam meningkatkan keterampilan ibu-ibu PKK. Jadi *E-Media DVD 6M* sangat tepat digunakan untuk meningkatkan keterampilan masyarakat dalam 6M, ebagai media pendidikan masyarakat khususnya melalui jalur penddikan non formal. Sedangkan untuk jalur pendidikan formal secara keseluruhan terjadi kisaran peningkatan pemahaman 3-85%, dan meningkatkan keterampilan siswa dalam pengelolaan smpah rumah tangga sebesar 12-35%. Dengan demikian disarankan untuk lebih intensif menggunakan *DVD 6M* tersebut dalam pembelajaran baik secara terintegrasi maupun monolitik, di tingkat SD sampai dengan SMA.

Secara keseluruhan hasil penelitian penerapan *Software DVD E-Media 6M* dalam meningkatkan pemahaman dan keterampilan masyarakat dalam pengelolaan sampah rumah tangga melalui jalur pendidikan non formal dapat dilihat pada Tabel 3 dan 4. Dari Tabel 3 dan 4 dapat disimpulkan bahwa penerapan *Software DVD E-Media 6M* dapat meningkatkan pemahaman dan keterampilan masyarakat dalam pengelolaan sampah rumah tangga melalui jalur pendidikan nonformal di kelompok PKK RT sampai dengan Kota Malang dan kelompok PKK RW lingkungan Tidar. Peningkatan pemahaman dan keterampilan tersebut berkisar 16 sampai dengan 130 persen. Artinya penerapan *Software DVD E-Media 6M* dapat meningkatkan pemahaman dan keterampilan masyarakat khususnya di kelompok PKK RT sampai dengan PKK Kota dan kelompok PKK RW di lingkungan Tidar.

Tabel 3. Rata-rata Penilaian Pemahaman Sebelum dan Sesudah Tindakan Jalur Pendidikan Non Formal

| No | Lembaga Non Formal | Rata-Rata Nilai Pemahaman | | Peningkatan Rata-rata Nilai |
|----|--------------------|---------------------------|------------------|-----------------------------|
| | | Sebelum | Sesudah | |
| 1 | PKK RT s.d. Kota | 56 Cukup | 65 Cukup | 16% |
| 2 | PKK RW Tidar | 63 Cukup | 86 Sangat Tinggi | 37% |

Tabel 4. Rata-rata Penilaian Keterampilan Sebelum dan Sesudah Tindakan Jalur Pendidikan Non Formal

| No | Lembaga Non Formal | Rata-Rata Nilai Keterampilan | | Peningkatan Rata-rata Nilai |
|----|--------------------|------------------------------|------------------|-----------------------------|
| | | Sebelum | Sesudah | |
| 1 | PKK RT s.d. Kota | 39 Sangat Rendah | 90 Sangat Tinggi | 130% |
| 2 | PKK RW Tidar | 47 Sangat Rendah | 79 Tinggi | 68% |

Hadirin yang saya hormati,

Pada tahun 2010 dan 2011 konsep 6M tersebut telah berhasil saya integrasikan pada Program Nasional Pemberdayaan Masyarakat (PNPM) Mandiri perkotaan melalui pengembangan 7 Booklet Pedoman dan Acuan Teknis Pengelolaan sampah rumah tangga berbasis BKM dapat PNPM Mandiri Perkotaan. Hasil penelitian yang telah dilakukan seperti tersebut di atas secara keseluruhan menunjukkan hasil yang positif dapat meningkatkan pemahaman, keterampilan, maupun pembudayaan masyarakat dalam pengelolaan sampah rumah tangga. Rangkuman hasil penelitian dijabarkan sebagai berikut.

Pemahaman Masyarakat Kelurahan Balasklumprik dan Kelurahan Ploso Kota Metropolitan Surabaya tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga setelah Diberikan Tindakan 7 Booklet Pedoman dan Acuan Teknis Pengelolaan Sampah Rumah Tangga berbasis BKM dapat PNPM Mandiri Perkotaan

Berdasarkan hasil analisis data sebelum dan setelah tindakan, diperoleh nilai pemahaman subyek masyarakat kelurahan Balasklumprik sebelum dan sesudah tindakan dapat dijelaskan bahwa rata-rata nilai *pretest* pemahaman subyek masyarakat Balasklumprik adalah sebesar 72 (tergolong tinggi) dan meningkat sebesar 17% menjadi 87 (tergolong sangat tinggi). Ditinjau dari kriteria ketuntasan kelompok, nilai *pretest* memiliki ketuntasan kelompok sebesar 85%, sedangkan *posttest* sebesar 100%.

Tingginya nilai rata-rata *posttest* pemahaman tersebut dimungkinkan disebabkan karena materi dalam 7 Booklet disajikan secara singkat, padat, dan dengan bahasa yang mudah dipahami, dan diterapkan oleh masyarakat. Tingginya nilai *pretest* menunjukkan bahwa subyek masyarakat kelurahan Balasklumprik sering memperoleh pelatihan tentang persampahan. Apalagi didukung dengan kehadiran Drs. Sutanto warga kelurahan Balasklumprik yang berperan sebagai fasilitator lingkungan tingkat kota Surabaya.

Rata-rata nilai *pretest* pemahaman subyek masyarakat kelurahan Ploso adalah sebesar 66 (tergolong cukup), sedang nilai rata-rata *posttest* pemahaman subyek masyarakat kelurahan Ploso adalah sebesar 83 (tergolong tinggi). Ditinjau dari kriteria ketuntasan kelompok nilai *pretest* sebesar 48% dan meningkat tajam pada *posttest* menjadi sebesar 100%. Tingginya peningkatan antara nilai *pretest* dan *posttest* tersebut menunjukkan bahwa 7 Booklet pemberdayaan masyarakat dalam pengelolaan sampah rumah tangga melalui pembudayaan 6M berbasis BKM pada PNPM Mandiri Perkotaan dapat meningkatkan pemahaman subyek masyarakat di kelurahan Ploso. Peningkatan tersebut dimungkinkan disebabkan oleh karakteristik subyek masyarakat kelurahan Ploso tergolong memiliki tingkat pendidikan tinggi sehingga dengan pelatihan tentang 7 Booklet tersebut menjadikan 100% subyek masyarakat memiliki tingkat pemahaman tergolong tinggi. Ditinjau dari ketuntasan kelompok maka terjadi peningkatan sebesar 52% antara ketuntasan kelasikan pada saat *pretest* (48%) dan *posttest* (100%). Artinya sejumlah 100% subyek masyarakat kelurahan Ploso memiliki nilai pemahaman tentang 6M minimal tergolong tinggi.

Pemahaman Masyarakat Desa Sumpoko Dukuh Klumpit dan Kelurahan Tompoksan Kota Kecil Lumajang Tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga setelah Diberikan Tindakan 7 Booklet Pedoman dan Acuan Teknis Pengelolaan Sampah Rumah Tangga berbasis BKM dapat PNPM Mandiri Perkotaan

Berdasarkan hasil analisis data terhadap nilai pemahaman subyek masyarakat desa Sumpoko Dukuh Klumpit Lumajang sebelum dan sesudah tindakan, dapat dijelaskan sebagai berikut. Terjadi peningkatan rata-rata nilai pemahaman sebelum tindakan yaitu sebesar 69 meningkat sebesar 15% menjadi 79 sesudah tindakan. Ketuntasan kelompok juga meningkat dari 55 menjadi 77%. Artinya sebelum tindakan sejumlah 55% subyek memiliki pemahaman tergolong tinggi dan meningkat sesudah tindakan sejumlah 77% subyek masyarakat memiliki pemahaman tentang pengelolaan sampah melalui 6M tergolong tinggi. Jika dibandingkan dengan subyek masyarakat yang lain yaitu Kelurahan Balaskumpit dan Kelurahan Ploso Surabaya serta Kelurahan Tompoksan Lumajang, desa Sumpoko dukuh Klumpit memiliki nilai rata-rata akhir terendah dan memiliki ketuntasan kelompok terendah. Meskipun jika dilihat berdasarkan indikator keberhasilan tindakan dapat disimpulkan bahwa penelitian tindakan ini berhasil meningkatkan pemahaman masyarakat tentang 6M melalui media 7 Booklet yang dikembangkan. Paling rendahnya nilai tersebut dimungkinkan disebabkan karena desa Sumpoko Dukuh Klumpit Lumajang tergolong berada di wilayah kota kecil dan tergolong wilayah perdesaan. Jika dilihat dari latar belakang pendidikan mereka memang tergolong paling rendah. Pekerjaan sehari-hari mereka tidak tetap sebagai buruh dan wiraswasta lain. Ada yang pemulung dan mereka hidup di wilayah lokalisasi. Dengan demikian tingkat kemampuan berpikirnya juga rendah. Mereka disibukkan dengan berpikir mencari penghidupan layak. Ini dibuktikan dengan ketika pelatihan keterampilan daurulang sampah plastik, mereka memiliki motivasi perhatian yang sangat tinggi. 100% subyek masyarakat peserta pelatihan mengikuti dan mempraktikkannya. Dengan harapan mereka dapat menerapkan sesuai pelatihan.

Nilai rata-rata pemahaman subyek masyarakat Kelurahan Tompoksan sebelum tindakan adalah sebesar 76 dan sesudah tindakan adalah sebesar 80. Berarti terjadi peningkatan rata-rata nilai sebesar 5%. Merupakan peningkatan terkecil dibandingkan subyek masyarakat lainnya. Kecilnya peningkatan tersebut disebabkan karena subyek masyarakat Kelurahan Tompoksan telah memiliki nilai rata-rata awal sebelum tindakan tergolong tinggi yaitu 76. Setelah diselidiki ternyata subyek tersebut memiliki latar belakang pendidikan yang cukup tinggi, mereka bahkan bekerja sebagai pegawai negeri, pengusaha, dan guru. Dengan demikian dimungkinkan telah mendapatkan informasi tentang pengelolaan sampah dari lingkungan mereka bekeja ataupun dari media pendidikan, sarana televisi, majalah, koran, ataupun lainnya. Pendapat ini didukung oleh hasil penelitian sebelumnya (Al Muhdhar, 1998) yang menemukan bahwa peran media informasi berpengaruh terhadap tingkat pengetahuan ibu-ibu rumah tangga dalam pengelolaan sampah rumah tangga.

Ditinjau dari persentase ketuntasan minimal, terjadi peningkatan dari 67% sebelum tindakan menjadi 94% sesudah tindakan. Dengan kata lain 7 Booklet kebudayaan 6M berbasis BKM pada PNPM Mandiri perkotaan tersebut telah terbukti meningkatkan pemahaman subyek masyarakat. Sejumlah 67% subyek masyarakat pada sebelum tindakan memiliki pemahaman tergolong tinggi, meningkat menjadi 97% yang memiliki pemahaman tergolong tinggi. Peningkatan ketuntasan kelompok sebesar 45% tersebut dimungkinkan disebabkan oleh 7Booklet tersebut: (1) disajikan dengan bahasa yang lugas tidak bertele-tele; (2) berisi materi-materi teoritis dan praktis; dan (3) disampaikan melalui pelatihan oleh para pakar langsung sebagai sumber pertama. Materi 6M disajikan oleh penemu 6M yaitu peneliti sendiri. Materi tentang peran BKM dan PNPM mandiri disajikan langsung oleh Ir. Adi Irianto Pakar dari Konsultan Manajemen Nasional PNPM Lingkungan Mandiri Perdesaan Jakarta. Pemanfaatan tong sampah komposter skala rumah tangga beserta teknik pemasangan dan penggunaannya disajikan langsung oleh pemilik HAK PATEN tong sampah tersebut yaitu Dr. Asri Wijastuti, Dra. Winarsih, M.Kes, Dra Wahananik, M.Si, dan Drs Mohamad Yadi. Mereka datang langsung di empat wilayah subyek penelitian untuk melatih secara teori maupun praktik.

Pembudayaan 6M Masyarakat Kelurahan Balasklumprik dan Kelurahan Ploso Kota Metropolitan Surabaya Tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga setelah Diberikan Tindakan 7 Booklet Pedoman dan Acuan Teknis Pengelolaan Sampah Rumah Tangga berbasis BKM dapat PNPM Mandiri Perkotaan

Penjaringan data tentang pembudayaan 6M dilakukan melalui pengisian *checklist* sebelum dan setelah tindakan. Pengisian *checklist* setelah tindakan dilakukan minimal 2 minggu setelah pelatihan dengan anggapan waktu 2 minggu tersebut akan digunakan untuk pengendapan, penghayatan, serta pengamalan dalam kehidupan sehari-hari masyarakat sebagai subyek penelitian tindakan ini. Pelaksanaan pembudayaan 6M oleh masyarakat sebelum dan setelah tindakan dapat dijelaskan bahwa rata-rata pembudayaan 6M oleh masyarakat kelurahan Balasklumprik sebelum tindakan adalah 57 tergolong cukup, sedangkan sesudah tindakan adalah 81 (tergolong tinggi). Berarti terjadi peningkatan pembudayaan 6M oleh masyarakat subyek penelitian di kelurahan Balasklumprik Surabaya. Dengan kata lain 7 Booklet pemberdayaan masyarakat dalam pengelolaan sampah rumah tangga berbasis BKM pada PNPM Mandiri perkotaan dapat meningkatkan pembudayaan masyarakat dalam 6M. Tingkat keberhasilan tindakan sebesar 73% diperoleh dari persentase subyek yang memperoleh nilai minimal 70 (tergolong tinggi). Berdasarkan indikator keberhasilan tindakan yang telah ditetapkan pada BAB III, 7 Booklet dapat dikatakan berhasil meningkatkan pemahaman dan pembudayaan 6M jika minimal 70% subyek mendapat nilai 70 (tergolong tinggi).

Peningkatan pembudayaan 6M masyarakat kelurahan Balasklumprik dapat dijelaskan sebagai berikut: (1) Booklet yang dikembangkan berisi contoh-contoh praktis, menarik, dan memiliki kemudahan untuk diterapkan dalam kehidupan sehari-hari; (2) Karakter masyarakat subyek penelitian di kelurahan Balasklumprik masih tergolong guyub dan “*manul*”; (3) Peran Lurah yang terlibat langsung dalam pemberian penekanan pada saat tindakan dan memberikan motivasi yang baik. Dibuktikan dengan perhatiannya mulai persiapan, penetapan subyek, tempat, serta waktu tindakan. Bahkan kehadiran beliau saat pelatihan untuk menyempatkan diri memberikan motivasi kepada seluruh peserta subyek penelitian meskipun beliau harus bertugas di luar kota setelah acara pembukaan selesai; dan (4) peran Drs Sutanto sebagai fasilitator lingkungan yang memoderatori kegiatan, memotivasi, serta memfasilitasi keberlanjutan kegiatan. Keberlanjutan kegiatan dimaksud akan dijelaskan pada sub-subbab “Keberlanjutan Program”

Pembudayaan 6M masyarakat kelurahan Ploso dapat dijelaskan bahwa rata-rata pembudayaan 6M masyarakat subyek penelitian sebelum tindakan adalah sebesar 38 (tergolong sangat rendah) meningkat setelah tindakan menjadi 78 (tergolong tinggi). Berarti terjadi peningkatan nilai rata-rata *pretest* dan *posttest* sebesar 73%. Indikator keberhasilan tindakan sebesar 72% yang diperoleh dari ketuntasan kelompok. Yaitu persentase subyek yang mendapat nilai minimal 70. Jika dilihat sebelum tindakan maka ketuntasan kelompoknya hanya 26%, berarti terjadi peningkatan sebesar 46%. Boleh dikatakan 7 Booklet pemberdayaan masyarakat dalam pengelolaan sampah rumah tangga berbasis BKM pada PNPM Mandiri perkotaan dapat meningkatkan pembudayaan 6M dari subyek masyarakat di kelurahan Ploso.

Peningkatan pembudayaan 6M tersebut dimungkinkan disukung oleh beberapa hal berikut: (1) 7 Booklet tersebut telah mampu memberikan motivasi kepada subyek masyarakat kelurahan Ploso untuk dapat menerapkan 6M pada kehidupan sehari-hari mereka; (2) Peran BKM kelurahan Ploso nampak efektif. Tercatat BKM kelurahan Ploso sebagai BKM percontohan di Surabaya. Dengan demikian ketika terdapat program baru yaitu pembudayaan 6M berbasis BKM pada PNPM Mandiri perkotaan, maka BKM tersebut secara proaktif menentukan sikap untuk mendukung keberhasilan program; dan (3) Karakter subyek masyarakat Ploso memiliki tingkat pendidikan yang relatif lebih tinggi daripada subyek penelitian di wilayah lain yaitu kelurahan Balasklumprik Surabaya, Desa Sumbersuko Dukuh Klumprik Lumajang, serta kelurahan Tompokersan Lumajang yang memiliki latar belakang pendidikan relatif lebih rendah. Dengan tingkat pendidikan yang lebih tinggi tersebut dimungkinkan memiliki daya serap materi yang lebih tinggi pula.

Pembudayaan 6M Masyarakat Desa Sumpersuko Dukuh Klumprit dan Kelurahan Tompokersan Kota Kecil Lumajang Tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga setelah Diberikan Tindakan 7 Booklet Pedoman dan Acuan Teknis Pengelolaan Sampah Rumah Tangga berbasis BKM dapat PNPM Mandiri Perkotaan

Pembudayaan 6M masyarakat desa Sumpersuko diukuh Klumprit Lumajang sebelum dan sesudah tindakan dapat dijelaskan bahwa rata-rata nilai pembudayaan 6M sebelum tindakan adalah sebesar 37 (tergolong sangat rendah) dengan ketuntasan kelompok sebesar 14%. Sedangkan rata-rata nilai pembudayaan 6M sesudah tindakan meningkat menjadi 64 (tergolong cukup) dengan ketuntasan kelompok sebesar 35%. Berarti terjadi peningkatan nilai rata-rata sebesar 73% dan peningkatan ketuntasan klasikal sebesar 21%. Berdasarkan kriteria keberhasilan tindakan maka 7 Booklet pemberdayaan masyarakat dalam pengelolaan sampah rumah tangga melalui pembudayaan 6M berbasis BKM pada PNPM Mandiri Perkotaan, belum mampu meningkatkan pembudayaan 6M dari subyek masyarakat di desa Sumpersuko dukuh Klumprit Lumajang. Namun demikian jika dilihat dari tingkat peningkatan nilai rata-rata maupun persentase ketuntasan kelompoknya tergolong cukup bagus untuk mampu meningkatkan pembudayaan 6M. Karena nilai awal yang memang sangat rendah maka dengan peningkatan nilai sebesar 27 serta peningkatan ketuntasan kelompok sebesar 21% boleh dikatakan 7 Booklet tersebut telah mampu meningkatkan pembudayaan 6M dari subyek masyarakat desa sumpersuko dukuh Klumprit Lumajang. Rendahnya nilai awal dimungkinkan disebabkan karena di desa Sumpersuko dukuh Klumprit Lumajang tergolong wilayah perdesaan dan di kota kecil. Dengan demikian pembudayaan 6M yaitu mengurangi, menggunakan kembali, memisahkan, mendaurulang, dan mengomposkan, belum menjadi budaya awal di kehidupan sehari-hari mereka. Mereka belum terbiasa mengurangi timbulan sampah karena budaya masyarakatnya memang tidak konsumtif. Mereka belum terbiasa membudayakan 6M juga mungkin disebabkan belum mendapat informasi sebelumnya dari teman ataupun dari media informasi. Dengan demikian meskipun nilai rata-rata pembudayaan 6M sesudah tindakan adalah sebesar 64 (tergolong cukup), boleh dikatakan tindakan 7 Booklet sudah berhasil meningkatkan pembudayaan 6M dari subyek masyarakat desa Sumpersuko dukuh Klumprit Lumajang.

Hasil analisis terhadap nilai pembudayaan 6M sebelum dan sesudah tindakan terhadap subyek masyarakat di kelurahan Tompokersan Lumajang dapat dijelaskan bahwa rata-rata nilai pembudayaan 6M sebelum tindakan adalah sebesar 40 (tergolong sangat rendah), meningkat sebesar 75% menjadi rata-rata sesudah tindakan adalah sebesar 70 (tergolong tinggi). Ketuntasan klasikal sebelum tindakan adalah sebesar 23% sedangkan ketuntasan kelompok sesudah tindakan adalah sebesar 53%, sehingga meningkat sebesar 30%.

Pemahaman Dan Pembudayaan 6M dari Subyek Tindakan Masyarakat di Empat Kelurahan di Jawa Timur setelah Diberikan Tindakan 7 Booklet Pedoman dan Acuan Teknis Pengelolaan Sampah Rumah Tangga berbasis BKM dapat PNPM Mandiri Perkotaan

Perbandingan peningkatan tingkat pemahaman masyarakat subyek tindakan pada sebelum dan sesudah tindakan dapat dijelaskan bahwa secara keseluruhan terjadi peningkatan rata-rata nilai pemahaman masyarakat di empat kelurahan subyek penelitian (Tabel 1). Peningkatan rata-rata nilai pemahaman tertinggi terjadi di kelurahan Ploso Surabaya (26%), sedangkan tertendah di kelurahan Tompokersan Lumajang (5%). Jika dilihat dari keefektifan produk, *Gain Score* tertinggi terjadi di kelurahan Balasklumpruk Surabaya.

Ditinjau dari peningkatan nilai rata-rata pembudayaan 6M sebelum dan sesudah tindakan, maka dari keempat kelompok subyek penelitian terdapat dua kelompok subyek yang mengalami peningkatan sangat tajam yaitu dari nilai tergolong sangat rendah pada sebelum tindakan menjadi nilai tergolong tinggi pada sesudah tindakan. Kedua kelurahan tersebut berada pada kategori kelurahan yang mewakili wilayah perkotaan yaitu kelurahan Ploso Surabaya dan kelurahan Tompokersan Lumajang (Tabel 2). Dengan kata lain terjadi peningkatan lebih besar dari subyek masyarakat di wilayah perkotaan dibandingkan dengan di wilayah perdesaan dalam pembudayaan 6M.

Tabel 5. Rata-rata Nilai Subjek Penelitian Sebelum dan Sesudah Tindakan

| No | Kelurahan | Rata-Rata Nilai Pemahaman dan Ketuntasan Kelompok | | Peningkatan Rata-Rata Nilai | GS |
|----|---------------|---|---------|-----------------------------|-----|
| | | Sebelum | Sesudah | | |
| 1 | Balasklumprik | 72 | 87 | 20 | 0,6 |
| | Surabaya | 85% | 100% | | |
| 2 | Ploso | 66 | 83 | 26 | 0,5 |
| | Surabaya | 48% | 100% | | |
| 3 | Sumbersuko | 69 | 79 | 15 | 0,3 |
| | Lumajang | 55% | 77% | | |
| 4 | Tompokersan | 76 | 80 | 5 | 0,2 |
| | Lumajang | 67% | 94% | | |

GS = Gain Score

Tabel 6. Rata-rata Nilai Keterampilan 6M Subjek Penelitian Sebelum dan Sesudah Penelitian

| No | Kelurahan | Rata-Rata Nilai Pemahaman dan Ketuntasan Kelompok | | Peningkatan Rata-Rata Nilai | GS |
|----|---------------|---|---------|-----------------------------|-----|
| | | Sebelum | Sesudah | | |
| 1 | Balasklumprik | 58 | 81 | 17 | 0,6 |
| | Surabaya | 46% | 70% | | |
| 2 | Ploso | 38 | 78 | 26 | 0,5 |
| | Surabaya | 26% | 72% | | |
| 3 | Sumbersuko | 36 | 2 | 15 | 0,3 |
| | Lumajang | 14% | 35% | | |
| 4 | Tompokersan | 43 | 70 | 5 | 0,5 |
| | Lumajang | 23% | 53% | | |

GS = Gain Score

Keberlanjutan Program

Pada akhir pelatihan, dilakukan diskusi oleh subyek masyarakat peserta ujicoba. Diskusi dilakukan dengan berbagai pola yaitu ada yang memanfaatkan waktu di akhir pelatihan dan ada yang berdiskusi di luar waktu elatihan. Sebagai contoh, diskusi yang dilakukan oleh subyek masyarakat desa Sumbersuko dukuh Klumprit adalah pada saat

pelatihan di akhir waktu. Mereka berdiskusi secara berkelompok dan mempresentasikan hasil diskusi kepada seluruh peserta lain. Isi diskusi adalah membahas rencana tindaklanjut dari masing-masing kelompok. Kelompok hanya dibagi dua yaitu kelompok ibu-ibu dan kelompok bapak-bapak dengan alasan pembagian peran yang berbeda yang akan mereka lakukan. Selain diskusi, di akhir kegiatan juga dilakukan triangulasi data dengan mengisi kuesioner untuk mengetahui manfaat, kendala, upaya pennggulangan masalah, dan rencana tindak lanjut. Hasil diskusi dan triangulasi data dirangkum dijabarkan sebagai berikut.

Manfaat Program

Berbagai manfaat dirasakan oleh subyek masyarakat peserta ujicoba antara lain dirangkum sebagai berikut. (1) Banyak manfaat yang diperoleh dari hasil pelatihan, yaitu bisa mengetahui jenis sampah yaitu sampah basah bisa digunakan untuk kompos dan sampah kering bisa didaurulang; (2) Sangat berguna sekali untuk membentuk pola pikir kita tentang manfaat dari limbah sampah yang menurut kita tidak berguna ternyata mempunyai nilan guna yang tinggi; (3) Mengerti lebih jauh manfaat sampah dan kepedulian terhadap sampah sehingga sampah tidak menjadi sesuatu yang mengotori lingkungan, tetapi berguna dan bermanfaat; (4) Memperoleh ilmu keterampilan menganyam dan mengolah sampah; (5) Manfaat pelatihan mendapatkan ilmu tentang memanfaatkan sampah; dan (6) Menjadi tau bahwa sampah dapat dimanfaatkan sesuai dengan jenisnya misalnya plastik dapat dijadikan tas atau tempat perhiasan dll. dan sampah sayur dan daun dapat dijadikan kompos.

Kendala yang Dihadapi

Berbagai kendala yang dihadapi pasca pelatihan diuraikan sebagai berikut: (1) Kendala untuk mengajak masyarakat supaya memilah-milah sampah kering dan sampah basah; (2) Mengajak anggota masyarakat untuk sadar tentang masalah sampah masih kesulitan karena tidak memiliki SDM yang sama; (3) Masih belum dapat membuat keterampilan dengan bahan yang diberikan saat pelatihan dengan sempurna; dan (4) Warga berusaha mencoba hasil pelatihan, tetapi kesulitan untuk memperoleh bahan/sampah yang diinginkan untuk membuat suatu produk, dan sulit berkoordinasi dengan tukang sampah.

Upaya Penanggulangan Masalah

Berbagai masukan tentang upaya penanggulangan masalah dijabarkan sebagai berikut: (1) Memberikan informasi hasil pelatihan kepada pengurus PKK dan RW yang tidak terlibat sebagai peserta pelatihan. (2) Mensosialisasikan manfaat sampah pada anggota masyarakat dan secara pribadi sudah melakukan beberapa hal yaitu memilah antara sampah basah dan sampah kering. Bentuk sosialisasi yang akan ditempuh akan dilakukan melalui perkumpulan yasinan bagi bapak-bapak dan perkumpulan arisan bagi ibu-ibu; (3) Memisahkan sampah kering dan basah dalam wadah berbeda, memanfaatkan sampah kaleng/gelas untuk dipakai kembali; dan (4) Menasehati sesama warga terutama kepada diri sendiri; dan (4) Mengadakan pendekatan dengan pasukan kuning untuk mengumpulkan sampah kering.

Rencana Tindaklanjut

Rencana indaklanjut yang akan dilakukan meliputi: (1) mengadakan kerjasama antara anggota pelatihan; (2) mengadakan koordinasi dengan semua anggota pelatihan; mengajak masyarakat/ keluarga untuk menanggulangi sampah di sekitar kita. Dengan memanfaatkan kembali limbah sampah di rumah tangga; dan (4) menjadikan sampah sebagai sumber penghasilan; (5) mencoba menerapkan hasil pelatihan misalnya membuat tas dari bungkus permen.

Keberlanjutan program secara umum telah dilakukan khususnya oleh subyek masyarakat kelurahan Balasklumprik kota metropolitan Surabaya. Seminggu pasca tindakan pelatihan, dipimpin oleh fasilitator lingkungan Drs. Sutanto masyarakat berupaya melaksanakan apa yang telah disepakati pada saat diskusi ketika pelatihan. Pada saat pelatihan mereka berdiskusi dipimpin oleh fasilitator lingkungan tersebut serta sepakat akan mengadakan kegiatan yang disebut "Sabtuan". Kegiatan "Sabtuan" merupakan kegiatan berkumpul dari anggota masyarakat secara mandiri dan sukarela. Pesertanya dari anggota peserta pelatihan yang terlibat sebagai subyek ujicoba maupun warga lain yang berminat. Isi kegiatan adalah mendaurulang sampah khususnya masih sebatas sampah plastik dan mencoba mengembangkan daurulang limbah eceng gondok karena di Surabaya eceng gondok mudah diperoleh. Produk yang telah dihasilkan misalnya: (1) sajadah, tempat tissue, dan rompi dasi bungkus mie instan; (2) taplak meja dari sedotan air; (3) tas dari eceng gondok; dan tiker dari bungkus mie instan untuk beberan saat mengadakan simulasi. Kelompok yang terlibat pada kegiatan "Sabtuan" menamakan kelompoknya dengan nama KOMPOS kepanjangan dari kelompok orang-orang yang mau peduli pada ongkongan sampah.

Kelanggengan atas keberlanjutan program juga didukung oleh pembangunan jaringan pemasaran. Jaringan pemasaran yang dibentuk dijelaskan sebagai berikut. KOMPOS mengorganisir anggotanya untuk aktif memproduksi barang-barang hasil daurulang sampah. Hasil yang diperoleh dikumpulkan oleh KOMPOS yang diketuai oleh Drs. Sutanto. Setelah terkumpul maka akan diikutkan pameran ke koperasi Pemkot yang memiliki ruang pameran dan telah memiliki pengunjung rutin. Pola seperti ini diharapkan dapat diterapkan juga oleh subyek masyarakat ujicoba produk 7 Booklet tersebut.

Hadirin yang berbahagia,

Pada tahun 2011 DVD 6M telah saya desiminasi melalui media televisi JTV agar diketahui keefektifannya dalam meningkatkan pengetahuan dan pembudayaan 6M masyarakat di Jawa Timur. Saya menentukan sampel Lumajang sebagai perwakilan kota kecil, Malang sebagai perwakilan kota besar, dan Surabaya sebagai perwakilan kota metropolitan. Hasil penelitian disimpulkan sebagai

berikut. Rata-rata *Gain Score* pemahaman masyarakat di tiga kota sebagai sampel penelitian adalah 0,3, artinya *DVD 6M* cukup efektif dalam meningkatkan pemahaman masyarakat dalam pengelolaan sampah khususnya di kota kecil Lumajang, kota besar Malang, dan kota metropolitan Surabaya. Peningkatan yang tajam dialami masyarakat di ketiga kota penelitian dalam pembudayaan 6M dengan rata-rata *Gain Score* 0,7 artinya *DVD 6M* memiliki efektivitas yang tinggi dalam meningkatkan pembudayaan masyarakat dalam pengelolaan sampah rumah tangga melalui 6M. Agar hasil pengembangan *DVD 6M* dapat digeneralisasi maka pada tahun ini (2011) saya mengajak beberapa mahasiswa S2 UM dan di luar UM untuk melaksanakan penelitian jenis korelasional dengan pendekatan *Quasi Experiment* ataupun *Ex post Facto*. Saya juga sedang mempersiapkan karya saya ini untuk mendapatkan pengakuan Hak Kekayaan Intelektual.

Hadirin yang berbahagia,

Berbagai pengalaman penelitian tindakan saya dalam menerapkan konsep 6M menjadi sebuah budaya atau kebiasaan, belum menjadikan saya puas dalam membantu pemerintah menangani masalah sampah. Oleh karenanya pada tahun 2012 saya berencana mengembangkan sebuah *Pilot Project* wilayah bebas sampah (*Zero Waste Zone*) yang mana proposal yang saya susun ini telah lolos pada tahap *desk evaluation* dan telah saya presentasikan di depan *reviewer DP2M* pada bulan Oktober 2011 di Surabaya dengan mendapat pujian. Pengembangan *Pilot Project* ini besar manfaatnya bagi masyarakat secara langsung dan bagi pemerintah secara tidak langsung antara lain: (1) menyediakan model percontohan wilayah bebas sampah berbasis 6M di kota Malang, (2) mendukung program pemerintah melalui sinergisme program pengelolaan sampah ke dalam KSM pada PNPM Mandiri perkotaan, (3) dalam jangka panjang akan mereduksi timbulan sampah kota, (4) menangani permasalahan sampah secara terpadu dan mendasar dari tingkat sumber sampah (65% sampai dengan 85% sampah kota berasal dari rumah tangga), (5) secara bertahap dalam jangka panjang akan membantu meningkatkan kesejahteraan ekonomi masyarakat karena paradigma "sampah harus dibuang" diubah menjadi "sampah harus dikumpulkan", paradigma "mengelola sampah memerlukan biaya besar" diubah menjadi "mengelola sampah mendatangkan penghasilan besar". Definisi sampah bukan lagi sebagai barang sisa yang tidak bermanfaat tetapi sebagai sumberdaya yang memberikan manfaat. Dengan demikian luaran penelitian pengembangan ini secara nyata akan **membantu pemerintah menyelesaikan masalah nasional**.

Pilot Project yang dikembangkan akan dirancang melalui perencanaan partisipatif dan perencanaan koordinatif. Perencanaan partisipatif, yaitu dimulai dengan meningkatkan kesadaran masyarakat melalui sosialisasi di masyarakat; pertemuan masyarakat; refleksi; pemetaan swadaya untuk identifikasi masalah, potensi, dan kebutuhan; pengorganisasian masyarakat; dan penyusunan rencana dan program yang dilakukan masyarakat secara bersama-sama. Perencanaan koordinatif artinya perencanaan dilakukan melalui koordinasi dalam kelembagaan yang matang. Dengan demikian akan segera terwujud sinergisme pemberdayaan masyarakat dalam pengelolaan sampah.

Prinsip-prinsip penciptaan *Pilot Project* wilayah bebas sampah berbasis 6M akan mengutamakan peran Kelompok Swadaya Masyarakat (KSM) yaitu bertumpu pada pembangunan manusia, otonomi, desentralisasi, berorientasi pada masyarakat miskin, partisipasi, kesetaraan gender, demokrasi, transparansi, prioritas, kolaborasi, keberlanjutan, dan sederhana (Menteri Koordinator Bidang Kesejahteraan Masyarakat, 2007). Pengembangan *Pilot Project* wilayah bebas sampah berbasis 6M juga akan menerapkan prinsip-prinsip dasar kinerja KSM yaitu: (1) akan bertumpu pada pembangunan manusia, (2) masyarakat memiliki kewenangan secara mandiri untuk berpartisipasi dalam menentukan dan mengelola kegiatan pembangunan secara swakelola, (3) kewenangan pengelolaan kegiatan dilimpahkan kepada masyarakat sesuai dengan kapasitasnya, (4) kegiatan yang dilaksanakan mengutamakan kepentingan dan kebutuhan masyarakat miskin dan kelompok masyarakat yang kurang beruntung, (5) masyarakat terlibat secara aktif dan bergotong royong, (6) melibatkan banyak ibu-ibu rumah tangga, (7) pengambilan keputusan dilakukan secara musyawarah dan mufakat dengan tetap berorientasi pada kepentingan masyarakat miskin, (8) pengelolaan kegiatan dilaksanakan secara terbuka, (9) memprioritaskan pendayagunaan secara optimal berbagai sumberdaya, (10) didorong untuk mewujudkan kerjasama dan sinergi, (11) menjaga

kelestarian lingkungan, dan (12) dilaksanakan secara sederhana tidak teoritis dan mudah dipahami dan diterapkan oleh masyarakat. Semoga *pilot project* tersebut dapat berjalan lancar dan mendapat ridlo Allah amin.

PENUTUP

Hadirin yang dirahmati Allah,

Pada akhir pidato saya ini, perkenankan saya menekankan kembali bahwa pengelolaan sampah yang ideal yang perlu segera diterapkan adalah Pengelolaan Sampah Terpadu baik secara fisik maupun nonfisik. Ketegasan dan niat yang kuat dari seluruh *stakeholder* juga merupakan aspek penentu keberhasilan penerapan Pengelolaan Sampah Terpadu ini. Pembudayaan konsep 6M pada kehidupan sehari-hari merupakan alternatif ideal yang mudah dan praktis yang dapat diintegrasikan melalui jalur pendidikan formal, nonformal, maupun informal. Kami menghimbau kepada para hadirin, pemirsa, dan pendengar pidato saya ini: “mari kita sukseskan program pengelolaan sampah terpadu ini”. Saya menyadari bahwa saya tidak memiliki kekuatan apapun untuk menerapkan konsep besar ini, karena penerapan konsep besar ini akan melibatkan selain masyarakat juga para penentu kebijakan. Oleh karena itu pada kesempatan yang mulia ini saya sangat berterimakasih atas perhatian dan kehadiran Bapak Ibu sekalian utamanya kepada yang terhormat para penentu kebijakan khususnya dalam pengelolaan sampah di Jawa Timur. Akhirnya saya hanya bisa berdoa dengan berwasilah kepada Jaddi Rosulullah S.A.W semoga pemikiran saya ini dapat menjadi ilmu manfaat di dunia dan di akherat. Amin. Sebagai penutup pidato saya ini akan saya bacakan satu hadits,

عَنْ سَعْدِ بْنِ أَبِي وَقَّاصٍ عَنْ أَبِيهِ عَنِ النَّبِيِّ ﷺ : إِنَّ اللَّهَ طَيِّبٌ يُحِبُّ
الطَّيِّبَ نَظِيفٌ يُحِبُّ النَّظَافَةَ كَرِيمٌ يُحِبُّ الْكِرَامَ جَوَادٌ يُحِبُّ الْجُودَ
فَنَظِّفُوا أَفْنِيَّتَكُمْ (رواه الترمذي)

Artinya : “Diriwayatkan dari Sa’ad bin Abi Waqas dari bapaknya, dari Rasulullah saw. : Sesungguhnya Allah SWT itu Maha Suci yang menyukai hal-hal yang suci, Dia Maha Bersih yang menyukai kebersihan, Dia Maha Mulia yang menyukai kemuliaan, Dia Maha Indah yang menyukai keindahan, karena itu bersihkanlah tempat-tempatmu” (HR. Tirmizi)”

DAFTAR RUJUKAN

- Al Muhdhar, M.H.I. 1998. *Keterkaitan antara Faktor Sosial, Faktor Ekonomi, Faktor Budaya, Pengetahuan, dan Sikap Ibu-ibu Rumah Tangga dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga, dengan Manifestasi Perilaku Ibu-ibu Rumah Tangga dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga di Kotamadia Surabaya*. Disertasi tidak diterbitkan. Malang: Program Pascasarjana Universitas Negeri Malang.
- Al Muhdhar, M.H.I. 1999. Manifestasi Perilaku Ibu-ibu Rumah Tangga Dalam pengelolaan Sampah Rumah Tangga di Kota Surabaya. *Jurnal Penelitian Kependidikan*. 9 (1): 34-48
- Al Muhdhar, M.H.I. 2000. Sampah, Dampak dan Manfaatnya. *Ilmu Pengetahuan Sosial*. 34 (2): 210-226
- Al Muhdhar, M.H.I. 2000. Ketidakkonsistenan antara Pengetahuan, Sikap dan Manifestasi Perilaku Ibu-ibu Rumah Tangga Dalam pengelolaan Sampah Rumah Tangga di Kota Surabaya. *Jurnal Penelitian Kependidikan*. 10 (2): 166-178
- Al Muhdhar, M.H.I. 2002a. *Keterkaitan antara Faktor Sosial, Faktor Ekonomi, Faktor Budaya, Pengetahuan, dan Sikap Ibu-ibu Rumah Tangga dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga, dengan Manifestasi Perilaku Ibu-ibu Rumah Tangga dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga di Dukuh Sanan Kecamatan Blimbing Kota Malang*. Laporan Penelitian tidak diterbitkan. Malang: Lembaga Penelitian Universitas Negeri Malang.
- Al Muhdhar, M.H.I. 2002b. *Pendidikan kepada Masyarakat dalam Pengelolaan Sampah*. Penelitian Mandiri.
- Al Muhdhar, M.H.I. 2002c. *Studi Penanganan Sampah di Wilayah Surabaya Metropolitan*. Surabaya: Balitbang Jatim.
- Al Muhdhar, M.H.I. 2003a. Kontribusi Faktor Sosial, Faktor Ekonomi, Tingkat Pengetahuan, dan Tingkat Sikap dengan Manifestasi Perilaku Ibu-ibu Rumah Tangga Dalam pengelolaan Sampah Rumah Tangga di Dukuh Sanan Kecamatan Blimbing Kota Malang. *Pendidikan Nilai*. 10 (1): 105-116
- Al Muhdhar, M.H.I. 2003b. Pendidikan kepada Masyarakat dalam Pengelolaan Sampah. *Ilmu Pengetahuan Sosial*. 37 (3): 716-736
- Al Muhdhar, M.H.I. 2003c. Keterkaitan antara Faktor Sosial, Faktor Ekonomi, Tingkat Pengetahuan, dan Tingkat Sikap dengan Manifestasi Perilaku Ibu-ibu Rumah Tangga Dalam pengelolaan Sampah Rumah Tangga di Kotamadia Surabaya. *Jurnal Ilmu Pendidikan*. 10 (2): 174-189
- Al Muhdhar, M.H.I. 2009. *Pengembangan E-Media Pendidikan kepada Masyarakat dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga (Penelitian Tahun Pertama)*. Laporan Penelitian tidak diterbitkan. Malang: Lembaga Penelitian Universitas Negeri Malang.
- Aquino, J. T. 1993. Your Neighbor's Nose: The Goal of Odor Control. *Waste Age*. June.
- Armstrong, P. 1995. *Waste Stoppers. Manual for Training Recycling Coordinators*. Victoria: Gould League of Victoria Inc.
- Baisa, I.R. 2010. *Pengaruh Penerapan Media Pembelajaran berbasis Web terhadap Keterampilan Berpikir Kritis dan Kemampuan Kognitif Siswa Kelas V SD Islam Sabilillah Malang*. Tesis tidak diterbitkan. Malang: Program Pascasarjana Universitas Negeri Malang.
- Baisa, I.R. 2010. Pengaruh Penerapan Media Pembelajaran berbasis Web terhadap Keterampilan Berpikir Kritis dan Kemampuan Kognitif Siswa Kelas V SD Islam Sabilillah Malang. *Jurnal Pendidikan Biologi*. 1 (2): 189-197.
- Departemen Pekerjaan Umum. 1990. *Standar Tata Cara Pengelolaan Teknik Sampah Perkotaan*. Bandung: Yayasan LPMB.
- Departemen Pekerjaan Umum. 1991. *Pedoman Penyusunan Pengembangan Sistem Pembiayaan Pengelolaan Persampahan*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum Dirjen Cipta Karya Direktorat Kesehatan Lingkungan Pemukiman.

- Departemen Pekerjaan Umum. 1993. *Perencanaan Tempat Pembuangan Akhir Sampah Kotamadia Malang*. Final Report February 1993. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum Dirjen Cipta Karya Direktorat Penyehatan Lingkungan Pemukiman.
- Fandi, V.Y. 2008. *Pengembangan Multimedia CD Interaktif berbasis Komputer pada Pembelajaran Biologi Materi Daur Biogeokimia untuk Siswa SMA Kelas X*. Skripsi tidak diterbitkan, Malang: Jurusan Biologi FMIPA Universitas Negeri Malang.
- Goldberg, M. S. dkk. 1995. Low Birth Weight and Preterm Births among Infants Born to Women Living Near a Municipal Solid Waste Landfill Site in Montreal, Quebec. *Environmental Research*. 69, 37-50 (1995). Montreal: Academic Press, Inc.
- Japan International Cooperation Agency (JICA). 1993a. *The Study on the Solid Waste Management Improvement for Surabaya City in The Republic of Indonesia*. Final Report Volume 5 Data Book. Jakarta: Japan International Cooperation Agency & Ministry of Public Works Republic of Indonesia.
- Japan International Cooperation Agency (JICA). 1993b. *One Day Seminar For Presentation of The Result of The Study on Solid Waste Management Improvement for Surabaya City*. 22 February 1993. Jakarta: Japan International Cooperation Agency & Ministry of Public Works Republic of Indonesia.
- Nurdjaman, O. 1993. *Pengelolaan Sampah Padat Kota Melalui "Kawasan Industri Sampah (KIS)"*. Bandung: Lembaga Penelitian ITB.
- Peraturan Daerah Kotamadia Daerah Tingkat II Surabaya Nomor 6 Tahun 1986 jo Peraturan Daerah Tingkat II Surabaya Nomor 2 Tahun 1990 Tentang Penyelenggaraan Kebersihan Dalam Kotamadia Daerah Tingkat II Surabaya*. 1991. Surabaya: Diperbanyak oleh PT. Arina Advertising.
- Raven, B.H. & Rubin, J.Z. 1983. *Social Psychology*. New York: John Wiley & Sons.
- Sadono, G. & Antonius. 1996. Limbah Domestik. Makalah disajikan dalam *Kegiatan Penyuluhan Lingkungan Hidup Pengurus PKK Kotamadia Malang tanggal 18 September 1996*. Malang: Dinas Kesehatan Daerah Kotamadia Daerah Tingkat II Malang.
- Setyowati, E. 2011. *Pengembangan Modul Multimedia Pengelolaan Sampah Berwawasan Sains Teknologi Masyarakat sebagai Upaya Peningkatan Pengetahuan, Sikap, dan Perilaku Peserta Didik SMA*. Disertasi tidak diterbitkan. Malang: Program Pascasarjana Universitas Negeri Malang
- Sukmana, S. 1983. *Evaluation of Processes in The Composting of City Waste*. A Thesis Presented to the Faculty of Agriculture Sciences in Fulfilment of the Requirements for Degree of Doctor in Agricultural Sciences.
- Sutisna, M. 1995. *Permasalahan dan Penanganan Limbah Rumah Tangga dan Teknik Pembuatan Kompos*. Bandung: PAU ITB.

Mengembangkan Literasi Sains Anak Indonesia Melalui Pembelajaran Berorientasi *Nature of Science* (NOS)

Prof. Dra. Sri Rahayu, M.Ed., Ph.D.

Bismillahirrahmanirrahim

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Yang saya hormati

Rektor Universitas Negeri Malang

Ketua dan sekretaris Senat Universitas Negeri Malang

Ketua dan Sekertaris Komisi Guru Besar Universitas Negeri Malang

Para Anggota Senat Universitas Negeri Malang

Para Pejabat Struktural Universitas Negeri Malang

Para Sejawat Dosen, Karyawan, dan Mahasiswa Universitas Negeri Malang

Para Undangan dan Hadirin semuanya.

Marilah kita panjatkan puji syukur ke hadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, taufiq, dan hidayahnya sehingga kita dapat melakukan salah satu kegiatan akademik ini, seraya memohon kepada Allah SWT agar kegiatan ini mendapat ridhaNya. Amin. Semoga shalawat dan salam selalu tercurah kepada junjungan kita, Rasulullah SAW, beserta keluarga, sahabat, dan pengikutnya.

Dalam pidato pengukuhan saya sebagai Guru Besar dalam bidang Pendidikan Ilmu Pengetahuan Alam atau Sains, perkenankanlah saya menyampaikan sekelumit gagasan tentang pentingnya mengembangkan kemampuan berliterasi sains siswa melalui rancangan pembelajaran sains yang secara eksplisit bertujuan ke arah terbentuknya masyarakat berliterasi sains.

Melalui pidato pengukuhan ini, saya berharap dapat memberikan sumbangan pikiran dalam upaya meningkatkan kualitas sumber daya manusia Indonesia melalui peningkatan kualitas proses dan hasil belajar bidang sains. Materi yang saya sampaikan dalam pidato merupakan sebuah gagasan yang saya tindak lanjuti dengan melakukan sejumlah penelitian baik secara mandiri maupun bersama-sama dengan mahasiswa sarjana maupun pascasarjana yang saya bimbing. Secara berturut-turut akan saya paparkan perihal pentingnya membangun masyarakat yang memiliki literasi sains, pengertian literasi sains, peranan hakekat sains (*nature of science/ NOS*) dalam literasi sains, cara mengeklisitkan *NOS* dalam pembelajaran sains dan implikasinya bagi guru, LPTK dan kurikulum.

Pentingnya Membangun Masyarakat yang Memiliki Literasi Sains

Hadirin yang saya muliakan,

Dalam abad ke-21 ini perubahan yang revolusioner telah terjadi dalam bidang sains dan teknologi. Perubahan ini telah meningkatkan kualitas hidup umat manusia. Berbagai terobosandalam sains dan teknologi tersebut menyebar ke seluruh penjuru dunia atau mengglobal (Friedman, 2007). Penemuan dan perkembangan baru dalam genetika, nano sains dan neurosains misalnya, memberikan khabar baik dalam bidang kesehatan manusia. Namun, perkembangan lain dalam bidang-bidang sains dan teknologi juga dapat menyebabkan terjadinya permasalahan baru yang berkaitan dengan etika, moral dan isu-isu global yang justru mengancam martabat dan kelangsungan hidup manusia. Sebagai contoh, terjadinya masalah pemanasan global, berkurangnya sumber energi secara global atau munculnya berbagai bentuk polusi yang mengganggu kestabilan alam. Permasalahan ini menimbulkan kekhawatiran bagi individu, masyarakat global dan hanya dapat diselesaikan melalui sarana komunikasi dan kerjasama antar orang-orang yang memandang diri mereka sendiri sebagai masyarakat global. Sebagai masyarakat global kita perlu menjawab

pertanyaan-pertanyaan seperti: apakah dampak yang mungkin ditimbulkan oleh produk-produk nano yang diciptakan, diproduksi atau digunakan bagi kesehatan keluarga dan masyarakat? Apakah dampak pemanasan global bagi kelangsungan hidup makhluk hidup di bumi? Bagaimana caranya mengurangi polutan beracun? Bagaimana caranya memenuhi kebutuhan energi yang semakin menipis? Agar supaya dapat menjawab pertanyaan-pertanyaan seperti itu, diperlukan warga negara atau masyarakat yang memiliki pemahaman tentang konsep-konsep sains, kemampuan berfikir kritis, kemampuan bernalar, kreativitas, dan juga memiliki kepedulian terhadap permasalahan yang terjadi di dunia sehingga mereka dapat menjaga kelestarian lingkungan, kesehatan, dan dapat mengambil keputusan tentang kebijakan sosial bagi diri sendiri maupun bagi masyarakat global. Agar tercapai harapan ini maka diperlukanlah masyarakat yang memiliki literasi sains (*scientific literacy*). Literasi sains semakin diperlukan agar dapat hidup di tengah-tengah masyarakat modern (New Zealand Curriculum Guides, 2013).

Literasi sains sebenarnya bukanlah hal baru dalam dunia pendidikan. Namun, sejak dua dekade terakhir, literasi sains menjadi topik diskusi utama ketika membicarakan tujuan pendidikan sains di sekolah. Literatur dalam bidang pendidikan sains juga menunjukkan bahwa literasi sains semakin diterima dan dinilai oleh para pendidik sebagai hasil belajar yang diharapkan (Lederman, 2014). Trend dalam kebijakan pendidikan sains menekankan pentingnya literasi sains sebagai *transferable outcome* dalam pendidikan sains (Fives et al., 2014). Diskusi tentang tujuan pendidikan sains seringkali diawali dengan isu “literasi sains” dan frasa itu mewakili harapan kita tentang apa yang seharusnya diketahui dan mampu dilakukan oleh siswa sebagai hasil dari pengalaman belajarnya. Walaupun sebenarnya, pengertian literasi sains itu sendiri jika dikaitkan dengan implementasi pembelajarannya di kelas masih dapat diperdebatkan karena istilah literasi sains itu cenderung abstrak sehingga menimbulkan interpretasi yang bermacam-macam berkaitan dengan hasil belajar yang diharapkan. Namun secara internasional telah disepakati bahwa tujuan utama mengembangkan literasi sains adalah agar siswa memiliki kemampuan dalam memahami perdebatan sosial mengenai pertanyaan-pertanyaan yang terkait sains dan teknologi dan turut berpartisipasi didalam perdebatan itu (Roth & Lee, 2004). Literasi sains memfokuskan pada membangun pengetahuan siswa untuk menggunakan konsep sains secara bermakna, berfikir secara kritis dan membuat keputusan-keputusan yang seimbang dan memadai terhadap permasalahan-permasalahan yang memiliki relevansi terhadap kehidupan siswa. Akan tetapi masih sering dijumpai bahwa praktek pembelajaran sains di berbagai negara mengabaikan dimensi sosial pendidikan sains dan dorongan untuk mengembangkan ketrampilan-ketrampilan siswa yang diperlukan untuk berpartisipasi secara aktif dalam masyarakat (Hofstein, Eilks & Bybee, 2011).

Hadirin yang saya muliakan,

Sebagaimana kita pahami bersama bahwa asesmen merupakan komponen penting dalam belajar dan pembelajaran. Sama pentingnya dengan tercapainya literasi sains siswa sebagai tujuan utama belajar. Dua program survei komprehensif yang bertujuan untuk menilai literasi sains siswa adalah the Program for International Student Assessment (PISA) dari the Organization for Economic Co-operation and Development (website: <http://www.oecd.org/pisa>) and Trends in Mathematics and Science Studies (TIMSS) (website: <http://timssandpirls.bc.edu>). Jika TIMSS memfokuskan penilaian pada mengingat kembali materi pelajaran sains yang sudah diajarkan di sekolah, maka PISA lebih memusatkan pada pengetahuan praktis siswa dalam bertindak (*practical knowledge in action*).

PISA merupakan sebuah komitmen bersama dari berbagai negara yang tergabung dalam Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). Komitmen tersebut berupa upaya untuk memonitor *outcome* dari sistem pendidikan mereka dalam bentuk prestasi belajar siswa dalam lingkup internasional. Dalam kurun waktu 3 tahunan, PISA secara bergiliran memberikan penekanan terhadap literasi membaca, literasi matematika, dan literasi sains yang dimiliki siswa usia 15 tahun (usia antara SMP kelas 8 dan SMA kelas 9 dalam konteks Indonesia). Oleh karena itu, dalam setiap asesmen PISA terdapat salah satu literasi tersebut sebagai ranah utama (*major domain*) dan dua yang lainnya sebagai ranah minor (*minor domain*). Misalnya ranah utama tahun 2000, 2003, 2006, 2009 berturut-turut adalah literasi membaca, literasi matematika, literasi sains dan literasi membaca lagi.

Selain itu, PISA juga mengumpulkan informasi tentang bagaimana hubungan *outcome* tersebut dengan variabel pendidikan lainnya seperti demografis, sosial, ekonomi.

Pada dasarnya PISA menilai kompetensi menalar siswa, termasuk didalamnya kemampuan berpikir kritis, yang diperoleh dari iklim pembelajaran saintifik yang betul-betul memfasilitasi berkembangnya potensi diri dan interkoneksinya dengan pemecahan masalah dalam kehidupan nyata. Hasil penilaian PISA ini diakui sebagai gambaran efektivitas penerapan kurikulum dan dijustifikasi sebagai tolak ukur keberhasilan pendidikan suatu wilayah/negara. Indikator ini ditunjukkan dengan memberi peringkat negara-negara yang mengikuti prosedur asesmen PISA. Indonesia adalah salah satu negara yang ikut berpartisipasi dalam PISA meskipun tidak termasuk dalam negara anggota OECD. Capaian siswa Indonesia dalam PISA dalam beberapa tahun sangat memprihatinkan. Tabel 1 berikut ini menunjukkan posisi prestasi siswa Indonesia mulai tahun 2000 sampai 2012.

Tabel 1. Prestasi Siswa Indonesia dalam PISA
(Sumber: OECD Family Database, 2015)

| Tahun | Ranking | Jumlah Negara Yang Berpartisipasi |
|-------|---------|-----------------------------------|
| 2000 | 39 | 41 |
| 2003 | 38 | 40 |
| 2006 | 50 | 57 |
| 2009 | 57 | 63 |
| 2012 | 64 | 65 |

Dari data pada Tabel 1 tersebut nampak bahwa siswa Indonesia memiliki literasi sains yang sangat rendah, yaitu peringkat 2 sampai 7 dari peringkat terbawah dibandingkan dengan negara-negara lain. Dengan keyakinan bahwa semua manusia diciptakan sama, interpretasi dari hasil ini hanya satu, yaitu: *yang kita ajarkan di sekolah berbeda dengan tuntutan zaman*. Kurikulum sains yang ada saat ini dikritik oleh banyak pihak kurang peka dan kurang tanggap terhadap perubahan-perubahan yang terjadi di masyarakat baik lokal, nasional maupun internasional. Oleh karena itu, dalam implementasinya di sekolah di Indonesia sangatlah penting untuk meningkatkan kualitas pembelajaran yang secara eksplisit mengintegrasikan aspek-aspek yang diperlukan dalam meningkatkan kemampuan berliterasi sains. Pertanyaan yang penting untuk dipikirkan adalah bagaimanakah rancangan pembelajaran sains yang dapat meningkatkan literasi sains siswa? Apakah tantangan yang dihadapi oleh guru dan kurikulum dalam mewujudkan tujuan sains tersebut?

Pengertian Literasi Sains

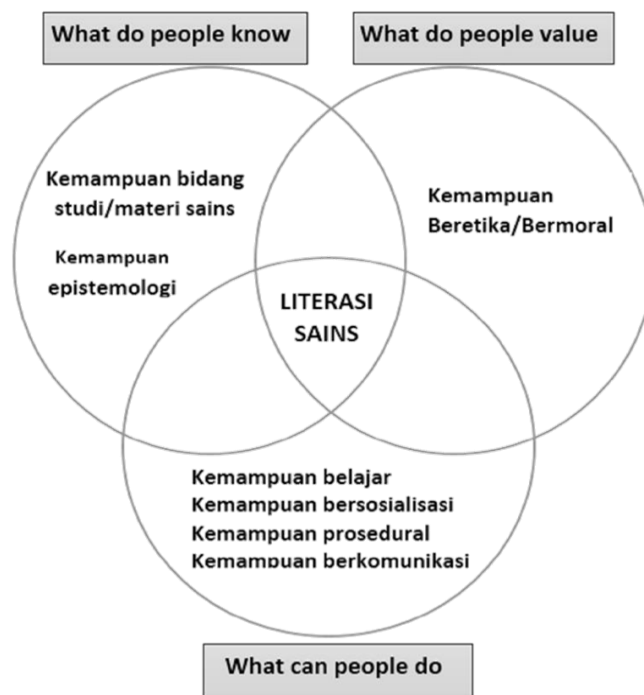
Hadirin yang saya muliakan,

Walaupun istilah literasi sains telah digunakan dalam literatur sejak empat dekade yang lalu, namun pengertian-pengertian yang dikemukakan tersebut tidaklah selalu sama. Holbrook & Rannikmae (2009) menggambarkan bahwa ada dua kelompok besar orang yang memiliki pandangan tentang *scientific literacy*, yaitu kelompok "*science literacy*" dan kelompok "*scientific literacy*". Kelompok pertama "*science literacy*" memandang bahwa komponen utama literasi sains adalah pemahaman konten sains yaitu konsep-konsep dasar sains. Pemahaman kelompok pertama inilah yang banyak dipahami oleh guru-guru sains saat ini baik di Indonesia maupun di luar negeri.

Kelompok kedua, *scientific literacy*, memandang *scientific literacy* searah dengan pengembangan *life skills* (Rychen & Salganik, 2003), yaitu pandangan yang mengakui perlunya keterampilan bernalar dalam konteks sosial dan menekankan bahwa literasi sains diperuntukan bagi semua orang, bukan hanya kepada orang yang memilih karir dalam bidang sains atau spesialis dalam bidang sains. Gräber dkk (2001) menjembatani kedua kelompok ini dengan model literasi sains seperti Gambar 1. Model literasi sains dalam gambar 1 menunjukkan bahwa literasi sains tersebut berbasis kompetensi/kemampuan dan merupakan hasil interseksi(persinggungan) antara "**what do people know**" (terdiri dari kemampuan memahami materi sains dan kemampuan epistemologis sains (*nature of science*)), "**what do people value**" (terdiri dari kemampuan beretika atau bermoral), dan "**what can**

people do” (terdiri dari kemampuan belajar, kemampuan bersosialisasi, kemampuan melakukan prosedur, kemampuan berkomunikasi). Model *scientific literacy* ini menekankan perlunya keseimbangan antar berbagai kemampuan dan membutuhkan ketrampilan dalam pengambilan keputusan terhadap isu-isu sosial ilmiah (*socioscientific issues*)(Holbrook & Rannikmae, 2007).

Holbrook & Rannikmae (2009) mengembangkan definisi baru tentang literasi sains yang menjadi target pendidikan sains. Mereka menyarankan perlunya apresiasi tentang hakekat sains (*NOS*) dan relevansinya dengan sains yang sedang diperoleh, sehingga mengembangkan literasi sains melalui pendidikan sains adalah mengembangkan kemampuan untuk menggunakan pengetahuan dan ketrampilan ilmiah secara kreatif berlandaskan bukti-bukti yang cukup, khususnya yang relevan dengan karir dan kehidupan sehari-hari dalam memecahkan permasalahan-permasalahan penting dan memberi argumentasi secara pribadi didalam membuat keputusan sosial ilmiah secara bertanggung jawab. Selain itu, dalam literasi sains diperlukan juga kemampuan mengembangkan ketrampilan berinteraksi secara kolektif, pengembangan diri dengan pendekatan komunikatif, dan perlunya menunjukkan penalaran yang dapat dimengerti dan persuasif ketika mengemukakan argumentasi dalam isu-isu sosial ilmiah



Gambar 1. Model Literasi Sains Gräber

Menurut PISA 2006 (OECD, 2006), kualitas penting dalam literasi sains siswa mencakup:

- Pengetahuan sains dan penggunaan pengetahuan tersebut untuk mengidentifikasi pertanyaan, memperoleh pengetahuan, menjelaskan fenomena ilmiah, membuat kesimpulan berlandaskan bukti-bukti terkait isu-isu sains.
- Memahami *ciri khas sains sebagai bentuk pengetahuan dan inkuiri manusia*.
- Kesadaran tentang bagaimana sains dan teknologi membangun lingkungan fisik, intelektual dan kultural.
- Kepedulian untuk ikut terlibat dalam isu-isu terkait sains, dan dengan ide-ide sains sebagai warga negara yang konstruktif, memiliki keprihatinan dan reflektif.

Dengan memperhatikan definisi yang dikemukakan oleh Holbrook & Rannikmae, (2007, 2009) serta PISA 2006 (OECD, 2006), maka saya memfokuskan pada bagaimana mengajarkan sains

di kelas dengan menitik beratkan perhatian pada **kemampuan epistemologi sains (hakekat sains/nature of science)** atau **pemahaman tentang ciri khas sains sebagai bentuk pengetahuan dan inkuiri manusia** menurut definisi PISA 2006 untuk mencapai literasi sains siswa.

Tujuan utama mengintegrasikan *NOS* kedalam kurikulum sains adalah untuk membantu mendidik siswa menjadi warga negara yang memiliki literasi sains sehingga dapat memecahkan permasalahan-permasalahan sains dan teknologi yang kompleks dalam kehidupan modern dan budaya demokratis (OECD, 2009, p. 128). Selain itu, penetapan *NOS* sebagai komponen utama dalam literasi sains sudah semakin mapan di berbagai negara dan digunakan sebagai tujuan belajar yang penting dalam setiap kurikulum sains (Hodson, 2014). Melalui integrasi *NOS* secara eksplisit dalam rancangan pembelajaran sains, kemampuan lain yang diperlukan dalam pengembangan literasi sains diharapkan juga akan terwadahi.

Peranan Hakekat Sains (*Nature of Science/NOS*) dalam literasi sains

Hadirin yang kami muliakan,

Sebenarnya, ungkapan “*nature of science*” (hakikat sains/ilmu) sudah diketahui oleh para pendidik/guru selama kurun waktu 50 tahun, namun pengertiannya masih seringkali simpang siur (Lederman, 2014). *Nature of science* atau disingkat *NOS* mengacu pada epistemologi ilmu pengetahuan, ilmu sebagai cara untuk mengetahui, atau nilai-nilai dan keyakinan yang melekat pada pengembangan sains/pengetahuan ilmiah (Lederman, 2007). Pemahaman tentang hakekat sains (*NOS*) tersebut diapresiasi sebagai salah satu karakteristik yang diharapkan bagi seseorang/siswa yang memiliki literasi sains, di mana orang tersebut secara umum harus mengembangkan pemahaman konsep, prinsip, teori dan proses sains dan menyadari adanya hubungan yang kompleks antara sains, teknologi dan masyarakat dan yang lebih penting adalah pemahaman tentang *NOS* (Abd-El-Khalick & BouJaoude, 1997). Selain penting bagi siswa untuk memahami *NOS*, siswa juga perlu memiliki kemampuan umum untuk membuat keputusan-keputusan ilmiah terhadap isu-isu yang sifatnya personal maupun kemasyarakatan (Lederman, 2014). Jadi pada prinsipnya *NOS* mencakup konsepsi tentang pengetahuan sains, nilai-nilai dan keyakinan dalam memperoleh pengetahuan sains tersebut, serta pengaruhnya terhadap masyarakat, budaya dan teknologi dalam sains (Lederman, Abd-El-Khalick, Bell & Schwartz, 2002; Osborne, Collins, Ratcliffe, Millar & Duschl, 2003). Karena konsep tentang hakekat sains (*NOS*) berbasis pengetahuan, maka konsep tersebut dapat diajarkan kepada siswa (Abd-El-Khalick & Lederman, 2001). Oleh karena itu, dewasa ini banyak kurikulum sains di dunia bertujuan untuk membantu siswa memperoleh pemahaman yang memadai tentang *NOS*. Sebagai contoh, Standar untuk pendidikan sains di USA yaitu “*The Next Generation Science Standards*” (NGSS Lead States, 2013) menekankan pemahaman *NOS* dengan menyediakan matriks *NOS* ke seluruh standar level SD, SMP dan SMA. Matriks tersebut menggambarkan outcome belajar berkaitan dengan hakekat sains (*NOS*). New Zealand Curriculum Guides (2013) juga menekankan pentingnya pemahaman tentang hakekat sains (*NOS*). Manfaat memasukkan *NOS* kedalam kurikulum, diantaranya dapat meningkatkan hasil belajar tentang materi sains, minat terhadap sains, pengambilan keputusan terhadap masalah-masalah yang berhubungan dengan sains dan metode penyampaian dalam pembelajaran sains (Driver, Leach, Miller, & Scott, 1996).

Hakekat sains (*NOS*) seringkali didefinisikan sebagai *epistemology of science* (epistemologi sains), sains sebagai *a way of knowing* (cara mengetahui), atau *values* (nilai-nilai) and *beliefs* (keyakinan) yang melekat dalam pengembangan dan validasi pengetahuan ilmiah (Abd-El-Khalick & Lederman, 2000). Ditinjau dari tingkat keumumannya, ada tujuh aspek *NOS* yang dapat diimplementasikan dalam kurikulum dan pembelajaran sains. Siswa sekolah menengah dapat mengakses pengetahuan itu dan relevan dengan kehidupan sehari-hari. Ketujuh aspek tersebut adalah (1) sains/pengetahuan ilmiah bersifat tentatif (dapat berubah), (2) sains/ pengetahuan ilmiah berbasis empiris sebagian diperoleh dari hasil pengamatan terhadap alam semesta), (3) sains/ pengetahuan ilmiah bersifat subjektif (*theory-laden*) yang menyertakan interpretasi kelompok atau individu, (4) sains/pengetahuan ilmiah selalu menggunakan inferensi, imajinasi dan kreativitas manusia (terutama dalam menemukan penjelasan), (5) sains/pengetahuan ilmiah terikat dengan aspek sosial budaya (dipengaruhi oleh masyarakat dan budaya dimana pengetahuan ilmiah tersebut

diterapkan), (6) sains/ada perbedaan antara pengamatan (*observation*) dan inferensi (*inference*), dan (7) fungsi dan hubungan antara teori ilmiah dan hukum ilmiah (Bell, Lederman, Abd-El-Khalick, 2000; Lederman, 2007; Lederman, 2006). Ketujuh aspek tersebut saling berkaitan dan tidak bisa berdiri sendiri. Berikut ini gambaran singkat mengenai hakekat sains (*NOS*) dan sains/pengetahuan ilmiah.

Pertama, pengetahuan ilmiah (fakta, teori, prinsip dan hukum) bersifat tentatif dan dapat berubah meskipun pengetahuan tersebut handal dan tahan lama (Lederman et al., 2002:502). Sebuah klaim ilmiah berubah ketika ada bukti baru yang mungkin diperoleh melalui kemajuan teori dan teknologi, diterapkan pada teori atau hukum yang berlaku saat ini, atau ketika bukti lama dipikirkan kembali mengingat adanya teori baru, atau ketika terjadi pergeseran program-program riset yang sudah mapan. Makna tentatif dalam sains muncul bukan hanya karena pengetahuan ilmiah merupakan hasil inferensi dan kreativitas manusia serta terikat pada masyarakat dan budaya. Namun, dapat juga karena adanya argumen logis yang menambah keyakinan tentang aspek tentatif dari *NOS* tersebut. Sebagai ilustrasi yang baik tentang aspek tentatif dari hakekat sains adalah suksesi model atom yang cepat (Thomson, Rutherford, Bohr, Bohr– Sommerfeld, mekanika gelombang) (Niaz & Maza, 2011).

Kedua, pengetahuan ilmiah berbasis empiris. Hal ini berarti bahwa ilmu pengetahuan berlandaskan dan/atau diperoleh dari pengamatan terhadap dunia sekitar kita yang kemudian hasil pengamatan tersebut diinterpretasikan. Untuk menghasilkan pengetahuan ilmiah, seorang ilmuwan membutuhkan bukti-bukti empiris. Oleh karena itu, klaim/ pernyataan ilmiah apapun harus selaras dengan bukti-bukti empiris dan bukti baru dapat merevisi pengetahuan ilmiah yang sudah ada sebelumnya. Namun, sains bukan sekedar akumulasi bukti-bukti yang dapat diamati secara kasat mata. Semua pengamatan membutuhkan interpretasi dan inferensi dari ilmuwan. Ilmuwan seringkali membutuhkan imajinasi dan kreativitas dalam membuat pernyataan inferensial tentang hal yang diamatinya. Pada kenyataannya, imajinasi dan kreativitas ini diperlukan dalam setiap aspek kegiatan ilmuwan, misalnya dalam memahami hasil pengamatan, membuat langkah-langkah kreatif dari data pengamatan untuk menghasilkan penjelasan (*explanation*), memunculkan ide-ide baru, atau mendesain sebuah penyelidikan (*investigation*). Oleh karena itu, sains mencakup imajinasi dan kreativitas manusia walaupun sebagian saja berbasis dan/atau diperoleh dari hasil pengamatan terhadap dunia sekitar kita. Dengan kata lain, ilmu pengetahuan mencakup menemukan penjelasan/paparan yang memerlukan banyak imajinasi dan kreativitas dari ilmuwan (Lederman, Lederman, & Antink, 2013; Lederman, 2007).

Ketiga, pengetahuan ilmiah bersifat subyektif (*theory-laden*). Para ilmuwan selalu berusaha untuk bersikap objektif, namun tidak dapat dipungkiri bahwa sangatlah sulit untuk melakukan pengamatan dan interpretasi yang benar-benar obyektif. Seorang ilmuwan secara pribadi memiliki komitmen pada suatu teori, keyakinan, pengetahuan sebelumnya, pelatihan, pengalaman, dan harapan yang benar-benar mempengaruhi pekerjaan mereka (Lederman, 2007: 834). Sebagai ilustrasi, dua orang ilmuwan dalam bidang ilmu yang sama bisa saja memiliki interpretasi yang berbeda terhadap hasil pengamatan pada fenomena yang sama. Semua faktor latar belakang ini membentuk pola pikir (*mind set*) yang akan mempengaruhi masalah yang diinvestigasi dan cara melakukan investigasi oleh ilmuwan.

Keempat, sangatlah penting bagi siswa untuk dapat membedakan observasi dan inferensi. Observasi merupakan pernyataan deskriptif tentang fenomena alam semesta yang secara langsung dapat diakses oleh panca indera dan beberapa orang pengamat dapat mencapai kesepakatan dengan mudah mengenai hasil pengamatan terhadap fenomena tersebut (Lederman, Lederman, & Antink, 2013). Sebagai contoh, dalam kegiatan laboratorium orang dapat mengamati secara langsung tentang warna dan perubahan warna atau suhu dan perubahan suhu dalam sebuah percobaan. Kegiatan ini digolongkan sebagai observasi. Sebaliknya, inferensi adalah pernyataan tentang fenomena yang tidak dapat diakses langsung oleh panca indera dan merupakan hasil dari proses mental yang mencoba untuk menjelaskan atau menduga-duga tentang hal yang diamati. Misalnya, setelah memperoleh data hasil pengamatan di laboratorium siswa diminta untuk melakukan kegiatan membuat kesimpulan, menjelaskan, atau menentukan terjadi tidaknya reaksi kimia, maka mereka dikatakan sedang melakukan inferensi. Model ilmiah (seperti atom atau molekul) merupakan konstruk inferensial yang dapat

membantu menjelaskan fenomena yang diamati. Oleh karena itu, model ilmiah bukan merupakan duplikat (*copy*) dari realitas. Teori ilmiah analog dengan model ilmiah dalam pengertian teori juga merupakan penjelasan inferensial terhadap fenomena yang dapat diamati (McComas, 1998).

Kelima, siswa sebaiknya memahami perbedaan antara hukum ilmiah dan teori ilmiah. Hukum adalah pernyataan atau deskripsi tentang apa yang terjadi pada fenomena yang dapat diamati (Lederman, Lederman, & Antink, 2013; Robertson, 2009). Sebagai contoh, hukum kekekalan massa dalam ilmu kimia berbunyi bahwa massa total zat yang bereaksi (reaktan) sama dengan massa total zat sesudah bereaksi (produk). Pada umumnya teori memberikan mekanisme yang menjelaskan sesuatu yang kita amati. Sebagai contoh, teori kinetika molekul dapat menjelaskan fenomena yang berhubungan dengan perubahan-perubahan keadaan fisik materi, atau berhubungan dengan laju reaksi kimia, dan menjelaskan fenomena yang berkaitan dengan panas reaksi dan transfer kalor. Teori kinetika gas layak dianggap sebagai sebuah teori karena teori tersebut mampu menjelaskan mekanisme daripada sekedar deskripsi hasil. Namun, teori kinetika gas tidak akan pernah menjadi sebuah hukum. Teori yang baik adalah teori yang dapat menjelaskan hukum. Sebaik apapun sebuah teori, teori tersebut tidak akan pernah berubah statusnya menjadi sebuah hukum. Teori dan hukum memiliki status sah sebagai produk sains dan kita tidak dapat menganggap hukum memiliki kedudukan yang lebih tinggi daripada teori (Lederman, 2007).

Keenam, sains sebagai aktivitas manusia dipraktekkan dalam konteks budaya yang lebih luas, dan para ilmuwan merupakan produk dari budaya tersebut. Sains mempengaruhi dan dipengaruhi oleh berbagai elemen (misalnya politik, ekonomi, struktur kekuasaan, agama dan filsafat) dan lingkungan budaya intelektual di dalamnya (Lederman *et al.*, 2002: 501). Nilai-nilai budaya juga menentukan apa dan bagaimana sains dilakukan, diinterpretasikan, diterima dan digunakan (Schwartz, Lederman, & Crawford, 2004: 613). Sebagai contoh, praktek akupunktur sebelumnya tidak diterima sebagai sains di dunia Barat namun sekarang sudah diterima dunia Barat telah dapat menjelaskan sisi keilmiahannya dari akupunktur (Lederman, 2007: 834). Oleh karena itu, arah dan produk ilmu pengetahuan akan dipengaruhi juga oleh masyarakat dan budaya tempat ilmu pengetahuan tersebut diterapkan.

Beberapa peneliti mensurvei bagaimana pemahaman calon guru sains dan guru-guru sains di luar negeri tentang hakekat sains (*NOS*) dengan asumsi bahwa pemahaman guru tentang sains dapat mempengaruhi pemahaman siswa. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pada umumnya, seperti halnya siswa, guru dan calon guru tidak memiliki pemahaman yang memadai tentang *NOS* (misalnya penelitian King, 1991; Tsai, 2002). Mengingat pentingnya memasukkan aspek *NOS* untuk meningkatkan literasi sains siswa, beberapa penelitian berupaya untuk mengkaji cara-cara yang efektif untuk meningkatkan pemahaman guru tentang hakekat sains (Akerson, Abd-El-Khalick, & Lederman, 2000). Menurut Lederman (1998), ada tiga strategi pembelajaran yang utama untuk mengajarkan *NOS* selama empat dekade, yaitu melalui pendekatan sejarah, pendekatan eksplisit dan pendekatan implisit. Contoh-contoh penelitian berikut menginvestigasi penggunaan pendekatan eksplisit dan implisit.

- Penelitian yang dilakukan oleh Khishfe & Lederman (2007) tentang hubungan antara konteks dengan pemahaman tentang *NOS*. Hasil penelitian kualitatif ini menunjukkan bahwa pemahaman siswa yang diajarkan materi pelajaran dengan *NOS* secara eksplisit meningkat dibandingkan dengan siswa yang diajar materi pelajaran tanpa *NOS* eksplisit. Penelitian ini menyarankan bahwa pembelajaran yang secara eksplisit memasukkan *NOS* baik secara terintegrasi dengan materi ataupun tidak dapat digunakan untuk meningkatkan pemahaman siswa tentang *NOS*. Namun perlu dipertimbangkan penggunaan waktu pembelajaran harus realistis.
- Bell, Matkins, & Gansneder (2011) melakukan penelitian eksperimen tentang bagaimana pengaruh pembelajaran kontekstual dengan memasukkan aspek *NOS* secara *eksplisit* dibandingkan dengan pembelajaran kontekstual dengan aspek *NOS* *implisit* terhadap pemahaman calon guru SD terhadap *NOS*. Konteks yang digunakan adalah perubahan iklim global. Hasil penelitian menunjukkan bahwa calon guru SD yang diberi pembelajaran dengan aspek *NOS* secara eksplisit, baik dengan konteks perubahan iklim global ataupun tidak menggunakan konteks tersebut, memiliki pemahaman yang lebih baik secara signifikan dibandingkan dengan

pemahaman calon guru SD yang diberi pembelajaran dengan aspek *NOS* implisist. Dari kedua penelitian ini dapat disimpulkan bahwa mengajarkan aspek *NOS* untuk meningkatkan literasi sains sebaiknya dilakukan secara eksplisit, baik dengan konteks ataupun tanpa konteks.

Dalam konteks Indonesia, dalam payung penelitian saya, Syukron (2012) dan Handoko (2012) menganalisis buku kimia SMA kelas X (Koefisien Kappa = 0,69) dan XI (Koefisien Kappa=0,846) tentang bagaimana para penulis dari 3 buku teks terkenal di Indonesia menyajikan aspek *NOS* (kesepuluh aspek *NOS* terdiri dari aspek empiris, inferensial, kreatif, *theory-driven*, tentatif, metode ilmiah, teori ilmiah, hukum ilmiah, dimensi sosial sains, dan penanaman sains dalam sosial dan budaya). Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar aspek *NOS* disajikan oleh penulis buku teks secara implisit dan aspek terbanyak yang terdapat dalam buku teks tersebut keberadaannya bervariasi tergantung pokok bahasan yang dikaji.

Penulis juga meneliti pemahaman *NOS* siswa SMP terbaik se Jawa Timur. Instrumen yang digunakan adalah angket *NOS* (reliabilitas= 0,802) yang mengukur 6 aspek *NOS* (pengamatan dan inferensi, tentatif, teori dan hukum ilmiah, keterikatan sosial dan budaya, imajinasi dan kreativitas, metode ilmiah). Dari 840 siswa yang disampling menunjukkan bahwa siswa yang paham terhadap keenam aspek *NOS* hanya sebesar 8%. Siswa yang cukup paham terhadap seluruh aspek *NOS* sebanyak 17%. Selanjutnya siswa yang kurang paham sebanyak 10% dan siswa yang tidak paham terhadap seluruh aspek *NOS* sebanyak 2%. Sementara itu, sebanyak 63% siswa tidak dapat dikategorikan. Hal ini menunjukkan bahwa pemahaman siswa SMP tentang *NOS* masih sangat rendah (Laporan Penelitian Hibah Bersang, Lemlit, 2013).

Selain itu, masih dalam payung penelitian yang sama, penelitian oleh Ratnawati (2013) terhadap 93 mahasiswa calon guru kimia UM tahun ke-3 tentang 10 aspek *NOS*. Dengan menggunakan instrumen tes pilihan ganda (reliabilitas=0,744) diperoleh data bahwa umumnya mahasiswa memiliki pemahaman yang cukup baik (60,73%) terhadap ke delapan aspek *NOS*, namun kurang bagus (15,40%) pada aspek teori ilmiah dan yang paling dikuasai dengan baik oleh mahasiswa adalah aspek dimensi sosial sains (85,95%). Hal ini menunjukkan bahwa mahasiswa calon guru kimia UM sudah memahami *NOS* dengan cukup baik walaupun masih perlu mendapatkan penekanan pada beberapa aspek *NOS* tersebut.

Cara Mengekplisitkan *NOS* dalam Pembelajaran Sains

Hadirin yang saya muliakan,

Dari hasil kajian literatur dan hasil penelitian yang telah saya lakukan maka gagasan yang diajukan dalam pidato ini untuk meningkatkan literasi sains adalah bagaimana mendesain pembelajaran sains yang mengekplisitkan aspek *NOS* dengan menggunakan konteks. Konteks pembelajaran meliputi segala sesuatu yang berada di lingkungan sekitar yang dapat berupa fisik, sosial, institusional dan personal yang mempengaruhi proses belajar mengajar. Berkaitan dengan konteks, karakteristik pembelajaran sains dapat digolongkan sebagai pembelajaran berkonteks dan yang tidak berkonteks. Bila *NOS* diajarkan dengan cara yang tidak berkonteks maka *NOS* tersebut menjadi fokus utama pembelajaran dan diajarkan melalui penggunaan kegiatan dan diskusi khusus yang dirancang untuk mendorong aspek-aspek tertentu dari *NOS* dengan tidak mengaitkan langsung terhadap konten sains atau keterampilan proses. Dalam pembelajaran *NOS* yang berkonteks, misalnya, *NOS* diintegrasikan dalam topik sains tertentu. Pembelajaran *NOS* secara eksplisit tanpa menggunakan konteks akan kurang bernilai, karena hasil penelitian menunjukkan bahwa siswa akan belajar jika disertai dengan contoh-contoh kasus atau konteks (Gentner & Colhoun, 2008). Pada dasarnya ada 3 cara yang bisa dilakukan untuk mengekplisitkan *NOS* dalam desain pembelajaran, yaitu: 1) dengan konteks kasus-kasus kontemporer, 2) dengan proses inkuiri ilmiah, dan 3) dengan konteks sejarah.

1. Konteks kasus kontemporer

Mengajarkan *NOS* dalam konteks isu-isu kontemporer adalah pendekatan riil dalam upaya mengajarkan literasi sains (Khishfe, 2012). Siswa yang memiliki literasi sains yang baik diharapkan

mampu memecahkan permasalahan-permasalahan sains dan teknologi yang kompleks dalam kehidupan modern. Oleh karena itu, topik *NOS* yang diajarkan sangat melekat pada situasi yang menggambarkan warga negara yang dituntut untuk memecahkan isu-isu sosioilmiah (*socioscientific issues/SSI*). *NOS* yang dikaitkan dengan isu-isu kontemporer, termasuk *SSI*, untuk mengembangkan literasi sains sekurang-kurangnya memenuhi ciri argumentasi manfaat, argumentasi demokrasi dan sedikit argumentasi sosial tentang mengapa seseorang harus mengetahui sesuatu tentang sains dan ciri ini disebut dengan literasi sains fungsional (Ryder, 2001).

Millar (1996) mengemukakan 5 argumentasi mengapa seorang ilmuwan atau non ilmuwan perlu mengenal sains, yaitu: 1) argumen ekonomi (*economic*), menunjukkan bahwa ada hubungan antara level pendidikan sains dengan kemakmuran ekonomi suatu bangsa, terutama melalui kebutuhan untuk memastikan kelangsungan penyediaan sarjana sains yang akan memasuki profesi bidang sains, 2) argumen manfaat (*utility*), menunjukkan bahwa pemahaman sains praktis berguna dalam konteks sehari-hari dalam masyarakat berteknologi maju, 3) argumen demokrasi (*democratic*), menunjukkan bahwa sains memungkinkan individu untuk terlibat dalam perdebatan dan pengambilan keputusan dalam konteks yang menampilkan informasi ilmiah. Misalnya, individu akan mengambil manfaat dari pemahamannya dasar tentang sifat radioaktif unsur ketika ia berkontribusi dalam suatu diskusi tentang keamanan warga penduduk sekitar lokasi dengan adanya pembangkit tenaga listrik nuklir, 4) argumen sosial (*social*), menunjukkan bahwa hubungan antara sains dan budaya yang lebih luas penting untuk dipelihara. Dari sudut pandang ini, dimungkinkan bahwa orang yang memiliki pengetahuan sains akan merasa tidak asing dengan sains dan memahami tujuan sains, dan 5) argumen budaya (*cultural*) menunjukkan bahwa orang harus tahu sesuatu tentang sains karena sains merupakan prestasi besar dari kebudayaan manusia.

Literasi sains penting bagi semua siswa. Hal ini disebabkan karena sebagian besar siswa tidak akan menjadi ilmuwan yang profesional. Mereka perlu memiliki kemampuan dalam menggunakan proses ilmiah dan kebiasaan berfikir dalam memecahkan masalah yang dijumpai dalam kehidupan sehari-hari dan untuk menghadapi masalah yang melibatkan sains dan pembuatan keputusan (Sadler, 2004). Kasus-kasus kontemporer seperti *SSI* menjadi semakin penting dalam pendidikan sains karena dapat digunakan sebagai alat untuk: (a) menjadikan pembelajaran sains lebih relevan bagi kehidupan siswa; (b) wahana yang mengarahkan hasil belajar seperti apresiasi terhadap hakekat sains (*NOS*); (c) meningkatkan argumentasi berdialog; (d) meningkatkan kemampuan mengevaluasi informasi ilmiah; dan (e) termasuk aspek penting dalam literasi sains (Sadler & Zeidler, 2004: 6). Selanjutnya, *SSI* mampu menginspirasi, memprovokasi, atau sebaliknya mengkontroversikan ide-ide/wawasan dan biasanya melibatkan perdebatan para ahli pada pertanyaan-pertanyaan ilmiah yang tidak memiliki solusi sederhana dan jelas (Kolstø et al., 2006). Kontroversi itu, yang memprovokasi keterlibatan pikiran siswa, merupakan keunikan *SSI* karena provokasi tersebut tidak mungkin bisa muncul dalam perkuliahan/ceramah biasa. Oleh karena itu, *SSI* memiliki potensi juga untuk mengasah kemampuan berfikir kritis siswa.

Masalah-masalah *SSI* menggabungkan komponen-komponen moral dan etika dari suatu topik sains yang dilakukan melalui kegiatan diskusi dan interaksi siswa tentang isu-isu kontroversial bertujuan untuk meredam/ memecahkan isu-isu tersebut. Oleh karena itu, *SSI* bersifat terbuka sehingga memungkinkan siswa untuk berfikir kritis mengenai isu-isu tersebut bersama dengan orang lain yang memiliki pandangan yang berbeda (Simonneaux, 2001; Zeidler & Sadler, 2008).

Secara singkat dapat disimpulkan bahwa kasus-kasus kontemporer (termasuk *SSI* di dalamnya) nampaknya cocok untuk mengenalkan beberapa aspek *NOS* dan dapat mengembangkan apresiasi siswa terhadap pentingnya memahami *NOS*. Melalui kasus-kasus yang relevan dan akrab bagi siswa akan lebih memvisualisasikan konsep-konsep yang abstrak agar menjadi lebih konkrit. Selain itu, melalui pembelajaran dengan menggunakan isu-isu kontemporer, diharapkan siswa menjadi sadar akan aspek-aspek penting dalam penciptaan sains/ilmu pengetahuan (*science-in-the-making*) seperti ketidakpastian (*uncertainty*), tentatif (*tentativeness*), subyektif (*subjectivity*), pandangan yang beragam (*multiple perspectives*), peran pendanaan (*the role of funding*), minat politik (*political interests*), and keterikatan sains dengan sosial (*social embeddedness of science*). Siswa dapat menerapkan pengetahuan *NOS* yang mereka pahami dalam perdebatan *SSI* yang otentik dan

mempraktekkan ketrampilannya sebagai warga negara yang kompeten dalam lingkungan yang bersifat “latihan”. Namun, kasus kontemporer itu sendiri tidak membekali siswa dengan alat literasi sains yang dasar untuk menyelesaikan kontroversi ilmiah, yaitu termasuk bagaimana menginterpretasikan atau mengatasi “sifat tentatif ” (atau ketidakpastian ilmiah) dalam kasus tertentu; atau bagaimana menilai bukti empiris ataupun faktor subjektivitas yang dapat menyebabkan bukti-bukti menjadibias. Pemahaman NOS yang penting seperti itu tidak akan diperoleh secara langsung dari kasus kontemporer melainkan harus dintergasikan secara eksplisit. Contoh konteks kontemporer yang dapat digunakan sebagai konteks pembelajaran NOS misalnya perubahan iklim atau pemanasan global (sains), pencemaran, pembangkit listrik tenaga nuklir atau zat aditif pada makanan, dan sebagainya. Sedangkan, langkah-langkah yang dilakukan bisa ketika mengintegrasikan NOS dalam konteks isu-isu populer atau *SSI* adalah:

- Mengidentifikasi materi sains yang akan diajarkan dan konteks belajar yang berupa isu-isu populer atau *SSI* yang terkait dengan materi tersebut. Isu-isu yang diangkat dapat diperoleh melalui media massa yang populer dan diakui kredibilitasnya.
- Menganalisis kedalaman dan keluasan materi yang terkait dengan konteks agar sesuai dengan level sekolah/tingkat pengetahuan siswa.
- Mengidentifikasi aspek-aspek NOS yang dapat diintegrasikan secara eksplisit dalam konteks yang dipilih.
- Menyusun skenario pembelajaran dan lembar kegiatan siswa dengan memilih pertanyaan-pertanyaan yang mampu melatih siswa untuk berfikir kritis dan ketrampilan lain yang diperlukan dalam berliterasi sains.

Berikut ini adalah ilustrasi rancangan pembelajaran materi sains dengan mengeksplicitkan NOS dalam konteks isu-isu kontemporer/*SSI* untuk mengembangkan literasi sains:

- Topik: Pencemaran Lingkungan di SMP
- Subtopik: Pemanasan Global
- Tujuan Pembelajaran: melalui pengalaman belajar mengkaji literatur, mengamati gambar ilustrasi, animasi, menganalisis artikel, observasi, diskusi dan presentasi, siswa dapat: 1) Menjelaskan pengertian pemanasan global, 2) Mengidentifikasi faktor-faktor penyebab pemanasan global, 3) Menjelaskan dampak pemanasan global bagi ekosistem, 4) Menganalisis sumber dari berbagai jenis gas rumah kaca, 5) Menganalisis upaya penanggulangan masalah pemanasan global dari berbagai informasi tentang pemanasan global, 6) mempresentasikan usulan penanggulangan masalah pemanasan global, 7) menjelaskan sikap terhadap pemanasan global, 8) memahami hakekat sains, terutama dalam aspek empiris dan inferensi, aspek tentatif, subyektivitas (*theory-driven*) dan keterkaitan sains dengan sosial budaya.

Skenario: Siswa diberi kegiatan pembelajaran seperti menggali informasi di website tentang pemanasan global dan/atau ditayangkan video, gambar, bacaan yang dikutip dan diramu dari beberapa media massa berkaitan dengan konteks pemanasan global. Dengan menggunakan LKS siswa dituntun dengan pertanyaan-pertanyaan yang mengasah ketrampilan berfikir kritis dan pemahaman tentang NOS eksplisit. Selain itu siswa diajak untuk beradu argumentasi untuk mempertahankan ide-ide mereka dalam diskusi.

Tabel 2. Contoh penjabaran literasi sains dalam pembelajaran dengan konteks kontemporer/*SSI*/pemanasan global

| Aspek literasi sains | Kemampuan | Pertanyaan atau kegiatan |
|----------------------|----------------------|--|
| what do people know | Memahamimateri sains | <ul style="list-style-type: none"> • Apa yang Anda ketahui tentang pemanasan global? • Bagaimana hubungannya dengan pencemaran udara? • Mengapa gas-gas pencemar yang menyebabkan pemanasan global disebut gas rumah kaca? • Bagaimana hubungan istilah tersebut dengan rumah kaca dalam bidang pertanian? • Bagaimana mekanisme terjadinya pemanasan global? |

| Aspek literasi sains | Kemampuan | Pertanyaan atau kegiatan |
|----------------------|--|--|
| what do people value | Epistemologis sains (NOS) | <ul style="list-style-type: none"> • Pengetahuan berasal dari kegiatan melakukan pengamatan/observasi dan menghasilkan data ilmiah. Pemanasan global merupakan suatu pengetahuan ilmiah. Indikator apakah yang kalian amati/observasi yang menunjukkan bahwa telah terjadi pemanasan global di bumi? (NOS: aspek empiris) • Pengetahuan merupakan hasil inferensi manusia terhadap data hasil observasi mereka. Ada sekelompok peneliti yang membenarkan terjadinya pemanasan global yang akhirnya menghasilkan Protokol Kyoto, namun ada sekelompok peneliti yang bersikap skeptis atau menolak pandangan tersebut. Para peneliti tersebut sangat tergantung pada teori yang dimiliki dalam menyimpulkan hasil pengamatannya tentang pemanasan global. Menurut Anda benarkah bahwa bumi kita mengalami pemanasan global? (NOS: aspek theory-laden (subyektivitas), inferensi & empiris) • Suatu pengetahuan dapat berubah sesuai dengan perkembangan zaman. Dewasa ini, zaman telah berkembang dari tradisional ke industri yang modern. Keberadaan industri yang begitu banyak menghasilkan gas rumah kaca yang menyebabkan pemanasan global. Dengan adanya pemanasan global terjadilah perubahan iklim yang menyebabkan petani kesulitan menentukan musim tanamnya. Dalam hal ini ada keterikatan antara aspek sosial budaya dengan pengetahuan ilmiah yaitu pemanasan global. Apa yang dapat Anda lakukan untuk mengatasi pemanasan global dalam upaya membantu petani menentukan musim tanamnya dengan mudah kembali? (NOS: aspek tentatif dan keterkaitan sosial budaya) |
| | Etika/Moral | |
| what can people do | <ul style="list-style-type: none"> • Kemampuan belajar • Kemampuan bersosialisasi • Kemampuan melakukan prosedur • Kemampuan berkomunikasi | <ul style="list-style-type: none"> • Menggali informasi dari berbagai sumber referensi dan mengkritisi kredibilitas sumber yang diperoleh. • Melakukan diskusi secara kooperatif dengan teman-teman sekelas. • Melakukan observasi ke lapangan atau bereksperimen di laboratorium • Melakukan presentasi dan berargumentasi. |

2. Mengeksplisitkan NOS dalam Kegiatan Inkuiri Ilmiah

Inkuiri ilmiah didefinisikan sebagai berbagai cara yang digunakan oleh para ilmuwan untuk mempelajari alam semesta dan untuk mengajukan penjelasan berdasarkan bukti-bukti yang diperoleh dari kegiatannya. Inkuiri juga mengacu pada aktivitas yang dilakukan oleh siswa dalam proses mengembangkan pengetahuan dan pemahaman tentang ide-ide ilmiah, juga tentang bagaimana seorang ilmuwan mempelajari alam semesta (NRC, 2012). Oleh karena itu, walaupun sangat erat kaitannya dengan proses sains, inkuiri ilmiah lebih dari sekedar mengembangkan ketrampilan proses seperti mengamati, menginfer, mengklasifikasikan, memprediksi, mengukur, merumuskan masalah, menginterpretasi dan menganalisis data. Dengan kata lain, inkuiri ilmiah tidak hanya mencakup

keampilan proses sains tradisional tetapi juga mengkombinasikan proses tersebut dengan pengetahuan, penalaran, dan berfikir kritis untuk mengembangkan pengetahuan ilmiah.

Kegiatan inkuiri juga merupakan sarana untuk menerapkan pendekatan konstruktivistik dalam belajar yang mana melalui sarana tersebut siswa membangun konsep sains yang diajarkan dan memperdalam pemahamannya tentang konsep tersebut. Tujuan inkuiri di kelas atau di laboratorium adalah membuat pembelajaran sains dapat benar-benar menyerupai inkuiri otentik kegiatan ilmiah (Lederman, 2014). Dalam hal ini, guru berupaya untuk mewujudkan kegiatan ilmiah tersebut di kelas atau di laboratorium dan sekaligus menunjukkan kepada siswa bagaimana pengetahuan tentang alam semesta diciptakan, atau dibangun. Pembelajaran inkuiri dapat diterapkan dalam berbagai konteks (bahkan juga pada konteks sejarah atau kasus kontemporer).

Sejak masyarakat pendidik sains mengakui bahwa pemahaman siswa terhadap hakekat sains (*NOS*) dan inkuiri ilmiah merupakan hasil belajar yang penting, berbagai negara termasuk Indonesia mulai mengajarkan *hands-on activity*, pembelajaran berbasis inkuiri dan juga pembelajaran dengan ketrampilan proses. Pendekatan yang digunakan tersebut adalah pendekatan implisit dengan asumsi bahwa dengan melakukan kegiatan sains (*doing science*) siswa akan mudah memahami *NOS* dan inkuiri ilmiah (Lederman, 2014). Namun, hasil-hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan implisit tidak efektif dalam meningkatkan pemahaman guru dan siswa tentang *NOS* dan/atau inkuiri ilmiah (Haukoos & Penick, 1985).

Pendekatan alternatif yang cocok untuk meningkatkan literasi sains adalah pendekatan eksplisit. Untuk meningkatkan pemahaman siswa tentang berbagai upaya ilmiah (*scientific endeavor*) (misalnya subjektivitas, inferensi, observasi, metode ilmiah), maka sudah seharusnya pembelajaran riil di kelas atau di laboratorium direncanakan secara eksplisit dan bukan hanya diantisipasi sebagai efek samping atau hasil sekunder dari berbagai pendekatan dalam pengajaran sains. Oleh karena itu, secara eksplisit beberapa aspek *NOS* yang sesuai dengan materi pelajaran diintegrasikan ke dalam strategi pembelajaran inkuiri ilmiah. Guru perlu secara aktif melakukan *scaffolding* untuk mentransfer aspek-aspek *NOS* dari kegiatan investigasi siswa ke dalam konteks sosial yang lebih relevan. Jika siswa memiliki pengalaman dalam melakukan kegiatan sains yang otentik, harapannya, mereka bisa merefleksikan, secara alamiah, apa yang telah mereka lakukan dan mengapa mereka melakukan itu. Dalam hal ini, guru memfasilitasi siswa dalam memahami *NOS*. Pada gilirannya, siswa akan memiliki apresiasi yang lebih baik terhadap konsep-konsep yang sedang dipelajari dan mereka memahami bagaimana konsep tersebut dikembangkan. Siswa akan “melihat” hubungan antara kegiatan sains, pengetahuan sains, dan hakekat sains (*NOS*). Hal ini tidak akan mengalihkan perhatian dari materi pelajaran, namun akan lebih membantu siswa dalam mengembangkan pemahamannya terhadap materi secara lebih baik dan juga pemahaman tentang sains sebagai cara mengetahui alam semesta. Selain itu, jika kegiatan inkuiri tersebut berhasil, maka diharapkan siswa belajar bagaimana membangun klaim ilmiah, meningkatkan kemampuan bertanya dan berfikir kritis serta bagaimana berargumentasi yang baik.

Sehubungan dengan mengeksplisitkan *NOS* dalam kegiatan inkuiri ilmiah, saya bersama-sama dengan mahasiswa sarjana S1 telah mengembangkan bahan ajarnya yang berupa Buku Siswa dan Buku Panduan Guru. Sampai saat ini sudah lebih dari 20 topik kimia SMA yang dikembangkan dengan inkuiri ilmiah dan *NOS* eksplisit, namun masih dalam taraf uji validitas konten dan selanjutnya perlu diuji cobakan efektifitasnya terhadap beberapa variabel misalnya pemahaman konsep, berfikir kritis, pemahaman *NOS*, pemahaman inkuiri ilmiah, dan lain sebagainya. Selain bahan ajar Kimia SMA, saya dan 2 orang mahasiswa juga dalam proses mengembangkan bahan ajar untuk IPA SMP. Berikut ini contoh hasil pengembangan Bahan Ajar berupa Buku Teks yang telah dilakukan oleh mahasiswa yang saya bimbing:

Subbab 6

IKATAN LOGAM

IDE UTAMA Logam tersusun dari kation-kation logam dan elektron valensi yang bergerak bebas di sekelilingnya.

Materi Ajar

- 6.1 Susunan 2 Dimensi Atom-atom Logam
- 6.2 Jenis-jenis Susunan Atom-atom Logam
- 6.3 Model Ikatan logam
- 6.4 Sifat-sifat Logam

KREATIVITAS: Layar Sentuh Smartphone

- Layar sentuh *smartphone* kalian tersusun dari material yang memancarkan cahaya bila terhubung dengan sumber energi.
- Gambar disamping adalah pixel LED (*light-emitting diodes*) yang terbuat dari bahan yang menghasilkan warna spesifik pada tegangan tertentu.
- Tiap pixel akan merespon sentuhan dalam waktu satu milidetik.
- Perangkat-perangkat elektronik yang mengandung layar sentuh terdiri dari bahan-bahan logam dan material padat lainnya.

Gambar 2. Judul bahan ajar yang dikerjakan



MENGAMATI adalah salah satu kegiatan ilmiah yang dilakukan oleh para ilmuwan. Ilmu pengetahuan seringkali didapat melalui kegiatan mengamati (observasi). Dengan melakukan observasi, ilmuwan dapat memperoleh fakta-fakta dan informasi. Amatilah fakta dan informasi berikut untuk mendapatkan pengetahuan seperti yang dilakukan para ilmuwan!



(a)



(b)



(c)

Gambar 6.1 (a) Kini kita sangat jarang menemui anak-anak bermain petak umpet, kelereng, bahkan bermain bola hingga sore tiba. Negara kita kembali dijajah, serangan teknologi telah mematikan jiwa sosial anak-anak Indonesia. Laptop, iPod, *smartphone*, dan tab menjadi sarana bermain anak-anak sekarang. Dibalik semua itu, gadget-gadget diciptakan dari material padat berupa logam-logam. Sifat-sifat logam tersebut dimanfaatkan untuk menciptakan gadget dengan fitur yang canggih. (b) Bangunan Greenhouse di Amerika, sebuah bangunan yang berdiri kokoh karena terbuat dari logam-logam yang diolah sedemikian rupa. Logam menjadi material penting dalam kehidupan. Mereka menyusun rumah rumah kita, melindungi keluarga dari panas, terik, dan hujan. (c) Kalian tentunya pernah pergi ke pasar atau swalayan. Kalian pasti menemui buah-buah yang disusun sangat teratur dan rapi. Penjual tidak sembarang menatanya seperti itu, mereka punya maksud tertentu. Dari fakta-fakta mengenai layar sentuh *smartphone*, gadget, bangunan, dan penataan buah di atas, tuliskan pertanyaan yang ada di benak kalian!

(Sumber: (a) Eubanks, 2009: 330 (b) Housecroft & Constable, 2010: 334 (c) Moore dkk, 2011: 507)

Tujuan Pembelajaran
Peserta didik dapat

- mendeskripsikan susunan atom pada logam,
- menjelaskan susunan rapat kubus, heksagonal, kubus primitif, dan kubus berpusat badan.

IDE POKOK Atom-atom pada logam tersusun secara teratur dan berulang.

Banyak ilmu pengetahuan berasal dari proses pengamatan atau observasi. Setelah melakukan pengamatan, biasanya ilmuwan akan melakukan proses menyimpulkan atau inferensi terhadapnya. Logam misalnya, kita dapat mengamati bagaimana tembaga dapat menghantar listrik dengan baik; bagaimana penampilan perak yang berkilau; bagaimana kuatnya besi menyangga rumah-rumah kita; dan bagaimana kita dapat menikmati bermacam bentuk emas. Para ilmuwan telah melakukan observasi mengenai

Aspek
NOS

Gambar 3. Ilustrasi NOS eksplisit dalam Bahan Ajar

sifat-sifat logam. Inferensi pun dilakukan mengapa logam bersifat seperti itu. Beberapa sifat-sifat alamiah dari logam hasil kegiatan observasi dan inferensi para ilmuwan diringkas dalam Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Beberapa hasil inferensi mengenai sifat alamiah logam.

| Observasi | Inferensi |
|--|---|
| Logam bersifat padat. | Atom-atom pada logam tersusun secara rapat. |
| Logam bersifat lentur. | Atom-atom pada logam mudah bergeser satu sama lain. |
| Logam bersifat konduktor listrik yang baik. | Logam mengandung partikel bermuatan negatif (elektron) yang bergerak bebas. |
| Logam bersifat konduktor panas yang baik. | Logam mengandung partikel yang bergerak bebas. Mereka mampu bergerak dari daerah dengan suhu tinggi ke rendah secara cepat dengan membawa energi. |
| Logam mempunyai titik leleh dan titik didih yang tinggi. | Antar partikel pada logam terikat sangat kuat sehingga membutuhkan energi tinggi untuk memisahkan mereka. |
| Logam kebanyakan mengkilap. | Sebagian besar cahaya yang mengenai permukaan logam dipantulkan. |

(Sumber: Effendy, *A-Level Chemistry 1B, 2011: 99-100*)

Dari hasil observasi dan inferensi itulah kita dapat mengetahui lebih mendalam gambaran logam secara mikroskopis. Susunan atom-atom dalam logam dapat kita ketahui bila sepotong logam diteliti dengan mikroskop. **Amati dan simak** materi berikut untuk mengetahui lebih mendalam mengenai logam!

HAKIKAT SAINS: Sifat-sifat logam yang telah diketahui didapat melalui proses observasi para ilmuwan terhadap penampakan fisik logam tersebut. Setelah itu, dilakukan inferensi terhadap proses pengamatan tersebut. Hal ini membuktikan bahwa pengetahuan tentang ikatan logam berasal dari pengamatan terhadap fakta-fakta empiris dan kemudian dilakukan inferensi terhadapnya.

6.1 Susunan 2 Dimensi Atom-atom Logam

Atom-atom pada logam tersusun secara teratur dan memiliki pola tertentu. Bila dimisalkan atom-atom tersebut dengan bola pejal, maka bola-bola tersebut tersusun dengan saling bersentuhan satu sama lain. Susunan tersebut meninggalkan suatu ruangan bernama selitan (*interstitial site*). Berikut adalah kemungkinan susunan atom-atom pada logam.

Aspek NOS: Observasi

Gambar 4. Ilustrasi NOS aspek Observasi dan Inferensi eksplisit dalam bahan ajar

Sedangkan beberapa mahasiswa S2 sedang menguji efektivitas rancangan pembelajaran dengan inkuiri ilmiah dipadu dengan isu-isu *SSI* dan NOS eksplisit terhadap pemahaman NOS, pemahaman konsep dan ketrampilan berfikir kritis. Berikut ini adalah contoh Lembar Kerja Siswa yang digunakan untuk membelajarkan topik kimia SMA Hasil Kali Kelarutan dengan menggunakan inkuiri ilmiah (model pembelajaran Learning Cycle 5E) dengan NOS eksplisit, berfikir kritis dan konteks isu-isu kontemporer.



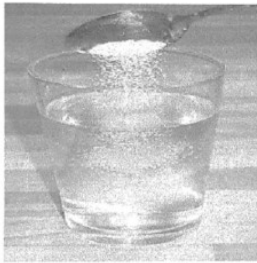
TUJUAN PEMBELAJARAN

- Menjelaskan pengertian larutan belum jenuh, jenuh dan lewat jenuh.
- Menjelaskan pengertian kelarutan.
- Menjelaskan satuan kelarutan zat elektrolit dalam air.

Engagement

Mengamati merupakan kegiatan ilmiah yang dilakukan oleh para ilmuwan ketika mengawali sebuah penyelidikan terhadap fenomena untuk mendapatkan fakta-fakta dan informasi. Oleh karena itu sebagai calon ilmuwan marilah kita melakukan pengamatan terhadap fenomena berikut untuk mendapatkan informasi!

Aspek
NOS



Gambar 1.1 | Pelarutan garam

Gambar di samping merupakan gambar proses pelarutan satu sendok garam dalam segelas air. *Apakah yang terjadi jika jumlah garam yang kita larutkan lebih banyak lagi namun jumlah pelarut air tetap? Apakah garam tersebut masih bisa larut?*

Suatu pelarut tidak dapat melarutkan lagi zat terlarut jika kondisi larutan sudah dalam keadaan jenuh. Kelarutan dimiliki suatu garam pada saat larutan garam dalam keadaan jenuh.

Berdasarkan tujuan pembelajaran hari ini yang sudah disampaikan dan pengamatan kalian terhadap fenomena pelarutan garam, tuliskan pertanyaan yang muncul dalam benakmu! (*memfokuskan pertanyaan*)

Aspek berpikir
kritis

Exploration

Ilmu pengetahuan dapat diperoleh melalui **observasi dan inferensi**. Observasi merupakan kegiatan ilmiah yang mengawali sebuah penyelidikan untuk mendapatkan **bukti ilmiah**. Sedangkan inferensi merupakan kegiatan menyimpulkan sementara berdasarkan fakta-fakta yang didapat. Untuk memperoleh pengetahuan, para ilmuwan menggunakan **metode ilmiah**. Oleh karena itu, marilah kita bertindak layaknya ilmuwan dengan melakukan eksperimen untuk menjawab pertanyaan yang kamu susun sebelumnya!

Gambar 5. Ilustrasi NOS dan berpikir kritis dalam LKS inkuiri ilmiah

AKTIVITAS 1 | Larutan Jenuh dan Konsep Kelarutan

Inkuiri ilmiah

A. Tujuan

- Mengetahui definisi larutan belum jenuh, dan larutan jenuh.
- Mengetahui penentuan kelarutan zat dalam air.

B. Rumuskanlah masalah!

Permasalahan apa yang dapat kalian temukan dalam membuat larutan belum jenuh, jenuh dan menentukan kelarutan garam dapur (NaCl) dalam air?

Tuliskan pertanyaan-pertanyaan terkait dengan percobaan yang akan dilakukan!

C. Susunlah hipotesis!

Tuliskan hipotesis yang muncul dalam benak kalian terkait dengan percobaan yang akan dilakukan!

D. Rancanglah prosedur, dan lakukanlah percobaan!

Seorang peneliti ingin melakukan percobaan membuat larutan belum jenuh dan jenuh dari garam dapur NaCl dan AgCl serta menentukan kelarutannya pada suhu ruang. Peneliti tersebut akan menggunakan 6 gelas kimia dengan masing-masing 3 untuk larutan NaCl dan AgCl. Tiga gelas tersebut yang pertama digunakan untuk membuat larutan belum jenuh, gelas kimia kedua untuk membuat larutan jenuh dengan adanya endapan. Volume larutan yang dibuat masing-masing 100 mL. gelas kimia ketiga digunakan untuk menampung filtrate larutan jenuh dari gelas kimia kedua. Selanjutnya peneliti tersebut dapat menentukan kelarutan NaCl dengan mengetahui jumlah NaCl yang larut.

Bantulah peneliti tersebut untuk menentukan apa saja alat dan bahan yang dibutuhkan serta prosedur kerja untuk melakukan percobaan berdasarkan narasi di atas kemudian konsultasikan rancangan tersebut kepada guru kalian! Setelah itu lakukan percobaan sesuai dengan rancangan yang telah disetujui oleh guru kalian. Untuk mempermudah dalam menganalisis data buatlah tabel pengamatan berkaitan dengan massa NaCl dan AgCl yang larut dapat diketahui dan kelarutannya (g/L) dapat dihitung!

Explanation

Menalar

1. Berdasarkan hasil percobaan, tunjukkan kapan keadaan belum jenuh tercapai!
(melaporkan hasil pengamatan)

Gambar 6. Ilustrasi aspek NOS dan berpikir kritis dalam LKS inkuiri ilmiah

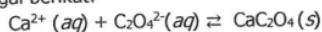
Mengomunikasikan | Setelah melakukan metode ilmiah dan memperoleh kesimpulan, seorang ilmuwan akan mengomunikasikan hasil temuannya untuk membagi pengetahuan yang diperoleh sertadapat dipelajari dan dianalisis oleh ilmuwan –ilmuwan lain. Sebagai calon ilmuwan, ayo presentasikan hasil percobaan dan analisis kelompokmu di depan kelas agar kelompok yang lain dapat menganalisis temuanmu!

Elaboration

CHEMISTRY IN SOCIETY | Penyakit Gout Arthritis dan Batu Ginjal

Kamu pasti pernah menjumpai orang yang terjangkit penyakit gout (asam urat) maupun batu ginjal baik itu dialami oleh tetangga maupun kenalanmu. Penderita penyakit gout akan merasa nyeri di persendian sedangkan penderita baru ginjal akan merasa nyeri di pinggang dan sakit ketika buang air kecil. Hal ini terjadi karena setiap hari tubuh manusia mengeluarkan zat sisa metabolisme yang berupa asam urat. Asam urat akan dikeluarkan melalui urin dan feses secara berkala. Ketika jumlah air yang terkandung dalam tubuh berkurang dan asam urat meningkat maka asam urat yang dihasilkan tubuh akan melampaui nilai kelarutannya yaitu lebih dari 7 mg/100 mL plasma pada suhu 37°C. Ketika kondisi ini berlangsung secara terus menerus, kristal asam urat akan mengendap di tulang rawan, urat daging, dan persendian tulang. Penumpukan endapan ini dalam waktu lama akan menyebabkan rasa nyeri. Endapan kristal ini juga dapat terbentuk pada jaringan di ginjal sehingga menyebabkan kerusakan ginjal.

Asam urat yang tinggi dalam tubuh dapat disebabkan oleh peningkatan produksi asam urat, gagalnya ginjal menyinkronkan asam urat, atau karena banyak mengonsumsi makanan tinggi purin. Purin merupakan senyawa organik yang dapat dipecah menjadi asam urat. Batu ginjal selain berasal dari asam urat juga berasal dari ion oksalat dan ion kalsium yang bereaksi membentuk garam kalsium oksalat yang sukar larut. Jika proses ini terus berlanjut, maka garam sukar larut tersebut akan mengendap dan saling menempel sehingga terbentuklah batu ginjal. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:



Gambar 1.2 | Penumpukan Kristal asam urat pada kaki

Konteks isu-isu kompeten

Menalar

1. Berdasarkan persamaan reaksi di atas dan dengan menerapkan asas Le Chatelier, sebut dan jelaskan tindakan yang dapat dilakukan untuk mencegah terbentuknya batu ginjal! (*Mengevaluasi berdasarkan fakta*)
2. Mengapa penderita asam urat dan batu ginjal tidak boleh banyak mengonsumsi daging dan ikan laut? (*menjawab pertanyaan mengapa*)

Aspek berpikir kritis

Gambar 7. Ilustrasi aspek NOS, berpikir kritis, dan isu-isu kompetensi

3. Mengeksplisitkan NOS dalam Konteks Sejarah

Cara ketiga dalam mengeksplisitkan NOS dalam pembelajaran sains adalah melalui konteks sejarah. Fokus dalam penggunaan konteks ini adalah tentang bagaimana proses pembuatan atau terbentuknya sains. Oleh karena itu siswa akan menyoroti isu-isu epistemik (*epistemology*) dalam konteks tersebut dalam jangkauan manusia. Walaupun, tidak semua konteks sejarah bisa menunjukkan aspek NOS yang sama, namun melalui konteks sejarah setidaknya siswa bisa lebih memahami NOS. Misalnya dalam aspek empiris (*empirical foundations*), fungsi teori (*functions of theory*), hakekat eksperimen (*nature of experiment*) atau observasi (*observation*), dimensi subyektif dari interpretasi ilmiah (*subjective dimensions of scientiûc interpretations*), dan konteks sosial budaya penerapan sains (*sociocultural context*) (Kim & Irving, 2010).

Pembelajaran dengan konteks sejarah selain dapat mengajarkan *NOS* secara eksplisit, juga memiliki keuntungan lain bagi siswa seperti: a) dapat meningkatkan pemahaman konsep sains, b) dapat meningkatkan minat dan motivasi siswa dalam belajar sains, dan c) meningkatkan pemahaman tentang relevansi sains bagi masyarakat (Solomon et al., 1992). Beberapa contoh topik sains yang bisa digunakan sebagai konteks sejarah dalam mengajarkan *NOS* adalah genetika (Biologi) dan suksesi model atom yang cepat (Thomson, Rutherford, Bohr, Bohr–Sommerfeld, mekanika gelombang) (kimia). Melalui konteks sejarah tersebut siswa dapat mengembangkan pengetahuan dan pemahamannya tentang bagaimana pengetahuan ilmiah berkembang sepanjang waktu dan bagaimana hakekat sains dan penggunaan sains selama perkembangannya dipengaruhi oleh konteks masyarakat, moral, spiritual dan budaya.

Implikasi bagi Guru, LPTK dan Kurikulum

Hadirin yang saya muliakan,

Mengembangkan literasi sains anak Indonesia adalah sangat penting untuk dilakukan di abad modern ini. Kenyataan menunjukkan bahwa literasi sains anak Indonesia berdasarkan asesmen PISA sangatlah rendah dibandingkan dengan negara-negara lain di dunia. Hal ini akan berdampak pada masa depan bangsa Indonesia.

Pengembangan literasi sains seharusnya sejalan dengan pengembangan kecakapan hidup (*life skills*), yang mana komponen literasi sains mencakup interseksi dan keseimbangan dari tiga komponen “what do people know” (terdiri dari kemampuan memahami materi sains dan kemampuan epistemologis sains (*nature of science*), “what do people value” (terdiri dari kemampuan beretika atau bermoral), dan “what can people do” (terdiri dari kemampuan belajar, kemampuan bersosialisasi, kemampuan melakukan prosedur, kemampuan berkomunikasi) dan ketrampilan dalam pengambilan keputusan tentang isu-isu kontemporer/*SSI* yang bermunculan seiring dengan kemajuan dalam bidang sains dan teknologi.

Pendekatan yang paling nyata dalam mengembangkan literasi sains anak Indonesia adalah pendekatan eksplisit dengan mengintegrasikan hakekat sains (*NOS*) dalam rancangan pembelajaran. Walaupun sudah ada upaya untuk mengajarkan sains melalui aktivitas *hands-on*, pembelajaran berbasis inkuiri atau pembelajaran dengan ketrampilan proses dalam kurikulum di Indonesia sebelumnya, namun pendekatan dalam pembelajaran tersebut masih bersifat implisit dengan asumsi bahwa dengan melakukan kegiatan sains (*doing science*) siswa akan mudah memahami *NOS* dan inkuiri ilmiah. Terlebih lagi Kurikulum 2013 telah mempersyaratkan guru untuk melaksanakan pembelajaran dengan inkuiri ilmiah yang disebut 5M (Mengamati, Menanya, Mengumpulkan Data, Menalar dan Mengkomunikasikan). Namun, jika guru tidak memahami landasan filosofis (*NOS*) mengapa melakukan 5M dan bagaimana status klaim pengetahuan yang diperoleh dalam kegiatan berinkuiri, maka sangat dimungkinkan hasil belajar yang diharapkan untuk tercapainya literasi sains siswa tidak akan terwujud. Jika dikaitkan dengan asesmen PISA 2015 yang dicanangkan oleh OECD, ada kemungkinan juga capaian literasi anak Indonesia masih tetap dalam posisi saat ini. Karena literasi sains yang menjadi landasan PISA 2015 adalah kemampuan anak dalam menjawab pertanyaan: “*What is important for young people to know, value, and be able to do in situations involving science and technology?*”.

Kompetensi yang diperlukan dalam menjawab pertanyaan ini adalah: 1) Menjelaskan fenomena secara ilmiah; 2) Mengevaluasi dan mendesain inkuiri ilmiah; dan 3) Menginterpretasikan data dan bukti-bukti secara ilmiah. Kompetensi ke-1 membutuhkan pengetahuan materi sains. Sedangkan kompetensi ke 2) dan ke 3) membutuhkan bukan hanya pengetahuan namun juga pemahaman tentang hakekat sains (*NOS*). Oleh karena itu, implikasi dari pembelajaran berorientasi *NOS* adalah:

Bagi guru sains:

- Guru perlu meningkatkan pemahaman tentang *NOS* dan pemahaman tentang bagaimana mengajarkan *NOS* kepada siswa agar literasi sains siswa meningkat.
- Guru sains perlu mengubah *mind set* dari hanya mengajarkan konten sains menuju mengajarkan selain konten sains juga mengajarkan berbagai komponen yang diperlukan dalam berliterasi sains, seperti kemampuan belajar, kemampuan berkomunikasi, kemampuan prosedural.

- Guru perlu memodifikasi rancangan pembelajaran sains dengan mengintegrasikan *NOS* secara eksplisit melalui konteks kontemporer/ *SSI*, inkuiri ilmiah atau konteks sejarah. Mengkontekstualisasikan pembelajaran *NOS* ke dalam pelajaran sains seperti ini berarti menerapkan pemahaman *NOS* yang benar dengan memodifikasi panduan kegiatan lab yang *cookbook* atau mengilustrasikan bagaimana bekerjanya sains secara historis dan contoh-contoh kasus kontemporer dikaitkan dengan ide-ide atau konsep-konsep sains yang fundamental. Dalam hal ini diperlukan pengetahuan dan ketrampilan guru dalam memilih sumber pustaka yang kredibel, memahami inkuiri ilmiah dan dapat mengimplementasikannya di kelas seotentik/sealamiah mungkin.

Bagi lembaga pencetak guru:

- Bagi Institusi pencetak guru seperti UM, pembelajaran berbasis *NOS* secara eksplisit hendaknya diterapkan secara kontinyu pada program studi pendidikan guru tingkat dasar, tingkat menengah, hingga pendidikan tinggi.
- Dari literatur dapat diketahui bahwa dalam praktek pembelajaran sains berorientasi *NOS* secara eksplisit seringkali terjadi kesalahan konsep tentang *NOS* itu sendiri, misalnya (a) hukum dan fakta merupakan sesuatu yang pasti sedangkan teori bersifat tentatif; (b) hukum memiliki tingkatan pengetahuan lebih tinggi dibanding teori; (c) pengetahuan sains bersifat pasti dan mutlak; (d) percobaan/praktikum merupakan prinsip utama dalam sains; dan (e) sains bersifat prosedural dan kurang kreatif. Oleh karena itu, kesalahan-kesalahan konsep tentang *NOS* sebaiknya juga diidentifikasi dan dianalisis.

Bagi pengembang kurikulum:

- Pada pengembangan kurikulum hendaknya dilakukan penyeimbangan antara aspek konten, kognitif, motorik, dan sikap serta aspek konteks sehingga benar-benar dapat meningkatkan literasi sains siswa. Semua komponen literasi sains perlu diintegrasikan secara eksplisit dalam kurikulum, terutama *NOS* menjadi lebih eksplisit tertulis dalam Kompetensi Dasar Kurikulum sesuai dengan level pendidikan siswa. Materi pembelajaran siswa sebaiknya dipilih hal yang esensial dan strategis, sehingga perkembangan kognitif siswa dapat lebih diperhatikan.

Daftar Rujukan

- Abd-El-Khalick, F., & BouJaoude, S. 1997. An exploratory study of the knowledge base for science teaching. *Journal of Research in Science Teaching*, 34(7), 673-699.
- Abd-El-Khalick, F., & Lederman, N. G. 2001. Improving science teachers' conceptions of nature of science: A critical review of the literature. *International Journal of Science Education*, 22(7), 665–701
- Abd-El-Khalick, F., & Lederman, N.G. 2000. Improving science teachers' conceptions of the nature of science: A critical review of the literature. *International Journal of Science education*, 22(7), 665–701.
- Akerson, V. L., Abd-El-Khalick, F., & Lederman, N. G. 2000. Influence of a reflective explicit activity-based approach on elementary teachers' conceptions of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(4), 295–317.
- Bell, R. L., Lederman, N. G., & Abd-El-Khalick, F. 2000. Developing and acting upon one's conception of the nature of science: A follow-up study. *Journal of Research in Science Teaching*, 37, 563–581.
- Bell, R. L., Matkins, J.J., & Gansnedder, B.M. 2011. Impacts of contextual and explicit instruction on preservice elementary teachers' understandings of the nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 48 (4), 414–436. Driver, R., Leach, J., Miller, A., & Scott, P. 1996. *Young people images of science*. Pennsylvania: Open University Press.
- Fives, H., Huebner, W., Birnbaum, A.S, Nicoloch, M. 2014. Developing a measure of scientific literacy for middle school students. *Science Education*, 98: 549– 580.
- Friedman, T. 2007. *The world is flat: A brief history of the twenty-first century*. New York: Farrar, Straus and Giroux.
- Gentner, D., & Colhoun, J. 2008. Analogical processes in human thinking and learning. In B. Glatzeder, V. Goel, & A. Muller (Eds.), *Towards a theory of thinking* (pp. 35–48). Berlin, Germany: Springer.
- Graber, W., Nentwig, P., Becker, H.J, Sumfleth, E., Pitton, A., Wollweber, K, Jorde, D. 2001. Scientific literacy: From theory to practice. In H. Behrendt, et al (Eds). *Research in Science Education- Past, Present, and Future* (pp 61–70). Nederland: Kluwer Academic Publisher.
- Haukoos, G.D., & Penick, J.E. 1985. The effects of classroom climate on college science students: A replication study. *Journal of Research in Science Teaching*, 22(2), 163–168.
- Hodson, D. 2014. Nature of science in the science curriculum: origin, development, implications and shifting emphasis. Dalam Matthews, M.R (Eds). *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching* (hal. 911–970). New York: Springer.
- Hofstein, A., Eilks, I., & Bybee, R. 2011. Societal Issues and their importance for contemporary science education: a pedagogical justification and the state of the art in Israel, Germany and the USA. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 9 (6), 1459–1483
- Holbrook, J., & Rannikmae, M. 2009. The meaning of scientific literacy. *International Journal of Environmental & Science Education*, 4(3), 275–288.
- Holbrook, J., & Rannikmae, M. 2007. Nature of science education for enhancing scientific literacy. *International Journal of Science Education*, 29(11), 1347–1362.
- Kim, S.Y., & Irving, K.E. 2010. History of science as an instructional context: Student learning in genetics and nature of science. *Science & Education*, 19(2), 187–215.
- King, B.B. 1991. Beginning teachers' knowledge of and attitudes toward history and philosophy of science. *Science Education*, 75(1), 135–141.
- Kolstø, S., Bungum, B., Arnesen, E., Isnes, A., Kristensen, T., Mathiassen, K., Mestad, I., Quale, A., Tonning, A., & Ulvik, M. 2006. Science students' critical examination of scientific information related to socioscientific issues. *Science Education*, 90, 632–655.
- Lederman, N.G., Abd-El-Khalick, F., Bell, R.L., Schwartz, R.S. 2002. Views of nature of science questionnaire: toward valid and meaningful assessment of learners' conceptions of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(6):497–521.

- Lederman, N.G. 2006. Syntax of Nature of Science within Inquiry and Science Instruction. Dalam B. Flick and N.G. Lederman (Eds.) *Scientific Inquiry and Nature of Science* (hal.301-317). Dordrecht, Netherlands: Springer.
- Lederman, N.G., Abd-El-Khalick, F., Bell, R.L., & Schwartz, R.S. 2002. Views of nature of science questionnaire: Toward valid and meaningful assessment of learners' conceptions of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 39, 497–521.
- Lederman, N.G. 2007. Nature of science: Past, present, and future. In S.K. Abell, N.G. Lederman, (Eds), *Handbook of research in science education* (pp 831-879). Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Publishers.
- Lederman, N.G. 1992. Students' and teachers' conceptions of the nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(4), 331–359.
- Lederman, N.G. 1998. The state of science education: Subject matter without content. *Electronic Journal of Science Education*, 3, 1–12.
- Lederman, N.G. 2014. Nature of science and its fundamental important to the vision of the next generation science standards. *Science & Children*, hal 8–10.
- Lederman, N.G., Lederman, J.S., & Antink, A. 2013. Nature of science and scientific inquiry as contexts for the learning of science and achievement of scientific literacy. *International Journal of Education in Mathematics, Science and Technology*, 1(3), 138–147.
- McComas W.F. 1998. *The nature of science in science education: Rationales and strategies*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer.
- Millar, R. 1996. Towards a science curriculum for public understanding, *School Science Review*, 77(280), 7–18.
- National Academy of Sciences. 2012. A Framework for K-12 Science Education: Practices, Crosscutting Concepts, and Core Ideas. Washington, DC: National Academy Press.
- New Zealand Curriculum Guides. 2013. *Senior Secondary Science*. Wellington: Ministry of Education.
- NGSS Lead States. (2013). *Next Generation Science Standards: For States, By States*. Washington, DC: The National Academies Press.
- Niaz, M., & Maza, A. 2011. *Nature of science in general chemistry textbooks*. Dordrecht, The Netherlands: SpringerBriefs in Education.
- Organisation for Economic Cooperation and Development(OECD). 2015. OECD Database. OECD. Online: [Http://www.oecd.org/pisa/pisaproducts/](http://www.oecd.org/pisa/pisaproducts/)
- Osborne, J., Collins, S., Ratcliffe, M., Millar, R., & Duschl, R. 2003. What 'ideas-about-science' should be taught in school science? A Delphi study of expert community. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(7), 692–720.
- Reneé, S., Schwartz, R.S., Lederman, N.G., & Crawford, B.A. 2004..Developing views of nature of science in an authentic context: An explicit approach to bridging the gap between nature of science and scientific inquiry. *Science Education*, 88(4), 610–645.
- Roth, W.M., & Lee, S. 2004. Science Education as/for participation in the community. *Science Education*, 88, 263–291.
- Rychen, D.S., & Salganik, L.H. 2003. *Key competencies for a successful life and a well functioning society*. Cambridge, MA: Hogrefe & Huber.
- Ryder, J. 2001. Identifying science understanding for functional scientific literacy. *Studies in Science Education*, 36, 1–44.
- sadler, T.D., & Zeidler, D.L. 2004. The morality of socioscientific issues: Construal and resolution of genetic engineering dilemmas. *Science Education*, 88 (1), 4– 27.
- Sadler, T. 2004. Moral and ethical dimensions of socioscientific decision-making as integral components of scientific literacy. *Science Educator*, 13(1):39–48.
- Simonneaux, L. 2001. Role-play or debate to promote students' argumentation and justification on an issue in animal transgenesis. *International Journal of Science Education*, 23, 903–927.
- Solomon, J., Duveen, J., Scot, L., & McCarthy, S. 1992. Teaching About the Nature of Science through History: Action Research in the Classroom. *Journal of Research In Science Teaching*, 29(4), 409–421.

- Solomon, J., Duveen, J., Scot, L., & McCarthy, S. 1992. Teaching About the Nature of Science through History: Action Research in the Classroom. *Journal of Research In Science Teaching*, 29 (4), 409–421.
- Tsai, C.C. 2002. Nested epistemologies: science teachers' beliefs of teaching, learning and science. *International Journal of Science Education*, 24(8), 771–783.
- Zeidler, D.L., & Sadler, T.D. 2008. Social and ethical issues in science education: A prelude to action. *Science and Education*, 17, 799–803.

Memfasilitasi Siswa Memahami Fisika Secara Bermakna Koheren: Tantangan dan Alternatifnya

Prof. Dr. Sutopo, M.Si.

Bismillahirrahmaanirrohiim

Assalaamu'alaikum warahmatullahi wabarakaatuh.

Yth. Bapak Rektor beserta para wakil Rektor Universitas Negeri Malang

Yth. Bapak Ketua, ibu Sekretaris, dan para anggota Senat Akademik Universitas Negeri Malang,

Yth. Bapak/Ibu Dekan, Direktur Pascasarjana, dan Ketua Lembaga di lingkungan Universitas Negeri Malang

Yth. Bapak/Ibu pejabat struktural di lingkungan Universitas Negeri Malang

Yth. Bapak/Ibu para Guru Besar di lingkungan Universitas Negeri Malang

Yth. Ketua Jurusan dan rekan sejawat (dosen dan tendik) Jurusan Fisika Universitas Negeri Malang

Yth. Para hadirin dan undangan yang berbahagia

Pertama-tama izinkan saya memanjatkan puji syukur ke hadirat Allah, Tuhan yang Maha Kuasa, atas segala nikmat yang dikaruniakan kepada saya beserta keluarga, dan kepada hadirin sekalian, sehingga hari ini kita bisa berkumpul dalam suatu majelis yang insya Allah diridloi oleh Allah swt. Terimakasih saya sampaikan kepada semua hadirin atas kesediaannya meng-hadiri acara pengukuhan saya hari ini. Mudah-mudahan Allah senantiasa- melimpahkan rahmatNya kepada kita semua di sepanjang sisa usia kita ke depan, aamiin.

Hadirin yang saya muliakan,

Sebelum menyampaikan pidato pengukuhan ini, perkenankan saya menyampaikan ucapan terimakasih kepada Rektor dan Senat Universitas Negeri Malang yang telah berketetapan menganugerahi saya gelar Guru Besar dalam bidang Pendidikan Fisika, yang secara formal telah ditetapkan oleh Kementerian Ristek dan Dikti tanggal 1 Desember 2017 yang lalu. Sungguh suatu kehormatan bagi saya dan keluarga atas penghargaan ini. Saya sangat menyadari bahwa penganugerahan ini hanya terjadi karena ijin Allah yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang. Mudah-mudahan penghargaan ini bisa memicu saya untuk berkarya lebih baik lagi di masa mendatang.

Hadirin yang saya muliakan,

Kekuatan utama fisika adalah kemampuannya menjelaskan sejumlah besar fenomena alam yang kompleks dengan sejumlah kecil hukum dan prinsip saja. Oleh karena itu, banyak pendidik dan peneliti pendidikan fisika berpandangan bahwa salah satu tujuan penting pembelajaran fisika adalah memfasilitasi siswa memahami konsep-konsep esensial fisika secara terintegrasi dan koheren sehingga mampu menerapkannya untuk memecahkan masalah secara efektif [1-7]. Secara lebih rinci, tujuan tersebut dapat dielaborasi sebagai berikut. Kita ingin siswa dapat memahami setiap konsep fisika yang mereka pelajari sebagaimana yang dimaksud oleh komunitas ilmiah. Kita ingin siswa menyadari bahwa konsep-konsep fisika yang mereka pelajari cocok dengan pengalaman personal mereka dalam berinteraksi dengan alam. Kita ingin siswa menemukan koherensi dari akumulasi pengetahuan fisika yang telah mereka pelajari menjadi *body of knowledge* fisika yang sederhana namun indah [2]. Kita juga ingin siswa dapat menggunakan pengetahuan mereka secara efektif dalam memecahkan masalah. Perlu ditambahkan bahwa yang dimaksud dengan konsep di sini adalah segala ide dalam fisika yang mencakup definisi, prinsip, hukum, teori, dan persamaan matematis yang memetakan deskripsi abstrak fisika dengan benda-benda atau fenomena nyata di dunia fisik [2, 8].

Berdasarkan pengalaman membina matakuliah Fisika Dasar di prodi S1 Pendidikan Fisika UM selama ini, dalam membina matakuliah Kapita Selekta di prodi S2 Pendidikan Fisika selama

beberapa tahun terakhir, dalam membimbing skripsi dan tesis pendidikan fisika selama ini, dalam bergaul dengan para guru fisika melalui berbagai forum, dan didukung oleh berbagai artikel penelitian pendidikan fisika, banyak tantangan yang perlu kita perhatikan dalam mewujudkan tujuan tersebut. Indikasi utamanya adalah banyak siswa yang cenderung menggunakan teori naïve [1-2] ketika dihadapkan pada permasalahan konseptual-kualitatif. Di pihak lain, ketika dihadapkan pada persoalan kuantitatif siswa cenderung memecahkannya secara *plug-and-chug* [3-4] yaitu mencomot rumus yang dipandang cocok dengan besaran-besaran yang tersebut dalam soal tanpa mempertimbangkan ide fisika yang terkandung dalam rumus dan konteks di mana rumus tersebut dapat diterapkan. Indikasi lainnya adalah siswa cenderung memandang fisika sebagai kumpulan pengetahuan yang terpisah-pisah. Akibatnya, siswa tidak bisa melihat adanya integritas struktur pengetahuan fisika, suatu integritas yang menjadikan fisika tampak sebagai ilmu yang sederhana (hanya terdiri dari sejumlah kecil prinsip dan hukum saja) namun sangat berguna untuk memecahkan berbagai macam masalah fisika. Akibat ikutannya, siswa cenderung macet (tidak punya ide) jika dihadapkan pada persoalan yang melibatkan banyak konsep, atau persoalan yang kaya konteks (*context rich*) dan tidak terstruktur (*illstructured*) [5].

Ada banyak aspek yang perlu kita perhatikan untuk membantu siswa memahami ide-ide esensial fisika secara bermakna dan koheren. Dalam kesempatan yang sangat terbatas ini saya hanya akan membahas beberapa aspek saja, terutama yang berkaitan erat dengan bagaimana siswa belajar fisika. Ada tiga aspek yang ingin saya angkat, yaitu yang berkaitan dengan teori naïf siswa, yang berkaitan dengan Bahasa, dan yang berkaitan dengan matematika dalam fisika.

Hadirin yang saya muliakan,

Ijinkan saya mulai dengan teori naïf siswa

Pandangan konstruktivisme, bahwa siswa hanya akan berhasil mengkonstruksi pengetahuan baru secara bermakna jika pengetahuan baru tersebut dapat dikaitkan dengan pengetahuan yang sudah dimiliki, telah diterima secara luas di kalangan pendidik dan peneliti pendidikan fisika [2-3, 9-10]. Dalam hal ini, tugas guru adalah menciptakan lingkungan belajar yang dapat membantu siswa mengkonstruksi pengetahuan baru secara efektif dan akurat. Agar tugas itu dapat terwujud, guru perlu mengetahui.

1. isi dan struktur pengetahuan yang tersimpan dalam memori siswa dan
2. bagaimana siswa menggunakan pengetahuannya itu untuk mengkonstruksi pengetahuan baru.

Pandangan konstruktivisme juga menyakini bahwa sebelum belajar fisika secara formal siswa sudah memiliki gagasan sendiri tentang bagaimana alam bekerja, di mana sebagian besar gagasan tersebut tidak cocok dengan konsep ilmiah. Para peneliti melabeli gagasan yang salah tersebut dengan miskonsepsi, konsepsi alternative, prekonsepsi, atau teori naïve [7, 10-14]. Gagasan tersebut umumnya dibangun cukup lama berdasarkan pengalaman atau pengamatan fenomena sehari-hari melalui generalisasi yang sederhana: semata-mata berdasarkan fitur-fitur yang nampak di permukaan tanpa menggunakan abstraksi yang memadai. Sebagai contoh, berdasarkan pengalaman sehari-hari tentang benda jatuh, siswa membangun teori bahwa benda berat akan jatuh lebih cepat daripada benda ringan. Jika dihadapkan pada dua benda yang sama berat tetapi berbeda bentuknya sehingga jatuh dengan kecepatan berbeda, misalnya selembat kertas utuh dan selembat kertas sejenis yang digumpalkan (di mana gumpalan kertas jatuh lebih cepat), siswa tetap berpegang pada teorinya dengan dalih bahwa gumpalan kertas memang lebih berat daripada lembaran kertas (dibuktikan dengan percobaan sederhana: jika keduanya ditimbang dengan menumpangkannya di telapak tangan, gumpalan kertas terasa lebih berat daripada kertas lembaran!). Ketika telah belajar Hukum II Newton ($F = ma$) mereka semakin yakin akan kebenaran teorinya: karena berat adalah gaya gravitasi Bumi terhadap benda maka semakin berat suatu benda (berarti semakin besar gaya yang bekerja) semakin besar percepatannya. Mereka tidak melakukan penalaran lebih lanjut bahwa berat benda adalah mg sehingga jika dimasukkan ke formulasi $F = ma$ diperoleh hasil $a = g$; yang tidak bergantung pada massa benda.

Contoh lain teori naïve siswa adalah tentang sifat alami gerakan benda-benda. Berdasarkan pengalaman sehari-hari, untuk membuat benda diam menjadi bergerak harus ada gaya (dorongan) yang dikerjakan kepada benda itu, dan untuk menjaga benda bergerak tetap bergerak diperlukan dorongan secara terus menerus. Pengalaman ini mengantarkan siswa pada gagasan bahwa sifat alami gerakan benda-benda adalah diam sehingga untuk mempertahankan gerakannya harus ada gaya yang diberikan secara terus-menerus. Gagasan tersebut tentu saja bertentangan dengan Hukum I Newton bahwa sifat alami gerakan benda-benda adalah diam atau bergerak dengan kecepatan konstan (sehingga tidak perlu ada gaya apapun untuk menjaga benda bergerak tetap bergerak). Meskipun bertentangan dengan Hukum I Newton, gagasan tersebut sangat konsisten dengan pengalaman sehari-hari di mana sangat sulit untuk benar-benar meniadakan gaya gesek. Bahkan, jika dirunut dari sejarah perkembangan fisika, pandangan tersebut tidaklah senaif yang dilabelkan mengingat pandangan serupa, yang dikenal dengan teori impetus [8], pernah berkembang cukup lama sampai era ketika Newton mengajukan hukum-hukum tentang gerak.

Hadirin yang saya hormati,

Sejumlah penelitian mengungkapkan bahwa sebagian besar siswa tetap memegang teori naifnya meskipun telah mempelajari prinsip-prinsip fisika yang terkait [7-8,]. Pengalaman saya berinteraksi dengan mahasiswa S1 dan S2 Pendidikan Fisika serta dengan para guru fisika yang sudah memiliki pengalaman- mengajar cukup lama memperkuat temuan itu. Ketika saya ajukan persoalan konseptual tentang dua orang yang bermain tarik tambang, hampir semua populasi tersebut berpendapat bahwa yang badannya besar dan kekar pastilah sebagai pemenangnya karena mereka mampu menarik lebih kuat. Ketika ditanya lebih lanjut apakah berarti yang menang adalah yang mampu menarik dengan gaya yang lebih besar, mereka dengan mantab menjawab “ya”. Perlu dicatat bahwa semua populasi tersebut sudah belajar Hukum III Newton (bahkan telah mengajarkannya). Mereka juga dengan fasih dapat mendeskripsikan inti hukum tersebut, yaitu jika benda A memberikan gaya kepada benda B maka benda B juga memberi gaya kepada benda A dengan gaya yang sama besar tetapi berlawanan arah. Mereka menyebutnya sebagai hukum aksi-reaksi.

Sejumlah penelitian telah mengungkap berbagai pemikiran siswa terkait gaya aksi-reaksi antar dua benda [15-18]. Sebagaimana dinyatakan dalam Hukum III Newton, gaya interaksi antar dua benda tersebut selalu sama besar dan saling berlawanan arah. Namun demikian, sebagian besar siswa yang sudah mempelajari hukum ini jarang sekali menggunakannya untuk menjelaskan besarnya gaya interaksi antara dua benda yang saling bertumbukan. Pemikiran siswa cenderung dipandu oleh fitur-fitur yang nampak di permukaan seperti massa, kecepatan, percepatan, dan mana yang aktif. Jika massa kedua benda berbeda maka benda yang massanya lebih besar akan memberikan gaya lebih besar. Jika sebelum tumbukan kecepatannya berbeda maka benda yang bergerak lebih cepat akan memberikan gaya lebih besar. Jika keduanya mengalami percepatan yang berbeda setelah tumbukan maka yang mengalami percepatan lebih besar berarti mendapat gaya lebih besar. Jika sebuah benda menumbuk benda lain yang diam, maka hanya benda yang menumbuk (yang aktif) yang memberikan gaya; walaupun yang diam juga memberikan gaya maka gaya reaksinya lebih kecil.

Beberapa contoh fenomena berpikir siswa tersebut memberikan ilustrasi- betapa dominannya pengaruh pengetahuan naif. Penelitian lain menunjukkan- bahwa teori naif cenderung mengganggu pengkonstruksian pengetahuan ilmiah yang sedang dipelajari siswa. Sebagai contoh, pandangan “gaya sebagai penggerak” cenderung mengganggu siswa memahami hukum- II Newton secara benar. Meskipun secara verbal siswa menyatakan gaya- yang bekerja pada benda sebanding dengan percepatan benda ($F \propto a$), pelacakan lebih lanjut menunjukkan bahwa pemikiran siswa tidaklah seperti yang terucapkan; melainkan sebagian besar mereka sebenarnya berpikir bahwa gaya sebanding dengan kecepatan ($F \propto v$) [8, 15, 18]. Selain itu, seperti yang telah dipaparkan di depan, pemikiran naif siswa juga cenderung- lebih dominan dan lebih mudah teraktivasi ke memori kerja daripada pengetahuan ilmiah yang sudah dimiliki. Oleh karena itu penting bagi para pendidik untuk mengenali isi dan struktur pengetahuan siswa sebelum memulai pembelajaran baru.

Hadirin yang saya muliakan,

Ada dua pandangan yang berkembang terkait bagaimana pengetahuan siswa tersimpan dalam memori dan bagaimana implikasinya pada pembelajaran fisika; yaitu teori miskonsepsi dan teori *knowledge in pieces* [7, 13]. Berikut dipaparkan secara singkat kedua pandangan tersebut.

Menurut teori miskonsepsi, teori naif siswa tersimpan dalam bentuk struktur pengetahuan (skema kognitif) yang rigid (sulit diubah bentuknya), stabil (tidak mudah berganti akibat perubahan konteks), koheren (tidak bertentangan antarsubstruktur), dan memiliki nilai kebenaran yang pasti (dalam hal miskonsepsi adalah pasti salah) [13]. Menurut pandangan ini, miskonsepsi telah tertanam kuat dalam memori siswa karena dibangun dalam waktu yang lama dan terbukti (bagi siswa) dapat menjelaskan banyak fenomena; akibatnya miskonsepsi sangat sulit diperbaiki [7, 10]. Mengingat cenderung mengganggu pengkonstruksian pengetahuan baru [7], miskonsepsi harus dihapus dari memori siswa dan diganti dengan pemikiran baru yang lebih ilmiah dan koheren.

Teori miskonsepsi menyakini bahwa miskonsepsi hanya bisa diperbaiki melalui pembelajaran yang memungkinkan terjadinya proses disequilibrasi dalam struktur kognitif siswa, misalnya pembelajaran berbasis konflik kognitif [20-23]. Secara umum, sekuensi pembelajaran untuk mengganti miskonsepsi dengan konsepsi ilmiah mencakup (1) menghadirkan fenomena yang memungkinkan siswa mengalami konflik kognitif sehingga tidak puas dengan pemahaman yang sudah dimiliki, (2) mengenalkan gagasan baru yang lebih ilmiah, (3) membantu siswa menyadari bahwa gagasan baru tersebut lebih masuk akal, dan (4) membantu siswa meyakini bahwa gagasan baru (yang ilmiah) tersebut dapat menjelaskan berbagai fenomena secara konsisten.

Secara teoretis strategi tersebut efektif meremidiasi miskonsepsi. Namun, dalam praktek sangatlah sulit menghadirkan situasi yang dapat memicu sebagian besar siswa sasaran mengalami konflik kognitif yang berarti [23-26]. Fenomena yang diyakini guru dapat memicu konflik kognitif seringkali tidak menimbulkan konflik kognitif yang berarti. Akibatnya, rangkaian kegiatan belajar berikutnya tidak lagi efektif meremidiasi miskonsepsi siswa. Selain itu, miskonsepsi yang berhasil dibuang melalui pembelajaran, ternyata masih muncul kembali hanya beberapa bulan setelah pembelajaran [7, 27].

Hadirin yang saya muliakan,

Menurut teori *knowledge in pieces*, pengetahuan siswa tersimpan dalam bentuk potongan-potongan pengetahuan yang tidak selalu terkompilasi menjadi struktur pengetahuan yang besar dan rigid [3,7, 28-30]. Kalaupun ada sejumlah potongan yang terangkai satu sama lain, rangkaian tersebut tidak membentuk struktur yang rigid dan stabil, melainkan masih bersifat cair dan mudah berubah. Potongan pengetahuan tersebut bisa berupa *phenomenological primitives (p-prims)* [28], *cognitive resources* [30], *facet of knowledge* [31], dan *primitive reasoning* [3]. Berbeda dengan pandangan teori miskonsepsi, kebenaran substansif potongan pengetahuan tersebut belum dapat dipastikan (bisa benar bisa salah) [7,13].

Menurut teori ini, pemanggilan pengetahuan ke memori kerja (misalnya ketika siswa mencoba menjawab suatu pertanyaan) bisa berupa potongan tunggal atau berupa jaringan dengan komposisi yang bisa bervariasi sesuai konteks dan/atau proses pengolahan informasi di memori kerja. Sebagai contoh, semua pemikiran naif siswa tentang gaya interaksi antar dua benda sebagaimana dipaparkan di depan bisa dimiliki oleh seorang siswa yang sama.

Menurut pandangan ini, kesalahan berulang siswa dalam menjawab sejumlah persoalan sejenis tidak serta-merta menunjukkan bahwa siswa memiliki struktur pengetahuan salah yang stabil (seperti pandangan miskonsepsi) dan sama sekali tidak memiliki pengetahuan yang benar. Melainkan lebih disebabkan oleh kegagalan siswa memanggil potongan pengetahuan yang cocok. Sebagai contoh, semua siswa yang memiliki pemikiran naif tentang gaya interaksi dua benda tadi sudah memiliki pengetahuan yang diperlukan (Hukum III Newton). Kesalahan penjelasan juga bukan karena potongan pengetahuan yang digunakan siswa secara mutlak salah, melainkan lebih karena ketidaktepatan konteks dimana potongan pengetahuan tersebut seharusnya digunakan. Sebagai contoh, penerapan potongan pengetahuan “semakin besar upaya semakin besar hasilnya” pada peristiwa tumbukan akan menghasilkan kesimpulan yang benar pada konteks percepatan benda yang

ditumbuk: “semakin besar massa benda semakin besar percepatan benda yang ditumbuknya”; tetapi menghasilkan kesimpulan yang salah pada konteks gaya yang diberikan: “semakin besar massa benda semakin besar gaya dorong yang diberikan kepada benda yang ditumbuk”.

Berdasarkan pemikiran tersebut, fungsi pembelajaran adalah memperkuat pola asosiasi yang terbukti cocok dengan pengetahuan ilmiah dan memperlemah pola asosiasi yang tidak cocok dengan pengetahuan ilmiah. [Yang dimaksud asosiasi di sini adalah kaitan antarpotongan pengetahuan atau antara potongan-potongan pengetahuan dengan konteks.]. Penguatan akan terjadi jika pola asosiasi itu sering dipanggil dari memori. Semakin sering suatu pola asosiasi yang terbukti cocok dengan pengetahuan ilmiah dipanggil, semakin besar peluangnya untuk menjadi struktur pengetahuan ilmiah yang kokoh, stabil, dan mudah diaktivasi. Selanjutnya, antar struktur pengetahuan ilmiah yang sudah dimiliki siswa perlu dikompilasi menjadi struktur pengetahuan yang lebih kompleks tetapi tetap koheren.

Belajar dari munculnya pengetahuan naif siswa sebagai diuraikan di atas, kita perlu hati-hati ketika mengajarkan fisika secara induktif berdasar fenomena nyata. Belajar fisika melalui fenomena sehari-hari memang disarankan oleh para peneliti pendidikan fisika. Namun tanpa fasilitasi yang cukup dari guru, cara belajar tersebut justru kontra produktif mengingat siswa cenderung membuat generalisasi secara tergesa-gesa, dan hanya didasarkan pada fitur-fitur yang nampak di permukaan.

Hadirin yang saya muliakan,

Perkenankan saya berpindah ke aspek Bahasa

Dalam konteks belajar-mengajar, bahasa merupakan alat komunikasi utama antara guru dan siswa, antarsiswa, dan antara siswa dan buku teks. Ketepatan pesan yang diusung melalui komunikasi verbal sangat bergantung pada bagaimana kedua pihak memaknai setiap kata, frase, dan kalimat yang digunakan. Perbedaan pemaknaan akan menyebabkan terjadinya kesulitan dan kesalahpahaman. Oleh karena itu bahasa juga berpotensi menyumbang kesulitan siswa jika tidak dikelola secara cermat. Menyadari pentingnya bahasa dalam belajar fisika, banyak penelitian pendidikan fisika yang mencoba menyingkap pengaruh bahasa terhadap bagaimana siswa belajar fisika [32-40].

Kesulitan akibat bahasa bisa disebabkan oleh perbedaan antara makna khusus dalam fisika dengan makna umum sehari-hari. Banyak sekali terma fisika yang memiliki makna berbeda dengan makna sehari-hari. Perbedaan tersebut tentu dapat menyebabkan kesulitan bagi siswa jika tidak dikelola dengan baik. Dalam kesempatan yang sangat terbatas ini, saya akan menyebutkan beberapa contoh saja sebagai ilustrasi. Terma-terma tersebut adalah “kelembaman” (dalam konteks hukum I Newton), “aksi-reaksi” (dalam konteks Hukum III Newton), dan “usaha” (dalam konteks teorema usaha energi).

Terma kelembaman (inersia) sering digunakan untuk mendeskripsikan hukum I Newton. Dalam banyak buku teks, hukum I Newton diungkapkan kurang lebih sebagai berikut. *Setiap benda memiliki kecenderungan untuk mempertahankan geraknya: jika diam akan berusaha tetap diam dan jika bergerak akan berusaha tetap bergerak dengan kecepatan konstan. Kecenderungan mempertahankan keadaan gerak tersebut disebut kelembaman.* Para fisikawan dan orang yang telah belajar banyak tentang fisika paham betul bahwa ungkapan tersebut bersifat metaforik-personifikatif. Artinya, tidak perlu dimaknai bahwa benda secara aktif menolak atau melawan setiap upaya yang akan mengubah geraknya.

Jika para ahli memahami terma kelembaman sebagai ungkapan metaforik-personifikatif, tidak demikian halnya dengan siswa yang cenderung memahaminya secara literal [32,33] sebagaimana tertulis dalam Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI). Menurut KBBI, kelembaman memiliki arti (1) kelambanan atau kemalasan; dan (2) -dalam konteks fisika- sifat materi yang menentang atau menghambat perubahan momentum atau keadaan gerak benda yang bersangkutan. Artinya siswa sungguh berpikir bahwa setiap benda memiliki sifat mempertahankan geraknya, yaitu secara aktif menolak atau melawan setiap upaya yang akan mengubah geraknya.

Dalam hal tertentu, pemaknaan kelembaman secara literal menjelaskan dengan baik berbagai fenomena. Misalnya, mengapa kita terlempar ke sisi luar ketika mobil yang kita tumpangi

menikung dengan kencang, mengapa kita terlempar ke depan ketika mobil yang kita tumpangi tiba-tiba direm dengan mendadak, dan mengapa kita terdorong ke belakang ketika mobil yang kita tumpangi dipercepat secara tiba-tiba.

Namun demikian, dalam banyak hal pemahaman secara lateral berpotensi menutup penalaran lebih lanjut siswa dalam menganalisis fenomena gaya dan gerak. Sebagai misal, ketika siswa menggunakan sifat kelembaman sebagai senjata pamungkas untuk menjelaskan mengapa benda tetap diam di lantai meskipun sedang didorong, atau mengapa koin yang ada di permukaan cakram ikut berputar bersama cakram ketika cakram diputar dengan kecepatan putar yang tidak terlalu besar, maka jawaban siswa adalah “karena benda-benda tersebut mempertahankan diri untuk tetap diam”. Jika ditanya lebih lanjut, misalnya: “Mengapa jika gaya dorongan terus diperkuat maka benda tersebut akhirnya bergerak?”, jawaban umum siswa adalah “karena gaya dorongan tersebut sudah melampaui kemampuan benda mempertahankan diri”.

Penjelasan ilmiah tentang fenomena tersebut bukan berpijak pada hukum kelembaman (Hukum I Newton), melainkan pada Hukum II Newton sebagai berikut. Pada fenomena pertama, diamnya benda tersebut karena ada gaya gesek (oleh lantai) yang besar dan arahnya tepat mengimbangi gaya dorong yang diberikan ke benda (resultan gaya gesek dan gaya dorong adalah nol). Pada fenomena kedua, diamnya koin terhadap cakram disebabkan karena gaya gesek yang dihasilkan oleh permukaan cakram masih mampu menghasilkan percepatan sentripetal yang diperlukan agar koin tetap bergerak melingkar dengan jari-jari yang besarnya tepat sama dengan jarak koin ke pusat cakram.

Ilustrasi di atas sengaja saya hadirkan sebagai pengingat bahwa penggunaan gaya bahasa metaforik-personifikatif bisa berdampak buruk pada penalaran siswa. Karena itu sedapat mungkin perlu dihindari. Pernyataan Hukum I Newton sesungguhnya bisa disajikan secara lugas (tanpa metafora), misalnya: “Keadaan alami gerakan benda-benda adalah diam atau bergerak lurus dengan kecepatan konstan: jika mula-mula diam akan tetap diam dan jika mula-mula bergerak akan tetap bergerak dengan kecepatan konstan selama tidak ada perubahan gaya yang bekerja padanya”.

Hadirin yang saya muliakan,

Kata majemuk “aksi-reaksi” lazim digunakan dalam buku teks fisika untuk mendeskripsikan hukum III Newton tentang gerak, dengan maksud untuk memudahkan siswa memahami dan menghafalkannya. Sebagai contoh, berikut dikutipkan pernyataan dalam buku teks fisika SMA yang banyak digunakan di Indonesia [41]

Jika A mengerjakan gaya pada B, maka B akan mengerjakan gaya pada A, yang besarnya sama tetapi arahnya berlawanan. Hukum ini kadang-kadang dinyatakan sebagai berikut: Untuk setiap aksi, ada suatu reaksi yang sama besar tetapi berlawanan arah. Secara matematis Hukum III Newton dinyatakan sebagai “aksi = - reaksi”

Pernyataan tersebut merupakan parafrase dari rumusan asli hukum III Newton sebagaimana dikutip oleh Cropper [42]: “*To every action there is always opposed an equal reaction or, the mutual actions of two bodies upon each other are always equal, and directed to contrary parts*”. Buku-buku teks fisika untuk perguruan tinggi juga memparafrasekan rumusan asli hukum tersebut dengan berbagai versi, sebagian besar juga menggunakan terma “aksi-reaksi”.

Dari aspek membantu siswa menghafalkan hukum III Newton, penggunaan terma aksi-reaksi tersebut cukup berhasil. Namun, dari sisi pemahaman tampaknya justru berpotensi kontra produktif. Bagi sebagian besar siswa, kata “aksi-reaksi” identik dengan, atau setidaknya sangat dekat dengan “sebab -akibat”. Akibatnya siswa cenderung menggunakan pola pikir hubungan sebab-akibat dalam memaknai kata “aksi-reaksi” pada Hukum III: aksi sebagai sebab dan reaksi sebagai akibat. Pemaknaan seperti ini sangatlah logis sebab kata reaksi memiliki arti sebagai respon terhadap suatu aksi. Selanjutnya, karena sebab selalu mendahului akibat maka “gaya aksi” selalu mendahului “gaya reaksi”. Pemahaman ini tentu tidak sesuai dengan yang dimaksudkan oleh hukum III bahwa “gaya aksi” dan “gaya reaksi” terjadi secara simultan.

Siswa yang memaknai aksi -reaksi sebagai sebab akibat cenderung memiliki pemahaman yang salah bahwa “gaya aksi” dan “gaya reaksi” bisa bekerja pada benda yang sama. Sebagai contoh, munculnya gaya gesek statis pada benda yang didorong di atas meja dipikirkan sebagai reaksi benda terhadap gaya dorong yang dikerjakan padanya. Karena merupakan pasangan aksi-reaksi maka keduanya sama besar dan berlawanan arah sehingga saling meniadakan. Pemikiran tersebut selaras dengan keyakinan adanya sifat kelembaman: gaya reaksi merupakan manifestasi dari sifat kelembaman tersebut. Menyadari banyak siswa yang cenderung berpikir seperti itu, para penulis buku teks fisika memberikan catatan sebagai peringatan, misalnya

- (1) gaya aksi dan gaya reaksi harus bekerja pada benda yang berbeda, dan
- (2) tidak semua gaya yang sama besar dan berlawanan arah merupakan pasangan aksi-reaksi.

Untuk menghindari kesalahpahaman tersebut, terma aksi-reaksi untuk mendeskripsikan hukum III Newton perlu diganti dengan terma lain. Menurut hemat saya, terma “interaksi” bisa digunakan sebagai salah satu alternatif. Karena interaksi bermakna “saling memberi aksi” maka terma ini tetap bisa menyampaikan pesan adanya pasangan gaya yang sama besar dan berlawanan arah (yang terjadi ketika dua benda saling berinteraksi secara mekanik) tanpa perlu mengkaitkannya dengan hubungan sebab-akibat.

Hadirin yang saya muliakan,

Dalam struktur fisika (mekanika), hukum III Newton bersama-sama dengan hukum I dan II membentuk satu system hukum untuk menjelaskan gerakan benda-benda, khususnya gerakan benda-benda yang dapat dimodelkan sebagai partikel. Hukum I menetapkan (mempostulatkan) keadaan alami gerakan benda-benda, yaitu keadaan ketika tidak ada gaya yang bekerja pada benda; hukum II menjelaskan bagaimana gaya mengubah keadaan gerak benda (harus memenuhi persamaan $\Sigma F = ma$), dan hukum III menetapkan (membatasi) gaya-gaya yang dimaksud pada hukum II (yaitu harus ada benda lain sebagai agen atau pelakunya).

Dari perspektif ini, hukum III Newton tidak sebatas menjelaskan gaya aksi-reaksi antardua benda, tetapi juga memberikan penjelasan tambahan atas hukum II Newton. Yaitu, setiap gaya yang dimasukkan hukum II Newton harus merupakan hasil interaksi mekanik (tarik-menarik, dorong-mendorong, gesek-menggesek, dsb) antara benda yang dibicarakan dengan benda-benda lain di sekitarnya. Interaksi tersebut bisa terjadi melalui kontak fisik secara langsung atau interaksi jarak jauh melalui perantara medan. Pada setiap interaksi, gaya-gaya yang saling dikerahkan oleh kedua benda adalah sama besar dan berlawanan arah. Pembelajaran Hukum III Newton yang lebih menekankan makna aksi-reaksi menyebabkan siswa tidak menemukan adanya integrasi hukum II dan III Newton. Siswa akan berhenti sampai pemahaman bahwa hukum III Newton digunakan untuk menjelaskan apa yang terjadi pada suatu benda ketika mengerahkan gaya pada benda lain, atau apa yang dilakukan suatu benda jika dikenai suatu gaya.

Sejauh pengalaman saya mengajar dan berinteraksi dengan para guru fisika, belum pernah saya jumpai mahasiswa dan guru yang memandang kedua hukum tersebut saling berkaitan. Hal ini juga tidak saya jumpai dalam buku-buku teks fisika SMA, semuanya membahas hukum-hukum Newton secara terpisah. Jarang sekali yang mengkaitkan ketiganya dalam satu bingkai sistem hukum dan menerapkannya untuk memecahkan masalah secara komprehensif.

Berdasarkan paparan tersebut, agar siswa dapat memaknai hukum III Newton dengan baik sekaligus menemukan integrasinya dengan dua hukum Newton lainnya, pembelajaran ketiga hukum Newton perlu dilakukan secara terintegrasi. Artinya, pembelajaran perlu dirancang untuk memberi siswa pengalaman yang cukup untuk menggunakan ketiga hukum tersebut dalam menganalisis gerakan benda-benda. Lebih khusus, terma aksi-reaksi perlu diganti dengan interaksi sebagaimana telah diungkapkan di depan.

Hadirin yang saya muliakan,

Ijinkan saya lanjutkan ke terma usaha

Dalam fisika, terma usaha digunakan untuk menyatakan transfer energy secara- mekanik (melalui gaya) antara system dan lingkungannya. Secara opera--sional didefinisikan sebagai hasil kali gaya dan perpindahan titik kerjanya- (secara- dot product), secara matematis diungkapkan sebagai $W \equiv \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s}$. Ungkapan- yang lebih umum adalah $\int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s}$ dengan pengintegralan dilakukan menyusuri lintasan. Konsep usaha merupakan elemen utama dalam teorema usaha energy: "jumlah usaha yang dilakukan oleh semua gaya (resultan gaya) terhadap suatu benda sama dengan perubahan energy kinetic benda: $W_i \rightarrow \int \mathbf{f} = K_f - K_i$, dengan $K \equiv \frac{1}{2} mv^2$ menyatakan energy kinetic benda". Konsep usaha memainkan peran penting dalam teori medan, hukum kekealan energi, dan energy pada proses-proses termodinamik. Oleh karena itu, pemahaman yang baik tentang usaha sangat diperlukan untuk mempelajari cabang fisika lainnya.

Dalam kehidupan sehari-hari, usaha dimaknai sebagai aktivitas manusia (berupa perbuatan, prakarsa, daya upaya, atau ikhtiar) untuk mencapai suatu tujuan [43]. Atribut utama konsep usaha adalah aktivitas dan tujuan. Siswa cenderung menggunakan kedua atribut itu untuk memaknai usaha dalam fisika: besaran perpindahan dikaitkan dengan tujuan, dan besaran gaya dikaitkan dengan aktivitas. Ada berbagai ragam pemaknaan yang dirumuskan siswa. Siswa yang lebih focus pada besaran perpindahan akan memaknai usaha sebagai aktivitas memindahkan benda-benda. Siswa yang lebih focus pada besaran gaya akan memaknai usaha sebagai aktivitas mengerjakan gaya pada suatu benda. Siswa yang memperhatikan keduanya secara bersamaan akan memaknai usaha sebagai aktivitas memindahkan benda dengan menggunakan gaya (tarikan atau dorongan). Semua pemakaan tersebut tidak sepenuhnya sesuai dengan yang dimaksud dalam fisika, bahwa usaha adalah proses (mekanisme) perpindahan energy melalui gaya.

Pemahaman siswa tidak bisa dilepaskan dari pengalaman belajar yang dilaluinya, baik melalui tatap muka dengan guru maupun melalui membaca buku. Pada umumnya, konsep usaha dibahas pada bagian awal bab teorema usaha-energi dan difokuskan pada aspek definisi operasional usaha sebagai hasil kali gaya dan perpindahan. Konsep usaha dikenalkan melalui penyelidikan pengaruh besar dan arah gaya terhadap efektivitas memindahkan suatu benda. Berdasarkan penyelidikan itu ditemukan fenomena sebagai berikut. (1) Efektivitas upaya memindahkan benda bergantung pada besarnya gaya yang diterapkan: semakin besar semakin efektif. (2) Efektivitas upaya tersebut juga bergantung pada arah gaya: semakin besar sudut antara gaya dan arah perpindahan yang diinginkan, semakin kecil efektivitasnya; bahkan bernilai nol jika sudut yang dibentuk sebesar 90o. Berdasarkan hasil tersebut dirumuskanlah definisi usaha sebagai $W = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} = F s \cos \theta$. Di pihak lain, definisi konseptual usaha sebagai mekanisme transfer energy pada umumnya tidak dibahas secara eksplisit sampai bab teorema usaha-energi selesai dibahas. Sebagian besar pemahaman siswa sebagaimana diuraikan di depan diperoleh melalui pengalaman belajar kurang lebih seperti itu.

Ilustrasi di atas menunjukkan bahwa pengadopsian makna umum untuk mengenalkan makna khusus bisa kontra produktif jika tidak dirancang dengan hati-hati. Penelitian tentang pengaruh bahasa dalam belajar fisika menyarankan agar pembelajaran tidak diawali dengan mengenalkan dan membahas definisi-definisi teknis, melainkan dimulai dengan membangun ide fisika terlebih dahulu baru mengenalkan istilah atau definisi teknis tersebut [35].

Sesuai anjuran model pembelajaran bermakna Ausubel, pembelajaran perlu memperhatikan konsep yang besar yang berfungsi sebagai *advanced organizer* konsep-konsep yang dilingkupinya [10]. Berdasarkan anjuran ini, pembelajaran konsep usaha perlu ditempatkan dalam bingkai mempelajari teorema usaha-energy secara lengkap. Artinya, teorema usaha-energy perlu dirumuskan dan dibahas terlebih dahulu, meskipun masih secara global. Setelah itu, konsep usaha baru dipelajari secara lebih terperinci dan mendalam hingga mencakup definisi operasional dan definisi konseptualnya [44].

Sebagai misal, setelah merumuskan dan memaknai teorema usaha-energy beserta definisi operasional usaha yang dilakukan oleh suatu gaya, siswa dilatih memecahkan persoalan dengan menerapkan teorema usaha-energi secara utuh. Secara bertahap, siswa diminta (1) mengidentifikasi semua gaya yang bekerja pada benda, (2) menghitung usaha oleh masing-masing gaya (menerapkan

definisi operasional usaha), (3) menentukan sumbangan usaha masing-masing gaya terhadap perubahan energy kinetic benda (menerapkan definisi konseptual usaha), dan (4) menghitung jumlah usaha yang bekerja pada benda dan menentukan perubahan energy kinetic benda (menerapkan teorema usaha-energi).

Setelah siswa memahami makna khusus usaha sebagai “mekanisme transfer energy”, pengaitan (penganalogian) dengan makna umum “usaha sebagai aktivitas untuk mencapai tujuan” dapat dilakukan. Atribut aktivitas dianalogikan dengan $F \cdot s$ (definisi opsional usaha dalam fisika) dan atribut tujuan dianalogikan dengan energy yang ditransfer (definisi konseptual usaha dalam fisika). Penganalogian bisa dilanjutkan pada aspek hasil. Jika usaha dalam kehidupan sehari-hari bisa bernilai positif (misalnya untung), bisa bernilai nol (misalnya impas, tidak untung pun tidak rugi), dan bisa bernilai negative (misalnya merugi); demikian juga halnya dengan usaha dalam fisika. Usaha bisa bernilai positif (misalnya saat F searah dengan s), bernilai nol (saat F tegak lurus s), dan bisa bernilai negative (misal saat F berlawanan arah dengan s); dengan makna sebagai berikut: positif berarti “menambah” energy benda, negative berarti “mengurangi” energy benda, dan nol bermakna tidak mengubah energy benda.

Berdasarkan pengalaman mengajar saya, strategi tersebut dapat membantu mahasiswa memahami teorema usaha-energi secara bermakna dan koheren. Mahasiswa juga bisa menemukan kesejajaran makna usaha dalam fisika dengan makna sehari-hari.

Hadirin yang saya muliakan,

Aspek lain yang perlu kita antisipasi dalam hal bahasa adalah adanya kemungkinan perbedaan cara siswa memaknai suatu frase dan kalimat dengan yang kita pikirkan saat melontarkan atau menuliskan frase dan kalimat tersebut. Penelitian menunjukkan bahwa kalimat yang menurut kita sudah sangat jelas, bisa jadi tetap dimaknai secara berbeda oleh siswa. Sebagai contoh, pernyataan “kelajuan merupakan jarak yang ditempuh tiap satu-satuan waktu” bisa dimaknai oleh siswa bahwa kelajuan sama dengan (juga merupakan) jarak. Pada awalnya saya sungguh tidak percaya ketika membaca artikel tersebut. Namun setelah melakukan uji petik terhadap mahasiswa baru (peserta matakuliah Fisika Dasar I yang saya bina), saya baru menyadari bahwa banyak siswa yang berpikir seperti itu. Secara iseng saya bertanya kepada mahasiswa tentang apa yang mereka ketahui tentang kelajuan. Ada mahasiswa yang menyatakan “Kelajuan adalah jarak yang ditempuh tiap satu-satuan waktu”. Saya coba kejar dengan pertanyaan lanjutan, “apakah berarti kelajuan sama dengan jarak ditempuh?” Ada mahasiswa lain yang menjawab “Tidak, kelajuan berbeda dengan jarak. Kelajuan adalah jarak yang ditempuh tiap satu satuan waktu, misalnya setiap detik; sedangkan jarak ditempuh adalah jarak yang ditempuh selama kurun waktu sebarang”. Ungkapan kedua mahasiswa tersebut menguatkan klaim laporan tadi. Jika dicermati dari aspek gramatikal, kalimat “kelajuan merupakan jarak ditempuh tiap satu satuan waktu” memang bisa dimaknai seperti itu. Frase “tiap satu satuan waktu” secara fungsional membatasi makna “jarak ditempuh”. Dengan kata lain, kesalahan siswa tentang definisi kelajuan tadi bukan karena kenafian siswa. Bisa jadi justru karena kemahiran atau kepekaan linguistik siswa.

Definisi operasional suatu besaran bisa dirumuskan melalui beberapa cara. Antara lain dengan merujuk pada bagaimana besaran tersebut didefinisikan dari besaran lain, atau merujuk pada bagaimana nilai besaran tersebut diukur, atau merujuk pada satuan yang digunakan untuk menyatakan besarnya. Masing-masing cara menghasilkan ungkapan verbal yang bisa berbeda beda. Untuk kelajuan misalnya, cara pertama menghasilkan ungkapan “kelajuan adalah jarak dibagi waktu”, cara kedua menghasilkan “kelajuan adalah hasil bagi jarak yang ditempuh dengan lamanya waktu yang diperlukan untuk menempuh jarak itu”, dan cara ketiga menghasilkan rumusan “kelajuan adalah jarak yang ditempuh tiap satuan waktu”. Bagi yang sudah memahami fisika, ketiga ungkapan tersebut sama benarnya dan dapat digunakan secara saling melengkapi. Pada umumnya kita lebih menyukai definisi yang paling singkat namun dapat menghubungkan ketiga perspektif tersebut, yaitu “kelajuan adalah jarak yang ditempuh tiap satuan waktu”. Agar asosiasi dengan proses pembagian (untuk mengakomodasi dua cara yang lain) tampak lebih eksplisit, frase “tiap satuan waktu” seringkali diganti dengan “per satuan waktu”, karena kata “per” mudah diasosiasikan dengan kata “dibagi”. Rumusan

definisi operasional besaran-besaran fisika lainnya lazim dilakukan dengan cara serupa. Contoh: kecepatan didefinisikan sebagai perpindahan atau perubahan posisi per satuan waktu, percepatan sebagai perubahan kecepatan per satuan waktu, massa jenis sebagai massa per satuan volume, dan masih banyak lagi lainnya.

Hadirin yang saya muliakan,

Analisis gramatikal juga bisa menyebabkan kesalahan memahami makna suatu terma berdasarkan kategori ontologisnya. Karena fisika mengkaji interaksi antarbenda beserta pengaruh yang ditimbulkan, elemen-elemen ontology fisika dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori ontologi, yaitu materi, proses, dan keadaan (*physical state*) [7, 33]. Sejalan dengan itu, terma-terma dalam fisika juga dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori:

(1) terma-terma untuk menyatakan benda atau materi (misalnya partikel, system, electron, foton, dsb), (2) terma-terma untuk menyatakan proses interaksi (misalnya gaya, usaha, kalor, dsb), dan (3) terma-terma untuk mendeskripsikan keadaan benda (misalnya percepatan, momentum, muatan listrik, suhu, tekanan, dsb). Dalam struktur kalimat, terma-terma tentang materi diposisikan sebagai subjek atau objek, terma-terma tentang proses sebagai predikat (kata kerja), dan terma-terma tentang keadaan sebagai keterangan.

Sebagai ilustrasi kesalahan kategori ontologis adalah memandang kalor (*heat*) sebagai materi (seharusnya sebagai *proses*). Munculnya kesalahan itu akibat ungkapan-ungkapan berikut, yang kesemuanya lazim ditemukan di buku-buku teks atau muncul pada percakapan di kelas. (1) *Kalor mengalir* dari suhu tinggi ke suhu rendah, (2) Jika dua benda yang berbeda suhunya saling bersentuhan maka benda yang bersuhu tinggi *melepaskan kalor* dan benda yang bersuhu rendah *menerima kalor*, dan (3) Jika pertukaran kalor hanya terjadi antara dua benda, maka *kalor yang dilepaskan* oleh benda pertama harus sama dengan *kalor yang terima* benda ke dua". Analisis gramatikal terhadap ungkapan-ungkapan tersebut cenderung mengarah pada pemaknaan bahwa kalor merupakan materi, karena bisa mengalir (serupa dengan air) dan bisa dipindah-milikkan (serupa benda neda pada umumnya).

Sebagai guru, seringkali kita membuat frase atau kalimat yang menyebabkan suatu besaran proses (seperti gaya, usaha, dan arus listrik) bergeser makna menjadi kategori materi. Contoh, "*Arus listrik mengalir* dari potensial tinggi ke potensial rendah", "*Usaha yang diberikan* oleh gaya gravitasi Bumi sama dengan negative perubahan energy potensial", "percepatan benda sebanding dengan *gaya yang diberikan*".

Kesalahan kategori ontologis bisa berdampak pada kesalahan memahami suatu konsep. Contoh, siswa yang memandang kalor sebagai materi akan berpikir bahwa kalor dapat disimpan atau dilepas oleh suatu benda, kalor sama dengan energy panas, dan benda yang bersuhu tinggi memiliki kalor yang lebih tinggi. Siswa yang memandang gaya sebagai materi akan berpikir bahwa gaya yang diberikan ke suatu benda akan tetap ada (bekerja) meskipun interaksi dengan benda yang menghasilkannya sudah berakhir. Sebagai contoh, ketika suatu benda dipukul hingga bergerak, gaya (dorongan oleh pemukul) tetap bekerja pada benda meskipun sudah lepas dari pemukul; gaya yang tersimpan tersebut semakin berkurang seiring dengan waktu.

Belajar dari fenomena di atas, kita perlu mengantisipasi kemungkinan adanya siswa (bahkan bisa banyak siswa) yang mengandalkan analisis gramatikal dalam memahami deskripsi verbal ide-ide fisika. Kita perlu hati-hati dalam membuat pernyataan. Misalnya, alih-alih mengatakan "gaya yang diberikan", kita katakan "gaya yang bekerja pada", atau "gaya yang dikerjakan oleh". Selain itu, penjelasan secara eksplisit kategori ontologis suatu besaran juga perlu diberikan. Terkait gaya misalnya, perlu penjelasan secara eksplisit bahwa gaya adalah hasil interaksi (tekan-menekan atau tarik-menarik) antar dua benda; oleh karena itu hanya bekerja ketika dua benda sedang berinteraksi. Cara lain untuk yang bisa ditempuh adalah melengkapi deskripsi verbal dengan bentuk representasi lainnya (matematik, diagram, dsb)

Hadirin yang saya muliakan,

Perkenankan saya berpindah ke topik matematika dalam fisika

Fisika dibangun untuk menjelaskan berbagai fenomena alam yang sangat kompleks ini dengan cara seserhana mungkin. Untuk itu persamaan matematika sangat diperlukan untuk merepresentasikan ide-ide fisika. Dengan menggunakan persamaan matematika, hubungan kompleks yang melibatkan banyak besaran dapat direpresentasikan dalam satu rumusan yang kompak, cermat, dan sederhana; suatu deskripsi yang mustahil bisa dilakukan secara verbal. Karena keahliannya itu lah maka hampir semua ide fisika disajikan dalam bentuk persamaan matematika. Namun, matematika tidak sekedar sebagai bahasa untuk menyampaikan ide-ide fisika, tetapi juga sebagai perangkat untuk membangun penjelasan dan membuat prediksi [45, 46]. Matematika juga bukan sekedar alat menghitung atau mengkuantisasikan fenomena.

Mengingat hampir semua ide fisika direpresentasikan dalam bentuk rumus (persamaan matematika), siswa perlu memahami arti fisik setiap rumus yang mereka pelajari dan hafalkan. Memahami rumus fisika tidak sekedar bisa memetakan setiap lambang dengan besaran fisika yang diwakilinya, melainkan juga memahami secara utuh ide fisika yang direpresentasikan, termasuk batasan atau konteks di mana rumus tersebut dapat digunakan.

Untuk memahami dengan baik ide fisika yang direpresentasikan oleh suatu rumus, siswa perlu dibiasakan mendeskripsikannya secara verbal. Pendeskripsian tidak cukup sekedar membaca rumus dengan mengganti setiap lambang dengan besaran yang diwakilinya. Misalnya, $m = \rho V$ dideskripsikan dengan “massa sama dengan hasil kali massa jenis dan volume”, dan $\rho = m / V$ dideskripsikan dengan “massa jenis sama dengan massa dibagi volume”.

Dalam memaknai suatu persamaan, perlu memperhatikan struktur atau bentuk simboliknya. Sebab setiap bentuk simbolik merepresentasikan struktur pengetahuan atau skema konseptual tertentu [47]. Meskipun kedua rumus di atas secara matematis identic, keduanya merepresentasikan skema konseptual yang berbeda. Persamaan $\rho = m / V$ menyatakan definisi operasional massa jenis, sehingga dideskripsikan dengan “massa jenis suatu benda diukur dengan membagi massa benda dengan volumenya” atau “massa jenis suatu benda adalah perbandingan massa benda dengan volumenya”. Di pihak lain, $m = \rho V$ menyatakan kesebandingan massa benda terhadap volumenya, bisa dideskripsikan dengan ungkapan “massa suatu benda berbanding lurus dengan volumenya” atau “massa suatu benda sama dengan hasil kali volume dengan massa jenisnya”.

Contoh lain, ketiga persamaan berikut: (1) $x_t = x_0 + vt$, (2) $x_t = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$, dan (3) $x_t = x_0 + \int v dt$, memiliki struktur yang sama sehingga juga merepresentasikan skema konseptual yang sama, yaitu “po sisi benda pada suatu saat nanti (x_t) ditentukan oleh posisi saat ini (x_0) ditambah perpindahannya”. Dengan demikian suku ke dua di ruas kanan ketiga persamaan tersebut mewakili konsep yang sama, yaitu perpindahan. Bedanya hanyalah pada model yang digunakan; yaitu, secara berurutan: model gerak dengan kecepatan konstan, gerak lurus dengan percepatan konstan, dan gerak lurus dengan kecepatan sebarang.

Hal lain yang perlu diperhatikan dalam memahami persamaan fisika adalah makna tanda “=”, yang direpresentasikan oleh suatu persamaan. Ada beberapa macam pemikiran yang bisa diwakili oleh tanda “=”, antara lain sebagai berikut: (1) menyatakan definisi atau “didefinisikan sebagai”, misalnya $p = mv$; (2) hubungan antar besaran keadaan, misalnya $PV = nRT$; (3) pengaruh besaran proses terhadap besaran keadaan, misalnya $F_R = ma$; (4) menyatakan besarnya interaksi, misalnya $F = Gm_1 m_2 / r^2$; dan (5) menyatakan dekomposisi atau superposisi suatu besaran, misalnya $a = a_r + a_\theta$.

Kesalahan memaknai tanda sama dengan bisa mengantarkan kesalahan yang serius. Sebagai contoh, berdasarkan persamaan $F = ma$, banyak siswa yang memahami “gaya adalah hasil kali massa dan percepatan”. Agar bisa memahami arti “=” secara tepat setiap persamaan fisika, siswa perlu memahami bagaimana asal-usul persamaan tersebut.

Pertanyaan reflektif yang perlu diajukan adalah, sejauh mana pembelajaran fisika selama ini mampu mengantarkan siswa memahami persamaan fisika? Untuk menjawab pertanyaan ini, saya paparkan jawaban mahasiswa saya (S2 Pendidikan Fisika dan mahasiswa baru S1 Pendidikan Fisika) tentang soal kinematika berikut. “Posisi benda yang bergerak lurus menemuhi persamaan $x(t) = 20$

$+ 40t - 5t^2$, dengan x dalam cm dan t dalam sekon. Jarak yang ditempuh benda selama 5 sekon pertama adalah: (A) 75 cm, (B) 80 cm, (C) 85 cm, (D) 95 cm, (E) 445 cm". Sejah ini belum ada satu pun yang menjawab benar (85 cm). Sebagian besar jawaban mahasiswa adalah 95 cm (diperoleh dengan memasukkan $t = 5$ pada persamaan yang diberikan). Ini menunjukkan bahwa sebagian besar mahasiswa memahami posisi sama dengan jarak tempuh. Jawaban terbanyak berikutnya adalah 75 cm (diperoleh dengan menghitung $x(5) - x(0)$, mengindikasikan pemahaman bahwa jarak tempuh sama dengan perpindahan). Sebagian kecil lainnya menjawab 80 cm (diperoleh dengan menghitung $x(4) - x(0)$ dengan alasan benda sudah berhenti pada detik ke 5), atau 445 cm (diperoleh dengan menjumlahkan nilai $x(0) + x(1) + \dots + x(5)$). Soal serupa pernah saya berikan ke guru MGMP Fisika di salah satu kabupaten di Jawa Timur. Hasilnya tidak jauh berbeda.

Pembelajaran fisika di sekolah pada umumnya menempatkan persamaan atau rumus fisika sebagai alat menghitung. Walaupun ada proses belajar di mana guru melibatkan siswa secara aktif dalam merumuskan suatu persamaan fisika, kegiatan paska penurunan rumus pada umumnya difokuskan pada berlatih mengerjakan soal dengan tujuan agar siswa dapat menggunakan rumus yang sudah ditemukan. Soal yang dihadirkan umumnya disusun sangat terstruktur dalam arti secara jelas merujuk ada rumus tertentu, hanya menyinggung besaran fisika yang sesuai rumus, semua besaran yang ada di ruas kanan disebutkan nilainya, dan besaran yang ditanyakan adalah besaran yang ditulis di ruas kiri persamaan. Proses pemecahannya diawali dengan mendaftar semua besaran yang sudah diketahui (dengan format diketahui: ...), dan mengeksplisitkan besaran yang ditanyakan (misal: ditanya: ...?). Setelah itu, kegiatan siswa tidak lebih dari sekedar memasukkan angka ke dalam rumus kemudian melakukan perhitungan (membagi, mengali, menambah, dll) sampai diperoleh jawaban. Latihan berikutnya adalah mengerjakan soal yang lebih rumit di mana untuk memecahkannya harus melalui manipulasi matematis suatu persamaan, atau menggabungkan beberapa persamaan, sebelum memasukkan angka-angka.

Latihan memecahkan soal seperti itu tentu tidak menyumbang apapun terhadap penguatan pemahaman siswa tentang ide fisika yang baru dipelajari [48]. Kalau pun ada, hanya sebatas memperkuat arti lambang-lambang besaran yang ada di rumus melalui pemetaan terma-terma yang tersurat di soal dengan lambang-lambang tersebut.

Latihan menerapkan prinsip dan persamaan fisika untuk menjelaskan fenomena sehari-hari perlu diberikan porsi yang cukup dalam pembelajaran. Hal ini dimaksudkan untuk menumbuhkan keyakinan kepada siswa bahwa konsep-konsep fisika yang dipelajari di sekolah benar-benar berguna untuk mehami alam, bukan hanya sekedar kumpulan pengetahuan yang harus dihafal agar lulus dalam menghadapi ujian sekolah. Selain itu, dengan seringnya menggunakan konsep ilmiah untuk menjelaskan fenomena sehari-hari diharapkan dapat menggantikan kebiasaan berpikir berdasar teori naif dengan berpikir berdasar prinsip-prinsip ilmiah.

Hadirin yang saya muliakan,

Meskipun persamaan matematika merupakan bentuk representasi yang sangat efektif, penggunaan bentuk representasi lain tetap diperlukan untuk memahami ide-ide fisika secara bermakna dan komprehensif. Sebagai contoh, representasi verbal sangat diperlukan untuk memaknai persamaan secara fisik lengkap dengan informasi tentang batasan atau asumsi yang melandasinya dan dalam konteks apa dapat digunakan. Representasi grafik juga sangat diperlukan untuk melengkapi representasi matematik. Sebagai contoh, soal yang saya contohkan di depan dapat diselesaikan dengan mudah dan benar jika siswa terlebih dahulu membuat grafik kecepatan-waktu untuk memecahkannya. Demikian pula halnya dengan representasi diagram. Dengan diagram, fenomena yang dideskripsikan oleh suatu persamaan matematis bisa direpresentasikan secara lebih nyata. Pembelajaran dengan multirepresentasi bisa membantu siswa memahami konsep fisika secara bermakna dan komprehensif [49].

Hadirin yang saya muliakan,

Mengakhiri paparan saya, ijin kan saya merangkum beberapa hal sebagai berikut. Belajar dari bagaimana siswa membangun teori naifnya, ada dua hal yang patut kita perhatikan. **Pertama**, kita

patut menduga bahwa siswa cenderung menyimpan pengetahuannya dalam bentuk potongan-potongan yang tidak terkompilasi menjadi struktur pengetahuan yang koheren. Jika benar demikian halnya, maka perlu kita antisipasi bahwa siswa juga akan sekedar mengumpulkan dan menghafalkan ide-ide fisika yang mereka pelajari di kelas. Fenomena ini perlu kita antisipasi dengan seksama, terutama dalam mengorganisasikan bahan ajar. Meskipun tidak bisa dihindari bahwa pembelajaran perlu dikemas berdasarkan bab, kita harus memperhatikan secara seksama bagaimana keterkaitan antarbab itu dapat membantu siswa membangun pengetahuan fisika secara koheren. Jika hal itu sudah kita lakukan, hal berikut yang juga tidak kalah penting adalah bagaimana membantu siswa mengkaitkan ide fisika yang sedang dipelajari pada suatu bab dengan ide-ide yang sudah dipelajari pada bab-bab sebelumnya. Membiarkan siswa mengkaitkan sendiri tampaknya bukan keputusan yang bijak. **Kedua**, kita perlu hati-hati ketika mengajarkan fisika secara induktif berdasar fenomena-nyata. Belajar fisika melalui fenomena sehari-hari memang disarankan oleh para peneliti pendidikan fisika. Namun, tanpa fasilitasi yang cukup dari guru, cara belajar tersebut justru kontra produktif mengingat siswa cenderung membuat generalisasi secara tergesa-gesa dan hanya didasarkan pada fitur-fitur yang nampak di permukaan saja.

Banyak istilah dalam kehidupan sehari-hari yang diadopsi dalam fisika dengan maksud agar fisika tampak lebih humanis. Dalam konteks pembelajaran, pengadopsian tersebut ada yang berdampak buruk sehingga perlu dihindari. Misalnya penggunaan kata kelembaman dalam konteks hukum I Newton. Ada yang perlu dimodifikasi, misalnya kata aksi-reaksi (dalam konteks Hukum III Newton) perlu diganti dengan kata interaksi. Ada juga yang dapat diadopsi dengan baik tetapi perlu dilakukan pada waktu yang tepat, misalnya terma usaha. Pengaitan pada waktu yang tidak tepat bisa menyebabkan siswa salah dalam memahami konsep. Prinsip "ide fisika harus mendahului istilah" tampaknya bisa kita gunakan sebagai panduan.

Kecenderungan siswa menggunakan analisis gramatikal untuk memahami suatu frase dan kalimat juga perlu kita perhatikan. Kalimat-kalimat yang lazim digunakan dalam komunikasi antarfisikawan, atau yang ditulis dalam buku-buku teks seringkali bermakna lain jika dianalisis secara gramatikal. Pergeseran makna tersebut bisa jadi di luar dugaan kita. Oleh sebab itu, kita perlu berhati-hati dalam membuat pernyataan verbal tentang ide esensial dalam fisika.

Tantangan besar yang kita hadapi terkait matematika dalam fisika adalah memfasilitasi siswa memahami secara baik setiap rumus fisika yang mereka pelajari dan hafalkan. Kecenderungan siswa lebih suka memperlakukan matematika sebagai alat menghitung daripada alat untuk menjelaskan, juga merupakan tantangan tersendiri yang tidak kalah penting. Kedua tantangan tersebut perlu kita selesaikan mengingat matematika merupakan bagian integral fisika dan sebagai alat yang paling *powerful* untuk merepresentasikan ide-ide fisika.

Demikian sekelumit yang bisa saya sampaikan pada kesempatan yang sangat mulia ini. Mohon maaf atas segala kekurangan.

DAFTAR RUJUKAN

- Smith, T. I., Wittmann, M. C., & Carter, T. (2014). Applying model analysis to a resource-based analysis of the Force and Motion Conceptual Evaluation. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 10(2), 020102.
- Redish, E. F. (2003). *Teaching physics with the physics suite*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Tuminaro, J., & Redish, E. F. (2007). Elements of a cognitive model of physics problem solving: Epistemic games. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 3(2), 020101.
- Maloney, D. P. (1994). Research on problem solving: Physics. *Handbook of research on science teaching and learning*, 327-354, edited by D.L. Gabel. Mac-Millan, New York.
- Ogilvie, C. A. (2009). Changes in students' problem-solving strategies in a course that includes context-rich, multifaceted problems. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 5(2), 020102.
- Hsu, L., Brewe, E., Foster, T. M., & Harper, K. A. (2004). Resource letter RPS-1: Research in problem solving. *American Journal of Physics*, 72(9), 1147-1156.
- Docktor, J. L., & Mestre, J. P. (2014). Synthesis of discipline-based education research in physics. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 10(2), 020119.
- Halloun, I. A., & Hestenes, D. (1985). Common sense concepts about motion. *American journal of physics*, 53(11), 1056-1065.
- Wood, A. K., Galloway, R. K., Hardy, J., & Sinclair, C. M. (2014). Analyzing learning during Peer Instruction dialogues: A resource activation framework. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 10(2), 020107.
- Hassard, J., & Dias, M. (2013). *The art of teaching science: Inquiry and innovation in middle school and high school*. Routledge.
- Brown, D. E., & Clement, J. (1989). Overcoming misconceptions via analogical reasoning: Abstract transfer versus explanatory model construction. *Instructional science*, 18(4), 237-261.
- Clement, J. (1993). Using bridging analogies and anchoring intuitions to deal with students' preconceptions in physics. *Journal of research in science teaching*, 30(10), 1241-1257.
- Scherr, R. E. (2007). Modeling student thinking: An example from special relativity. *American Journal of Physics*, 75(3), 272-280.
- Wandersee, J. H., Mintzes, J. J., & Novak, J. D. (1994). Research on alternative conceptions in science. *Handbook of research on science teaching and learning*, 177-210, edited by D.L. Gabel. MacMillan, New York
- Bao, L., Hogg, K., & Zollman, D. (2002). Model analysis of fine structures of student models: An example with Newton's third law. *American Journal of Physics*, 70(7), 766-778.
- Smith, T. I., & Wittmann, M. C. (2007). Comparing three methods for teaching Newton's third law. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 3(2), 020105.
- Maloney, D. P. (1984). Rulegoverned Approaches to Physics--Newton's Third Law. *Physics Education*, 19(1), 37-42.
- Smith, T. I., & Wittmann, M. C. (2008). Applying a resources framework to analysis of the Force and Motion Conceptual Evaluation. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 4(2), 020101.
- Carey, S. (1999). Sources of conceptual change. *Conceptual development: Piaget's legacy*, 293-326.
- Strike, K. A., & Posner, G. J. (1982). Conceptual change and science teaching. *European Journal of Science Education*, 4(3), 231-240.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science education*, 66(2), 211-227.
- McDermott, L. C. (2001). Oersted medal lecture 2001: "Physics Education Research—the key to student learning". *American Journal of Physics*, 69(11), 1127-1137.
- Hadjichilleos, S., Valanides, N., & Angeli, C. (2013). The impact of cognitive and affective aspects of cognitive conflict on learners' conceptual change about floating and sinking. *Research in Science & Technological Education*, 31(2), 133-152.

- Limón, M. (2001). On the cognitive conflict as an instructional strategy for conceptual change: A critical appraisal. *Learning and instruction*, 11(4-5), 357-380.
- Lee, G., Kwon, J., Park, S. S., Kim, J. W., Kwon, H. G., & Park, H. K. (2003). Development of an instrument for measuring cognitive conflict in secondary-level science classes. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(6), 585-603.
- Parker, J. (2006). Exploring the impact of varying degrees of cognitive conflict in the generation of both subject and pedagogical knowledge as primary trainee teachers learn about shadow formation. *International Journal of Science Education*, 28(13), 1545-1577.
- E. Etkina, J. Mestre, and A. O'Donnell (2005), in *The Cognitive Revolution in Educational Psychology*, edited by J. M. Royer (Information Age Publishing, Greenwich, CT), pp. 119–164
- DiSessa, A. A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and instruction*, 10(2-3), 105-225.
- Disessa, A. A., & Sherin, B. L. (1998). What changes in conceptual change?. *International journal of science education*, 20(10), 1155-1191.
- Hammer, D. (1996). Misconceptions or p-prims: How may alternative perspectives of cognitive structure influence instructional perceptions and intentions. *The Journal of the Learning Sciences*, 5(2), 97-127.
- J. Minstrell (1992), in *Proceedings of the International Workshop on Research in Physics Education: Theoretical Issues and Empirical Studies*, edited by R. Duit, F. Goldberg, and H. Niedderer (Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften, Kiel, Germany), pp. 110–128.
- Brookes, D. T., & Etkina, E. (2007). Using conceptual metaphor and functional grammar to explore how language used in physics affects student learning. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 3(1), 010105.
- Brookes, D. T., & Etkina, E. (2009). “Force,” ontology, and language. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 5(1), 010110.
- Brookes, D. T., & Etkina, E. (2015). The importance of language in students’ reasoning about heat in thermodynamic processes. *International Journal of Science Education*, 37(5-6), 759-779.
- Brown, B. A., & Ryoo, K. (2008). Teaching science as a language: A “content-first” approach to science teaching. *Journal of Research in Science Teaching*, 45(5), 529-553.
- Itza-Ortiz, S. F., Rebello, N. S., Zollman, D. A., & Rodriguez-Achach, M. (2003). The vocabulary of introductory physics and its implications for learning physics. *The Physics Teacher*, 41(6), 330-336.
- Kraus, P. A., & Vokos, S. (2011). The role of language in the teaching of energy: The case of ‘heat energy’. *Washington State Teachers’ Association Journal*
- Taibu, R., Rudge, D., & Schuster, D. (2015). Textbook presentations of weight: Conceptual difficulties and language ambiguities. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 11(1), 010117.
- Taibu, R., Schuster, D., & Rudge, D. (2017). Teaching weight to explicitly address language ambiguities and conceptual difficulties. *Physical Review Physics Education Research*, 13(1), 010130.
- Williams, H. T. (1999). Semantics in teaching introductory physics. *American Journal of Physics*, 67(8), 670-680.
- Kanginan, M. (2007). *Fisika untuk SMA kelas X*. Jakarta: Penerbit Erlangga
- Cropper, W.H. (2001). *The life and times of leading physicists from Galileo to Hawking*. New York: Oxford University Press
- Kamus Besar Bahasa Indonesia.
- Galiili, I., & Lehavi, Y. (2006). Definitions of physical concepts: A study of physics teachers’ knowledge and views. *International Journal of Science Education*, 28(5), 521-541
- Redish, E. F. (2005). Problem solving and the use of math in physics courses. *Invited talk presented at the conference, “World View on Physics Education in 2005: Focusing on Change”, Delhi, August 21-26*

- Karam, R. (2014). Framing the structural role of mathematics in physics lectures: A case study on electromagnetism. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 10(1), 010119.
- Sherin, B. L. (2001). How students understand physics equations. *Cognition and instruction*, 19(4), 479-541.
- Kim, E., & Pak, S. J. (2002). Students do not overcome conceptual difficulties after solving 1000 traditional problems. *American Journal of Physics*, 70(7), 759-765.
- Sutopo & Waldrip, B. (2014). Impact of representational approach on students' reasoning and conceptual understanding in learning mechanics. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 12 (4), 741-765.

Pembelajaran Deteksi Kualitas Air Sederhana dengan Indikator Biologi Bentos Makroinvertebrata

Prof. Dr. Susriyati Mahanal, M.Pd

Bismillahirrahmanirrahim.

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Yth. Rektor Universitas Negeri Malang

Yth. Ketua dan anggota Senat Universitas Negeri Malang

Yth. Ketua dan Anggota Komisi Guru Besar Universitas Negeri Malang

Yth. Para Pejabat Struktural di Tingkat Rektorat, Dekanat, Lembaga, dan Jurusan di Universitas Negeri Malang

Yth. Para Sejawat Dosen, Tenaga Kependidikan, dan Mahasiswa

Yth. Para Undangan serta hadirin yang saya muliakan.

Puji dan syukur hanyalah milik Allah yang Maha Pemurah, yang telah menganugerahkan kepada kita rahmat-karunia tiada terbatas, serta nikmat yang tiada terhingga sehingga kita dapat hadir dalam keadaan sehat *wal aflat* pada acara Sidang Terbuka Senat Universitas Negeri Malang. Pada kesempatan ini marilah kita memohon kepada Allah SWT agar kegiatan ini mendapat Ridho-Nya, Aamiin. Semoga shalawat dan salam selalu tercurah kepada junjungan kita, Rosulullah Muhammad SAW, beserta keluarga, sahabat, dan pengikutnya.

Ucapan terimakasih yang tulus dan penghargaan yang setinggi tingginya juga saya sampaikan kepada hadirin dan para undangan yang meluangkan waktu untuk hadir pada acara ini guna mendengarkan pidato pengukuhan- guru besar saya di bidang ilmu pendidikan biologi. Pada kesempatan ini iijinkan saya menyampaikan pidato pengukuhan dengan judul “Pembelajaran Deteksi Kualitas Air Sederhana dengan Indikator Biologi Bentos Makroinvertebrata”.

Keterarikan saya pada indikator biologi kualitas sungai dimulai ketika saya mengajar Biologi di SMA pada materi pencemaran air, serta sebagai dosen pengampu matakuliah ilmu Alamiah Dasar (IAD) dan Pendidikan Kependudukan Lingkungan Hidup (PKLH) di IKIP Malang sebagai Matakuliah Dasar Umum (MKU).

Pembelajaran Biologi, Lingkungan, dan Pelestariannya

Ibu, Bapak dan hadirin yang saya hormati.

Isu lingkungan merupakan topik yang semakin sering diperbincangkan seiring dengan semakin maraknya penurunan kualitas lingkungan. Masalah lingkungan seperti penipisan sumber daya, kerusakan ekosistem, polusi, dan hilangnya keanekaragaman hayati merupakan tantangan yang sering dihadapi oleh manusia (Martin, Maris, & Simberloff, 2016). Masalah tersebut saling terkait yang dihasilkan dari berbagai penyebab yang saling berinteraksi, dan semakin diperburuk oleh perubahan iklim dan dampaknya pada lingkungan dan mata pencaharian (Scientific and Technical Advisory Panel, 2018).

Kerusakan yang telah terjadi pada lingkungan begitu besar sehingga semua pendidikan dan khususnya pendidikan dalam sains selayaknya difokuskan pada pemecahan masalah lingkungan (Baez, 2000). Sains adalah tentang menemukan, memahami, menjelaskan dan memprediksi pola dalam fenomena alam, menghasilkan penjelasan yang lebih akurat tentang bagaimana dunia alami bekerja (Robson, C., & McCartan, K., 2016). Pendidikan sains berperan dalam mengembangkan pemahaman tentang prinsip-prinsip ilmiah mengenai pelestarian lingkungan. Pelestarian lingkungan menjadi tujuan utama pembelajaran sains, terutama pembelajaran biologi (Littledyke, 2008).

Saat ini selayaknya penelitian sains (biologi) difokuskan untuk menyelidiki kondisi dan proses pembelajaran yang memungkinkan warga, terutama generasi muda, untuk (i) mengembangkan kapasitas untuk berpikir kritis, etis, dan kreatif dalam menilai situasi lingkungan; (ii) membuat

keputusan berdasarkan informasi tentang situasi tersebut; dan (iii) mengembangkan kapasitas dan komitmen untuk bertindak secara individu dan kolektif dengan cara yang dapat menopang dan meningkatkan lingkungan (Wals, Brody, Dillon, Stevenson, 2004).

Pembelajaran lingkungan perlu dibelajarkan sejak dini dan secara bertahap pada jenjang berikutnya. Di Indonesia, lingkungan dan pelestariannya dibelajarkan sejak SD, SMP, SMA, hingga Perguruan Tinggi. Kurikulum 2013 telah menyajikan kompetensi dasar yang berhubungan dengan lingkungan dan pelestariannya yang tertuang dalam Peraturan Menteri Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia Nomor 24 Tahun 2016 Tentang Kompetensi Inti dan Kompetensi Dasar Pelajaran pada Pendidikan Dasar dan Pendidikan Menengah (Tabel 1). Universitas Negeri Malang juga telah mengembangkan Kurikulum Berbasis Kehidupan (*Life Based Learning*) dengan mengintegrasikan proses belajar dengan kehidupan sehari-hari, yang memfasilitasi pemecahan permasalahan nyata, termasuk masalah lingkungan.

Di Indonesia isu lingkungan telah dikaji sejak SD sampai Perguruan Tinggi, namun permasalahan lingkungan baik lingkungan darat maupun lingkungan perairan sampai sekarang tidak pernah selesai. Selain itu, isu lingkungan seringkali menjadi agenda politik bagi yang memiliki kepentingan pribadi dengan dalih pembangunan ekonomi dengan pendekatan ekstraktif sumber daya yang berdampak ketidakberlanjutan lingkungan (Hudson, 2001).

Salah satu isu lingkungan dan pelestariannya adalah tantangan mengelola ekosistem sungai. Secara ideal upaya mengelola dan mengatasi masalah ekosistem sungai (perairan) dilakukan secara simultan melalui teknologi, regulasi, dan pendidikan. Pendidikan sains, dan teknologi mempunyai peran penting dalam mengelola dan mengatasi masalah lingkungan sungai yang kompleks melalui penjelasan yang mudah dipahami, mendeteksi atau memantau penyebab permasalahan, serta menciptakan solusinya.

Salah satu strategi pengelolaan melalui pendidikan yaitu melibatkan guru dan siswa dalam program pemantauan kualitas sungai atau air. Pemantauan kualitas air dengan melibatkan guru dan siswa, selain siswa lebih memahami dampak aktivitas manusia terhadap ekosistem perairan juga memahami cara melindungi kualitas air di masa depan.

Tabel 1. Kompetensi Dasar terkait Pelestarian Lingkungan Menurut K 13.

| JENJANG PENDIDIKAN | KELAS | | KD 3 | | KD 4 |
|--------------------|-------|------|---|------|---|
| SD | 4 | 3.8 | Menjelaskan pentingnya upaya keseimbangan dan pelestarian sumber daya alam di lingkungannya | 4.8 | Melakukan kegiatan upaya pelestarian sumber daya alam bersama orang-orang di lingkungannya |
| SMP | 7 | 3.7 | Menganalisis interaksi antara makhluk hidup dan lingkungannya serta dinamika populasi akibat interaksi tersebut | 4.7 | Menyajikan hasil pengamatan terhadap interaksi makhluk hidup dengan lingkungan sekitarnya |
| | | 3.8 | Menganalisis terjadinya pencemaran lingkungan dan dampaknya bagi ekosistem | 4.8 | Membuat tulisan tentang gagasan penyelesaian masalah pencemaran di lingkungannya berdasarkan hasil pengamatan |
| | | 3.9 | Menganalisis perubahan iklim dan dampaknya bagi ekosistem | 4.9 | Membuat tulisan tentang gagasan adaptasi/ penanggulangan masalah perubahan iklim |
| SMA | 10 | 3.11 | Menganalisis data perubahan lingkungan, penyebab, dan dampaknya bagi kehidupan | 4.11 | Merumuskan gagasan pemecahan masalah perubahan lingkungan yang terjadi di lingkungan sekitar |

Indikator Kualitas Air

Ibu, Bapak dan hadirin yang saya hormati.

Penurunan kualitas air ditandai dengan beberapa karakteristik baik secara kimia, fisika, maupun biologi. Dengan demikian, deteksi kualitas air dan berbagai polutan air dapat dikarakterisasi berdasarkan fisika, kimia, dan biologi. Karakteristik fisika diantaranya warna, bau, padatan tersuspensi, suhu, kecepatan arus. Contoh dari karakteristik kimia yaitu oksigen terlarut, pH, chemical oxygen demand (COD), chlorin, minyak. Sedangkan hadirnya organisme patogen, blooming alga merupakan karakteristik biologi.

Pelaksanaan pemantauan (deteksi) kualitas air pada umumnya menggunakan parameter fisikokimia dan jarang menggunakan parameter biologi. Beberapa parameter fisikokimia untuk menentukan kualitas air yaitu kecepatan arus, suhu, konduktivitas, padatan tersuspensi, pH, O₂ terlarut, CO₂ bebas, nitrat, nitrit, ammonia, dan BOD. Nilai setiap parameter fisikokimia untuk menentukan kualitas air sungai tertera pada Tabel 2.

Pemantauan kualitas air menggunakan parameter fisikokimia mempunyai beberapa kelemahan diantaranya hanya menggambarkan kualitas air sungai pada saat pengambilan sampel atau dalam jangka pendek (Bere & Tundisi, 2010). Dengan demikian, pemantauan dengan parameter biologi atau yang disebut dengan *biomonitoring*, layak dipertimbangkan untuk mendeteksi kualitas air. *Biomonitoring* kualitas air, yaitu pemantauan kualitas air dengan menggunakan makhluk hidup di dalam ekosistem perairan itu sendiri sebagai dasar untuk mendeteksi polusi air (Szczerbińska & Galczyńska, 2015). *Biomonitoring* merupakan sarana penting untuk memantau kualitas sungai, karena komunitas biota air cenderung merespon perubahan faktor fisikokimia perairan (Margolis, 1999; Rimet, 2012; Lavoie, Campeau, ZugicDrakulic, Winter, Fortin, 2014; Lenard, Ejankowski, & Poniewozik, 2019).

Penggunaan indikator biologi dalam menentukan kualitas air sungai telah terbukti lebih efektif karena organisme air mengintegrasikan karakteristik struktural dan fungsional serta mencerminkan kesehatan sungai yang dipelajari (Bonada, Prat, Resh, & Statzner, 2006). Indikator biologi yaitu, spesies atau komunitas, dan proses biologi yang digunakan untuk menilai kualitas lingkungan dan bagaimana perubahannya seiring waktu (Beyeler & Dale, 2001).

Tabel 2. Nilai Parameter Fisiko-Kimia Pendeteksi Kualitas Air

| PARAMETER FISIKO-KIMIA | SKOR | | | |
|-------------------------------|---------|-----------|------------|-------|
| | 1 | 3 | 6 | 10 |
| Suhu (°C) | 15-20 | 21-25 | 26-31 | >31 |
| Konduktivitas (µmhos/cm) | <50 | 50-100 | >100-500 | >500 |
| Padatan tersuspensi (ppm) | <20 | >20-100 | >100-400 | >400 |
| BOD ₅ (ppm) | <3,0 | >3,0-<5,0 | 5,0-15 | >15 |
| O ₂ terlarut (ppm) | >6,5 | 4,5-<6,5 | 2,0-<4,5 | <2,0 |
| CO ₂ bebas (ppm) | <12 | >12-30 | >30-75 | >75 |
| pH | 6,5-7,5 | 5,5-<6,5 | 4,0-<5,5 | <4,0 |
| Nitrit (ppm) | <0,06 | 0,06-0,10 | >0,10-0,55 | >0,55 |
| Nitrat (ppm) | <10 | 10-25 | >25-50 | >50 |
| Amonia (ppm) | <0,65 | 0,65-1,3 | >1,3-4,0 | >4,0 |

Sumber: Klein (1973), Lee et al., (1978), dan Pescod (1973)

Keterangan

- Nilai rerata <2 berarti air sungai belum tercemar (bersih s/d sangat bersih)
- Nilai rerata 2,0-4,0 berarti air sungai tercemar ringan (sedang)
- Nilai rerata >4,0-6,0 berarti air sungai tercemar sedang (kotor)
- Nilai rerata >6,0 berarti air sungai tercemar berat (sangat kotor)

Analisis suatu pencemaran di lingkungan perairan, banyak digunakan indikator biologi karena: (1) pengukuran kualitas faktor fisiko-kimia hanya menggambarkan situasi pada saat itu, (2) jumlah atau intensitas zat pencemar kadangkala terlalu rendah untuk dideteksi dengan analisis secara fisiko-kimia,

(3) pengaruh kombinasi beberapa zat pencemar mungkin berbeda bila terpisah-pisah, dan (4) kadangkala tidak jelas parameter faktor fisiko-kimia mana yang perlu diukur (Masese *et al.*, 2014).

Penggunaan indikator biologi dalam mendeteksi kualitas sungai disarankan oleh beberapa ahli. Schneider, Lawniczak, Picińska Faltynowicz, & Szoszkiewicz (2012) mengusulkan diatom perifiton sebagai indikator biologi yang dapat menggambarkan perubahan kondisi lingkungan perairan. Diatom perifiton merupakan indikator perubahan kualitas air yang baik Hering, Johnson, & Buffagni, 2006; Lavoie *et al.*, 2014).

Selain diatom perifiton, bentos makroinvertebrata sangat layak sebagai indikator biologi kualitas air (Ahmad, Maimon, Othman, & Mohd-Fauzi, 2002; Carter, Vincent, & Morgan, 2007). Bentos makroinvertebrata juga dikenal dengan istilah bentos adalah invertebrata yang hidup menempel pada substrat (batu, sedimen, tanaman air) atau di dasar sungai dan danau. Bentos makro invertebrata cukup besar untuk dilihat dengan mata telanjang (tanpa mikroskop), seperti cacing, larva serangga, siput air dan sebagainya.

Beberapa alasan penggunaan bentos makroinvertebrata untuk memantau kualitas air disampaikan oleh beberapa ahli sebagai berikut. (1) Bentos makroinvertebrata merupakan mayoritas spesies yang ada di sungai, dan dalam siklus hidupnya terdapat tahap yang sensitif serta rentang hidup yang relatif panjang (Li li, Zheng, & Liu, 2010). (2) Berbagai jenis bentos makroinvertebrata mempunyai kepekaan berbeda terhadap polusi, sehingga memberikan informasi yang kuat untuk menafsirkan efek kumulatif dari polusi, relatif mudah untuk diidentifikasi serta sebagian besar hidupnya menetap sehingga dapat menggambarkan kondisi lingkungan tertentu (Covich, *et al.*, 2004; Resende, Resende, Pardal, Almeida, Azeiteiro, 2010). (3) Bentos makroinvertebrata memainkan peran penting dalam jaring-jaring makanan ekosistem sungai; bentos makroinvertebrata juga sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan dan karakteristik habitat yang disebabkan oleh adanya aktivitas manusia (Kripa, Prasanth, Sreejesh, & Thomas, 2013). (4) Bentos makroinvertebrata juga mampu memberikan informasi yang konsisten pada penilaian kualitas air dan dapat digunakan sebagai indikator biologi kualitas air di sungai (Resende *et al.*, 2010). (5) Bentos makroinvertebrata dari taksa yang berbeda memiliki preferensi habitat dan toleransi polusi yang berbeda sehingga ketiadaan spesies sensitif dan kehadiran spesies yang toleran menunjukkan kemerosotan kualitas air (Kripa *et al.*, 2013).

Berdasarkan pada variasi adaptasi dan kisaran toleransi bentos makroinvertebrata terhadap perubahan lingkungan abiotik, makrobentos dapat dibedakan menjadi 3 kelompok sebagai berikut. (1) Kelompok 1, organisme yang *intolerant* (sensitif) terhadap polutan yaitu organisme yang dominan pada sungai yang kualitas airnya bagus atau belum tercemar. (2) Kelompok 2, organisme *indifferent* atau moderat yaitu organisme yang dapat eksis pada rentangan kualitas yang luas. (3) Kelompok 3, organisme yang toleran terhadap sungai yang kualitasnya rendah.

Deteksi kualitas air di Indonesia

Ibu, Bapak dan hadirin yang saya hormati

Beberapa negara dan organisasi di seluruh dunia telah melakukan deteksi kualitas sungai dengan indikator biologi (biomonitoring) (Patrick, Jean Mariez, & Nadine, 2015). Di Indonesia, deteksi kualitas sungai dengan menggunakan indikator biologi bentos makroinvertebrata sudah dilakukan oleh Sekolah Menengah Atas (SMA) yang tergabung dalam Jaring-Jaring Komunikasi Pemantau Kualitas Air (JKPKA). JKPKA ini berdiri pada 24 Juni 1997, atas prakarsa Perum Jasa Tirta I (PJT I) dan IKIP MALANG (sekarang Universitas Negeri Malang atau UM). Beberapa tokoh pendiri JKPKA dari Universitas Negeri Malang yaitu Prof. Ir Radyastuti Winarno (almh), Prof. Dra. Herawati Susilo, M Sc. Ph D., Prof. Dr. Sugeng Utaya, M.Si., Dr. Istamar Samsuri, M.Pd., dan Drs. Subagyo (alm). JKPKA pada awal berdiri dalam kegiatannya melibatkan sekolah yang terdiri dari SMA, MA, SMK Negeri dan Swasta di Wilayah Sungai (WS) Brantas dari hulu sampai hilir. JKPKA kini berkembang ke SMP dan SD di wilayah Sungai Kali Brantas dan Bengawan Solo (sebanyak 220 sekolah), dan terus berkembang sebagai perintis dan pelopor Sekolah Sungai Indonesia.

Pemantauan kualitas air yang dilakukan oleh sekolah, dalam pelaksanaannya melibatkan siswa dan guru. Partisipasi guru dan siswa menjadi hal penting dalam program pemantauan kualitas

air, karena merupakan aset yang besar bagi pengelola sumber daya dan dianjurkan menggunakan instrumen yang tepat dan memiliki prosedur mudah (Margolis, 1999). Pemantauan kualitas air yang melibatkan siswa menjadikan kegiatan belajar ekosistem sungai lebih bermakna sehingga kendala-kendala yang ditemukan pada pemantauan kualitas air dapat dicarikan solusinya. Pemantauan kualitas sungai mengandung nilai-nilai pendidikan dan merupakan alat pendidikan yang kuat (Kentucky Division of Water, 2019). Lebih lanjut, tujuan yang dicapai jika siswa dilibatkan dalam monitoring kualitas sungai yaitu: (1) siswa dikenalkan pada ekologi bentos makroinvertebrata, 2) siswa diberi pengetahuan tentang biomonitoring, 3) siswa diberi pengetahuan tentang prosedur sampling, 4) siswa diberi kesempatan berpartisipasi langsung dalam monitoring ekosistem sungai.

Kegiatan biomonitoring menggunakan bentos makroinvertebrata juga dilakukan melalui kegiatan praktikum matapelajaran Biologi SMA pada kompetensi dasar (KD) 3.11 Menganalisis data perubahan lingkungan, penyebab, dan dampaknya bagi kehidupan, dan KD 4.11 Merumuskan gagasan pemecahan masalah perubahan lingkungan yang terjadi di lingkungan sekitar. Salah satu kajian dari KD tersebut yaitu tentang pencemaran lingkungan perairan termasuk di dalamnya pemantauan kualitas air (sungai). Biomonitoring kualitas sungai merupakan salah satu point yang menarik untuk dipelajari melalui praktikum.

Beberapa ahli, menganjurkan guru dalam mengajarkan sains menggunakan praktikum, karena sains tidak dapat dipelajari secara efektif hanya dari buku (Houfstein & Lunetta, 2003; Toplis & Allen, 2011). Beberapa alasan praktikum dianggap penting, yaitu: mendukung belajar tentang konsep-konsep ilmiah, mengajarkan siswa tentang sifat ilmu, dan memotivasi siswa (Needham, 2014), membantu siswa membuat hubungan antara dunia-nyata dengan dunia abstrak yaitu pemikiran dan ide-ide (Woodley, 2009; Akbar, 2012).

Praktikum dianggap sebagai kunci dalam mempelajari sains lebih efektif, namun Heerale (2014) menemukan beberapa kendala yang menyebabkan ketidakefektifan praktikum yaitu guru kurang kompeten dan kurangnya sumber daya, buku pelajaran termasuk panduan serta dukungan teknis. Hal yang hampir sama dialami oleh SMA di Malang terkait pelaksanaan praktikum *biomonitoring* yaitu tidak ada panduan atau instrumen pendeteksi kualitas air secara biologi yang praktis dan efektif.

Kenyataan di lapangan sekolah-sekolah dalam melakukan *biomonitoring* menggunakan "Panduan Pengenalan Invertebrata Kolam dan Sungai di Asia Tenggara" yang dikembangkan oleh *Wetlands International Indonesia Programme*". Beberapa kelemahan dari panduan ini akan dipaparkan lebih lanjut. Panduan ini tidak praktis untuk dibawa ke lapangan karena ukurannya yang relatif besar yaitu 87.5 cm x 26 cm (Gambar 1a dan 1b). Panduan tersebut juga memuat banyak instruksi yang harus dibaca oleh siswa, dan dalam penggunaannya diperlukan waktu untuk menghitung indeks biotik. Demikian pula instrumen tersebut tidak dapat menggambarkan kualitas air yang sebenarnya, sebagai contoh penggalan sungai yang dideteksi dengan instrumen parameter biologi menunjukkan kualitas air baik, tetapi secara fisiko-kimia kualitas air kategori jelek (Mahanal, 2009). Berdasarkan beberapa kelemahan panduan tersebut dikembangkan instrumen deteksi kualitas air yang sederhana sehingga mudah digunakan oleh siswa maupun pengguna lain dengan hasil yang cepat dan akurat.

Instrumen Deteksi Kualitas Air Sederhana

Ibu, Bapak dan hadirin yang saya hormati

Instrumen Deteksi Kualitas Air Dengan Indikator Biologi Bentos Makroinvertebrata dikembangkan berdasarkan beberapa hasil penelitian berikut.

1. Pada Sungai Brantas penggalan Malang, dari Sumber Brantas sampai Jembatan Blobo Kepanjen (sepanjang 45 km) ditemukan 84 spesies diatom perifiton. Dari 84 spesies tersebut, 3 spesies diantaranya sebagai indikator biologi kualitas air yaitu *Achnanthes lanceolata* (Breb.) (Gambar 2a) dan *Cocconeis placentula* (Gambar 2b) merupakan spesies indikator untuk lingkungan yang belum tercemar, sedang *Nitzschia palea* (Kg) W. Smith (Gambar 2c), merupakan spesies indikator untuk lingkungan yang sudah tercemar (Mahanal, 1998).

Bagaimana Menggunakan Tabel

Apabila anda memperoleh binatang yang ada dalam tabel ini (walaupun hanya satu), berilah tanda ✓ pada tabel. Setelah seluruh binatang diamati, tambahkan skor dari tiap binatang yang anda dapat itu, dan hitunglah rata-rata dengan membagi skor total dengan jumlah jenis

| Nama Binatang | Skor |
|---|------|
| Cacing bersegmen | 1 |
| Larva mrutu biasa | 2 |
| Belatung ekor tikus | 3 |
| Lintah | 3 |
| Kepiting sungai | 3 |
| Kerang | 3 |
| Siput tanpa 'pintu' | 3 |
| Nimfa capung jarum ekor tebal | 3 |
| Nimfa capung dobson | 4 |
| Nimfa capung sialid | 4 |
| Nimfa lalat sehari perenang | 4 |
| Larva lalat atau nyamuk lainnya | 5 |
| Cacing pipih | 5 |
| Larva Kumbang | 5 |
| Kumbang dewasa | 5 |
| Kepik-pejalan kaki | 5 |
| Anggang-anggang | 5 |
| Kepik perenang punggung | 5 |
| Kepik pendayung | 5 |
| Kepik air lainnya | 5 |
| Siput ber'pintu', ≥ 15 mm | 6 |
| Kijing | 6 |
| Limpet air tawar | 6 |
| Nimfa capung biasa | 6 |
| Nimfa capung jarum lainnya | 6 |
| Larva ulat air (tanpa kantong) | 7 |
| Larva ulat kantong air (kantong terbuat dari dedaunan) | 7 |
| Nimfa lalat sehari insang segiempat | 7 |
| Udang air tawar dan udang biasa | 8 |
| Kepik pinggan bermoncong panjang | 10 |
| Larva ulat kantong air (kantong dari pasir atau kerikil) | 10 |
| Nimfa lalat sehari pipih | 10 |
| Nimfa lalat sehari insang bercabang | 10 |
| Nimfa lalat sehari penggali | 10 |
| Nimfa plekoptera | 10 |
| Jumlah total skor | |
| Jumlah tipe binatang | |
| Indeks Kualitas Air | |

yang anda dapat pada tabel (yang diberi tanda ✓). Nilai rata-rata perlu dihitung untuk mengurangi kesalahan yang dapat terjadi pada sampel/cuplikan. Hasil pembagian tersebut adalah Indeks Kualitas Air.

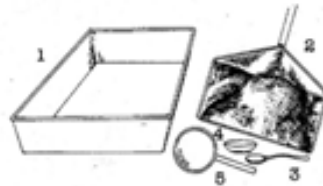
Indeks Kualitas Air digunakan untuk mengkaji kualitas air:

| Skor | Kualitas air |
|-----------|---|
| 0 | luar biasa kotor (tidak ada kehidupan sama sekali) |
| 1.0 - 2.9 | sangat kotor |
| 3.0 - 4.9 | kotor |
| 5.0 - 5.9 | sedang (rata-rata) |
| 6.0 - 7.9 | agak bersih sampai bersih |
| 8 - 10 | sangat bersih |

PERHATIAN! Tabel ini berdasarkan penelitian di Thailand Utara. Kami masih perlu banyak sukarelawan untuk mencobanya di daerah lain. Anda bisa bantu?

Bagaimana Mendapatkan Binatang-binatang Ini?

Saat paling baik untuk mendapatkan binatang ini adalah di anak sungai yang dangkal selama musim kemarau, dimana binatang cenderung lebih banyak daripada saat musim hujan. Di bawah ini dapat dilihat peralatan paling dasar yang anda butuhkan.

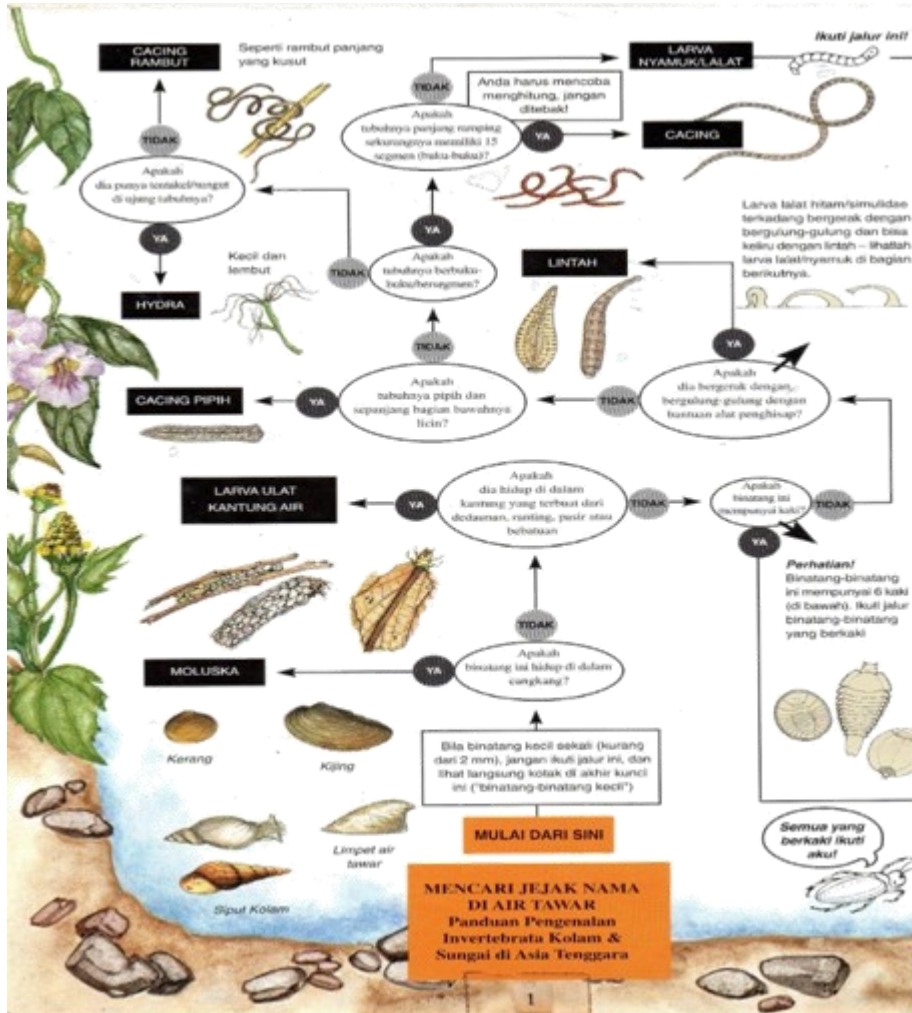


Apabila anda telah memilih lokasi (lihat tentang pengamatan di bawah), isilah baki aluminium besar (1) dengan air. Tempatkan jaring segiempat besar (2) di sungai, dan aduk dasar sungai yang berada di depan jaring. Kosongkan jaring dengan memindahkan seluruh hasil yang terkumpul ke dalam baki. Setelah semua dipindahkan, perhatikan dengan seksama pada sesuatu yang bergerak-gerak. Perlahan, sendok (3) lah satu binatang ke dalam mangkuk plastik kecil (4) berwarna putih. Pastikan mereka cukup air! Lalu amati dengan menggunakan kaca pembesar (5). Setelah mendapatkan namanya, amati lagi binatang lainnya yang ada di dalam baki.

Cobalah untuk mengumpulkan binatang dari beberapa tempat di lokasi tersebut. Lihatlah di sekitar kerikil, di antara dedaunan yang mati atau cobalah untuk memungut sebuah batu, siapa tahu ada binatang yang menempel. Jangan lupa binatang yang berada di permukaan, anda dapat mengambilnya langsung dengan menggunakan jaring.

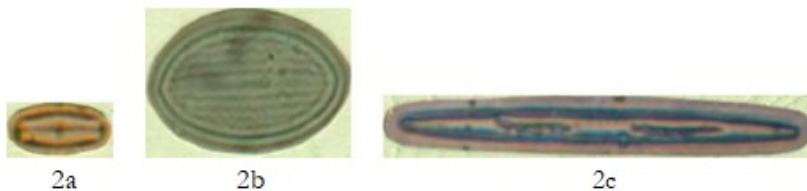
Alamatkan komentar anda kepada: Wetlands International-Indonesia Program 312189; Fax: (8252) 323753; E-mail: wi-ip@serverindo.net.id; Field Studies 1740580179; Fax: +64 1740580179; E-mail: FSCPublication@compuserve.co

Gambar 1a. bagian dari Sisi Depan Panduan Pengenalan Invertebrata Kolam dan Sungai



Gambar 1b. Bagian dari Sisi Belakang Panduan Pengenalan Invertebrata Kolam dan Sungai

2. Ditemukan sebanyak 13 spesies bentos makroinvertebrata di sungai Brantas dan 16 spesies di sungai Metro. Spesies-spesies tersebut masuk ke dalam kelompok *Gastropoda*, *Insekta*, *Crustacea* dan *Hirudinea*.



Gambar 2a. *Achnantes lanceolata*, 2b. *Cocconeis placentula*, 2c. *Nitzschia palea* (Kg.) W. Smith

Dari kelompok insekta yaitu kelas *Ephemeroptera* (Mayfly), *Diptera*, dan *Trichoptera* (Caddisfly) (Mahanal, Saptasari, Fathurrachman, 2007).

3. Terdapat tiga kelompok bentos makroinvertebrata yang ditemukan di Sungai Brantas dan Sungai Metro yaitu, (1) organisme yang sensitif (*High Quality*) meliputi Mayfly (*Ephemeroptera*), Stonefly (*Plecoptera*), Caddisfly (*Trichoptera*), Dobsonfly (*Megaloptera*), Beetle larva (kumbang); (2) organisme yang moderat (*Middle Quality*) meliputi (*Crayfish*), Dragonfly (nimpa capung), dan

Damselflies (nimpha capung jarum), *Sowbug* (*Isopoda*), *Water beetle* (*Coleoptera*), *Riffle beetle* dewasa (*Coleoptera*), *Crane fly larva* (*Diptera*), *flat worm* (*Planaria*), *Clam* dan (3) organisme yang toleran meliputi *Leeches*, *Cacing air* (*Aquatic Worm*), siput air (*Water Snails*), *Simuliidae*, *Midge Larva* (*Chironomus*), *Red Tailed Maggot* (belatung berekor tikus), dan *Scuds* (*Amphipoda*) (Mahanal, 2009).

4. *Caddisflies* merupakan *spesies intolerant* yang mendominasi perairan yang belum tercemar ditemukan melimpah di Sumber Brantas. *Chironomus* (midge larva), dan *Simuliidae* merupakan spesies yang toleran, ditemukan dominan di penggalan sungai Metro yang berada di belakang pabrik Gula Kebon Agung. Penggalan sungai ini secara fisiko-kimia mempunyai BOD5 87,5 ppm (sangat kotor). *Crayfish* dan *Dragonfly* merupakan spesies *indifferent/moderat*, ditemukan melimpah baik di penggalan sungai yang belum tercemar maupun sudah tercemar (Mahanal, 2009).

Selain hasil penelitian di atas, pengembangan instrumen deteksi kualitas air ini terinspirasi oleh media pembelajaran yang dibuat ayahanda (Mahanal) untuk mengajari matematika putra putrinya. Media yang dimaksud adalah "TANGKARAN" (ping-pingan). Tangkaran tersebut biasanya dibuat dari kertas karton. Gambar 3 adalah contoh dari tangkaran (ping-pingan). Tangkaran berupa **matrik** inilah menginspirasi saya untuk menyusun matrik deteksi kualitas air dengan indikator biologi bentos makroinvertebrata.

| | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
| 3 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 |
| 4 | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 | 24 | 28 | 32 | 36 | 40 |
| 5 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| 6 | 6 | 12 | 18 | 24 | 30 | 36 | 42 | 48 | 54 | 60 |
| 7 | 7 | 14 | 21 | 28 | 35 | 42 | 49 | 56 | 63 | 70 |
| 8 | 8 | 16 | 24 | 32 | 40 | 48 | 56 | 64 | 72 | 80 |
| 9 | 9 | 18 | 27 | 36 | 45 | 54 | 63 | 72 | 81 | 90 |
| 10 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |

Gambar 3. Tangkaran untuk Menghafal Perkalian

Secara lengkap Instrumen Deteksi Kualitas Air Dengan Indikator Biologi Bentos Makroinvertebrata ini tertera pada Gambar 4. Instrumen yang dikembangkan mempunyai kelebihan yaitu lebih sederhana, ukurannya lebih kecil sehingga mudah dibawa, serta tidak memerlukan perhitungan yang kompleks untuk menentukan kualitas air.



| Keterangan | Kategori Jumlah Individu | Kualitas Air |
|-----------------------------|--|---|
| S Organisme Sensitif | n = 0 bila tidak ditemukan bents makroinvertebrata | ● Sangat Bersih |
| M Organisme Moderat | n = 1 bila ditemukan 1 individu | ● Bersih |
| T Organisme Toleran | n = 2 bila ditemukan 2-10 individu | ● Kotor |
| | n = 3 bila ditemukan 11-100 individu | ● Sangat Kotor |
| | n = 4 bila ditemukan 101-1000 individu | ● Sedang |
| | n = 5 bila ditemukan > 1000 individu | |

Kelompok Bents Makroinvertebrata Berdasarkan Daya Toleransinya Terhadap Lingkungan Air

| Organisme Sensitif | Organisme Moderat | Organisme Toleran |
|--------------------------|--------------------|-------------------|
| Mayflies Nymph | Damselfly | Snails |
| Water Penny Beetle Larva | Crayfish | Simulidae |
| Dobsonfly Pupa | Water Beetle | Midge Larva |
| Stoneflies | Clams | Aquatic Worm |
| Most Caddisflies | Dragonfly Nymph | Red Tailed Maggot |
| | Rifle Beetle Adult | Leeches |
| | Crane-fly Larva | Scuds |
| | Flatworm | |

Gambar 4. Instrument Deteksi Kualitas Air dengan Indikator Biologi Bents Makroinvertebrata (Sumber; Mahanal, 2014)

Cara Penggunaan

Ibu, Bapak dan hadirin yang saya hormati

Berikut adalah contoh penggunaan Instrumen Deteksi Kualitas Air Dengan Indikator Biologi Bents Makroinvertebrata. Ditemukan bents makroinvertebrata di stasiun pengamatan III Sungai Metro sebagai berikut.

- nimfa serangga *Mayflies* = 54 individu (kelompok sensitive)
- *Crayfish* = 3 individu (kelompok moderat),
- siput air (*Water Snails*) = 52 individu, larva lalat (*Simulidae*) = 102 individu, lintah besar (*Leeches*) = 14 individu (bents dari kelompok toleran)
- Bagaimanakah kualitas air pada stasiun pengamatan III S. Metro tersebut?

Dari data tersebut diperoleh:






- individu dari kelompok sensitive sebanyak 54 (n=3),
- individu dari kelompok moderat ditemukan 3 individu (n=2),
- dan individu dari kelompok toleran sebanyak 168 (n=4).

Berdasarkan data tersebut, dengan menggunakan instrument deteksi kualitas air pada matrik ditemukan warna kuning berarti sedang. Jadi berdasarkan instrumen deteksi kualitas air, stasiun III S. Metro kualitas airnya adalah **SEDANG**.

Ibu, Bapak serta Hadirin yang saya hormati

Keakuratan Instrumen Deteksi Kualitas Air Dengan Indikator Biologi Bentos Makro-invertebrata ini sudah teruji secara empirik melalui beberapa penelitian di Sungai Metro dan sungai Brantas, dengan cara membandingkan hasil analisis kualitas air berdasar parameter fisiko-kimia dengan parameter biologi menggunakan instrument yang deteksi kualitas air. Hasil penelitian menunjukkan terdapat kesesuaian kualitas air antara yang dideteksi berdasar parameter fisiko-kimia dengan kualitas air berdasar parameter biologi menggunakan Instrumen Deteksi Kualitas Air Dengan Indikator Biologi Bentos Makroinvertebrata. Hasil penelitian di Sungai Metro tertera pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan Kualitas Air Sungai Metro berdasarkan Parameter Biologi Menggunakan Instrumen Deteksi Kualitas Air dengan Parameter Fisiko-Kimia (Sumber: Mahanal 2009)

| STASIUN | PARAMETER BIOLOGI | | PARAMETER FISIKO-KIMIA | |
|---------|---|--------------|------------------------|--------------------------|
| | WARNA PADA INSTRUMEN | KUALITAS AIR | NILAI RERATA | KRITERIA KUALITAS AIR |
| I |  | Bersih | 1,5 | Belum tercemar (bersih) |
| II |  | Sedang | 2,4 | Tercemar ringan (sedang) |
| III |  | Sedang | 2,4 | Tercemar ringan (sedang) |
| IV |  | Kotor | 4,9 | Tercemar sedang (kotor) |
| V |  | Sedang | 2,4 | Tercemar ringan (sedang) |

Ibu, Bapak dan Hadirin yang saya hormati

Kemudahan pengaplikasian instrumen ini memungkinkan dapat digunakan oleh sekolah untuk kegiatan praktikum biologi/sains pada materi pencemaran sungai atau danau. Instrumen ini juga dapat digunakan oleh masyarakat lebih luas sekalipun bukan peneliti profesional semisal kelompok jaring-jaring komunikasi pemantau kualitas air (JKPKA).

Instrumen Deteksi kualitas air sungai/danau ini dikembangkan oleh akademisi (perguruan tinggi) dengan harapan agar isi yang terkandung- sesuai kebutuhan di lapangan dan mudah diaplikasikan. Pelibatan guru dan siswa yang difasilitasi perguruan tinggi diharapkan dapat meningkatkan partisipasi masyarakat dalam pemantauan kualitas air secara berkelanjutan; serta menumbuhkan kesadaran dan perilaku siswa difokuskan pada peningkatan kualitas sungai (Phalaraksh. Kunpradid, Kawashima, & Nakamura, 2006). Demikian juga yang dikemukakan oleh Kohlmann Russo, Itzep, & Soli (2010), setelah siswa dilibatkan dalam pemantauan kualitas air dengan teknik *biomonitoring*, selain terjadi peningkatan pengetahuan yang bermakna, siswa juga tertarik dan berkomitmen untuk berpartisipasi dan melindungi sumber daya air.

DAFTAR RUJUKAN

- Ahmad A., Maimon A., Othman M.S, and Mohd-Fauzi, A. (2002). The potential of local benthic macroinvertebrate as a biological monitoring tool for river water quality assessment. *In Proceedings of the Regional Symposium on Environment and Natural Resources*. 10-11 April 2002, Hotel Renaissance Kuala Lumpur, Malaysia, 1, 464-471.
- Akbar, R.A. (2012). Mind the Fact: Teaching science without practical as body without soul. *Journal of Elementary Education*, 22 (1), 1-8.
- Baez, A. V. (2000). *Teaching Youth about the Environmental Impact of Science and Technology*. Retrieved from: (<http://www.friends-partners.org/utsumi/glo-sas-news/GN/baez.htm>).
- Bere, T. and Tundisi, J.G. (2010). Biological monitoring of lotic ecosystems: the role of diatoms. *Braz. J. Biol.*, 70 (3), 493-502.
- Beyeler, S.C. and Dale, V.H. (2001). Challenges in the development and use of ecological indicators. *Ecological Indicators*, 1, 3-10.
- Bonada, N.; Prat, N.; Resh, V.H.; Statzner, B. (2006). Developments in aquatic insect biomonitoring: A comparative analysis of recent approaches. *Annu. Rev. Entomol*, 51, 495–523. [CrossRef] [PubMed].
- Carter. J.L., Vincent, R., Morgan, H. (2007). Macroinvertebrates as biotic indicators of environmental quality. In F. Richard Hauer and Gary A. Lamberti, [editors]. *Methods in Stream Ecology* (pp. 805-83). Academic Press. Burlington, MA.
- Covich, A.P., Austen, Mc., Bärlocher, F., Chauvet, E., Cardinale, B., Biles, Cl., Inchausti, P., Dangles, O., Solan, M., Gessner, Mo., Statzner, B., Moss. B. (2004). The role of biodiversity in the functioning of freshwater and marine benthic ecosystems. *Bioscience*, 54(8), 767-775.
- Heeralal, P.J.H. (2014). Barriers Experienced by natural science teachers in doing practical work in primary schools in Gauteng. *Int J Edu Sci*, 7(3): 795-800.
- Hering, D., Johnson, R. K. & Buffagni, A. (2006). Linking organism groups – major results and conclusions from the STAR project. *Hydrobiologia*, 566, 109-113.
- Houfstein, A., & Lunetta, V. (2003). The laboratory in science education: foundations for the twenty-first century. *Science Education*, 88, 28-53.
- Hudson, S.J. (2001). Challenges for Environmental Education: Issues and Ideas for the 21st Century. *BioScience*, 51(4), 283-288).
- Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan. (2016). *Peraturan Menteri Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia Nomor 24 Tahun 2016 Tentang Kompetensi Inti dan Kompetensi Dasar Pelajaran pada Pendidikan Dasar dan Pendidikan Menengah*. Jakarta: Kemdikbud.
- Kentucky Division of Water. (2019). *Kentucky Nonpoint Source Management Plan: A Strategy for 2019-2023*. Retrieved from <https://eec.ky.gov/Environmental-Protection/Water/Protection/NPS%20Documents/KY%27s%20NPS%20Management%20Plan%202019-2023.pdf>.
- Kripa P.K., Prasanth K.M., Sreejesh K.K., Thomas T.P. (2013). Aquatic macroinvertebrates as bioindicators of stream water quality a case study in Koratty, Kerala, India. *Research Journal of Recent Sciences*, 2(ISC-2012), 217-222).
- Klein, L. (1973). *River Pollution I*. Butterworths. London.
- Kohlmann, B., Russo, R., Itzep. O.J. and Solí. R. (2010). Children's Participation in the Evaluation of BioIndicators of Water Quality in Rural Communities. *Conference: 21st Century Watershed Technology: Improving Water Quality and Environmen*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/236342937_Children's_Participation_in_the_Evaluati_on_of_BioIndicators_of_Water_Quality_in_Rural_Communities.
- Lavoie, I., Campeau, S., Zugic-Drakulic, N., Winter, J.G., Fortin, C. (2014). Using diatoms to monitor stream biological integrity in Eastern Canada: An overview of 10 years of index development and ongoing challenges. *Sci. Total Environ*, 475, 187–200.

- Lee, C.D.; S.E. Wang & C.L. Kuo. (1978). Benthic Macroinvertebrate and fish as biological indicators of water quality, with reference to community diversity Index. *International Conference on Water Pollution in developing countries. Bangkok. Thailand*, 103–118.
- Lenard, T., Ejankowski, W., and Poniewozik, M. (2019). Responses of phyto-plankton communities in selected eutrophic lakes to variable weather conditions. *Water*, 11(1207), 1-20. DOI: 10.3390/w11061207.
- Li Li., Zheng, B., Liu, L. (2010). *International Society for Environmental Information Sciences 2010 Annual Conference (ISEIS) Biomonitoring and Bioindicators Used for River Ecosystems: Definitions, Approaches and Trends*. Retrieved from (http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/stc/biomonitoring_of_wetlands/biomonitoring_bioindicators_river_ecosystems.pdf) diakses tgl 15 Nopember 2015.
- Littledyke, Michael. (2008) Science education for environmental awareness: approaches to integrating cognitive and affective domains, *Environmental Education Research*, 14:1, 1-17, DOI: 10.1080/13504620701843301.
- Mahanal, S. (1998). *Diatom Perifiton Sebagai Indikator Biologi Kualitas Sungai (Studi Di Sungai Kali Brantas)*. Tesis (Tidak diterbitkan). Program Pascasarjana Program Studi Pendidikan Biologi Institut Keguruan Dan Ilmu Pendidikan Malang.
- Mahanal, S. (2009). *Pengaruh Penerapan Perangkat Pembelajaran Deteksi Kualitas Sungai dengan Indikator Biologi Berbasis Proyek terhadap Hasil Belajar Siswa SMA di Malang*. Disertasi (Tidak diterbitkan). Program Studi Pendidikan Biologi Program Pascasarjana Universitas Negeri Malang.
- Mahanal, S. (2014). Mengenalkan Instrumen Pendeteksi Kualitas Air Sungai Dengan Indikator Biologi Bentuk Sebagai Perangkat Pembelajaran Pada Matapelajaran Ipa-Biologi. *Prosiding Symposium On Biology Education, Prodi Pendidikan Biologi FKIP Universitas Ahmad Dahlan*. p. 214-221.
- Mahanal, S., Fathurrachman. Saptasari, M. (2007). *Pengembangan Perangkat Pembelajaran Deteksi Kualitas Sungai dengan Indikator Biologi BerbasisKonstruktivistik untuk Memberdayakan Sikap Siswa terhadap Ekosistem Sungai di Malang*. Lembaga Penelitian Universitas Negeri Malang.
- Margolis, Brian. (1999). Student macroinvertebrate sampling benefits community: aquatic biomonitoring. *The Science Teacher*, 66(1), 23-26.
- Martin, J. L., Maris, V., & Simberloff, D. S. 2016. The need to respect nature and its limits challenges society and conservation science. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113, 6105–6112. DOI: 10.1073/pnas.1525003113.
- Masese, F. O., Nzula, K., Kipkembo, J., Gettel, G. M., Irvine, K., McClain, M. E. (2014): Macroinvertebrate functional feeding groups in Kenyan highland streams: evidence for a diverse shredder guild. *Freshwater Science*, 33(2), 435-450.
- Needham, R. (2014). The contribution of practical work to the science curriculum. *SSR March* 95(35), 53-69.
- Patrick, M.S., Jean-Mariez, T.M., Nadine, M.L. (2015). Benthic macroinvertebrates as indicators ofwater quality: a case-study of Urban Funa Stream (In Kinshasa, Democratic Republic Of Congo). *Open Journal Of Water Pollution And Treatment*, 2(1), 8-24.
- Pescod, M.B. (1973). *Investigation of National Effluent and Stream Standarts for Tropical Countries*. Bangkok: AIT.
- Phalaraksh, C., Kunpradit,T., Kawashima, M. And Nakamura, M. (2006). *Participatory Aquatic Environmental Education As A Means To Promote Sustainable Watershed Management In The Northern-Thailand Tribal Communities*. Retrieved from Wldb.Ilec.Or.Jp/Data/Ilec/Wlc13_Papers/S18/S18-3.Pdf.
- Resende, P.C., Resende, P., Pardal, M., Almeida, S., Azeiteiro, U. (2010). Use of biological indicators to assess water quality of the UI River (Portugal). *Environmental Monitoring and Assessment*, 170(1), 535-544.
- Rimet, F. (2012). Recent views on river pollution and diatoms. *Hydrobiologia*, 683, 1–24.
- Robson, C., & McCartan, K. (2016). *Real world research*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

- Schneider, S.C.; Lawniczak, A.E.; Picińska-Faltynowicz, J.; Szoszkiewicz, K. (2012). Do macrophytes, diatoms and nondiatom benthic algae give redundant information? Results from a case study in Poland. *Limnologica*, 42, 204–211.
- Scientific And Technical Advisory Panel, (2018). Integration: to solve complex environmental problems. Retrieved from: <https://www.thegef.org/sites/default/files/publications/STAP%20Report%20on%20integration.PDF>
- Szczerbińska, N. and Galczyńska, M. (2015). Biological methods used to assess surface water quality. *Arch. Pol. Fish*, 23, 185-196.
- Toplis, R., and Allen, M. (2011). 'I do and I understand?' Practical work and laboratory use in United Kingdom schools. *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, 2012, 8(1), 3-9.
- Wals, A.E.J., Brody, M., Dillon, J., Stevenson, R.B., (2004). Convergence Between Science and Environmental Education. *SCIENCE* VOL 344 9 MAY 2014. Retrieved from www.sciencemag.org
- Woodley, E. (2009). Practical work in school science – why is it important? *SSR*, 91(335) 49, 49-51.

Ilmu Perilaku Sebagai Strategi Mencegah Kecelakaan Kerja

Prof. Dr. Ir. Djoko Kustono H.M., M.Pd.

Bismillahirrohmanirrohim,
Assalamu'alaikum Warohmatullahi Wabarokatuh
Selamat pagi dan salam sejahtera untuk kita semua

Yang Saya Hormati,
Ketua Senat Universitas Negeri Malang,
Rektor dan Wakil Rektor Universitas Negeri Malang
Para Anggota Senat Universitas Negeri Malang
Para Dekan, Direktur Pascasarjana, Ketua Lembaga, Ketua Jurusan, Ketua Program Studi, Ketua Pusat, Ketua Laboratorium di Lingkungan Universitas Negeri Malang
Para Dosen, Mahasiswa dan Tenaga Kependidikan di Lingkungan Universitas Negeri Malang
Dan tidak lupa para Undangan dan hadirin sekalian yang berkesempatan hadir pada forum yang terhormat ini.

Marilah pertama tama kita bersama memanjatkan puji Syukur ke hadirat Allah SWT, karena hari ini kita telah dikarunia rahmat-Nya berupa nikmat sehat dan waktu luang sehingga kita semua bisa berkumpul untuk menghadiri Pidato Keguru Besar Saya yang diselenggarakan secara khusus oleh Senat Universitas Negeri Malang.

Tidak lupa Sholawat dan Salam kita haturkan kepada Junjungan kita Nabi Besar Muhammad SAW, yang telah memberikan suri teladan yang baik kepada umatnya.

Hadirin yang terhormat,

Perkenankanlah saya menyampaikan gagasan dalam bidang Keselamatan dan Kesehatan Kerja yaitu bidang ilmu yang saya pakai sebagai Guru Besar. Materi dalam gagasan yang saya sampaikan pada hari ini pada hakekatnya merupakan rangkuman dari materi beberapa seminar dan hasil penelitian yang terkait dengan bidang ilmu ini. Judul pidato saya adalah: **Ilmu Perilaku Sebagai Strategi Untuk Mencegah Kecelakaan Kerja.**

Kecelakaan adalah kejadian yang tidak terduga dan tidak diharapkan. Tidak terduga, oleh karena di belakang peristiwa itu tidak terdapat unsur kesengajaan. Tidak diharapkan, oleh karena peristiwa kecelakaan disertai kerugian material ataupun penderitaan dari yang paling ringan sampai ke yang paling berat (Suma'mur, 1995). Data dari *International Labour Organization (ILO)* mencatat, setiap hari terjadi sekitar enam ribu kecelakaan kerja mengakibatkan korban fatal di dunia. Di Indonesia, ada 20 kasus kecelakaan dialami para buruh dari setiap 100 ribu tenaga kerja, Data dari Jamsostek, secara keseluruhan sembilan orang meninggal perhari. Tiga orang di tempat kerja, enam orang di hubungan kerja (Daafi Armada, 2015) Secara lengkap data dari Biro Pusat Statistik disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tabel Kecelakaan Kerja

| Tahun | Jumlah Kecelakaan | Korban Mati | Luka Berat | Luka Ringan | Kerugian Materi (Juta Rp) |
|-------|-------------------|-------------|------------|-------------|---------------------------|
| 2000 | 12.649 | 9.536 | 7.100 | 9.518 | 36.281 |
| 2001 | 12.791 | 9.522 | 6.656 | 9.181 | 37.617 |
| 2002 | 12.267 | 8.762 | 6.012 | 8.929 | 41.030 |
| 2003 | 13.399 | 9.856 | 6.142 | 8.694 | 45.778 |
| 2004 | 17.732 | 11.204 | 8.983 | 12.084 | 53.044 |

| Tahun | Jumlah Kecelakaan | Korban Mati | Luka Berat | Luka Ringan | Kerugian Materi (Juta Rp) |
|-------|-------------------|-------------|------------|-------------|---------------------------|
| 2005 | 91.623 | 16.115 | 35.891 | 51.317 | 51.556 |
| 2006 | 87.020 | 15.762 | 33.282 | 52.310 | 81.848 |
| 2007 | 49.553 | 16.955 | 20.181 | 46.827 | 103.289 |
| 2008 | 59.164 | 20.188 | 23.440 | 55.731 | 131.207 |
| 2009 | 62.960 | 19.979 | 23.469 | 62.936 | 136.285 |
| 2010 | 66.488 | 19.873 | 26.196 | 63.809 | 158.259 |
| 2011 | 108.696 | 31.195 | 35.285 | 108.945 | 217.435 |
| 2012 | 117.949 | 29.544 | 39.704 | 128.312 | 298.627 |
| 2013 | 100.106 | 26.416 | 28.438 | 110.448 | 255.864 |

Tabel di atas menunjukkan kecenderungan yang semakin meningkat dari tahun ke tahun mulai 12.646 kasus di tahun 2000 sampai 93.578 di tahun 2013. Korban meninggal juga meningkat drastis dari 9.532 orang di tahun 2000 menjadi 23.385 orang di tahun 2013. Data sebenarnya tentu jauh lebih tinggi, karena penjarangan data dari Biro Pusat Statistik biasanya hanya berdasarkan laporan resmi suatu institusi, sedang data yang tidak dilaporkan mungkin belum tercatat.

Umur korban kecelakaan kerja biasanya merupakan faktor penting untuk menganalisa keseriusan kejadian kecelakaan kerja. Data kecelakaan kerja yang dikaitkan dengan umur korban disajikan pada Tabel 2. Nampak bahwa pekerja dengan umur produktif (16 tahun sampai 50 tahun) menempati urutan tertinggi sebagai korban kecelakaan kerja. Dalam interval tersebut pekerja muda (16 tahun sampai 25 tahun) memegang rekor kecelakaan yang paling tinggi sebagai korban kecelakaan. Kondisi ini tentu sangat memprihatinkan kita bersama. Di samping itu penelitian Kustono (2013:2) bahwa kecelakaan kerja lebih banyak dialami oleh pekerja berpendidikan rendah yaitu SD dan SLTP.

Tabel 2. Data Kecelakaan Kerja dalam Kelompok Umur Pekerja

| No | Kelompok Umur | Satuan | Tahun | | | | | | | | | |
|----|---------------|--------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
| 1 | 5-15 tahun | orang | 409 | 506 | 2311 | 3492 | 6437 | 7114 | 11747 | 12968 | 15630 | 2553 |
| 2 | 16-25 tahun | orang | 4717 | 4994 | 12813 | 17963 | 25681 | 29703 | 14396 | 24583 | 23052 | 67789 |
| 3 | 26-30 tahun | orang | 6036 | 6230 | 13607 | 18776 | 25064 | 29123 | 7198 | 18012 | 13816 | 67789 |
| 4 | 31-40 tahun | orang | 3946 | 3927 | 9196 | 13380 | 17712 | 20728 | 11315 | 17942 | 17034 | 27360 |
| 5 | 41-50 tahun | orang | 1920 | 1918 | 5164 | 8260 | 11115 | 13095 | 7434 | 11826 | 11376 | 21495 |
| 6 | 51-60 tahun | orang | 568 | 778 | 1957 | 3645 | 5318 | 6163 | 6091 | 7871 | 8585 | 23104 |

Bapak dan Ibu Hadirin yang Saya Hormati

Pada forum terhormat ini saya ingin menyampaikan strategi untuk mencegah kecelakaan kerja, yang didasarkan pada ilmu Keselamatan dan Kesehatan Kerja, namun akan disampaikan secara populer sehingga mudah dimengerti.

Strategi I memilih pendekatan

Para ilmuwan dan praktisi keselamatan kerja telah melakukan berbagai macam pendekatan dalam upaya untuk mencegah terjadinya kecelakaan kerja, misalnya pendekatan dari aspek hukum, aspek manajemen, aspek ergonomi, aspek perilaku, alat pelindung diri, HAZCOM, promosi dan lain sebagainya. Namun kecelakaan kerja cenderung makin meningkat.

Organisasi buruh internasional I.L.O (1989, dalam Kustono, 2015) mengungkapkan bahwa dari 75.000 kasus kecelakaan kerja 88 % disebabkan tindakan tidak aman (*unsafe act*), 10 % oleh kondisi tidak aman (*unsafe condition*) dan 2 % oleh sebab yang tidak terduga. Dari ungkapan ini tindakan tidak aman merupakan penyebab utama (88 %) terjadinya kecelakaan kerja. Tindakan tidak aman dipicu dari perilaku tidak aman (*unsafe behavior*). Berbagai data penelitian lain telah

mengungkapkan dominasi faktor perilaku ini sebagai penyebab utama kecelakaan kerja, sehingga kajian ilmu perilaku menempati posisi yang strategis dalam mencegah terjadinya kecelakaan kerja.

Strategi kedua, — Merubah Pola Pikir menurut Teori Domino Heinrich dan

Menurut teori domino Heinrich bahwa kecelakaan kerja yang terjadi merupakan suatu rangkaian kejadian seperti halnya kartu domino, salah satu kejadian (kartu) tidak terjadi maka kecelakaan tidak terjadi (Kustono, 2000 dan Pejman Ghasemi Poor Sabet dkk, 2013). Ilustrasi berikut ini dapat menggambarkan kejadian tersebut: Si Buruh hari Minggu tadi pagi berangkat kerja lembur, karena diperintah oleh Bang Mandor menyelesaikan pekerjaannya. Tadi pagi ia bangun terlambat karena hari Sabtu malam kemarin si Buruh menghadiri resepsi pernikahan keponakannya di desa sebelah hingga pulang larut malam. Si Buruh ke tempat kerja bersepeda motor. Di pertigaan Randu Pangger si Buruh tetap melintas meskipun lampu sudah merah. Pada saat yang sama bus Akas jurusan Ambulu melaju dari arah yang berlawanan. Kecelakaan tidak bisa dihindari. Helm si Buruh terlempar dan kepala Si Buruh membentur aspal jalan. Si Buruh sekarang dirawat di rumah sakit.

Pemahaman secara tradisional dalam menilai kejadian tersebut adalah (1) bahwa kecelakaan begitu saja terjadi. memang nasib Si Buruh yang sedang naas, sial dan kurang beruntung, (2) seringkali orang mengira bahwa kecelakaan kerja tidak akan terjadi pada dirinya, sehingga tidak perlu ada rencana mencegah kecelakaan kerja dan (3) banyak bukti menunjukkan bahwa tidak semua tindakan tidak selamat (misalnya menerobos lampu merah) menyebabkan kecelakaan. Ketiga jenis penilaian tersebut membuat kita enggan berlatih untuk berperilaku selamat (*safe behavior*) baik di jalan maupun di tempat kerja seperti: tidak menerobos lampu merah, memakai APD (alat pelindung diri) dengan tepat, menuruti prosedur keselamatan kerja dan lain sebagainya. Keengganan ini sudah pasti akan meningkatkan peluang terjadinya kecelakaan kerja (KK) fatal.

Menurut pendekatan ilmu perilaku KK adalah peristiwa yang rasional (masuk akal) dan dapat dijelaskan, oleh karena itu bisa dihindari atau dicegah. Nampak bahwa kronologi kecelakaan tersebut rasional dan jelas. Seandainya salah satu saja dari semua butir sebelum terjadinya KK tidak dipenuhi maka kecelakaan tidak terjadi. Oleh karena itu pendekatan ilmu perilaku berkeyakinan bahwa: (1) KK tidak begitu saja terjadi, namun merupakan suatu peristiwa yang rasional dan dapat dijelaskan, (2) KK merupakan suatu rangkaian peristiwa, tidak berdiri sendiri, (3) Langkah atau tindakan harus diambil agar KK dapat dicegah, dan (4) Peluang KK akan lebih besar bila tindakan korektif (perbaikan) tidak dilakukan.

Sehingga strategi yang dikemukakan adalah menanamkan pola pikir bahwa kecelakaan kerja fatal dapat dicegah dengan melatih untuk selalu berperilaku selamat.

Bapak dan Ibu Hadirin yang Saya Hormati

Strategi yang ketiga Budaya K3 dengan prinsip Safety Triad (Tiga Serangkai Keselamatan)

Safety Triad menurut Kustono (2015) merupakan gabungan terintegrasi dari faktor lingkungan kerja, kepribadian pekerja dan perilaku pekerja. Ketiga aspek ini seringkali dipakai sebagai analisis mencari penyebab kecelakaan kerja yang didasarkan kepada perilaku selamat organisasi

(*organizational safety behavior*). Faktor kepribadian (*person factor*), merupakan faktor yang bergantung kepada pengetahuan, keterampilan, pendidikan, motivasi, kemampuan, kecerdasan, sikap dan opini. Faktor lingkungan (*environment factor*), berkaitan dengan desain alat dan mesin, alat pelindung diri (APD), pelindung mesin, prosedur kerja dan sebagainya dan Faktor perilaku atau tindakan (*safety act*) ialah apa yang sesungguhnya dilakukan (diperbuat) oleh pekerja.

Ketiga faktor dalam *safety triad* ini dapat membentuk budaya K3. Budaya K3 merupakan penjelmaan dari perilaku, sikap, dan nilai secara bersama untuk mencapai derajat performansi sehat dan selamat, yang dipahami dan dijadikan prioritas utama dalam suatu organisasi (Blair, 2003; DePasquale & Geller, 1999). *The Advisory Committee on the Safety of Nuclear Installations (ACSNI, 1993)*, menyatakan bahwa budaya K3 dalam suatu organisasi adalah produk nilai-nilai, sikap, persepsi, kompetensi dan pola-pola perilaku dari individu dan kelompok yang memiliki komitmen terha-dap K3. Budaya K3 erat kaitannya dengan perilaku selamat dari organisasi (*organizational*

safety behavior). Penelitian Lin Cui dkk (2013) menemukan bahwa perilaku selamat organisasi ini berdampak kepada pengetahuan pekerja tentang K3 dan perilaku selamat dari pekerja.

Di tempat kerja ketiga faktor tersebut tidak bisa berdiri sendiri tetapi saling berinteraksi. Namun demikian kita dapat mengenal dominasi faktor perilaku terhadap yang lain, dalam kaitannya dengan KK melalui uraian sebagai berikut:

1. *Organisasi buruh internasional I.L.O* (1989) mengungkapkan bahwa dari 75.000 kasus kecelakaan kerja 88 % disebabkan tindakan tidak aman, 10 % oleh kondisi tidak aman dan 2 % oleh sebab yang tidak terduga.
2. Strasser (1981:83) membuktikan bahwa “*unsafe behavior is contributing cause of 85 % of all accident*”
3. Penelitian Hidayat (1999:3) yang mengambil data laporan kecelakaan lalu lintas di jalan tol dari PT Jasa Marga dari tahun 1992 sampai tahun 1996 menyimpulkan bahwa dari 2101 kasus kecelakaan yang terjadi di jalan tol 64,8 % adalah faktor pengemudi
4. Laporan *Bureau of Air Safety Investigation* menyebutkan bahwa kecelakaan pesawat terbang faktor penyebab utamanya adalah pilot yaitu sebesar 90 % (Hidayat 1999:6).
5. Menurut Krause et al 80 % sampai dengan 95 % KK berkaitan dengan perilaku pekerja.

Kita tidak selalu bisa dan kita juga tidak selalu siap merubah semua aspek dari kepribadian (*person factor*) atau kondisi kita (*environment factor*) tetapi kita semua dapat merubah perilaku atau tindakan kita. Sebagai contoh para pekerja dapat merubah lingkungan yang jelek menjadi baik dengan perilakunya. Perilaku pekerja merupakan suatu faktor yang selalu dapat diamati dan dimonitor oleh karena itu bisa dirubah.

Dari fakta yang ditunjukkan di atas tindakan tidak aman (dari manusia) merupakan penyebab utama kecelakaan kerja. Jadi kita dapat menyimpulkan penyebab KK paling penting adalah tindakan pekerja atau “apa yang sesungguhnya dilakukan oleh pekerja”. Dengan menekankan pada masalah perilaku yang spesifik kita dapat mengindikasikan (mengenal) suatu tindakan merupakan perilaku selamat atau tidak selamat.

Bila pekerja meningkatkan perilaku selamatnya atau tindakan selamatnya maka ia akan semakin berpengalaman dalam pengetahuan tentang keterkaitan antara perilaku dengan KK. Hal ini dapat dilakukan dengan terus berlatih bertindak selamat.

Bapak dan Ibu Hadirin yang Saya Hormati

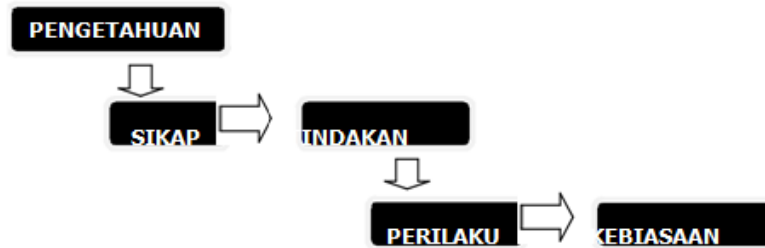
Strategi keempat adalah Mewujudkan Perilaku sehat dengan Teori Perubahan Perilaku

Perilaku seseorang tidak didapatkan sejak lahir tetapi didapatkan melalui berbagai macam proses sepanjang kehidupannya, dan dapat dibentuk maupun dikembangkan melalui berbagai rangsang. Begitu juga perilaku sehat (*save behavior*) bisa didapatkan dari pelatihan.

Dewasa ini ada tiga buah teori dasar (*grand theory*) yang dipakai untuk memprediksi perilaku sehat (Kustono, 2000: 25-30) yaitu 1) *health belief model*, 2) *theory of reasoned action* dan 3) *planned behavioral theory*. Menurut teori Kerangka berfikir *Health belief model* (Last, 1991) dalam Smet (1994:160) perilaku sehat seseorang muncul karena serangkaian proses yang ada dalam diri seseorang tersebut. Seseorang berperilaku sehat karena dua hal yaitu 1) adanya pertimbangan antara keuntungan dan kerugian apabila perilaku tersebut dilakukan (*perceived benefits minus perceived cost*) dan 2) persepsi orang tersebut terhadap ancaman bahaya suatu penyakit yang mungkin timbul.

Smet (1994: 164) mengungkapkan bahwa *theory of reasoned action* (TRA) masih merupakan teori yang baru dalam bidang perilaku sehat. Teori ini terwujud berdasarkan asumsi bahwa manusia adalah hewan yang berfikir (*man is a reasoning animal*) artinya semua tindakan manusia muncul karena adanya suatu proses berfikir sebelumnya, jadi manusia itu bertindak karena adanya nalar. Menurut teori ini tindakan manusia terwujud karena kehendak (*intention*) untuk bertindak. Sedangkan kehendak dibentuk oleh 1) sikap tentang perilaku dan 2) norma-norma subyektif yang ada. Pada teori *Planned behavioral theory* perilaku seseorang atau sekelompok orang terwujud karena kehendak untuk berperilaku (*behavior intention*). Kehendak ini terbentuk oleh tiga determinan

yaitu (1) sikap untuk berperilaku (*attitude toward behavior*), (2) norma-norma subyektif (*subjective norm*) dan (3) keyakinan kemampuan untuk melakukan perilaku tersebut (*self efficacy*). Berdasarkan ke tiga teori ini Kustono (2000:27-30) merangkumnya menjadi seperti gambar berikut.



Kebiasaan berperilaku sehat dapat dimulai dari memberikan pengetahuan. Pengetahuan ini akan membentuk sikap positif yang berupa dorongan dari dalam untuk berbuat sesuai dengan pengetahuan yang diberikan. Dorongan ini kemudian memicu tindakan untuk mencoba berbuat sesuai dengan dorongan dari dalam dirinya tersebut. Apabila kemudian tindakan ini menghasilkan “reward” sesuai “yang diketahui” maka tindakan tersebut akan berulang kali sehingga membentuk perilaku dan kebiasaan. Sehingga untuk mendapatkan kebiasaan berperilaku sehat dapat harus bermula diberikan pengetahuan tentang perilaku sehat. Dijelaskan dan diberikan pengetahuan mana perilaku sehat dan perilaku tidak sehat. Apa akibatnya apabila berperilaku tidak sehat dan berperilaku sehat. Pengetahuan ini apabila sering diberikan akan menginternal menjadi sikap positif terhadap perilaku sehat yang kemudian memicu tindakan awal yang bersifat coba-coba. Apabila ternyata tindakan yang bersifat coba coba ini dilakukan berkali kali akan membentuk kebiasaan berperilaku sehat.

Bapak dan Ibu Hadirin yang Saya Hormati

Jadi, strategi keempat adalah membentuk kebiasaan berperilaku sehat dengan mengawali dengan memberikan pengetahuan tentang perilaku sehat dan mengawasi sampai prosesnya sampai menjadi kebiasaan.

Bapak Ibu Hadirin Yang Saya Hormati

Strategi kelima adalah melatih kebiasaan berperilaku selamat dengan *Behavioral Base Safety (BBS)*

BBS merupakan cara mencegah kecelakaan kerja berdasarkan penekanan pada latihan mengembangkan tindakan selamat dan mengeliminir tindakan tidak selamat (Kustono, 2013). BBS adalah suatu teknik per-ubahan perilaku dgn karakteristik (1) dimulai dari bawah ke atas (*bottom up approach*), (2) berfokus kepada apa yang sesungguhnya dilakukan oleh pekerja (*focus on employee do*), (3) berusaha mencari akar permasalahan (*addresses root causes*) dan (4) dan berusaha memeberikan penguatan internal (*internal enforcement*) (Dorgan, 2013) jadi BBS ini merupakan suatu teknis tindakan proaktif untuk mencegah terjadinya kecelakaan kerja.

Beberapa penelitian lapangan menunjukan hasil yang baik terhadap aplikasi BBS ini, misalnya. Penelitian Mokaliran dan Panjaitan (2015) menyimpulkan — *This method gave good results in that all processes had an average of 80% safety behavior. BBS changed many dangerous behavior to become safety behavior, but there is still a dangerous behavior that cannot be changed* — Penelitian Zohar dan Luria (2003) mengungkapkan bahwa BBS dapat melibatkan seluruh lini perusahaan dan secara signifikan meningkatkan supervisi perilaku selamat. Seiring dengan itu perilaku selamat pekerja dan budaya K3 juga meningkat secara signifikan, dan masih banyak lagi hasil penelitian yang dapat menunjukkan keberhasilan teknis BBS ini dalam meningkatkan perilaku selamat pekerja.

Proses pelatihan perubahan perilaku keselamatan menurut BBS ini dapat dilakukan melalui empat tahapan sebagai berikut (Kustono, 2013):

1. *Observation*, mengamati dan memonitor perilaku pekerja dan mengidentifikasi (mengenali) manakah perilaku selamat dan manakah perilaku tidak selamat.
2. *Feedback*, memberikan umpan balik. Katakan kepada pekerja anda apakah ia melakukan tindakan selamat atau tidak selamat. *Feed back* ini harus merupakan masukan yang spesifik (khusus). Umpan balik yang tepat merupakan pemicu kepada pekerja untuk meneruskan atau merubah perilakunya.
3. *Reinforcement* (penguatan), pemberian suatu *consequences* yang positif sesudah pekerja anda melakukan tindakan selamat dapat mendorong pekerja tersebut melakukan lagi tindakan tersebut. Memberikan penguatan dapat dilakukan misalnya dengan mengatakan “Saya lihat anda memakai kacamata pelindung dengan baik hari ini. Itu merupakan perilaku yang selamat. Saya senang melihat hal itu”. Penghargaan se-macam ini merupakan “*positive consequences*” yang dapat memicu pekerja tersebut bertindak seperti itu lagi. Masih banyak contoh lain yang dapat dieksplorasi dari tempat kerja.
4. *Behavior change* (perubahan perilaku), perubahan ini terjadi hanya bila selalu dilakukan penguatan ke arah “*safe behavior*”, ini merupakan tujuan dari ketiga proses sebelumnya.

Bapak dan Ibu Hadirin yang saya hormati — —

Strategi keenam adalah dengan — Mengendalikan Bahaya Kecelakaan Kerja

Pada dasarnya bahaya KK dapat dicegah yaitu dengan:

1. Mencegah atau mengendalikan KK secara Teknis
2. Mencegah atau mengendalikan KK secara administrasi
3. Mencegah atau mengendalikan KK alat pelindung kerja

Semua tipe pengendalian ini dapat digunakan secara bersamaan, tapi prioritas harus diberikan kepada pengendalian teknik sebelum metoda pengendalian yang lain diaplikasikan. Pengendalian administratif dan peralatan pelindung pekerja sebaiknya tidak diaplikasikan sebelum pengendalian teknik dicoba, atau jika pengendalian teknik tidak mungkin dilakukan. Perlu diingat bahwa yang terbaik untuk melindungi pekerja adalah: Kendalikan Bahaya yang ada bukan pekerjaanya.

1. Pengendalian Teknik

Pengendalian teknik adalah pengendalian yang terbaik karena menghilangkan bahaya yang ada atau menghilangkan kemungkinan bahaya tersebut mengenai pekerja. Sasaran dari pengendalian teknik adalah bahaya yang ada secara langsung, dan efektifitasnya tidak tergantung pada perilaku pekerja. Yang termasuk dalam jenis pengendalian teknik adalah metoda untuk mendesain kembali proses produksi, dengan:

1. Mengganti motor berbahan bakar bensin dengan motor listrik untuk menghilangkan polusi asap
2. Memasang peralatan pengisi pada mesin untuk melindungi tangan
3. Menggunakan metoda basah untuk mengurangi tingkat debu
4. Mekanisasi proses produksi, seperti menggunakan ban berjalan untuk menghilangkan debu yang terjadi pada proses penyendokan
5. Menggunakan produk yang lebih aman, seperti dengan:
 - a) Menggunakan bahan kimia yang tidak beracun, tidak berdebu, atau tidak mudah terbakar;
 - b) Mengganti peralatan lama dengan peralatan baru yang menggunakan sistem pelindung;

2. Pengendalian Administratif

Pengendalian administratif tidak menghilangkan bahaya secara langsung, tetapi digunakan untuk membatasi waktu kontak antara pekerja dengan bahaya. Untuk menjadi efektif, pengendalian administratif bergantung pada perilaku manusia. Yang termasuk pengendalian administratif antara lain:

1. Menggilir tempat pekerja antara pekerjaan yang berbahaya dengan pekerjaan yang tidak berbahaya, sehingga waktu kontak dengan bahaya dapat dikurangi;
2. Menambah jam istirahat untuk mengurangi waktu kontak dengan bahaya;

3. Mengubah jadwal kerja, jika memungkinkan jadwalkan pekerjaan yang membuat suhu naik dikerjakan malam hari ketika suhu ruangan lebih rendah;
4. Meningkatkan fasilitas kesehatan dan kebersihan, seperti memberi tempat bagi pekerja untuk mencuci muka dan tangan sebelum makan dan minum, melarang makan dan minum di tempat kerja, memberi tempat agar pekerja dapat mandi setelah shift dan meninggalkan pakaian kotor di tempat kerja
5. Meningkatkan kemampuan pekerja untuk mengenali bahaya dan mengambil langkah untuk melindungi diri sendiri
6. Memberikan jumlah istirahat yang cukup

3. Peralatan Pelindung Pekerja

Penggunaan peralatan pelindung pekerja adalah sistem pengendalian bahaya yang paling lemah. Peralatan pelindung digunakan sebagai cara terakhir untuk melindungi pekerja bila pengendalian teknik dan administratif tidak mungkin dilakukan atau dalam keadaan darurat. Peralatan pelindung tidak menghilangkan ataupun mengurangi bahaya yang ada. Peralatan ini hanya mengurangi jumlah kontak dengan bahaya dengan menempatkan penghalang antara pekerja dengan bahaya. Banyak faktor yang dapat mengurangi efektifitas dari peralatan pelindung. Efektifitas sistem ini juga amat bergantung dari perilaku pekerja. Peralatan pelindung yang ada dapat melindungi kepala, telinga, pernapasan (melalui mulut dan hidung), tangan, kaki, dan tubuh.

Strategi keenam — — KENDALIKAN BAHAYANYA BUKAN MEMANIPULASI PERILAKU PEKERJANYA — —

Bapak dan Ibu Hadirin yang saya hormati

Strategi ketujuh (yang terakhir) menggunakan ilmu Post-Traumatic Stress Disorder (PTSD) untuk memelihara sikap dan perilaku berhati-hati.....

Kecelakaan kerja sering kali menimbulkan trauma. Berat ringan trauma tergantung antara lain kepada berat ringan kecelakaan, umur, jenis kelamin, pendidikan, status sosial dan lain sebagainya. Kondisi ini terkadang sampai jauh hari melampaui peristiwa kecelakaan itu sendiri. Ilmu psikologi menyebutnya *Post-Traumatic Stress Disorder (PTSD)*.

PTSD dapat mempengaruhi tindakan atau perilaku subyek dalam kehidupan sehari-harinya. Salah satu yang sering kali terjadi adalah *Avoidance symptoms*: (penghindaran gejala). Perilaku menghindari gejala ini secara positif memicu tindakan berhati-hati, lebih berjaga jaga (*coping*), lebih mengingat kepada peristiwa, benda benda dan atribut lain yang berkaitan dengan peristiwa kecelakaan.

Kejadian KK yang menyebabkan trauma ternyata tidak harus dialami sendiri oleh pekerja namun bisa dimanipulasi dengan berbagai bentuk media misalnya gambar, foto, tayangan video dan lain sebagainya. Dalam kesempatan ini saya ingin menunjukkan beberapa gambar yang mungkin bisa menimbulkan trauma buatan.

Berdasarkan berbagai tayangan tersebut maka strategi ketujuh adalah menanamkan pengertian bahwa KESELAMATAN SAYA ADALAH URUSAN SAYA ...

DAFTAR RUJUKAN

- Daafi Armada, 2015. Norma K3 Dalam Konstruksi Bangunan. Disampaikan pada *Diskusi publik yang diadakan di Lembaga Bantuan Hukum (LBH) Jakarta*, Senin, 29 Juni 2015.
- Blair, E. (2003). Culture & Leadership: Seven Key Points for Improved Safety Performance. *Professional Safety* (6), 18-22.
- DePasquale, Jason and E. Scott Geller. (1999). Critical Success Faktors for Behavior-Based Safety: A Study of Twenty Industry-Wide Applications. *Journal of Safety Research*, vol. 30, no. 4, page 237-249.
- Dorgan, Mary. 2013. Behavioral Base Safety Guide. *Published in 2013 by the Health and Safety Authority, The Metropolitan Building, James Joyce Street, Dublin 1.*
- I.L.O. 1989. Pencegahan kecelakaan (terjemahan). Buku pedoman. Jakarta: IPPM dan PT. Pustaka Binaman Presindo.
- Zohar., Dov. dan Gil Luria. 2003. The use of supervisory practices as leverage to improve safety behavior: A cross-level intervention model. *Journal of Safety Research*. Volume. 34., Issue 5. 2003. Pages 567-577.
- Ghasemi, Pejman Poor Sabet., Hamid Aadal., Mir Hadi Moazen jamshidi., dan Kiyanoosh Golchin Rad. 2013., Application of Domino Theory to Justify and Prevent Accident Occurance in Construction Sites. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering.*, Volume 6, Issue 2 (Mar. Apr. 2013), PP 72-76.
- Kustono., Djoko. 2000. Model Interakasi Antara Pendidikan Keselamatan Kerja, Dengan Pendidikan Formal Dalam Membentuk Sikap Mengutamakan Keselamatan Kerja. Naskah Disertasi. *Universitas Airlangga Tahun 2000.*
- Kustono, Djoko. 2003. Pengaruh Pendidikan – Latihan Keselamatan Kerja, Peng-alaman Kerja, Dukungan Manajerial dan Pangkat terhadap Sikap Pekerja Industri Berpendidikan Rendah. *Jurnal Ilmu Pendidikan. Tahun 30. No. 1. Januari 2003.* (terakreditasi)
- Kustono, Djoko. 2015. Strategi dan Implementasi Multisektoral dalam Mewujudkan Indonesia Berbudaya Kesehatan dan Keselamatan Kerja. Makalah disampaikan pada *Seminar Nasional K3, Tanggal 15 November 2015. Fakultas Teknik Universitas Negeri Malang.*
- Lin Cui., Di Fan., Gui Fu., Cherrie Jiuhua Zhu. 2013. An integrative model of organizational safety behavior. *Journal of Safety Research*. Volume. 45., June 2013. Pages 37-46
- Mokaliran., Chintia dan Togar.W.S. Panjaitan. 2015. Peningkatan Perilaku Aman di PT. XXX Dengan Pendekatan *Behavior Base Safety*. *Jurnal Titra. Vol. 3. No. 2. Juli 2015. Pp. 79-84.*
- Smet, Bart. 1995. Psikologi kesehatan. Jakarta: PT. Gramedia Widiasarana Indonesia.

Keselamatan dan Kesehatan Kerja di Bidang Otomotif: Teknologi, Keamanan dan Polusinya

Prof. Dr. Marji, M.Kes

*Bismillaahirrahmaanirrahiim
Assalamu'alaikum warahmatulloohi wabarorakaatuh,*

Yang saya hormati,
Bapak Rektor Universitas Negeri Malang
Para Guru Besar dan Anggota Senat Universitas Negeri Malang
Bapak Dekan Fakultas Teknik
Pimpinan Fakultas dan Lembaga di Lingkungan Universitas Negeri Malang
Teman Sejawat dan Segenap Civitas Akademika Universitas Negeri Malang, serta
Hadirin Undangan yang Berbahagia

Pada pagi yang berbahagia ini marilah kita memanjatkan puji syukur ke hadirat Allah SWT., yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya kepada kita semua sehingga kita dapat berkumpul di ruangan ini dalam keadaan sehat *wal afiat*.

Pada kesempatan ini, perkenankanlah saya menyampaikan rasa hormat dan terima kasih yang sebesar besarnya kepada Bapak Rektor dan Senat Universitas Negeri Malang yang telah memberi kepercayaan kepada saya untuk menyampaikan pidato pengukuhan sebagai Guru Besar dalam Ilmu Keselamatan dan Kesehatan Kerja otomotif pada Fakultas Teknik.

Oleh karena itu, sebagai tradisi dalam pengukuhan Guru Besar baru, pada kesempatan ini saya akan memberikan orasi dengan judul:

Keselamatan dan Kesehatan Kerja di Bidang Otomotif: Teknologi, Keamanan dan Polusinya

Hadirin yang saya muliakan,

1. Keselamatan Kerja (K2)

Didefinisikan sebagai: suatu upaya perlindungan dari kecelakaan agar tenaga kerja selalu dalam keadaan selamat dan sehat selama melakukan pekerjaan di tempat kerja serta bagi orang lain yang memasuki tempat kerja maupun sumber sehingga proses produksi dapat secara aman dan efisien dalam pemakaiannya (Toyota, 2006).

Menindaklanjuti pentingnya keselamatan di dalam bekerja, maka Pemerintah Indonesia di dalam hal ini mengeluarkan undang-undang yang menjamin diberlakukannya keselamatan di dalam bekerja oleh setiap perusahaan. Undang-Undang Pokok Keselamatan dan Kesehatan Kerja No. 1 Tahun 1970 dikeluarkan dengan tujuan sebagai berikut.

- Agar tenaga kerja dan setiap orang yang berada di tempat kerja selalu dalam keadaan sehat dan selamat.
- Agar sumber-sumber produksi dapat dipakai dan digunakan secara efisien.
- Agar proses produksi dapat berjalan secara lancar tanpa adanya hambatan.

Sebelum teori Heinrich, kecelakaan utamanya di bidang otomotif dianggap sebagai kehendak Tuhan, karena itu seorang yang tertimpa kecelakaan menerimanya sebagai nasib atau takdir. Tambah tahun pertumbuhan kendaraan berkembang semakin pesat, Ada sekitar 600 juta mobil penumpang di seluruh dunia. Diperkirakan terdapat satu mobil tiap sebelas orang. Di seluruh dunia, ada sekitar 806 juta mobil dan truk ringan di jalan pada 2007 (Edukasia, 2012).

Seiring pesat pertumbuhan kendaraan tersebut kecelakaan juga semakin banyak. Meningkatnya kecelakaan ini, membuat orang berpikir bahwa kecelakaan itu sendiri tidak hanya takdir

saja melainkan juga ada penyebabnya. Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi seiring dengan perkembangan zaman kecelakaan itu dicari penyebabnya.

Menurut ILO (1990), faktor penyebab terjadinya kecelakaan kerja dapat dibagi menjadi dua kelompok sebagai berikut.

1. Keadaan yang tidak aman (*Unsafe Condition*)
2. Tindakan/gerakan yang tidak aman (*Unsafe Act*)

Kedua faktor ini sangat erat hubungannya dan dapat merupakan hubungan sebab akibat yaitu keadaan yang tidak aman dapat menimbulkan bahaya yang tidak aman dan begitu juga sebaliknya.

Pada tahun 1931 Heinrich mengeluarkan buku *Industrial Accident Prevention*. Dalam buku tersebut mengemukakan teori sebab akibat yang terkenal dengan teori domino. Apabila salah satu dari domino jatuh, akan menabrak domino lainnya, dan akan menimbulkan kerugian. Agar tidak dapat memutuskan serentetan tersebut dicabut domino C (*hazard*) sehingga tidak terjadi kecelakaan (Sulakmono, 1988).

Akibat dari kecelakaan adalah kerugian yang mengakibatkan kerusakan harta benda maupun kerugian proses operasi.

Jenis dan derajat kerugian sebagian tergantung pada hal yang kebetulan dan sebagian tergantung pada tindakan yang dilakukan untuk memperkecil kecelakaan.

Para hadirin yang terhormat,

2. Kesehatan Kerja

Kesehatan Kerja adalah upaya penyesuaian antara kapasitas kerja, beban kerja, dan lingkungan kerja agar setiap pekerja dapat bekerja secara sehat tanpa membahayakan dirinya sendiri maupun masyarakat di sekelilingnya, agar diperoleh produktivitas kerja yang optimal khusus di bidang otomotif (UU Kesehatan Tahun 1992 Pasal 23).

Konsep dasar dari Upaya Kesehatan Kerja ini adalah: identifikasi permasalahan, evaluasi, dan dilanjutkan dengan tindakan pengendalian.

3. Ruang Lingkup Kesehatan Kerja

Kesehatan kerja meliputi berbagai upaya penyesuaian antara pekerja dengan pekerjaan dan lingkungan kerjanya baik fisik maupun psikis dalam hal cara/metode kerja, proses kerja, dan kondisi di bidang otomotif yang bertujuan sebagai berikut.

1. Memelihara dan meningkatkan derajat kesehatan kerja masyarakat pekerja di semua lapangan kerja setinggi-tingginya baik fisik, mental, maupun kesejahteraan sosialnya.
2. Mencegah timbulnya gangguan kesehatan pada masyarakat pekerja yang diakibatkan oleh keadaan/kondisi lingkungan kerjanya.
3. Memberikan pekerjaan dan perlindungan bagi pekerja di dalam pekerjaannya dari kemungkinan bahaya yang disebabkan oleh faktor-faktor yang membahayakan kesehatan.
4. Menempatkan dan memelihara pekerja di suatu lingkungan pekerjaan yang sesuai dengan kemampuan fisik dan psikis pekerjaannya.

4. Kapasitas Kerja, Beban Kerja, dan Lingkungan Kerja

Kapasitas kerja, beban kerja dan lingkungan kerja merupakan tiga komponen utama dalam kesehatan kerja, di mana hubungan interaktif dan serasi antara ketiga komponen tersebut akan menghasilkan kesehatan kerja yang baik dan optimal di bidang otomotif. Kapasitas kerja yang baik seperti status kesehatan kerja dan gizi kerja yang baik serta kemampuan fisik yang prima diperlukan agar seorang pekerja dapat melakukan pekerjaannya dengan baik.

Kondisi atau tingkat kesehatan pekerja sebagai (modal) awal seseorang untuk melakukan pekerjaan harus pula mendapat perhatian. Kondisi awal seseorang untuk bekerja dapat dipengaruhi oleh kondisi tempat kerja, gizi kerja, dan lain-lain. Kondisi lingkungan kerja (misalnya panas, bising debu, zat-zat kimia, dan lain-lain) dapat merupakan beban tambahan terhadap pekerja. Beban-beban tambahan tersebut secara sendiri-sendiri atau bersama-sama dapat menimbulkan gangguan atau

penyakit akibat kerja. **Kendaraan dan Bengkel merupakan tempat kerja yang sering digunakan oleh pekerja dalam mengais rezeki dan memperbaiki kendaraan.** Penyakit akibat kerja dan atau berhubungan dengan pekerjaan dapat disebabkan oleh pemajanan di lingkungan kerja tersebut. Dewasa ini terdapat kesenjangan antara pengetahuan ilmiah tentang bagaimana bahaya-bahaya kesehatan berperan dan usaha-usaha untuk mencegahnya.

Beban kerja meliputi beban kerja fisik maupun mental. Akibat beban kerja yang terlalu berat atau kemampuan fisik yang terlalu lemah dapat mengakibatkan seorang pekerja menderita gangguan atau penyakit akibat kerja. Gangguan kesehatan pada pekerja dapat disebabkan oleh faktor yang berhubungan dengan pekerjaan maupun yang tidak berhubungan dengan pekerjaan. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa status kesehatan masyarakat pekerja dipengaruhi tidak hanya oleh bahaya kesehatan di tempat kerja dan lingkungan kerja tetapi juga oleh faktor-faktor pelayanan kesehatan kerja, perilaku kerja, serta faktor lainnya.

Hadirin yang saya muliakan,

5. Keselamatan dan Kesehatan Kerja di Bidang Otomotif

Keselamatan dan kesehatan kerja otomotif merupakan satu kesatuan yang menjadi isu penting di dalam percaturan dunia modern, di dalam terkandung dua disiplin ilmu yang saling melengkapi, yaitu ilmu teknik dan kedokteran. Tanpa teknologi dan perilaku pekerja yang baik dan benar serta dapat menyebabkan kecelakaan yang dahsyat bahkan menimbulkan kematian.

Kecelakaan mobil hampir sama tua dengan mobil itu sendiri. **Joseph Cugnot** menabrak mobil tenaga-uapnya “Fardier” dengan tembok pada **1770**. Kecelakaan mobil fatal pertama kali yang dicatat adalah Bridget Driscoll pada 17 Agustus 1896 di London dan Henry Bliss pada **13 September 1899** di New York City. (Wikimedia, Mobil. @google.id.com. <http://wikipedia.org/wiki/mobil> diakses 22 Mei 2012).

Selanjutnya menurut penelitian yang dilakukan Saini AK, selama periode 5 tahun (1991-1995) terdapat 2277 kasus kecelakaan lalu lintas di Provinsi Riau, dengan korban meninggal sebanyak 1290 orang, luka berat 1287 orang, luka ringan 1308 orang. Faktor penyebab kecelakaan terbesar adalah faktor manusia yaitu sebesar 95%, faktor kendaraan sebesar 2,6%, faktor jalan sebesar 1,3%, dan faktor lingkungan sebesar 1,1% (Saini AK: 2008).

Tercatat di Indonesia, sedikitnya kematian akibat kecelakaan lalu lintas sepanjang tahun 2007 menelan korban mencapai jumlah 16.548 jiwa. Dengan kata lain, setiap hari minimal 45 orang tewas di jalan raya. Padahal, pada tahun 2003 angka dari korban tewas akibat kecelakaan lalu lintas baru mencapai 9.856 jiwa atau mengambil 24 jiwa setiap harinya (darwis97.wordpress.com: diakses 19 April 2009).

Lebih Lanjut ditegaskan pula oleh Muharsanto dari 105 hasil pemeriksaan luar yang memenuhi kriteria inklusi dari 108 hasil pemeriksaan luar di RSUD Arifin Achmad Pekanbaru selama periode 1 Januari 2005–31 Desember 2007. Korban meninggal disebabkan kecelakaan lalu lintas terbanyak menurut jenis kelamin adalah laki-laki (85,71%), menurut lokasi perlukaan yang terbanyak adalah perlukaan di kepala (98,10%), menurut kategori pengguna jalan yang terbanyak adalah kategori pengendara sepeda motor (88,57%), dan Jenis perlukaan terbanyak ditemukan dalam penelitian ini adalah luka robek/ terbuka (89,52%) (Muharsanto: 2008).

5.1 Ancaman Eksistensi Populasi

Dengan fakta angka demikian, tak ayal lagi kecelakaan lalu lintas menempati posisi pembunuh nomor 3 di Indonesia setelah penyebab kematian nomor 1 dan 2 adalah penyakit jantung dan stroke. “Prestasi” tersebut memposisikan Indonesia duduk di peringkat ke-3 di antara negara-negara di ASEAN yang jumlah kecelakaan lalu lintasnya paling tinggi. Dengan demikian, secara tidak langsung telah menjadikan suatu hal yang serius untuk ditangani.

Jalan raya telah menjadi medan belantara yang menakutkan. Fakta angka kematian yang disebutkan di atas sungguhlah fantastis. Dibandingkan angka kematian Demam Berdarah Dengue & serangan virus H5N1 atau *avian influenza*, angka kematian di jalan raya jauh lebih tinggi di atas kedua penyakit yang masuk kategori sebagai kejadian luar biasa (KLB) tersebut.

Sekadar melengkapi, data dari Badan Kesehatan Dunia (WHO), korban kematian dari kecelakaan lalu lintas 2007 telah menelan korban sedikitnya 1,2 juta jiwa per tahunnya. Diperkirakan 90% dari total jumlah tersebut mengambil porsi korban jiwa dari penduduk negara berkembang (www.g2glive.com: diakses: 19 April 2009).

Perlu diingat, angka-angka tersebut belum termasuk angka para korban yang mengalami cacat fisik. Di mana cacat fisik merupakan dampak samping memprihatinkan dari fenomena kecelakaan lalu lintas dalam skala nasional maupun dunia. Koordinator Persatuan Bangsa-Bangsa untuk Indonesia Bo Asplund, pernah menyinggung bahwasanya di seluruh dunia terdapat sekitar 140.000 orang mengalami kecelakaan di jalan setiap harinya. Lebih dari 3.000 orang meninggal akibat kecelakaan di jalan dan sekitar 15.000 orang mengalami cacat seumur hidup (www.klikdokter.com diakses 20 April 2009).

Dalam laporan berjudul *World Report on Road Traffic Injury Prevention*, untuk pertama kalinya badan Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) itu memberi perhatian serius pada masalah ini, setelah meninjau fakta statistik mengenai ancaman kecelakaan lalu lintas pada keberlangsungan eksistensi manusia yang notabene kecelakaan lalu lintas juga telah menjadi penyebab 90 persen cacat seumur hidup.

Bila masalah kecelakaan di jalan tidak diperhatikan dengan sungguh-sungguh, maka dikhawatirkan pada tahun 2020 nanti, jumlah korban yang meninggal atau mengalami kecacatan setiap harinya mencapai lebih dari 60% di seluruh dunia. Sehingga kecelakaan di jalan menjadi penyebab utama kesakitan dan kecacatan (www.klikdokter.com diakses 20 April 2009).

5.2 Kerugian Ekonomi

Selain kematian dan cacat fisik, dampak kecelakaan lalu lintas lainnya adalah dampak ekonomi. Pada skala mikro ekonomi, kecelakaan lalu lintas sangat merugikan pihak korban. Situasi keuangan keluarga dapat mengalami intervensi karena pada umumnya mereka yang terkena kecelakaan adalah usia produktif, yaitu 15-44 tahun. (www.g2glive.com).

Secara demografis, penduduk Indonesia dalam kategori usia produktif (15-44 tahun) mengambil porsi sekitar 75% dari total populasi. Dengan rasio intensitas frekuensi kematian di jalan raya 16.548 jiwa per tahunnya, maka para prosentase jumlah populasi generasi penerus bangsa tereduksi menjadi hanya sekitar 60% (www.klikdokter.com diakses 20 April 2009).

Di kawasan Asia Tenggara saja, pada tahun 2001 diperkirakan 354.000 orang meninggal akibat kecelakaan di jalan dan diperkirakan 6,2 juta terpaksa dirawat di rumah sakit akibat kecelakaan di jalan. Biaya akibat kecelakaan di jalan di negara-negara kawasan Asia Tenggara diperkirakan mencapai 14 miliar dolar Amerika. Secara nasional kerugian ekonomi yang diakibatkan oleh kecelakaan lalu lintas mencapai 1-2% PDB Nasional. Perlu diingat, prosentase ini belum termasuk lagi kerugian akibat gangguan kesehatan yang disebabkan polusi udara, padahal kerugian akibat gangguan kesehatan yang disebabkan polusi udara pada tahun 1996 saja sudah diperkirakan sebesar US\$ 2,16 miliar (www.klikdokter.com diakses 20 April 2009).

Faktor kendaraan yang paling sering terjadi adalah ban pecah, rem tidak berfungsi sebagaimana seharusnya, kelelahan logam (logam yang sudah berumur) yang mengakibatkan bagian kendaraan patah, peralatan yang sudah aus tidak diganti dan berbagai penyebab lainnya. Keseluruhan faktor kendaraan sangat terkait dengan teknologi yang digunakan, perawatan yang dilakukan terhadap kendaraan.

Teknologi yang tidak mendukung dengan medan yang ditempuh, tidak ergonomis, kaku, membuat pengendara tidak nyaman dalam berkendara, oleh sebab itu suspensi aktif dapat digunakan sebagai salah satu untuk memperkecil kecelakaan.

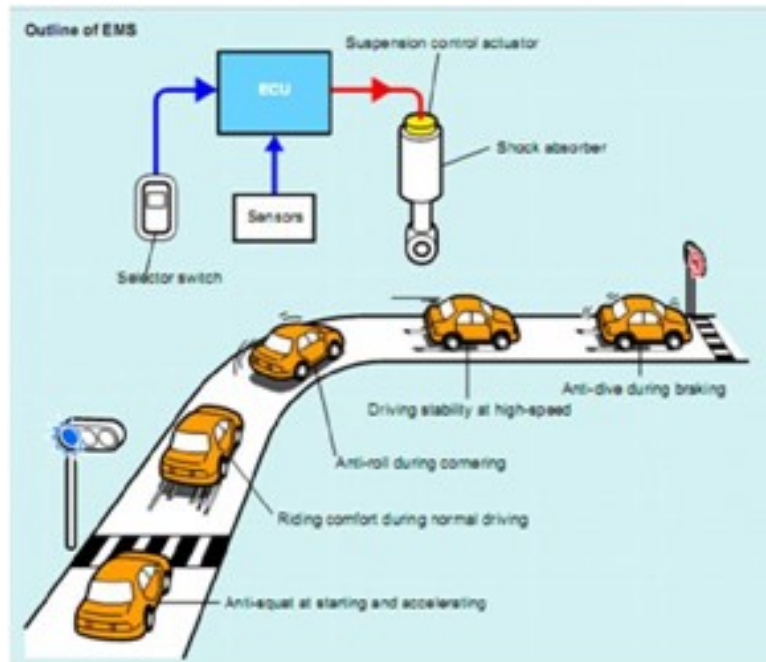
Hadirin yang saya muliakan,

6. Teknologi Keamanan

6.1. EMS (*Electronically Modulated Suspension*)

EMS adalah singkatan dari *Electronically Modulated Suspension Anti-dive during braking* adalah suspensi udara menggunakan sebuah ECU untuk secara elektronik mengontrol suspensi yang

menggunakan pegas-pegas udara yang memanfaatkan elastisitas udara yang terkompres. Terdapat pula model-model yang menggabungkan suspensi udara dengan EMS. Suspensi udara mempunyai fitur-fitur berikut: Tenaga damping dapat diubah. Nilai pegas dan tinggi kendaraan dapat diubah dengan menyesuaikan volume udara.



Gambar 6.1 Peran EMS pada Tikungan Tajam (Toyota:2003)

Kontrol *Anti-squat* mengubah tenaga *damping* menjadi lebih keras. Ini menekan kondisi seperti jongkok saat akselerasi, sehingga meminimalkan perubahan pada postur kendaraan. Kontrol *Anti-roll*, mengubah tenaga *damping* menjadi lebih keras. Ini kondisi bergulir, sehingga meminimalkan perubahan pada postur kendaraan, dan memberikan kemampuan kontrol yang sangat baik. Kontrol *Anti-dive*, mengubah tenaga *damping* menjadi lebih keras. Ini menekan kondisi penurunan hidung kendaraan (*nose*) saat pengereman, sehingga meminimalkan *diving* perubahan pada postur kendaraan. Kontrol kecepatan tinggi (hanya mode normal), mengubah tenaga *damping* menjadi lebih keras. Kontrol ini memberikan kestabilan pengemudian dan kemampuan mengontrol yang sangat baik pada kecepatan tinggi. Kontrol *Semi-active*, mengubah dengan halus tenaga *damping* ke nilai yang dituju yang sesuai dengan perubahan-perubahan pada permukaan jalan atau kondisi pengemudian. Oleh karena itu, kenyamanan berkendara yang baik telah dihasilkan pada getaran. saat memastikan tingkat tinggi performa *damping Sky-hook EMS* (Toyota: 2003).

Dengan membuat kendaraan berada pada kondisi *sky-hook*, secara konstan akan mendapatkan kinerja kendaraan yang stabil sehubungan dengan perubahan pada kondisi jalan. Pada *sky-hook* EMS dengan menggunakan teori ini, gerakan naik dan turun dari badan kendaraan terasa lebih nyaman karena sebuah komputer akan mengontrol dan menyesuaikan gerakan dari peredam guncangan dengan baik. Sistem ini sangat memperbaiki kenyamanan berkendara dan kestabilan pengemudian. Pada model-model terakhir, seperti pada LS430, kontrol *semi-active* dari kontrol tenaga *damping* telah berubah dari kontrol *sky-hook* menjadi kontrol *non-linear H* untuk mendapatkan kontrol yang lebih baik lagi. Sebagai hasilnya, kenyamanan berkendara telah terlaksana.

6.2 ABS (*Anti-lock Brake System*)

Ide kontrol dari ABS untuk menghindarkan ban dari penguncian dan kehilangan kemampuan untuk membelokkan roda *steering* saat pengereman darurat, adalah hal yang efektif untuk menekan dan melepaskan rem berkali-kali. Namun saat pengereman darurat tidak ada waktu untuk melakukan

ini. ABS menggunakan sebuah komputer untuk menentukan kondisi rotasi dari keempat roda saat pengereman dan dapat secara otomatis menekan dan melepaskan rem. Perbedaan rasio antara kecepatan badan kendaraan dan kecepatan roda dikenal dengan “*slip ratio*”. Bila perbedaan antara kecepatan roda dan kecepatan kendaraan menjadi terlalu besar, selip terjadi antara ban dan permukaan jalan. Ini juga menghasilkan friksi dan pada akhirnya akan berfungsi sebagai tenaga pengereman dan memperlambat kecepatan kendaraan.

Tenaga pengereman tidak proporsional terhadap *slip ratio*, berada pada kondisi maksimum bila persentase *slip ratio* antara 10 sampai dengan 30%. Di atas 30%, tenaga pengereman secara bertahap akan menurun. Karenanya, untuk mempertahankan tingkat maksimum dari tenaga pengereman, *slip ratio* harus dipertahankan antara 10 hingga 30% setiap waktu. Sebagai tambahan, sangat penting untuk mempertahankan *cornering force* pada tingkat yang tinggi untuk menjaga stabilitas langsung. Untuk melakukan hal ini, ABS didesain untuk memaksimalkan kinerja rem dengan menggunakan *slip ratio* 10-30% apa pun kondisi jalannya, pada saat yang sama juga menjaga *cornering force* setinggi mungkin untuk mempertahankan stabilitas langsung (*directional stability*) (Suzuki, 2008, Toyota, 2003).

Meskipun ABS merupakan keamanan yang andal namun pada jalan yang licin, pengendara harus mengurangi kecepatan karena permukaan jalan mempunyai friksi koefisien yang rendah (μ), karena jarak pengereman bertambah sebagai perbandingan dengan permukaan jalan yang mempunyai nilai tinggi dari μ walaupun ABS diaktifkan.

Pada jalan yang kasar, atau pada jalan berbatuan atau jalan dengan salju baru, operasi ABS akan berakibat pada jarak berhenti yang lebih panjang daripada bagi kendaraan yang tidak dilengkapi dengan ABS .

Sebagai tambahan, suara dan getaran akan dihasilkan bila ABS diaktifkan untuk memberi informasi kepada pengemudi bahwa ABS sedang bekerja. Berdasarkan signal dari sensor kecepatan, *Skid Control ECU* merasakan kecepatan rotasi roda dan kecepatan kendaraan.

Selama pengereman, walaupun kecepatan rotasi roda menurun, jumlah perlambatan akan bervariasi tergantung pada baik kecepatan kendaraan selama pengereman maupun kondisi permukaan jalan, seperti aspal kering, permukaan basah dan beres, dan lain-lain.

Dengan perkataan lain, ECU menentukan jumlah ketergelinciran (*slipping*) antara roda dan permukaan jalan dari perubahan pada kecepatan rotasi roda selama pengereman, dan mengendalikan pentil *solenoid* dari penggerak rem dalam 3 mode berikut: pengurangan tekanan, mempertahankan tekanan, dan mode meningkatkan tekanan, untuk secara optimal mengendalikan kecepatan roda.

Para hadirin yang terhormat,

1. Polusi

Sejak Robert Bosch menemukan Pompa Injeksi Diesel tahun 1922, maka dikembangkan secara marak sistem injeksi bensin, tahun 1995 hampir semua produksi mobil dilengkapi dengan sistem injeksi, dengan tujuan agar emisi gas buang bisa dikendalikan.

Adapun pengertian dari EPI adalah sebuah sistem penyemprotan bahan bakar di Intake yang dalam kerjanya dikontrol secara elektronik agar didapatkan nilai campuran udara dan bahan bakar selalu sesuai dengan kebutuhan motor bakar, sehingga didapatkan daya motor yang optimal dengan pemakaian bahan bakar yang *minimal* serta mempunyai gas buang yang *ramah lingkungan*.

Gas buang di dapat dari kendaraan bermotor, dari data statistik kendaraan bermotor makin lama makin besar jumlahnya. Menurut Scholz kandungan gas buang kendaraan bermotor (motor bensin dan motor diesel) dapat dilihat seperti Tabel 1.

Tabel 7.1 Kandungan Gas Buang Hasil Pembakaran (Sumber: Scholz, 2007)

| | | Conventional gasoline engine | Diesel engine | Lean-burn gasoline engine |
|-----------------------|--------|-------------------------------------|----------------------|----------------------------------|
| O₂ | vol. % | 0,2-2 | 5-15 | 4-18 |
| CO₂ | vol. % | 10-13.5 | 2-12 | 2-12 |
| H₂O | vol. % | 10-12 | 2-10 | 2-12 |

| | | Conventional gasoline engine | Diesel engine | Lean-burn gasoline engine |
|-----------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------|---------------------------|
| N₂ | vol.% | 70-75 | 70-75 | 70-75 |
| CO | vol.% | 0.1-6 | 0.01-0.1 | 0.04-0.08 |
| HC | vol.% C ₁ | 0.5-6 | 0.005-0.05 | 0.002-0.015 |
| NO_x | vol.% | 0.04-0.4 | 0.003-0.06 | 0.01-0.05 |
| SO_x | Dependent on fuel S content | | | |

Oleh karena itu, komisi Eropa membuat aturan semua kendaraan yang melintas di kawasan Eropa terutama di Jerman tidak boleh melebihi euro IV, pada tahun 2014 akan menerapkan Euro VI, namun di negara kita sekarang masih berkuat Euro II aja belum tuntas, artinya masih banyak kendaraan yang menghasilkan emisi gas buang melebihi ketentuan dari Euro II.

Tabel 7.2 *European Emission Standards for light commercial vehicles* dⁿ1305kg, g/km

| Tier | Date | CO | THC | NMHC | NO _x | HC+NO _x | PM | P |
|--------------------------|----------------|-------|-------|-------|-----------------|--------------------|--------|---|
| Diesel | | | | | | | | |
| Euro 1 | October 1994 | 2.72 | - | - | - | 0.97 | 0.14 | - |
| Euro 2 | January 1998 | 1.0 | - | - | - | 0.7 | 0.08 | - |
| Euro 3 | January 2000 | 0.64 | - | - | 0.50 | 0.56 | 0.05 | - |
| Euro 4 | January 2005 | 0.50 | - | - | 0.25 | 0.30 | 0.025 | - |
| Euro 5 | September 2009 | 0.500 | - | - | 0.180 | 0.230 | 0.005 | - |
| Euro 6 (future) | September 2014 | 0.500 | - | - | 0.080 | 0.170 | 0.005 | - |
| Petrol (Gasoline) | | | | | | | | |
| Euro 1 | October 1994 | 2.72 | - | - | - | 0.97 | - | - |
| Euro 2 | January 1998 | 2.2 | - | - | - | 0.5 | - | - |
| Euro 3 | January 2000 | 2.3 | 0.20 | - | 0.15 | - | - | - |
| Euro 4 | January 2005 | 1.0 | 0.10 | - | 0.08 | - | - | - |
| Euro 5 | September 2009 | 1.000 | 0.100 | 0.068 | 0.060 | - | 0.005* | - |
| Euro 6 (future) | September 2014 | 1.000 | 0.100 | 0.068 | 0.060 | - | 0.005* | - |

Sumber: <http://gudangvirtual.blogspot.com/2012/03/standar-euro-untuk-emisi-gas-buang.html#axzz1tYSieX8h>, diakses 24 Mei 2012.

1.1 NO_x (Nitrogen Oksid)

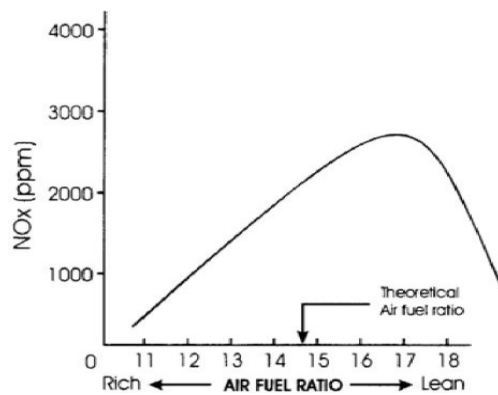
Meskipun dampak gas buang pada motor bensin masih ada misal HC (hidrokarbon), bila uap bensin dipanaskan pada temperatur tinggi, akan terjadi oksidasi. Akibatnya adalah pembakaran tidak sempurna bahkan ada bagian yang tidak terbakar. Bensin yang tidak terbakar ini keluar dan ruang bakar dalam bentuk HC. Menurut Suzuki (2005) HC ber-sumber dari

1. Bensin yang tidak terbakar akibat *overlap* katup
2. Gas sisa di dinding silinder dan terbuang saat langkah buang
3. Gas yang tidak terbakar yang tertinggal di belakang ruang bakar setelah *misfiring* ketika jalan menurun atau saat *engine brake*
4. Gas yang tidak terbakar akibat pembakaran terlalu singkat atau campuran terlalu kaya.

Nitrogen oksid terjadi karena reaksi molekul nitrogen dengan oksigen pada *temperature* yang tinggi (1800° C). dengan demikian NO_x terbentuk selama berlangsungnya pembakaran yang sempurna, karena pada pembakaran yang sempurna akan menghasilkan panas yang maksimal. Bila *temperature* tidak naik sampai di atas 1800°C, kemudian nitrogen dan oksigen dibuang ketika langkah buang tanpa bergabung membentuk NO (Suzuki, 2005).

Dengan demikian, faktor yang mempunyai efek terbesar terhadap timbulnya NO_x selama proses pembakaran adalah *temperature* maksimum di ruang bakar dari perbandingan udara dan

bensin. Jalan terbaik untuk mengurangi NOx adalah dengan mencegah *temperatur* di ruang bakar mencapai 1800° C atau memperpendek waktu dalam mencapai *temperatur* tinggi, kemungkinannya adalah menurunkan konsentrasi oksigen. Konsentrasi NOx paling besar dihasilkan pada perbandingan udara dan bensin 16:1. perbandingan di atas atau di bawah nilai tersebut akan menghasilkan NOx yang lebih rendah.



Konsentrasi NOx pada campuran kaya (<16:1) akan rendah karena konsentrasi oksigen rendah, sedangkan untuk campuran yang lebih kurus, pembakarannya lebih lambat sehingga menghambat kenaikan *temperatur* di ruang bakar sampai tingkat maksimumnya. Di samping perbandingan campuran udara dan bensin berpengaruh pada produksi NOx, saat pengapian juga sangat berpengaruh pada produksi NOx. Hal ini karena maju atau lambatnya saat pengapian yang memengaruhi temperatur maksimum yang dapat dicapai di dalam ruang bakar. Pada perbandingan udara dan bensin teoretis, konsentrasi NOx menjadi lebih besar karena *temperatur* pembakaran naik saat pengapian dipercepat.

1.2 Karbon Monoksida (CO)

Proses pembakaran kendaraan bermotor pada kenyataannya dapat mengakibatkan timbulnya polusi udara yang berupa gas racun CO akibat proses pembakaran motor yang tidak sempurna (*abnormal combustion*). Polusi udara ini dikeluarkan melalui saluran buang kendaraan bermotor yang secara langsung maupun tidak langsung dapat membahayakan manusia dan lingkungan hidup.

Timbulnya gas racun CO, menyebabkan penyakit saluran pernapasan pada manusia, justru banyak terjadi di kota-kota metropolitan sebagai pusat segala aktivitas umat manusia, akibat dari banyaknya kendaraan bermotor.

Akibat ketergantungan manusia terhadap sarana transportasi kendaraan bermotor ternyata telah menjadi penyumbang terbesar penyebab polusi udara kota. Inti dari timbulnya pencemaran udara di kota-kota yang berlalu lintas padat adalah produk *emisi gas buang* dari proses pembakaran yang tidak sempurna dari kendaraan bermotor.

Pembakaran mesin kendaraan bermotor yang tidak sempurna juga akan menghasilkan emisi gas *karbonmonoksida* (CO). Gas karbonmonoksida ini lebih berbahaya lagi, tidak berbau dan tidak berwarna dan bisa mematikan manusia bila dihirup terlalu lama dalam ruangan tertutup (Suyanto, 1989).

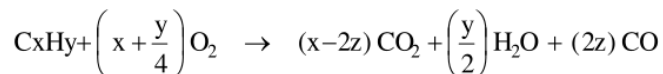
Persenyawaan CO dan hemoglobin akan membentuk kaboksihemoglobin (COHb) yang dapat membuat penurunan sel darah yang tak mampu mengangkut O₂ yang mengakibatkan terjadinya *anoxia* pada jaringan. Jika di dalam aliran darah manusia mengandung kadar karboksihemoglobin (COHb) sebesar 40–50%, maka akan mengalami gejala klinis seperti pusing, mual, irritabilitas, frekuensi pernapasan naik, sakit dada, bingung, *impaired judgment*, *cyanosis* dan pucat (Depkes, 1996).

Untuk mengurangi hal tersebut banyak cara yang digunakan misal di dalam kendaraan dibuat *FUEI CUT OFF* (sistem perlambatan)

Menurut Marji (2006) besarnya kadar emisi CO sebelum dan sesudah menggunakan alat tersebut dapat dilihat dalam Tabel 2. *Mean* tanpa menggunakan alat pemutus perlambatan sebesar 4,6150%, nilai paling tinggi 5,50% dan paling rendah 4,00%, setelah menggunakan alat pemutus perlambatan nilai paling tinggi 2,20% dan paling rendah 1,35%.

Hasil penelitian Marji (2006) menunjukkan bahwa ada pengaruh dengan digunakannya alat pemutus sistem perlambatan otomatis terhadap kadar emisi gas buang CO. Hal ini sesuai sebagaimana dijelaskan pada kajian teori mengenai cara kerja alat pemutus sistem perlambatan otomatis terhadap kerja motor. Diperkuat oleh rerata menunjukkan mean CO sesudah menggunakan alat lebih kecil dari CO ketika tidak menggunakan alat ($1,8830 < 4,6150$).

Proses pembakaran kendaraan bermotor pada kenyataannya dapat mengakibatkan polusi udara akibat proses pembakaran motor yang tidak sempurna (*abnormal combustion*). Menurut De Nevers (1995) persamaan reaksi untuk pembakaran yang menghasilkan CO adalah



Pembakaran yang tidak sempurna akan menghasilkan nilai z sebesar $z = 0,1 (x + y/4)$, maka untuk bahan bakar bensin (C_8H_{18}) = $0,1 (8 + 18/4) = 1,25$. Mol oksigen dari udara sebesar $(N_2/O_2) = 0,79/0,21 = 3,76$ mol; sehingga total mol produk pembakarannya.

$$n_{totalout} = 3,76 \left(x + \frac{y}{4} - z\right) + (x - 2z) + \frac{y}{2} + (2z)$$

Fraksi mol CO (y_{CO})

$$\begin{aligned} & \frac{2z}{3,76 \left[x + \left(\frac{y}{4}\right) - z\right] + x + \left(\frac{y}{2}\right)} \\ &= \frac{2 \cdot 1,25}{3,76 \left[8 + \left(\frac{18}{4}\right) - (1,25)\right] + 8 + \left(\frac{18}{2}\right)} = 0,042 \\ &= 4,2\% \end{aligned}$$

Angka 4,2 % adalah kadar rata-rata yang dihasilkan oleh proses pembakaran yang tidak sempurna motor dengan bahan bakar bensin. Pernyataan ini juga didukung oleh pendapat Arends & Berenschot (1997), hasil temuannya bahwa kadar emisi gas buang CO terbesar persentasenya terjadi pada saat putaran menengah, pada saat secara umum putaran berkisar 3000 rpm. Menurut Arends & Berenschot (1997) terjadi pada saat kendaraan mengalami perlambatan.

Hal ini disebabkan kevakuman di bawah katup gas lebih tinggi dari pada saat putaran *idle*/stasioner sehingga di sini banyak sekali jumlah karbonmonoksida yang tidak terbakar. Kadar emisi CO jika motor masih dalam keadaan masih baik atau ideal ($l = 1$), gerakan campuran bahan bakar *stream line* tidak terjadi turbulensi. Akan tetapi kenyataannya, motor Toyota 4K yang digunakan sebagai objek penelitian ini kondisinya sudah jauh berkurang dan mungkin disebabkan oleh umur pemakaian motor tersebut disertai dengan perlakuan menutupnya katup gas yang mendadak, sehingga mengakibatkan kevakuman dan gerakan campuran bahan bakar cenderung turbulensi, tidak homogen, sisa bensin pada saluran *idle* setelah katup solenoid cenderung membuat campuran kaya, sehingga pembakaran tidak sempurna artinya > 1 sehingga kadar CO menjadi lebih tinggi. Hal ini sesuai dengan penegasan Gambar 2 semakin kaya campuran bahan bakar maka semakin tinggi kadar CO yang dihasilkan (Geschler, 1988).

Oleh karena itu, penggunaan alat pemutus sistem perlambatan otomatis sangat bermanfaat pada saat putaran motor menengah. Alat ini dapat menurunkan kandungan CO di dalam gas buang, seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 2 mean CO sesudah menggunakan alat lebih kecil dari CO ketika

tidak menggunakan alat (1,8830 % < 4,6150%). Ditambahkan lagi oleh Suess dan Crawford (1976) bahwa kadar CO selain tergantung pada perbandingan campuran udara -bahan bakar juga dipengaruhi oleh saat pengapian. Saat pengapian *idle*, saat pengapian putaran menengah tergantung dari *advance* vakum dan *advance* sentrifugal (tergantung beban motor) atau posisi katup gas. Dengan penggunaan alat pemutus sistem perlambatan ini tidak berpengaruh pada kestabilan saat pengapian sehingga saat pengapian yang telah disetel $\pm 8^\circ$ sebelum TMA tidak akan berubah sebelum motor di *tune-up* kembali, pada saat *idle*, namun pada putaran menengah sudah dipengaruhi oleh *advance* vakum (selang penghubung dan *mimbran*) dan sentrifugal tergantung putaran dan kekuatan pegas. Dengan demikian, secara berkala kendaraan bermotor perlu di *tune-up*, agar kondisi *advance* vakum dan sentrifugal bekerja normal sehingga fungsi saat pengapian tepat dan menghasilkan CO yang minimal.

Jika kendaraan menggunakan alat pemutus perlambatan kadar CO yang dihasilkan dapat ditekan serendah mungkin maka komulasi CO di jalan yang ada *traffic light* atau perempatan jalan atau di *halte* menjadi rendah, sehingga pengguna jalan tidak akan mengalami gejala klinis seperti pusing, mual, iritabilitas, frekuensi pernapasan naik, sakit dada, bingung, *impaired judgment*, *cyanosis* dan pucat.

Polutan CO sangat berbahaya bagi kesehatan manusia khususnya, dan daya racun CO adalah menurunkan kemampuan sel darah dalam mengangkut oksigen. Setelah masuk dalam tubuh melalui paru, CO akan terikat dengan *hemoglobin* (COHb) sehingga tidak dapat mengikat oksigen (Depkes, 1996). Bahkan daya ikat *hemoglobin* dengan gas CO lebih besar dari pada daya ikat dengan oksigen. Pada saat keseimbangan maka ratio karboksi *hemoglobin* dalam darah mencapai 210 kali lebih kuat daripada dengan oksigen (Depkes, 1996). Begitu berbahayanya polutan CO, maka penggunaan alat pemutus sistem perlambatan otomatis sangat diperlukan terutama pada angkutan kota seperti mikrolet, untuk menurunkan produksi gas racun CO. Angkutan kota merupakan kendaraan umum yang menggunakan karburator berbahan bakar bensin, yang jumlahnya paling banyak, sehingga merupakan kontributor terbesar dalam menyumbangkan polutan CO. Alat pemutus sistem perlambatan otomatis merupakan alat yang sangat praktis dapat untuk menurunkan produksi CO serta dengan merekayasa kedudukan saklar pada pedal gas dapat digunakan pada angkutan kota seperti mikrolet.

Dari hasil pengukuran CO di lingkungan kerja Laboratorium IKIP Malang, data dikelompokkan sesuai dengan kelompoknya yaitu sebelum/setelah dimodifikasi kemudian di uji dan analisis dengan statistik deskripsi hasilnya seperti pada *tabel* 10 dan 11.

Sebelum saluran gas buang dimodifikasi (standar) rerata 1,895 ppm dengan standar deviasi 0,403 (sebelum mulai kerja) dan 6,585 ppm dengan standar deviasi 0,587 (setelah selesai kerja) berarti keluhan sakit pada saat praktikum disebabkan bukan kadar CO melainkan adanya gas beracun lain seperti aldehida atau amoniak (Bosch, 1976).

Berdasarkan Surat Edaran Menteri Tenaga Kerja No. SE – 01/MEN/1997 tentang NAB Faktor Kimia Lingkungan Kerja, NAB Karbon Monoksida adalah 25 ppm (Depnaker, 1997). Jadi kadar CO pada saluran gas buang standar tersebut masih di bawah nilai ambang batas, penyebabnya adalah adanya pengaruh ventilasi seperti terbukanya semua kaca nako dan gerakan angin saat pengambilan data. Hal ini dipertegas oleh ACGIH (1982) yang menuliskan pergantian udara tidak tergantung dari ukuran ruangan melainkan masalah ventilasi.

Menurut Suess dan Caxford (1979) dalam rumusnya menyebutkan konsentrasi CO dalam ruangan sangat tergantung dari nilai pergantian udara, keseimbangan akan lebih tercapai jika nilai pergantian udara besar. Selanjutnya setelah saluran gas buang dimodifikasi, dihasilkan pengukuran rerata 1,425 ppm dengan standar deviasi 0,035 (sebelum mulai bekerja) dan 3,710 ppm dengan standar deviasi 0,226 (setelah bekerja).

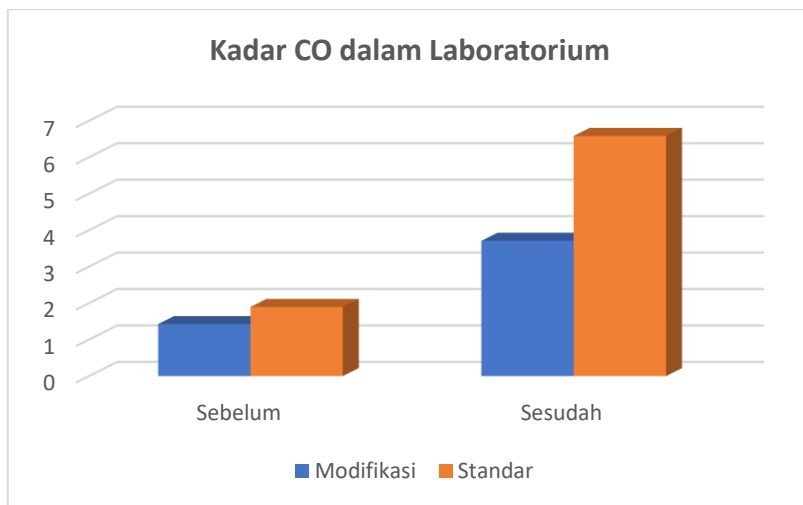
Dari data tersebut, ternyata masih ada kenaikan kadar CO yang disebabkan oleh kurangnya komponen pada *engine stand* seperti: tidak adanya sistem sirkulasi ventilasi karter yang baik, sehingga gas sisa lewat karter dapat keluar dengan mudah bersama dengan uap oli melalui tutup silinder. Hal ini sesuai dengan penjelasan WPU (1998) yang menuliskan bahwa sisa gas buang hasil pembakaran selain dibuang lewat saluran gas buang akan masuk melalui celah cincin torak masuk

ke dalam ruang karter oleh sebab itu ruang karter harus diberi ventilasi. Selanjutnya menurut *staudt* (1988) tekanan pembakaran yang tinggi 60 bar, ada sebagian kecil gas yang menerobos lewat celah cincin torak menuju ke ruang karter.

Namun masih adanya penurunan rata-rata kadar CO dalam ruang praktikum jika dibandingkan dengan sebelum saluran dimodifikasi, penyebabnya CO yang dihasilkan *engine stand* keluar lewat ventilasi karter jauh lebih rendah. Jika sebelum saluran dimodifikasi CO yang masuk ruangan melalui ventilasi karter dan lewat saluran gas buang, sedang setelah saluran gas buang dimodifikasi CO yang masuk ruangan hanya yang lewat ventilasi karter.

Jika digambar dengan diagram batang didapat hasil rata-rata sebelum dan sesudah bekerja baik pada saluran standar maupun modifikasi hasilnya dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Rata rata sebelum dan setelah kerja dengan saluran standar diperoleh kenaikan dari 1,895 ppm menjadi 6,585 ppm
- Rata rata sebelum dan setelah kerja dengan saluran modifikasi diperoleh kenaikan dari 1,425 ppm menjadi 3,710 ppm.



Gambar 1. Grafik Perbandingan Mean Kadar CO Sebelum dan Sesudah Kerja pada Saluran Standard an Modifikasi

- Rata-rata sebelum kerja dengan saluran standar dan modifikasi diperoleh penurunan dari 1,895 ppm menjadi 1,425 ppm.
- Rata rata setelah kerja dengan saluran standar dan modifikasi diperoleh penurunan dari 6,585 ppm menjadi 3,710 ppm.

Para hadirin yang saya muliakan,

1.3 Kadar COHb dalam Darah

Menurut Marji (1999) hasil analisis kadar COHb sebelum dan sesudah bekerja pada saat saluran belum dimodifikasi menerima hipotesis "Ada perbedaan kadar COHb dalam darah mahasiswa sebelum dan setelah praktikum sebelum saluran dimodifikasi ($p < 0,05$). Hal ini berarti adanya kenaikan yang signifikan dengan kadar COHb dalam darah mahasiswa yang sedang praktikum dari sebelum kerja dan setelah kerja. Kenaikan tersebut jelas dipengaruhi oleh adanya akumulasi gas CO sisa hasil pembakaran *engine stand* di dalam ruang kerja atau laboratorium. Hal ini juga ditegaskan oleh Peterson dan Stewart (dalam WHO, 1979) secara empiris kadar karboksihemoglobin merupakan fungsi konsentrasi karbon monoksida dengan waktu paparan. Jadi dalam waktu 3 jam terjadi kenaikan terjadi kenaikan konsentrasi CO akan mengakibatkan kenaikan COHb dalam darah para pekerja tersebut.

Kemudian setelah saluran gas buang dimodifikasi hasil analisis kadar COHb sebelum dan sesudah bekerja pada saat saluran belum dimodifikasi tidak ada perbedaan yang signifikan kadar

COHb dalam darah mahasiswa sebelum dan setelah praktikum. Dengan demikian, dapat ditarik suatu kesimpulan bahwa modifikasi saluran gas buang dapat mendukung menurunkan kadar COHb dalam darah para mahasiswa.

Bahkan dari analisis, menurut Marji (1999) memperkuat dengan uji t yang menjelaskan ada perbedaan yang bermakna kadar COHb sebelum dan setelah saluran gas buang dimodifikasi ($p < 0,05$), dan nilai rata-ratanya pada saluran gas buang standar 1,5720 dan setelah saluran dimodifikasi menjadi 0,5180 berarti ada penurunan. Hal ini disebabkan adanya nilai rerata CO saluran gas buang modifikasi lebih rendah nilai rerata saluran gas buang standar selama mesin bekerja 3 jam. Menurut *forbe et.al.* (dalam WHO, 1979) ada hubungan linier seperti rumus $COHb = k \times CO \times t$ maka jika kadar CO dalam ruang kerja turun pada konstanta dan waktu paparan yang sama maka kadar COHb akan turun juga. Penurunan kadar CO dalam ruang disebabkan oleh semua gas buang yang lewat saluran gas buang yang dimodifikasi keluar ruangan dan berdilusi dengan udara luar.

Paparan CO yang terus menerus memicu terjadinya oksidatif stress. Oksidatif stress merupakan kata lain dari kerusakan oksidatif yang mengakibatkan rusaknya membran mitokondria yang bertanggung jawab atas peningkatan peroksida lipid. Hal ini akan menyebabkan disfungsi mitokondria. Menurut Miro dalam penelitiannya menjelaskan, pemaparan CO menyebabkan kerusakan oksidatif sehingga oksidatif membran merusak mitokondria reaktif. Oksidasi sitosom mitokondria (CO_x) berpengaruh aktivitas limposit akibatnya peroksida lipid meningkat. Kerusakan oksidatif pada membran limposit meningkat disebabkan oleh penghambatan mitokondria (Miro et al., 1999).

Ini juga diperkuat hasil penelitian Miro tahun 1998 yang menjelaskan bahwa hasil studi aktivitas enzim mitokondria dalam limposit dari 3 pasien yang keracunan CO akut diperoleh HbCO 11,6%, 19,6% dan 22,3% dalam fase akut, 2,3%, 2,4% dan 1,5% dalam 3 hari dan 1,2%, 3,3% dan 1,1% dalam 12 hari. Hasilnya oksidasi sitosom mitokondria merupakan target dari keracunan CO akut (Miro et al., 1998).

Mitokondria sebagai produsen ATP, jika terjadi paparan CO maka akan mengakibatkan produksi ATP (*Adenin Tri Phosfat*). Penurunan ATP mengakibatkan pasokan energi sel berkurang. Jika ini terus menerus berlangsung maka dapat memediasi timbulnya reseptor sel B yang dapat membunuh sel itu sendiri (*Apoptosis*). Katz dalam penelitian yang berjudul *B cell receptor-stimulated mitochondrial phospholipase A 2 activation and result disruption of mitochondrial membrane potential correlate with the induction of apoptosis in WEHI 231 B cell* menjelaskan bahwa munculnya sel B pada reseptor yang memediasi apoptosis sangat korelasi dengan penurunan fungsi mitokondria dan depleksinya ATP (Katz et al., 2001).

Fungsi ATP yang berasal dari ADP sangat tergantung dari membran pembawa yang merupakan protein yang berada pada mitokondria. Di sini dapat dikatakan bahwa mitokondria bertanggung jawab terhadap stagnasi fungsi ATP. Berikut ini penelitian dari Ryan dengan judul *Function staging of ADP/ATP carrier translocation across the outer mitochondrial membrane*, menyimpulkan fungsi stagnasi ATP/ADP sangat tergantung dalam membran pembawa protein pada mitokondria (Ryan et al., 1999).

Penurunan ATP memicu terjadinya peningkatan glikolisis, yang bekerja lebih keras lagi. Glikolisis itu sendiri dimaksudkan suatu proses untuk mengubah glukosa menjadi glukogen sebagai energi yang digunakan untuk tranfor Ca^{2+} . Hal ini sesuai dengan penjelasan Kahlert yang menyatakan glikolisis sangat penting sebagai sumber ATP, ATP lokal sangat diperlukan untuk memompa Ca^{2+} (Kahlert dan Reiser, 2000).

Kerja keras yang tinggi glikolisis tidak ada artinya jika sumber glukosa yang diproses bocor, yaitu energi yang diperoleh tetap saja rendah (glukogen rendah) yang tidak mampu untuk menghidup dari sel itu sendiri dapat memicu naiknya asam laktat dan menyebabkan kematian sel (Nekrosis). Hal sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Single dengan judul *Differential Effects of Bcl 2 on Cell Death Triggered under ATP Depleting Condition EXP Cell*, menjelaskan bahwa level ATP dimodulasi oleh penggunaan inhibitor mitokondria seperti s-nitroglutination sebagai media tambahan glukosa. Kebocoran glukosa akan menurunkan ATP yang memicu naiknya *staurosporin* (STS). STS > 90% akan terjadi nekrosis (Single et al., 2001).

Kemunduran atau kematian sel dapat mengganggu fungsi kerja jaringan yang dibentuknya, misalnya jantung, paru, otak dan lain lain. Oleh karena itu perusahaan/bengkel, pemerintah harus memperhatikan keselamatan dan kesehatan kerja dalam hal ini adalah ventilasi ruangan kerja, saluran gas buang sehingga para teknisi bekerja dengan udara yang segar, tidak terlalu banyak menghirup gas racun CO.

2. Penutup

Keselamatan dan Kesehatan di bidang otomotif merupakan bagian dari K3 secara umum, yang isinya sangat luas mencakup: upaya perlindungan dari kecelakaan, upaya penyerasian antara kapasitas kerja, beban kerja dan lingkungan kerja agar setiap pekerja dapat bekerja secara sehat di bidang otomotif. Kecelakaan Lalu lintas, kecelakaan di bengkel, polutan berupa gas racun NOx, HC, CO, Pb, Sulfur dan bising (ancaman ketulian) ini akan selalu menghantui para pekerjanya terutama mekanik, sopir, masinis, dan nahkoda yang bekerja di bidang otomotif.

K3 di bidang otomotif diperlukan teknolog yang andal untuk mendesain kendaraan canggih agar aman dan nyaman, serta para ahli kesehatan dan Dokter yang dapat mengatasi dampak kesehatan dan penyakit yang ditimbulkan dari perkembangannya dan operasional kendaraan serta ahli psikologi yang mampu mengendalikan perilaku pekerja, karena 85% perilaku merupakan penyumbang kecelakaan.

DAFTAR RUJUKAN

- Arends, BPM. & Berenschot, H. 1997. *Motor Bensin*, alih bahasa oleh Umar Sukrisno. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Bosch. 1976. *Kraftfahr Technisches Taschenbuch*. Duesseldorf: VDI-Verlag.
- Edukasia. 2012. *Sejarah Otomobil*. Jakarta: PT Berita Nusantara, Email: redaksi@koran-jakarta.com, diakses 30 April 12.
- Darwis. 2008. *Kecelakaan lalu-lintas*, www.darwis97.wordpress.com diakses 19 April 2009.
- De Nevers, N. 1995. *Air Pollution Control Engineering*. Singapore: McGraw-Hill chemical Engineering Series, Inc.
- Depkes RI. 1996. *Bahan-Bahan Berbahaya dan Dampaknya Terhadap Kesehatan Manusia*. Sub-Proyek Dampak Kesehatan Lingkungan, Proyek Kesehatan Lingkungan Bantuan UNDP INS/91/019.
- Depnaker. 1997. *Nilai Ambang Batas Faktor Kimia di Udara Lingkungan Kerja*. Jakarta: Proyek Pengembangan Hygiene dan Kesehatan Kerja.
- Geschler, H. 1988. *Fachkunde Kraft-fahrzeugtechnik*. Stuttgart: Verlag Europe.
- _____. 2009. *Kematian di Jalan Raya*, www.klik.dokter.Com diakses 20 April 2009.
- _____. 2009. *Kecelakaan Lalu Lintas*, www.g2glive.com: diakses: 19 April 2009.
- _____. 2012. *European Emission Standards*, http://gudangvirtual.blogspot.com /2012/03/standar-euro-untuk-emisi-gas-buang.html #axzz1tYSieX8h, diakses 24 Mei 2012.
- Katz, E. et al. 2001. B Cell Receptor-Stimulated Mitochondrial Phospholipase A 2 Activation and Result Disruption of Mitochondrial Membrane Potential Correlate with the Induction of Apoptosis in WEHI 231 B cell. Glasgow: D I. P137–47.
- Kahlert, S. and Reiser, G. 2000. Requirement of Glycolytic and Mitochondrial Energy Supply for Loading of Ca²⁺ Stores and insP3 Mediated Ca²⁺ signaling in Rat Hippocampus Astrocytes. J. Neurosci. Magdeburg: UM-IN. P 409-20.
- ILO. 1990. *Keselamatan dan Kesehatan Kerja di Indonesia*. Manila: ILO.
- Marji. 2006. *Sistem Perlambatan untuk Mereduksi Gas Buang CO pada Kendaraan Bermotor Bensin*. J. Teknologi dan Kejuruan Malang: Fakultas Teknik Vol 29 No 2 P 165 -173.
- Marji. 1999. *Penggunaan Saluran Gas Buang untuk Mereduksi Karbon Monoksida dan Menurunkan Karbosi Hemoglobin di Laboratorium Otomotif*, Thesis. Surabaya: Unair.
- Miro, O. et. al. 1998. *Mitochondrial Cytochrome C Oxidase Inhibition During Acute Monoxide Poisoning*. Pharmacol Toxicol. Barcelona: DIMHC. P219-23.
- Miro, O. et. al. 1999. *Oxidative Damage on Lymphocyte Membranes is Increased in Patients Suffering from Acute Carbon Monoxide Poisoning* Toxicol Lett. Barcelona: DIMHC. P219–23.
- Muharsanto Peni, 2008. *Gambaran Hasil Pemeriksaan Luar Jenazah pada Korban Kecelakaan Lalu Lintas di RSUD Arifin Achmad Pekanbaru*, Periode 1 Januari 2005–31 Desember 2007. Pekanbaru: PT Asuransi Jiwa Jasa Raharja.
- Ryan, M.T., et. al. 1999. *Function Staging of ADP ATP Carrier Translocation Across the Outer Mitochondrial Membrane*. J Biol Chem. Freiburg: IBM UF. P20619–27
- Saini AK. 1998. *Analisis Kecelakaan Lalu Lintas di Provinsi Riau (Kasus Ruas Jalan Rimbo Panjang - Bangkinang)*. Diakses pada tanggal 2 Juni 2008 dari: http://msstt.ugm.ac.id/abstrak/abs_1.htm.
- Single, B. et al. 2001. *Differential Effects of Bcl 2 on Cell Death Triggered under ATP Depleting Condition*. EXP Cell. Kontanz: F B UK. P8–16.
- Silalahi. Bennett. NB dan Silalahi B. Rumondang. 1995. *Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja*. Jakarta: PT Pustaka Binaman Pressindo.
- Staudt, Wilfried. 1988. *Karttfahrzeug Technik*. Technologi fuer Auto-mobil und Kraftfahrzeug-mekaniker. Braunschweig: Vieweg & Sohn.

- Suess, MJ dan Craxford, SR. 1976. *Manual of Urban Air Quality Management*. Geneva: World Health Organization.
- Sulakmono. 1988. *Penyakit Akibat Kerja*, Diktat. Surabaya: FKM.
- Suyanto, W. 1989. *Teori Motor Bensin*. Jakarta: Departemen Pendidikan dan Kebudayaan Dirjen Dikti PPLPTK.
- Schholz, Louise Maria Ctharina. 2007. *NOx Storage and Reduction over Alean-Burn Automotive Catalyst*. Eindhoven: Eindhoven University.
- Suzuki. 2005. *APV 415 GC*. Jakarta: Suzuki Training Center.
- Suzuki. 2008. *Grand Vitara Jb 2,4*. Jakarta: Suzuki Training Center.
- Toyota. 2003. *EMS Electrically Modulated Suspension*. Jakarta: PT. Toyota Astra Motor.
- Toyota. 2006. *Lingkungan, Kesehatan, dan Keselamatan Kerja*. Jakarta: PT Toyota Astra Motor.
- Toyota. 1983. *General Servis Fuel System*. Japan: Toyota Motor Cooperation.
- WHO. 1979. *Carbon Moxide, Environmental Health Criteria 13*. Gene-va: World Health Organization.
- WHO. 2007. *Kematian Utama Manusia Berumur 10–24 Tahun*. www.g2glive.com diakses 19 April 2009.
- Wikimedia. 2012. *Mobil*. @ google.id.com. [http://wikipedia.org/wiki/ mobil](http://wikipedia.org/wiki/mobil) diakses 22 Mei 2012.
- WPU Malang. 1998. *Hand Out DS I Dasar Motor*. Malang: WPU/ SMEP Swisscontact Malang.

***Fatigue Failure* Merupakan Penyebab Utama Kegagalan Material pada Konstruksi**

Prof. Dr. Andoko, S.T., M.T.

Bismillahirrahmanirrahiim

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Ysh. Ketua Senat Universitas Negeri Malang

Ysh. Rektor Universitas Negeri Malang

Ysh. Ketua Komisi Guru Besar Universitas Negeri Malang

Ysh. Anggota Senat Universitas Negeri Malang

Ysh. Pimpinan Universitas, Lembaga, Fakultas, Pascasarjana, Jurusan, dan Program Studi di lingkungan Universitas Negeri Malang

Ysh. Dosen, Tendik, Mahasiswa, dan para undangan serta hadirin yang Saya muliakan

Pada hari yang berbahagia ini, **Kamis 19 Nopember 2020** perkenankan Saya mengajak para hadirin sekalian untuk memanjatkan puja dan puji syukur ke hadirat Allah SWT karena atas karunia dan rahmatNya semata kita dapat hadir dalam pengukuhan Saya sebagai Guru Besar pada Fakultas Teknik Universitas Negeri Malang dalam keadaan sehat walafiat. Shalawat dan salam mari kita haturkan kepada junjungan kita Nabiullah Muhammad SAW.

Hadirin yang berbahagia,

Pada kesempatan ini, izinkan Saya menyampaikan sebagian dari materi bidang ilmu mekanika kekuatan material yang Saya tekuni sejak Saya lulus S1 tahun akademik 1988/1989, menjadi dosen di Jurusan Teknik Mesin tahun 1991, selang waktu 5 tahun setelah menjadi dosen (tahun 1996), melalui beasiswa URGE Saya mendapatkan kesempatan magang selama 8 bulan di Jurusan Teknik Mesin ITB bidang konstruksi dan perancangan, kemudian tahun 1997 Saya menyelesaikan S1 kedua, sekaligus melanjutkan pendidikan Magister Pascasarjana Teknik Mesin di UGM bidang mekanika bahan khususnya analisis *fatigue* hasil *chemical milling* dan *shot peen-ing* pada aluminium paduan 2023-T3 dan 2524-T3, dan terakhir pendidikan Doktor Pascasarjana Teknik Mesin UB tahun 2011-2014, dengan- konsentrasi kekuatan dan *fatigue* material *Ferro Casting Ductile* (FCD) hasil perlakuan panas *Two Step Austempering*. Oleh karena itu, pada kesempatan ini, Saya akan menyampaikan pidato pengukuhan guru besar Saya dengan topik ***Fatigue Failure Merupakan Penyebab Utama Kegagalan Material pada Konstruksi.***

Fatigue (kelelahan) secara natural sebenarnya biasa terjadi pada material dalam sebuah konstruksi maupun terjadi pada manusia. Manusia dengan segala aktivitas kehidupannya tentu tidak terlepas dari beban yang dialami, baik pembebanan rutin pekerjaan yang bersifat monoton dan konstan, maupun beban pekerjaan yang naik turun yang lazim disebut dengan beban berfluktuasi. Berdasarkan beban yang dialami itulah, manusia mampu atau tidak mampu bertahan, baik secara fisik (fisilogis) maupun mental (psikologis). Ketidakkampuan bertahan secara fisiologis dan psikologis, tentu dapat menimbulkan beberapa gejala, misalnya: kelelahan dan sakit kepala, *microsleep* atau ketiduran singkat dalam beberapa detik, penurunan tingkat memori atau cenderung mudah lupa, sulit berkonsentrasi, tidak ada gairah untuk bekerja, tidak ada motivasi, kecemasan berlebih atau sering gelisah, merasakan jenuh atau bosan, tidak dapat mengontrol emosi dan sikap, dan kelelahan fisik (nyeri bahu dan punggung, nafas berat, masalah pencernaan, tremor pada anggota badan dan merasa lelah seluruh badan). Dampak yang ditimbulkan oleh seseorang yang mengalami kelelahan antara lain menurunnya semangat kerja secara fisik (*loyo*), menurunnya motivasi (kurang gairah), dan pada gilirannya terjadi penurunan produktivitas kerja. Senada dengan pembebanan yang dialami oleh manusia, materialpun akan mengalami hal yang sama. Material

dalam operasionalnya tidak terlepas juga dari beban yang diterima, baik beban statis atau dinamis yang konstan maupun yang berfluktuatif, dengan demikian material akan mengalami *fatigue* sampai pada batas waktu terjadinya kerusakan, bahkan akibat beban berfluktuasi yang dialami material dapat mengakibatkan kegagalan atau kerusakan tanpa memberikan tanda awal terlebih dahulu (*catastrophic*) [1], [2], bahkan tidak sedikit kegagalan material terjadi pada kekuatan yang jauh di bawah *yield strength* [3].

Fatigue didefinisikan sebagai proses perubahan struktur permanen *progressive localized* pada kondisi yang menghasilkan fluktuasi *strain* dan *stress* pada satu atau beberapa titik yang dapat memuncak menjadi *retak* (*crack*) atau patah (*fracture*) secara keseluruhan sesudah fluktuasi tertentu [4]. *Pro-gressive* memiliki pengertian bahwa proses *fatigue* yang terjadi dalam kurun waktu tertentu selama operasional, sedangkan *localized* bermakna proses *fatigue* beroperasi pada luasan lokal yang mempunyai *stress* dan *strain* yang tinggi karena pengaruh beban, perubahan geometri, perbedaan temperatur, *residual stress* (tegangan sisa), dan faktor lingkungan [5]

Kriteria desain *fatigue*

Menurut ASTM E 1150-87 [6], ada tiga pendekatan desain yang dikenal dengan filosofi desain. Ketiga filosofi desain masing-masing dilakukan dengan metode atau pendekatan berbeda. Berikut ketiga filosofi desain yang dimaksud:

Tabel 1. Filosofi Desain [6]

| <i>Design philosophy</i> | <i>Design methodology</i> | <i>Principal testing data description</i> |
|---------------------------------|---------------------------|---|
| <i>Safe-life, infinite-life</i> | <i>Stress-life</i> | S-N |
| <i>Safe-life, finite-life</i> | <i>Strain-life</i> | ϵ -N |
| <i>Damage tolerant</i> | <i>Fracture mechanics</i> | da/dN - Δ K |

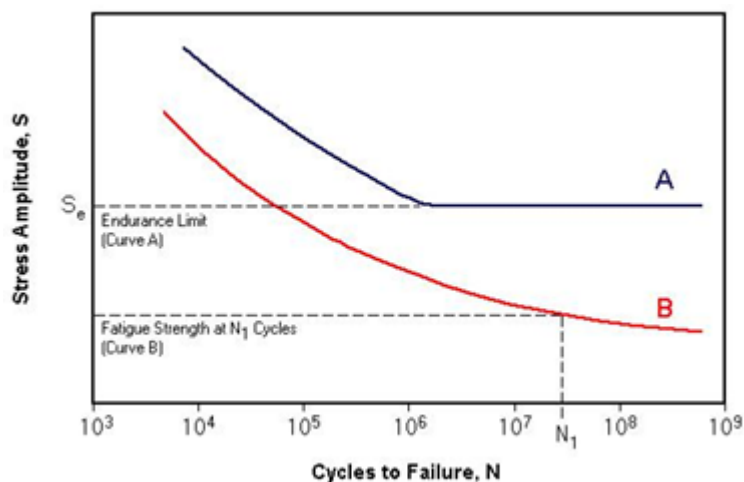
Sementara itu Fuch dan Stephens [7] membagi desain *fatigue* menjadi empat kriteria, yaitu *infinite-life*, *Safe-life*, *fail-safe*, dan *Damage tolerant*, pada referensi lain ada yang membagi menjadi tiga bagian yaitu *Safe-life*, *Fail safe*, dan *damage tolerant*, namun demikian pada prinsipnya ketiga filosofi desain dan empat kriteria desain di atas memiliki tujuan yang sama, yaitu untuk memprediksi berapa umur *fatigue* (*fatigue life*) material tersebut dapat beroperasi sesuai beban yang dialami baik beban statis maupun dinamis. Ketiga metode dan pendekatan di atas memiliki tujuan yang sama, yaitu memprediksi berapa *fatigue life* dari material yang diuji. Berikut dijabarkan secara teoritis tiga model pendekatan desain yang dimaksud

Desain *Stress-Life* (S-N)

Filosofi desain *safe-life, infinite life* adalah pendekatan desain *fatigue* yang paling tua, fenomena kegagalan *fatigue* pertama kali terjadi **Tahun 1800** pada poros *railroad-car* yang mengalami kegagalan setelah beroperasi dalam selang waktu tertentu. **Tahun 1843**, Rankin menerbitkan paper *On the Causes of Unexpected Breakage of Journals of Railway Axle* yang menyebutkan bahwa material mengalami *crystallized* dan material menjadi getas akibat *stress* yang berfluktuasi [8].

Beban dinamik menjadi suatu fenomena baru pada saat diperkenalkannya mesin uap (*steam power machinery*), dimana poros pada mesin tersebut disambung menyatu dengan roda, sehingga berputar bersama-sama roda. Pada kasus ini *stress* lentur pada beberapa titik di permukaan poros bervariasi dari negatif ke positif dan selalu berulang-ulang mengikuti *cycle* tertentu. **Tahun 1870**, August Wohler mempublikasikan penemuan hasil penelitiannya selama lebih dari 12 tahun tentang kegagalan *fatigue*. Penelitian Wohler berupa investigasi kegagalan poros yang menerima beban *fully reserved* [9] *as well as the procedure in failure analysis (materials used, design stress, service conditions, simulation, examination of results*. Hasil penemuannya berisi identifikasi jumlah *cycle* terhadap variasi *stress* dan menemukan adanya *en-durance limits* (level *stress* yang masih dapat ditoleransi per sejuta *cycle fully reversed stress*) pada baja. Hal tersebut dapat diamati pada diagram Wohler yang lebih dikenal sebagai diagram S-N [10].

Stress life merupakan metode desain yang sering digunakan untuk *High Cycle Fatigue* (HCF) yang diperkirakan akan bertahan sampai lebih dari 103 *cycle stress* [9] *as well as the procedure in failure analysis (materials used, design stress, service conditions, simulation, examination of results.* Pendekatan *Stress life* sangat baik digunakan untuk amplitudo beban yang konsisten dan dapat diprediksi. Pendekatan *Stress life* merupakan model yang berdasarkan *stress (stress-based model)* [11] *these requirements have de-veloped since the 1950s. Composite materials (notably carbon fibre rein-forced plastics.* Model ini digunakan untuk mencari dan menentukan *fa-tigue srength* maupun *endurance limit* suatu material, sehingga *cycle stress* dapat dijaga di bawah *fatigue strength level* maupun *endurance limits* tersebut yang mana dalam hal ini bertujuan untuk mencegah terjadinya kegagalan un-tuk jumlah *cycle* tertentu [12]. Komponen mesin dirancang berdasarkan kekuatan *fatigue* material (*endurance limit*) dengan *safety factor* tertentu [13]. Tujuan dari desain ini adalah menjaga *stress* dan *strain* yang terjadi pada komponen tetap pada daerah *elastic* sehingga tidak terjadi *local yielding* se-hingga *crack initiation stage* tidak akan terjadi [14]. Pendekatan ini sangat mudah untuk diaplikasikan dan sejumlah besar data material yang relevan tersedia karena metode ini sudah digunakan dalam jangka waktu yang lama [15]. Pendekatan *stress-life* memberikan rancangan komponen yang memiliki *life* tak terbatas (*infinite life*). Data hasil eksperimen untuk tiap *specimen* diplot dalam grafik *stress (S)* vs jumlah *cycle (N)*. Grafik hasil plot ini disebut diagram S-N atau diagram Wohler.



Gambar 1. Diagram S-N/ Diagram Wohler [16]

Dalam diagram S-N terdapat dua bentuk umum untuk dua kelas material, yaitu material yang memiliki *endurance limits* dan material yang tidak memiliki *endurance limits*. Grafik S-N pada gambar di atas menunjukkan bahwa material *ferrous alloy* mempunyai *endurance limits*. *Endurance limit*, menggambarkan fluktuasi *stress* terbesar yang tidak menyebabkan kegagalan sampai jumlah *cycle* yang tidak terbatas (*infinite*) [13]. Beberapa macam baja *endurance limit* berkisar antara 35%-60% dari kekuatan *ultimate*. *Endurance limit* baja untuk berbagai kondisi pembebanan dapat didekati dengan: $Se=0,5Su$ (*bending load*), $Se=0,45Su$ (*axial load*), dan $Se=0,29Su$ (*torsion load*). Sejumlah aplikasi material direkomendasikan memiliki *life* tak terhingga (*infinite life*) [17]. *Fatigue life* tak terhingga ditetapkan jumlah *cycle* lebih yang mencapai *endurance limits* biasanya dipakai di atas 106 *cycle* untuk material baja [15]. Material yang tidak mempunyai *endurance limits* tidak dapat didesain untuk *life* tak terhingga. Contoh material yang tidak mempunyai *endurance limits* adalah aluminium, sehingga komponen yang berbahan aluminium hanya bisa dirancang untuk batas *life* tertentu (*finite life*) [1]. Komponen yang dibuat dari bahan *material ferrous* dan paduan titanium dapat dirancang untuk *life* tak terhingga. Pada dasarnya dalam merancang komponen dengan *fatigue life* tak terhingga, seorang perancang menentukan *endurance limit* material 6-18 komponen tersebut dan menggunakannya sebagai *stress* yang diijinkan [15]. Kemudian ukuran, dan pemilihan komponen

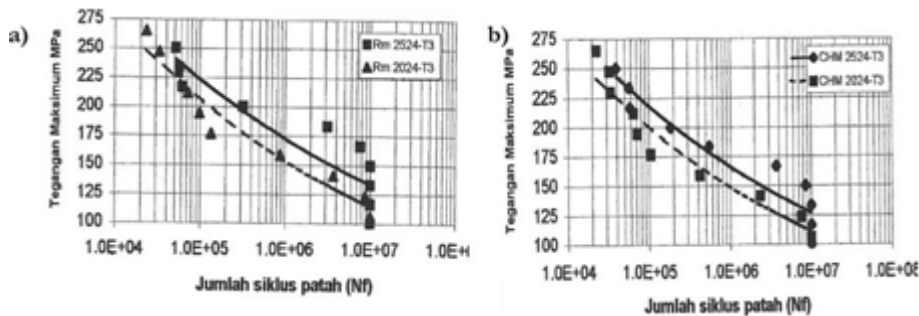
dapat dianalisis hanya dengan menggunakan analisis statik saja. Prediksi *fatigue life* (N) ditentukan dengan persamaan Basquin sebesar:

$$S_a = CN^m = 10^A N^m \rightarrow N = \left(\frac{S_a}{C}\right)^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{S_a}{10^A}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (1)$$

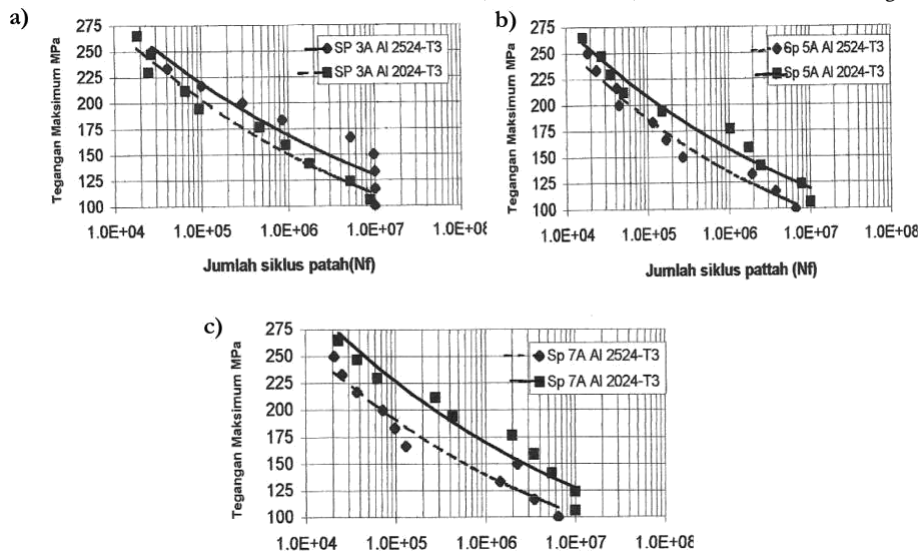
dimana: $m = -\frac{1}{3} \log\left(\frac{S_{10^3}}{S_e}\right)$; $A = \log\left[\frac{(S_{10^3})^2}{S_e}\right]$; S_a = Amplitudo Tegangan

Berikut hasil cuplikan penelitian yang pernah Saya lakukan terkait uji *fatigue* melalui S-N diagram dan *Fatigue Crack growth Rate* (FCGR) paduan aluminium 2023-T3 dan 2524-T3 hasil *Chemical Milling* dan *Shot Peening* (material untuk bodi pesawat yang di produksi oleh IPTN). Hasil peneli-tian tersebut telah Saya presentasikan pada seminar nasional di FT UGM, dan seminar internasional di jurusan teknik mesin ITB yang bertajuk *The-oretical and Experimental Mechanics*.

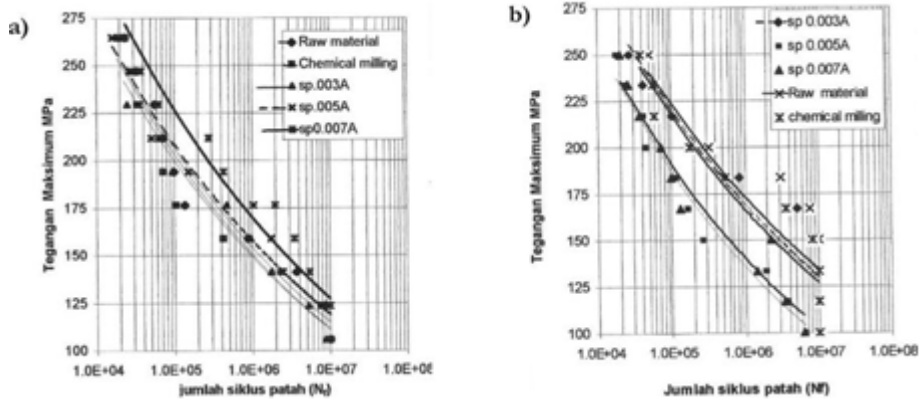
Penelitian terkait hal di atas telah Saya lakukan pada material alumi- nium padual Al2024-T3 dan Al 2524-T3 milik IPTN saat itu atau PTDI. Kedua material tersebut diperlakukan dengan *Chemical milling* dan *shot peening* dengan intensitas yang bervariasi yaitu 0,3, 0,5 dan 0,7 A.



Gambar 2. Grafik S-N A1204-T3 dan A1 2524-T3 a) Raw Material b) Perlakuan Chemical Milling



Gambar 3. Grafik S-N dari perlakuan shot peening A12024-T3 dan A1 2524-T3 a) intensitas 0,3 b) intensitas 0,5 c) intensitas 0,7



Gambar 4. Perbandingan Grafik S-N (A12024-T3 dan A1 2524-T3) dari *raw material*, *chemical milling* dan *shot peening*

Berdasarkan hasil pengujian di atas ditemukan bahwa material 2524-T3 memiliki *fatigue life* yang lebih tinggi dibandingkan dengan 2023-T3 baik yang material dasar, *Chemical milling* dan *shot peening*. Indikasi tingginya *fatigue life* tersebut ditunjukkan juga dari hasil deformasi platis yang terjadi. Deformasi *plastic* yang terjadi pada 2524-T3 lebih rendah dibandingkan dengan 2024-T3

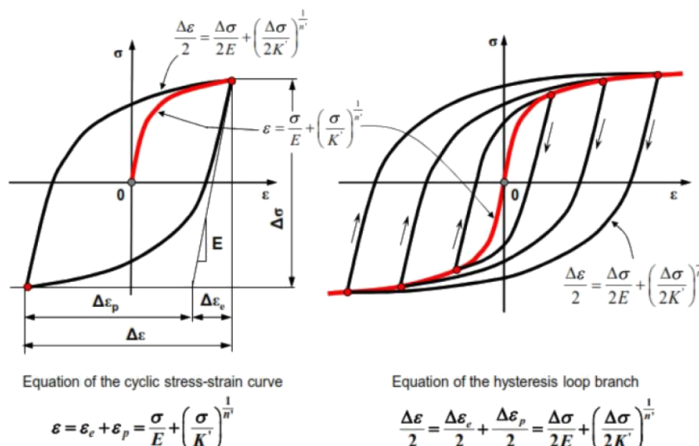
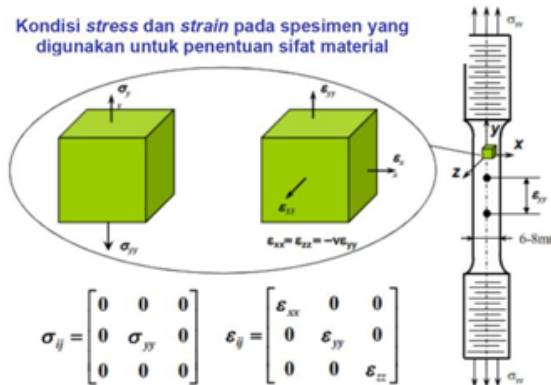
Strain-Life (ϵ -N)

Model pendekatan desain berdasarkan *strain (strain based model)* memberi gambaran yang lebih akurat untuk *crack-initiation stage*. Pendekatan *strain life* juga mengakumulasi kerusakan akibat *cycle* beban sepanjang *life* komponen, seperti *overload* yang menyebabkan *residual stress* yang menguntungkan maupun merugikan pada daerah kegagalan [12]. Kombinasi beban *fatigue* dan temperatur tinggi dapat ditangani dengan lebih baik dengan metode ini karena efek *creep* dapat dimasukkan [18]. Metode ini paling sering digunakan untuk *LCF-finite life* dimana *stress cycle* cukup tinggi untuk menyebabkan *local yielding*. [19] Metode ini paling kompleks dibandingkan dengan metode yang lain, sehingga dalam penyelesaiannya memerlukan ketelitian dan kecermatan. Data pengujian *cyclic-strain behavior* berbagai macam material masih dalam tahap pengembangan. *Fatigue* secara jelas menunjukkan akumulasi kerusakan melalui proses *crack propagation*, dimana proses tersebut tidak akan terjadi tanpa adanya deformasi *plastic* pada ujung *crack*, Sehingga apabila *stress* yang terjadi masih pada daerah *elastic* maka sebesar apapun *stress* tersebut tidak akan menyebabkan *crack propagation* [20]. Penggunaan kekuatan material (*yield strength* ataupun *ultimate strength*) tidak cukup untuk menggambarkan kegagalan *fatigue* akibat beban dinamik, karena kekuatan material tersebut dapat berubah di sekitar ujung *crack* akibat beban dinamik [14]. Selain itu kekuatan material tersebut dapat berubah (bertambah atau berkurang kekuatannya) tergantung pada material dan proses manufakturnya. Oleh karena itu, kekuatan material pada daerah dimana *crack propagation* terjadi berbeda dengan kekuatan ke seluruh material yang diperoleh dari hasil uji *tensile*. Beberapa macam pendekatan telah dilakukan untuk menggambarkan kekuatan material pada daerah *crack*, salah satunya adalah dengan menggunakan persamaan **Coffin Manson**.

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (2)$$

$\Delta \epsilon$ = Total strain, σ'_f = Stress dalam satu cycle, E = Modulus elastisitas, N_f = Jumlah cycle yang terjadi sebelum terjadi kegagalan, ϵ'_f = Koefisien keuletan *fatigue*, b = Eksponen kekuatan *fatigue*, c = Eksponen keuletan *fatigue*. Keuntungan penggunaan persamaan Coffin-Manson adalah bahwa persamaan tersebut memberikan pemahaman yang mendalam tentang sifat penting dalam penentuan kekuatan *fatigue* [21]. Dalam hal memberikan kesimpulan bahwa sepanjang ada *cyclic plastic strain*, tidak masalah seberapa kecilnya, dapat dideteksi yang pada akhirnya akan terjadi kegagalan.

Sebagian besar struktur teknik dan komponen mesin dirancang sedemikian rupa sehingga nominal stress tetap elastic ($\sigma_n < \sigma_{ys}$), stress concentration sering menyebabkan plastic strain berkembang di sekitar ujung crack, di mana stress meningkat karena efek stress concentration [22] cement pastes, rock, soil, etc. all benefit from these developments. Layered materials and especially thin film/substrate systems are becoming important in small volume systems used in micro and nanoelectromechanical systems (MEMS and NEMS. Karena kendala yang ditimbulkan oleh stress elastic material di sekeliling deformasi zona plastic ujung notch dianggap dikontrol oleh strain. Asumsi dasar pendekatan analisis strain-fatigue life bahwa akumulasi kerusakan fatigue dan fatigue life terhadap crack initiation pada ujung notch adalah sama seperti pada spesimen material yang tidak memiliki notch jika keadaan strain-stress pada notch dan benda ujinya sama [23]. Dengan kata lain: Pendekatan local strain menghubungkan deformasi yang terjadi di sekitar stress concentration terhadap stress dan strain [24]. Berdasarkan pengetahuan tentang geometri dan beban yang dikenakan pada komponen notch, kerusakan fatigue harus dihitung untuk setiap cycle stress-local strain (hyteresis loop, penjumlahan kerusakan linier). Prosedur N bertahap untuk memperkirakan fatigue life dapat diringkas berdasarkan hal berikut: analisis gaya eksternal yang bekerja pada struktur dan komponen yang dimaksud, analisis beban internal pada penampang yang dipilih dari komponen, pemilihan lokasi kritis (titik stress concentration) dalam struktur, perhitungan local stress elastic, , pada titik kritis (biasanya ujung notch), penyusunan local stress histories dalam bentuk urutan puncak dan bawah, penentuan respons elastic-plastic di lokasi kritis, identifikasi (ekstraksi) cycle diwakili oleh hyteresis loops stress-strain tertutup, perhitungan kerusakan fatigue, penjumlahan kerusakan fatigue (Hipotesis Miner-Palmgren), penentuan fatigue life (m) dalam hal jumlah pengulangan stress, , (Jumlah blok) atau jumlah cycle untuk crack initiation fatigue, N [2], [22]



Periode *crack initiation* menjadi bagian utama dari *fatigue life* spesimen, *life* spesimen diasumsikan sama dengan *crack initiation fatigue life*. Oleh karena itu, hanya *crack initiation fatigue life* pada ujung *notch* yang dapat diperkirakan dari data *fatigue*. Data *fatigue* diperoleh dari spesimen yang mengalami riwayat *stress-strain* yang sama dengan yang terjadi pada ujung *notch* [25]. Riwayat yang sama berarti besarnya semua komponen *stress* dan *strain* yang sama. Jika kondisi tersebut dipenuhi, kesetaraan satu komponen *stress* atau *strain* pada *notch* dan memastikan bahwa komponen spesimen lainnya juga sama. Oleh karena itu, dimungkinkan untuk digunakan dalam sebuah kasus yang hanya satu *strain* atau satu komponen *stress* sebagai parameter untuk perhitungan kerusakan *fatigue* dan estimasi *fatigue life* [26]. Hal ini berarti bahwa satu komponen mencirikan seluruh keadaan *stress strain*. Namun, jika keadaan *stress-strain* di ujung *notch* dan pada spesimen tidak sama, perhitungan berdasarkan hanya satu komponen *stress* atau *strain* mungkin tidak akurat. Oleh karena itu, penting untuk meninjau perilaku *stress plastic strainelastic* dari material dan model matematika yang digunakan dalam aplikasi *fatigue*. Penting juga untuk mengetahui modifikasi, yang harus diterapkan sebelum sifat *strain uniaksial life* (ϵ -N) dapat digunakan jika keadaan *stress-strain* pada ujung *notch* tidak sama dengan yang ada pada spesimen material yang digunakan untuk mendapatkan sifat material yang relevan. Respons *stress-strain* material logam sering diubah secara drastis karena pembebanan berulang. Material dapat: mengeras secara *cyclic*, melunak secara *cyclic* menjadi stabil secara *cyclic* memiliki perilaku campuran (melunakkan atau mengeraskan tergantung pada $\Delta\epsilon$). Alasan material melunak atau mengeras tampaknya terkait dengan sifat dan stabilitas dislokasi substruktur material. Material lunak, awalnya memiliki kepadatan dislokasi rendah [10], kepadatan meningkat dengan cepat karena *plastic strain* secara *cyclic* yang berkontribusi terhadap *strain hardening cyclic* yang signifikan. Untuk material yang keras, *cycle strain* berikutnya menyebabkan penyusunan ulang dislokasi, yang memberikan lebih sedikit ketahanan terhadap deformasi dan material melunak secara *cyclic* [1], [22]

$$\begin{aligned} \text{Jika } \frac{\sigma_{ult}}{\sigma_y} > 1.4 & \text{ material akan mengeras secara } cyclic \\ \text{Jika } \frac{\sigma_{ult}}{\sigma_y} > 1.2 & \text{ material akan melunak secara } cyclic \end{aligned}$$

Sifat Strain - fatigue life

Pada tahun 1910, Basquin mengamati bahwa data *stress-life* (S-N) dapat diplot secara linier pada skala *log* [27]

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (3)$$

Dimana $\Delta\sigma/2$ = Amplitudo *stress* sebenarnya, $2N_f$ = *reverseal* untuk gagal (1rev=1/2 cycle), σ'_f = Koefisien kekuatan *fatigue*, dan b = eksponen kekuatan *fatigue*

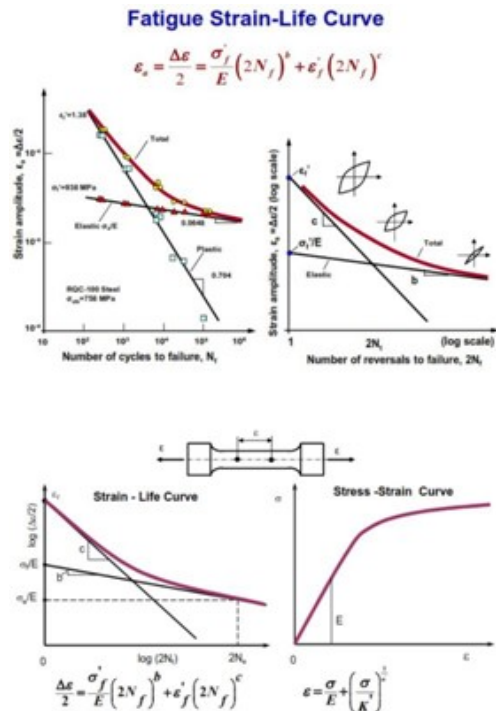
Parameter σ'_f dan b adalah sifat *fatigue* material. Koefisien kekuatan *fatigue*, kira-kira sama dengan kekuatan patah yang sebenarnya pada patahan. Eksponen kekuatan *fatigue* b , bervariasi di kisaran 0,05 dan -0,12. Manson

dan Coffin, yang bekerja secara independen (1950), menemukan bahwa data *plastic strain-life* (ϵ -N) dapat dilinearisasi dalam koordinat *log* [28].

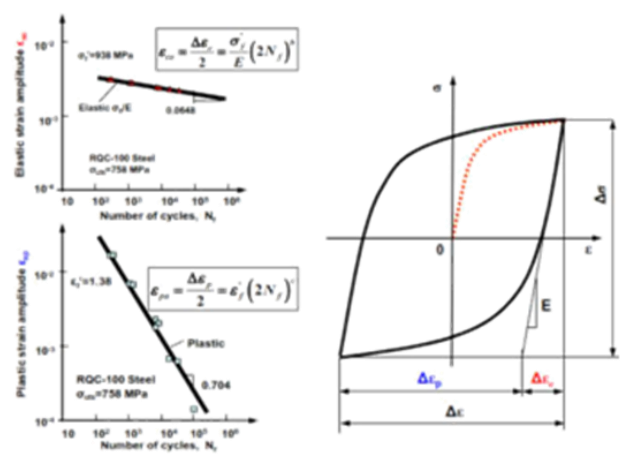
$$\frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (4)$$

$\Delta\epsilon_p/2$ = Amplitudo *plastic strain*, $2N_f$ = *reverseal* untuk gagal (1rev=1/2 cycle), ϵ'_f = Koefisien keuletan *fatigue*, c = eksponen keuletan *fatigue*.

Parameter ϵ_f dan c adalah sifat *fatigue* material. Koefisien keuletan *fa-tigue*, ϵ_f , kira-kira sama dengan keuletan patah sebenarnya (*strain* sebenarnya pada patahan), ϵ_f . Eksponen keuletan *fatigue*, c , bervariasi di kisaran $-0,5$ dan $-0,7$ [29].



Gambar 7. Kurva *strain-life* dan kurva *stress-strain cyclic* diperoleh dari spesimen silinder

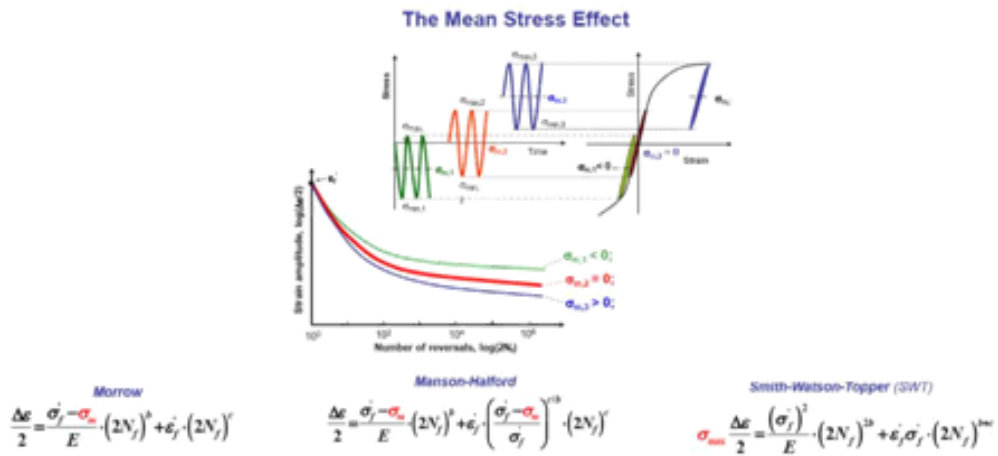


Gambar 8. Penentuan kurva *strain-fatigue life*

Ringkasan Pendekatan Local Strain-Life (ϵ -N)

Metode ini memperhitungkan respons *stress-strain* aktual material akibat pembebanan *cyclic*. *Plastic strain*, dan mekanisme yang mengarah pada inisiasi *crack*, dimodelkan dengan akurat [30]. Metode ini dapat memodelkan efek dari *stress* sisa rata-rata yang dihasilkan dari efek urutan dalam *load histories* dan *residual stress* manufaktur [31]. Hal ini memungkinkan akumulasi kerusakan yang lebih akurat di bawah pembebanan variasi amplitudo *cyclic*. Metode ϵ -N dapat lebih mudah digunakan untuk situasi yang melibatkan geometri yang rumit. Metode ini dapat digunakan dalam aplikasi suhu tinggi dimana interaksi *fatigue-propagation* sangat penting. Dalam situasi yang penting,

metode ini dapat menggabungkan perilaku material sementara. Metode ini dapat digunakan untuk *low cycle* (*strain* tinggi) dan *high cycle fatigue* (*strain* rendah) [32]. Hanya ada satu elemen empiris yang penting dalam metode ini, yaitu koreksi untuk efek *stress* rata-rata.



Gambar 9. Efek *stress* rata-rata dan grafik pendekatan *strain-life* lokal ($\epsilon-N$)

Berikut dua publikasi yang berhubungan dengan pendekatan *strain-life* ($\epsilon-N$), **pertama**: *Improvement of low-cycle fatigue resistance in AISI 4140 steel by annealing treatment, International Journal of Fatigue (IJF) 125 (2019) 406–417*

Bahan dan Metode

Dalam penelitian ini, baja komersial AISI 4140 *quenching* dan *tempering* (Q & T). Komposisi kimiawi bahan ini disajikan pada Tabel 2. Spesimen baja dengan diameter 16 mm dan panjang 190 mm dilakukan perlakuan anil pada suhu 815°C dalam tungku selama 1 jam; kemudian, suhu diturunkan menjadi 665°C dengan kecepatan 11°C/menit. Setelah suhu baja mencapai 665°C, baja tersebut didinginkan sampai suhu kamar. Spesimen baja yang tidak diperlakukan anil disimbolkan RS, dan baja yang menjalani dianil disimbolkan AS. standar Spesimen uji *tensile* ASTM E8 (Gbr. 10a) [33], dan spesimen uji LCF sesuai standar ASTM E606 (Gbr. 10b) [34]

Tabel 2. Komposisi kimia dari baja AISI 4140 (wt.%)

| C | Mo | Mn | Cr | Si | P | S |
|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 0.443 | 0.198 | 0.805 | 1.150 | 0.308 | 0.021 | 0.010 |
| Ni | Al | Co | Cu | Ti | W | Fe |
| 0.253 | 0.0198 | 0.020 | 0.320 | 0.026 | 0.0114 | Bal. |

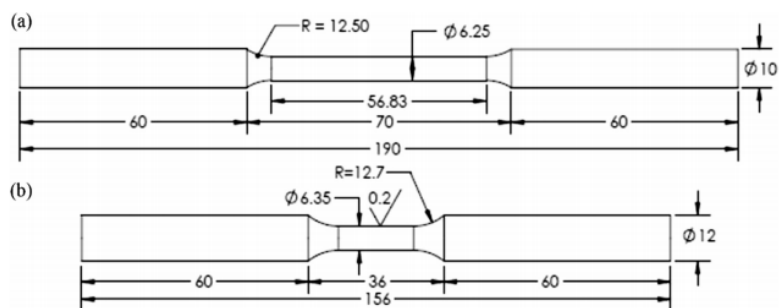


Fig. 1. Details of the specimens: (a) tensile test and (b) LCF test (units in mm).

Gambar 10. Detail dari specimen a) uji *tensile* b) uji LCF (satuan dalam mm)

Uji *Tensile* dan LCF

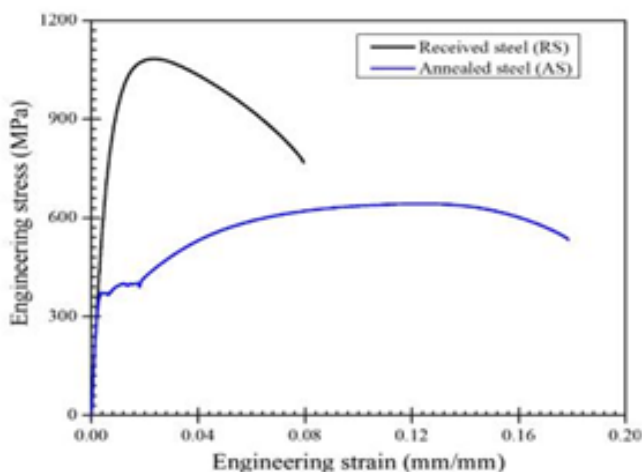
Uji *tensile* statis dan LCF dilakukan dengan menggunakan servohidraulik MTS Landmark 100 kN yang pada suhu kamar. Spesimen RS dan AS diuji di bawah pembebanan aksial untuk mendapatkan sifat mekaniknya. Panjang ukuran 50 mm dari ekstensometer aksial (MTS 634.25F-24 type) dipasang di area panjang pengukur spesimen. Spesimen diuji *tensile* secara aksial dengan kecepatan konstan 0,2 mm/menit sampai patah. Uji LCF menggunakan berbagai amplitudo *strain* 0,003-0,013 mm/mm yang diterapkan pada laju *strain* konstan 0,005 s⁻¹. Frekuensi untuk tes LCF di-hitung menggunakan yaitu 0,417 Hz, 0,25 Hz, 0,179 Hz, 0,139 Hz, 0,114 Hz dan 0,096 Hz untuk 0,003 mm/mm, 0,005 mm/mm, 0,007 mm/mm, 0,009 mm/mm, 0,011 mm/mm dan 0,013 amplitudo *strain* mm/mm, masing-masing [35]. Dalam penelitian ini, *cycle* kegagalan diteliti pada penurunan beban sebesar 50% dari *cycle* stabil. Data *plastic strain*, *elastic strain* dan modulus *elasticity* diukur pada setengah *cycle* (0,5Nf) selama uji LCF. Pasangan titik data yang terdiri dari *plastic strain* dan *elastic strain* dengan *reverseal* ke *cycle* kegagalan (2Nf) pada semua amplitudo *strain* yang diplot untuk menentukan parameter LCF menggunakan hubungan pendekatan **Coffin Manson Basquin**. Morfologi permukaan patahan sampel RS dan AS diuji LCF di semua amplitudo *strain* diamati dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Hasil Uji Sifat Mekanis

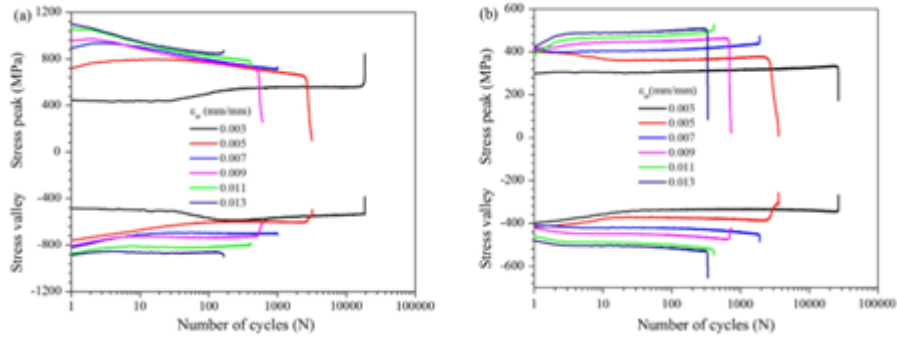
Kurva *stress-strain* untuk baja AISI 4140 dengan dan tanpa perlakuan *annealing* digambarkan pada Gambar 11. *Modulus elasticity* (E) dari baja ditentukan dengan cara memplot kurva *elastic* linier dengan panjang garis 20% pada rentang hubungan *stress-strain* linier menggunakan metode regresi kuadrat terkecil *yield strength*, σ_y dihitung menggunakan metode *offset* 0,2%. Hasil uji *tensile* dirangkum dalam Tabel 3.

Tabel 3. Hasil uji *Tensile*

| Material | σ_y (MPa) | σ_{ult} (MPa) | E _p (kJ) | E _e (kJ) | E (GPa) | E (%) |
|--------------------------------------|------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------|-------|
| AISI 4140 | 939.52 | 1093.69 | 0.001 | 0.028 | 209.88 | 14.60 |
| AISI 4140 <i>annealed</i> | 384.97 | 666.86 | 0.087 | 0.002 | 205.53 | 21.00 |



Gambar 11. Kurva *stress-strain* pada baja 4140 dan baja AISI 4140 dengan *annealed*



Gambar 12. Respon *cyclic stress* selama uji LCP a) baja AISI 4140 b) AS

Tabel 4. Hasil *stress-life* dari AISI 4140 (RS) dan baja *annealed* (AS)

| Material | $\Delta \epsilon_t$ (mm/mm) | ϵ_a (mm/mm) | | E (GPa) | N_f (Siklus) | σ_a (MPa) |
|----------|--------------------------------|----------------------|-----------------|------------|-------------------|---------------------|
| | | ϵ_{ap} | ϵ_{ae} | | | |
| RS1 | 0.003 | 0.00015 | 0.0029 | 194.99 | 18.563 | 548.50 |
| RS2 | 0.005 | 0.0015 | 0.0035 | 193.50 | 3161 | 634.00 |
| RS3 | 0.007 | 0.0035 | 0.0035 | 193.03 | 1000 | 716.00 |
| RS4 | 0.009 | 0.0050 | 0.0040 | 192.36 | 604 | 733.00 |
| RS5 | 0.011 | 0.0070 | 0.0040 | 192.25 | 405 | 807.00 |
| RS6 | 0.013 | 0.0085 | 0.0045 | 193.81 | 166 | 860.50 |
| AS1 | 0.003 | 0.0015 | 0.0015 | 207.10 | 26.858 | 333.00 |
| AS2 | 0.005 | 0.0031 | 0.0019 | 202.07 | 3606 | 381.50 |
| AS3 | 0.007 | 0.0049 | 0.0021 | 202.06 | 1912 | 436.50 |
| AS4 | 0.009 | 0.0066 | 0.0025 | 198.27 | 733 | 464.50 |
| AS5 | 0.011 | 0.0085 | 0.0025 | 200.25 | 415 | 498.00 |
| AS6 | 0.013 | 0.0105 | 0.0025 | 195.46 | 336 | 516.50 |

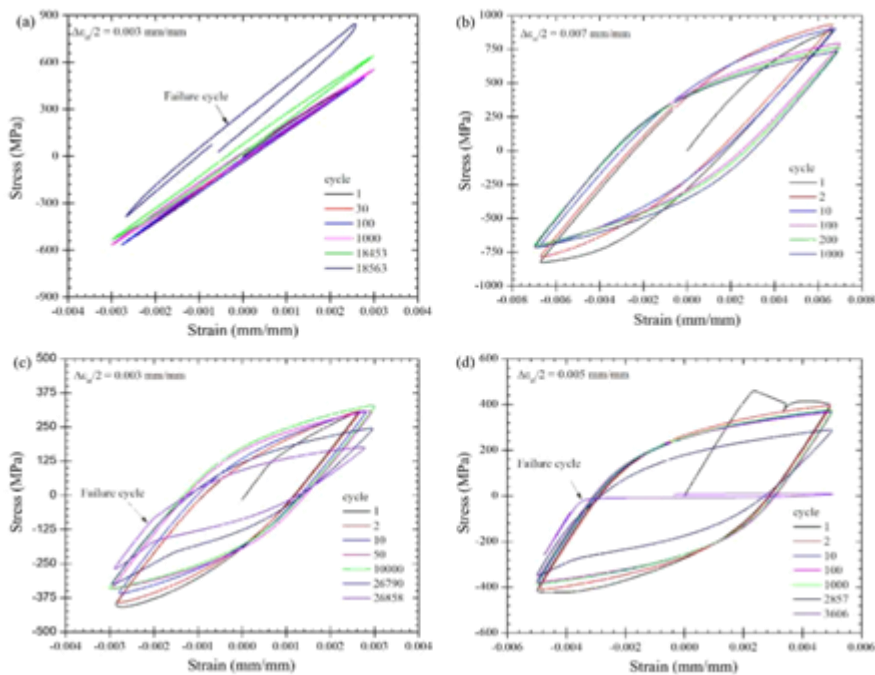
Analisis Respon *Cyclic stress*

Hasil pengujian LCF ditampilkan pada Tabel 4. Nilai rata-rata *modulus elasticity* untuk baja AISI 4140 yang dianil dan non anil masing-masing adalah 200,87 GPa dan 193,32 GPa. Perbedaan nilai *modulus elasticity* yang diperoleh dari pengujian *tensile* statik dan pengujian LCF (Tabel 3 dan 4) disebabkan oleh penurunan hubungan mikro plastifikasi dengan pergerakan dislokasi yang *reversibel* dan penurunan pembentukan pita Lüders [36]. Pengaruh amplitudo *strain* pada respons *cyclic stress* sehubungan dengan jumlah *cycle* pada laju *strain* konstan 0,005 s⁻¹ digambarkan untuk setiap baja pada Gambar.12 .a dan b. Puncak *stress* baja AISI 4140 meningkat dengan amplitudo *strain* (Gambar 12a). Sebaliknya, AS menunjukkan respons *cyclic stress* yang identik pada amplitudo *strain* yang lebih tinggi (Gbr. 12.b.). Pada amplitudo *strain* yang lebih rendah, perbedaan respon *cyclic stress* pada *stress* puncak (*tensile*) dan *stress* lembah (*compressive*) spesimen AS₁ dengan spesimen RS₁ adalah 150 MPa dan 100 MPa. Spesimen RS₁ menunjukkan perilaku pelunakan *cyclic* ringan terus menerus selama 30 *cycle*, dan perilaku pengerasan *cyclic* progresif diamati dari *cycle* 1000 sampai baja mengalami pengerasan *cyclic* saturasi (jenuh) dan akhirnya gagal. Selain itu, peningkatan- dalam besaran sampel tekan meningkat (0,005-0,009 mm/mm), AISI 4140 mengalami pengerasan *cyclic* awal selama dua *cycle*. Gbr. 12.a. dengan jelas menunjukkan pengerasan *cyclic* awal dan perilaku pelunakan *cyclic* kontinyu dari baja AISI 4140 yang diterima di bawah kondisi Q&T. Ketika amplitudo *strain* ditingkatkan menjadi 0,011 mm/mm dan 0,013 mm/mm, baja AISI 4140 terus mengalami perilaku pelunakan *cyclic* yang signifikan, yang menunjukkan bahwa baja tidak mampu mengalami deformasi *cyclic* (Gbr. 12.a.). Sebaliknya, spesimen AS₁ menunjukkan pengerasan *cyclic* awal hingga 8 *cycle* pembebanan, dan dengan pembebanan dari 9 hingga 20 *cycle*, spesimen AS₁ mengalami perilaku pelunakan *cyclic* (Gbr. 12b). Setelah *cycle* ke-21, spesimen AS₁ mengalami pengerasan *cyclic* hingga rusak. Ketika amplitudo *strain* ditingkatkan menjadi 0,007 mm/mm, AS mengalami pelunakan *cyclic* dalam beberapa *cycle* dan pengerasan *cyclic* terus menerus sampai gagal. Fenomena ini serupa dengan fenomena yang diamati pada baja 42CrMo4 (Baja AISI 4140)

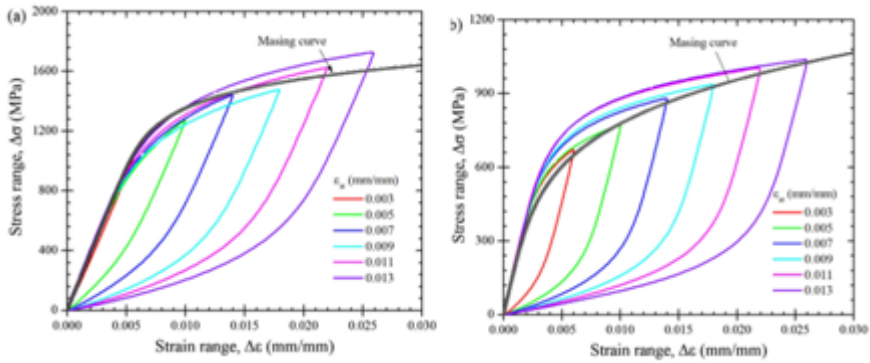
dalam kondisi normalisasi. Setelah AS mengalami fenomena gerigi, terjadi pengerasan *cyclic* pada baja pada amplitudo *strain* yang lebih tinggi sebesar 0,005 mm/mm (Gambar. 12.b.). Beberapa *cycle* pelunakan *cyclic* yang diamati pada amplitudo *strain* rendah 0,005 mm/mm mungkin karena pembentukan zona deformasi *plastic* rendah di daerah pita Lüders, di mana daerah dislokasi bebas aktif. Sebaliknya, pengerasan *cyclic* diduga disebabkan oleh pengerasan kerja ekstensif yang diakibatkan oleh peningkatan struktur sel dislokasi pada ferit *proeutektoid* dan dislokasi interaksi *lamellae* sementit dalam perlit kasar. Dalam studi ini, baja AISI 4140 dalam kondisi anil mengalami pelunakan *cyclic* dalam beberapa *cycle* dan kemudian mengalami pengerasan *cyclic* yang stabil sampai kegagalan dengan amplitudo *strain* yang meningkat, mirip dengan baja karbon rendah dan baja MA 49MnVS3 *hot forged*, yang memiliki lebih banyak fase perlit. Verifikasi mekanisme pelunakan *cyclic* dan pengerasan *cyclic* stabil dengan pemeriksaan *transmission electron microscope* (TEM) dari baja karbon medium MA *hot-forged* (Kelas baja 49MnVS3) setelah LCF pada amplitudo *strain* 0,8% diamati dari 1 sampai 1000 *cycle*.

Perilaku Stress-Strain Cyclic

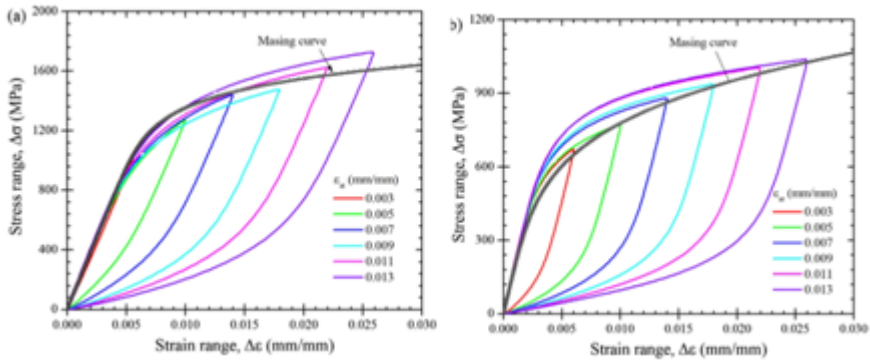
Gambar. 13 a dan b menunjukkan *hysteresis loops* untuk AISI 4140 pada amplitudo *strain* yang berbeda. Kurva histeresis pada Gambar. 13.a. menunjukkan bahwa baja secara *cyclic* melunak selama 30 *cycle* dan mengalami sedikit peningkatan *compressive stress*, yang menunjukkan bahwa pelunakan *cyclic* untuk baja AISI 4140. Selain itu, jumlah endapan karbida yang sangat rendah dalam butiran ferit kecil karena jumlah atom karbon yang rendah mungkin tidak dapat menahan deformasi, yang memungkinkan baja AISI 4140 mengalami pelunakan *cyclic* terus menerus dengan peningkatan *fatigue cycle* [37], yang terlihat pada Gambar 13.b. Lebih lanjut, Gambar 13c dan d menunjukkan pengaruh perlakuan anil pada baja AISI 4140, yang secara signifikan mengubah perilaku baja selama deformasi *cyclic*. *hysteresis loops* menunjukkan peningkatan linier (Gambar. 14.b.), yang menunjukkan bahwa AS jelas mengalami pengerasan *cyclic*.



Gambar 13. Plot dari *hysteresis loops* dihasilkan dari uji LCF pada amplitudo *strain* yang berbeda (a dan b) baja AISI 4140 dan (c dan d) AS



Gambar 14. Plot dari *hysteresis loops* amplitudo strain 0.011 mm/mm (a) baja AISI 4140 dan (b) AS.



Gambar 15. *Hysteresis loops* pada setengah cycle dengan ujung tekan yang umum (a) baja AISI 4140 dan (b)

Strain berdasarkan Analisis *Fatigue Life*

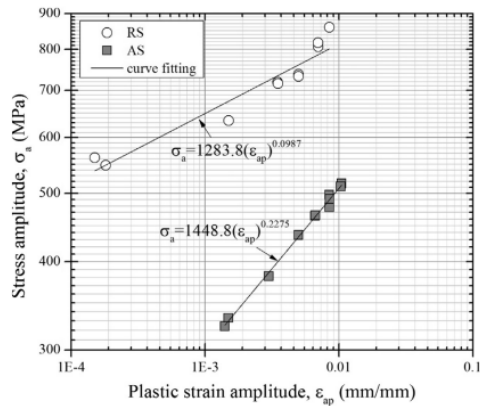
Hubungan antara amplitudo *stress* ($\Delta\sigma/2$) dan total amplitudo *strain* ($\Delta\varepsilon_t/2$) merupakan faktor penting dalam mengetahui material yang mengalami *strain hardening* akibat pembebanan *cyclic* [34]. Persamaan *stress-strain cyclic* dapat dijelaskan dengan Persamaan:

$$\Delta\varepsilon_t = \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \frac{(\Delta\sigma)}{2E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \quad (5)$$

dimana $\Delta\varepsilon_e/2$ dan $\Delta\varepsilon_p/2$ adalah amplitudo *elastic strain* dan amplitudo *plastic strain*. E adalah modulus *elastisitas* dalam kondisi *cyclic* [34]. Istilah *plastic* dari Persamaan di atas dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = K' \left(\frac{\Delta\varepsilon_p}{2}\right)^{n'} \quad (6)$$

Dimana K' adalah koefisien kekuatan *cyclic* dan n' adalah eksponen *cyclic strain hardening*. Plot $\log \Delta\sigma/2$ versus $\Delta\varepsilon_p/2$ dari *hysteresis loops* pada setengah cycle yang diperoleh dari data LCF pada amplitudo *strain* yang berbeda ditampilkan pada Gambar 16.



Gambar 16. Pengaruh *annealing uji* LCF pada amplitud *strain* yang berbeda.

Nilai K' dan n' ditentukan dari regresi linier pada Gambar 10 dan ditabulasikan pada Tabel 4. Persamaan Manson-Basquin selalu digunakan untuk memprediksi *fatigue life* suatu material berdasarkan uji LCF terkontrol *strain* dan direpresentasikan dengan persamaan

$$\Delta \varepsilon_t = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (7)$$

Persamaan ini merupakan hasil kombinasi persamaan untuk komponen *elastic* dan komponen *plastic* yang dikembangkan oleh Basquin dan Coffin-Manson, seperti yang diberikan oleh persamaan,

$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b \quad (8)$$

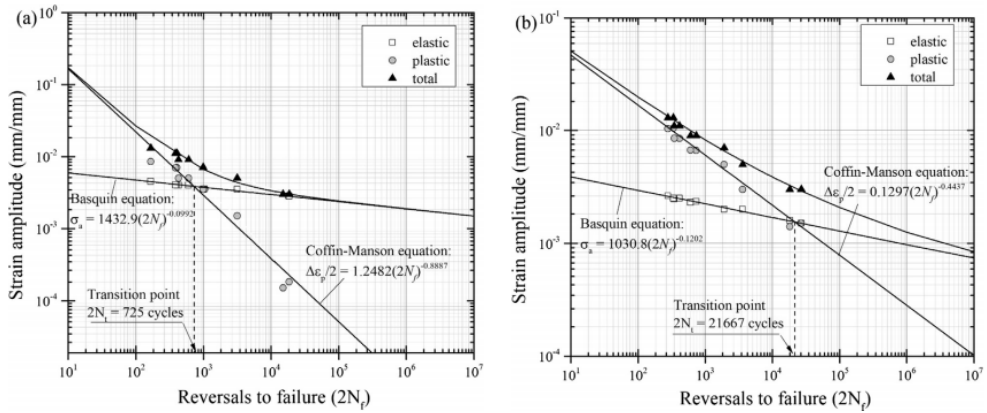
$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (9)$$

Selanjutnya parameter baja LCF dapat ditentukan melalui metode pemasangan kurva dengan memplot pasangan *plastic strain* dan *elastic* komponen dari data eksperimen dengan jumlah *reverseal* ke kegagalan ($2N_f$) pada skala log. Parameter LCF untuk baja AISI 4140 dan AS dirangkum dalam Tabel 5. *Total strain* versus *reverseal* kegagalan berdasarkan parameter ini diplot pada Gambar. 17a dan b untuk AISI 4140 dan AS, masing-masing, dan kurva menunjukkan korelasi yang baik dengan data eksperimen.

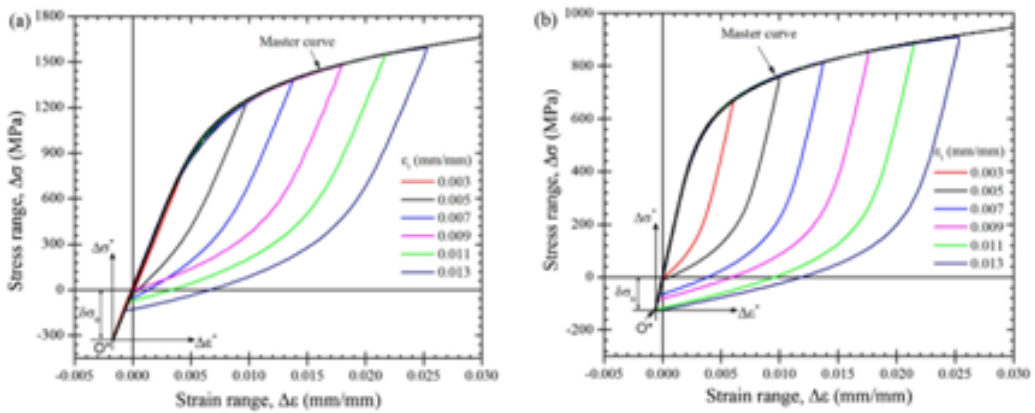
Dalam studi ini, koefisien kekuatan *fatigue* ($\sigma'_f = 1432,9$ MPa) dan eksponen kekuatan *fatigue* ($b = -0,0992$) dari baja AISI 4140 dalam kondisi Q&T identik dengan yang ada pada baja AISI 4140 yang di *quench* dengan suhu temper 650°C dengan 45,42% martensit [38]. Nilai b umumnya diamati berada dalam kisaran $-0.111 < b < -0.070$ untuk HSLA baja karbon sedang [39]–[41]. Koefisien keuletan *fatigue* ($\sigma'_f = 1,2482$ mm/mm) dan eksponen keuletan *fatigue* ($c = -0.8777$) hampir identik dengan baja AISI 1141.

Tabel 5. Perilaku LCF untuk baja AISI 4140 dan baja *annealed*

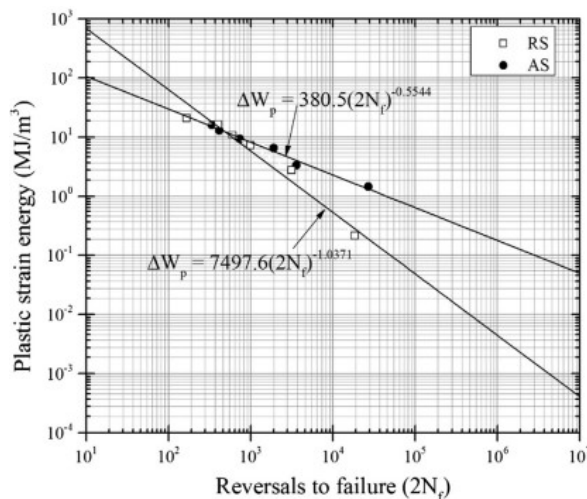
| Parameter | Baja AISI 4140 | Baja <i>annealed</i> |
|--|----------------|----------------------|
| Koefisien kekuatan <i>cyclic</i> , K' (MPa) | 1283.8 | 1448.8 |
| Koefisien kekuatan <i>fatigue</i> , (MPa) | 1432.9 | 1030.38 |
| Eksponen <i>cyclic strain hardening</i> , n' | 0.0986 | 0.2275 |
| Eksponen kekuatan <i>fatigue</i> , b | -0.0992 | -0.1202 |
| Koefisien keuletan <i>fatigue</i> , mm/mm | 1.2482 | 0.1297 |
| Eksponen keuletan <i>fatigue</i> , c | -0.8777 | -0.4437 |



Gambar 17. Kurva strain-fatigue life dan kurva kalibrasi dengan pendekatan Coffin Manson Basquin (a) baja 4140 dan (b) AS



Gambar 18. Konstruksi kurva master untuk (a) baja AISI 4140 dan (b) AS



Gambar 19. Plot LCF berdasarkan energy *plastic strain* dengan *reveral* ke kegagalan ($2N_f$) untuk amplitude *strain* mulai dari 0,003 hingga 0,013 mm/mm

Plastic Strain berdasarkan Prediksi LCF

Karena kerusakan LCF dikaitkan dengan *cyclic plastic strain*, maka energi *plastic strain* dapat dipertimbangkan untuk prediksi yang akurat dari *fatigue life* suatu material. Energi disipasi yang

diserap oleh material selama kerusakan *fatigue cyclic* dapat digunakan untuk memprediksi masa pakai LCF melalui plot energi *plastic strain* (MJ/m³) dengan *reverseal* ke kegagalan (2N_f). Untuk bahan yang menunjukkan perilaku non-Masing (Gbr. 15a dan b), konsep 'kurva master' dapat diperkenalkan dengan mencocokkan setiap jalur cabang *tensile* untuk semua amplitudo *strain* sepanjang bagian *elastic* linier [42]. Persamaan ini dapat diterapkan untuk membuat kurva utama, dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{\Delta \varepsilon^*}{2} = \frac{\Delta \sigma'}{2E} + 2 \left(\frac{\Delta \sigma'}{2K^*} \right)^{1/n^*} \quad (10)$$

Selanjutnya energi *plastic strain* disipasi per *cycle* dihitung menggunakan Persamaan di bawah [43]

$$\Delta Wp = \left(\frac{1-n^*}{1+n^*} \right) \Delta \sigma \Delta \varepsilon_p + \left(\frac{2n^*}{1+n^*} \right) \delta \sigma_0 \Delta \varepsilon_{p(11)}$$

Dimana K^* dan n^* sesuai dengan parameter kurva master Gambar. 18 a dan b, nilai-nilai ini diperoleh dari penyesuaian data eksperimen. Hubungan antara sistem koordinat lama dan baru, seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 18, tersedia dalam literatur [42], [44]. Dalam percobaan ini, nilai K^* dan n^* masing-masing adalah 3015,4 MPa dan 0,1547 untuk baja AISI 4140, dan untuk AS, nilai K^* dan n^* masing-masing adalah 1677,3 MPa dan 0,1557. Nilai $\delta \sigma_0 \Delta \varepsilon_p$ dapat diukur dari Gambar 18 a dan b. Selanjutnya energi *plastic strain* (ΔWp) dihitung menggunakan Persamaan. (12). Sifat LCF berdasarkan energi *plastic strain* dapat ditentukan dengan menggunakan hubungan hukum daya Coffin-Manson oleh persamaan di bawah [44], [45]

$${}_M \Delta Wp = W'_f (2N_f)^{\omega} \quad (12)$$

Dimana W'_f dan ω adalah koefisien energi *plastic strain* dan eksponen energi *plastic strain*, di mana ω adalah jumlah dari b dan c. Plot ΔWp versus *reverseals to failure* (2N_f) ditunjukkan pada Gambar. 19, dan parameter LCF disajikan pada Tabel 6. Dalam percobaan ini, perlakuan anil pada baja AISI 4140 diuji dalam kondisi LCF dengan amplitudo *strain* mulai dari 0,003 sampai 0,013 mm/mm menurunkan nilai W'_f dan ω . Efek serupa dari perlakuan anil pada penurunan nilai ε'_f dan c ditentukan oleh hubungan Coffin-Manson ditunjukkan pada Gambar 17.b. Nilai ω yang diperoleh untuk AISI 4140 dan AS sangat dekat dengan jumlah nilai b dan c pada Tabel 6

Tabel 6. Parameter LCF berdasarkan energi *plastic strain*

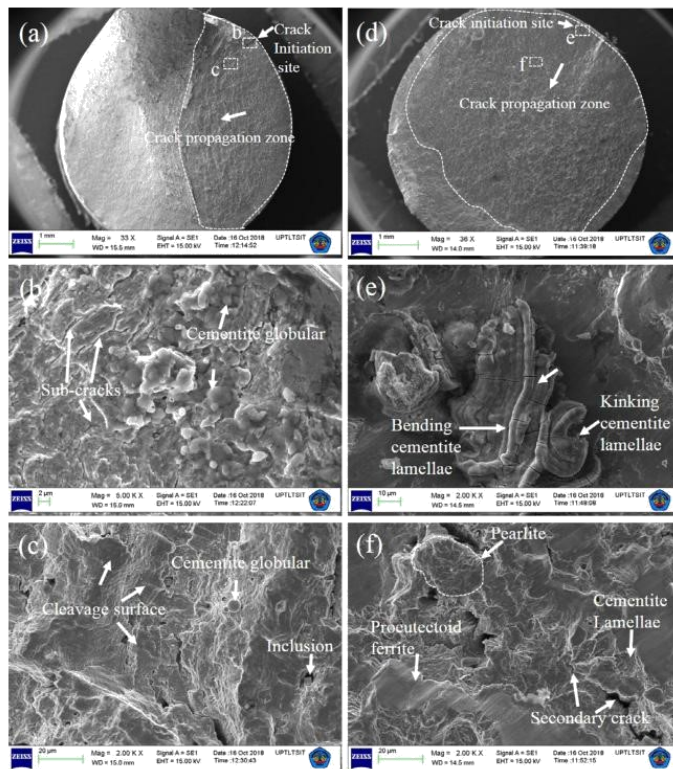
| Material | w'_f | ω |
|----------------------|--------|----------|
| Baja AISI 4140 | 7497.6 | -1.0371 |
| Baja <i>annealed</i> | 380.5 | -0.5544 |

Pengamatan Fraktografi

Fraktografi SEM pada Gambar 20 menampilkan permukaan patahan yang khas dari sampel RS dan AS yang diuji di bawah LCF pada *strain* 0,009 mm/mm amplitudo; *crack* karena *slip band persisten* di dekat permukaan *specimen* (dapat diamati pada Gambar 20 a dan d). Analisis dekat dari sampel RS dan AS pada Gambar. 20 b dan e menunjukkan partikel *lamellae globular* dan sementit. Sementit di dalam permukaan rekahan dari kedua sampel di dekat permukaan (dengan garis putus-putus). Partikel bola sementit dengan konsentrasi karbon 17,64 at.% (Panah pada Gambar 20.b.) dapat bertindak sebagai penghalang pergerakan dislokasi, yang mungkin berkontribusi pada pengerasan *cyclic* awal untuk beberapa *cycle* pada amplitudo *strain* rendah 0,011 mm/mm; namun gumpalan sementit yang tersebar secara acak di wilayah cluster kecil tidak dapat secara efektif melawan gerakan dislokasi kompleks selama deformasi *cyclic strain* [46]. Selain itu, *plastic strain* kecil yang terlokalisasi dan *stress* tinggi yang terkonsentrasi di fase martensit diyakini menyebabkan pembentukan *microcracks* yang cepat; dengan demikian, banyak *subcrack* yang terbentuk pada

batas ferit-mar-tensit, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 20.b., yang mempercepat *crack propagation* [47]. Fitur seperti fase pembelahan, yang disebabkan oleh Gambar 18. Plot LCF berdasarkan energi *plastic strain* dengan *reverseals to failure* (2Nf) untuk amplitudo *strain* mulai dari 0,003 hingga 0,013 mm/mm. Tabel 6 parameter LCF berdasarkan energi *plastic strain*. Parameter LCF Baja AISI 4140 dengan $W_f \omega = 7497.6 - 1.0371$ dan baja anil 380.5 -0.5544 menunjukkan pemotongan fase martensit keras dan pembatasan *slip* fase ferit lunak selama *fatigue strain cyclic*, dapat dengan jelas dilihat di zona *fatigue propagation* (Gbr. 20.c.). Fase kedua dari partikel inklusi, dimana *crack* dimulai dan menyebar karena ikatan partikel yang relatif lemah dengan matriks [48], [49], diamati pada Gambar. 20c.

Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) menegaskan bahwa *lamel-lae* sementit dalam koloni perlit memiliki kandungan karbon rendah (~ 14,3 pada.%) (Gambar. 20.e.). Bentuk lamelar yang bengkok pada Gambar 20e menunjukkan bahwa struktur lamelar karbida memiliki ketahanan yang kuat terhadap deformasi *plastic*. Struktur lamelar di AS dapat menahan gerakan dislokasi secara efektif, sehingga mencegah dislokasi pada ferit; fraktur permukaan *lamellae* sementit menunjukkan dekohesi karena *stress* yang terbentuk di sekitar matriks ferit [50], yang terbukti pada Gambar. 20.e. Gambar 20.f. menunjukkan pada mikrostruktur kasar ferit-perlit, pertumbuhan *crack* ulet lebih didominasi oleh koloni perlit daripada koloni ferit, dan koloni perlit cenderung menghambat pertumbuhan *crack*. Dalam kasus sampel yang dianil, pembentukan lamela sementit adalah hasil dekomposisi atom karbon, yang menyebabkan peningkatan kohesi batas dan pengasaran butir. Pengasaran butir dapat memicu banyak gerakan dislokasi di bagian dalam butir, yang menyebabkan *plasticity* luas di ujung *crack* sebelum patah [51]. Oleh karena itu, peningkatan signifikan dalam ketahanan LCF dari AS terutama disebabkan oleh pengerasan kerja ekstensif yang dihasilkan dari deformasi perlit yang sangat *plastic*.



Gambar 20. SEM permukaan patahan dari sampel yang diuji di bawah LCF pada amplitudo *strain* 0,009 mm/mm; (a-c) AISI 4140 dan (d-f) AS.

Kesimpulan

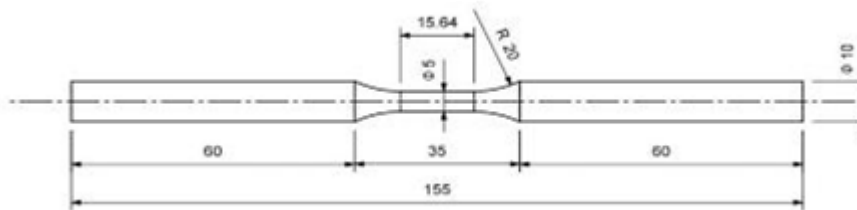
Pengerasan *cyclic* awal dan perilaku pelunakan progresif Baja AISI 4140 dalam kondisi Q&T dapat dikaitkan dengan awal struktur mikro baja, yang terdiri dari butiran ferit kecil dan fase martensit halus. Pengerasan *cyclic* awal hadir pada amplitudo *strain* total rendah 0,009 mm / mm, dan pada amplitudo *total strain* yang lebih tinggi, baja menunjukkan perilaku pelunakan *cyclic* progresif. Sebaliknya, struktur mikro ferit-perlit dari baja AISI 4140 menunjukkan pelunakan *cyclic* untuk beberapa *cycle* pada amplitudo *total strain* yang rendah sebesar 0,007 mm / mm dan pengerasan *cyclic* kontinyu. Amplitudo *strain* > 0,003 mm / mm, baja AISI 4140 dengan perlakuan Q&T menunjukkan perilaku pelunakan *cyclic*. Sebaliknya, baja AISI 4140 dalam kondisi anil mengalami transisi dari perilaku pelunakan ke perilaku pengerasan pada amplitudo *total strain* 0,005 mm / mm. Pengamatan SEM permukaan rekahan dari sampel yang diuji di bawah LCF pada amplitudo *strain* 0,009 mm/mm; (a– c) AISI 4140 dan (d–f) AS.M menunjukkan perilaku pengerasan terhadap perilaku pelunakan pada amplitudo *total strain* 0,011 mm/mm. Koefisien kekuatan *fatigue* tinggi (σ'_f) dan eksponen kekuatan *fatigue* rendah (b) dari AISI 4140 dalam kondisi Q&T menunjukkan bahwa *life* panjang baja secara dominan dikontrol oleh amplitudo *elastic strain* tinggi pada amplitudo *strain* rendah 0,003 mm /mm, namun untuk semua amplitudo *total strain*, AISI 4140 anil baja menunjukkan *life* LCF yang lebih besar daripada baja AISI 4140 yang dilakukan *quench* dan ditempa. Peningkatan resistansi LCF dari baja AISI 4140 dalam kondisi anil dapat dikorelasikan dengan eksponen kekuatan *fatigue* yang rendah (c) dan eksponen *cyclic strain hardening* yang tinggi (n'). Kelompok kecil sementit globular dan sementit *lamellae* yang ditemukan di permukaan rekahan baja AISI 4140 dalam kondisi Q&T dan kondisi anil, masing-masing, menunjukkan karakteristik yang berbeda dalam hal perilaku patahan. Pemotongan pada martensit dan inklusi diyakini dapat mempercepat *crack propagation* pada baja AISI 4140 yang dipadamkan dan ditempa. Sebaliknya, deformasi yang sangat *cyclic* dari *lamellae* sementit di koloni perlit secara signifikan berkontribusi pada peningkatan kinerja LCF dari baja AISI 4140 yang dianil. Dalam analisis ini, metode prediksi LCF alternatif yang efektif dan andal menggunakan pendekatan Coffin-Manson menunjukkan bahwa baja AISI 4140 dalam kondisi anil dapat menjadi pilihan yang baik untuk komponen teknik jika kerusakan LCF dipertimbangkan

Artikel kedua terbit di *Material Research Express* (MRX), IOP publisher

The Effects of Strain Amplitude and Low Cycle Fatigue (LCF) Behavior on Nodular Cast Iron with Two-Step Austempering (TSA) Process

Bahan dan metode

Besi cor nodular diuji menggunakan standar ASTM A395 dengan komposisi utama 3-4% C, maksimum 2,5% Si, dan maksimum 0,08P (wt.%). Pengujian untuk mengetahui ketahanan *fatigue* LCF dan *fatigue crack propagation* diuji dengan servo-hidrolik

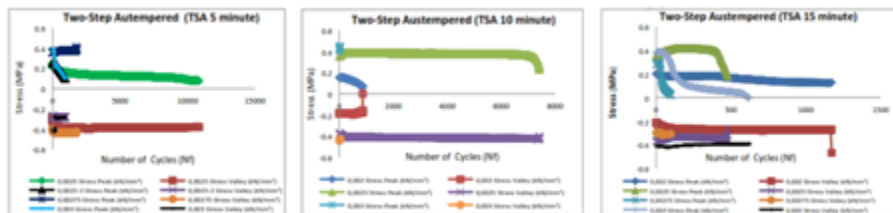


Gambar 21. Specimen Pengujian LCF Standar ASTM 606 [52]

Uji LCF dilakukan pada suhu kamar dengan spesimen yang dibuat sesuai standar ASTM 606: berbentuk silinder dengan panjang total 150 mm dan diameter 10 mm. Uji *low cycle fatigue* diberikan dalam rasio *strain* $R = -1$ dengan kecepatan *strain* 2×10^{-3} s⁻¹ hingga 7×10^{-3} s⁻¹ dan variasi amplitudo *strain* 0,2-0,4%. Kurva *hysteresis loops* (s vs. e) dan kurva gaya vs. jumlah *cycle* dicatat secara otomatis selama periode pengujian menggunakan MTS. Persamaan Coffin-Manson diadopsi untuk menentukan kekuatan *fatigue* material secara empiris dengan memasukkan *elastic strain* dan *plastic* terhadap *cycle* yang putus. Setiap jumlah kurva *hysteresis* (s vs. e) (*cycle* pertama, $\frac{1}{2}$ *cycle*

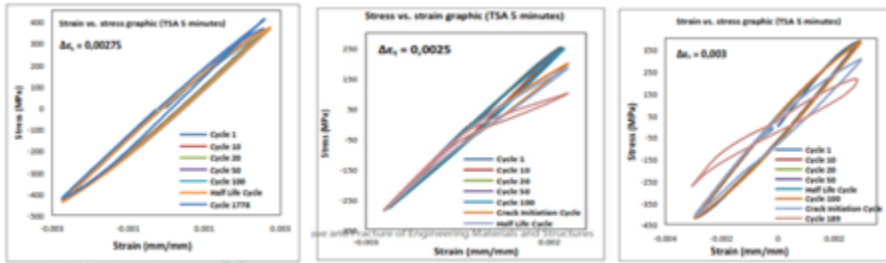
total, cycle terakhir) digunakan untuk mempelajari sifat dan karakteristik LCF. Setiap data dianalisis menggunakan software MTS *Fatigue Analyzer*. Fenomena *fatigue* dimulai dari terbentuknya *crack*, perkembangan *crack initiation*, *crack propagation*, kemudian patah. Setiap data kualitatif dan kuantitatif dari uji SEM digunakan untuk mempelajari sifat LCF selama uji *fatigue*.

Gambar 22. menunjukkan korelasi antara *total cycle* dan *stress* puncak dalam berbagai waktu tahan *two steps austempering* (TSA): 5 menit (22a), 10 menit (22b), dan 15 menit (22c); dan dengan amplitudo *strain* yang bervariasi mulai dari 0,002, 0,0025, 0,00275, dan 0,003. Gambar 22.a. memiliki *stress* puncak pada amplitudo *strain* 0,0025 mm/mm, serta Gambar 22.b. dan 22.c. yang memiliki *stress* puncak pada amplitudo *strain* 0,0025 mm/mm. Fenomena ini menunjukkan bahwa *stress* puncak yang terjadi pada 0,0025 mm/mm disebabkan adanya pelunakan pada awal *cycle*, kemudian berangsur-angsur mengeras dan pada akhirnya mengalami kegagalan [53], [54].

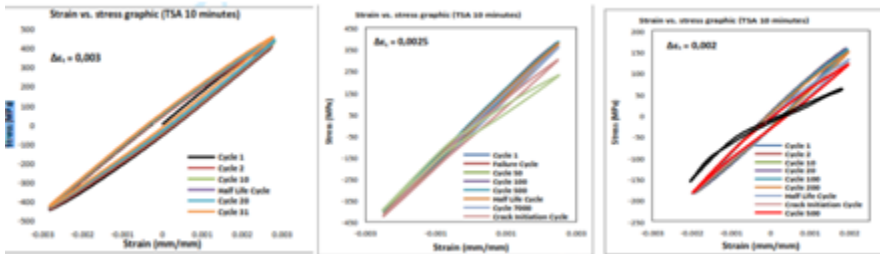


Gambar 22. Korelasi antara *total cycle* dan *stress* puncak dalam berbagai waktu tahan *two steps austempering* (TSA): a) 5 menit, b) 10 menit, dan c) 15 menit

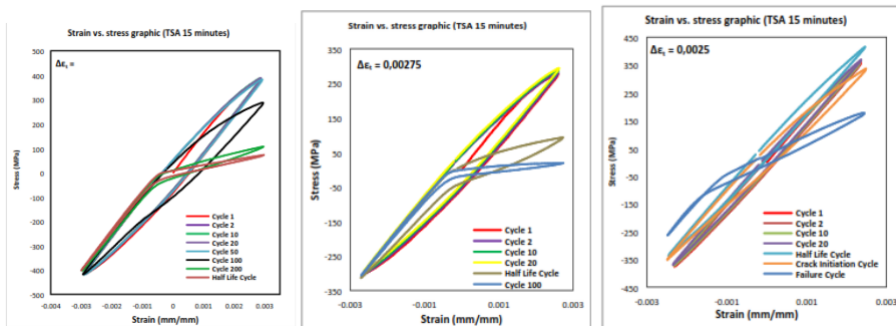
Gambar di atas menjelaskan perilaku pengerasan dan pelunakan pada besi cor nodular sebagai hasil dari proses *two steps austempering* selama 5 menit. Kurva menunjukkan hasil uji *fatigue* di *low cycle* dengan amplitudo *strain* sebesar 0,0025 mm/mm dengan beberapa *cycle*: 1, 10, 20, 50, 100, sampai terjadi kegagalan pada *cycle* 10842. *Cycle* pertama memiliki *tensile stress* 253.941 MPa dan *compressive stress* -272.185 MPa. *Cycle* kesepuluh memiliki *tensile stress* lebih rendah yaitu 250.609 MPa dan *compressive stress* sebesar -273.343 MPa. *Cycle* ke seratus memiliki *tensile stress* yang lebih rendah yaitu 249.652 MPa dan *compressive stress* sebesar -283.165 MPa. Terjadinya *crack initiation* ditunjukkan dengan penurunan *tensile stress* sebesar 198.522 Mpa dengan gaya tekan -288.892 MPa. Sedangkan setengah *total cycle* (0,5Nf) mengalami pelunakan yang ditunjukkan dengan penurunan *tensile stress* sebesar 184.522 MPa dan *compressive stress* sebesar -288.030 MPa. Kegagalan terjadi pada *tensile stress* 99.808 MPa dengan *compressive stress* -284.040 MPa. Kenaikan, penurunan kekuatan *tensile* dan *compressive stress* adalah efek dari *strain hardening* dan pelunakan. Peningkatan ditandai dengan *strain hardening*, sedangkan penurunan ditandai dengan pelunakan [55]. Setelah itu, pengujian lain (Gambar 23.b.) dilakukan pada amplitudo *strain* 0,00275 mm/mm dengan 1, 10, 20, 50, 100 *cycle* sampai *crack initiation* dan kegagalan. Pada kurva histeresis dengan amplitudo *strain* 0,00275 mm/mm *cycle* I memiliki *tensile stress* puncak 364,372 MPa dan *compressive stress* -409,362 MPa, sedangkan *cycle* kesepuluh memiliki *tensile stress* lebih rendah yaitu 353,303 MPa dan *compressive stress* -411,362. Pada setengah *cycle* (0.5Nf) terjadi *strain hardening* seiring dengan peningkatan *tensile stress* sebesar 373.277 MPa dan *compressive stress* sebesar -440.144 MPa. Pada *cycle* 1778 juga terjadi *strain hardening* dengan kenaikan *tensile stress* sebesar 412.073 MPa dan *compressive stress* sebesar -425.951 MPa. Pada amplitudo berikutnya 0,003 mm/mm (Gambar 23.c.) *cycle* I memiliki *tensile stress* maksimum 381.635 MPa dan *compressive stress* -416.780 MPa, sedangkan dari *cycle* kesepuluh sampai *cycle* keseratus mengalami pengerasan dengan penambahan kekuatan tekan. *Cycle* keseratus memiliki *tensile stress* 385.436 MPa dan *compressive stress* -423.225 MPa. Penurunan yang terjadi seiring dengan *crack initiation* hanya menyebabkan *tensile stress* 305.302 MPa dan *compressive stress* -423.225 MPa. Kekuatan *tensile* secara bertahap menurun hingga mencapai 215.113 MPa dengan *compressive stress* -278.093 MPa. Kegagalan ditunjukkan dengan penurunan baik *tensile stress* maupun *compressive stress*. Hasil dan pembahasan yang ditambahkan yang telah dibahas dan disajikan pada uraian di atas akan dilengkapi dengan fakta-fakta yang berkaitan dengan *plastic strain* dan sifat *elastic* yang dihasilkan.



Gambar 23. Kurva *stress-strain* TSA dan waktu tahan 5 menit



Gambar 24. Kurva *stress-strain* TSA dan waktu tahan 10 meni



Gambar 25. Kurva *stress-strain* TSA dan waktu tahan 15 menit

Kesimpulan

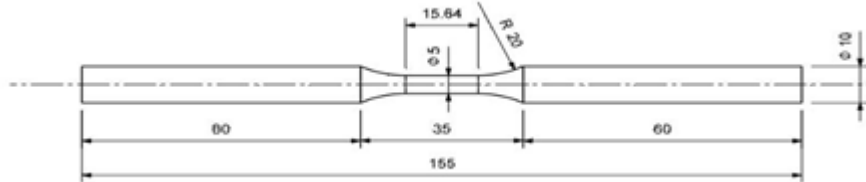
Puncak *stress* terjadi pada amplitudo *strain* 0,0025 mm / mm, terutama pada TSA 5 dan 10 menit, karena *cycle* tertinggi terdapat pada amplitudo *strain* tersebut. Puncak *stress* dan *cycle* tinggi disebabkan oleh pelunakan pada *cycle* awal kemudian secara bertahap mengeras hingga rusak. Uji *fatigue* pada amplitudo *strain* 0,0025 mm / mm dengan TSA 5 menit hingga keg-agalan memiliki total *cycle* tertinggi yaitu 10842. Pengujian amplitudo *strain* 0,0025 mm / mm dengan TSA 10 menit memiliki kuat *tensile* maksimum 231,121 MPa dan kuat tekan -399,337 MPa dan *cycle* tertinggi pada *cycle* 7417. Besi cor nodular hasil dari TSA menghasilkan *elastic strain* yang lebih besar dari *plastic strain*.

Artikel ke tiga sedang dalam Proses *Review* di *Engineering Science and Technology an International Journal Elsevier*

Low Cycle Fatigue (LCF) and Morphological Analysis of Nodular Cast Iron Faults,

Material dan Metode

Besi cor nodular yang diuji sesuai dengan standar ASTM A395 dan diuji dengan *Servo hydraulic test system* untuk mengetahui ketahanan *fatigue*.

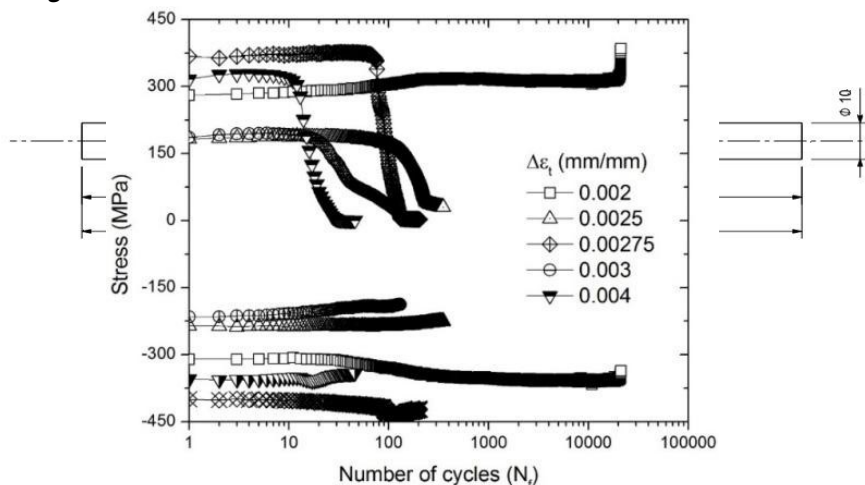


Gambar 26. Spesimen Pengujian LCF Standar ASTM 606 [52]

Pengujian LCF dilakukan pada suhu kamar, dengan spesimen sesuai standar ASTM 606 berbentuk silinder panjang total 150 mm, diameter 10 mm. Uji *low cycle fatigue* dilakukan dalam rasio *stress* $R=-1$ dengan laju *strain* $2 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ sampai $7 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ dan variasi amplitudo *strain* 0,2%-0.4%. Kurva *hysteresis loops* dan kurva *Force vs* jumlah *cycle* secara otomatis direkam selama pengujian menggunakan program MTS *Test suite* sebagai data kuantitatif untuk menentukan sifat *fatigue* dari besi cor nodular. Persamaan *Coffin Manson* akan diadopsi untuk menentukan kekuatan *fatigue* bahan secara empirik dengan memasukan *strain elastic*, *plastic strain* terhadap *cycle* yang patah. Plot kurva *hysteresis* setiap jumlah *cycle* tertentu (*cycle* pertama, 1/2 jumlah *cycle*, *cycle* terakhir) dilakukan untuk mempelajari perilaku LCF. Semua data yang diperoleh dari hasil uji LCF dianalisis menggunakan software MTS *Fatigue Analyzer*, untuk memperkuat fenomena *fatigue* besi cor nodular, dilakukan analisa patahan dengan menggunakan *scanning electron microscopy* (SEM). Fenomena pengamatan *crack fatigue* diawali dengan peristiwa permulaan *crack initiation*, *crack propagation* awal, penjaralan *crack* sampai terjadinya kegagalan. Semua data kuantitatif dan kualitatif dari hasil SEM digunakan mempelajari perilaku LCF selama pengujian *fatigue*.

Hasil dan Pembahasan

Low Cycle Fatigue Behavior



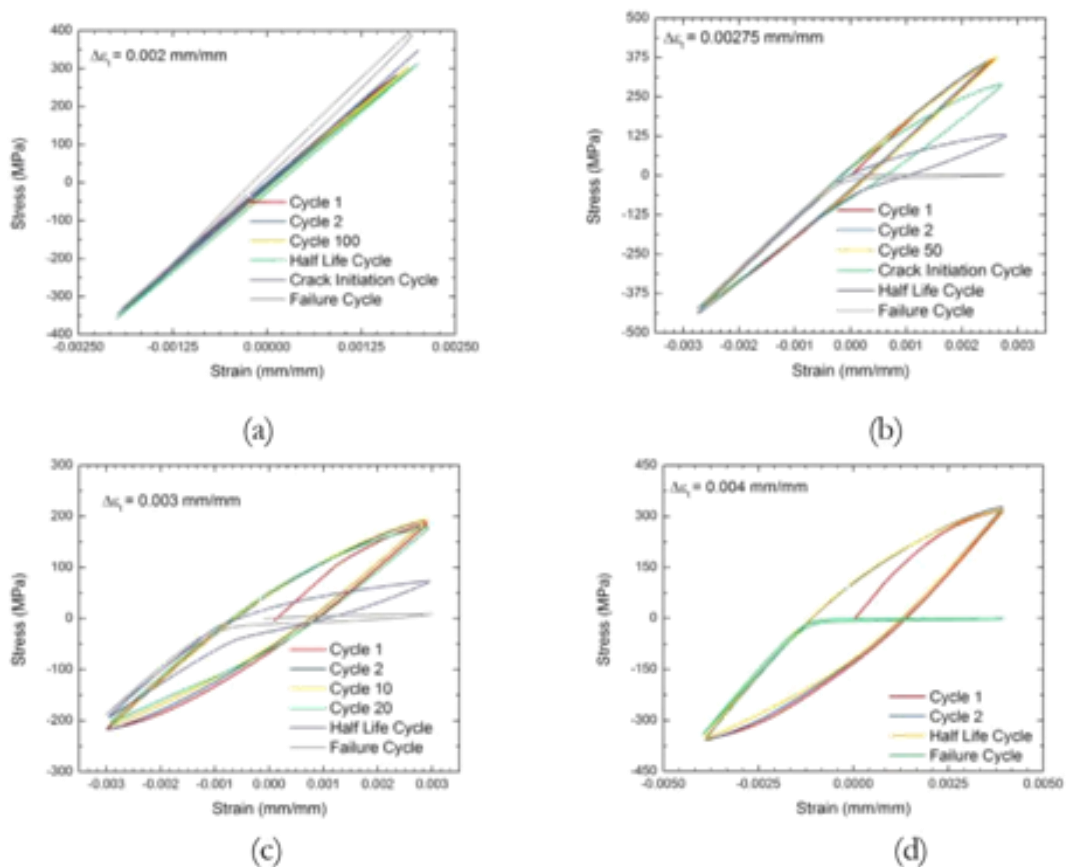
Gambar 27. *Low cycle fatigue* dari besi cor nodular

Berdasarkan Gambar 28, perilaku pengerasan dan pelunakan besi cor nodular dapat dipelajari melalui plot kurva *hysteresis* (*stress vs strain*) (Gambar 27). Gambar 28.a. menunjukkan hasil pengujian *fatigue* pada *low cycle* dengan amplitudo *strain* 0.002 mm/mm dan pada *cycle* ke-1 besi cor nodular mengalami *tensile stress* sebesar 280.7611 MPa dan *compressive stress* sebesar -309.793 MPa. Pada *cycle* kedua besi cor nodular mengalami peningkatan *tensile stress* sebesar 282,5166 MPa dan *compressive stress* sebesar -306.955 MPa. Pada *cycle* ke-100 besi cor nodular mengalami peningkatan *tensile stress* sebesar 304,2518MPa dan *compressive stress* sebesar -

330.873MPa. Pada setengah *life cycle* ($0.5N_f$), besi cor nodular kembali mengalami efek *strain hardening* yang ditandai dengan meningkatnya sebesar 313.2083 MPa dan *compressive stress* sebesar -357.129 MPa. Sebelum proses kegagalan terjadi besi cor nodular mengalamai *crack* yang di awal munculnya *crack initiation* [56] *Crack* awal masih ditandai dengan peningkatan *tensile stress* sebesar 347.787 Mpa dan *compressive stress*-346.242 MPa, dan saat terjadi kegagalan sedangkan kegagalan pada *tensile stress* 393.0695 MPa *compressive stress* -331.725 MPa

Dalam melihat perbedaan *effect strain amplitude*, mulai *elastic strain* lebih dominan pada *strain amplitude* ≤ 0.00275 , sebaliknya kalau *strain amplitude* ≥ 0.003 .

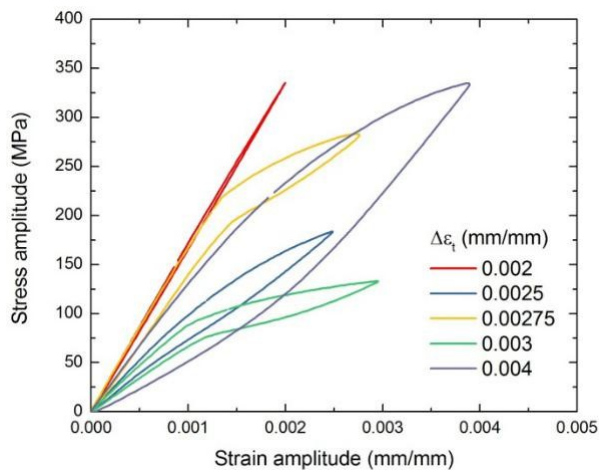
Pada Gambar.28.b., kurva histeresis pada amplitudo *strain* 0.0025 mm/ mm, dimana pada *cycle* pertama *tensile stress* puncak sebesar 183.538 MPa dan *compressive stress* -236.013 MPa, sedangkan *cycle* kedua terjadi peningka-tan *tensile stress* sebesar 185.0364 MPa dan -236.552 MPa untuk *compressive stress*. Pada setengah *cycle life* ($0.5N_f$), besi cor nodular kembali mengalami efek *strain hardening* yang ditandai dengan meningkatnya *tensile stress* lebih tajam sebesar 313.2083 MPa dan *compressive stress* sebesar -357.129 MPa. Pada amplitudo *strain* berikutnya yaitu 0.00275 mm/mm (Gambar 28.c.) dimana pada *cycle* pertama mengalami *tensile stress* maksimum sebesar 369.2572 MPa dan *compressive stress* -401.132 MPa, sedangkan pada *cy-cle* kesepuluh mengalami kenaikan *tensile stress* sebesar 375.9392 MPa dan *compressive stress* -411.238 MPa. Terjadi penurunan *tensile stress* maksimum saat *crack initiation* muncul yaitu sebesar 289.2355 MPa dan *compressive stress* -417.784 MPa. Secara berangsur terjadi penurunan *tensile stress* maksimum pada setengah *life cycle* sebesar 128.6196 MPa dan *compressive stress* -437.285



Gambar 28. Evolusi kurva *stress-strain* histeresis besi cor nodular di bawah LCF pada amplitudo *strain* yang berbeda, $\Delta\epsilon_t$ (mm/mm) (a) 0.002, (b) 0.00275, (c) 0.003 and (d) 0.004

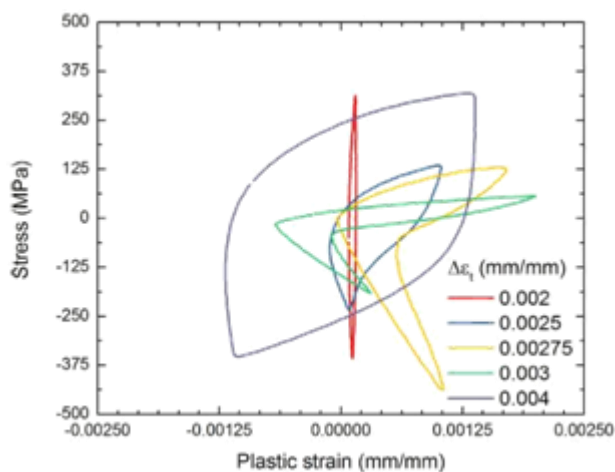
MPa, dan akhir gagal yang ditandai dengan menurunnya *tensile stress* maksimum senilai 2.723837 MPa dan *compressive stress* -423.27 MPa. Berdasarkan Gambar 28.d., menunjukkan bahwa pada

cycle satu nilai *tensile stress* maksimum berada pada angka 186.8075 MPa dan *compressive stress* sebesar -216.998 MPa, sedangkan pada cycle kedua dan cycle ke sepuluh mengalami kenaikan *tensile stress* dan *compressive stress* masing-masing 192.1928 MPa dan 194.0495 MPa untuk *tensile stress* maksimum, *compressive stress* masing-masing adalah -216.257 MPa dan -208.442 MPa. Penurunan semakin tajam terjadi saat cycle ke kedua puluh sampai kegagalan pengujian terjadi. Besarnya *tensile stress* maksimum masing-masing sebesar 73.86024 MPa dan 9.515426 MPa, sedangkan *compressive stress* masing-masing bernilai -192.844 MPa dan -187.583 MPa. Pada amplitudo *strain* terakhir yaitu 0.004 mm/mm (Gambar 28.e.) pada cycle kesatu terjadi *tensile stress* maksimum sebesar 317.9514 MPa dan *compressive stress* -354.942 MPa, sedangkan pada cycle kesepuluh mengalami kenaikan *tensile stress* sebesar 327.3872 MPa dan *compressive stress* -357.403 MPa. Terjadi penurunan *tensile stress* maksimum pada setengah *life cycle* sebesar 319.322 MPa dan *compressive stress* -353.442 MPa, dan akhir gagal yang ditandai dengan menurunnya *tensile stress* maksimum senilai 0.617347MPa dan *compressive stress*-341.058 MPa

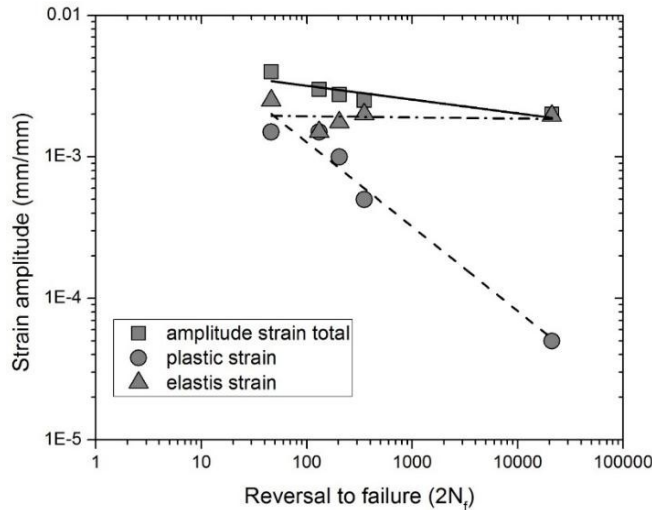


Gambar 29. Amplitudo *stress* vs amplitudo *strain* besi cor nodular pada *life* setengah *cycle*

Gambar 30 Perubahan deformasi *plastic* pada besi cor dari amplitudo *strain* rendah sampai 0.004 mm/mm. Evolusi *plastic strain* pada amplitudo *strain* 0,0025-0,003 mm / mm. *Plastic strain* terbesar diperoleh pada amplitudo *strain* 0,004 mm / mm.



Gambar 30. Amplitudo *plastic strain* vs amplitudo *stress* pada *life* setengah *cycle*



Gambar 31. Plot amplitudo *total strain* ($\Delta\epsilon/2$) vs jumlah *reversal* kegagalan ($2N_f$)

Gambar 31 menunjukkan plot amplitudo *total strain* vs *kegagalan* dalam skala log. Parameter LCF ditentukan dengan regresi linier sesuai dengan Gambar 31. Parameter LCF besi cor ulet sehubungan dengan pendekatan Coffin-Manson-Basquin diperoleh [57]

$$\Delta\epsilon / 2 = 297.511 (2N)^{-0.008} + 0.00197(2N)^{-0.596} \quad (13)$$

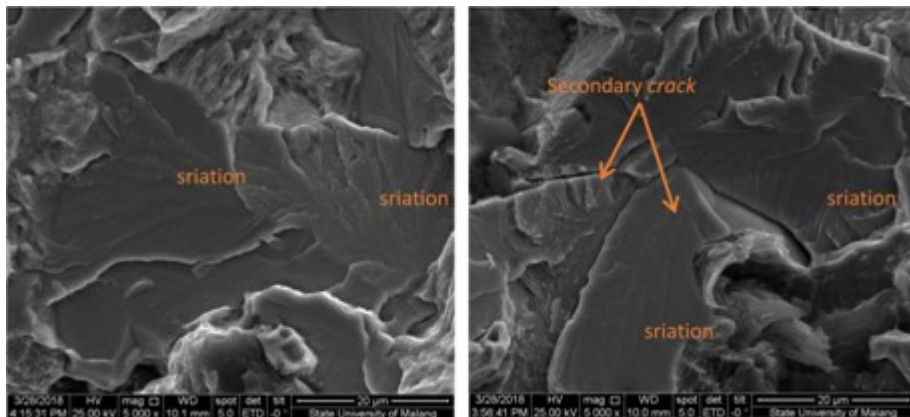
Dimana, koefisien kekuatan *fatigue* (σ'_f) = 297.511 MPa, eksponen kekuatan *fatigue* (b) = -0.008, keuletan kekuatan *fatigue* (ϵ'_f) = -0.596 dan eksponensial keuletan *fatigue*

Berdasarkan grafik hubungan amplitudo *stress-strain* (Gambar 28) menunjukkan perilaku non-Masing yang dapat diamati dari plot kurva *stress-strain* pada kondisi setengah *cycle* ($0.5N_f$) dengan variasi amplitudo berbeda setelah uji *low cycle fatigue* menunjukkan bahwa besi cor nodular mengalami perilaku sifat non-masing karena setiap lintasan amplitudo *stress* tidak berimpit (*co-incident*) pada amplitudo *strain* yang berbeda [58]. Umumnya karakteristik ini terjadi karena bahan mengalami efek *strain hardening* kinematik selama uji *cyclic*. Sedangkan hasil pengujian *Low cycle fatigue* diperoleh data *cycle 1* pada amplitudo *strain* yang berbeda dengan kondisi monotonik yang di plot secara lengkap pada Gambar 29. Berdasarkan grafik pada gambar menunjukkan bahwa pada *cycle 1* pada amplitudo *strain* 0.002-0.0275 mm/mm mengalami pelunakan *cycle* dapat dilihat dari *stress* puncak berada di bawah *cycle* monotoniknya selanjutnya pada amplitudo *strain* 0.003 mm/mm *cycle* mengalami pengerasan di atas kondisi *cycle* monotonik, kemudian pada amplitudo *strain* 0.004 mm/mm spesimen mengalami pengerasan *cycle* yang melebihi kondisi *cycle* monotonik, maka semakin besar amplitudo *strain* yang digunakan semakin besar juga pengerasan *cycle* yang terjadi pada pengujian *low cycle fatigue* [59].

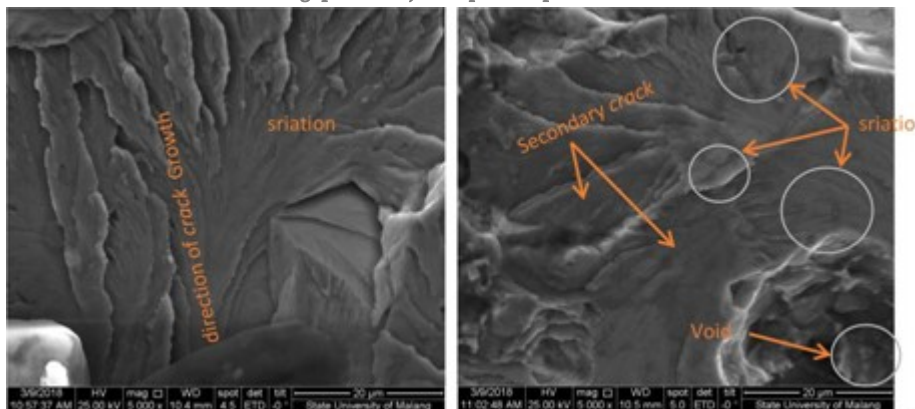
Gambar 30. di atas menunjukkan hubungan antara *stress* dan jumlah *cycle* sampai terjadinya kegagalan. Gambar 30. memperlihatkan bahwa pada amplitudo *strain* 0.002 mm/mm menunjukkan pada *cycle* kedua besi cor nodular mengalami pengerasan (*hardening*) dan selanjutnya *cycle* ketiga mengalami pelunakan (*softening*). Pada *cycle* ketiga besi cor nodular mengalami pengerasan, kemudian berlanjut hingga spesimen mengalami patah [60]. Pada amplitudo *strain* 0.0025-0.003 mm/mm menunjukkan bahwa pada *cycle* pertama sampai *cycle* sepuluh mengalami pelunakan sampai mencapai *cycle* seratus, dan selanjutnya besi cor nodular mengalami pengerasan hingga mengalami kegagalan. Pada amplitudo *strain* 0.004 mm/mm besi cor nodular menunjukkan pada *cycle* pertama hingga *cycle* ke dua mengalami pelunakan *cycle* dan selanjutnya pada amplitudo *strain* 0.004 mm/mm mengalami peningkatan pengerasan hingga mengalami kegagalan patah pada daerah *plastic*. Pada pengujian ini menunjukkan bahwa semakin kecil amplitudo *strain* semakin tinggi *cycle* yang dihasilkan yaitu sebesar 21117 *cycle*.

Fraktografi SEM

Inisiasi *microcracks* sekunder diamati di dekat *crack* utama. Ketika *crack* kecil menyebar secara bersamaan selain *crack* utama, energi *elastic* yang ada untuk perambatan dari *crack* utama jelas berkurang, terutama karena penciptaan permukaan *crack* yang lebih besar, sehingga mengura-angi tingkat umum *crack propagation* dan dalam beberapa kasus secara lokal menyebabkan *crack* secara tiba-tiba, orientasi *laths* ferit dalam matriks juga dapat mempengaruhi jalur *crack* (Gambar 32-33). Celah sering merambat sepanjang ferit-*austenite interface* yang terletak kira-kira normal terhadap arah beban yang diterapkan, *crack* kecil memotong melalui *laths* ferit bainitik yang terletak paralel terhadap arah beban yang diterapkan [61]. Di sisi lain, karena beberapa *laths* ferit bainitik biasanya memiliki orientasi yang sama, sehingga mereka membentuk *cluster laths* [62]. Namun, orientasi setiap kelompok tunggal umumnya bermacam-macam.



Gambar 32. Morfologi patahan uji LCF pada amplitudo *strain* 0.002 mm/ mm



Gambar 33. Morfologi patahan uji LCF pada amplitudo *strain* 0.004 mm/ mm

Crack initiation fatigue terjadi secara eksklusif di pori-pori yang tampak baik di permukaan atau langsung di bawah permukaan. *Decohesion* nodular grafit dan inisiasi berikutnya dan pertumbuhan *crack* mikro dapat menyebabkan defleksi dari sistem *crack* dominan [63]. Hal ini juga menunjukkan bahwa ada peningkatan yang signifikan dalam frekuensi grafit nodular sepanjang *crack* [64]. Jadi perubahan dalam struktur mikro cor mengaki batkan performa *crack* meningkat. Hal ini disebabkan kurangnya karbida eutektik dan jumlah austenit yang relatif tinggi pada struktur mikro.

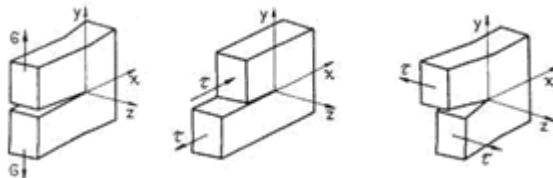
Secara umum, kombinasi mekanisme *crack propagation fatigue* yang dijelaskan, menjadi lebih keras dan lebih tahan *fatigue* dari besi cor nodular lainnya. Gejala lain yang tampak pada adalah berdasarkan bentuk patahan permukaan. Patahan permukaan hasil pengamatan SEM menunjukkan adanya *dimple* yang lebih cekung dan *striation* jika dibandingkan dengan *single step*, sehingga jenis patahan permukaan *two step* lebih bersifat ulet (*ductile*) [65].

Damage Tolerant/Fracture Mechanic (da/dN vs Δk)

Pada proses perancangan dengan pendekatan mekanika bahan un-tuk dapat menahan beban dengan besaran tertentu, besarnya beban yang dapat ditahan oleh suatu konstruksi diperoleh dengan membandingkan *stress* maksimum yang terjadi pada konstruksi/struktur akibat beban maksimum dengan kekuatan material (*yield strength*, kekuatan *tensile*). Jika *stress* maksimum yang terjadi pada konstruksi lebih besar dari *yield strength* atau kekuatan *tensilenya*, maka konstruksi akan dianggap gagal (*failure*) [66]. Kriteria kegagalan tersebut diterapkan pada berbagai kostruksi yang tidak mengalami cacat (*crack*), sedang jika material mengalami cacat (*crack*) pendekatan mekanika bahan tidak bisa diimplementasikan. Pendekatan yang sesuai jika material mengalami cacat adalah dengan mekanika *crack* (*fracture mechanics*). Parameter yang digunakan bukan lagi dengan *yield strength* maupun kekuatan *tensile*, melainkan ketangguhan *crack* (*fracture toughness*) dengan memperhitungkan faktor intensitas *stress* di ujung *crack* [1], [2], [67] Tiga parameter yang digunakan untuk menentukan kriteria kegagalan suatu konstruksi adalah *stress* yang bekerja, ukuran *crack* dan ketangguhan *crack*. [2], [22].

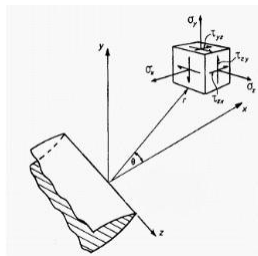
Model Pembebanan

Pada dasarnya ada tiga model pembebanan *crack*, yaitu mode I mode buka (*opening Mode*), mode II mode geser (*sliding mode*), dan mode III mode sobek (*tearing mode*) [68].



Gambar 34. Tiga jenis mode pembebanan [2], [3]

Berdasarkan ketiga mode di atas yang paling banyak terjadi adalah mode I, yaitu pembukaan *crack* akibat *stress* normal *tensile*. Analisa *stress* di ujung *crack* pada mode I digambarkan sebagai berikut:



Gambar 35. Analisa *stress* di Ujung *crack* [2], [3]

$$\sigma_x = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (14)$$

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (15)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (16)$$

Persamaan di atas dapat dituliskan dalam bentuk umum sebagai berikut:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{2\pi r} f_{ij}(\theta) \text{ dengan } K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (17)$$

Persamaan di atas terlihat bahwa *stress* di sekitar ujung *crack* hanya tergantung pada besaran $\sqrt{\pi a}$, karena suku-suku lainnya ($\sqrt{2\pi r}$) dan $f_{ij}\theta$ hanya menyatakan koordinat. Besaran $\sigma\sqrt{\pi a}$ inilah yang disebut dengan faktor intensitas *stress* (K_I) subskrip I menyatakan mode I, yaitu beban yang tegak lurus garis *crack* dan cenderung membuka *crack* [68]. Berdasarkan persamaan di atas satuan K adalah MPa \sqrt{m} atau ksi \sqrt{in} . Perlu diperhatikan bahwa persamaan itu hanya berlaku untuk pada pelat berdimensi tak berhingga, sedang jika pelat berdimensi berhingga persamaan tersebut masih berlaku dengan menambahkan faktor koreksi β , sehingga persamaan berubah menjadi [69]

$$K_I = \beta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (18)$$

Faktor intensitas *stress* K merupakan indikasi besarnya *stress* di sekitar ujung *crack* dan digunakan sebagai parameter yang menggambarkan reaksi dalam struktur yang mengandung *crack* terhadap beban luar [22].

Crack Propagation Fatigue

Berdasarkan pendekatan analisis toleransi kerusakan (*damage analysis tolerance*) LEFM mengasumsikan bahwa pada kondisi *elastic* di mana daerah *plastic* pada ujung *crack* relatif kecil dibanding panjang *crack*, maka faktor Δk dapat menjadi indikator dari distribusi *stress* pada ujung *crack* [2], [22], [70]. Menurut Paris, hubungan antara da/dN dan Δk dapat ditulis dengan persamaan [2]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (19)$$

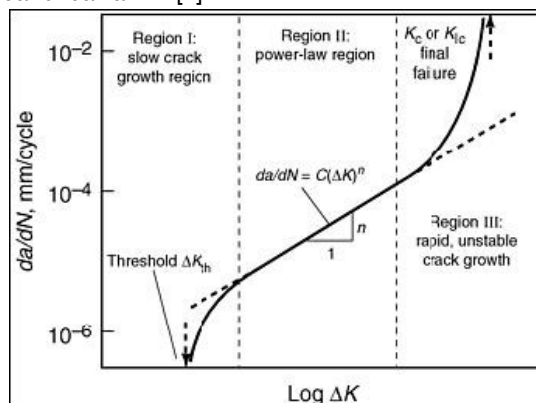
da/dN adalah perubahan panjang *crack* per *cycle* beban (a adalah panjang *crack* dan N adalah jumlah *cycle fatigue*), Konstanta C dan n tergantung dari material, sedangkan ΔK adalah faktor intensitas *stress* yang didefinisikan sebagai [1],

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (20)$$

K_{max} dan K_{min} adalah faktor intensitas *stress* maksimum dan faktor intensitas *stress* minimum, sedangkan *stress* rerata atau rasio beban (R) [67]

$$R = \frac{K_{max}}{K_{min}} \quad (21)$$

Hubungan Hukum Paris hanya menjelaskan sebagian dari pertumbuhan *crack* total material. Bahan yang paling menunjukkan variasi sigmoidal laju *crack propagation* dengan ΔK seperti yang ditunjukkan seperti gambar di bawah ini [1]:



Gambar 36. Karakteristik *Crack Propagation Fatigue*

Berdasarkan gambar di atas terdapat tiga daerah yang berbeda dari pertumbuhan *crack*: daerah I yang merupakan daerah ambang (tidak terjadi *crack propagation*), daerah II menunjukkan hubungan linier antara $\log da/dN$ dan $\log \Delta K$ Hukum Paris, dan daerah III adalah daerah yang tidak stabil, di mana nilai ΔK tinggi menyebabkan tingkat pertumbuhan *crack* yang sangat cepat menyebabkan kegagalan secara tiba-tiba (*catastrophic*) [2], [65], [67]. Estimasi *fatigue life* untuk pendekatan *fracture mechanics* ditentukan berdasarkan persamaan:

$$\Delta K = \Delta S \sqrt{\pi a \alpha} \quad (22)$$

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^n = A(\Delta S \sqrt{\pi a \alpha})^n = A(\Delta S)^n (\pi a)^{n/2} \alpha^n \quad (23)$$

$$N_f = \int_0^{N_f} \frac{da}{A(\Delta S)^n (\pi a)^{n/2} \alpha^n} = \frac{1}{A(\Delta S)^n (\pi)^{n/2}} \int_{a_t}^{a_f} \frac{da}{\alpha^n a^{n/2}} \quad (24)$$

$$= \frac{1}{A(\Delta S)^n (\pi)^{n/2}} \int_{a_t}^{a_f} \frac{da}{\alpha^n a^{n/2}} \quad (25)$$

Berikut hasil penelitian yang pernah Saya lakukan terkait dengan *fatigue crack growth rate* (FCGR) sesuai dengan pendekatan *damage tolerant fracture mechanics* terhadap dua material pesawat yaitu aluminium paduan 2024-T3 dan 2524-T3 yang mengalami proses *chemical milling* dan *shot peening*.

FCGR Hasil Chemical Milling (CHM)

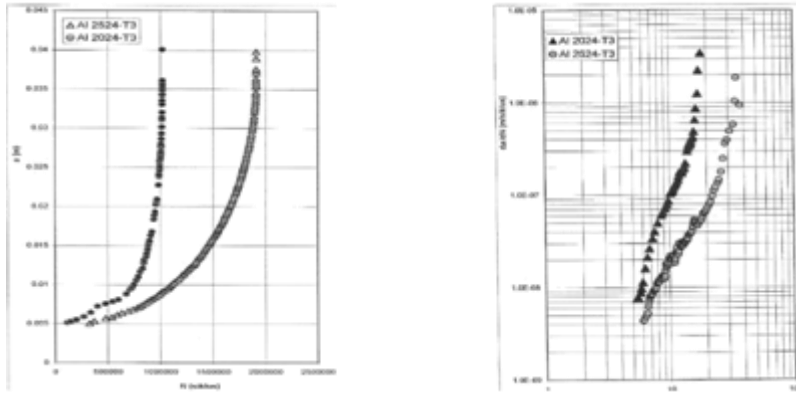
Dua bahan utama yang digunakan dalam proses **Chemical mill-ing** adalah *etchant* dan *maskant*. *Etchant* adalah larutan asam atau basa yang dipertahankan dalam kisaran komposisi kimia dan suhu yang terkontrol. *Maskant* adalah produk elastomer yang dirancang khusus yang dapat dilepas dengan tangan dan secara kimiawi tahan terhadap etsa yang keras. Penghilang *residual stress*: Jika bagian yang akan dikerjakan memiliki *residual stress* dari proses sebelumnya, *stress* ini harus dihilangkan terlebih dahulu untuk mencegah deformasi setelah **Chemical milling** [71]. Mempersiapkan permukaan dengan menghilangkan minyak dan membersihkan secara menyeluruh untuk memastikan adhesi yang baik dari bahan penutup dan penghilangan bahan yang seragam. Masking: Material masking diterapkan (melapisi atau melindungi area yang tidak akan digores). Etsa: Permukaan yang terbuka dikerjakan secara kimiawi dengan etsa. *Demask-ing*: Setelah pengerjaan, bagian-bagian tersebut harus dicuci bersih untuk mencegahnya

Reaksi lebih lanjut dengan atau paparan residu etsa, kemudian sisa bahan penutup dilepas dan bagian tersebut dibersihkan dan diperiksa. Aplikasi: **Chemical milling** digunakan dalam industri dirgantara untuk menghilangkan lapisan dangkal material dari panel kulit rudal komponen pesawat besar, bagian yang diekstrusi untuk badan pesawat.

Proses CHM dilakukan dengan mencelupkan spesimen ke dalam cairan selama waktu tertentu tergantung dari jenis cairan, sehingga mencapai ukuran yang diinginkan. Pada saat proses pengikisan (*etching*) akan timbul panas akibat adanya reaksi antara cairan etsa dengan spesimen, namun suhu yang timbul tidak terlalu tinggi sehingga tidak merusak bahan [72]. Kemudian setelah waktu tertentu, spesimen langsung dicelupkan ke dalam air untuk dibersihkan (*rinsing*).

Berdasarkan gambar grafik di bawah panjang *crack* (a) dan Jumlah *cycle* Al2524-T3 mengalami penurunan 0.68 kali lebih rendah dibandingkan dengan *raw material*, sedangkan Al2024-T3 lebih rendah lagi 0.78 dari *raw material*. Hal tersebut disebabkan berkurangnya *residual compressive stress* pada permukaan, sehingga distribusi *stress* yang bekerja pada material saat mengalami pembebanan *tensile* dinamis terjadi ketidakseimbangan, yang pada gilirannya material tidak mampu lagi menahan beban berulang dan mengalami kegagalan [73], [74]. Dampak yang dialami dari peristiwa di atas adalah *fatigue life* menurun.

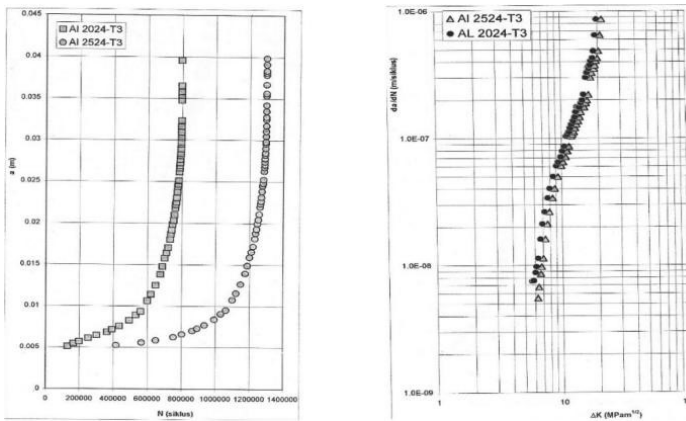
Hubungan laju perambatan reaktif *fatigue* (da/dN) dengan faktor intensitas *stress* (Δk) menunjukkan bahwa hasil *chemical milling* cenderung mengalami peningkatan laju *crack propagation*, hal tersebut ditandai dengan peningkatan nilai *n* konstanta Paris, bahwa 2524-T3 meningkat 13,3% dan 2024-T3 meningkat 16.2 %.



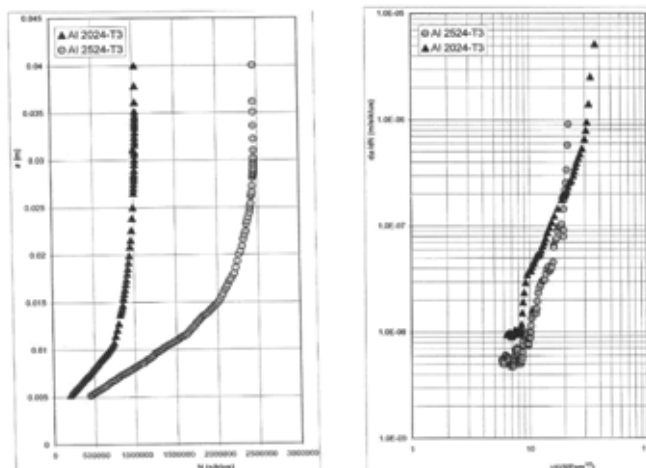
Gambar 37. Kurva a-N Raw Material dan Kurva da/dN vs Δk Raw Material

Shot peening

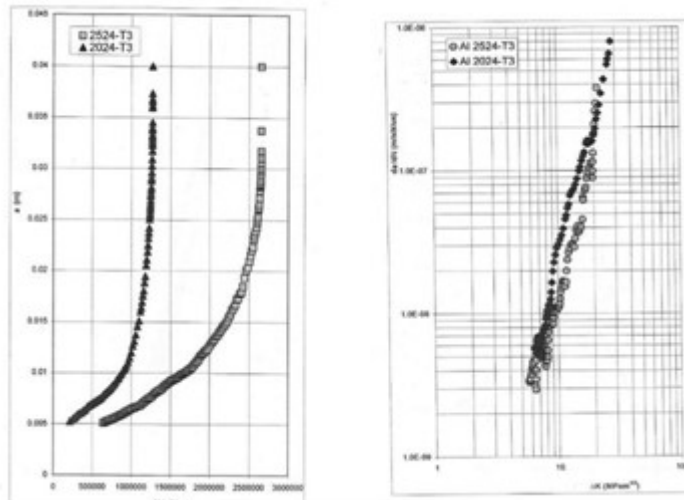
Berdasarkan penelitian terhadap 2024-T3 dan 2524-T3 hasil *shot peening* dengan intensitas yang berbeda (3, 5, 7) menunjukkan peningkatan *fatigue life* 1,7 kali Al 2524-T3 lebih besar. Sedangkan 2 sebelum diperiksa untuk pertumbuhan *crack fatigue*, bahan baku berupa besi cor 200 mm dengan diameter 25 mm ditempatkan ke dalam tungku untuk perlakuan panas dan *crack fatigue*. 2024-T3 meningkat 1,59 kalinya dibandingkan dengan *chemical milling* [75]



Gambar 38. Kurva a-N Chemical milling dan Kurva da/dN vs Δk Chemical Milling



Gambar 39. Kurva a-N hasil *shot peening* 0.003 dan kurva da/dN vs Δk hasil *Shot peening* 0.003

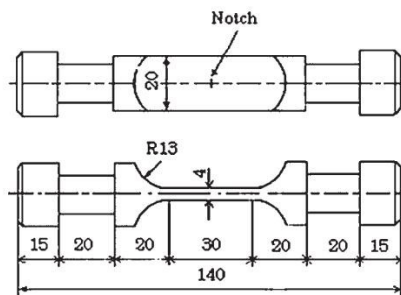


Gambar 40. Kurva a-N hasil *shot peening* 0.005 dan Kurva da/dN vs Δk hasil *Shot peening* 0.005

Publikasi lainnya terkait FCGR, telah dipublikasikan pada jurnal (*Metalurgija*, 2018, ISSN 0543-5846. *Fatigue Crack Growth Behavior Of Nodular Cast Iron Subjected To Two-Step Austempering*

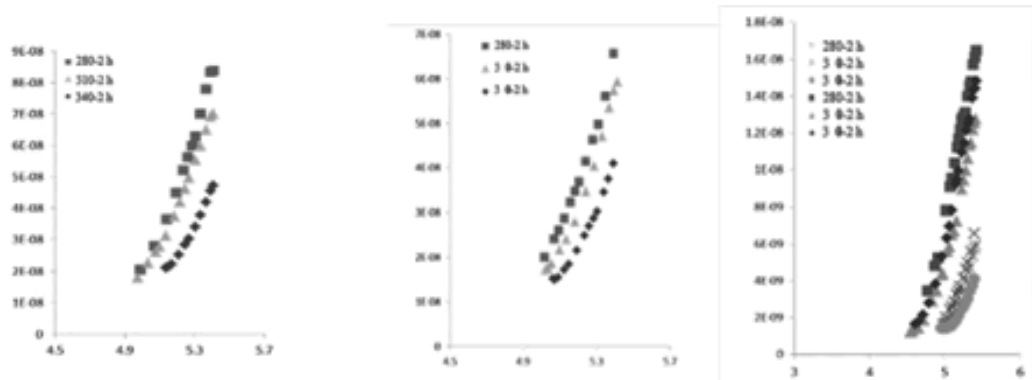
Material dan metode

Perlakuan panas dilakukan dengan dua cara yaitu *single steps austempering* dan *two steps*. Pada kedua proses tersebut, material di *austenitisasi* pada suhu 900°C dengan waktu tahan 60 menit dan kemudian didinginkan. Selanjutnya pada *single steps austempering*, material dipanaskan kembali pada suhu 280°C, 310°C, dan 340°C. Sedangkan pada proses *two steps austempering*, material terlebih dahulu dipanaskan kembali pada suhu 260°C selama 10 menit, kemudian suhu dinaikkan menjadi 280°C, 310°C, dan 340°C dengan waktu tahan 60 menit. dan 120 menit. Kemudian material tersebut didinginkan di dalam *furnace* hingga mencapai suhu kamar. Setelah perlakuan panas, spesimen besi cor nodular dibuat menggunakan mesin *Computer Numerical Control* (CNC),



Gambar 41. *Spesimen uji fatigue crack growth*

Perilaku *crack propagation fatigue* dari spesimen besi cor nodular diamati dari uji *fatigue* pada frekuensi 11 Hz. Hasil yang diperoleh disajikan dalam diagram yang menunjukkan panjang *crack* (a) dan sejumlah *cycle* (N).



Gambar 42. Grafik (da/dN) vs (Δk) besi tuang nodular dengan *two steps austempering* waktu tahan a) 60°C. menit b) 120°C c) 60°C. menit dan 120°C

Gambar 42.a. menunjukkan *crack propagation fatigue* (da/dN) dan intensitas *stress* (Δk) besi tuang nodular yang terkena *two steps austempering* dengan suhu 280°C, 310°C dan 340°C dan waktu tahan 60 ° C. menit. Gambar 42.b. menunjukkan *crack propagation fatigue* (da/dN) dan intensitas *stress* (Δk) besi cor nodular dilakukan *two steps austempering* dengan suhu 280°C, 310°C dan 340°C dengan waktu tahan 120 menit. Gambar 42.c. adalah grafik gabungan *crack propagation fatigue* (da / dN) dan intensitas *stress* (Δk) besi cor nodular yang dilakukan proses *austempering* dengan suhu 280°C, 310°C dan 340°C untuk waktu penahanan. 60 menit dan 120 menit. *Two steps austempering* dengan suhu 340°C dan waktu tahan 60 menit menghasilkan mikrostruktur NCI yang memiliki matriks ausferrit halus dengan sisa fasa austenit, serta jumlah, ukuran dan distribusi grafit yang lebih merata. Semakin lama waktu *austempering* maka semakin terbentuk matriks ausferrit. Hasilnya, kekuatan *tensile* dan ketangguhan menjadi sedikit lebih tinggi. Transformasi pada suhu yang lebih tinggi di atas 350°C dapat menghasilkan matriks ausferrit yang lebih kasar yang disebut ausferrit atas yang menampilkan struktur asikular [76]–[78], sedangkan proses pada suhu yang lebih rendah di bawah 350°C dapat menghasilkan ausk-ferit yang lebih halus disebut bottom ausferrite menunjukkan struktur yang sangat mirip dengan martensit [79], [80]. Pada *two steps austempering* dengan waktu tahan 60 menit, ketangguhan tertinggi terjadi pada suhu 340°C, sedangkan pada waktu tahan 120 menit ketangguhan tertinggi ter jadi pada suhu 340°C dan terendah pada suhu 280°C. Hal ini disebabkan matriks yang terbentuk pada suhu 310°C adalah ausferrit yang lebih rendah dengan sedikit sisa austenit dengan persentase fase ferit asikuler ferit yang lebih tinggi dibandingkan dengan austenit yang tersisa. Pada temperatur 280°C, struktur matriks yang terbentuk adalah ausferrit bagian atas (ausferrit kasar) menyerupai perlit halus. Fase ausferrit yang lebih halus pada mikrostruktur austemper dua langkah, serta jumlah, ukuran dan semakin rata. Distribusi karbon menghasilkan kekuatan dan ketangguhan yang lebih tinggi. Hal ini sesuai dengan teori bahwa transformasi pada suhu yang lebih tinggi di atas 350°C dapat menghasilkan mikro ausferrit yang lebih kasar (ausferrit atas) yang memiliki keuletan yang lebih tinggi, dan yang pada suhu yang lebih rendah dapat menghasilkan struktur yang lebih halus. *ausferrite* dengan *tensile stress* yang lebih tinggi dan keuletan yang lebih rendah. Semakin lama *austempering*, semakin rendah ketangguhan material yang dihasilkan. Hal ini sejalan dengan teori bahwa semakin panjang *austempering* maka semakin kasar mikrostruktur ausferrit.

Peningkatan ketangguhan ditemukan melalui *two steps austempering*, yang dikaitkan dengan ukuran partikel ferit yang telah dimurnikan, peningkatan kandungan karbon dan stabilitas austenit yang tersisa. Kombinasi ketangguhan tinggi dapat diperoleh dengan mengadopsi *two steps austempering*. Hasil peningkatan ADI menunjukkan bahwa *tensile* dan *yield strength* meningkat dengan bertambahnya waktu, sedangkan keuletan dan ketangguhan menurun [77]–[79].

Mekanisme pembentukan grafit berbentuk bulat pada besi cor nodular dan hasil *two steps austempering* telah banyak dipelajari oleh banyak peneliti. Grafit menjadi bulat ketika austenit dapat terbentuk di sekelilingnya dengan sempurna. Sebaliknya, grafit vermikuler terbentuk ketika kanal yang

menghubungkan grafit dengan cairan muncul di austenit karena adanya unsur intrusi. Ketika pertumbuhan grafit dalam gelembung gas berhenti, dan grafit dari inti baru di sekitar austenit tumbuh, potongan grafit akan terjadi [81]–[83].

Berdasarkan hasil pengamatan, panjang *crack* dan *cycle* sangat dipengaruhi oleh keberadaan fase matriks besi cor nodular yang dikenakan dua langkah penempaan. Persentase fasa matriks perlit pada *two steps austempering* relatif tinggi. Jalur *crack fatigue* mengubah perilaku yang dikendalikan oleh kehadiran grafit nodular. Propagasi *crack* selalu terjadi di antarmuka matriks grafit [83] a small number of test specimens are required, NDT technique. In Aus tempered Ductile Iron (ADI, sedangkan grafit nodular tetap tidak rusak.

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, matriks hasil *heat treatment* terdiri dari ferit dan perlit. *Crack* selalu dimulai pada matriks grafit dan menyebar sepanjang jalur energi secara umum sebagai antarmuka antara ferit dan perlit [84]. Dalam hal ini, jalur *crack* umum terus menerus terjadi di beberapa titik lain di semua nodul di mana kondisi yang menguntungkan ada di awal ruang baru yang membuat proses perambatan dan mengulangi proses tersebut saat menghadapi nodul lain. Mekanisme ini membenarkan adanya percabangan *crack* yang diamati dari kesesuaian antara *crack* utama dan nodul.

Permulaan *fatigue crack* terjadi secara eksklusif di pori-pori yang ada di permukaan dan langsung di bawah permukaan. Dekohesi grafit nodular dan inisiasi berikutnya serta pertumbuhan *microcrack* dapat menyebabkan defleksi sistem *crack* dominan. Hal ini juga menunjukkan bahwa terdapat peningkatan yang signifikan dalam frekuensi grafit nodular sepanjang jalur *crack* seiring dengan peningkatan level *stress* dan inisiasi lebih lanjut (terbatas pada grafit nodular pada zona *plastic* ujung *crack*) untuk *crack* yang terjadi untuk menyebarkan dominansi. ujung *crack* selama periode spesimen [85]. Dengan demikian perubahan mikro tuang yang disebabkan oleh perlakuan panas menghasilkan tingkat *kefatiguean* yang lebih tinggi dalam kinerja *crack propagation*. Hal ini disebabkan oleh kurangnya karbida eutektik dan jumlah austenit yang relatif tinggi di mikro [86].

Sebagai penutup dari pidato pengukuhan ini, perkenankanlah Saya menyampaikan penghargaan serta rasa terimakasih Saya kepada semua pihak yang telah memungkinkan semua ini terjadi.

Pertama Saya harus berterimakasih kepada Pemerintah Republik Indonesia melalui Menteri Pendidikan dan Kebudayaan yang telah mempercayakan kepada Saya untuk memangku jabatan guru besar ini. Insya Allah dengan dukungan dan kerja keras para kolega yang sebidang baik di lingkungan prodi TM maupun di luar Universitas Negeri Malang dan mahasiswa, Saya akan berusaha optimal untuk tidak menyianyikan amanah dan kepercayaan tersebut.

Kedua, Saya juga berterimakasih dan penghargaan yang tinggi kepada Rektor UM Prof. AH. Rofi'uddin, Ketua dan Anggota Senat, Komisi Guru Besar atas kesediaan dan dukungannya untuk mengusulkan pengangkatan Saya sebagai guru besar. Mudah-mudahan jabatan ini memacu Saya bekerja dan berkarya lebih baik lagi demi memberikan kontribusi sekaligus memberikan akselerasi pada pencapaian visi dan misi UM.

Ketiga, terimakasih dan penghargaan selanjutnya Saya sampaikan kepada Dekan FT Prof. Mardji dan jajarannya yang telah mendukung dan mengusulkan Saya sebagai guru besar di lingkungan Fakultas Teknik UM. Terimakasih juga Saya sampaikan kepada pimpinan Jurusan dan Prodi Teknik Mesin yang telah ikut repot mengurus kenaikan pangkat dan jabatan Saya ini. Insya Allah pengangkatan ini akan mendorong Saya untuk menempatkan Prodi/Jurusan Teknik Mesin dan Fakultas Teknik sebagai salah satu gerbong utama menuju Prodi/Jurusan/Fakultas Teknik yang dicita-citakan.

Kepada seluruh kolega Prodi dan Jurusan Teknik Mesin, Saya menyampaikan terimakasih dan penghargaan atas kebersamaan, kerjasama, kritik, dan juga kelakar yang menciptakan iklim akademik yang kondusif di Prodi TM. Suasana ini telah memberi energi dan inspirasi pada Saya untuk bekerja memajukan Prodi/Jurusan yang Saya cintai ini. Secara khusus Saya sangat berhutang budi kepada senior dan guru-guru terbaik Saya di Jurusan Teknik Mesin, yaitu Bapak Prof. Sonhadji, Drs. Madari (alm), Bapak Ir. H. Iskandar, Bapak Ir. Jules Saroinsong, Bapak Drs. H. Wakidi MM, Drs. Siswanto, M.A, bunda Dra.Any Martiningsih, M.Kes, Drs. H. Putut Murdanto, M.T, dan Dosen TM

lainnya, terutama Ibunda Dr. Hj. Sukarnati yang pada waktu itu beliau sebagai Ketua Jurusan Teknik Mesin yang telah membukakan pintu masuk dan memberikan kesempatan sekaligus kepercayaan atas karier awal Saya sebagai dosen di Jurusan Teknik Mesin sampai sekarang ini.

Saya juga menyampaikan terimakasih dan penghargaan yang tinggi kepada para kolaborator riset Saya, Rr. Poppy Puspitasari, P.hD., Dr. Femiana Gapsari (Teknik Mesin UB), Mohammad Badarudin, P.hD (Teknik Mesin Unila), Prof. Timotius Pasang (AUT New Zealand), Dr. Maykel (PNJ).

Terimakasih juga kepada tim Percepatan Publikasi UM, Talenta muda UM, Dr. M. Taufik, dkk. yang telah mendorong Saya untuk segera mengusulkan Profesor.

Saya juga berterimakasih kepada mahasiswa Saya, S1-S2 Teknik Mesin (Agus, Galih, Pradhana, Rifqi, Raymond, Dhanang, dan Riduwan) yang telah membantu mengerjakan topik riset dengan semangat dan rasa ingin tahu yang tinggi, tanpa kerja keras kalian semua mustahil riset dan publikasi yang dilakukan memberikan hasil yang optimal.

Saya sangat berhutang budi juga kepada guru-guru (mulai sekolah dasar sampai sekolah menengah atas) dan dosen Saya mulai tingkat sarjana sampai pasca sarjana yang telah membekali Saya dengan pengetahuan, *skill*, sikap, dan perilaku bermanfaat untuk mengarungi karier Saya sebagai dosen. Saya sangat berhutang budi kepada guru SDN Ds. Bedahan, Kec. Babat Kab. Lamongan, Guru SMPN 1 Kec. Babat Kab. Lamongan, dan guru STMN Bojonegoro. IKIP Malang, ITB (Prof. Satriyo Sumantri Brojonegoro, Prof. Marjono (alm), Prof. Indra Nurhadi, Prof. Djoko Suharto, Prof. Bambang Sujiatmo, Prof. I. Wayan Suweca, Dosen UGM Prof. Jamasri, Prof. Viktor Malau, Prof. Sukrisno, dan UB, Prof. Rudy Soenoko, Accst. Prof. Anindito Purnowidodo, Accst. Prof. Yudy Surya Irawan, Prof. Pratikto, Prof. Wardana, Prof. Sujito, Accst. Prof. M. Choiron yang telah membekali Saya dengan kemampuan belajar mandiri.

Selanjutnya perkenankan Saya pada kesempatan yang langka ini, mempersembahkan gelar guru besar ini kepada orang-orang terdekat yang sangat berjasa dan sangat mempengaruhi perjalanan hidup Saya sampai saat ini. Orang-orang itu adalah kedua orang tua Saya yang sangat Saya Sayangi dan hormati yang selalu mendoakan Saya, mendoakan kakak Saya dan adik-adik Saya agar jangan pernah berhenti menuntut ilmu dan menjadi insan yang sholeh dan sholihah, serta bermanfaat bagi sesama Ibunda Hj. Sariyam dan Ayahanda H. Miskan Dirdjo Harsoyo, kedua mertua yang Saya Sayangi dan hormati, Ibunda Srimunah (Almh) dan Ayahanda Soekarman (Alm), Istri Saya terkasih dan tercinta Dra. Hj. Indah Yulianti yang telah mendampingi Saya hampir 30 tahun lamanya dalam banyak suka dan sedikit duka. Anak-anakku pengobat jerih, peleraian demam Saya, yang pertama Anindya Febrianti, S.T. dan Suami Mohamad Aljoza, S.T. dan cucu Ammar Zhafran Alfarezel, Anak kedua Ananda Dwitha Yuniar M.A dan Suami Alan Sigit M.Si. cucu Angsana Kilau Malini, dan Ragil kami Andiny Trie Oktavia yang memasuki semester ke tujuh Jurusan Teknik Industri FT UB.

Akhirnya kepada hadirin yang dengan penuh kesabaran mengikuti pengukuhan guru besar ini, Saya ingin menyampaikan penghormatan dan penghargaan yang tinggi. Terimakasih dari lubuk hati yang paling dalam Saya haturkan kepada rekan-rekan Tendik baik di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Universitas Negeri Malang, terutama rekan-rekan tendik yang terlibat langsung di FT, Bapak Aldo, Ibu Aniek, dan di UM Bapak Sugianto, Ibu Titi, Bapak Dwi Waluyo dan Kabiro Bapak Amin Sidiq dan seluruh panitia yang telah mempersiapkan kegiatan ini dengan baik sekali.

Mohon maaf bila ada salah kata dan salah ucap, *Wa billahit taufik wal hidayah, Wassalamu'alaikum wa rahtmatullahi wa barakatuh.*

DAFTAR RUJUKAN

- [1] N. Perez, *Fracture Mechanics*, 2004 edition. Springer, 2007.
- [2] T. L. Anderson, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, Fourth Edition*, 4 edition. CRC Press, 2017.
- [3] D. Broek, *Elementary engineering fracture mechanics*, 1982 edition. Dordrecht; Boston: Hingham, Mass., U.S.A: Springer, 1982.
- [4] D. W. Cameron and D. W. Hoepfner, "Fatigue Properties in Engineering," Jan. 1996, doi: 10.31399/asm.hb.v19.a0002350.
- [5] Y. Nikishkov, A. Makeev, and G. Seon, "Progressive fatigue damage simulation method for composites," *International Journal of Fatigue*, vol. 48, pp. 266–279, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2012.11.005.
- [6] ASTM, *Definitions of Terms Relating to Fatigue (Withdrawn 1996)*. 1993.
- [7] H. O. Fuchs and R. I. Stephens, *Metal Fatigue in Engineering*. Wiley, 1962.
- [8] W. J. M. Rankine, "On the causes of the unexpected breakage of the journals of railway axles; and on the mean of preventing such accidents by observing the law of continuity in their construction," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 36, no. 3, pp. 178–180, Sep. 1843, doi: 10.1016/S0016-0032(43)91062-2.
- [9] Shin-Ichi Nishida, *Failure Analysis in Engineering Applications*. Butterworth-Heinemann, 2014.
- [10] Arthur J. McEvily and Jirapong Kasivitanunay, *Metal Failures: Mechanisms, Analysis, Prevention*, 2 edition. Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience, 2013.
- [11] R. J. H. Wanhill, "Chapter Two - Fatigue Requirements for Aircraft Structures," in *Aircraft Sustainment and Repair*, R. Jones, A. Baker, N. Matthews, and V. Champagne, Eds. Boston: Butterworth-Heinemann, 2018, pp. 17–40.
- [12] C. H. Wang and C. N. Duong, "Chapter 5 - Disbond and damage tolerance analysis of doubler repairs," in *Bonded Joints and Repairs to Composite Airframe Structures*, C. H. Wang and C. N. Duong, Eds. Oxford: Academic Press, 2016, pp. 113–139.
- [13] D. B. Marghitu, C. I. Diaconescu, and B. O. Ciocirlan, "3 - Mechanics of Materials," in *Mechanical Engineer's Handbook*, D. B. Marghitu, Ed. San Diego: Academic Press, 2001, pp. 119–188.
- [14] Z. Zhuang, Z. Liu, B. Cheng, and J. Liao, "Chapter 3 - Dynamic Crack Propagation," in *Extended Finite Element Method*, Z. Zhuang, Z. Liu, B. Cheng, and J. Liao, Eds. Oxford: Academic Press, 2014, pp. 33–50.
- [15] P. Mouritz, Ed., "20 - Fatigue of aerospace materials," in *Introduction to Aerospace Materials*, Woodhead Publishing, 2012, pp. 469–497.
- [16] "Fatigue of Metals: Part Three:: Total Materia Article." <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=282> (accessed Nov. 10, 2020).
- [17] Y.-L. Lee and M. E. Barkey, "Chapter 4 - Stress-Based Uniaxial Fatigue Analysis," in *Metal Fatigue Analysis Handbook*, Y.-L. Lee, M. E. Barkey, and H.-T. Kang, Eds. Boston: Butterworth-Heinemann, 2012, pp. 115–160.
- [18] M. H. Sabour, "Creep-Fatigue," in *Encyclopedia of Tribology*, Q. J. Wang and Y.-W. Chung, Eds. Boston, MA: Springer US, 2013, pp. 627–630.
- [19] B. K. Parida, "Fatigue Testing," in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, K. H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ilshner, E. J. Kramer, S. Mahajan, and P. Veyssi re, Eds. Oxford: Elsevier, 2001, pp. 2994–2999.
- [20] V. Dubois and M. A. Hirt, "Effectiveness of Improvement Methods for Welded Connections Subjected to Variable Amplitude Loading," in *European Structural Integrity Society*, vol. 22, G. Marquis and J. Solin, Eds. Elsevier, 1997, pp. 165–173.
- [21] Andoko, "The effects of strain amplitude and low cycle fatigue (LCF) behavior on nodular cast iron with two-step austempering (TSA) process," *Mater. Res. Express*, vol. 6, no. 9, p. 095705, Aug. 2019.
- [22] E.E. Gdoutos, *Fracture Mechanics: An Introduction*, 2nd edition. Springer, 2006.

- [23] P. Grad, B. Reuscher, A. Brodyanski, M. Kopnarski, and E. Kerscher, "Mechanism of fatigue crack initiation and propagation in the very high cycle fatigue regime of high-strength steels," *Scripta Materialia*, vol. 67, no. 10, pp. 838–841, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.scriptamat.2012.07.049.
- [24] Y. Murakami, "2 - Stress concentration," in *Metal Fatigue (Second Edition)*, Y. Murakami, Ed. Academic Press, 2019, pp. 13–27.
- [25] C. S. Pande, "Fundamentals of Fatigue Crack Initiation and Propagation: Some Thoughts," in *Fatigue of Materials II: Advances and Emergences in Understanding*, T. S. Srivatsan, M. A. Imam, and R. Srinivasan, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 3–15.
- [26] J. Schijve, *Fatigue of Structures and Materials*, 2nd ed. Springer Netherlands, 2009.
- [27] L. Susmel, "7 - The Modified Manson–Coffin Curve Method in fatigue assessment," in *Multiaxial Notch Fatigue*, L. Susmel, Ed. Woodhead Publishing, 2009, pp. 210–239.
- [28] M. C. Sobieraj and C. M. Rimnac, "Chapter 5 - Fracture, Fatigue, and Notch Behavior of PEEK," in *PEEK Biomaterials Handbook (Second Edition)*, S. M. Kurtz, Ed. William Andrew Publishing, 2019, pp. 67–82.
- [29] V. M. Radhakrishnan, "On fatigue ductility," *Scripta Metallurgica*, vol. 5, no. 10, pp. 855–858, Oct. 1971, doi: 10.1016/0036-9748(71)90058-5.
- [30] S. Petinov, "Strain-Life Approach: Application for Fatigue Design of Ship Superstructure Critical Detail," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 617, pp. 197–202, Aug. 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.617.197.
- [31] G. Bussu and P. E. Irving, "The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024-T351 aluminium joints," 2003, doi: 10.1016/S0142-1123(02)00038-5.
- [32] Z. Wei *et al.*, "Chapter 18 - Failure mechanisms and modes analysis of vehicle exhaust components and systems," in *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Aerospace and Automotive Industries*, A. S. H. Makh-louf and M. Aliofkhaezraei, Eds. Boston: Butterworth-Heinemann, 2016, pp. 393–432.
- [33] ASTM E8 / E8M, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International, 2016.
- [34] ASTM E606-04, *Standard practice for strain-controlled fatigue testing*. West Conshohocken. ASTM International, 2012.
- [35] H. Kwon, F. Barlat, M. Lee, Y. Chung, and S. Uhm, "Influence of Tempering Temperature on Low Cycle Fatigue of High Strength Steel," *ISIJ International*, vol. 54, no. 4, pp. 979–984, 2014, doi: 10.2355/isijinternational.54.979.
- [36] N. Tsuchida, Y. Tomota, K. Nagai, and K. Fukaura, "A simple relationship between Lüders elongation and work-hardening rate at lower yield stress," *Scripta Materialia*, vol. 54, no. 1, pp. 57–60, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.scripta-mat.2005.09.011.
- [37] P. N. Thielen, M. E. Fine, and R. A. Fournelle, "Cyclic stress strain relations and strain-controlled fatigue of 4140 steel," *Acta Metallurgica*, vol. 24, no. 1, pp. 1–10, Jan. 1976, doi: 10.1016/0001-6160(76)90140-1.
- [38] P. C. Chakraborti and M. K. Mitra, "Room temperature low cycle fatigue behaviour of two high strength lamellar duplex ferrite–martensite (DFM) steels," *International Journal of Fatigue*, vol. 27, no. 5, pp. 511–518, May 2005, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2004.09.003.
- [39] Fatemi, Z. Zeng, and A. Plaseied, "Fatigue behavior and life predictions of notched specimens made of QT and forged microalloyed steels," *International Journal of Fatigue*, vol. 26, no. 6, pp. 663–672, Jun. 2004, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2003.10.005.
- [40] V. Singh, P. V. S. S. Raju, T. K. G. Namboodhiri, and P. Rama Rao, "Low-cycle fatigue behaviour of a low-alloy high-strength steel," *International Journal of Fatigue*, vol. 12, no. 4, pp. 289–292, Jul. 1990, doi: 10.1016/0142-1123(90)90457-P.
- [41] S. R. Mediratta, V. Ramaswamy, and P. R. Rao, "Influence of ferrite–martensite microstructural morphology on the low cycle fatigue of a dual-phase steel," *International Journal of Fatigue*, vol. 7, no. 2, pp. 107–115, Apr. 1985, doi: 10.1016/0142-1123(85)90041-6.

- [42] O. Fatoba and R. Akid, "Uniaxial cyclic elasto-plastic deformation and fatigue failure of API-5L X65 steel under various loading conditions," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 94, pp. 147–159, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.tafmec.2018.01.015.
- [43] D. Lefebvre and F. Ellyin, "Cyclic response and inelastic strain energy in low cycle fatigue," *International Journal of Fatigue*, vol. 6, no. 1, pp. 9–15, Jan. 1984, doi: 10.1016/0142-1123(84)90003-3.
- [44] R. Branco, J. D. Costa, and F. V. Antunes, "Low-cycle fatigue behaviour of 34CrNiMo6 high strength steel," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 58, no. 1, pp. 28–34, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.tafmec.2012.02.004.
- [45] P. P. Sarkar, P. S. De, S. K. Dhua, and P. C. Chakraborti, "Strain energy based low cycle fatigue damage analysis in a plain C-Mn rail steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 707, pp. 125–135, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.msea.2017.09.035.
- [46] C. Ye, S. Suslov, B. J. Kim, E. A. Stach, and G. J. Cheng, "Fatigue performance improvement in AISI 4140 steel by dynamic strain aging and dynamic precipitation during warm laser shock peening," *Acta Materialia*, vol. 59, no. 3, pp. 1014–1025, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.actamat.2010.10.032.
- [47] J. Zhang, H. Di, Y. Deng, and R. D. K. Misra, "Effect of martensite morphology and volume fraction on strain hardening and fracture behavior of martensite–ferrite dual phase steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 627, pp. 230–240, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.msea.2015.01.006.
- [48] J. B. Jordon and M. F. Horstemeyer, "Microstructure-Sensitive Fatigue Modeling of AISI 4140 Steel," *J. Eng. Mater. Technol.*, vol. 136, no. 2, Apr. 2014, doi: 10.1115/1.4025424.
- [49] J. M. Tartaglia and K. L. Hayrynen, "A Comparison of Fatigue Properties of Austempered Versus Quenched and Tempered 4340 Steel," *J. of Mater Eng and Perform*, vol. 21, no. 6, pp. 1008–1024, Jun. 2012, doi: 10.1007/s11665-011-9951-y.
- [50] L. Zhou, F. Fang, L. Wang, H. Chen, Z. Xie, and J. Jiang, "Torsion delamination and recrystallized cementite of heavy drawing pearlitic wires after low temperature annealing," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 713, pp. 52–60, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.msea.2017.12.055.
- [51] B. N. Jaya, S. Goto, G. Richter, C. Kirchlechner, and G. Dehm, "Fracture behavior of nanostructured heavily cold drawn pearlitic steel wires before and after annealing," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 707, pp. 164–171, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.msea.2017.09.010.
- [52] ASTM E606, "Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing," 2004.
- [53] Andoko, R. Soenoko, A. Purnowidodo, and Y. Surya Irawan, "The Effects of Two-Steps Austempering Heat Treatment on the Tensile Strength and Toughness of Nodular Cast Iron," *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, pp. 277–282, 2014.
- [54] Z. He, Y. Zhang, W. Qiu, H.-J. Shi, and J. Gu, "Temperature effect on the low cycle fatigue behavior of a directionally solidified nickel-base superalloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 676, pp. 246–252, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.msea.2016.08.064.
- [55] S. Foletti, F. Corea, S. Rabbolini, and S. Beretta, "Short cracks growth in low cycle fatigue under multiaxial in-phase loading," *International Journal of Fatigue*, vol. 107, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2017.10.010.
- [56] B. Atzori, G. Meneghetti, and M. Ricotta, "Unified material parameters based on full compatibility for low-cycle fatigue characterisation of as-cast and austempered ductile irons," *International Journal of Fatigue*, vol. 68, pp. 111–122, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2014.05.012.
- [57] W. Jiang and P. Yang, "Experimental studies on crack propagation and accumulative mean strain of cracked stiffened plates under low-cycle fatigue loads," *Ocean Engineering*, vol. 214, p. 107744, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107744.
- [58] B. Nečemer, F. Zupanič, D. Gabriel, E. A. Tarquino, M. Šraml, and S. Glodež, "Low cycle fatigue behaviour of ductile aluminium alloys using the inelastic energy approach," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 800, p. 140385, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.msea.2020.140385.

- [59] G.-G. Youn, J.-H. Hwang, D.-Y. Lee, Y.-J. Kim, J.-W. Kim, and N. Miura, "Fracture mechanics analysis method for cracked components under very low cycle fatigue loading," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 188, p. 104191, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.ijpvp.2020.104191.
- [60] Andoko, "Crosshead Speed Effects on Ferro Casting Ductile (FCD) Ten-sile Strength and Fault Morphology," *MM SJ*, vol. 2019, no. 03, pp. 2957–2963, Oct. 2019, doi: 10.17973/MMSJ.2019_10_2019036.
- [61] Andoko, P. Puspitasari, and F. Gapsari, "Effect of Two-Step Austempering Time on Tensile Strength and Fracture Morphology of Austempered Ductile Iron (ADI)," *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, vol. 13, p. 465, Aug. 2019.
- [62] Andoko, P. Puspitasari, and F. Gapsari, "Fatigue crack growth behavior of nodular cast iron subjected to two-step austempering," *Metalurgija*, vol. 57, no. 4, pp. 317–320, Oct. 2018.
- [63] Basso, J. Sikora, and R. Martínez, "Analysis of Mechanical Properties and its Associated Fracture Surfaces in Dual-Phase Austempered Ductile iron: Ductile Iron, Dual-Phase ADI, Matrix Microstructure, Fracture Surface," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 36, no. 7, pp. 650–659, Jul. 2013, doi: 10.1111/ffe.12032.
- [64] Z. Zhang, Z. Hu, S. Schmauder, B. Zhang, and Z. Wang, "Low cycle fatigue properties and microstructure of P92 ferritic-martensitic steel at room temperature and 873 K," *Materials Characterization*, vol. 157, p. 109923, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.matchar.2019.109923.
- [65] R. A. Martínez, "Fracture surfaces and the associated failure mechanisms in ductile iron with different matrices and load bearing," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 77, no. 14, pp. 2749–2762, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.engfrac-mech.2010.07.013.
- [66] Y. Murakami, *Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions*, 2nd edition. Waltham, MA: Academic Press, 2019.
- [67] M. Janssen, J. Zuidema, and R. Wanhill, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, 2 edition. CRC Press, 2004.
- [68] R. W. Hertzberg, R. P. Vinci, and J. L. Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, 5th edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2012.
- [69] H. Popelar and M. F. Kanninen, *Advanced Fracture Mechanics*, 1st edition. New York: Oxford University Press, 1985.
- [70] M. P. Wnuk, Ed., *Nonlinear Fracture Mechanics*, 1990th edition. Wien: Springer, 1990.
- [71] K. G. Swift and J. D. Booker, "5 - Non-Traditional Machining (NTM) processes," in *Process Selection (Second Edition)*, K. G. Swift and J. D. Booker, Eds. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003, pp. 161–177.
- [72] J. F. Wilson, *Practice and theory of electrochemical machining*. New York: Wiley-Interscience, 1971.
- [73] T. De Litzia, "Influence of Shot Peening on the Residual Stresses in Spring Steel Plate," *Wheelabrator-Frye, A Signal Company Mishawaka, Indiana, U S A .*, 1984.
- [74] O. Ruud, "A review of selected non-destructive methods for residual stress measurement," *NDT International*, vol. 15, no. 1, pp. 15–23, Feb. 1982, doi: 10.1016/0308-9126(82)90083-9.
- [75] M. Widmark and A. Melander, "Effect of material, heat treatment, grinding and shot peening on contact fatigue life of carburised steels," *International Journal of Fatigue*, vol. 21, no. 4, pp. 309–327, Apr. 1999, doi: 10.1016/S0142-1123(98)00077-2.
- [76] Andoko and P. Puspitasari, "The Fatigue Crack Growth Rate Due to Single-Step Austempered Heat Treatment in Nodular Cast Iron," *MATEC Web of Conferences*, vol. 97, p. 01028, Jan. 2017.
- [77] K. S. Ravishankar, P. P. Rao, and K. R. Udupa, "Improvement in fracture toughness of austempered ductile iron by two-step austempering process," *International Journal of Cast Metals Research*, vol. 23, no. 6, pp. 330–343, Dec. 2010, doi: 10.1179/136404610X12693537270091.
- [78] H. Elsayed, M. M. Megahed, A. A. Sadek, and K. M. Abouelela, "Fracture toughness characterization of austempered ductile iron produced using both conventional and two-step

- austempering processes," *Materials & Design*, vol. 30, no. 6, pp. 1866–1877, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2008.09.013.
- [79] J. Yang and S. K. Putatunda, "Influence of a novel two-step austempering process on the strain-hardening behavior of austempered ductile cast iron (ADI)," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 382, no. 1–2, pp. 265–279, Sep. 2004, doi: 10.1016/j.msea.2004.04.076.
- [80] A. Nofal and L. Jekova, "ovel Processing Techniques and Applications of Austemper Ductile Iron (Review)," pp. 213–228, 2009.
- [81] E. Brunhuber, *Giesserei Lexikon*. Berlin: Schiele & Schön, 1994.
- [82] Horstmann, *Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff und die Grundlagen der Wärmebehandlung der Eisenkohlenstoff-Legierungen*, 5., neu Bearb. Auf.I Edition. Düsseldorf: Stahleisen, 1985.
- [83] M. Alaalam, "Fatigue Properties of an Alloyed Austempered Ductile Iron of Initially Ferritic Matrix Structure Using Thermography as NDT," Oct. 2008.
- [84] G. L. Greno, J. L. Otegui, and R. E. Boeri, "Mechanisms of fatigue crack growth in Austempered Ductile Iron," *International Journal of Fatigue*, vol. 21, no. 1, pp. 35–43, Jan. 1999, doi: 10.1016/S0142-1123(98)00055-3.
- [85] V. Cocco, F. Iacoviello, A. Rossi, M. Cavallini, and S. Natali, "Graphite nod-ules and fatigue crack propagation micromechanisme in a ferritic ductile cast iron," *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, vol. 36, no. 9, pp. 893–902, Sep. 2013, doi: 10.1111/ffe.12056.
- [86] P. Q. Dai, Z. R. He, W. Q. Wu, and Z. Y. Mao, "Mechanical behaviour of graph-ite in fracture of austempered ductile iron," *Materials Science and Technology*, vol. 18, no. 9, pp. 1052–1056, Sep. 2002, doi: 10.1179/026708302225004874

Intelligent Computation dalam Sistem Tenaga Listrik Menyongsong Era Super Grid Indonesia

Prof. Arif Nur Afandi, S.T., M.T., Ph.D.

Bagian I:

PENDAHULUAN

Bismillahirrahmanirrahim.

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

- Yth. Rektor Universitas Negeri Malang;
- Yth. Ketua, Sekretaris, dan para anggota Senat Universitas Negeri Malang;
- Yth. Ketua, dan para anggota Komisi Guru Besar Universitas Negeri Malang;
- Yth. Para sesepuh dan pinisepuh Universitas Negeri Malang;
- Yth. Para pejabat struktural Universitas Negeri Malang;
- Yth. Para dosen, tendik, dan mahasiswa Universitas Negeri Malang;
- Yth. Walikota Malang;
- Yth. Bupati Malang;
- Yth. Walikota Batu;
- Yth. Kepala Sekolah SDN Ketawanggede, Malang;
- Yth. Kepala Sekolah SMP Muhammadiyah 1, Malang;
- Yth. Kepala Sekolah SMA Negeri 4, Malang;
- Yth. Ketua Jurusan Teknik Elektro, Universitas Brawijaya, Malang;
- Yth. Ketua Jurusan Teknik Elektro, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta;
- Yth. *Chair, Vice Chair, and members of Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Indonesia Section,*
- Yth. *Chair, Vice Chair, and members of Power and Energy Society (PES) Chapter, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Indonesia Section-*,
- Yth. Ketua, Wakil Ketua, dan anggota Forum TEUB92;
- Yth. Ketua, Wakil Ketua, dan anggota Forum Pendidikan Tinggi Teknik Elektro Indonesia (FORTEI);
- Yth. Ketua, Wakil Ketua, dan anggota Forum Pendidikan Tinggi Teknik Elektro Indonesia Wilayah 7 (FORTEI7), Jawa Timur;
- Yth. Ketua, Sekretaris, dan anggota Aliansi Dosen Nahdlatul Ulama (Nahada) Indonesia;
- Yth. Ketua, Sekretaris, dan anggota Aliansi Dosen Nahdlatul Ulama (Nahada) Jawa Timur;
- Yth. Ketua, Wakil Ketua, dan anggota Persatuan Insinyur Indonesia (PU) Pusat;
- Yth. Ketua, Wakil Ketua, dan anggota Persatuan Insinyur Indonesia (PU), Wilayah Jawa Timur;
- Yth. Ketua, Wakil Ketua, dan anggota Persatuan Insinyur Indonesia (PII), Cabang Malang;
- Yth. Ketua, Wakil Ketua, dan anggota Komunitas Alumni Jepang di Indonesia (KAJI);
- Yth. Ketua, Wakil Ketua, dan anggota Alumni Indonesia dari Jepang (PERSADA);
- Yth. *Chair, Vice Chair, and members of Kumamoto University Alumni Association Indonesia (KUAAL);*
- Yth. Ketua dan anggota Persatuan Pelajar Indonesia di Kumamoto, Jepang;
- Para Hadirin dan Undangan semuanya;
- Para Pelaksana Prosesi Pengukuhan Guru Besar dan Panitia semuanya;
- Para Pendengar, Para Pemirsa *Life Streaming* dan *UM Channel* semuanya.

Alhamdulillahirabbil'alamin, pada hari ini, Kamis 19 November 2020, kita bersama bisa hadir di Graha Cakrawala, memenuhi undangan Pengukuhan Guru Besar Universitas Negeri Malang.

Alhamdulillahirabbil'alamin, pada hari ini, kita juga bisa bersama bertemu melalui wahana *Virtual UM Channel, Life Streaming*, untuk mengikuti proses Pengukuhan Guru Besar Universitas Negeri Malang.

Rasa bersyukur, *Alhamdulillahirabbil'alamin*, saya panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberi saya kenikmatan/rizki yang borakah, keluarga dan saudara yang baik, melindungi dan menakdirkan hidup saya dalam kebaikan, serta menuliskan perjalanan karir saya di Universitas Negeri Malang hingga menjadi Profesor.

Saya juga panjatkan sholawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW, yang telah membuka sejarah umat manusia dan Jaman Jahiliah yang penuh kebodohan, menuju jaman yang lebih beradab. Serta, membimbing kita semua dalam kebaikan dan kebenaran, hingga mengarungi peradaban modern saat ini.

Bagian II:

INTELLIGENT COMPUTATION

Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

Berbicara tentang peradaban manusia, maka hal itu tidak akan terlepas dari beberapa proses yang mewarnai kemunculan peradaban modern saat ini. Sebagaimana diketahui, bahwa peradaban muncul sesuai dengan pertumbuhan, perkembangan sosial dan teknologi manusia pada jaman itu [1]—[5]. Sehingga dikenal Jaman Prasejarah, Jaman Lahirnya Peradaban, Jaman Era Pascaklasik, Jaman Modern.

Pada Jaman Prasejarah dikenal adanya *Hominid* Purba (2,5-0,6 juta tahun yang lalu), dimana beberapa teknologi peralatan berbasis kayu dan batu, yang secara sederhana digunakan selama ribuan tahun, untuk bertahan hidup. Seiring waktu berjalan, peralatan yang digunakan terus diperbagus dan lebih kompleks [6], [7]. Selanjutnya, Jaman *Heanderthal* (600.000-30.000 tahun yang lalu) merupakan masa dimana mulai mengembangkan teknologi bahasa dan bekerja sebagai pemburu untuk mengumpulkan makanan. Pada jaman ini, pola kehidupan bergerak secara *nomaden*, serta ekspresi dalam hiasan juga mulai ditemui pada jaman ini. Secara umum, peradaban *nomaden* pada Jaman *Neanderthal* umumnya pindah dari satu tempat ke tempat lain tergantung jumlah hewan buruan di tempat tinggal mereka [8]—[10]. Selanjutnya masa *Homo Sapiens* (sekitar 195.000 tahun yang lalu), ditandai dengan penyebaran menuju kawasan bebas, sehingga menduduki berbagai kawasan tertentu dengan teknologi yang lebih maju [11].

Bersamaan dengan migrasi dan penyebaran tersebut, peradaban terus lahir dan berkembang, sehingga dikenal beberapa peradaban berdasarkan material dan teknologi yang digunakan, yaitu: Jaman Batu, Jaman Perunggu, Jaman Besi [12]—[14]. Secara umum, peradaban terus berkembang seiring dengan pola *nomaden* yang semakin menyebar kemana-mana, serta menempati kawasan-kawasan yang paling subur dan biasanya di sekitar sungai. Sehingga pada jaman tersebut, berkembang beberapa kota di beberapa bagian dunia yang umumnya terpusat pada lembah dan sungai yang subur, seperti: sungai Tigris dan Efrat di Mesopotamia, sungai Nil di Mesir, sungai Indus di Asia Selatan, Yangtze, dan lainnya. Dengan kondisi tersebut, maka sungai menjadi pusat peradaban yang kuat pada suatu kawasan, mengingat air diperlukan untuk membangun suatu masyarakat agraris, serta menjadi fasilitas dalam transportasi melalui jalur air. Oleh karena peradaban berkebang disekitar daerah yang subur dan sungai. Bersamaan dengan lahir dan berkembangnya berbagai peradaban, baik jaman batu, jaman perunggu, jaman besi, ataupun abad pertengahan. Maka, peradaban dan teknologi yang digunakan juga berkembang menjadi bentuk yang lebih kompleks, sesuai dengan kapasitas dan kebutuhannya. Sehingga teknologi tumbuh dengan cepat untuk mempermudah proses dan bertahan hidup.

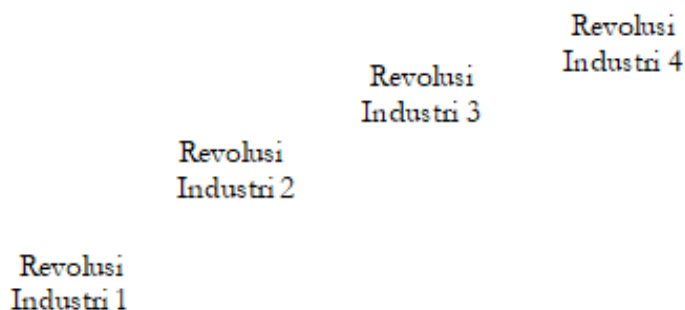
Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

Memasuki Jaman Modern, yang merupakan bagian dari perkembangan peradaban. Maka jaman ini terus berkembang sejak awal abad pertengahan, dan diwarnai dengan peristiwa-peristiwa konteporer yang terjadi sejak sekitar tahun 1900 hingga sekarang. Awal peradaban modern ditandai dengan perkembangan teknologi berbasis bubuk mesiu yang digunakan pada senjata api. Selain itu,

awal abad modern juga ditandai dengan pusat perhatian pada sains. Sehingga perkembangan teknologi benar-benar begitu cepat terasa sesuai dengan fungsinya. Selain itu pada *renaissance era*, juga memicu penggalian dan pemahaman ilmu pengetahuan jaman dahulu ke dalam bentuk ilmiah, serta ditunjang dengan temuan-temuan lainnya, sehingga mengiring dan menjadi era perkembangan peradaban dan kebudayaan cukup pesat [15], [16]. Dengan berbasis pada pengetahuan dan teknologi yang dikembangkan dengan melalui tahapan dan prosedur secara rasional, maka pada era *renaissance era* ini menjadi penanda menuju pada Revolusi Ilmiah. Dengan derasnya perubahan dan temuan pada masa revolusi ilmiah tersebut dan terjadi dimana-mana, mengubah cara pandang dan pemahaman terhadap dunia dan kekayaan alam yang ada, untuk membentuk teknologi dan peradaban yang lebih baik dan bermanfaat. Kondisi yang pesat berkembang tersebut pada era ini, akhirnya memicu pada lahirnya Revolusi Industri (RI), sebagaimana dalam Gambar 1, yang mampu mentransformasi perekonomian dunia.

Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

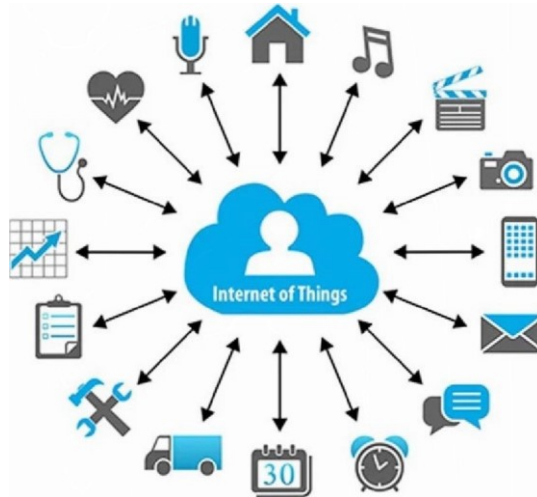
Revolusi Industri 1 (RI1) ditandai ketika ditemukannya mesin uap oleh James Watt pada abad ke-18 [17], [18]. Dengan diciptakannya mesin uap ini, pola produksi bergeser, yaitu banyak pekerjaan dialihkan menggunakan mesin uap. Sehingga pada era RI1 ini, banyak tenaga otot digantikan dengan mesin uap, serta industri berkembang dengan pesat. Pada masa ini juga, banyak industri melakukan produksi barang lebih mudah dan secara massal. Selain itu, akibat perkembangan teknologi mesin uap dalam era RI1, maka perubahan besar juga terjadi pada bidang lainnya, seperti bidang pertanian, manufaktur, pertambangan, dan transportasi.



Gambar 1. Proses revolusi industry

Selanjutnya era Revolusi Industri 2 (RI2) merupakan kelanjutan dari RI1, dimana proses produksi semakin *massive* dan dalam kapasitas besar, sehingga menuntut *energy source* lebih. Lahirnya RI2 diawali dengan adanya temuan listrik pada akhir abad ke-19. Sehingga pada era ini, banyak digunakan energy listrik untuk membantu proses produksi dan pengangkutan selama produksi berlangsung. Selain itu, transportasi juga ikut berkembang dengan ditemukannya listrik. Pada era ini, tenaga otot saat itu sudah tergantikan oleh mesin uap, perlahan mulai tergantikan lagi oleh tenaga listrik [19],[20].

Revolusi Industri 3 (RI3), menjadi era baru pengurangan peranan manusia dalam proses, sehingga tidak lagi memegang peranan penting. Seiring dengan kebutuhan dan perkembangan dalam proses produksi dan pemasaran, maka peradaban juga terus berkembang. Sehingga pada era RI3, abad informasi dimulai. Perkembangan teknologi telekomunikasi yang begitu pesat, mempercepat proses transformasi menuju penyebaran informasi yang lebih luas dengan berbagai variasi sistemnya [21], [22]. Selain itu, pada Revolusi Industri 3 juga ditandai dengan penemuan komputer dan robot, yang mengirim masuk dalam era digitalisasi.



Gambar 2. Internet of things

Revolusi Industri 4 (RI4), dipicu dengan penemuan internet dan teknologi bergeser pada *internet of thing* (IoT), serta berbasis pada teknologi cerdas, seperti pada Gambar 2. Pada era ini, pola baru telah menemukan bentuknya, yaitu *disruptive technology*. Teknologi akan muncul dengan cepat dan bergatian dengan cepat, mengancam keberadaan teknologi yang sudah ada. Sehingga gaya hidup dan peradaban juga bergeser karena perubahan yang cepat [23]–[25]. Sebagai bagian dari temuan komputer di RI3, maka kemajuan teknologi internet juga cukup cepat mempengaruhi RI4. Semua komputer tersambung ke sebuah jaringan bersama. Komputer juga semakin kecil, dengan kapasitas yang besar. Dalam perkembangan berikut, sistem semakin besar dan rumit, sehingga memerlukan komputer canggih, yang mampu menganalisis data secara tepat. Sehingga kehadiran *artificial intelligent* sangat penting untuk menangani proses tersebut.

Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

Dalam konteks *artificial intelligent* atau kecerdasan buatan, maka hal itu merupakan penambahan prinsip kecerdasan kedalam suatu sistem yang nantinya bisa beradaptasi, mengatur dan diatur melalui prosedur ilmiah. Sehingga, mampu menafsirkan data eksternal dengan benar, untuk belajar dari data tersebut, dan menggunakan pembelajaran tersebut guna mencapai tujuan dan tugas tertentu melalui adaptasi dalam *artificial intelligent* [26], [27]. Untuk melakukan itu, biasanya kecerdasan diciptakan dan dimasukkan ke dalam suatu mesin agar dapat melakukan pekerjaan seperti yang dapat dilakukan manusia. Oleh karena itu proses pembelajaran dalam mesin menjadi sangat penting, dan dilakukan dengan prosedur yang benar untuk semua proses yang ada. Dengan tuntutan seperti itu, maka *machine learning* menjadi berkembang pula sebagai bagian dalam proses cerdas yang mengolah semua data [28], [30].

Pada proses *machine learning*, maka pembelajaran mesin tersebut dapat dilakukan dengan menerapkan berbagai teknik atau metode yang berbeda. Pembelajaran yang diawasi (*Supervised learning*) maksudnya bahwa algoritma pembelajaran yang digunakan diberi data berlabel dan keluaran seperti yang diinginkan. Pembelajaran tanpa pengawasan (*Unsupervised learning*, yaitu data yang diberikan ke algoritma pembelajaran tidak berlabel, sebagai hasil proses yang ada, algoritma diminta untuk mengidentifikasi pola dalam data masukan. Pembelajaran penguatan (*peinforcement learning* mengarah pada algoritma yang berinteraksi dengan lingkungan dinamis yang mampu memberikan umpan balik dalam hal penghargaan dan pinalti.

Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

Dalam *machine learning*, maka hal yang tidak kalah penting adalah urutan *learning process* harus memenuhi kriteria sesuai dengan prosedur yang ditentukan. Oleh karena itu, langkah-langkah yang disusun secara definit dan berurutan untuk menyelesaikan suatu masalah menjadi hal utama,

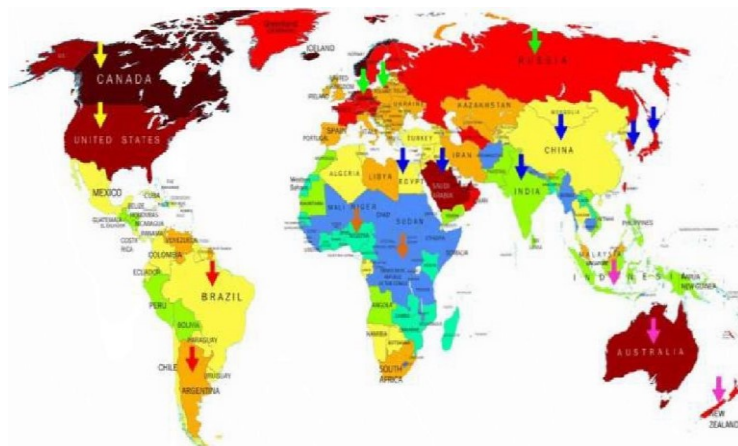
agar mampu membentuk sebuah urutan proses, sehingga dapat diekskusi untuk menyelesaikan masalah menggunakan pemrograman komputer. Pada konteks ini, algoritma memegang peranan selama proses memecahkan masalah, sehingga mampu beradaptasi dan menghasilkan *output* solusi dengan baik.

Secara umum, bentuk dasar algoritma ada tiga, yaitu Algoritma Sekuensial (*Seceptence Algorithm*), Algoritma Perulangan (*Laoping Algorithnt*), Algoritma Perulangan *Ppooping Algorithm*). *Seceptence algorithm* merupakan algoritma yang langkah-langkahnya secara urut dari awal hingga akhir. Sedangkan, *Looping algorithm* merupakan perulangan untuk menjalankan beberapa langkah tertentu secara *looping*. *Conditional algorithm* merupakan algoritma yang menjalankan langkah berikutnya apabila terdapat syarat yang sudah dapat dipenuhi.

Dengan demikian, penyelesaian berbasis komputer menjadi sangat *urgent*, dimana hal itu menuntut ketelitian dan sesuai prosedur yang ada. Oleh karena itu, proses komputasi sangat dominan berbasis optimisasi. Metode komputasi cerdas yang saat ini banyak digunakan adalah metode yang berbasis pola pikir dengan konsep dan prinsip dasar dari evolusi alam, atau *evoltionaiy algorithm* [31]—[34]. Pada awal perkebangannya, pada era tahun 1960an, ide dasar ini dikembangkan di masing-masing tempat berlainan. Di Amerika, Fogel, Owens, dan Walsh memperkenalkan *Evolutionay Programming*, sedangkan Holland (juga di Amerika) menyebut metodenya sebagai *Genetic Algorithm*. Sementara itu di Jerman, Rechenberg dan Schwefel menemukan metode *Evolution Strategies*. Selama lima belas tahun berikutnya, metode tersebut dikembangkan secara terpisah, namun sejak awal tahun 1990an ketiganya dipandang sebagai tiga jenis dari satu teknologi yang diberi nama *Evolutionay Compnting*. Di awal tahun 1990an juga bergabung dalam arus pemikiran ini suatu metode baru, yaitu *Genetic Programming*.

Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

Dalam kaitannya dengan *intelligent computation* atau komputasi cerdas yang mengakar pada *evolutionay algorithm* untuk optimisasi, maka pada kesempatan kali ini, saya akan mengulas inovasi yang sedang dan sudah saya promosikan, seperti pada akhir promosi di Gambar 3, yaitu *Harvest Season Artifiial Bee Colony* (HSABC) *Algorithm*, *Ehunderstorm Algorithm*, dan *Artifiacial Salmon Tracking Algorithm* (ASTA). Dimana *evolutionay algorithms* tersebut telah dipromosikan ke manca negara dengan berbagai publikasi dan presentasi [35]—[38].



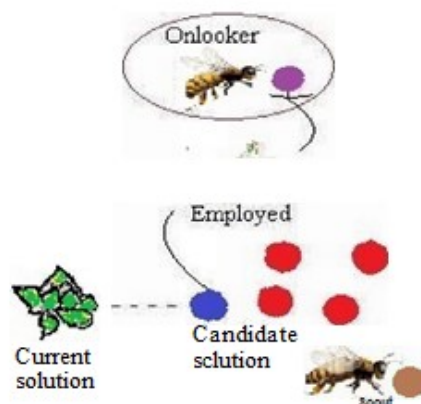
Gambar 3. Peta promosi akhir tahun 2019

Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

Harvest Season ArtifiialBee Coolony (HSABC) *Algorithm* dikembangkan pada tahun 2012 dengan inspirasi cerdas dari alam, yaitu entitas lebah dan bunga yang bermekaran. Dua komponen, lebah dan bunga ini menjadi agen utama dalam HSABC *Algorithm*. Proses intelijen atau proses cerdas yang dikembangkan, diadopsi dari kemampuan lebah untuk mengeksploitasi makanan dalam bunga-bunga [35]. Secara umum banyaknya entitas di alam sangat tidak dapat diprediksi, sehingga

dengan pola penerapan *random* dapat mencakup aktifitas untuk menirukan gerakan yang tak menentu dari objek tertentu dalam berbagai arah. Secara prinsip, entitas di lokasi yang saat ini dipilih secara acak akan pindah ke lokasi baru dengan memilih arah secara acak pula, dengan demikian menjadi tujuan baru yang dipilih. Sebagai entitas di alam, lebah bergerak secara acak saat mencari makanan. Dalam pergerakannya untuk mencari makanan tersebut, maka seekor lebah berpindah dari sumber makanan yang dipilih saat ini ke posisi baru yang sesuai dengan jumlah *nectar* untuk memperoleh makanan lainnya [39]. Selain itu, *behaviour* menunjukkan bahwa kawanan lebah hidup dalam koloni. Koloni lebah dapat meluas dalam jarak yang jauh dan mampu menjangkau dalam berbagai arah secara bersamaan, untuk mengeksploitasi sumber makanan. Selanjutnya, selama musim panen, bunga mekar di sekitar sarang dengan kualitas nektar yang bervariasi. Untuk menunjang kelangsung hidupnya, lebah terus mencari sumber makanan tambahan secara acak di dalam area tersebut. Sehingga pola cerdas untuk mendapatkan makanan dapat ditangkap sebagai pola khusus yang berurutan untuk menemukan titik dengan sebaran yang acak.

Oleh karena itu, dari inspirasi *behavior* lebah dan *harvest season* tersebut, dapat dilakukan dan diusulkan pengembangan baru dari algoritma berbasis lebah yang dinamai *HSABC Algorithm*, dan diilustrasikan pada Gambar 4. Pada *HSABC Algorithm*, bunga adalah sebagai sumber makanan. *HSABC Algorithm* menggunakan mekanisme pencarian yang dimodifikasi dan proses tersendiri untuk digunakan eksploitasi saat mencari makanan. *HSABC Algorithm* meningkatkan mekanisme pencariannya dengan menghasilkan arah acak untuk beberapa lokasi sumber makanan, serta proses *greedy* dengan menggunakan perbandingan kesesuaian makanan yang layak.



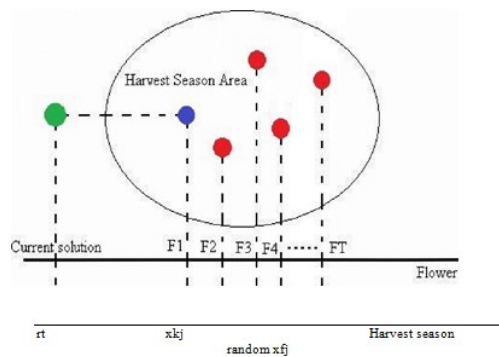
Gambar 4. Mekanisme mencari sumber makanan

Berdasarkan ilustrasi mekanisme mencari sumber makanan, maka *HSABC Algorithm* menggunakan beberapa tahapan untuk memilih sumber makanan yang optimal [35]. Langkah pertama adalah *initial generation of a population set* untuk kumpulan populasi calon makanan. Langkah kedua adalah *assigns employed bees* untuk menugaskan lebah pekerja untuk mencari sumber makanan di berbagai posisi. Pada langkah ketiga, *onlooker bee* melakukan pemilihan sumber makanan yang dianggap memiliki jumlah nektar tertinggi berdasarkan proses *greedy* setelah mendapat informasi kondisi bunga dari lebah pekerja. Langkah keempat adalah eksplorasi acak dari sumber makanan baru oleh *onlooker bee* untuk menggantikan sumber nektar yang ditinggalkan.

Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

Merujuk pada Gambar 5, bahwa proses penempatan sumber makanan atau *food sources*, dalam *HSABC Algorithm*, *firstfoof source* atau bunga pertama dieksplorasi dengan mempertimbangkan solusi saat ini (x_{ij}) dan *random reighbour* tetangga acak dari solusi saat ini (x_{kj}). Untuk mencari posisi solusi baru, maka diterapkan mekanisme seperti pencarian untuk menentukan bunga pertama atau sumber makanan pertama. Setelah posisi bunga pertama ditentukan, maka bunga lainnya dalam *HSABC* dibuat pada posisi acak di dekat bunga pertama. Setiap posisi bunga ditentukan dari bunga

pertama oleh *harvest operator*. Operator ini menunjukkan banyaknya sumber makanan sesuai dengan total populasi bunga dan setiap nilai operator dikaitkan dengan setiap bunga di area panen.



Gambar 5. Penempatan sumber makanan

Pada prinsipnya urutan semua proses komputasi dalam *HSABC Algorithm* didistribusikan ke dalam beberapa tahap untuk memilih solusi yang optimal. Dengan mempertimbangkan tahapan pemilihan makanan tersebut, maka fase lebah ditransfer ke dalam *pseudo-code* sebagaimana yang diusulkan berikut [35], [39]:

Initial Phase: membuat kumpulan populasi awal dari candidate solusi untuk berbagai sumber makanan dan evaluasi populasi untuk setiap makanan.

Employed Bees Phase: menghasilkan posisi baru sumber makanan, menghasilkan posisi baru sumber makanan selama musim panen, mengevaluasi setiap sumber makanan, menerapkan proses *greedy* untuk berbagai sumber makanan, dan menghitung nilai probabilitas berbagai sumber makanan.

Onlooker Bees Phase: menghasilkan solusi baru untuk posisi baru, menghasilkan solusi baru musim panen, mengevaluasi solusi dan menerapkan proses *greedy* pada makanan dari berbagai posisi.

Scout Bees Phase: menentukan solusi yang ditinggalkan untuk *onlooker bee*, mengganti dengan solusi baru yang diproduksi secara acak, dan mengingat solusi optimal yang telah dicapai sejauh ini.

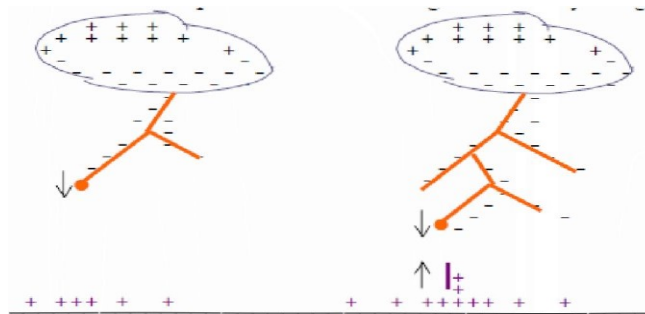
Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

Masih kaitannya dengan inovasi, maka berikut ini akan mengulas inspirasi lainnya yang berhubungan dengan proses di alam, badai petir. Inovasi yang akan saya uraikan adalah *Thunderstorm Algorithm*, suatu algoritma yang dikembangkan pada tahun 2016 dengan berlandaskan pada proses terjadinya petir [37].

Dalam runutan sejarah pengetahuan, maka Benjamin Franklin pertama kali telah memelopori cara menangkap fenomena alam dari langit [40], [41]. Dengan melakukan penelitian dan pengamatan, mencoba memahami mekanisme alam melalui idenya untuk menjelaskan apa yang terjadi saat sambaran petir terjadi. Metode yang terkenal saat itu, menguji teori petir dengan menggunakan layang-layang sebagai benda terbang yang didirikan sambil menunggu selesainya puncak menara. Setelah itu, memperhatikan tali yang terentang dan percikan api yang melonjat ditengah hujan yang turun selama badai, dan membasahi tali sehingga menjadi konduktif dalam badai petir. Di alam, badai petir terjadi secara acak di seluruh lapisan atmosfer, yang biasanya terjadi karena beberapa faktor, seperti letusan gunung berapi atau badai debu. Dibandingkan dengan angin topan, badai petir mempengaruhi area yang relatif kecil. Meski ukurannya kecil, badai petir berbahaya karena dapat membangkitkan sambaran petir yang cukup banyak.

Di alam, badai petir dapat dikenali lebih awal dari bentuk awan dan sinyal awal, seperti, seperti *puffy shape* yang meluas dan memulai tumbuh ke atas, serta membentuk jalur potensial ditandai dengan warna yang mencolok antara awan dan bumi. Fenomena ini dapat didefinisikan

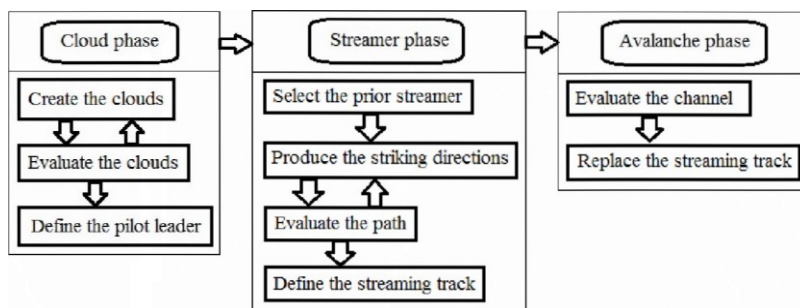
sebagai *charging* muatan dari bahan atmosfer untuk membentuk *lightning* yang dipengaruhi oleh beberapa parameter, seperti kelembaban; udara tidak stabil; dan gaya angkat. Dengan memper-timbangkan *charging* tersebut, maka proses terjadinya petir merupakan pelepasan muatan listrik berupa percikan api di awan [42]–[44]. Selain itu, secara struktur awan bermuatan negatif pada sisi bawah dan bermuatan positif pada bagian atas, sehingga memiliki beda potensial satu sama lain. Secara khusus, studi tentang badai petir telah berkembang pesat selama seabad terakhir dan banyak upaya telah dilakukan untuk memahami berbagai jenis petir, mekanisme badai, dan konsekuensinya. Secara rinci, beberapa perkembangan petir dihasilkan melalui beberapa langkah dalam hal, yaitu *charge separation*; *kader formation*; and *dischatge channel*, yang berkaitan dengan posisi awan dengan awan atau awan dengan bumi, seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Ilustrasi rambatan muatan listrik

Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

Dewasa ini, perilaku dan mekanisme alam menjadi topik yang lebih menarik dibandingkan dengan lainnya, jika itu dipandang dari sisi inovasi. Sehingga penelitian dan simulasi terus dilakukan untuk mengkaji semua proses yang ada di alam, termasuk untuk mencari model yang sesuai untuk memahami fenomena. Banyak perilaku entitas dan mekanisme proses di alam telah dipilih menjadi inspirasi bagi pengembangan metode komputasi yang berbasis *evolutionary algorithm* algoritma. Pada bagian ini, dengan mempertimbangkan fenomena badai petir, mekanisme tersebut diadopsi sebagai inspirasi untuk menghadirkan komputasi cerdas baru. Metode ini dikembangkan dengan menganggap proses di alam disajikan dalam *evolutionary algorithm* menggunakan hierarki tertentu [37], [45], [46]. Hierarki ini dituangkan dalam Gambar 7, dengan menggunakan beberapa tahap untuk menjelaskan adopsi mekanisme dalam *pseudo-code*, serta untuk membimbing semua proses cerdas dalam *Thunderstorm Algorithm* (TA).



Gambar 7. Hirarki proses dalam *Thunderstorm Algorithm*

Secara prinsip, mekanisme pencarian solusi dalam TA dilakukan dengan *striking processes* dan *channeling avalanches*, untuk melepaskan populasi muatan dari awan. Selain itu, muatan awan diisi menggunakan prosedur tertentu untuk membangkitkan kemungkinan awan yang terjadi. Selain itu, algoritma ini juga terdiri dari berbagai jarak posisi untuk *streamer* yang menggunakan *hasyar-dottsfactor* untuk menentukan target sambaran. Selain itu, setiap solusi ditempatkan secara acak berdasarkan arah acak yang dihasilkan dari titik multi sambaran. Dalam proses komputasi, TA

dijalankan menggunakan beberapa langkah untuk menentukan dan memilih solusi optimal [37], [45], [46]. *Population set* dibangkitkan pada langkah pertama untuk membentuk awan bermuatan dengan mempertimbangkan banyak *constraints* dan batasan teknis. Dalam fase ini, berbagai kombinasi disediakan untuk semua proses komputasi yang nanti mengarah pada pencarian solusi. Pada prinsipnya, urutan komputasi pada TA diberikan dalam *pseudo-code* sebagai *Cloud Phase*", *Streamer Phase*", dan *Avalanche Phase*.

- *Cloud Phase* digunakan untuk menghasilkan *cloud charge*, dan untuk mengevaluasi awan sebelum menentukan *pilot leader*.
- *StreamerPhase*, diimplementasikan untuk memilih *prior streamer* dan untuk memandu *striking directions* termasuk evaluasi jalur untuk menentukan *streaming*.
- *Avalanche Phase*, proses terakhir yang digunakan untuk mengevaluasi jalur, menggantikan jalur *streaming*, dan menyimpan proses *streamer*.

Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

Selanjutnya adalah inovasi dalam *intelligent computation* yang berkaitan dengan adopsi Salmon sebagai *evolutionary algorithm*. Inovasi ini dikembangkan pada tahun 2018, dan terus dipromosikan global. Seperti disebutkan sebelumnya, maka inovasi ini dinamai dengan *Artificial Salmon Tracking Algorithm* (ASTA), yang terinspirasi dari migrasi ikan Salmon. Secara umum, siklus hidup salmon dapat diilustrasikan dengan menggunakan perilaku alami dalam hal *spawningfish and returning home* dari laut, sebagaimana diilustrasikan dalam Gambar 8. Kehidupan awal salmon dihabiskan di sungai terus berenang ke laut untuk dewasa. Kemudian, salmon bermigrasi dari lautan, berenang ke hulu sungai tempat bertelur.

Selain itu, Salmon memiliki kemampuan yang luar biasa saat melacak jalur dan air terjun selama mencapai habitatnya. Secara alami, siklus hidup salmon mencakup *eggs dan slevins, fry, seaward migration, ocean life, spawning migration, spawning dan death*. Dalam proses hidupnya, Salmon melakukan migrasi, baik *downstream migration* atau *Hpstream migration* [47], [49]. Migrasi digunakan untuk memberi/mencari makan dan tumbuh, serta pulang untuk bertelur. Selama migrasi, Salmon berenang sangat jauh untuk menemukan rumahnya. Secara rinci, Salmon yang kembali mengikuti sungai mungkin menempuh jarak yang jauh melalui laut yang luas dan tanpa jejak. Selain itu, migrasi dapat dilakukan secara horizontal dengan berbagai kelompok populasi ikan salmon, dimana dapat dilakukan dengan mengikuti wilayah laut atau sungai dengan populasi dan kondisi ekologi yang berbeda. Sehingga memiliki dampak dan kontribusi terhadap pertumbuhan salmon dewasa yang berbeda.

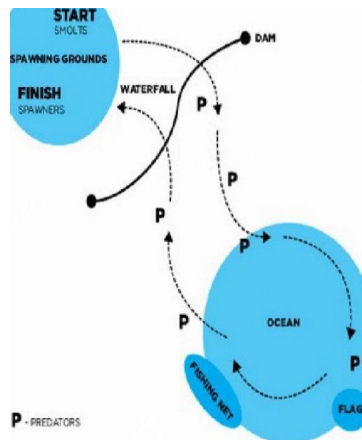


Gambar 8. *Life cycle* ikan salmon

Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

Secara alami, beberapa salmon hidup di laut hanya selama enam bulan, spesies lain bertahan selama tujuh tahun. Salmon harus berenang ke hulu dan melompati jeram dan air terjun. Salmon kembali ke aliran kelahirannya untuk bertelur atau melahirkan bayi. Sebagian besar salmon mati sepanjang perjalanan dan tidak membuatnya kembali untuk bertelur, tetapi mereka yang berhasil kembali bertelur ribuan, telur tersebut melanjutkan siklus hidup untuk generasi berikutnya. Selama migrasi dan bertalian hidup, Salmon menghadapi beberapa predator untuk menjaga siklus hidupnya.

Deengan adanya hambatan ini, maka tidak mudah untuk bermigrasi dengan aman. Sebenarnya, Salmon bisa mati selama proses migrasi, dengan banyaknya yang harus dilalui dan predator, seperti ikan, bebek, dan rakun. Ikan lain dan serangga besar memakan salmon sebagai alevin. Begitu salmon mulai bermigrasi kembali ke sungai dan sungai air tawar, maka berang-berang; elang; dan burung semuanya berburu salmon di perairan dangkal [48], [50]–[53]. Dengan mempertimbangkan perilaku ikan Salmon dan menghadapi predator, maka mekanisme migrasinya diadopsi sebagai inspirasi bagi ASTA. Dalam ASTA, proses-proses di alam disajikan dalam algoritma evolusioner menggunakan hierarki tertentu.



Gambar 9. Mekanisme *doivnstream and itpstream migration*



Gambar 10. Konsep model *migrating behaniors*

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, ASTA dikembangkan dengan mengacu pada mekanisme eksplorasi selama migrasi ikan salmon, sehingga hal itu menjadi inspirasi untuk pengembangan algoritma dengan meminimalkan hierarki migrasi salmon. Selain itu rangkaian proses migrasi ikan salmon *downstream migatrion* dan *upstream migration*, menghadapi berbagai kendala dan predator, juga dijadikan prosedur dalam proses komputasi, seperti pada Gambar 9.

Selanjutnya, karakteristik kecepatan komputasi dalam ASTA dibangun dengan mempertimbangkan prosedur dan tahapan migrasi yang dilakukan oleh Salmon. Langkah-langkah ini juga mempertimbangkan peristiwa di alam yang merupakan proses eksplorasi dan kelangsungan hidup melawan berbagai predator. Sehingga dapat merefleksikan keadaan nyata yang ada di alam, sebagaimana pendekatan model pada Gambar 10. Secara prinsip, prosedur dalam ASTA mencakup [46], [53]:

- > *Exploration step*, merupakan tahapan migrasi yang digunakan sebagai tahapan untuk menemukan muara sungai yang sekaligus memandu dalam pemilihan tujuan yang memungkinkan.
- > *Survival step*, digunakan untuk melacak dan mengetahui tujuan atau target kembali dan digunakan untuk melacak solusi sesuai dengan jumlah cabang yang berbeda.

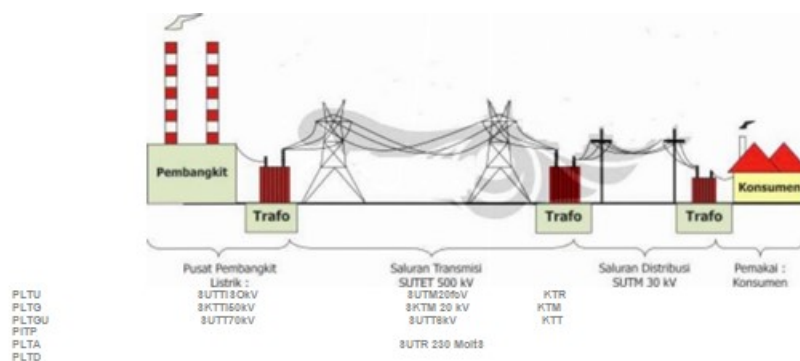
Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

Intelligent computation semakin banyak digunakan dalam implementasi di berbagai bidang, disamping itu *evolutionaty algorithm* juga banyak dikembangkan sesuai dengan inspirasi yang dijadikan rujukan. Dengan demikian memberi peluang lebih luas untuk melakukan improvisasi dan perbaikan pada setiap metode yang sebelumnya muncul. Dalam kontraks implementasi pada bidang *engineering*, maka kasus-kasus riil banyak dekati dengan metode ini, baik pada teknik mesin, teknik sipil, teknik elektro, ataupun teknologi industri. Hal ini menunjukkan penerapan yang beragam pada berbagai problem sesuai dengan masalah yang muncul. Dari sisi penerapan di bidang teknik elektro, *evolutionaty algorithm* juga diterapkan pada bidang sistem tenaga listrik. Kajian dalam *power system* ini, memiliki variasi yang cukup banyak, sehingga proses optimasi juga dapat dilakukan untuk persoalan-persoalan riil yg berdasarkan pada proses *realtime* dan *system operation*. Oleh karena itu, implementasinya bisa pada bagian sistem pembangkitan, sistem transmisi dan sistem distribusi. Disisi lain, penggunaan metode cerdas juga bisa digunakan pada sisi pengelolaan beban.

Bagian III: SISTEM TENAGA LISTRIK

Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

Sistem tenaga listrik dewasa ini merupakan kebutuhan vital untuk menunjang proses penyediaan daya listrik yang bukan saja monopoli daerah perkotaan, tetapi sudah merambah ke desa-desa terpencil. Untuk melayani daerah perkotaan dan pedesaan perlu ditingkatkan pula pembangunan jaringan distribusi sehingga terjadi pemerataan pemakaian energi listrik [45], [54], [55]. Mengingat pentingnya energi listrik bagi kehidupan masyarakat dan bagi pembangunan nasional, maka suatu sistem tenaga listrik harus bisa melayani pelanggan secara baik, dalam arti sistem tenaga listrik tersebut aman dan andal. Aman berarti bahwa sistem tenaga listrik tidak membahayakan manusia dan lingkungannya. Handal berarti sistem tenaga listrik dapat melayani pelanggan secara memuaskan misalnya dalam segi kontinuitas dan kualitas. Prinsip kerja dari sistem tenaga listrik di mulai dari bagian pembangkitan kemudian disalurkan melalui sistem jaringan transmisi pada gardu induk dan dari gardu induk disalurkan serta dibagi-bagi kepada pelanggan melalui saluran distribusi, sebagaimana yang dilukiskan dalam struktur interkoneksi dalam Gambar 11.



Gambar 11. Struktur sistem tenaga listrik

Dipandang dari sisi energi, maka saat ini energi listrik merupakan salah satu kebutuhan dasar yang tumbuh dan berkembang dengan pesat sejalan dengan pertumbuhan penduduk dan meningkatnya pembangunan. Listrik merupakan energi sekunder yang sekaligus dapat dikonversikan dalam bentuk pemakaian energi akhir yang berupa cahaya, panas dan gerak. Oleh karena itu menuntut dilakukan pengelolaan secara benar, dan manajemen energi harus lebih diartikan sebagai usaha untuk menaikkan efisiensi penggunaan energi. Salah satu cara upaya untuk menghemat penggunaan energi, terutama energi listrik, adalah dengan mengendalikan beban pada sisi permintaan.

Konsep tatakelola energi menjadi penting, hal ini dikenal dengan nama *Demand side management* (DSM). Pada strategi ini, dilakukan beberapa upaya, seperti menghemat listrik

pelanggan, mengurangi laju konsumsi energi, mengurangi beban puncak tanpa mengurangi kepentingan konsumen, menunda investasi pembangkit listrik baru, dan menekan dampak negatif terhadap lingkungan [56]. Selanjutnya, masalah pada *power sistem* yang sering muncul adalah masalah yang berkaitan dengan dinamika dan stabilitas untuk merespon gangguan yang terjadi, karena masalah dinamika dan stabilitas sistem tersebut sangat berkaitan erat dengan unjuk kerja sistem yang mencerminkan kondisi setiap saat, baik kondisi normal maupun kondisi gangguan, serta pemulihannya. Gangguan pada sistem tenaga listrik dapat menimbulkan osilasi tegangan, frekuensi dan daya. Selain itu, sistem tenaga listrik juga merupakan sistem yang dinamis, karena performansi sistem tenaga listrik berubah-ubah setiap saat. Disamping itu, beban juga berubah-ubah setiap saat, akibatnya pembangkit juga mengalami perubahan setiap saat, karena harus mensuplai daya yang sesuai dengan kebutuhan beban pada saat itu.

Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

Secara praktis, sistem tenaga listrik dibangun dengan menggunakan struktur interkoneksi untuk menyediakan energi listrik bagi beban-beban yang tersebar di berbagai area pelanggan. Sistem ini dapat dikelompokkan dalam bagian utama yang mencakup sistem pembangkitan, sistem transmisi, dan sistem distribusi yang melingkupi pusat-pusat beban. Salah satu tujuan utama dari struktur interkoneksi ini adalah untuk mengurangi biaya operasional melalui kombinasi berbagai tipe pembangkit yang digunakan, selain itu juga untuk meningkatkan keandalan dan lainnya. Pada kondisi ini, pengurangan biaya operasi dapat ditentukan dengan pembagian produksi daya ke masing-masing unit pembangkit dengan mengacu pada total daya beban melalui *economic load dispatch* (ELD). Tujuan utama ELD adalah untuk menjadwalkan daya keluaran masing-masing unit pembangkit yang diintegrasikan dalam sistem interkoneksi dengan berbasiskan pada total biaya minimum yang dibatasi oleh berbagai kendala operasional [35].

Sejak meningkatnya upaya perlindungan lingkungan dari berbagai polusi atmosfer, maka ELD mulai mempertimbangkan emisi polusi dari proses pembakaran bahan bakar fosil yang digunakan pada berbagai pembangkit-pembangkit termal. Selain itu, dengan disepakatinya *Clean Air Act Amendments* pada tahun 1990, semakin menjadikan operasi sistem tenaga listrik harus memodifikasi strategi operasi bagi pembangkit-pembangkit termal dengan memasukkan persoalan kontribusi polusi udara melalui *emission dispatch* (EmD), sebagai upaya mengurangi produksi polusi dari operasi sistem tenaga listrik [45].

Dengan mempertimbangkan EmD, masalah ELD menjadi salah satu persoalan yang krusial untuk dioptimasi, dengan target utama total biaya operasi yang minimum sekaligus pengurangan produksi polusi bagi setiap unit pembangkit. Secara umum, masalah ELD dan EmD dapat ditransformasikan menjadi suatu fungsi tunggal sebagai tujuan optimasi melalui rumusan *combined economic and emission dispatch* (CEED) yang berorientasi pada minimasi biaya bahan bakar dan pengurangan produksi polusi. Secara operasional, dengan difokuskannya pada total biaya selama rentang periode operasi, maka sistem tenaga listrik dioperasikan dengan berbasiskan pada total biaya minimal untuk setiap alokasi daya keluaran bagi *unit commitment* selama 24 jam beroperasi [57].

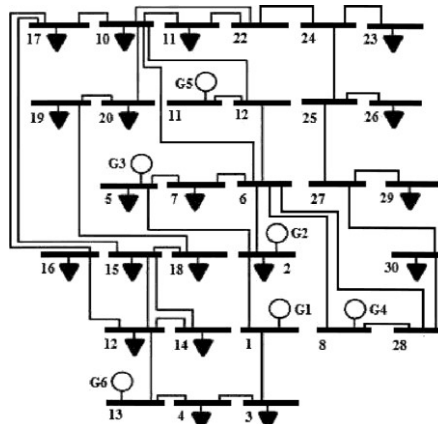
Dengan demikian, persoalan operasional tersebut akan berlangsung secara dinamis dari waktu ke waktu. Terkait dengan kondisi ini, maka situasi ini juga akan berdampak pada penjadwalan daya keluaran setiap unit pembangkit yang tergabung dalam sistem interkoneksi, dan akan berakibat pada bervariasinya biaya pembangkitan selama memproduksi daya keluaran, dan juga akan berdampak pada dinamika operasi ekonomis (DOE) untuk mengkoordinasikan seluruh unit pembangkit. Oleh karena itu, persoalan ELD and EmD menjadi masalah dinamika yang terkait langsung dengan perubahan kondisi permintaan daya beban setiap waktu dan hal ini menjadi persoalan DOE yang sangat penting bagi sistem tenaga listrik dalam menyediakan energi listrik dengan orientasi total biaya minimum dengan kualitas performansi teknis yang telah ditetapkan.

Untuk mengatasi situasi dinamis ini, persoalan CEED diakomodasi menjadi suatu permasalahan *dynamic economic dispatch* (DED), dengan mempertimbangkan dinamika perubahan daya beban dan berbagai batasan-batasan operasional selama 24 jam. Selain itu, daya keluaran unit-unit pembangkit diproduksi dengan mempertimbangkan berbagai batasan operasional dan *ramp*

limits bagi masing-masing unit pembangkit yang sedang bekerja, *ramp limits* ini digunakan untuk membatasi setiap perubahan daya keluaran pada unit-unit pembangkit, agar tetap berada pada rentang perubahan daya keluaran yang diijinkan bagi setiap perubahan jam operasi. Saat ini DED menjadi salah satu isu utama dalam DOE *real time* pada sistem tenaga listrik yang bekerja selama 24 jam, dengan berbagai kondisi dinamis beban dan kriteria operasional.

Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

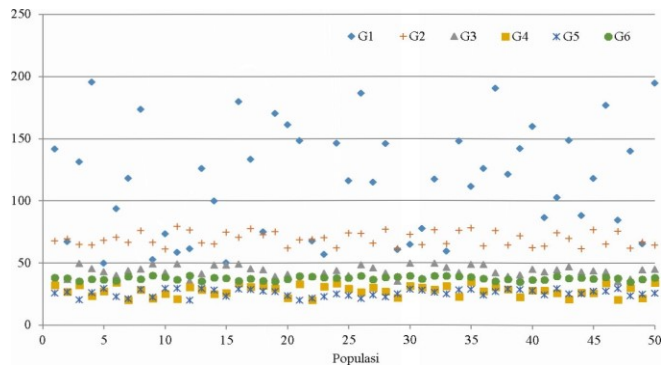
Untuk mengatasi persoalan DED, maka pada pembahasan ini diberikan demonstrasi aplikasi HSABC *Algorithm* sebagai salah satu inovasi yang diterapkan untuk menyelesaikan kasus tersebut. Pada implementasi ini, Multi sumber makanan (MSM) atau *multiple food sources* digunakan untuk merepresentasikan bunga yang bermekaran dan terletak di area musim, melalui prinsip keacakan atau *random principles*. Untuk mengeksploitasi sumber makanan, maka lebah terbang secara acak ke berbagai arah agar mendapatkan makanan, dengan perpindahan dari posisi satu ke posisi lainnya untuk menyeleksi makanan yang tersedia di area musim bunga. Dalam algoritma HSABC, MSM disusun oleh sumber makanan pertama (SMP) atau *the first food source* dan sumber makanan lainnya (SML) atau *the other food sources*. Masing-masing SML diletakan pada posisi tertentu terhadap SMP dengan menggunakan operator panen (OP) atau *harvest operator*. Pada penentuan MSM, SML akan didahului pemilihan SMP pada setiap proses penyediaan makanan. Dengan mengacu pada proses ini, maka algoritma HSABC dinyatakan dalam empat tahapan pseudo-codes yang melibatkan agen-agen utama berupa lebah pekerja (*employed bees*), lebah pemantau (*onlooker bees*), dan lebah pencari (*scout bees*). *Pseudo-codes* tersebut dinyatakan dalam pembangkitan populasi (*generating population*), eksplorasi sumber makanan (*food source exploration*), eksploitasi makanan (*food exploitation*), dan penggantian sumber mati (*abandoned replacement*). Pada bagian ini, aplikasi intelijen komputasi HSABC *Algorithm* diterapkan pada persoalan DOE berbasis problem DED yang menggunakan model IEEE-30 bus system dengan kondisi perubahan daya beban selama 24 jam.



Gambar 12. Model IEEE-30 bus system

Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

Tabel dan Gambar berikut ini merupakan performansi penggunaan metode optimasi dalam sistem tenaga listrik, yang dihasilkan dari proses HSABC *Algorithm*. Kajian utama ditujukan untuk menguji kemampuan algoritma HSABC dalam menyelesaikan persoalan DOE berbasis *problem* DED, dengan mempertimbangkan batas-batas operasional untuk menentukan komitmen daya keluaran pembangkit tenaga listrik. Berdasarkan hasil eksekusi program untuk 24 jam selama 100 siklus didapatkan, bahwa hasil proses komputasi algoritma HSABC diberikan dalam Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3. Masing-masing tabel menunjukkan hasil optimasi dengan mempertimbangkan kondisi perubahan setiap beban pada setiap jam operasi. Selanjutnya, pergerakan komputasi dalam mencari solusi terbaik selama 24 jam diilustrasikan dalam Gambar 13, yang mencakup kecepatan konvergen algoritma HSABC dalam memilih solusi optimal menggunakan faktor kompromi sebesar 0,5.



Gambar 13. Populasi kandidat solusi

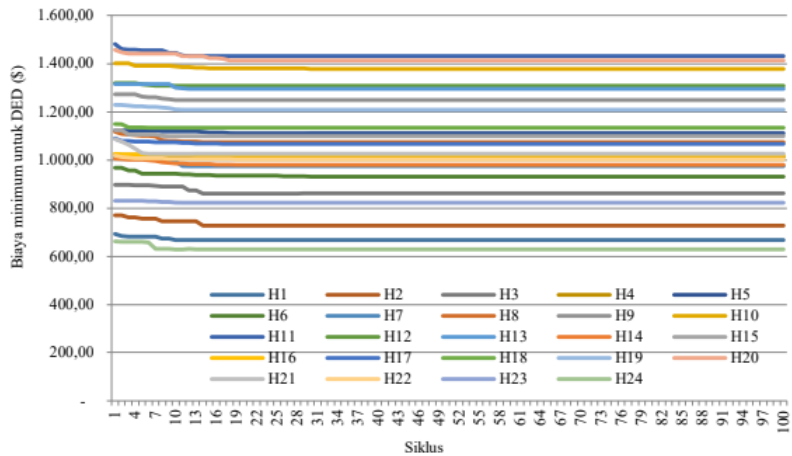
Tabel 1. Hasil statistic persoalan DOE berbasis DED

| Jam | Max. | Min. | Mean | Median | Std. Dev. | siklus |
|-------|----------|----------|----------|----------|-----------|--------|
| 01:00 | 692,60 | 667,33 | 668,64 | 667,33 | 4,47 | 10 |
| 02:00 | 769,96 | 727,11 | 730,57 | 727,11 | 9,62 | 14 |
| 03:00 | 896,60 | 861,37 | 864,98 | 861,37 | 9,82 | 14 |
| 04:00 | 1.023,83 | 1.011,30 | 1.011,97 | 1.011,30 | 2,06 | 17 |
| 05:00 | 1.121,88 | 1.110,43 | 1.111,91 | 1.110,43 | 3,51 | 19 |
| 06:00 | 967,31 | 930,35 | 933,46 | 930,35 | 7,01 | 16 |
| 07:00 | 1.008,49 | 974,02 | 976,96 | 974,02 | 9,08 | 11 |
| 08:00 | 1.117,05 | 1.073,56 | 1.075,94 | 1.073,56 | 8,03 | 15 |
| 09:00 | 1.272,36 | 1.248,55 | 1.249,98 | 1.248,55 | 5,13 | 10 |
| 10:00 | 1.401,02 | 1.377,46 | 1.379,59 | 1.377,46 | 5,10 | 17 |
| 11:00 | 1.481,03 | 1.430,93 | 1.433,49 | 1.430,93 | 8,22 | 12 |
| 12:00 | 1.318,95 | 1.307,43 | 1.308,02 | 1.307,43 | 2,35 | 10 |
| 13:00 | 1.314,80 | 1.295,07 | 1.296,91 | 1.295,07 | 5,68 | 12 |
| 14:00 | 1.005,66 | 979,35 | 981,39 | 979,35 | 5,90 | 19 |
| 15:00 | 1.123,39 | 1.098,57 | 1.099,43 | 1.098,57 | 3,76 | 14 |
| 16:00 | 1.024,83 | 1.019,17 | 1.019,61 | 1.019,17 | 1,11 | 19 |
| 17:00 | 1.089,54 | 1.066,38 | 1.067,49 | 1.066,38 | 3,37 | 17 |
| 18:00 | 1.148,98 | 1.133,45 | 1.133,76 | 1.133,45 | 2,14 | 10 |
| 19:00 | 1.228,54 | 1.208,03 | 1.209,33 | 1.208,03 | 4,27 | 11 |
| 20:00 | 1.456,95 | 1.412,83 | 1.416,94 | 1.412,83 | 9,93 | 18 |
| 21:00 | 1.086,64 | 1.025,74 | 1.027,49 | 1.025,74 | 8,87 | 13 |
| 22:00 | 1.018,23 | 1.002,05 | 1.002,74 | 1.002,05 | 2,26 | 19 |
| 23:00 | 830,27 | 822,31 | 822,88 | 822,31 | 1,89 | 11 |
| 24:00 | 661,96 | 628,70 | 630,63 | 628,70 | 7,40 | 13 |

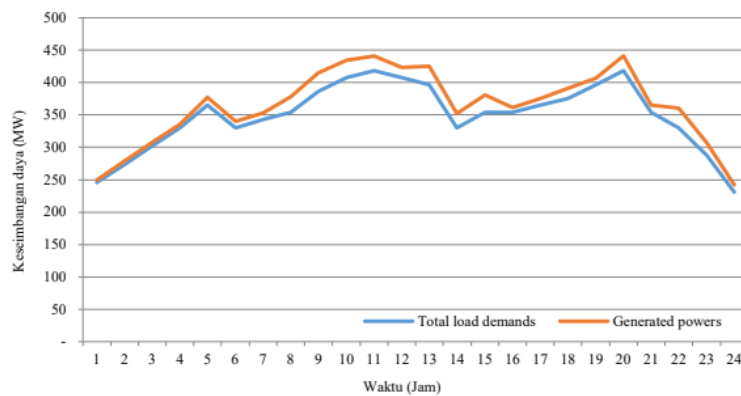
Tabel 2. Komitmen daya keluaran unit pembangkit

| Jam | Daya keluaran (MW) | | | | | | Total |
|-------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | G1 | G2 | G3 | G4 | G5 | G6 | |
| 01:00 | 59,75 | 66,34 | 36,77 | 24,40 | 26,98 | 35,12 | 249,36 |
| 02:00 | 88,06 | 68,74 | 35,00 | 27,78 | 24,49 | 35,00 | 279,07 |
| 03:00 | 94,27 | 77,72 | 50,00 | 22,63 | 25,06 | 38,19 | 307,87 |
| 04:00 | 99,87 | 89,72 | 62,00 | 28,33 | 20,00 | 35,93 | 335,85 |
| 05:00 | 157,16 | 85,70 | 51,48 | 25,07 | 20,00 | 37,91 | 377,32 |
| 06:00 | 133,42 | 75,05 | 39,94 | 35,00 | 20,02 | 36,74 | 340,17 |
| 07:00 | 153,74 | 72,76 | 36,86 | 27,47 | 27,10 | 35,54 | 353,47 |
| 08:00 | 159,42 | 79,68 | 35,00 | 33,75 | 33,10 | 37,01 | 377,96 |

| Jam | Daya keluaran (MW) | | | | | | Total |
|-------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | G1 | G2 | G3 | G4 | G5 | G6 | |
| 09:00 | 187,76 | 73,57 | 49,19 | 41,75 | 27,55 | 35,00 | 414,82 |
| 10:00 | 230,36 | 64,42 | 41,17 | 33,85 | 29,31 | 35,78 | 434,89 |
| 11:00 | 240,25 | 62,50 | 45,34 | 28,83 | 25,90 | 37,69 | 440,51 |
| 12:00 | 214,38 | 64,62 | 44,91 | 32,94 | 26,13 | 40,00 | 422,98 |
| 13:00 | 191,31 | 71,36 | 50,00 | 40,94 | 32,13 | 39,75 | 425,49 |
| 14:00 | 136,31 | 64,62 | 48,92 | 35,84 | 27,28 | 39,04 | 352,01 |
| 15:00 | 159,49 | 72,72 | 50,00 | 38,84 | 23,35 | 36,24 | 380,64 |
| 16:00 | 143,26 | 79,81 | 44,77 | 32,02 | 23,78 | 37,52 | 361,16 |
| 17:00 | 165,99 | 69,12 | 40,98 | 35,00 | 24,62 | 40,00 | 375,71 |
| 18:00 | 177,57 | 64,37 | 44,37 | 43,00 | 25,11 | 36,42 | 390,84 |
| 19:00 | 187,56 | 73,73 | 44,41 | 38,17 | 25,90 | 36,74 | 406,51 |
| 20:00 | 227,51 | 80,00 | 41,96 | 31,25 | 22,88 | 37,73 | 441,33 |
| 21:00 | 170,58 | 69,98 | 35,74 | 33,14 | 20,78 | 35,28 | 365,50 |
| 22:00 | 155,94 | 68,77 | 35,00 | 41,14 | 20,00 | 39,88 | 360,73 |
| 23:00 | 102,52 | 69,52 | 40,29 | 34,54 | 20,00 | 40,00 | 306,87 |
| 24:00 | 63,65 | 60,00 | 35,00 | 28,10 | 20,30 | 35,00 | 242,05 |



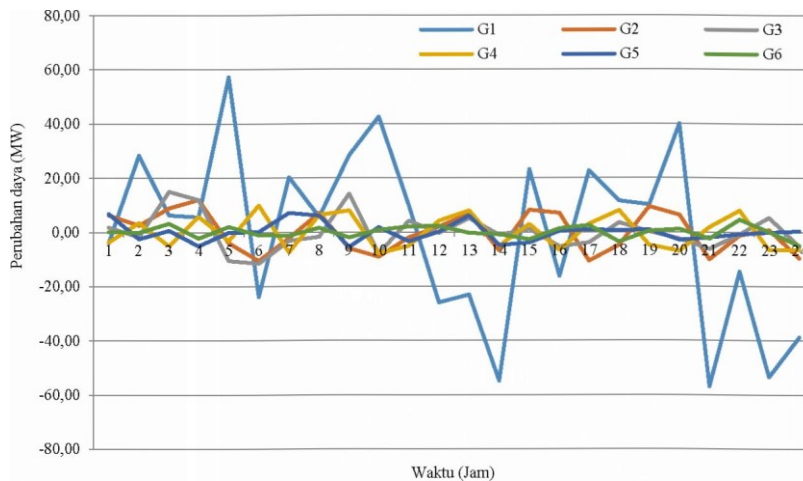
Gambar 14. Karakteristik kecepatan komputasi untuk 24 jam



Gambar 15. Keseimbangan total daya keluaran dan total beban

Tabel 3. Biaya operasi minimal berbasis DED selama 24 jam

| Jam | Biaya komponen operasi (\$) | | | |
|-------|-----------------------------|-------------|----------|---------------|
| | Emisi | Bahan bakar | Tiap jam | Total operasi |
| 01:00 | 766,87 | 567,79 | 1.334,66 | 1.334,66 |
| 02:00 | 840,56 | 613,65 | 1.454,21 | 2.788,87 |
| 03:00 | 989,56 | 733,18 | 1.722,74 | 4.511,61 |
| 04:00 | 1.146,10 | 876,50 | 2.022,60 | 6.534,21 |
| 05:00 | 1.208,94 | 1.011,93 | 2.220,87 | 8.755,08 |
| 06:00 | 1.041,15 | 819,55 | 1.860,70 | 10.615,78 |
| 07:00 | 1.071,29 | 876,75 | 1.948,04 | 12.563,82 |
| 08:00 | 1.167,40 | 979,71 | 2.147,11 | 14.710,93 |
| 09:00 | 1.319,08 | 1.178,01 | 2.497,09 | 17.208,02 |
| 10:00 | 1.360,50 | 1.394,42 | 2.754,92 | 19.962,94 |
| 11:00 | 1.392,19 | 1.469,66 | 2.861,85 | 22.824,79 |
| 12:00 | 1.329,80 | 1.285,06 | 2.614,86 | 25.439,65 |
| 13:00 | 1.368,10 | 1.222,05 | 2.590,15 | 28.029,80 |
| 14:00 | 1.109,81 | 848,89 | 1.958,70 | 29.988,50 |
| 15:00 | 1.204,47 | 992,68 | 2.197,15 | 32.185,65 |
| 16:00 | 1.130,51 | 907,83 | 2.038,34 | 34.223,99 |
| 17:00 | 1.158,79 | 972,73 | 2.131,52 | 36.355,51 |
| 18:00 | 1.214,64 | 1.052,26 | 2.266,90 | 38.622,41 |
| 19:00 | 1.273,51 | 1.142,55 | 2.416,06 | 41.038,47 |
| 20:00 | 1.393,34 | 1.432,32 | 2.825,66 | 43.864,13 |
| 21:00 | 1.100,97 | 950,51 | 2.051,48 | 45.915,61 |
| 22:00 | 1.094,96 | 909,14 | 2.004,10 | 47.919,71 |
| 23:00 | 944,64 | 699,97 | 1.644,61 | 49.564,32 |
| 24:00 | 726,79 | 530,62 | 1.257,41 | 50.821,73 |



Gambar 16. Perubahan daya keluaran selama 24 jam

Tabel 2 menyajikan produksi daya keluaran yang diijinkan untuk membentuk unit komitmen pembangkit yang memenuhi semua perubahan daya beban secara fluktuatif seperti yang perlihatkan pada Gambar 15. Tabel 2 ini menjelaskan penjadwalan daya keluaran pembangkit untuk mendukung DOE selama operasi 24 jam dan memuat perubahan daya keluaran yang diperbolehkan dalam rentang batas maksimum dan minimum seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16. Selama 24 jam beroperasi, total biaya pembangkitan dari setiap jam diberikan dalam Tabel 3 yang mencakup biaya bahan bakar dan biaya emisi.

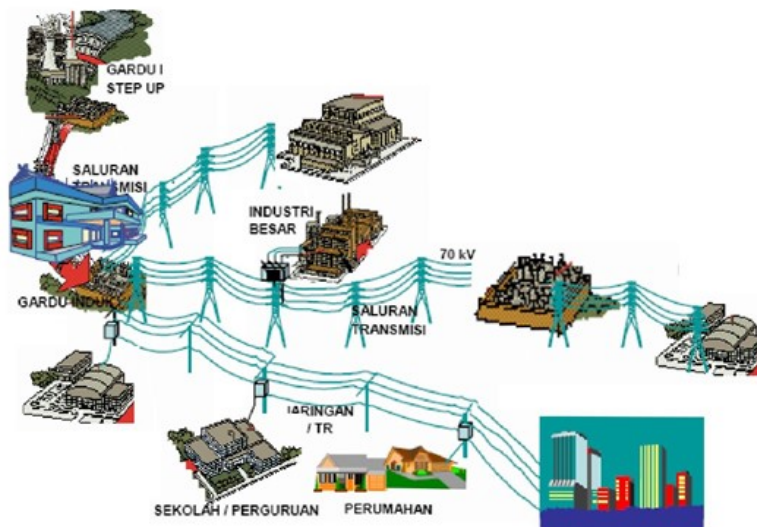
Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

Paparan tersebut merupakan contoh implementasi komputasi cerdas yang diterapkan pada kasus riil dengan model *Standard*, sehingga dapat melihat performansi dan perubahan yang akan terjadi. Namun, bagaimanakah dengan sistem eksis yang ada saat ini, maka hal itu patut dikelola dengan baik dan menjaga ketersediaan pasokan daya bagi pelanggan, baik dalam wilayah atau antar wilayah.

Bagian IV: **NUSANTARA POWER GRID**

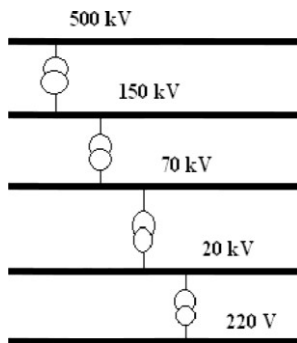
Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

Kebutuhan energi listrik saat ini bukan menjadi monopoli masyarakat daerah perkotaan, tetapi menjadi kebutuhan setiap orang termasuk yang tinggal di desa-desa terpencil. Sehingga untuk melayani daerah perkotaan dan pedesaan perlu ditingkatkan pembangunan jaringan distribusi yang memadai, agar terjadi pemerataan pemakaian energi listrik di setiap daerah. Selain itu untuk mendukung kebutuhan energi listrik, maka perlu dilakukan peningkatan kapasitas produksi, baik melalui perluasan kapasitas pembangkit atau penambahan pembangkit baru, sehingga mampu memenuhi kebutuhan pelanggan yang semakin meningkat tingkat pemakaiannya, selain itu peningkatan kualitas dan kapasitas jaringan transmisi/distribusi juga sangat penting, serta perilaku efisiensi dalam menggunakan energi listrik bagi konsumen juga sangat penting [38].



Gambar 17. Struktur operasional sistem tenaga listrik

Secara proses, dengan memperhatikan Gambar 17, energi listrik dibangkitkan oleh generator dengan mengkonversikan energi primer yang tersedia, daya listrik yang dihasilkan oleh pembangkit akan dikirim ke beban melalui saluran transmisi dan distribusi. Umumnya generator membangkitkan energi listrik dengan menggunakan tegangan berkisar 13,8 kV 18 kV dan 24 kV, kemudian pada gardu induk tegangan akan dinaikan, kemudian tegangan yang telah dinaikan pada saluran transmisi digunakan untuk mengirim daya sesuai kebutuhan transmisi. Meskipun pengiriman daya listrik menggunakan tegangan yang telah dinaikan pada saluran transmisi, namun tegangan tersebut diturunkan kembali pada jaringan distribusi sampai ke beban. Dari Gambar 18 diketahui bahwa, pada sistem tenaga listrik dikenal beberapa jenis tegangan layanan yang cukup beragam sesuai yang digunakan, yaitu sistem 500 kV, 150 kV, 70 kV, 20 kV, 380/220 volt.



Gambar 18. Klasifikasi tegangan

Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

Merujuk pada Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT. PLN, sebagaimana dalam Gambar 19, bahwa pelayanan jaringan listrik secara nasional dibagi menjadi lima regional, yaitu: Jawa-Bali, Sumatera, Kalimantan, Sulawesi, dan Nusa Tenggara-Maluku-Papua. Sistem Jawa Bali, yaitu mencakup daerah-daerah di pulau Jawa, Madura dan Bali, dilayani oleh Unit Pelayanan Sistem Jawa-Bali yang meliputi Jawa Barat dan Banten, DKI Jakarta & Tangerang, Jawa Tengah dan DI Yogyakarta, Jawa Timur dan Bali.

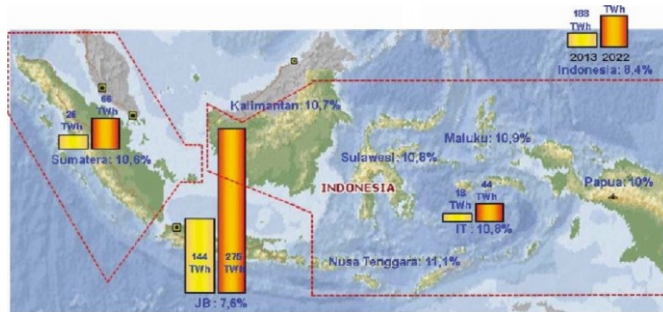
Sistem Sumatera, yaitu mencakup Pulau Sumatera dan sekitarnya seperti Riau Kepulauan, Batam, Bangka, Belitung, Nias. Sistem ini dilayani oleh Sistem Sumatera yang meliputi Wilayah Nanggroe Aceh Darussalam, Sumatera Utara, Sumatera Barat, Riau, Sumatera Selatan, Jambi, Bengkulu, dan Bangka Belitung. Sistem Kalimantan, yaitu mencakup Pulau Kalimantan yang terdiri dari empat provinsi. Sistem ini dilayani oleh Sistem Kelistrikan yang meliputi Kalimantan Barat, Kalimantan Selatan dan Tengah, Kalimantan Timur, dan termasuk Pulau Tarakan. Sistem Sulawesi, yaitu mencakup daerah-daerah di pulau Sulawesi, dilayani oleh Sistem Kelistrikan Sulawesi yang meliputi Sulawesi Utara Tengah Gorontalo dan Sulawesi Selatan-Tenggara-Barat. Sistem Nusa Tenggara, yaitu mencakup Pelayanan Kelistrikan di kepulauan Nusa Tenggara dilaksanakan untuk Nusa Tenggara Barat dan Nusa Tenggara Timur. Sistem Maluku dan Papua, yaitu mencakup daerah-daerah di provinsi Maluku dan Maluku Utara serta provinsi Papua dilayani oleh Sistem Kelistrikan di bawah Maluku dan Maluku Utara, dan Papua.

Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

Gambar 20 menunjukkan proyeksi penjualan energi listrik ke pelanggan hingga 2022, dengan kebutuhan listrik sistem Jawa Bali diperkirakan akan meningkat dari 144 TWh pada tahun 2013 menjadi 275 TWh pada tahun 2022, atau tumbuh rata-rata 7,6% per tahun. Untuk Indonesia Timur pada periode yang sama, kebutuhan listrik akan meningkat dari 18,5 TWh menjadi 46 TWh atau tumbuh rata-rata 11,2% per tahun. Wilayah Sumatera tumbuh dari 26,5 TWh pada tahun 2013 menjadi 65,7 TWh pada tahun 2022 atau tumbuh rata-rata 10,6% per tahun.



Gambar 19. Pembagian wilayah operasi



Gambar 20. Proyeksi penjualan listrik PLN 2013-2022

Sebagaimana direncanakan, pada periode tahun 2018-2027 pengembangan sistem penyaluran berupa pengembangan sistem transmisi dengan tegangan 500 kV dan 150 kV di sistem Jawa-Bali serta tegangan 500 kV, 275 kV, 150 kV dan 70 kV di sistem Indonesia Timur dan Sumatera. Pembangunan sistem transmisi secara umum diarahkan kepada tercapainya kesesuaian antara kapasitas pembangkitan di sisi hulu dan permintaan daya di sisi hilir secara efisien. Disamping itu juga sebagai usaha untuk mengatasi *bottleneck* penyaluran dan perbaikan tegangan pelayanan. Oleh karena itu, sangat penting untuk dipikirkan jaringan listrik yang terpadu dan terintegrasi secara menyeluruh di Indonesia.

Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

Sebagai ilustrasi pentingnya *national electric backbone system*, mari kita pikirkan beberapa proyek prestisius di Indonesia. Palapa Ring Indonesia, yang merupakan proyek infrastruktur telekomunikasi berupa pembangunan serat optik di seluruh Indonesia sepanjang 36.000 kilometer. Proyek itu terdiri atas tujuh lingkaran kecil serat optik (untuk wilayah Sumatera, Jawa, Kalimantan, Nusa Tenggara, Papua, Sulawesi, dan Maluku) dan satu *wN/w/z* untuk menghubungkan semuanya. Proyek Palapa Ring ini akan mengintegrasikan jaringan yang sudah ada (*existing network*) dengan jaringan baru (*new network*) pada wilayah timur Indonesia (Palapa Ring-Timur). Disamping itu, Palapa Ring merupakan bangunan tol informasi dalam bentuk serat optik yang menghubungkan seluruh wilayah Indonesia, sebagai infrastruktur tulang punggung jaringan telekomunikasi *broadband*, seperti diilustrasikan pada Gambar 21.



Gambar 21. Palapa ring Indonesia

Selanjutnya, proyek serupa yang menyatukan wilayah Indonesia adalah dari segi bisnis, yaitu berupa Proyek Tol Laut. Tol laut adalah konsep untuk memperbaiki proses pengangkutan logistik di Indonesia, sehingga proses distribusi barang (terutama bahan pangan) di Indonesia menjadi semakin mudah. Kemudian, berdampak pada harga bahan pokok yang semakin merata di seluruh wilayah Indonesia. Secara umum, konsep tol laut ini bukan serta merta membuat jalan tol di

atas laut. Melainkan jalur pelayaran bebas hambatan yang menghubungkan hampir seluruh pelabuhan di Indonesia.



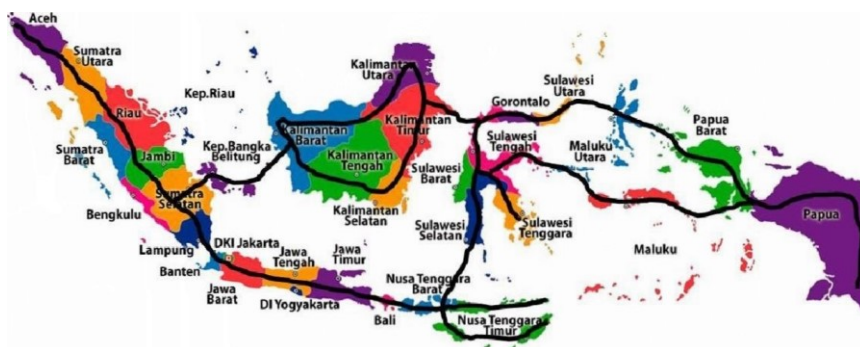
Gambar 22. Tol laut Indonesia

Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

Sebagaimana diulas pada bagian sebelumnya, energi listrik merupakan hal yang penting untuk menunjang keperluan sehari-hari dan proses industri, maka kehadiran *Supergrid* menjadi sangat penting, untuk mendukung pemerataan pembangunan dan pergerakan ekonomi di semua wilayah Indonesia. Oleh karena itu, listrik menjadi salah satu parameter yang dampaknya langsung pada masyarakat sebagai pengembangan infrastruktur dalam pembangunan. Dengan demikian, menjadi tantangan besar dari penyedia listrik untuk melakukan pemerataan akses listrik yang stabil dan handal. Salah satu cara untuk mengatasi tantangan tersebut adalah dengan model *Nusantara Power Grid* yang menyatukan semua infrastruktur kelistrikan secara nasional, baik yang saat ini *ewist* maupun yang akan dibangun.



Gambar 23. Model 1 *Nusantara Power Grid*



Gambar 24. Model 2 *Nusantara Power Grid*

Untuk mewujudkan *Nusantara Power Grid*, maka dapat memanfaatkan semua infrastruktur yang ada dan menyiapkan/mengkondisikan lainnya untuk mendukung hal tersebut. Secara prinsip, jaringan ini merupakan *national electric backbone system* yang menghubungkan pulau-pulau induk/besar di Indonesia. Dengan demikian, *Nusantara Power Grid* berfungsi menjadi jalur tol untuk mentransmisikan daya listrik jarak jauh menggunakan tegangan tinggi. Secara konsep, Gambar 23 dan Gambar 24 menunjukkan model untuk *Nusantara Power Grid*, dengan dua pola pendekatan bentuk interkoneksi. Secara teknis, untuk membentuk backbone system tersebut dapat menggunakan transmisi listrik bawah laut atau bawah tanah.

Dengan adanya *Nusantara Power Grid*, diharapkan Energi Baru dan Terbarukan dapat dimanfaatkan dan diintegrasikan ke sistem lebih optimal. Hal ini akan mampu mendukung pengembangan terhadap potensi energi di daerah-daerah. Oleh karena itu, dengan adanya interkoneksi induk ini, diharapkan menjadi salah satu solusi untuk menambahkan pasokan listrik lintas pulau. Serta, mampu mengalirkan listrik ke wilayah-wilayah di Indonesia, untuk menunjang pertumbuhan ekonomi pada pusat pembangunan dan menjadi pusat-pusat beban baru.

Sehingga pemerataan akses energi listrik dapat diwujudkan, serta peningkatan produktifitas dan pengembangan potensi daerah dapat dioptimalkan dengan dukungan kecukupan energi listrik. Dengan demikian, kehadiran *Nusantara Power Grid* dapat menunjang proses pembangunan di daerah-daerah atau wilayah-wilayah Indonesia. Selain itu, dengan adanya *Nusantara Power Grid*, potensi energi dapat dioptimalkan dan menjadi komoditas daerah/wilayah.

Bagian V:

PENUTUP

Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

Pemaparan ini merupakan salah satu upaya desiminasi dan *sharing* terhadap pemikiran dan inisiatif untuk pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Oleh karena itu, sangat penting untuk selalu menggali temuan dan kebaruan yang akan muncul, atau improvisasi dan melakukan pengembangan terhadap iptek yang ada. Dengan demikian aktivitas riset menjadi penting untuk selalu dijaga keberlanjutannya.

Sebagai Profesor, saat ini bukan sekedar capaian tertinggi yang prestise dalam jabatan akademik, tetapi membawa tanggung jawab spesifik secara keilmuannya, melengkapi peranannya dalam *tri dhrama perguruan tinggi*. Jelas tersebut di dalam UU Nomor 14 Tahun 2005, bahwa Profesor memiliki kewajiban khusus menulis buku dan karya ilmiah, serta menyebarluaskan gagasannya untuk mencerahkan masyarakat.

Oleh karena itu, Profesor harus mampu mengukuhkan dirinya dalam kepakaran yang diakui oleh komunitas bidangnya atau bidang yang berkaitan. Serta, eksistensinya terbangun dalam tataran nasional atau internasional. Sehingga, sepatutnya kontribusinya kepakarannya diakui secara kelembagaan dan personal.

Hal ini secara *performasi* dapat diukur dan rekam secara langsung, salah satunya pada Sinta. Sinta merupakan domain resmi yang dapat mengukur kinerja secara personal, dimana kaitannya dengan kepakarannya dapat diekspresikan dalam bentuk karya buku, paten, artikel, *h-index*, dan rangkai secara nasional atau institusi,

Hadirin, Pendengar, dan Pemirsa yang dimuliakan Allah...

Dari akhir sebuah proses pencapaian, yang lebih sulit adalah mempertahankan atau menjaga keberlangungannya, untuk tetap semangat; untuk tetap berkarya; untuk tetap produktif.



Gambar 25. KRUSIF

Oleh karena itu, motivasi perlu terus ditumbuhkan dan dibangun, seperti Gambar 26. Semoga senantiasa Allah SWT memudahkan semua urusan dan melebarkan segala upaya, serta tetap:

1. Kreatif terhadap berbagai tantangan;
2. Responsif terhadap berbagai keadaan;
3. Unggul dalam beraktualita;
4. Solutif pada berbagai permasalahan;
5. Inovatif dalam penciptaan ipteks;
6. Futistik memandang positip masa depan.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] P. B. Cray, A. A. Strafsds, B. M. Bird, T. S. McHale, and S. Zilioli, "Human reproductive behavior, life history, and the Challenge Hypothesis: A 30-year review, retrospective and future directions," *Horm. Behav.*, vol. 123, p. 104530, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.yhbeh.2019.04.017.
- [2] T. Moynihan, "Existential risk and human extinction: An intellectual history," *Eutures*, vol. 116, p. 102495, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.futures.2019.102495.
- [3] B. Bogin and C. Varea, "Evolution of Human Life History," in *Evolutionay Neuroscience*, Elsevier, 2020, pp. 753–767.
- [4] S. A. G. Leroy, "Natural Hazards, Landscapes and Civilizations," in *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier, 2020, p. B9780128182345000000.
- [5] D. Robson, "The civilisation that time forgot," *New Sd.*, vol. 245, no. 3274, pp. 36–10, Mar. 2020, doi: 10.1016/S0262-4079(20)30598-4.
- [6] R. J. Clarke, "A Homo habilis maxilla and other newly-discovered hominid fossils from Olduvai Gorge, Tanzania," *J. Flum. Evol.*, vol. 63, no. 2, pp. 418-428, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.jlievol.2011.il.007.
- [7] N. Rolland, "The earliest hominid dispersals beyond Subsaharan Africa: A survey of underlying causes," *Quat. Int.*, vol. 223–224, pp. 54–64, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.quaint.2010.02.011.
- [8] J. S. Carrion, C. Lalueza-Fox, and J. Stewart, "Neanderthals: Ecology and evolution," *Quat. Sd. Rev.*, vol. 217, pp. 1–6, Aug. 2019, doi: 10.1016/j. quascirev.2019.05.008.
- [9] T. K. Nielsen, S. M. Kristiansen, and F. Riede, "Neanderthals at the frontier? Geological potential of southwestern South Scandinavia as archive of Pleistocene human occupation," *Quat. Sd. Rev.*, vol. 221, p. 105870, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.quascirev.2019.105870.
- [10] J. Ochando *et al.*, "Neanderthals in a highly diverse, mediterranean-Eurosiberian forest ecotone: The pleistocene pollen record of Teixoneres Cave, northeastern Spain," *Quat. Sd. Rev.*, vol. 241, p. 106429, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.quascirev.2020.106429.
- [11] H. S. Groucutt *et al.*, "Stone tool assemblages and models for the dispersal of Homo sapiens out of Africa," *Quat. Int.*, vol. 382, pp. 8–30, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.quaint.2015.01.039.
- [12] S. Lennox and L. Wadley, "Middle Stone Age wood use in Rose Cottage Cave South Africa: Evidence from charcoal identifications," *Quat. Int.*, p. S1040618220305905, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.quamt.2020.09.041.
- [13] H. Yu *et al.*, "Paleolithic to Bronze Age Siberians Reveal Connections with First Americans and across Eurasia," *Cell*, vol. 181, no. 6, pp. 1232-1245.e20, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.cell.2020.04.037.
- [14] C. Ravazzi *et al.*, "Paleoecological archives unraveling the early land-use history at the emergence of the Bronze Age settlement of Bergamo (Italian Alps)," *Rev. Palaeobot. Palynol.*, vol. 276, p. 104205, May 2020, doi: 10.1016/j.re vpalbo.2020.104205.
- [15] E. El. P. Kickhofel, "Renaissance natural philosophy, brain, and epilepsy (and some ideas about Science)," *Epilepsy Behav.*, p. 106593, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.yebeh.2019.106593.
- [16] Renn and P. Damerow, "Scientific Revolution, Elistory and Sociologv of," in *International Emyclopedia of the Sodal & Behavioral Sdences*, Elsevier, 2015, pp. 318-321.
- [17] A. Nuvolari, "Understanding successive industrial revolutions: A 'development block'

- approach,” *Environ. Innov. Soc. Transit.*, vol. 32, pp. 33–14, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.eist.2018.11.002.
- [18] A. Trew, “Endogenous Infrastructure Development and Spatial Takeoff in the First Industrial Revolution,” *Am. Econ. J. Macroecon.*, vol. 12, no. 2, pp. 44–93, Apr. 2020, doi: 10.1257/mac.20160162.
- [19] R. Thomson, “The Second Industrial Revolution A Brief History of Computing,” in *High Integrity Systems and Safety Management in Hazardous Industries*, Elsevier, 2015, pp. 127–136.
- [20] “Second industrial revolution?,” *Mater. Today*, vol. 5, no. 9, p. 17, Sep. 2002, doi: 10.1016/S1369-7021(02)00920-3.
- [21] E. Guerado, “Scientific societies and the third industrial revolution The future role of the OTC,” *Injury*, vol. 48, pp. S1–S4, Nov. 2017, doi: 10.1016/S0020-1383(17)30788-X.
- [22] Z. Glasnovic, I. Margeta, and I. Premec, “Could Key Engine, as a new open source for RES technology development, start the third industrial revolution?,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 1194–1209, May 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.152.
- [23] G.-G. Hu, “Is knowledge spillover from human capital investment a catalyst for technological innovation? The curious case of fourth industrial revolution in BRICS economies,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 162, p. 120327, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.techfore.2020.120327.
- [24] L. Dogaru, “The Main Goals of the Fourth Industrial Revolution. Renewable Energy Perspectives,” *Procedia Manuf.*, vol. 46, pp. 397-401, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.03.058.
- [25] P. Cowie, L. Townsend, and I. Salemin, “Smart rural futures: Will rural areas be left behind in the 4th industrial revolution?,” *J. Rural Stud.*, vol. 79, pp. 169–176, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.jrurstud.2020.08.042.
- [26] F. Muangprathub, V. Boonjing, and I. Chamnongthai, “Learning recommendation with formal concept analysis for intelligent tutoring system,” *Eelion*, vol. 6, no. 10, p. e05227, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05227.
- [27] H. M. Ghadirli and M. Rastgarpour, “A Web-Based Adaptive and Intelligent Tutor by Expert Systems,” in *Advances in Computing and Information Technology*, vol. 177, N. Meghanathan, D. Nagamalai, and N. Chaki, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 87–95.
- [28] Z. Kastrati and A. S. Imran, “Performance analysis of machine learning classifiers on improved concept vector space models,” *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 96, pp. 552–562, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.future.2019.02.006.
- [29] J. Zenisek, F. Holzinger, and M. Affenzeller, “Machine learning based concept drift detection for predictive maintenance,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 137, p. 106031, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.cie.2019.106031.
- [30] C. Gambella, B. Ghaddar, and J. Naoum-Sawaya, “Optimization problems for machine learning: A survey,” *Eur. J. Oper. Res.*, p. S037722172030758X, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.ejor.2020.08.045.
- [31] I. Poczeta, E. Kubus, and A. Yastrebov, “Reprint of: Analysis of an evolutionary algorithm for complex fuzzy cognitive map learning based on graph theory metrics and output concepts,” *Paosystems*, vol. 186, p. 104068, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.biosystems.2019.104068.
- [32] J. Li, B. Zhang, Y. Liu, I. Wang, and X. Wu, “Spatial evolution character of multi-objective evolutionary algorithm based on self-organized criticality theory,” *Phys. Stat. Mech. Its Appl.*, vol. 391, no. 22, pp. 5490–5499, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.physa.2012.06.032.
- [33] B. Doerr, “Runtime analysis of evolutionary algorithms via symmetry arguments,” *Inf. Process. Lett.*, p. 106064, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.ipl.2020.106064.
- [34] P. T. Elong Hanh, P. D. Thanh, and H. T. Thanh Binh, “Evolutionary Algorithm and Multifactorial Evolutionary Algorithm on Clustered Shortest- Path Tree problem,” *Inf. Sci.*, p. S0020025520310136, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.ins.2020.10.024.
- [35] A. N. Afandi and H. Miyauchi, “Improved artificial bee colony algorithm considering harvest season for computing economic dispatch on power system: ALGORITHM FOR ECONOMIC

- DISPATCH ON POWER SYSTEM,” *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 251—257, May 2014, doi: 10.1002/tee.21963.
- [36] A. N. Afandi and H. Miyauchi, “Harvest Season Artificial Bee Colony, Superior Performances on Combined Economic and Emission Dispatch of Power System,” *Int. J. Comput. Electr. Eng.*, pp. 538—544, 2013, doi: 10.7763/IJCEE.2013.V5.768.
- [37] A. N. Afandi, I. Fadlika, L. Gumilar, Y. Sulistyorini, C. W. A. Farrel, and R. S. A. Michiko, “Cloud Charge Impacts on Thunderstorm Algorithm Performances Considering the Scheduled Power Output Optimization Problem,” in *2018 Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS)*, Batu, East Java, Indonesia, Oct. 2018, pp. 46—51, doi: 10.1109/EECCIS.2018.8692972.
- [38] A. N. Afandi *et al.*, “An Opportunity of Artificial Salmon Tracking Algorithm for the Optimal Power Wlieeling Considering Open Tariffing Systems of the Transmission Charges,” in *2018 Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE)*, Solo, Indonesia, Oct. 2018, pp. 1—6, doi: 10.1109/ICPERE.2018.8739318.
- [39] A. N. Afandi, “Optimal scheduling power generations using HSABC algorithm considered a new penalty factor approach,” in *The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE) 2014*, Dec. 2014, pp. 13—18, doi: 10.1109/ICPERE.2014.7067227.
- [40] W. Hackmann, “Lightning rods and model experiments: Franklin’s Science comes of age,” *Stud. Hist. Philos. Sd. PartA*, vol. 22, no. 4, pp. 679-684, Dec. 1991, doi: 10.1016/0039-3681(91)90041-P.
- [41] B. F. J. Schonland, “The work of Benjamin Franklin on thunderstorms and the development of the lightning rod,” *J. Frankl. Inst.*, vol. 253, no. 5, pp. 375—392, May 1952, doi: 10.1016/0016-0032(52)90717-5.
- [42] V. P. Torchigin, “Physical phenomena responsible for stability and spherica form of ball lightning,” *Optik*, vol. 219, p. 165098, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.ijleo.2020.165098.
- [43] V. M. Mansoor *et al.*, “Throwing light on lightning,” *Mater. Today Proc.*, p. S2214785320363823, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.500.
- [44] A. I. Nikitin, “Possible process of ball lightning training in nature,” *J. Atmospheric Sol.-Terr. Phys.*, vol. 190, pp. 54—61, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.jastp.2019.05.001.
- [45] A. N. Afandi *et al.*, “Designed Operating Approach of Economic Dispatch for Java Bali Power Grid Areas Considered Wind Energy and Pollutant Emission Optimized Using Thunderstorm Algorithm Based on Forward Cloud Charge Mechanism,” *Int. Ren. Electr. Eng. IREE*, vol. 13, no. 1, p. 59, Feb. 2018, doi:10.15866/iree.v13i1.14687.
- [46] A. N. Afandi *et al.*, “K Natural Phenomenon Emphasizing of the Thunderstorm Processes and Salmon Migration for the Optimal Power Production of the Power System Operation,” in *2018 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication*, Semarang, Sep. 2018, pp. 104—109, doi: 10.1109/ISEMANTIC.2018.8549823.
- [47] S. G. Hinch, S. J. Cooke, M. C. Healey, and A. P. (Tony) Farrell, “Behavioural Physiology of Fish Migrations: salmon as a model approach,” in *Fish Physiology*, vol. 24, Elsevier, 2005, pp. 239—295.
- [48] S. J. Cooke, G. T. Crossin, and S. G. Hinch, “FISH MIGRATIONS I Pacific Salmon Migration: Completing the Cycle,” in *Entyclopedia of Fish Physiology*, Elsevier, 2011, pp. 1945—1952.
- [49] J. Klaminder *et al.*, “Less anxious salmon smolt become easy prey during downstream migration,” *S d. Total Environ.*, vol. 687, pp. 488—193, Oct. 2019, doi: i0.i0i6/j.scitotenv.20i9.05.488.
- [50] M. Gross, “Salmon face uphill struggle,” *Curr. Biol*, vol. 29, no. 24, pp. R1269-R1272, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.cub.2019.11.074.
- [51] J. H. Petersen and D. L. DeAngelis, “Dynamics of prey moving through a predator field: a model of migrating juvenile salmon,” *Math. Biosd.*, vol. 165, no. 2, pp. 97-114, Jun. 2000, doi: 10.1016/S0025-5564(00)00017-1.
- [52] B. S. Gerig *et al.*, “Trophic ecology of salmonine predators in northern Lake Huron with

- emphasis on Atlantic salmon (*Salmo salar*)," *J. Gt. Lakes Res.*, vol. 45, no. 1, pp. 160–166, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.jglr.2018.11.003.
- [53] A. N. Afandi *et al.*, "Natural Obstacles and Biological Salmon Behaviors Link to Modelling Approaches of Computational Intelligence Procedures for the Standard System," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 276, p. 012002, Jun. 2019, doi: 10.1088/1755-1315/276/1/012002.
- [54] S. B. Nugroho *et al.*, "The Effect of Prepaid Electricity System on Household Energy Consumption – The Case of Bogor, Indonesia," *Procedia Eng.*, vol. 198, pp. 642–653, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.07.117.
- [55] I. Sukamo, H. Matsumoto, and L. Susanti, "Household lifestyle effect on residential electrical energi- consumption in Indonesia: On-site measurement methods," *Urban Clitn.*, vol. 20, pp. 20–32, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.uclim.2017.02.008.
- [56] L. Tronchin, M. Manfren, and B. Nastasi, "Energi- efficiency, demand side management and energy storage technologies – A critical analysis of possible paths of integration in the buih environment," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 95, pp. 341-353, Nov. 2018, doi:10.1016/j.rser.2018.06.060.
- [57] A. N. Afandi, I. Fadlika, and Y. Sulistyorini, "Solution of dynamic economic dispatch considered dynamic penalty factor," in *2016 3rd Conference on Potrer Engineering and Renewable Energy (ICPERE)*, Yogyakarta, Indonesia, 2016, pp. 241-246, doi: 10.1109/ICPERE.2016.7904870.

Rekayasa *Interface*, Kunci Keberhasilan Manufaktur Material Komposit Polimer-Serat Alam

Prof. Dr. Heru Suryanto S.T., M.T.

Bismillahirrahmanirrahim

Yang terhormat

Ketua Senat, Sekretaris dan Anggota Senat Universitas Negeri Malang

Rektor dan Wakil Rektor Universitas Negeri Malang

Dekan Fakultas Teknik, Ketua Lembaga, Ketua Jurusan, kolega dan segenap civitas akademik Universitas Negeri Malang

Para hadirin dan undangan yang hadir luring dan daring, serta

Yang berbahagia hari ini, keluarga dari Bani Toekiman dan Bani Slamet Sukanto seluruhnya.

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarokatuh

Salam sejahtera bagi kita semua,

Bapak/ibu yang berbahagia, marilah kita bersama memanjatkan puji syukur kehadiran Allah SWT, karena atas rahmad, taufik, dan hidayah-Nya kita hadir pada kesempatan. Sholawat serta salam kita curahkan kepada junjungan kita Rasulullah SAW yang telah membawa kehidupan kita lebih baik penuh hidayah dari Allah SWT. Atas rahmat dan karunia Allah pula, saya memperoleh kehormatan untuk menyampaikan pidato pengukuhan sebagai Guru Besar dalam bidang "MATERIAL MANUFAKTUR" di Fakultas Teknik Universitas Negeri Malang.

Dengan segala kerendahan hati, serta penuh rasa hormat kepada Bapak/Ibu serta hadirin yang telah meluangkan waktu berkenan hadir pada sidang ini dan yang melalui daring, perkenankanlah saya menyampaikan pidato pengukuhan Guru Besar dengan judul "**Rekayasa *Interface*, Kunci Keberhasilan Manufaktur Material Komposit Polimer-Serat Alam**".

Hadirin yang saya hormati,

Apapun yang kita lakukan saat ini tentunya semua atas kehendak Ilahi. Tuhan membimbing kita untuk melakukan segala sesuatu sesuai dengan tuntunanNYA melalui kitab suci. Kitab suci Alquran merupakan inspirasi dan perintah bagi umat Islam. Dalam hal ini perintah untuk meng eksplorasi dan mengkaji serat selulosa agar dapat dimanfaatkan dalam kehidupan manusia adalah surat dalam Alquran yang terkait dengan serat alam yaitu surat ke 111 yang bernama surat Al Masad yang berarti "*palm fiber* atau serat palem", dan difirmankan pada ayat kelima yaitu:

فِي جِيدِهَا حَبْلٌ مِّن مَّسَدٍ ۝

Artinya: Di lehernya ada tali dari sabut yang dipintal.

Sabut ini dimaknai sesuai dengan nama surat tersebut yaitu serat-serat dari palem atau serat alam umumnya. Dalam ayat ini Allah telah mengisyaratkan bahwa serat alam yang dalam kondisi alamiah dapat berbentuk pintalan maupun dalam bentuk pilinan atau bundel adalah material yang sangat penting bagi manusia sehingga harus dikaji untuk kemaslahatan manusia. Perkembangan sains dan teknologi telah banyak mengupas tentang struktur serat alam selulosa agar dapat dimanfaatkan mulai dari material tradisional sampai pada material maju, mulai dari ukuran mikro sampai pada ukuran nano. Dalam wujud material maju keunggulan dari serat selulosa dalam bentuk nanokristal dan nanofiber memiliki kekuatan tarik yang nilainya 6 kali lipat dari kekuatan tarik baja tahan karat dengan densitas yang jauh lebih rendah yaitu 5 kali lebih ringan namun dengan modulus elastisitas yang kurang lebih setara dengan baja tahan karat (Tabel 1). Dalam kesempatan ini saya mengajak agar kita berusaha senantiasa menggali lebih banyak isyarat-isyarat yang tertuang dalam

Alquran sesuai dengan bidang keilmuan masing-masing, tentunya untuk kejayaan lembaga kita yang tercinta ini, dan berkontribusi terhadap kemajuan bangsa.

Tabel 1. Sifat Selulosa dan penguat lainnya [1]

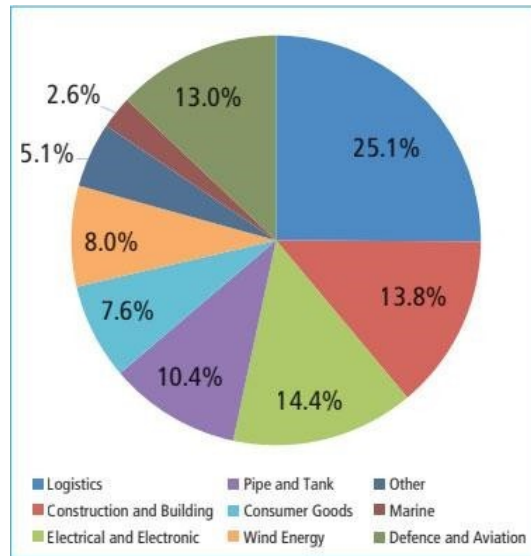
| Jenis material | Kekuatan tarik σ (MPa) | Modulus Elastis E (GPa) | Densitas ρ (g.cm ⁻³) |
|------------------------|----------------------------------|----------------------------|--|
| Selulosa nanokristal | 7.500–7.700 | 110–220 | 1,6 |
| Serat kaca/glass fiber | 4.800 | 86 | 2,5 |
| 302 stainless steel | 1.280 | 210 | 7,8 |
| Softwood kraft pulp | 700 | 20 | 1,5 |
| Serat karbon | 4.100 | 210 | 1,8 |
| Boron nanowhiskers | 2.000–8.000 | 250–360 | — |
| Aluminum | 330 | 71 | 2,7 |
| Karbon nanotube | 11.000–63.000 | 270–950 | — |
| Serat Kevlar | 3.880 | 88 | 1,4 |

Hadirin yang saya hormati,

Akibat menipisnya sumber daya minyak bumi ditambah dengan semakin ketatnya peraturan tentang lingkungan mendorong untuk meng eksplorasi bahan-bahan baru dan produk yang kompatibel dengan lingkungan atau menjadi "*green composite material*" yang sangat sesuai dengan pergeseran paradigma baru bidang manufaktur. Keunggulan yang ditawarkan dari serat alam dibandingkan dengan serat sintesis adalah harganya murah, densitas rendah, mudah lepas, bahan terbarukan dan terbiodegradasi serta tidak berbahaya bagi kesehatan.

Tujuan dari suatu proses manufaktur adalah memberikan nilai tambah pada suatu material dengan membentuknya menjadi komponen atau alat tertentu yang mempunyai daya guna. Demikian juga, serat selulosa harus dapat dikonversi agar memiliki nilai tambah sehingga dapat membantu mensejahterakan masyarakat, khususnya masyarakat pembudidaya tanaman serat. Upaya ini perlu dilakukan mengingat volume pasar komposit global mencapai 10,8 juta ton di tahun 2016 dan diperkirakan naik 5% di tahun 2021 dengan valuasi mencapai 105 miliar dollar [2], dengan potensi aplikasi pada berbagai sektor seperti sektor Aerospace (ekor, sayap, propeler, bilah kipas helikopter, interior); Otomotif (*door frame, door shutters, window frame, mirror casing*); Bangunan dan Konstruksi (atap, bata, *furniture panels*, tangki, perpipaan); Perangkat olahraga dan rekreasi (papan skating, frame sepeda, pemukul baseball, raket tenis, fork, helm); Peralatan elektronik (*laptop and mobile cases, chip boards, projector and voltage stabilizer cover*); Aplikasi lain (pipa, konstruksi senjata, tekstil, kipas industri, kemasan). Tentunya pangsa pasar yang besar dan banyak aplikasi menarik yang untuk dapat ikut ambil bagian didalamnya.

Mengapa kita perlu untuk ambil bagian? Tentunya hal ini karena Indonesia sebagai negara agraris memiliki keanekaragaman hayati yang melimpah. Meskipun luas Indonesia hanya sekitar 1,3 persen dari luas daratan dunia namun memiliki keragaman hayati ketiga terbesar di dunia [4]. Dari 5 juta jenis keanekaragaman hayati di dunia, 15 persen diantaranya berada di Indonesia. Sayangnya, tidak sampai 5% yang telah dimanfaatkan [5]. Mengingat potensi yang besar dari tanaman Indonesia maka perlu upaya untuk memanfaatkannya melalui kajian ilmu dasar dan terapan tentang komposit dari serat alam.



Gambar 1. Distribusi pasar komposit global [3]

Hadirin yang saya hormati,

Klasifikasi Serat

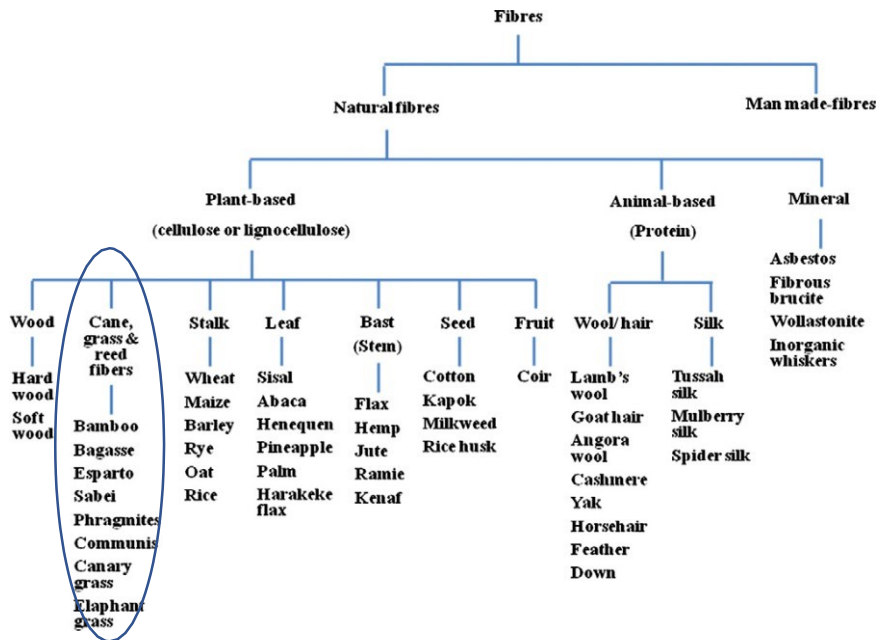
Sebagaimana telah diketahui bahwa serat-serat dikelompokkan berdasar pada sumbernya yaitu berasal dari tanaman, binatang, atau mineral (Gambar 1). Serat tanaman terdiri atas selulosa, sementara serat hewan (rambut, sutera, dan wol) terdiri atas protein-protein. Serat tanaman meliputi serat kulit pohon (atau stem atau sklerenkima halus), daun atau serat-serat keras, biji, buah, kayu, sereal gandum, dan serat-serat rumput lain. Banyak diantara serat-serat alam ini, telah dikembangkan sebagai penguat dalam bahan komposit.

Serat yang berasal dari tanaman, pada umumnya dikelompokkan menjadi 2 kelompok, yaitu serat non-kayu dan serat kayu. Serat non-kayu di bagi menjadi [6]:

- Jerami, contoh: jagung, gandum, dan padi;
- Kulit pohon, contoh: kenaf (*Hibiscus cannabicus*), flax (*Linum usitatissimum*), jute (*Corchorus*), rami (*Boehmeira nivea*), dan hemp (*Cannabis sativa*);
- Daun, contoh: sisal (*Agave sisalana*), daun nanas (*Ananas comosus*), dan serat henequen (*Agave fourcroydes*);
- Serat rumput/grass, contoh: serat bambu, rumput, rotan, *switch grass* (*Panicum virgatum*), dan rumput gajah (*Erianthus elephantinus*), serta yang khas dari Malang adalah rumput Mendong;

Sumber Serat Alam Hadirin yang saya hormati

Saya sangat bangga dengan potensi Indonesia sebagai negara dengan biodiversitas hayati yang besar sehingga banyak potensi serat alam Indonesia yang dapat digunakan dalam upaya untuk menghasilkan komposit, diantaranya adalah: serat kapas, serat kenaf, serat rami, serat daun nanas, jute, flax, serat pelepah pisang, serat sabut kelapa, serat kapuk, serat Mendong.



Gambar 2. Klasifikasi serat [7]

Tinjauan dari ilmu material maka potensi serat selulosa sebagai sumber material komposit sangat besar baik dari keberlangsungan suplai material maupun dari kekuatannya (Tabel 2 dan Tabel 3) dan serat selulosa ini juga sudah dimanfaatkan dalam industri manufaktur seperti dalam berbagai aplikasi.

Hal khusus dari upaya pemanfaatan serat alam di wilayah sekitar adalah eksplorasi serat mendong. Serat Mendong (*Fimbristylis globulosa*) adalah salah satu tanaman budidaya di wilayah Malang, khususnya di wilayah kecamatan Wajak sebagai tanaman produktif untuk industri rumah tangga dan industri kreatif. Dan saya upayakan agar Mendong juga dapat dikembangkan lebih lanjut potensinya sebagai penguat komposit [46][47][48]. Dari upaya memanfaatkan Mendong sebagai bahan komposit, saya sudah menghasilkan total 5 artikel publikasi jurnal internasional bereputasi dengan 3 diantaranya berfaktor dampak dari Web of Science (WoS), satu artikel dalam proses penerbitan (2021), serta 2 paten yang sudah granted. Ke depan akan lebih dikembangkan agar dapat dihilirisasi menjadi suatu barang komersial.

Tabel 2. Jenis serat alam Indonesia untuk penguat komposit

| Sumber serat | Kadar | Indeks | Ukuran | Produksi | Rujukan |
|------------------|--------------|-------------|--------------|------------------|--------------|
| | selulosa (%) | Kristal (%) | Kristal (nm) | (ribu ton/tahun) | |
| Mendong | 72,14 | 58,6 | 14,3 | 14 | [8] |
| Kapas | 85-90 | 68 | 5-7 | 1.712 | [9-11] |
| Flax/linen | 85 | 70 | 5,4 | - | [12][13] |
| Batang padi | 64 | 57 | 3,75 | ±78.000 | [9][14] |
| Pisang (pelepah) | 64 | 34,8 | 2,77 | 7.264,379 | [15-18] |
| Nanas (daun) | 67-85 | 41,5 | 68 | 1.805,499 | [15][19][20] |
| Jute | 58-63 | 65,8 | 29,25 | - | [21-23] |
| Kapuk | 35-64 | 35,34 | 3,2-5 | 61,273 | [24][25] |
| Rami | 70 | 63,3 | 5,8 | 2-2.7 | [26-28] |
| Kelapa (sabut) | 32-43 | 50,8 | 3,98 | ±2.960,851 | [9][29] |
| Tebu (ampas) | 38,2 | 77 | 35,23 | ±2.623,931 | [9][30] |

Rekayasa *Interface* Material Komposit

Ketua dan Anggota Senat, Rektor serta hadirin yang saya hormati.

Arti *interface* menurut bahasa adalah hubungan atau batasan umum antara dua unit atau lebih spesifik bermakna permukaan batas, permukaan kontak, permukaan ikatan, ataupun mediasi. Dalam bidang komposit maka *interface* berarti area di mana material yang berbeda berada dalam kondisi berhimpitan di dalam komposit. Material berbeda ini terdiri dari serat sebagai penguat dan matrik polimer sebagai pengikat. Serat tidak akan efektif fungsinya bila *interface* yang dibangun tidak baik sehingga tidak dapat membuat serat memberikan kontribusinya pada kekuatan komposit. Fungsi utama *interface* adalah sebagai transmitter kekuatan yang efisien antara serat dan matrik. Dalam hal ini tugas perekayasa komposit adalah bagaimana membangun *interface* agar proses manufaktur selanjutnya menjadi lebih berarti.

Tabel 3. Sifat fisik dan mekanis serat-serat potensial untuk penguat komposit.

| Jenis Serat | Densitas (g/cm ³) | Diameter (μm) | Modulus (GPa) | Kekuatan tarik (MPa) | Kekuatan spesifik (kN.m/kg) | Rujukan |
|------------------|-------------------------------|---------------|---------------|----------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Mendong | 0,892 | 33,8 | 17,4 | 452 | 507 | [8][31] |
| Kapas | 1,5-1,6 | 12-38 | 5,5-12,6 | 287-597 | 179 398 | [32][33] |
| Flax | 1,5 | 40-600 | 27,6 | 345-1035 | 230-690 | [10][32][33] |
| Batang padi | 1,36 | 4-16 | 26 | 450 | 331 | [14][34][35] |
| Pisang (pelepah) | 1,35 | 50-250 | 6,6-25,6 | 550-600 | 400-444 | [16] [18] [19] [36] [37] |
| Nanas (daun) | 1,07 | 50 | 34,5-82,5 | 1200 | 1,122 | [19][20] [38] |
| Jute | 1,3 | 26,0 | 91,9 | 1316 | 1012 | [32] [35] [39] |
| Kapuk | 0,23 | 16,5 | 37,9 | 93,3 | 300 | [24] [40-43] |
| Kelapa (sabut) | 1,15-1,46 | 100-460 | 4-6 | 131-220 | 169 | [12] |
| Rami | 1,25 | 17,56 | 36,09 | 810,24 | 790 | [44][26] |
| Tebu (ampas) | 0,341 | 20 | 4,5 | 89,9 | 264 | [45][35] |

Dalam kehidupan kita sehari-hari, semua yang berkaitan dengan hubungan 2 benda membutuhkan *interface* yang baik. Sebagai contoh, dalam kegiatan interaksi belajar mengajar antara dosen dan mahasiswa khususnya dalam masa pandemik saat ini, dibutuhkan *interface* yang baik antara Dosen dan mahasiswa agar kegiatan belajar mengajar menjadi efektif dan efisien. Untuk hal ini, UM juga telah merekayasa *interface* interaksi pembelajaran Dosen-mahasiswa dengan membangun SIPEJAR yang sangat membantu proses belajar sehingga proses belajar mengajar tetap berlangsung dengan baik dalam masa-masa sulit saat ini.

Dalam merekayasa dan melakukan manufaktur komposit maka perlu diperhatikan tiga faktor yang berpengaruh yaitu: (1) kekuatan dan modulus serat, (2) kekuatan dan modulus matrik, dan (3) efektivitas ikatan antara serat dan matrik dalam transfer tegangan di daerah *interface*. Faktor-faktor ini pada dasarnya ditentukan oleh rincian mikrostruktur bahan yang mencakup *interface*, kristalinitas dari matrik. *Interface* antara serat dan matrik dalam material komposit secara luas dianggap sebagai faktor yang paling penting menentukan sifat mekanik komposit keseluruhan [49]. Tanpa *interface* yang baik maka manufaktur komposit tidak dapat memberikan hasil yang optimal bahkan sumber kegagalan komposit lebih banyak dimulai dari *interface* serat-matrik.

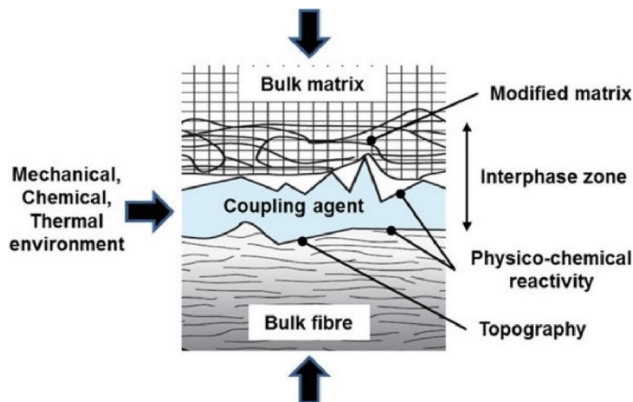
Ikatan atau adesi antara serat penguat dan matrik berperan penting dalam komposit. Kebasahan serat merupakan langkah awal dalam proses adesi. Adesi tak akan pernah efektif apabila *interface* di antara komponen penyusunnya memiliki halangan besar untuk menyatu atau sering disebut dengan tidak kompatibel. Halangan *interface* inilah yang harus direkayasa dengan memodifikasi permukaan serat ataupun matriks. Adesi serat matrik adalah variabel yang harus dioptimalkan untuk mendapatkan sifat terbaik dan kinerja dalam material komposit. Pada dasarnya adesi antara serat dan matrik dipengaruhi oleh interaksi fisik berupa *mechanical interlocking* dan ikatan kimia [50]. Adesi bersandar pada model interphase di mana tidak hanya zat kimia dan interaksi fisik

antara serat dan matrik yang berpengaruh, tetapi juga struktur dan sifat-sifat baik serat dan matrik di daerah dekat antarmuka/*interface*.

Hadirin yang saya hormati,

Optimalisasi desain dimulai dengan menciptakan interphase serat matrik yang baik. *Interphase* merupakan fase antara 2 material yang berbeda dalam satu kesetimbangan. Meskipun tidak ada model kuantitatif yang tersedia untuk optimasi interphase, data eksperimen memungkinkan pemahaman interphase secara kualitatif melalui modifikasi permukaan struktural dan kimia untuk pembasahan dan perlindungan serat, penciptaan interphase dengan kekakuan yang diinginkan, ketangguhan, dan modulus kerusakan, dan tingkat adesi serat-matrik yang kompatibel dengan lingkungan struktur dan material penyusunnya [51].

Interphase ini merupakan gambaran dua dimensi dari kontak serat dengan matrik dengan tebal tertentu dari permukaan kontak (Gambar 3). Batas ketebalan ini dimulai dari sifat lokal matrik yang mulai berubah sampai ke permukaan dimana daerah ini memiliki morfologi dan sifat kimia yang berbeda dari matrik intinya (berkisar 5-500 Angstrom), terma suk didalamnya pengotor, void, komponen polimer yang tidak bereaksi, dan juga aditif matrik yang tidak bereaksi. Pada *interface* tidak hanya terjadi kontak fisika dan kimia, juga dimungkinkan juga adanya kontak dengan void, gas yang terabsorpsi dan gugus fungsi. Pada sisi serat penguat, fitur kimia dan morfologi permukaan dapat berbeda dengan bahan intinya. Penekanan pada daerah ini adalah kondisi pemrosesan serat yang memungkinkan untuk terjadinya reaksi kimia dan perubahan volumetrik. Interfase ini merupakan material yang kompleks yang tidak mudah untuk dianalisis dengan model satu parameter [52].



Gambar 3. Skema diagram interphase serat-matrik dan beberapa faktor yang berkontribusi untuk pembentukannya [53]

Hadirin yang saya hormati,

Inti masalah dalam rekayasa *Interface* komposit adalah bagaimana mengefisienkan transfer tegangan dari matriks menuju serat sehingga fungsi penguatan dari serat akan efektif untuk memberikan penguatan pada komposit. Rekayasa *interface* komposit pada dasarnya dikembangkan dari 2 aspek:

1. Aspek serat sebagai penguat
2. Aspek matrik sebagai pengikat

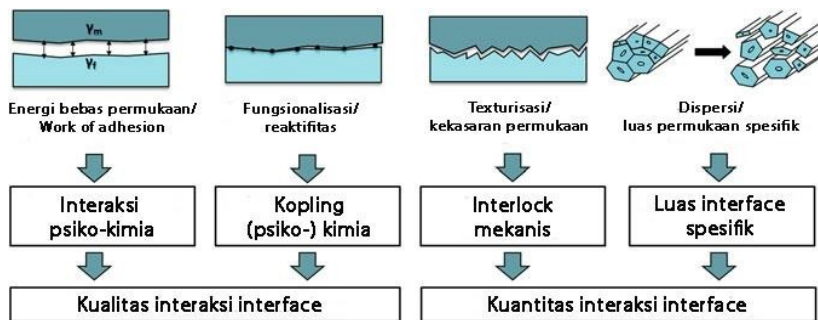
Yang keduanya harus kompatibel agar dapat bersatu menjadi komposit yang utuh.

Strategi untuk mengontrol adesi *Interface* serat – matriks

Hadirin yang saya hormati,

Untuk keberhasilan merekayasa *interface*, maka harus diawali dengan strategi untuk mengontrol adesi *interface* serat-matriks. Adesi pada komposit berbasis serat alami terutama dibangun oleh kuantitas *interface* serat/matriks yang dikembangkan dan sifat serta kekuatan interaksi antara matriks polimer dan serat. Saat mempelajari kualitas dari adesi *interface* dalam komposit berbasis serat alami, tampaknya penting untuk dilakukan mem bedakan fenomena adesi dan perlekatan. Di satu sisi, adesi adalah fenomena fisika-kimia murni yang diatur oleh energi bebas permukaan dan kekasaran serat dan tegangan permukaan matriks polimer. Hal ini mencirikan keterbasahan serat alam terhadap matriks polimer cair atau cair selama kontak pertama mereka setelah manufaktur komposit. Di sisi lain, perlekatan mencirikan kekuatan antarmuka antara serat dan matriks dalam komposit yang terkonsolidasi saat dibebani gaya mekanis. Dengan demikian, parameter lain seperti interaksi kimia serat/matriks dan interlocking mekanis, transkristalinitas termoplastik matriks atau variasi derajat ikatan silang termoset pada *interface* serat/matriks, atau kekuatan kohesi intra dan antar-seluler dalam bundel serat tentunya sangat mempengaruhi perlekatan dan hasil adesi *interface*.

Atas dasar ini, beberapa strategi dapat dikembangkan untuk merekayasa adesi *interface* dalam material komposit (Gambar 4). Memodifikasi energi bebas permukaan dari serat dan komponen polar dan dispersifnya dapat meningkatkan kinerja secara signifikan adesi dengan matriks, dan karenanya mendukung pembasahan dan impregnasi selama pengolahan. Fungsionalisasi serat alami digunakan untuk meningkatkan reaktivitasnya matriks dan mencapai kopling kimia dan/atau psiko-kimia yang lebih baik. Harus ditunjukkan bahwa kopling agen juga dapat digabungkan di dalam matriks untuk selanjutnya bereaksi dengan serat selama proses manufaktur. Peningkatan *interlock* mekanis dapat dicapai dengan mengontrol teksur permukaan dan kekasaran dari serat. Akhirnya, pengontrolan dispersi serat alami di dalam matriks sangat meningkatkan luas permukaan spesifik serat sehingga meningkatkan kuantitas interaksi *interface* dengan matriks.



Gambar 4. Strategi merekayasa *interface* (adaptasi dari [53])

Kekuatan *interface* sangat tergantung pada susunan kimia serat, permukaan serat (*sizing* formulasi) dan kekasaran permukaan [54]. Kompatibilitas permukaan serat dengan interaksi dengan bahan kimia seperti resin, tergantung pada kehalusan atau kekasaran serat. Permukaan kasar meningkatkan jumlah titik reaksi, sehingga memberikan *interlock* mekanis yang baik antara serat dengan resin [55]. Dengan pengasaran permukaan serat maka hidrofobisitas serat meningkat sehingga kompatibilitas dengan matriks menjadi lebih baik dan kekuatan *Interfacial Shear Strength* (IFSS) menjadi meningkat [56]. Namun, terdapat kondisi optimum kekasaran permukaan untuk meningkatkan tegangan geser. Mekanisme *interlock* mekanis tidak efektif dengan adanya permukaan yang terlalu kasar yang mengindikasikan kerusakan permukaan [57].

Adesi pada permukaan kasar bisa efektif karena pada permukaan secara intrinsik memiliki energi atom permukaan yang tinggi. Peningkatan luasan karena berbagai faktor juga meningkatkan energi permukaan ketika terekspos tiap unit luasan nominal. Permukaan kasar bila diberikan tegangan akan meredistribusi tegangan tersebut dan penguatan dari *interface* yang dihasilkan karena

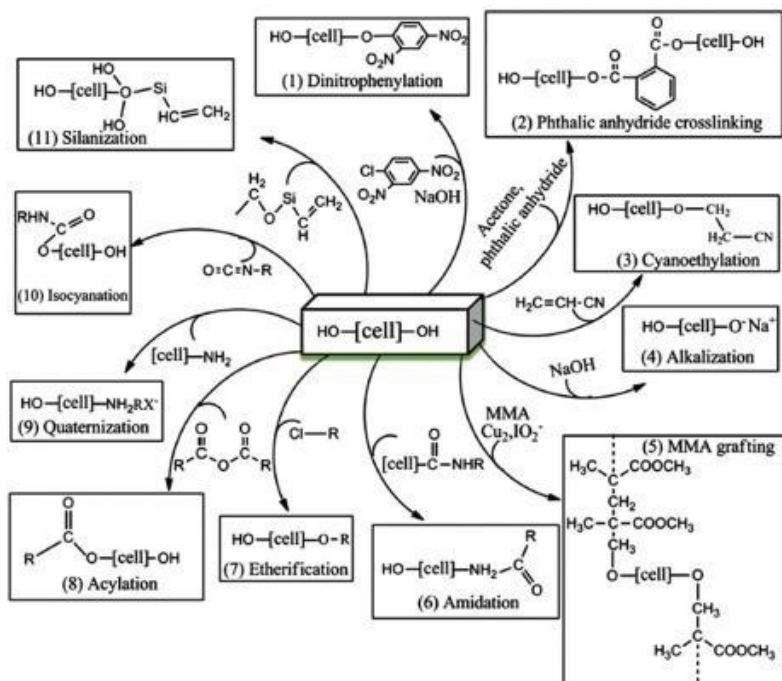
meningkatnya kekasaran bisa mengubah mekanis me *fracture* dari mode yang kecil hingga yang lebih energetik. Bila terjadi pada 2 polimer yang tidak kompatibel maka mekanisme berubah dari rantai *pull out* menjadi bentuk deformasi plastis lain [58]. Di sisi lain, kehadiran gugus fungsional reaktif baik pada serat dan resin, sangat pen ting untuk energi *interface* yang tinggi.

Semua parameter ini merupakan prasyarat untuk produksi komposit serat tanaman yang kuat. *Interface* serat-matrik yang kompatibel menghasil kan adesi dan sifat mekanik yang lebih baik dari komposit. Kinerja dan stabilitas material komposit diperkuat serat tergantung pada pengembang an ikatan permukaan koheren antara serat dan matrik. Dalam komposit yang diperkuat serat alam kurangnya adesi antar muka yang baik antara serat selulosa hidrofilik dan resin hidrofobik karena inkompatibilitas.

Teknik Rekayasa Permukaan Serat

Hadirin yang saya hormati,

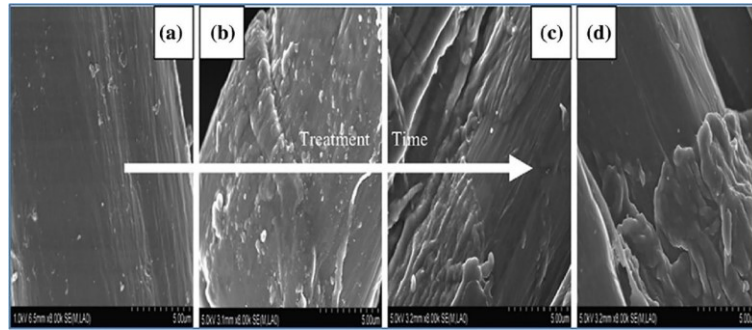
Rekayasa permukaan serat dapat dilakukan dengan melalui perlakuan kimia, perlakuan fisik, menggunakan proses biologis, dan menggunakan nanomaterial untuk deposisi dan fungsionalisasi permukaan serat. Perla kuan kimia bertujuan untuk mengurangi sifat hidrofilik dari serat, meningkatkan kekuatan serat yang mengarah pada peningkatan mekanis me adesi antara permukaan serat dan matriks polimer. Perlakuan kimia dapat mengaktifkan gugus fungsi hidroksil dalam strukturnya yang dapat bereaksi dengan permukaan serat yang mengubah komposisinya dan dapat secara efektif saling mengunci dengan matriks serta mengurangi sifat penyerapan air. Beberapa metode treatment kimiawi yang digunakan antara lain dengan proses phenilasi, grafting, crosslinking, etilasi, alkalisasi, amidasi, esterifikasi, silanisasi, asetilasi, dan yang lainnya. Reagent kimia ini mengubah sifat permukaan serat yang mana pilihan yang diambil sangat tergantung kepada jenis matriks polimer yang digunakan (Gambar 5).



Gambar 5. Rekayasa dengan reagent kimia pada serat selulosa [59]

Perlakuan fisik dalam pemrosesan serat alami terutama digunakan untuk memisahkan bundel serat alami menjadi filamen individual dan un tuk memodifikasi struktur permukaan serat untuk meningkatkan penerapannya pada komposit. Perlakuan fisik dilakukan dengan menerapkan per

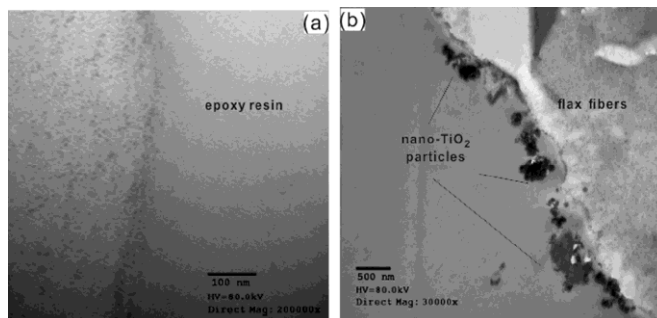
lakukan plasma, Irradiasi ultra violet, Corona, X-ray, maupun menggunakan Laser dan steam explosion.



Gambar 6. Rekayasa permukaan dengan pemaparan Corona [60]

Saat ini, modifikasi kimia atau fisik adalah salah satu jenis rekayasa permukaan yang paling umum. Namun demikian, ada beberapa kelemahan seperti: penggunaan pelarut dan bahan kimia berbahaya dalam jumlah besar, pembangkitan limbah, polusi, penggunaan energi tinggi, dan biaya tinggi beberapa bahan kimia dan peralatan. Mikroorganisme seperti jamur, bakteri, dan enzim dapat digunakan untuk mengatasi masalah ini; Jasad renik dapat memodifikasi permukaan serat alami dengan penggunaan energi yang lebih rendah.

Salah satu strategi terbaru untuk merekayasa permukaan serat alami adalah memanfaatkan material maju dalam bentuk nanopartikel. Beberapa jenis nanopartikel dapat digunakan untuk meningkatkan interaksi antara serat alami dan matriks, untuk memperbaiki beberapa karakteristik serat, dan juga untuk memperkenalkan sifat baru ke dalam serat. Sebagai metode rekayasa permukaan yang menjanjikan, nanopartikel anorganik seperti CaCO_3 dapat digunakan sebagai pengisi untuk mengurangi kekosongan dalam struktur sel serat mikro dan sebagai perekat antara serat dan matriks polimer. Demikian juga nanopartikel TiO_2 digunakan untuk mengubah permukaan serat sehingga kekuatan komposit meningkat [61]. Nanopartikel pada permukaan serat dapat memberikan situs nukleasi untuk memulai pembentukan kristal polimer, yang akan meningkatkan kompatibilitas antara serat dan matriks polimer.



Gambar 7. Fungsionalisasi permukaan dengan nanopartikel TiO_2 [61]

Rekayasa matriks sebagai pengikat komposit

Hadirin yang saya hormati,

Fungsi matriks polimer dalam komposit adalah sebagai pengikat serat. Jenis polimer resin termoset adalah polimer yang banyak digunakan sebagai matriks komposit namun polimer ini memiliki sifat ketangguhan yang buruk [62] sehingga perlu upaya untuk memperbaikinya, antara lain melalui modifikasi *backbone* epoksi sehingga memiliki struktur yang lebih fleksibel; menurunkan densitas *cross-link* dengan meningkatkan berat molekul monomer epoksi dan/atau penurunan fungsi dari *curing agent*, mendispersikan phase kedua dalam epoksi seperti memberikan inklusi partikel organik seperti karet maupun anorganik (kalsium karbonat, kedalam matrik epoksi [63] atau dengan partikel

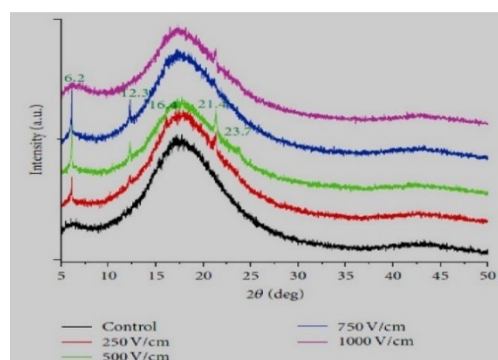
yang berukuran nano [64], mencampur 2 jenis termoset agar menghasilkan *interpenetrating polymer networks* [65], penguatan dengan *diblock copolymer* [66] dan penguatan dengan penambahan material kristalin [67][68]. Peningkatan ketangguhan dari epoksi timbul terutama dari deformasi geser, tapi yang deformabilitas geser dari epoksi tampaknya tergantung pada karakteristik seperti densitas *cross-link* dan suhu transisi *glass*. Untuk polimer dengan kristal yang tersebar secara efektif maka mekanisme peningkatan ketangguhan terjadi karena fase kristal yang menyebar mengalami transformasi fase. Akibat tegangan yang diberikan, struktur kristal yang ada bertransformasi dari struktur kristal yang memiliki densitas rendah (fase heksagonal ataupun tetragonal) menjadi struktur kristal dengan densitas yang lebih tinggi (fase monokli nik) sehingga menyebabkan peningkatan ketangguhannya [69][70].

Upaya lain adalah dengan merekonstruksi struktur polimer epoksi dengan gaya eksternal adalah menggunakan energi panas, magnetik, elek trik dan photonik untuk menghasilkan struktur spesifik yang diinginkan [71]. Mekanisme modifikasi struktur polimer dan komposit dalam medan listrik diawali pada saat pembentukan rantai polimer pada kondisi cair. Polimer cair awalnya mengandung inklusi dalam ukuran nano ataupun mikro yang berada dalam arah yang acak dapat dicuring dalam medan listrik sehingga menghasilkan komposit polimer yang padat dengan struktur lokal yang terarah [72]. Medan listrik mengorientasi monomer dan selanjutnya dikunci melalui reaksi polimerisasi. Sementara itu, energi dari unit kimia (monomer atau rantai polimer) dihasilkan melalui interaksi dengan medan eksternal tergantung pada orientasi relatif terhadap medan. Oleh karena itu, unit cenderung berorientasi dalam arah yang akan meminimalkan energinya [73]. Perubahan struktur akibat orientasi ini dapat diamati melalui pengujian XRD, yang menunjukkan bahwa perubahan orientasi epoksi kristalin yang dipapar medan magnet 9 Tesla menghasilkan puncak baru pada sudut $2\theta = 5^\circ$ [74], sedangkan yang dipapar medan listrik AC 750 V/cm, frekuensi 1 kHz menghasilkan puncak baru pada sudut $2\theta = 6.2^\circ$, yang juga tampak melalui morfologi permukaan epoksi [46] (Gambar 5 dan Gambar 6). Perubahan-perubahan inilah yang sangat berpengaruh terhadap keberhasilan manufaktur dari komposit yang ber kualitas.

Indikator Keberhasilan Rekayasa

Hadirin yang saya hormati

Setelah melakukan rekayasa tentunya kita harus dapat menjamin bahwa apa yang sudah dilakukan untuk menguatkan komposit harus benar-benar berhasil, sehingga sebelum proses manufaktur secara utuh dilakukan, perekayasa sudah dapat meyakinkan bahwa proses manufaktur akan berhasil. Evaluasi yang dilakukan terhadap kinerja *interface* yang direkayasa tergantung pada kelompok komposit yang dibuat, yaitu dengan uji komposit lamina untuk mengukur sifat interlaminarnya dan uji mikrokomposit serat tunggal (atau beberapa serat) seperti *single fiber compression test*, *fiber fragmentation test*, *fiber pull out test*, *fiber push out test*, *microbond test* dan *slice compression test*. Uji mikromekanika komposit digunakan untuk menjelaskan sifat *interface* matrik dengan serat yang mengalami perlakuan permukaan dan menjelaskan mekanisme kegagalan yang berkaitan dengan *interfacenya*.



Gambar 8. Diffractogram epoksi yang dicuring medan listrik AC [46]

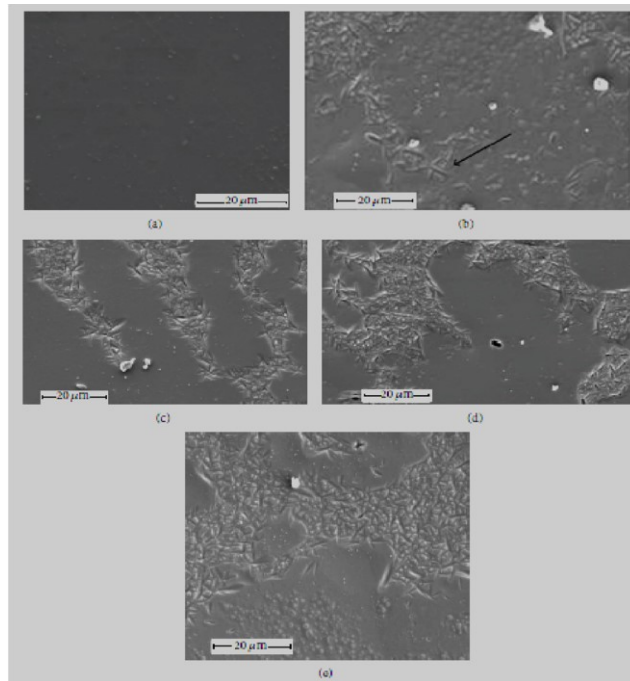
Kekuatan geser *interface* (Interfacial shear strength/IFSS) dapat diperoleh dari pengujian single pull out test berdasarkan interaksi kimia dan fisik yaitu [75][76]:

$$t = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot L_t} \dots \dots \dots (1)$$

dengan: F : beban tarik maksimum yang menyebabkan debonding serat

d : diameter serat

L_t : panjang serat yang tertanam pada matrik



Gambar 9. Morfologi permukaan akibat paparan medan listrik AC dengan kuat medan: 0 V/cm (kontrol) (a); 250 V/cm (b); 500 V/cm (c); 750 V/cm (d); 1000 V/cm (e) [46]

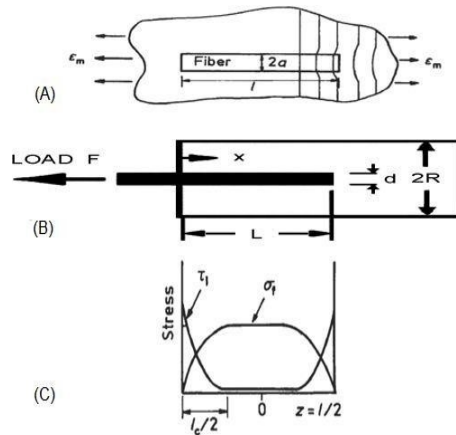
Dengan menggunakan tegangan geser yang diperoleh maka indikator kekuatan ikatan serat-matrik yaitu berupa panjang kritis serat sebagai penguat komposit yang berarti bila panjang serat kurang dari panjang serat kritis maka serat tidak akan memberikan efek penguatan pada komposit. Persamaan yang digunakan adalah

$$l_c = \frac{d \cdot \sigma_f}{4\tau} \dots \dots \dots (2)$$

Dengan σ_f : kekuatan tarik serat

d : diameter serat

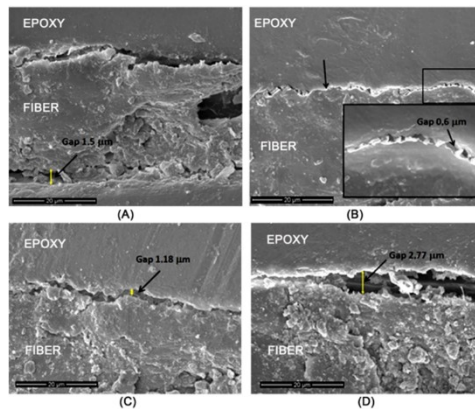
l_c : panjang kritis serat



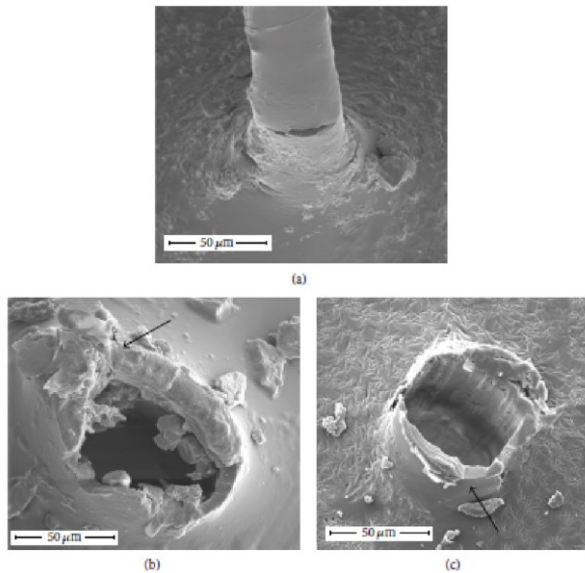
Keterangan: L: panjang serat tertanam; d: diameter serat, F: beban tarik, τ_t : tegangan geser; l_c : panjang kritis serat

Gambar 10. Uji mikromekanika transfer tegangan dengan metode pull out test [75][77]

Keberhasilan rekayasa *interface* terindikasi dari meningkatnya tegangan geser *interface*, juga dapat diamati dari morfologi kegagalan serat. Analisis terhadap morfologi dapat menunjukkan apakah rekayasa *interface* dapat berhasil dalam prosesnya dan apakah *interface* tersebut berperan dalam proses mentransfer tegangan dengan baik (Gambar 7 dan Gambar 8). Indikator dari *interface* yang baik ditunjukkan dengan kesempurnaan matrik dalam membasahi serat (Gambar 7B). Tentunya kesempurnaan kebasahan matrik pada serat akan berdampak pada kekuatan lekat matriks pada serat yang berimplikasi pada meningkatnya tegangan geser *interface* yang juga dapat diamati dari proses *debonding* serat terhadap matriks (Gambar 8C). Apabila dalam uji tersebut kekuatan geser *interface* meningkat secara signifikan maka dapat ditetapkan bahwa rekayasa *interface* yang dilakukan adalah sudah berhasil dengan baik (Gambar 7) [46].



Gambar 11. Rekayasa interface serat mendong – matriks epoksi. (A) Tanpa perlakuan; (B) Perlakuan medan listrik AC 750 V/cm, 1 kHz; (C) Perlakuan medan listrik AC 750 V/cm, 2 kHz; (D) Perlakuan medan listrik AC 750 V/cm, 3 kHz. Perbesaran 5000x [78].



Gambar 12. Mikrograf SEM dari spesimen tarik serat mendong pada rekayasa matriks dengan medan listrik. (a) Serat tertanam dalam epoksi, (b) rongga pada epoksi tanpa perlakuan setelah uji tarik, dan (c) rongga pada epoksi perlakuan menggunakan medan listrik AC 750 V/cm setelah uji tarik (panah menunjukkan proses deformasi elastis epoksi akibat kuatnya tegangan geser interface).

Kesimpulan

Hadirin yang saya hormati,

Mengakhiri pidato saya ini, dapat saya simpulkan yaitu

1. Potensi pengembangan komposit serat alam di Indonesia sangatlah besar mengingat sumberdaya yang dimiliki sangat besar dan peluang pasar komposit sangatlah besar
2. *Interface* serat matrik merupakan sumber utama dari kegagalan suatu struktur komposit dan rekayasa *interface* komposit dapat dilakukan melalui perlakuan eksternal baik melalui metode kimia, fisika, biologi, maupun dengan memanfaatkan material maju.
3. Peningkatan tegangan geser *interface* merupakan indikator keberhasilan rekayasa interface suatu komposit polimer berpenguat serat alam dan sebagai kunci suksesnya proses manufaktur suatu komposit polimer berpenguat serat alam.

Daftar Rujukan

- [1] D. Trache, M. H. Hussin, M. K. M. Haafiz, and V. K. Thakur, "Recent progress in cellulose nanocrystals: Sources and production," *Nanoscale*, vol. 9, no. 5, pp. 1763–1786, 2017.
- [2] B. Strain, M. Acoustic, and A. Gallego, "Monitoring of Carbon Fiber Reinforced Old Timber Emission Sensors," *Sensors*, vol. 18, no. 1224, 2018.
- [3] H. I. Hacıaloğlu, "A Review of the Global Composites Market and Turkish Composites Market," www.reinforcer.com, 2018. [Online]. Available: <https://www.reinforcer.com/en/category/detail/A-Review-of-the-Global-Composites-Market-and-Turkish-Composites-Market/61/350/0>.
- [4] Sudaryat, "Perlindungan hukum sumber daya genetik indonesia dan optimalisasi teknologi informasi," *Bina Huk. Lingkung.*, vol. 4, no. 2, pp. 236–250, 2020.
- [5] R. A. Buol, "Indonesia Perlu 'Database' Keanekaragaman Hayati," *Regional.kompas.com*, 2013. [Online]. Available: <https://regional.kompas.com/read/2013/07/05/1509063/Indonesia.Perlu.Database.Keanekaragaman.Hayati>.
- [6] Mohanty, M. Misra, and L. T. Drzal, "Natural fibers, biopolymers, and biocomposites: an introduction," in *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites.*, no. Taylor and Francis Publisher, 2005, pp. 1–36.
- [7] M. Ho *et al.*, "Composites : Part B Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites," *Compos. Part B*, vol. 43, no. 8, pp. 3549–3562, 2012.
- [8] H. Suryanto, Y. S. Irawan, E. Marsyahyo, and R. Soenoko, "Morphology, Structure , and Mechanical Properties of Natural Cellulose Fiber from Mendong Grass (*Fimbristylis globulosa*)," *J. Nat. Fiber*, vol. 11, no. 3, pp. 1–19, 2014.
- [9] L. Nuryanti and B. Waryanto, *Statistik Pertanian 2016*. Jakarta: Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian, Kementerian Pertanian Republik Indonesia, 2016.
- [10] J. Foulk, D. Akin, R. Dodd, and C. Ulven, "Production of Flax Fibers for Biocomposites," in *Cellulose Fibers: Bio and Nano-Polymer Composites*, S. Kalia, B. S. Kaith, and I. Kaur, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 61–95.
- [11] M. loelovich and A. Leykin, "Structural investigations of various cotton fibers and cotton celluloses," *BioResources*, vol. 3, no. Mcc, pp. 170–177, 2008.
- [12] A. Bismarck, S. Mishra, and T. Lampke, "Plant Fibers as Reinforcement for Green Composites," in *Natural Fibers, Biopolymer, and Biocomposites*, vol. 6, L. T. Mohanty, A.K., Misra, M., and Drzal, Ed. Boca Raton: CRC Press Taylor and Francis group, 2005.
- [13] B. S. Kaith and S. Kalia, "Graft copolymerization of MMA onto flax under different reaction conditions: A comparative study," *Express Polym. Lett.*, vol. 2, no. 2, pp. 93–100, 2008.
- [14] N. Reddy and Y. Yang, "Properties of high-quality long natural cellulose fibers from rice straw.," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 54, no. 21, pp. 8077–81, Oct. 2006.
- [15] K. Pertanian, "Produksi Hortikultura," *Produksi Hortikultura*, 2020. [Online]. Available: <http://hortikultura2.pertanian.go.id/produksi/buahan.php?page=1>.
- [16] K. Senthilkumar, I. Siva, N. Rajini, J. T. Winowlin Jappes, and S. Siengchin, "Mechanical characteristics of tri-layer eco-friendly polymer composites for interior parts of aerospace application," in *Sustainable Composites for Aerospace Applications*, M. Jawaid and M. B. T.-S. C. for A. A. Thariq, Eds. Woodhead Publishing, 2018, pp. 35–53.
- [17] M. M. Ibrahim, W. K. El-Zawawy, Y. Jüttke, A. Koschella, and T. Heinze, "Cellulose and microcrystalline cellulose from rice straw and banana plant waste: Preparation and characterization," *Cellulose*, vol. 20, no. 5, pp. 2403–2416, 2013.
- [18] N. Prasad, V. K. Agarwal, and S. Sinha, "Banana fiber reinforced low density polyethylene composites: effect of chemical treatment and compatibilizer addition," *Iran. Polym. J.*, vol. 25, no. 3, pp. 229–241, 2016.

- [19] S. Das, M. Rahman, and M. Hasan, "Physico-Mechanical Properties of Pineapple Leaf and Banana Fiber Reinforced Hybrid Polypropylene Composites: Effect of Fiber Ratio and Sodium Hydroxide Treatment," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 438, p. 12027, 2018.
- [20] M. Mahardika, H. Abral, A. Kasim, S. Arief, and M. Asrofi, "Production of Nanocellulose from Pineapple Leaf Fibers via High-Shear Homogenization and Ultrasonication," *Fibers*, vol. 6, May 2018.
- [21] W. Wang, Z. Cai, J. Yu, and Z. Xia, "Changes in Composition, Structure, and Properties of Jute Fibers after Chemical Treatments," *Fibers Polym.*, vol. 10, no. 6, pp. 776–780, 2009.
- [22] L. Y. Mwaikambo, "Tensile properties of alkalis jute fibres", *BioResources*, vol. 4, no. 2, pp. 566–588, 2009.
- [23] E. Sinha and S. K. Rout, "Influence of fibre-surface treatment on structural, thermal and mechanical properties of jute fibre and its composite," *Bull. Mater. Sci.*, vol. 32, no. 1, pp. 65–76, May 2009.
- [24] R. R. Rizkiansyah *et al.*, "Serat Kapuk Sebagai Bahan Baku Pembuatan Mikrokrystalin Selulosa," *J. Sains Mater. Indones.*, vol. 17, no. 4, pp. 172–177, 2016.
- [25] Y. Zheng and A. Wang, "Kapok Fiber: Structure and Properties," in *Biomass and Bioenergy*, K. Hakeem, M. Jawaid, and U. Rashid, Eds. Springer, Cham., 2014, pp. 101–110.
- [26] M. Murianingrum, U. S. Budi, Marjani, and Nurindah, "The Potency of Indonesian Ramie to Support Textile Industry," *Proceeding Indones. Text. Conf.*, vol. 1, pp. 1–11, 2019.
- [27] Y. Song *et al.*, "An alkali-free method to manufacture ramie fiber," *Text. Res. J.*, vol. 89, no. 17, pp. 3653–3659, 2019.
- [28] J. F. Revol, A. Dietrich, and D. A. I. Goring, "Effect of mercerization on the crystallite size and crystallinity index in cellulose from different sources," *Can. J. Chem.*, vol. 65, no. 8, pp. 1724–1725, 1987.
- [29] R. Manjula, N. V Raju, R. P. S. Chakradhar, E. Kalkornsuraprane, and J. Johns, "Influence of Chemical Treatment on Thermal Decomposition and Crystallite Size of Coir Fiber," *Int. J. Thermophys.*, vol. 39, no. 1, p. 3, 2017.
- [30] M. R. Cabral *et al.*, "Evaluation of pre-treatment efficiency on sugarcane bagasse fibers for the production of cement composites," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 18, no. 4, pp. 1092–1102, 2018.
- [31] R. Hasta, "The Study of Anatomy and Application of Mendong Straw (*fimbristylis globulosa* (Retz) Kunth) as Craft material in District of Wajak, Malang," *Bachelor Thesis Biol. Sci. Dep. Mat. Sci. Univ. Brawijaya, Indones. Not Publ.*, 2007.
- [32] J. Gassan and A. K. Bledzki, "Possibilities for improving the mechanical properties of jute / epoxy composites by alkali treatment of fibres," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 59, pp. 1303–1309, 1999.
- [33] D. Rouison, M. Sain, and M. Couturier, "Resin transfer molding of natural fiber reinforced composites: cure simulation," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 64, no. 5, pp. 629–644, Apr. 2004.
- [34] K. Abe and H. Yano, "Comparison of the characteristics of cellulose microfibril aggregates of wood, rice straw and potato tuber," *Cellulose*, vol. 16, no. 6, pp. 1017–1023, Jun. 2009.
- [35] Rowell, J. S. Han, and J. S. Rowell, "Characterization and Factors Effecting Fiber Properties," in *Natural Polymer and Agrofibre Based Composites*, Sao Carlos, Brazil: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2000, pp. 115–134.
- [36] S. Panthapulakkal, A. Zereshkian, and M. Sain, "Preparation and characterization of wheat straw fibers for reinforcing application in injection molded thermoplastic composites," *Bioresour. Technol.*, vol. 97, pp. 265–272, 2006.
- [37] P. S. Mukherjee and K. G. Satyanarayana, "Structure and properties of some vegetable fibres," *J. Mater. Sci.*, vol. 19, no. 12, pp. 3925–3934, Dec. 1984.
- [38] R. Siakeng, M. Jawaid, H. Ariffin, and S. M. Sapuan, "Thermal properties of coir and pineapple leaf fibre reinforced polylactic acid hybrid composites," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 368, p. 12019, 2018.

- [39] J. Park, S. Tran, B. Hwang, and K. L. Devries, "Interfacial evaluation of modified Jute and Hemp fibers / polypropylene (PP) -maleic anhydride polypropylene copolymers (PP-MAPP) composites using micromechanical technique and nondestructive acoustic emission," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 66, pp. 2686–2699, 2006.
- [40] P. Pulp and S. For, "Kapok i: characteristics of kapok fiber as a potential pulp source for papermaking," *BioResources*, vol. 7, pp. 475–488, 2011.
- [41] R. Purnawati and F. Febrianto, "Physical and Chemical Properties of Kapok (Ceiba pentandra) and Balsa (Ochroma pyramidale) Fibers," *J. Korean Wood Sci. Technol*, vol. 46, no. 4, pp. 393–401, 2018.
- [42] R. Xia and X. Li, "Mechanical properties testing of kapok fiber and its SiO₂ composite," in *International Conference on Experimental Mechanics*, 2009, vol. 7375, pp. 1–5.
- [43] L. Y. Mwaikambo, "Review of the history, properties and application of plant fibres," *African J. Sci. Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 120–133, 2006.
- [44] N. Ashiqeen Jamaluddin *et al.*, "Comparison of tensile properties between natural fibres and inorganic fibres for strengthening timber structures," *MATEC Web Conf.*, vol. 276, 2019.
- [45] S. Shibata, Y. Cao, and I. Fukumoto, "Effect of bagasse fiber on the flexural properties of biodegradable composites," *Polym. Compos.*, vol. 26, no. 5, pp. 689–694, Oct. 2005.
- [46] H. Suryanto, E. Marsyahyo, Y. Surya Irawan, R. Soenoko, and Aminudin, "Improvement of interfacial shear strength of Mendong fiber (*Fimbristylis globulosa*) reinforced epoxy composite using the AC electric fields," *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2015, no. Article Id. 542376, pp. 1–10, 2015.
- [47] H. Suryanto, Y. S. Irawan, E. Marsyahyo, and R. Soenoko, "Karakteristik Serat Mendong (*Fimbristylis globulosa*): Upaya Menggali Potensi Sebagai Penguat Komposit Matriks Polimer," in *Seminar Nasional Green Technology 3*, 2012, pp. 49–53.
- [48] H. Suryanto, Y. R. A. Pradana, and U. Yanuhar, "Effect of Exposure to the Electric Fields Frequency on Interfacial Properties of Mendong Fiber-Epoxy Composite," *J. Eng. Sci. Technol. Rev.*, vol. In Press, 2021.
- [49] H. Quan, Z.-M. Li, M.-B. Yang, and R. Huang, "On transcrystallinity in semi-crystalline polymer composites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 65, no. 7–8, pp. 999–1021, Jun. 2005.
- [50] W. Song, A. Gu, G. Liang, and L. Yuan, "Effect of the surface roughness on interfacial properties of carbon fibers reinforced epoxy resin composites," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 257, no. 9, pp. 4069–4074, Feb. 2011.
- [51] L. Xu and L. T. Drzal, "Improvement of Adhesion Between Vinyl Ester Resin and Carbon Fibers," in *Proceeding of the 13th International Conference on Composite Materials (ICCM)*, 2001, pp. 1–10.
- [52] L. T. Drzal, "The Effect of Polymeric Matrix Mechanical Properties on the Fiber-Matrix Interfacial Shear Strength," *Mater. Sci. Eng.*, vol. 126, pp. 289–293, 1990.
- [53] N. Le Moigne, B. Otazaghine, S. Corn, H. Angellier-Coussy, and A. Bergeret, "Interfaces in Natural Fibre Reinforced Composites: Definitions and Roles," in *Surfaces and Interfaces in Natural Fibre Reinforced Composites*, SpringerBriefs in Molecular Science. Springer, Cham., 2018, pp. 23–34.
- [54] R. Plonka, E. Mäder, S. Gao, C. Bellmann, V. Dutschk, and S. Zhandarov, "Adhesion of epoxy/glass fibre composites influenced by aging effects on sizings," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 35, no. 10, pp. 1207–1216, Oct. 2004.
- [55] L. Y. Mwaikambo and M. P. Ansell, "Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 84, no. 12, pp. 2222–2234, Jun. 2002.
- [56] Z. Zhou *et al.*, "Surface & Coatings Technology Hydrophobic surface modification of ramie fibers with ethanol pretreatment and atmospheric pressure plasma treatment," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 205, no. 17–18, pp. 4205–4210, 2011.
- [57] Z. X. Jiang, Y. D. Huang, L. Liu, and J. Long, "Effects of roughness on interfacial performances of silica glass and non-polar polyarylacetylene resin composites," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 253, no. 24, pp. 9357–9364, 2007.

- [58] D. E. Packham, "Surface energy, surface topography and adhesion", *Science (80-.)*, vol. 23, pp. 437–448, 2003.
- [59] S. M.R., S. Siengchin, J. Parameswaranpillai, M. Jawaid, C. I. Pruncu, and A. Khan, "A comprehensive review of techniques for natural fibers as reinforcement in composites: Preparation, processing and characterization," *Carbohydr. Polym.*, vol. 207, pp. 108–121, 2019.
- [60] O. Adekomaya and T. Majazi, "Sustainability of surface treatment of natural fibre in composite formation : challenges of environment-friendly option," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 105, pp. 3183–3195, 2019.
- [61] H. Wang, G. Xian, and H. Li, "Grafting of nano-TiO₂ onto flax fibers and the enhancement of the mechanical properties of the flax fiber and flax fiber / epoxy composite Composites : Part A Grafting of nano-TiO₂ onto flax fibers and the enhancement of the mechanical properties of the flax fiber and flax fiber / epoxy composite," *Compos. PART A*, vol. 76, no. September, pp. 172–180, 2015.
- [62] A. C. Moloney, H. H. Kausch, T. Kaiser, and H. R. Beer, "Parameters determining the strength and toughness of particulate filled epoxide resins," *J. Mater. Sci.*, vol. 22, no. 2, pp. 381–393, Feb. 1987.
- [63] S. Y. Fu, X. Q. Feng, B. Lauke, and Y. W. Mai, "Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 39, pp. 933–961, 2008.
- [64] R. Paper, S. Tiwari, J. Bijwe, and S. Panier, "Strengthening of a Fibre Matrix Interface : A Novel Method Using Nanoparticles," *Nanomater. Nanotechnol.*, vol. 3, pp. 1–8, 2013.
- [65] M. Lin, C. Liu, and C. Lee, "Toughened Interpenetrating Polymer Network Materials," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 72, no. May 1998, pp. 585– 592, 1999.
- [66] S. H. Deng, X. D. Zhou, M. Q. Zhu, C. J. Fan, and Q. F. Lin, "Interfacial toughening and consequent improvement in fracture toughness of carbon fiber reinforced epoxy resin composites : induced by diblock copolymers," *eXPRESS Polym. Lett.*, vol. 7, no. 11, pp. 925–935, 2013.
- [67] J. K. Kim and R. E. Robertson, "Toughening of thermoset polymers by rigid crystalline particles," *J. Mater. Sci.*, vol. 27, no. 1, pp. 161–174, 1992.
- [68] C. Carfagna, L. Nicolais, E. Amendola, and A. G. Filippov, "Toughening epoxy resins by liquid crystalline polymers," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 44, no. 8, pp. 1465–1471, Mar. 1992.
- [69] J. Karger-kocsis, "How Does 'Phase Transformation Toughening' Work in Semicrystalline Polymer?," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 36, no. 2, pp. 203–210, 1996.
- [70] P. Palmero, L. Montanaro, H. Reveron, and J. Chevalier, "Surface Coating of Oxide Powders: A New Synthesis Method to Process Biomedical Grade Nano-Composites," *Materials (Basel)*, vol. 7, no. 7, pp. 5012–5037, Jul. 2014.
- [71] C. Park and R. E. Robertson, "Crystallization of poly (ethylene oxide) in a photopolymerizable monomer under an electric field," *Polymer (Guildf)*, vol. 42, pp. 2597–2609, 2001.
- [72] G. Kim and Y. M. Shkel, "Polymeric composites tailored by electric field," *Mater. Res.*, vol. 19, no. 04, pp. 1164–1174, 2004.
- [73] M. Tehrani, M. Al-Haik, H. Garmestani, and D. Li, "Effect of Moderate Magnetic Annealing on the Microstructure, Quasi-Static, and Viscoelastic Mechanical Behavior of a Structural Epoxy," *J. Eng. Mater. Technol.*, vol. 134, no. January, pp. 1–10, 2012.
- [74] Y. Li and M. R. Kessler, "Liquid crystalline epoxy resin based on biphenyl mesogen: Effect of magnetic field orientation during cure," *Polymer (Guildf)*, vol. 54, no. 21, pp. 5741–5746, Oct. 2013.
- [75] A. V. Gonzalez, J. M. Cervantes, R. Olayo, and P. J. H. Franco, "Effect of fiber surface treatment on the fiber–matrix bond strength of natural fiber reinforced composites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 30, no. 3, pp. 309– 320, Apr. 1999.
- [76] W. Beckert and B. Lauke, "Critical discussion of the single-fibre pull-out test: does it measure adhesion?," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 57, no. 12, pp. 1689–1706, Jan. 1998.

- [77] Tsai and K.-S. Kim, "The Micromechanics of Fiber Pull-Out," *J. Mech. Phys Solid*, vol. 44, no. 7, pp. 1147–1177, 1996.
- [78] H. Suryanto, Y. R. A. Pradana, and U. Yanuhar, "Effect of Exposure to The Electric Fields Frequency on Interfacial Properties of Mendong Fiber-Epoxy Composite," *J. Eng. Sci. Technol. Rev.*, p. (in press), 2021.

Strategi Desain Manufaktur, dan Aplikasi Teknologi Tepat Guna (*Appropriate Technology*) Dalam Peningkatan Daya Saing Nasional

Prof. Dr. Muhammad Alfian Mizar, M.P.

Bismillahirohamanirohim

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarokatuh

Alhamdulillah Wa syukurillah La Hawla Wala Quwwata Illa Billah

- Yth. Ketua Senat Universitas Negeri Malang, Bapak Prof. Dr. Suko Wiyono, S.H., M.Hum.
- Yth. Rektor Universitas Negeri Malang, Bapak Prof. Dr. Ah. Rofi'uddin, M.Pd.
- Yth. Para Anggota Senat, Ketua dan para Anggota Komisi Guru Besar Universitas Negeri Malang
- Yth. Para Pejabat Struktural Universitas Negeri Malang
- Yth. Kepala Badan Penelitian dan Pengembangan Propinsi Jawa Timur
- Yth. Kepala Badan Penelitian dan Pengembangan Daerah Kabupaten Malang
- Yth. Kepala Dinas Pemberdayaan Masyarakat dan Desa Provinsi Jawa Timur
- Yth. Ketua Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Universitas Brawijaya Malang
- Yth. Anggota Komisi D (Bidang Pendidikan) DPRD Kota Malang (Bapak Suryadi, S.Pd., MM)
- Yth. Ketua Asosiasi Sentra Kekayaan Intelektual Indonesia
- Yth. Ketua Forum Layanan Ipteks bagi Masyarakat Indonesia (Prof. Dr. rer.nat. apt. Sundani Nuroso Soewandhi)
- Yth. Rekan sejawat dosen, tenaga fungsional, dan mahasiswa Universitas Negeri Malang
- Yth. Para tamu undangan dan hadirin yang berbahagia

Mengawali pidato ini, marilah kita bersama-sama memanjatkan puji syukur kehadiran Allah SWT, Tuhan Yang Maha Kuasa atas segala nikmat dan karunia-Nya tiada terhingga yang terlimpahkan kepada kita semua dan kami sekeluarga khususnya, sehingga hari ini kita dapat berbagi kebahagiaan atas rasa syukur itu melalui majelis terhormat ini. Lebih khusus, saya bersyukur pada hari ini saya masih diberi kesempatan dan kehormatan untuk memenuhi kewajiban akademik yang terpelihara dengan baik di Universitas Negeri Malang, yaitu menyampaikan pidato pengukuhan sebagai Guru Besar dalam bidang **Teknologi Tepat Guna (*Appropriate Technology*)** di Fakultas Teknik Universitas Negeri Malang. Kedua, saya sampaikan rasa terima kasih yang mendalam kepada Ketua Senat Universitas Negeri Malang Bapak Prof. Suko Wiyono, beserta segenap anggota Senat dan komisi Guru Besar, dan Rektor Universitas Negeri Malang Bapak Prof. Ah. Rofi'uddin serta segenap jajaran pimpinan dan staf yang telah menghantarkan saya untuk mendapatkan kehormatan berdiri di mimbar ini.

Hadirin yang saya muliakan,

Pidato yang akan saya sampaikan ini berjudul:

Strategi Desain Manufaktur, dan Aplikasi Teknologi Tepat Guna (*Appropriate Technology*) Dalam Peningkatan Daya Saing Nasional

Judul ini sengaja saya pilih karena beberapa alasan sebagai berikut:

Pertama, Percepatan pembangunan umumnya dilakukan dengan memprioritaskan pada program-program implementasi Ipteks bagi masyarakat, petani, nelayan, pengrajin, industri kecil dan menengah yang dilakukan melalui penyediaan sarana prasarana, pembangunan sistem agribisnis, pengembangan kelembagaan, penguasaan teknologi, serta pemanfaatan sumberdaya alam secara optimal dan bertanggung jawab.

Kedua, pemanfaatan teknologi pada IKM masih rendah jika dibandingkan dengan tuntutan bisnis di lapangan, sehingga peluang yang seharusnya bisa dimanfaatkan IKM Indonesia direbut produk impor. Pemanfaatan teknologi oleh kalangan IKM di Indonesia dapat dikatakan tertinggal oleh negara pesaing seperti China dan sebagian Negara Asean seperti Malaysia, Thailand, dan Singapura (Sudaryanto, 2005).

Ketiga, Banyak temuan TTTG untuk kalangan masyarakat IKM di Indonesia, tetapi sulit diaplikasikan, hal ini disebabkan antara lain lemahnya lembaga intermediasi dan kesiapan SDM IKM dalam menerima teknologi. Menurut Munaf (2006), pengembangan dan pemberdayaan IKM melalui penguatan kemampuan teknologi saat ini masih menghadapi beberapa kendala antara lain keterbatasan kemampuan IKM dalam memanfaatkan teknologi dan kurangnya promosi proaktif lembaga penghasil teknologi. Kondisi tersebut banyak disebabkan kurangnya kemampuan SDM di IKM dalam melihat peluang ganda dari pemanfaatan TTTG. Meskipun telah banyak upaya yang dilakukan untuk peningkatan kemampuan berteknologi bagi IKM tetapi dampak keberlanjutan peningkatan kemampuan IKM dalam memanfaatkan teknologi belum berjalan dengan baik.

Keempat, Adanya gap antara penghasil teknologi dengan pengguna teknologi yang antara lain disebabkan: (1) keterbatasan kemampuan IKM dalam memanfaatkan TTTG, (2) kebutuhan TTTG belum banyak didasarkan atas kebutuhan riil yang diperlukan oleh IKM agar menjadi solusi bagi masalah yang benar-benar dihadapinya, artinya penerapan TTTG pada IKM kurang tepat (*inappropriate*), apa yang dipersepsikan sebagai teknologi oleh pihak penghasil TTTG seringkali diserahkan begitu saja tanpa terlebih dahulu memahami apa sebenarnya masalah yang dihadapi, dan kebutuhan TTTG macam apa yang diperlukan oleh masyarakat/IKM sebagai pengguna TTTG tersebut. Skema pada gambar 1 dan 2 berikut menunjukkan adanya gap hasil temuan dengan kebutuhan IKM.

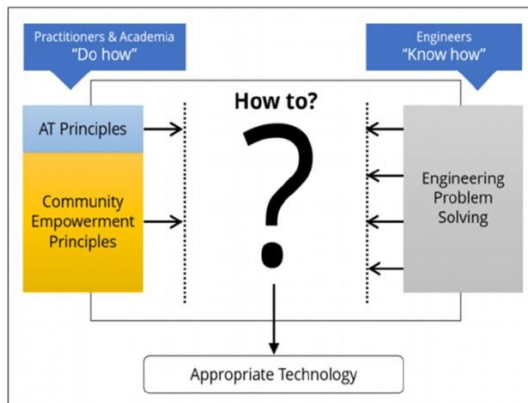
Hadirin yang saya hormati,

1. PENDAHULUAN

Dalam pidato ini akan diuraikan tentang: (1) Pengertian Teknologi Tepat Guna (TTG), (2) Desain manufaktur Teknologi Tepat Guna, (3) Pentingnya inovasi teknologi, (4) Aplikasi Teknologi Tepat Guna, dan (5) Kemampuan berteknologi dalam pengembangan industri kecil.



Gambar 1. Skema Adanya Gap Hasil Temuan Iptek dengan Kebutuhan Industri Kecil Menengah



Gambar 2. The Research Gap

Implementasi TTG dapat dipandang sebagai sebuah strategi untuk mengoptimalkan pen-dayagunaan semua aspek sumberdaya lokal (manusia, alam, teknologi, dan sosial) secara berke-lanjutan, yang mampu memberikan nilai tambah untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat, dan pada gilirannya akan memberikan kontribusi dalam peningkatan daya saing bangsa. Lahirnya Peraturan Bersama Menteri Riset dan Teknologi, dan Menteri Dalam Negeri Republik Indonesia No. 3 Tahun 2012 dan No. 36 Tahun 2012 tentang Penguatan Sistem Inovasi Daerah menjadi instrumen pemerintah dalam menumbuh-kembangkan peningkatan produktivitas daya saing nasional maupun daerah yang menuntut adanya peningkatan kapasitas inovatif. Pemanfaatan TTG memiliki peran yang sangat strategis di dalam mendorong berkembangnya kegiatan inovatif di masyarakat. Sistem inovasi yang efektif ditunjukkan dengan adanya interaksi antar berbagai *stakeholder* yang terkait dalam menyelesaikan sebuah isu/tema sebagai potensi strategik daerah (PPTTG-LIPI, 2016).

Berbagai macam mekanisme difusi dan pemanfaatan TTG telah diterapkan oleh penghasil teknologi kepada masyarakat, tetapi tingkat keberhasilannya masih belum maksimal, sehingga banyak teknologi khususnya TTG yang dihasilkan kurang terpakai oleh masyarakat. Pelajaran yang dapat diambil dari pengalaman itu adalah bahwa di dalam menerapkan dan mengembangkan serta menyebarluaskan TTG perlu dilakukan studi kelayakan untuk menilai aspek-aspek kelayakan teknis, kelayakan ekonomis, kelayakan sosial budaya dan lingkungan, serta standardisasi teknologinya (Angkasa, *et al* 2003).

Usaha pengembangan dan penerapan TTG diperlukan guna mendukung perubahan cara kerja dan percepatan penyesuaian sikap masyarakat khususnya IKM. Oleh karena itu, teknologi yang dimiliki oleh masyarakat sudah waktunya secara bertahap ditingkatkan untuk memperbaiki proses serta mutu produksi, dan mempercepat pertumbuhan ekonomi yang diharapkan dapat menjawab tantangan pembangunan.

Perguruan Tinggi memiliki peran penting dalam melakukan pemikiran kebutuhan teknologi. Oleh karenanya, sarana penyelesaian permasalahan masyarakat selayaknya mulai dicermati dan dicoba untuk dikons-truksikan. Untuk itu, perlu merencanakan dan melaksanakan penguasaan, pemanfaatan, dan pemajuan Ilmu pengetahuan dan teknologi dengan pendekatan lebih strategis. Kemitraan IKM dengan Perguruan Tinggi dan lembaga penelitian pengembangan merupakan faktor sangat penting, karena dapat berperan sebagai simpul-simpul jaringan yang bermanfaat bagi IKM untuk memantau dan menguasai kemajuan Iptek, serta menggali potensi pemanfaatannya sehingga IKM dalam memanfaatkan kemajuan Iptek dapat lebih maksimal dan diperkecil resikonya.

Salah satu alternatif untuk mengembangkan dan meningkatkan daya saing masyarakat khususnya IKM adalah dengan mengembangkan dan mendorong pembentukan keterkaitan IKM dengan lembaga litbang khususnya dalam pemanfaatan teknologi. Meskipun persoalan pemanfaatan teknologi telah menjadi suatu strategi bagi IKM dan lembaga penghasil teknologi, tetapi berbagai studi menunjukkan bahwa pemanfaatan teknologi di IKM masih saja merupakan area yang problematis. Keputusan strategis, seperti alokasi sumberdaya untuk mendapatkan teknologi dan mengembangkan kemampuan berteknologi, haruslah dianalisis secara komprehensif, kritik umum yang sering muncul dalam interaksi ini adalah penerapan teknologi kepada IKM masih belum tepat (*inappropriate*) bahkan seringkali mengalami kegagalan.

1. Pengertian Teknologi Tepat Guna (TTG)

Hadirin yang berbahagia,

Menurut Schumacher dalam B2PTTG-LIPI (2005), dinyatakan bahwa negara berkembang dapat melaksanakan pembangunan dengan memanfaatkan teknologi yang khusus dibuat dan dikelolanya sendiri dengan mendayagunakan potensi lokal yang dimilikinya. Teknologi tersebut kemudian dikenal sebagai "*Appropriate Technology*" atau Teknologi Tepat Guna (TTG). Istilah TTG tidak lagi dibatasi pada teknologi sederhana, tetapi telah mengalami perkembangan yang didasarkan pada konteks daya guna dan manfaat dari suatu teknologi. Teknologi tepat guna diakui sebagai pemicu pertumbuhan, TTG dipahami sebagai teknologi yang sesuai dengan kondisi, waktu, ruang serta mudah dijangkau dan dipahami oleh masyarakat pengguna. Sebagaimana dijelaskan Khalil

(2000), bahwa *Appropriate Technology is used to indicate a good match between the technology utilized and the resources required for its optimal use.*

Lebih lanjut menurut Indriyono (1998), Teknologi tepat guna adalah teknologi yang banyak berhubungan dengan industri kecil, pertanian, dan pembangunan pedesaan, dimana klasifikasi/tingkat kecanggihannya pada posisi madya/menengah, yang berarti posisi spesifikasi teknologinya ditempatkan pada tingkat antara sederhana dan maju. Sedangkan menurut Sewoyo (dalam Alkadri, *et al.*, 2000) TTG adalah teknik dan peralatan yang dikembangkan dan diterapkan sesuai kebutuhan masyarakat, bersifat dinamis, sesuai kemampuan, tidak merusak lingkungan dan dapat dimanfaatkan oleh masyarakat dalam meningkatkan nilai tambah bagi masyarakat yang memanfaatkannya.

Teknologi Tepat Guna (TTG) adalah teknologi yang sesuai dengan kebutuhan masyarakat, dapat menjawab permasalahan masyarakat, tidak merusak lingkungan, dapat dimanfaatkan dan dipelihara oleh masyarakat secara mudah, serta menghasilkan nilai tambah dari aspek ekonomi dan aspek lingkungan (Permendes PDTT No. 23 Tahun 2017). Dengan demikian Teknologi tepat guna (TTG) atau "*Appropriate Technology*" adalah: Teknologi yang sesuai dengan kebutuhan masyarakat, berdaya guna dan bermanfaat, sesuai dengan kemampuan, tidak merusak lingkungan, tidak bertentangan dengan kebiasaan masyarakat, dan merupakan salah satu bentuk teknologi yang dipakai untuk meningkatkan produk/nilai tambah.

Setidaknya ada empat manfaat produk rekayasa inovasi TTG: (1) bermanfaat untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat melalui pemenuhan kebutuhannya, pemecahan masalahnya, dan penambahan hasil produksi yang makin meningkat dari biasanya, (2) TTG relatif mudah dipahami mekanismenya, mudah dipelihara, dan mudah di terapkan dalam kehidupan sehari-hari, (3) memacu kreativitas dan inovatif pembuatnya untuk terus berkarya mencapai optimal, dan (4) terciptanya lapangan pekerjaan untuk mewujudkan karya inovasi.

2. Desain Manufaktur Teknologi Tepat Guna

Hadirin yang saya hormati,

Desain produk dalam prakteknya tidak hanya sebagai kegiatan perancangan, mulai dari gambar sketsa, perhitungan gaya-gaya, analisis kekuatan komponen sebuah produk, dan menggambar sebuah komponen (produk), tetapi sudah harus melibatkan bidang manufaktur (produksi), kontrol kualitas, dan mengevaluasi kinerjanya. Hal tersebut dapat dilihat dari 3 aspek produk yaitu kualitas, biaya dan waktu produksi. Sebuah metode yang sangat aplikatif untuk memenuhi kebutuhan 3 aspek produk tersebut adalah metode perancangan untuk manufaktur - *design for manufacture* (DFM) (Batan M.L, 2015).

Terdapat 10 petunjuk (*guideline*) dari *design for manufacture* (DFM) untuk mengembangkan produk yang lebih ekonomis dengan kualitas tetap memenuhi persyaratan (El-Tamimi, Chang *et al.*, 1998, Boothroyd, 2002), petunjuk tersebut adalah sebagai berikut:

1. Mengurangi jumlah bagian-bagiannya atau komponennya,
2. Mengembangkan modular design,
3. Menggunakan komponen standar,
4. Merancang komponen (*part*) menjadi multi fungsi pada produk sejenis
5. Merancang komponen yang multi guna pada produk berbeda,
6. Merancang komponen yang mudah dibuat (difabrikasi),
7. Menghindari berbagai sambungan/pengikat
8. Meminimalkan arah perakitan yang berbeda,
9. Memaksimalkan pemenuhan persyaratan, dan
10. Mengurangi *handling*.

Berdasarkan petunjuk metode DFM, perlu dilakukan langkah sistematis untuk menerapkan petunjuk tersebut mulai dari tahap awal sampai tahap akhir, artinya pada langkah awal (langkah 1) akan dievaluasi apakah pada suatu rancangan TTG memungkinkan untuk dilakukan pengurangan jumlah bagian atau komponennya, demikian selanjutnya sampai langkah terakhir (langkah 10). Dalam beberapa kasus, tidak seluruh langkah dari petunjuk tersebut dilakukan, tergantung dari jenis produk

TTG dan perakitan. Berikut adalah uraian lengkap dari urutan langkah-langkah petunjuk evaluasi desain:

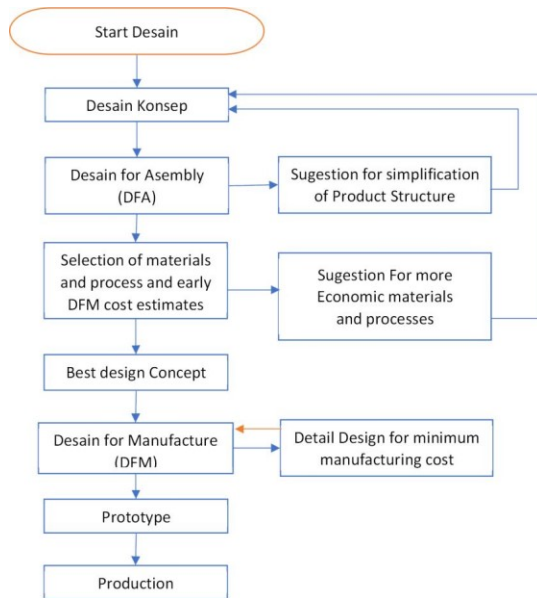
1. Mengurangi jumlah komponen, merupakan alternatif dan kesempatan terbaik untuk mengurangi biaya (*cost*), yang akan berdampak pada penurunan biaya, penyimpanan, *handling*, waktu proses, peralatan, kesulitan perakitan, dan pemeriksaan.
2. Pemakaian desain modular yaitu membagi sistem menjadi bagian-bagian kecil (modul) yang dapat dibuat mandiri, hal ini dimaksudkan akan lebih menyederhanakan dan mengurangi aktivitas manufaktur, seperti inspeksi, testing, perakitan, perawatan, redesain, dan pelayanan.
3. Komponen standard dapat menurunkan harga (biaya), karena ketersediaannya dapat terjamin sehingga waktu tunggu produksi dapat dikurangi. Komponen standard akan mempermudah pembelian baik dari segi kualitas, biaya dan waktu.
4. Komponen dibuat multi fungsi akan dapat mengurangi jumlah total komponen dalam perancangan produk yang sama.
5. Rancangan komponen multi guna dapat memberikan gambaran, sebuah komponen dapat digunakan (dalam fungsi yang berbeda) pada produk yang berbeda.
6. Membuat desain geometri yang sederhana, mudah di fabrikasi, pemilihan material dan proses manufaktur yang ekonomis, pemilihan toleransi dan/atau nilai kekasaran permukaan yang paling besar, tetapi fungsi komponen tetap terpenuhi.
7. Memanfaatkan sambungan yang seragam agar proses perakitan juga sejenis, sehingga dapat mengurangi waktu dan biaya perakitan.
8. Menghindari arah penyambungan atau perakitan yang berbeda-beda, akan dapat mengurangi waktu perakitan, mengurangi variasi dimensi sambungan, sehingga peralatan yang digunakan tidak banyak variasi.
9. Memaksimalkan pemenuhan persyaratan, dalam perakitan beberapa komponen perlu dirancang khusus tanda-tanda, agar perakitan tidak salah.
10. Mengurangi *handling* dengan cara menjaga ketepatan posisi, orientasi dan pemasangan, kurangi perakitan dengan tangan, pakailah peralatan yang sesuai.

Teknologi tepat guna adalah muara dari hasil riset menjadi sebuah produk tepat guna yang merupakan sebuah perwujudan hasil riset ke dalam pembuatan dan pengembangan produk. Oleh karena itu tujuan DFM selaras dengan TTG baik pada produk dengan level teknologi rendah, menengah, maupun produk dengan level teknologi tinggi, artinya perancangan untuk manufaktur dan perakitan sangat berpengaruh pada produk jenis apapun (Batan, I.M.L, 2015).

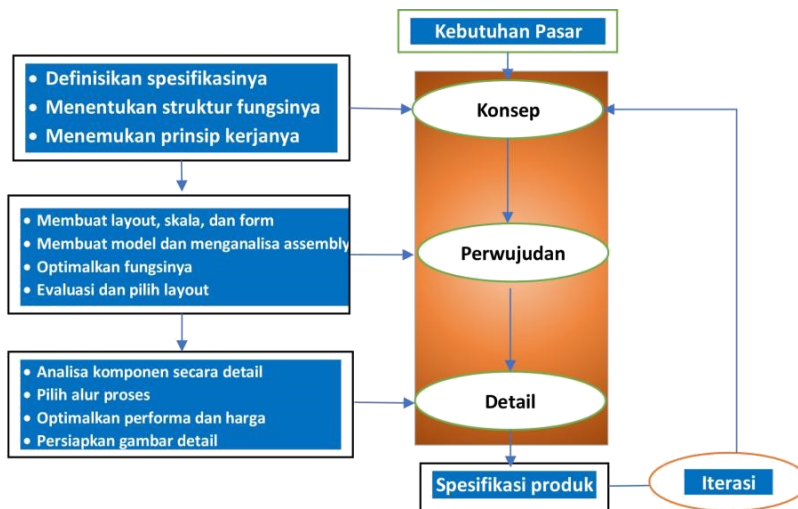
Memproduksi TTG mengacu pada pembuatan bagian komponen individu dari produk rakitan yang terintegrasi, sedangkan merakit mengacu pada penambahan atau penggabungan bagian untuk membentuk produk jadi. Oleh karena itu, istilah desain untuk pembuatan/manufaktur atau DFM berarti desain untuk kemudahan pembuatan koleksi suku cadang yang membentuk produk setelah dilakukan perakitan dan “desain untuk perakitan” (atau DFA) berarti desain produk untuk kemudahan perakitan, desain untuk pembuatan dan perakitan (DFMA) merupakan kombinasi DFA dan DFM (Geoffrey Boothroyd, 2011). DFMA digunakan untuk tiga kegiatan utama:

1. Sebagai dasar studi teknik konkuren untuk memberikan panduan desain dalam menyederhanakan struktur produk untuk mengurangi produksi, perakitan, biaya, dan untuk mengukur peningkatan.
2. Sebagai alat tolok ukur untuk mempelajari produk pesaing dan mengukur kesulitan manufaktur dan perakitan.
3. Sebagai instrumen dalam menentukan biaya yang seharusnya untuk membantu mengendalikan biaya dan untuk membantu bernegosiasi dengan pemasok kontrak.

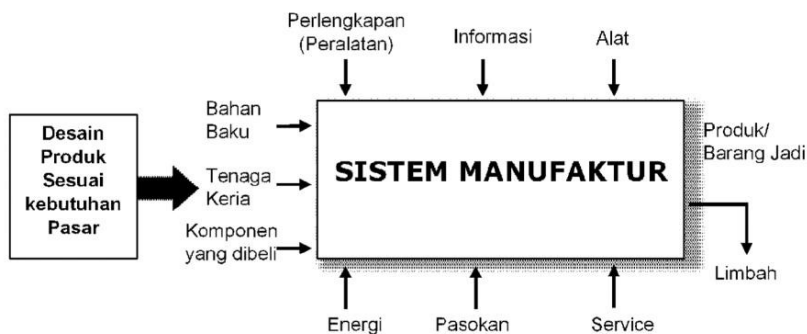
Pada proses DFA Analisis dilakukan pertama kali mengarah pada penyederhanaan struktur produk. Langkah-langkah yang diambil saat menggunakan DFMA selama desain ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Langkah-langkah yang dilakukan dalam Desain for Manufacturing and Assembly (DFMA) (Sumber: Geoffrey Boothroyd, Peter Dewhurst, Winston A. Knight. 2011).



Gambar 4. Desain Manufatur Berorientasi Kebutuhan Pasar



Gambar 5. Desain Produk Menuju Sistem Manufaktur

3. Pentingnya Inovasi Teknologi

Hadirin yang berbahagia,

Analisis Suhendri (2004) menjelaskan bahwa kemampuan inovasi merupakan faktor daya saing yang sangat penting, suatu inovasi seringkali melibatkan kegiatan *Research and Development* (R&D) secara ekstensif, tetapi karena objektif yang ingin dicapai adalah mendapatkan produk bernilai komersial maka kemampuan inovasi berakar pada kebutuhan industri mengatasi tekanan persaingan pasar. Apabila inovasi terjadi karena adanya terobosan yang dihasilkan oleh kegiatan litbang (*technical novelty*) maka inovasi ini bersifat *technology push*, sedangkan apabila lebih dipengaruhi oleh adanya peluang pasar maka inovasi tersebut bersifat *demand pull*.

Walaupun dalam kenyataannya suatu proses inovasi seringkali melibatkan modalitas *technology push* dan *demand pull* secara interaktif, tetapi kedua modalitas inovasi tersebut perlu difahami karena masing-masing mengandung tantangan yang berbeda. Tantangan modalitas *technology push* biasanya terletak pada kemampuan mengenali prospek ekonomi suatu hasil litbang, mengembangkan berbagai aspek teknis dan proses produksi untuk mengintegrasikan hasil riset tersebut ke dalam produk baru, serta kemampuan mengintroduksi produk baru tersebut ke pasar. Sedangkan pada modalitas *demand pull* tantangannya adalah pada kemampuan mengenali tuntutan perubahan dan persaingan pasar serta kemampuan memanfaatkan teknologi yang telah dimiliki untuk menghasilkan produk yang dapat mengisi tuntutan pasar secara cepat.

Kemampuan inovasi di suatu industri pada umumnya terbentuk melalui sinergi antara kemampuan mendayagunakan kemajuan teknologi untuk menghasilkan produk baru, kemampuan produksi, dan kemampuan pemasaran. Oleh karena setiap kegiatan produksi memerlukan pasokan dan dukungan dari industri lain, maka aliran teknologi dari industri pemasok dan industri penunjang juga merupakan aspek penting, demikian pula interaksi dengan kapasitas R&D yang ada di perguruan tinggi dan lembaga Litbang untuk mendapatkan pasokan iptek, merupakan unsur yang penting.

Kegiatan R&D di perguruan tinggi dan lembaga Litbang diperlukan untuk memperbesar *stock of knowledge* serta meningkatkan *tacit knowledge* untuk mengikuti dan mengadopsi kemajuan iptek, serta menggali potensi aplikasinya. Dengan demikian perkembangan kemampuan inovasi sangat terkait dengan keberadaan jaringan kelembagaan yang memfasilitasi aliran pengetahuan (*knowledge*) antara industri dengan industri lain dan antara industri dengan perguruan tinggi serta lembaga Litbang. Aliran pengetahuan dapat berbentuk aliran informasi, *codified* dan *uncodified information*, atau pertukaran *tacit knowledge*.

Mengkomunikasikan inovasi teknologi merupakan proses penyampaian informasi dari satu pihak ke pihak lain. saluran media massa relatif efektif menyampaikan "*knowledge*" inovasi, sedangkan saluran inter-personal relatif efektif dalam mempengaruhi apakah individu/ masyarakat akan menerima atau menolak inovasi.

Beberapa upaya yang dapat dilakukan dalam mengkomunikasikan inovasi teknologi kepada masyarakat, serta beberapa hal yang berperan dalam proses aplikasi dan difusi teknologi antara lain adalah: (1) *Awareness-building and technology demonstration*, (2) *information search and referral services*, (3) *technical assistance and consultancy*, (4) *training, collaborative research and technology projects*, (5) *personnel exchange and the support of R&D personnel*, (6) *standardization*, (7) *financial support*, (8) *procurement*, (9) *inter-firm cooperation, facilities for technology transfer*, (10) *regional or sectoral cluster measures*, dan (11) *macro policy measures*, (Shapira dalam Suhendri, 2004).

Beberapa aspek yang mempengaruhi cepat atau lambatnya suatu inovasi dapat diterapkan kepada masyarakat (diadopsi dari Rogers, 1995), adalah:

1. *Relative advantage* (keunggulan relatif/keuntungan relatif), apakah inovasi memberikan manfaat, yang diukur tidak hanya aspek teknis dan ekonomis, juga dikaitkan dengan *social prestige*, kenyamanan (*convenience*) dan kepuasan (*satisfaction*), jadi apakah inovasi yang di aplikasikan lebih baik dibandingkan inovasi sebelumnya (*existing*), paling tidak inovasi itu mempunyai keuntungan relatif 25-30% dari nilai sebelumnya.
2. *Compatibility* (kesesuaian), apakah inovasi tersebut konsisten dengan nilai-nilai yang ada, pengalaman sebelumnya dan kebutuhan masyarakat-. Inovasi yang tidak sesuai dengan nilai-nilai dan norma-norma masyarakat akan sulit diaplikasikan.

3. *Complexity* (kerumitan), berkaitan dengan tingkat kesulitan hasil inovasi untuk dipahami dan digunakan oleh individu atau masyarakat/ dunia industri. Inovasi yang kompleks relatif lebih sulit di terapkan dibanding dengan inovasi yang relatif lebih sederhana.
4. *Trialability* (ketercobaan), sejauh mana inovasi dapat dicoba dan diuji dalam skala kecil, inovasi yang *trialable* akan mengurangi keraguan individu atau masyarakat/dunia imndustri untuk mempelajari dan kemudian mempertimbangkan untuk menggunakannya.
5. *Observability* (keteramatan), mudah dilihat atau diamati secara fisik relatif akan memudahkan dalam menstimulasi masyarakat untuk menggunakannya.

4. Aplikasi Teknologi Tepat Guna (TTG)

Hadirin yang saya hormati,

Penerapan TTG merupakan proses untuk mempercepat pemanfaatan teknologi dari pencipta/pemilik kepada pengguna, penerapan teknologi berarti menjadikan teknologi itu sebagai bagian dari pengoperasian fungsi-fungsi kehidupan pemakai teknologi, menjadikan teknologi diketahui, dapat di jangkau dan difungsikan di lingkungan yang membutuhkan.

Manfaat penerapan teknologi adalah: (1) menyadarkan masyarakat akan pentingnya dukungan teknologi untuk meningkatkan produktifitas usahanya, (2) memberikan sentuhan teknologi dengan harapan akan meningkatkan produktivitas kerja, dan (3) penyebarluasan hasil teknologi akan berdampak pada banyak usaha/produksi dapat memanfaatkan teknologi tersebut sehingga diharapkan dapat memberikan nilai tambah produktivitas bagi IKM. Dinyatakan dalam Kep.Mendagri dan Menteri Otoda, No 4 Tahun 2001 bahwa TTG diterapkan untuk: (a) meningkatkan kemampuan pengetahuan dan keterampilan masyarakat dalam menggunakan TTG untuk peningkatan kapasitas dan mutu produksi, (b) meningkatkan pelayanan informasi dan membantu masyarakat untuk mendapatkan TTG yang dibutuhkan, (c) meningkatkan nilai tambah ekonomi masyarakat, dan (d) meningkatkan daya saing produk unggulan daerah.

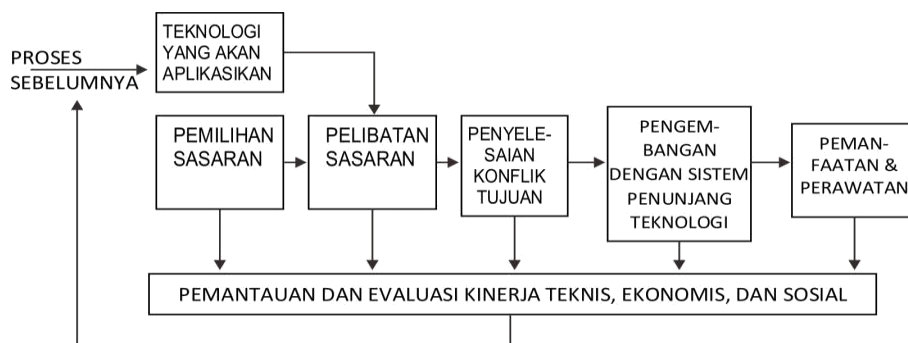
Rincian kinerja atau keberhasilan teknologi oleh Sudarmo (2005) diukur dari empat faktor: *pertama*, kelayakan teknis, teknologi harus menghasilkan nilai lebih, mempunyai fitur atau kemampuan yang makin beragam untuk memenuhi kebutuhan, hemat dalam menggunakan sumberdaya termasuk energi, awet, dan faktor teknis lainnya. *Faktor kedua*, teknologi harus menghasilkan produktivitas ekonomi atau keuntungan finansial. Salah satu cara untuk mengevaluasi produktivitas teknologi adalah menghitung rasio *output* rupiah dibandingkan dengan *input* rupiah, baik untuk jangka pendek, menengah, maupun jangka panjang. Teknologi yang tidak menghasilkan keuntungan atau nilai produktivitasnya kurang dari satu, disebut *non-pervorming*, tidak berkinerja. Teknologi yang *non-pervorming* biasanya tidak *sustainable*, tidak berkelanjutan perkembangannya. *Faktor keti-ga*, teknologi harus dapat diterima masyarakat pengguna (*user*). Teknologi dapat diterima karena memang diperlukan dan bermanfaat bagi pengguna, disenangi, mudah dipakai, dapat diperoleh dengan harga terjangkau, serta tidak bertentangan dengan kebiasaan, adat istiadat, dan budaya masyarakat. *Faktor keempat*, teknologi harus serasi dengan lingkungan, faktor ini akan menentukan *sustainability* keberadaan teknologi ditengah masyarakat yang menggunakannya. Empat faktor tesebut adalah tolok ukur yang digunakan untuk mengevaluasi TTG pada umumnya.

Pertimbangan penerapan teknologi ditekankan pada ketepatan agar efisiensi dan efektifitas proses produksi dapat memberikan hasil yang maksimal dan lebih mudah untuk dikembangkan. Efisien adalah penggunaan waktu dan tenaga proses produksi relatif lebih cepat, sedangkan efektif menyangkut hasil teknologi dapat beroperasi dengan baik sesuai fungsi atau kebutuhan, tidak cepat rusak dan relatif lebih baik dari hasil sebelumnya (Indriyono, 1998).

Penerapan TTG secara tepat dan sesuai kebutuhan diharapkan mampu meningkatkan kapasitas dan kualitas produk yang berdaya saing sehingga mampu mendorong berkembangnya usaha secara berkelanjutan. Pemanfaatan TTG secara intensif akan mampu mewujudkan IKM untuk mengefisienkan biaya produksi, memperbaiki mutu proses produksi, meningkatkan kapasitas, ketelitian, dan flleksibilitas, serta nilai tambah produk. Perbaikan proses, kapasitas dan mutu produk akan memberikan dukungan cukup nyata bagi IKM dalam rangka menjawab kebutuhan pasar.

Dalam penerapannya, meskipun suatu jenis TTG sudah melalui ujicoba, tetapi masih banyak yang belum diketahui apakah TTG tersebut akan mencapai kinerja teknik dan ekonomi seperti yang sudah ditetapkan sebelumnya, karena pada waktu TTG dikembangkan yang digunakan adalah informasi yang sifatnya makro dan masih bersifat umum. Sedangkan dalam penerapannya TTG tersebut akan berada dalam lingkungan mikro dengan sifat-sifatnya yang spesifik menurut tempat dan kebudayaan masyarakat pengguna. Ada kemungkinan bahwa hipotesis atau asumsi yang digunakan ternyata tidak benar, sehingga akan mengurangi kemanafaatannya. Apabila demikian akan membutuhkan adanya perubahan-perubahan pada teknologinya sendiri, ataupun hipotesis dan asumsi-asumsi yang menyangkut masyarakat sasaran dan lingkungannya.

Penerapan awal dapat mengandung kemungkinan kegagalan, walaupun dari segi kinerja teknis dan ekonomis teknologinya sudah baik. Hal itu disebabkan oleh berbagai faktor terpenting di antaranya tidak dianggapnya penerapan teknologi sebagai proses sosial. Artinya, bahwa cara-cara bagaimana masyarakat sasaran dipilih, dilibatkan dan dipersiapkan untuk menerima kehadiran TTG merupakan faktor penentu dalam keberhasilan atau kegagalan penerapan TTG. Proses penerapan awal di masyarakat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 6. Proses Penerapan Awal Suatu Teknologi

(Sumber: Toelihere, Mozes R.,1985)

Sebelum penerapan teknologi dilakukan, ada beberapa hal yang perlu diketahui mengenai kebutuhan akan teknologi yang akan diterapkan dari sudut pandang masyarakat sasaran, yaitu:

- (1) Apakah masyarakat sasaran merasa mempunyai persoalan mendesak yang dapat diselesaikan dengan penggunaan teknologi yang akan diterapkan?
- (2) Apakah masyarakat sasaran telah mengenal teknologi sejenis?
- (3) Bagaimana persepsi mereka terhadap teknologi tersebut?
- (4) Sejauh mana kesadaran mereka mengenai konsekuensi yang harus ditanggung untuk menggunakan teknologi tersebut?
- (5) Sejauh mana kesanggupan mereka untuk menerima konsekuensi tersebut?

Jawaban atas pertanyaan di atas akan menjadi pertimbangan untuk merencanakan pelaksanaan penerapan TTG, ada kemungkinan masyarakat sasaran belum merasakan kebutuhan akan TTG yang bersangkutan atau tidak sanggup untuk menanggung konsekuensi penerapan TTG tersebut. Selanjutnya adalah analisis mengenai kemampuan menyerap TTG, yang menyangkut beberapa faktor seperti: (a) tingkat penguasaan pengetahuan TTG; (b) tersedianya dana; (c) tersedianya tenaga kerja; (d) tersedianya waktu dan lain-lain. Kesemuanya itu merupakan sistem penunjang agar TTG dapat berfungsi secara optimal.

Menurut Disperindag Propinsi Jatim (2002), syarat penerapan TTG bagi IKM adalah: (1) penerapan TTG harus sesuai dengan kemampuan penyerapan secara ekonomi dan sosial budaya selaras dengan klasifikasi Industri kecil, (2) penerapan teknologi akan menambah lapangan pekerjaan, (3) penerapan teknologi disesuaikan dengan kapasitas produksi dan volume pemasarannya, (4) penerapan teknologi dapat mempertinggi pemanfaatan sumber daya lokal, (5) penerapan teknologi dapat memperbaiki teknologi yang telah ada sebelumnya, (6) dalam penerapan teknologi perlu

dipersiapkan dengan baik masyarakatnya dan teknologinya, (7) penerapan teknologi berwujud sederhana dan langsung dapat dirasakan manfaatnya. Penerapan teknologi akan dapat meningkatkan produksi, hal ini dimaksudkan bahwa dengan penggunaan faktor produksi yang sama dapat menghasilkan output yang lebih tinggi atau penggunaan input yang lebih sedikit dapat menghasilkan output yang sama dengan sebelum teknologi diterapkan (Nicholson, 1983).

Indikasi penerapan teknologi dapat dilakukan melalui tiga pendekatan, yaitu teknis, ekonomi dan sosial budaya (Suwito, dalam Najiyati, 2000). Pendekatan teknis ditekankan pada keberhasilan teknologi tersebut dalam meningkatkan produktivitas. Pendekatan ekonomi menyoroti dukungan pasar, kemampuan permodalan, dan adanya peningkatan pendapatan. Pendekatan sosial budaya ditekankan pada akseptabilitas dan tidak bertentangan dengan kebiasaan yang berlaku. Dengan demikian, keberhasilan aplikasi teknologi dalam mendukung pengembangan masyarakat/IKM akan tergantung pada kesesuaian teknologi tersebut dengan kondisi teknis, kondisi ekonomi, dan kondisi sosial budaya. Senada dengan pendapat Schumacher dalam Suwandi (1991), penerapan teknologi akan berhasil apabila sesuai dengan potensi sumberdaya alam, sumberdaya manusia, sumberdaya ekonomi, dan memberikan nilai tambah bagi penggunaannya. Jadi keberhasilan aplikasi teknologi tergantung pada kriteria kesesuaian teknologi tersebut. Kriteria kesesuaian teknologi pada masing-masing pendekatan tersebut adalah sebagai berikut:

- a) Teknis, dengan kriteria: (1) dapat meningkatkan produksi, (2) aplikasi teknologi sederhana dan dapat dilakukan oleh pengguna, (3) peralatan dan sarana produksi mudah didapat, dan (4) sudah teruji.
- b) Ekonomi, kriteria: (1) biaya operasional terjangkau, (2) secara finansial menguntungkan, (3) memberikan nilai tambah penjualan produknya.
- c) Sosial, kriteria: (1) sesuai atau tidak bertentangan dengan budaya masyarakat industri kecil setempat, (2) diminati oleh industri kecil.
- d) Lingkungan, kriteria: tidak menimbulkan dampak kerusakan lingkungan
- e) Kelembagaan, kriteria: ada dukungan kebijakan/kelembagaan

Apabila seluruh kriteria tersebut dipenuhi dan apabila sebagian kriteria tidak terpenuhi tetapi kendalanya dapat diatasi, maka teknologi tersebut dinyatakan dapat diterapkan. Sedangkan apabila salah satu kriteria tidak terpenuhi dan kendalanya tidak mungkin diatasi, maka teknologi tersebut dinyatakan tidak dapat diterapkan.

Dalam rangka pengembangan IKM, TTG merupakan bagian yang cukup strategis terutama dalam rangka meningkatkan efisiensi manajemen usaha dan nilai tambah produk yang dihasilkan sehingga memiliki daya saing di pasaran. Secara sederhana TTG merupakan teknologi yang mempunyai ciri: (a) dapat dioperasikan dengan mudah dan mampu merangsang pertumbuhan keterampilan berteknologi bagi pemanfaatnya, (b) sarana pendukung pengoperasian teknologi tersedia dengan mudah, (c) mampu meningkatkan kapasitas pengelolaan usaha lebih efisien dan bermutu, dan (d) penerapannya sangat memperhatikan keseimbangan dan keselarasan dengan lingkungan serta kemampuan ekonomi penggunaannya.

Penerapan teknologi yang sesuai konteks dan kondisi lokal penting untuk pembangunan berkelanjutan, metode yang lebih berkelanjutan sangatlah diperlukan dan menekankan pembangunan inklusif, oleh karena itu TTG memiliki potensi yang kuat di negara berkembang, konsep TTG didirikan seiring dengan pembangunan berkelanjutan yang mempertimbangkan kapasitas penerima untuk ketahanan dan ketekunan, akan tetapi terkadang banyak kegagalan karena sebagian besar ini dilakukan sebagai transfer teknologi yang bersifat sementara dalam praktik jangka pendek.

Menurut Munaf (2006), beberapa kendala yang menyebabkan kurang berhasilnya penerapan teknologi ke IKM disebabkan antara lain: (1) kurangnya konsistensi pelaksanaan implementasi, (2) kurangnya dukungan kemitraan antara IKM dengan industri besar; (3) kurangnya dukungan perundang-undangan yang mengatur proses penerapan teknologi kepada IKM dan (4) masih belum membudayanya penggunaan data dan informasi Iptek oleh kalangan IKM dalam melakukan kegiatan produksinya.

Faktor-faktor yang mempengaruhi penerapan TTG (diadopsi dari Fliegel, 1971), antara lain: (1) keuntungan relatif apabila TTG tersebut digunakan, (2) kecocokan TTG tersebut dengan norma kebudayaan dan lingkungan setempat, (3) hasil pengamatan terhadap TTG baru yang sedang dicoba oleh pengguna lain, (4) proses mencoba sendiri, juga sebagai dasar peletakan nilai kebenaran atau nilai kepercayaan akan keberhasilan TTG baru, (5) kondisi ekonomi yang ada, seperti modal tersedia, pasar sebagai tempat membeli input dan menjual output dan konsekuensi kenaikan hasil terhadap harga produksi akibat penggunaan TTG tersebut.

Dalam Gumbira (2004) juga disebutkan beberapa faktor yang mempengaruhi penerapan teknologi, antara lain: (1) karakteristik sosial, ekonomi, dan lokasi, (2) investasi yang diperlukan, (3) tingkat keuntungan atas investasi inovasi, (4) kesesuaian inovasi yang diperlukan, (5) keuntungan relatif dari teknologi lama versus baru, (6) kompleksitas dan efisiensi teknologi, (7) karakteristik dan mutu teknologi, dan (8) tingkat keusangan teknologi yang ada. Sedangkan Sulaiman (2003), menjelaskan bahwa berbagai aspek yang perlu dipertimbangkan dalam menerapkan teknologi, diantaranya aspek kelayakan teknis, ekonomis dan sosial-budaya. Kinerja industri dapat diperbaiki jika industri mampu memanfaatkan teknologi yang mendukung industrinya. Lebih lanjut sifat-sifat teknologi yang meliputi keuntungan relatif, kompatibilitas, kompleksitas, trialabilitas, dan observabilitas serta input komplementer menjadi faktor yang sangat berpengaruh terhadap penerapan teknologi.

Hasil penelitian Rashid (2001), menyatakan adanya empat faktor yang berdampak pada penerapan teknologi dan bertindak sebagai suatu struktur yang evaluatif untuk menentukan kecenderungan menerapkan inovasi teknologi di IKM, yaitu faktor teknologi, organisasi, individu, dan lingkungan. Sedangkan aspek teknologi itu sendiri meliputi keuntungan relatif dari inovasi, kompleksitas, kecocokan, biaya, dan gambaran inovasi. Sulaiman (2003) juga menjelaskan tentang berbagai aspek yang perlu dipertimbangkan dalam menerapkan teknologi, diantaranya aspek kelayakan teknis, ekonomis, dan sosial-budaya.

Beberapa studi yang menguji pengaruh aplikasi teknologi sebagai bagian strategi kompetitif terhadap kinerja industri dilakukan oleh Frohman (1985); Schroeder (1995), Price (1996), dan Whelen dan Honger (2002) dalam Sulaiman *et.al*, (2003). Aplikasi teknologi dalam mendukung strategi industri tidak selamanya memberikan hasil positif dan terbaik bagi pencapaian kinerja industri yang tinggi (Frohman, 1985). Disimpulkan bahwa jika suatu industri memutuskan untuk mengeksploitasi teknologi sebagai senjata kompetitif harus memenuhi tiga kondisi yaitu manajemen yang memiliki orientasi, sistem, serta struktur yang tepat dan mendukung strategi organisasi.

Studi yang dilakukan Schroeder (1995) menemukan keterkaitan antara strategi, teknologi, dan kinerja industri. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa kesalahan dalam memutuskan aplikasi teknologi maupun kesalahan dalam menyelaraskan strategi teknologi dengan strategi industri akan berpengaruh pada kinerja industri. Teknologi membentuk kekuatan yang dapat mengendalikan perubahan strategi dalam organisasi. Hubungan teknologi, strategi, dan kinerja industri sangat penting dalam menentukan keberhasilan industri (Price, 1996, Whelen dan Honger, 2002 yang dikutip Sulaiman, 2003). Selain itu di tekankan bahwa pemanfaatan kegunaan teknologi merupakan satu hal penting dalam menentukan kesuksesan dalam suatu usaha. Hasil penelitian Sudin (2004) mengenai pengaruh implementasi strategi dan teknologi terhadap kinerja industri menunjukkan bahwa industri yang menerapkan manajemen strategi dan mengaplikasikan teknologi cenderung mencapai kinerja yang lebih tinggi dibandingkan dengan industri yang tidak menerapkan manajemen strategi dan teknologi.

Penelitian tentang aplikasi teknologi, menunjukkan bahwa aplikasi teknologi memiliki dampak positif terhadap kinerja industri, karena teknologi berperan dalam meningkatkan profitabilitas industri dan dapat mengeliminasi limbah dalam proses produksi (Frohman, 1985; Zammuto dan Connor, 1992). Penelitian yang dilakukan oleh Sulaiman *et al* (2003) membuktikan peran aplikasi teknologi yang signifikan dalam memoderasi hubungan antara strategi dan kinerja industri.

Indikasi aplikasi teknologi dapat dilakukan melalui tiga pendekatan, yaitu teknis, ekonomi dan sosial budaya (Suwito, dalam Najiyati, 2000). Pendekatan teknis ditekankan pada keberhasilan teknologi tersebut dalam meningkatkan produktivitas. Pendekatan ekonomi terkait dukungan pasar,

kemampuan permodalan dan adanya peningkatan pendapatan. Pendekatan sosial budaya ditekankan pada akseptabilitas dan tidak bertentangan dengan kebiasaan yang berlaku. Dengan demikian, keberhasilan aplikasi teknologi dalam mendukung pengembanaan industri kecil akan tergantung pada kesesuaian teknologi tersebut dengan kondisi teknis, ekonomi, dan sosial budaya.

Penerapan teknologi akan berhasil apabila sesuai dengan potensi sumberdaya alam, sumberdaya manusia, sumberdaya ekonomi, dan memberikan nilai tambah bagi penggunanya (Schumacher dalam Suwandi,1991). Jadi keberhasilan aplikasi teknologi tergantung pada kriteria kesesuaian teknologi tersebut. Faktor-faktor keberhasilan penerapan teknologi dan indikatornya adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Faktor Keberhasilan Penerapan Teknologi dan Indikatornya

| No | Variabel | Indikator |
|----|--------------------|---|
| 1. | Faktor Teknis | <ol style="list-style-type: none"> 1. Dapat meningkatkan produksi 2. Aplikasi teknologi sederhana/mudah dilakukan oleh pengguna 3. Peralatan dan sarana produksi mudah didapat |
| 2. | Faktor Ekonomi | <ol style="list-style-type: none"> 1. Biaya operasional terjangkau 2. Secara finansial menguntungkan 3. Produknya mempunyai nilai tambah penjualan |
| 3. | Faktor Sosial | <ol style="list-style-type: none"> 1. Sesuai/tidak bertentangan dengan budaya masyarakat industri kecil setempat 2. Diminati oleh industri kecil |
| 4. | Faktor Lingkungan | Tidak menimbulkan dampak kerusakan terhadap lingkungan |
| 5. | Faktor Kelembagaan | Ada dukungan kebijakan/kelembagaan |

5. Kemampuan Berteknologi dalam Pengembangan Industri Kecil

Hadirin yang berbahagia,

Sasaran pengembangan industri kecil antara lain diarahkan pada: (1) peningkatan kapasitas dan kualitas produksi, dan (2) peningkatan penguasaan penggunaan teknologi. Kemampuan berteknologi dalam industri diartikan sebagai suatu keterampilan teknis, manajerial, dan kelembagaan yang diperlukan oleh industri untuk menggunakan mesin/peralatan dan informasi teknis secara efisien (Lall,1993). Kim (2000) mendefinisikan kemampuan berteknologi tidak hanya sekedar keterampilan menggunakan mesin/peralatan dan informasi, tetapi kemampuan untuk melakukan asimilisi, menggunakan, adaptasi dan mengubah teknologi yang ada, bahkan menciptakan teknologi baru.

Lebih lanjut Lall (1993) menguraikan kemampuan berteknologi dalam arti luas merupakan keterampilan, pengetahuan teknik (teknologi), dan kemampuan organisatoris yang diperlukan agar teknologi industri dapat berfungsi dengan baik dalam suatu perusahaan. Menurut Wiratmo (2002) kemampuan berteknologi (*technological capability*) atau penguasaan teknologi (*technological mastery*) dapat diartikan sebagai kemampuan untuk menggunakan teknologi secara efektif yang dapat dicapai melalui upaya teknologis (*technological effort*). Upaya teknologis adalah usaha sungguh-sungguh untuk menggunakan teknologi dan informasi yang tersedia, serta mengakumulasi-kan pengetahuan teknologi yang diperoleh untuk memilih, membaurkan dan menyesuaikan teknologi yang ada dan atau menciptakan teknologi baru.

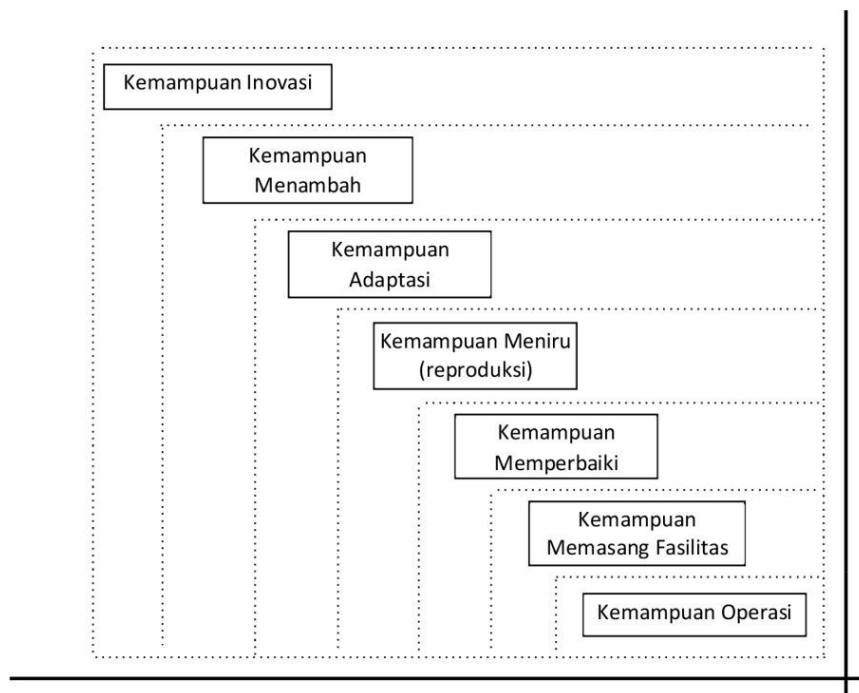
Industri kecil menengah yang produktif haruslah memiliki kemampuan berteknologi untuk mengelola perubahan teknologi dan mengambil peluang-peluang yang strategis untuk mencapai tujuannya. Kemampuan berteknologi merupakan proses pembelajaran yang dapat menghasilkan peningkatan produktivitas dan efisiensi ekonomis. Pergerakan transformasi dari input menjadi output penuh dengan pelibatan pengalaman dalam mengembangkan kemampuan berteknologi.

Menurut Sharif dalam Gumbira (2004), Pengembangan kemampuan berteknologi membutuhkan: (1) pembelajaran dalam hal melakukan kegiatan operasional (*learning by doing*) yang dapat terjadi apabila memiliki kemampuan pemanfaatan teknologi dan kompilasi teknologi. Pemanfaatan teknologi (meliputi kegiatan operasional, pengawasan, dan pemeliharaan komponen teknologi), sedangkan kompilasi teknologi (meliputi peningkatan kinerja teknologi yang digunakan),

dan (2) pembelajaran dalam hal melakukan perubahan (*learning by changing*) yang dapat terjadi apabila memiliki kemampuan akuisisi teknologi dan penciptaan teknologi. Akuisisi teknologi (meliputi kemampuan untuk mencari, menilai, mengadakan negosiasi dengan pemilik teknologi dan memperoleh teknologi yang relevan), sedangkan penciptaan teknologi (meliputi kegiatan pengembangan teknologi proses atau produk, membangun prototipe, dan pengembangan model untuk implementasi inovasi).

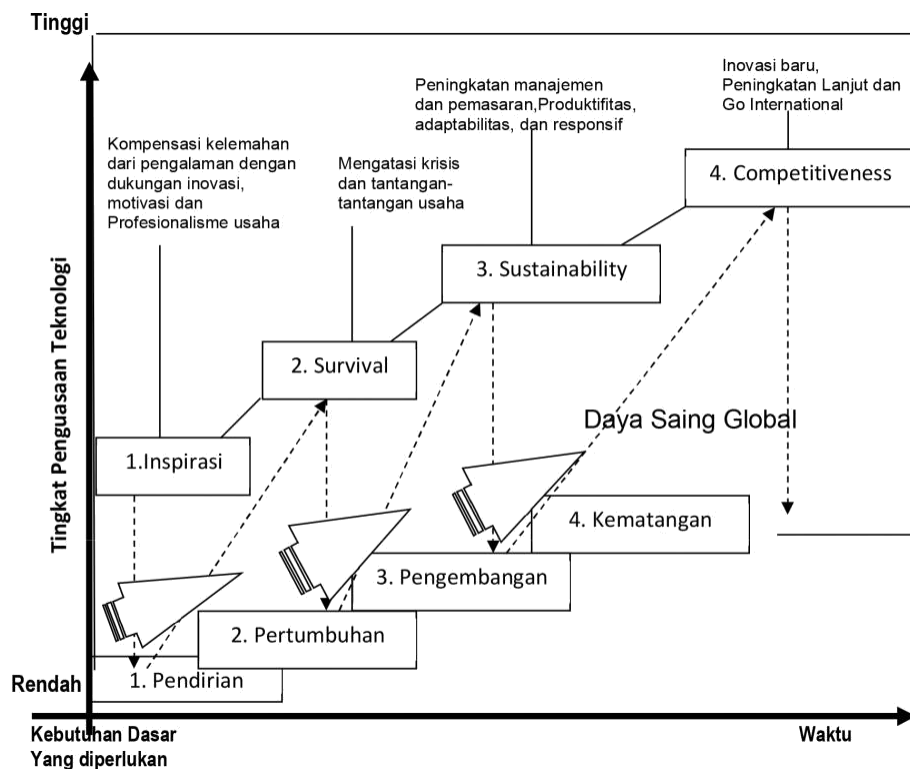
Purwasasmita (2000), membedakan tujuh tingkatan kemampuan berteknologi:

1. Kemampuan *Operasional*, yaitu kemampuan untuk memperoleh teknologi yang relevan, dan menjalankan proses produksinya termasuk perlengkapan mesin/peralatannya.
2. Kemampuan *mengeset*, kemampuan untuk mengatur dan mengeset teknologi yang digunakan untuk variasi produksinya.
3. Kemampuan *memperbaiki*, kemampuan melakukan perawatan dan perbaikan terhadap teknologi yang digunakan.
4. Kemampuan *reproduksi*, kemampuan memproduksi ulang teknologi untuk spesifikasi dan fungsi yang sama.
5. Kemampuan *mengadaptasi*, kemampuan penambahan pengetahuan dan pencernaan teknologi yang telah digunakan, serta kemampuan mengadakan perubahan kecil pada teknologi proses produksi yang lebih sesuai dengan kondisi setempat.
6. Kemampuan *meningkatkan*, kemampuan mencerna teknologi yang telah digunakan untuk melakukan perubahan kearah perbaikan (misalnya meningkatkan kinerjanya).
7. Kemampuan *inovasi*, kemampuan melaksanakan kegiatan pengembangan yang dapat menghasilkan perubahan/terobosan fundamental dalam teknologi proses/produk.



Gambar 7. Tingkatan Kemampuan Berteknologi (Purwasasmita, 2000)

Strategi pengembangan IKM dilakukan melalui beberapa tahapan, jenis perlakuan yang diterapkan kepada obyek pengembangan selalu spesifik disesuaikan dengan kondisi, tingkat perkembangan dan masalah yang dihadapi oleh IKM yang bersangkutan. Berbagai tahap perkembangan IKM dan jenis kebutuhan dalam perlakuan pembinaannya digambarkan pada Gambar 8 berikut.



Gambar 8. Tahapan Fasa Pengembangan IKM
(Sumber: Deperindag RI 2002)

Industri kecil merupakan perekonomian rakyat yang apabila dikembangkan akan mampu selain menyelesaikan masalah dasar pembangunan di Indonesia seperti pengangguran, juga mampu membantu tercapainya pertumbuhan ekonomi nasional. Menurut Saleh (1989), terdapat alasan kuat yang mendasari eksistensi industri kecil dalam perekonomian nasional, yaitu: (1) sebagian besar populasi industri kecil berlokasi di Pedesaan, sehingga jika dikaitkan dengan kenyataan tenaga kerja yang semakin menyempit, industri kecil merupakan jalan keluar, (2) beberapa jenis kegiatan industri kecil banyak menggunakan bahan baku lokal (dari sumber-sumber di lingkungan terdekat), menyebabkan biaya produksi dapat ditekan, (3) harga jual produk relatif lebih murah, merupakan kondisi yang memberi peluang bagi industri kecil tetap bertahan.

Beberapa keunggulan sektor industri kecil terhadap usaha besar menurut Rosyadi (2000), antara lain: (1) inovasi teknologi dapat dengan mudah dilakukan dalam upaya pengembangan produk, (2) hubungan kemanusiaan yang akrab didalam industri kecil, (3) kemampuan menciptakan kesempatan kerja yang cukup banyak atau penyerapannya terhadap tenaga kerja cukup tinggi, (4) fleksibilitas dan kemampuan menyesuaikan diri terhadap kondisi pasar, terdapat dinamisme manajerial dan peranan kewirausahaan.

Pengembangan industri kecil diarahkan untuk lebih berperan dalam pembangunan perekonomian nasional yaitu: (1) memperluas kesempatan kerja, (2) pengentasan kemiskinan dan (3) penyebaran industri serta memperkuat struktur industri. Untuk itu industri kecil dan menengah perlu dibina secara lebih terfokus, sistematis dan berkesinambungan, termasuk dalam hal pemanfaatan teknologi tepat guna (TTG) untuk meningkatkan nilai tambah produk IKM (Disperindag Propinsi Jatim, 2002). Sasaran pengembangan industri kecil juga diarahkan pada: (1) meningkatnya penguasaan penggunaan teknologi, (2) meningkatnya kapasitas dan kualitas produksi, (3) diterimanya produk industri kecil dan menengah di pasar global karena dukungan teknologi, dan (4) meningkatnya hubungan kemitraan dengan sumber-sumber teknologi. Sedangkan untuk menyuburkan pertumbuhan IKM yang berorientasi teknologi dapat dilakukan melalui tiga pendekatan: (1) membentuk aktivitas yang memperkuat industri kecil yang sudah ada, (2) mengembangkan permintaan yang akan

menumbuhkan industri kecil baru dan aktivitas industri baru, (3) membentuk kemampuan usaha dan teknologi yang akan menumbuhkan industri kecil.

Dalam hal pembentukan dan pengembangan industri kecil yang berorientasi teknologi, diperlukan wirausahawan yang mempunyai keterampilan secara efisien untuk: (1) menguasai teknologi dan mampu mempelajari teknologi baru, (2) dapat membangun jaringan hubungan dengan orang lain diperusahanya dan dengan industri lain dalam kaitan memenuhi keinginan pasar dalam bentuk desain dan kualitas (Adeboye, 1996). Selain dari sisi wirausahawannya, hal lain yang akan menumbuhkan terbentuknya industri kecil berorientasi teknologi adalah iklim dan konsensus yang memungkinkan untuk berbagi informasi, keterampilan, dan sumberdaya. Adanya kreativitas penciptaan dan penerapan teknologi merupakan kunci keberhasilan untuk pengembangan sektor IKM dalam meningkatkan nilai tambah dan daya saing produk, dimana kualitas, harga, dan kontinuitas merupakan faktor yang sangat menentukan.

Terkait dengan kinerja IKM dinyatakan oleh Goodhue dan Thompson (1995) bahwa kinerja yang semakin tinggi akan melibatkan kombinasi dari peningkatan efiseiensi, efektifitas, produktivitas, dan atau peningkatan kualitas, lebih lanjut dinyatakan bahwa kinerja yang dihasilkan oleh faktor kesesuaian penerapan teknologi berimplikasi kepada efiseiensi, efektifitas, dan kualitas yang lebih tinggi terhadap pemanfaatan teknologi. Produktivitas merupakan hasil yang dicapai tenaga kerja atau unit faktor produksi dalam waktu tertentu, tingkat produktivitas biasanya dipengaruhi oleh perkembangan teknologi, mesin produksi, dan keterampilan (*skill*) yang dimiliki oleh sumberdaya manusia IKM.

Program pengembangan IKM yang berorientasi teknologi memerlukan dukungan sebagai berikut:

1. Pembentukan dan peningkatan kemampuan menejemen dan kewirausahaan,
2. Pembentukan dan peningkatan kemampuan desain dan teknologi proses, termasuk pemanfaatan mesin/peralatan,
3. Pembentukan dan peningkatan kemampuan dalam memanfaatkan teknologi informasi.

Kontribusi IKM tidak dapat diabaikan dalam memacu pertumbuhan ekonomi dan penciptaan lapangan kerja telah memaksa perubahan orientasi dan mendorong pemerintah diberbagai negara untuk mengembangkan dan melindungi IKM. Dibandingkan dengan usaha berskala besar, tanpa mengabaikan kelemahannya, IKM ternyata memiliki beberapa keunggulan antara lain: (1) menyebar beragam bidang usaha, (2) kemampuan menciptakan kesempatan kerja, (3) fleksibel dan mampu menyesuaikan diri terhadap kondisi pasar yang berubah, (4) hubungan yang erat antara pemilik dan karyawan, (5) inovasi teknologi mudah terjadi dalam pengembangan produk.

Hadirin yang saya hormati,

KESIMPULAN

1. Teknologi Tepat Guna atau "*Appropriate Technology*" adalah: teknologi yang sesuai kebutuhan masyarakat, berdaya guna dan bermanfaat, sesuai kemampuan, tidak merusak lingkungan, tidak bertentangan dengan kebiasaan masyarakat, dan merupakan salah satu bentuk teknologi yang dipakai untuk meningkatkan produk bernilai tambah.
2. Desain produk TTG dalam prakteknya tidak hanya sebagai kegiatan perancangan dan analisis kekuatan komponen produk saja, tetapi sudah harus melibatkan bidang manufaktur, kontrol kualitas, dan mengevaluasi kinerjanya.
3. Faktor-faktor keberhasilan aplikasi TTG terdiri dari: (1) *faktor teknis* (dapat meningkatkan produksi, aplikasi teknologi mudah dilakukan, peralatan dan sarana produksi mudah didapat), (2) *faktor ekonomis* (biaya operasional terjangkau, menguntungkan, dan produknya mempunyai nilai tambah penjualan), (3) *faktor sosial* (ditekankan pada *akseptabilitas* dan tidak bertentangan dengan budaya setempat, dan diminati oleh industri kecil), (4) *faktor lingkungan* (tidak menimbulkan dampak kerusakan lingkungan), (5) *faktor kelembagaan* (ada dukungan kebijakan/ kelembagaan).

4. Tolok ukur keberhasilan kegiatan R&D ditakar dari luaran berupa inovasi teknologi, rekayasa sosial, atau teknik produksi yang sudah di terapkan di lapangan yang berdampak luas bagi kesejahteraan masyarakat, serta kestrategisan sumbangan ilmiahnya untuk masyarakat dan industri, jadi salah satu tolok ukur keberhasilan haruslah dinilai dari laku jualnya produk ipteks yang sudah dimanfaatkan.
5. Peran dan kontribusi teknologi dalam peningkatan pembangunan ekonomi menuju daya saing nasional perlu dirumuskan dengan menajamkan target-target pencapaian peningkatan kemampuan teknologi nasional yang lebih terukur.
6. Sebagai aktualisasi dari otonomi Perguruan Tinggi (PT), upaya yang perlu dilakukan adalah: (a) memutar lebih cepat siklus pertumbuhan di PT untuk menghadapi akselerasi perubahan kebutuhan teknologi di masyarakat, (b) Pengelola PT harus berani berada diantara anggota masyarakat untuk merancang program dari bawah keatas (*bottom-up*) dan mengupayakan sistem anggaran yang lebih ekspansif, (c) Mengoptimalkan pemanfaatan asset, (d) mengurangi porsi kelompok yang resistan terhadap upaya pembaharuan supaya berkeinginan untuk menjadi "*the winner*", (e) mengeksplorasi sumber-sumber inovasi teknologi yang menguntungkan dan alokasinya yang lebih terarah.

Saran-Rekomendasi:

1. Di Perguruan Tinggi khususnya Universitas Negeri Malang perlu direalisasikan adanya *Appropriate Technology Research and Applied Centre* (ATRAC) sebagai wadah dalam mengembangkan dan menerapkan TTG.
2. Meningkatkan jumlah dan tingkat kesiapan teknologi (*technology readiness level*) secara aplikatif serta kemampuan menyajikannya dalam bentuk paket-paket teknologi yang siap diaplikasikan.
3. Melakukan aktivitas R&D yang aplikatif berorientasi sesuai kebutuhan teknologi IKM.
4. Berinteraksi lebih aktif dengan IKM sebagai pengguna teknologi, serta mengatasi kesenjangan informasi melalui peningkatan publikasi teknologi dan fasilitas dalam memberikan dukungan teknologi kepada IKM ataupun masyarakat.

Bapak, Ibu, dan hadirin yang saya muliakan,

Demikianlah sedikit pemikiran saya yang tentu saja tidak serta merta menjadi model pengembangan dan penerapan TTG di Indonesia, namun sebagai wacana, saya berharap ini akan membuka diskusi dalam Strategi desain dan penerapan TTG di Indonesia, pastinya diperlukan proses berbagai penelitian dan pengembangan untuk menindaklanjutinya antara lain melalui wadah *Appropriate Technology Research and Applied Centre* dan sejenisnya.

Daftar Rujukan

- Adeboye, T. 1996. *Technology-oriented Entrepreneurs in Sub-Saharan Africa*. Entrepreneurship & Regional development, 8.
- Alkadri, Muchdi dan Suhandojo, (ed), 2000. *Tiga Pilar Pengembangan Wilayah: Sum-berdaya Alam, Sumber Daya Manusia, dan Teknologi*, Jakarta: Direktorat Kebijaksanaan Teknologi untuk Pengembangan Wilayah, BPPT
- Alkadri, Riyadi D.S., dan Muchdie. 2001. *Manajemen Teknologi Untuk Pengembangan Wilayah: Konsep dasar dan Implikasi Kebijakan*. Pusat Pengkajian Kebijakan Teknologi Pengembangan Wilayah. Jakarta: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi.
- Angkasa, Wisman Indra, Bambang Risdianto, dan Kasman. 2003. Pengkajian Mekanisme Difusi Teknologi Tepat Guna Pertanian. BPPT: *Prosiding Seminar Teknologi untuk Negeri, Vol. V, hal.140–155*.
- Batan, Made London. 2015. *Peran Design for Manufacture Pada Pengembangan Dan Inovasi Teknologi Terapan*. Seminar Nasional Teknologi Terapan (Sntt) 2015-Jtm Polinema
- Boothroyd, G. Dewhurst, P. (2002): *Product Design for Manufacture and Assembly*. Second Edition Revised and Expanded, Marcel Dekker, Inc.
- Chang, Tien-Chien, Wysk, Richard A., & Wang, HsuPin (1998). *Computer Aided Manufacturing*, Second Edition, PP 596-598, Prentice Hall.
- Departemen Perindustrian dan Perdagangan, 2002. *Rencana Induk Pengembangan Industri Kecil Menengah 2002-2004*.
- Dinas Perindustrian Dan Perdagangan Propinsi Jawa Timur, 2002. Makalah: *Pengembangan Sentra Industri Kecil Berbasis Teknologi Tepat Guna*.
- El-Tamimi, Abdulaziz, M.: *Design for Manufacturing* (1998), Industrial Engineering Departement, College of Engineering, King Saud University.
- Fliegel, E.C., J.E. Kivlin and G.S, Sekhon, 1971. *Message Distortion and The Diffusion of Innovations in Northern India*. Sociological Ruralis.
- Frohman, A.L.1985. *Putting Technology in Strategic Planning*. Journal California Management review. Vol. 27 (1), winter.
- Geoffrey Boothroyd, Peter Dewhurst, Winston A. Knight. 2011. *Product Design for Manufacture and Assembly* (Third Edition). Taylor and Francis Group, LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business.
- Goodhue, D.L. dan Thompson, R.L., 1995. *Task-Technology Fit and Individual Performance*, MIS quarterly.
- Gumbira, E., Rachmayanti, Muttaqin, MZ. 2004. *Manajemen Teknologi Agrobisnis*, Jakarta: Ghalia Indonesia.
- Indriyono. 1998. *Aplikasi Teknologi Tepat Guna dalam Pengembangan Kelompok Usaha*. Surabaya: Kantor Pembangunan Masyarakat Desa Prop. Jatim.
- Khalil, Tarek M. 2000. *Management Of Technology (The Key To Competitiveness and Wealth Creation)*. Singapore: McGraw-Hill Companies, Inc.
- Kim, L, 2000. *Rapid Growth, Sudden Plunge, and Fast Recovery: Lessons from the Korean Experience*, paper to the Seminar on “Crisis Recovery: Indonesian and Korean Perspective” UKDW, Yogyakarta, Indonesia, February 22.
- Lall, S, 1993, “Policies for Building Technological Capabilities: Lessons from Asian Experience”, *Journal Asean Development Review*, Vol.11, No.2. hal.74
- Munaf D.R. 2006. *Pengembangan Disiplin Ilmu di Institusi Pendidikan Teknologi dalam Membangun Budaya Informasi untuk UKM*. JURNAL SOSIOTEKNOLOGI. Edisi 8. Tahun 5, Agustus 2006.
- Najiyati, S. 2000. *Studi Kelayakan Pemanfaatan Bioteknologi untuk Peningkatan Produk-si di UPT*. Puslitbang BAKMP.
- Nicholson, W., 1983. *Intermediate Micro economics*. Alih Bahasa: Danny Hutabarat. Jakarta: L Erlangga

- Purwasasmita, M.2000. *Konsep Teknologi*. Bahan Kuliah KU-120. Kordinator Perkuliahan Konsep Teknologi Tahap Persiapan Bersama Institut Teknologi Bandung, 1 Maret 2000.
- Rashid, M. A., and Al-Qirim, N. A. (2001). *E-Commerce Technology Adoption Frame-work by New Zealand Small to Medium Enterprises*. *Research Letters Information Mathematical Science*, 2(1), 63-70.
- Rogers, Everett M, 1995, *Diffusion of Innovations*, 4 th ed., New York: The Free-Press, A Division of Macmillan Publishing Co Inc.
- Rosyadi, I, 2000. *Hubungan Pengeluaran Pembangunan dan pertumbuhan Ekonomi*. Tesis, Program Pasca Sarjana, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Saleh, A.I, 1989. *Industri kecil, Sebuah Tinjauan dan Perbandingan*. Jakarta: Lembaga Penelitian Pendidikan dan Penerapan Ekonomi dan Sosial.
- Schroeder, R. Sohal, A.S.1995. *Organizational Characteristics Associated with AMT Adoption: Towards a Contingency Framework*.*International Journal of Production and Operation Management*,19 (12).
- Sudaryanto, A. 2005. *Adopsi Teknologi oleh UKM Masih Rendah*. *Bisnis.com*, copyright © Sajadah.Net - All Rights Reserved, 12 Juli 2005.
- Sudarmo, M.S. 2005. *Perspektif Pengembangan Teknologi Tepat Guna*. Subang: Balai Besar Pengembangan Teknologi Tepat Guna (B2PTTG) LIPI.
- Sudin, A.G.,2004. *Pengaruh Strategi Manufaktur Terhadap Kinerja* (Studi Pada Industri Manufaktur Menengah dan Besar di Yogyakarta). *Jurnal Manajemen*, 3(2), 1-18.
- Suhendri, Dedi.2004. *Pengkajian Model Mekanisme Difusi Teknologi Pada Industri Kecil Menengah (IKM) Komponen Otomotif*. Jakarta: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT).
- Sulaiman, M., Hashim, MK., Wafa, S.A., 2003. *Examining the Moderating Role of Technology and Environment on The Business Strategy and Performance Relationship in SMEs*. 5th. Asean Academy of Management Conference, 10th-13th September 2003.
- Suwandi, S. 1991. *Monitoring dan Evaluasi Pelaksanaan Proyek-proyek Uji Coba Di Permukiman Transmigrasi*. Jakarta: Puslitbang Deptrans dan PPH.
- Toelihere, Mozes R., Rofiq Achmad, dan Ardjenas Soe'oad. 1985. *Pengantar Pengembangan, Penerapan dan Penyebarluasan TTG*. Direktorat Pembinaan Peneli-tian dan Pengabdian pada Masyarakat. Jakarta: Ditjen Dikti.
- Wiratmo, M. 2002. *Alih Teknologi Dalam Proses Industrialisasi di Indonesia*. Disertasi S3. Yogyakarta: UGM.
- Zammuto, R.F and Connor, K.1992. *Gaining Advanced Manufacturing Technologies Benefit: The Role of organitation design and culture*. *Academy of Management Review*,17(4)
- Permendes PDTT Nomor 23 Tahun 2017. *Tentang Pengembangan dan Penerapan Teknologi Tepat Guna Dalam Pengelolaan Sumber Daya Alam Desa*
- ,2005. *Teknologi Tepat Guna, Pengembangan dan Pemasaryakatannya*. Subang: Balai Besar Pengembangan Teknologi Tepat Guna (B2PTTG) LIPI.
- , 2001. Keputusan Menteri Dalam Negeri dan Otonomi Daerah Nomor 4 tahun 2001, *Tentang Penerapan Teknologi Tepat Guna*.
- , 2016. Pusat Pengembangan Teknologi Tepat Guna – LIPI. *Konferensi dan Seminar Nasional Teknologi Tepat Guna III Tahun 2016.*,

Pengendalian Keseimbangan Air Tanah di Kota dengan Pendekatan Geografi

Prof. Dr. Sugeng Utaya, M.Si.

Bismillahirrahmaanirrahiim

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Yang saya hormati:

Rektor/Ketua Senat Universitas Negeri Malang

Para Guru Besar dan Anggota Senat UM

Para Pimpinan Universitas, Fakultas, Lembaga, dan Jurusan di dalam dan luar Lingkungan UM

Para Civitas Akademika UM, khususnya sejawat dosen, karyawan, dan mahasiswa Geografi UM

Para tamu undangan, hadirin dan hadirat yang kami muliakan.

Hadirin sekalian yang saya muliakan,

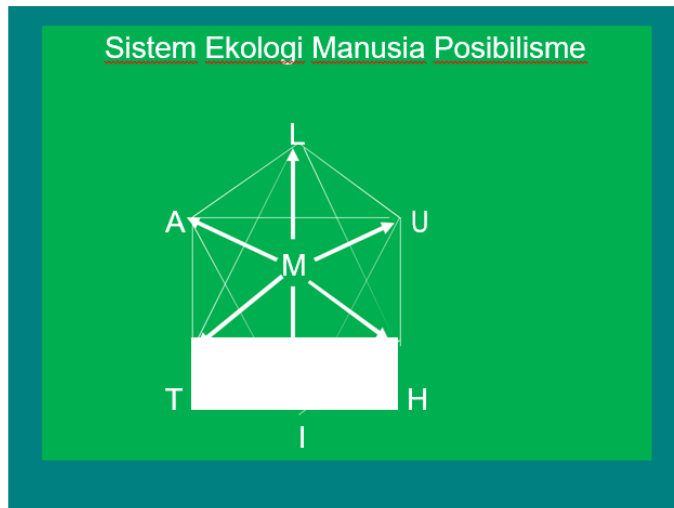
Pada kesempatan yang berbahagia ini ijin saya mengucapkan rasa syukur yang mendalam kehadirat Allah SWT, atas segala nikmat yang telah dilimpahkanNya kepada kita semua, terutama kepada kami sekeluarga, sehingga kita dapat berkumpul di tempat yang agung dan nyaman ini dalam keadaan sehat wal afiat.

Tak lupa shalawat dan salam semoga selalu tercurah kepada junjungan kita Nabi besar Muhammad SAW dan para sahabat serta pengikutnya hingga akhir zaman, *amien*.

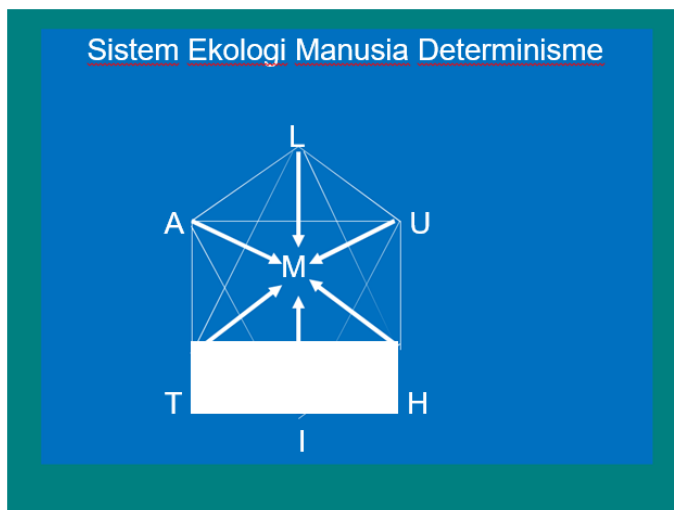
Hadirin sekalian yang saya hormati,

Geografi merupakan ilmu yang mengkaji dua aspek sekaligus yaitu bumi secara fisik dan manusia yang ada di dalamnya (Parker and Parker, 1985). Aspek fisik bumi terdiri dari atmosfer, lithosfer, hidrosfer, dan biosfer (Strahler and Strahler, 1984), sedangkan aspek manusia disebut antroposfer meliputi kehidupan sosial, ekonomi, dan politik (Dear and Wolch, 1989). Di dalam kajian geografi faktor terpenting adalah interelasi komponen fisik bumi dengan manusia (Sumaatmadja, 1988). Ilmu geografi dikembangkan berdasarkan realitas bahwa aspek fisik bumi tidak dapat lepas dari kepentingan manusia, dan manusia tidak dapat mengabaikan kondisi fisik bumi. Geografi memandang bahwa mengkaji aspek fisik bumi tanpa melibatkan manusia akan kurang bermakna, karena hasil kajian fisik bumi tidak akan memberi arti pada kehidupan manusia; sebaliknya mengkaji aspek manusia tanpa menyertakan kondisi fisik bumi jelas tidak sesuai dengan realita, karena akan membuat manusia tidak peduli dan bersikap semena-mena terhadap bumi. Bahkan, Strahler dan Strahler (1984) serta Parker dan Parker (1985) dalam mengkaji kenampakan alam, dia tetap memandang bagaimana alam mempengaruhi aktivitas manusia, dan bagaimana aktivitas manusia berdampak pada lingkungan alam. Geografi mengembangkan kajian yang berimbang antara aspek fisik bumi dan aspek manusia.

Dalam memandang hubungan fisik bumi dan manusia, geografi mengenal dua aliran yaitu (1) aliran possibilisme dengan tokoh geograf Perancis bernama Paul Vidal De La Blache, yang meletakkan manusia pada posisi sentral dan manusia berperan sebagai pihak yang mempengaruhi bumi, sehingga manusia dapat merubah dan menentukan kondisi bumi, dan (2) aliran fisis determinis dengan tokoh geograf Amerika bernama Ellsworth Huntington, yang meletakkan fisik bumi pada posisi sentral, dan manusia berada pada posisi dipengaruhi oleh bumi; dalam hal ini bumilah yang mempengaruhi dan menentukan kehidupan manusia (Bintarto, 1988).



Gambar 1. Manusia mempengaruhi bumi



Gambar 2. Bumi mempengaruhi manusia

Fenomena di lapang menunjukkan bahwa kedua aliran tersebut memang sesuai dengan fakta yang sesungguhnya. Sebagai contoh, banjir sebagai suatu fenomena alam akan berpengaruh buruk pada kehidupan manusia karena menimbulkan bencana; namun demikian sebenarnya fenomena banjir tersebut terjadi sebagai akibat perbuatan manusia. Perilaku manusia yang menebang hutan dan melakukan alih fungsi lahan secara membabi buta di kawasan hulu, berdampak pada tingginya proporsi air hujan yang menjadi aliran permukaan sehingga mengakibatkan banjir di kawasan hilir.

Dalam pandangan ilmu geografi kedua aliran tersebut dapat diterima karena realitas di lapang benar-benar menunjukkan fenomena seperti itu, sehingga dalam kajiannya geografi tidak dapat mengabaikan salah satu komponen baik aspek fisik bumi maupun aspek manusia. Hal inilah yang melandasi mengapa geografi sangat cocok dimasukkan ke dalam kelompok ilmu sosial, dan sesuai pula dimasukkan dalam kelompok ilmu pengetahuan alam. Menurut Sumaatmadja (1988) dan Daldjoeni (1996) geografi memiliki karakter interdisipliner yang menjembatani kelompok ilmu-ilmu alamiah (*natural sciences*) dengan kelompok ilmu-ilmu sosial (*social sciences*), sehingga bagi geografi bukan merupakan masalah dalam menelaah masalah kehidupan yang bersifat multiaspek dan multidimensional.

Berdasarkan uraian tersebut maka ruang lingkup geografi tak dapat dilepaskan dari aspek alamiah dan insaniah sebagai obyek studinya. Parker dan Parker (1985) secara tegas menyebut bahwa kenampakan geografi itu meliputi kenampakan alam dan budaya. Kedua aspek ini diungkapkan dalam ruang berdasarkan prinsip-prinsip distribusi, relasi, dan korologi (Sumaatmadja, 1988). Prinsip relasi diterapkan untuk menganalisis hubungan antara manusia dengan alam lingkungannya, sehingga dapat mengungkapkan perbedaan fenomena dan penyebaran dalam ruang. Geografi dengan prinsip relasi, distribusi, dan korologi dapat mengungkap karakteristik setiap wilayah, sehingga dapat teridentifikasi kawasan-kawasan yang berbeda satu sama lain. Hal ini sesuai dengan pendapat Hartshorne yang menyatakan bahwa sasaran utama studi Geografi adalah perbedaan fenomena di berbagai wilayah bumi, dan dipertegas oleh Ackerman yang berpendapat bahwa analisis perbedaan ruang di permukaan bumi merupakan pendekatan azasi geografi (Daldjoeni, 1996).

Sebagai sebuah ilmu, pada hakekatnya geografi mengkaji hubungan keruangan gejala-gejala dinamis aspek permukaan bumi pada areal tertentu, yang memiliki nilai berharga bagi kepentingan hidup manusia. Geografi melihat seluruh fenomena dalam ruang, dengan memperhatikan secara mendalam setiap aspek yang menjadi komponen tersebut. Geografi sebagai satu kesatuan studi (*unified geography*), melihat satu kesatuan komponen alamiah dan komponen insaniah pada ruang tertentu di permukaan bumi, dengan mengkaji faktor alam dan faktor manusia yang membentuk integrasi keruangan di wilayah yang bersangkutan. Gelaja – interelasi -- interaksi – integrasi keruangan menjadi hakekat kerangka kerja utama dalam studi geografi.

Hadirin sekalian yang berbahagia,

Sesuai dengan jabatan guru besar saya di bidang geografi fisik, maka pada pidato pengukuhan ini, ijin kan saya mengulas salah satu komponen penting geografi fisik yaitu air (hidrosfer), khususnya tentang air tanah di perkotaan, yang kami tinjau dari perspektif geografi. Masalah air tanah di kota menarik saya kemukakan karena sumber daya air yang sangat dibutuhkan manusia ini kondisinya semakin hari semakin mengkhawatirkan. Secara kuantitas dari hari ke hari jumlah ketersediaannya semakin menyusut, dan secara kualitas semakin lama kondisinya semakin memburuk. Kajian air tanah dari sisi geografi tentu merupakan sumbang sih penting ilmu geografi dalam membantu menyelesaikan masalah air tanah di dalam kehidupan masyarakat.

Air tanah di kota merupakan salah satu sumberdaya alam terpenting, karena sampai saat ini air tanah masih menjadi sumber utama dalam pemenuhan kebutuhan air bersih penduduk kota. Menurut Suripin (2002) ketergantungan sebagian besar penduduk kota pada air tanah tidak dapat dihindari, terbukti 60% penduduk Indonesia masih menggantungkan hidupnya pada air tanah (KLH, 1991). Sebagai bandingan, di negara adi daya seperti Amerika Serikat pun 50% kebutuhan air penduduk masih dipenuhi oleh air tanah (Kodoatie, 1995). Oleh karena air tanah di daerah perkotaan dimanfaatkan untuk memenuhi berbagai keperluan mulai domestik, industri, sampai irigasi (Kodoatie, 1995; Suwarno, 1996), maka jelas bahwa air tanah memiliki peran penting dalam mendukung kehidupan penduduk kota.

Tak dapat dipungkiri bahwa sesungguhnya air tanah merupakan berkah *Robbi Ilahi* yang tak ternilai. sumber air ini mudah didapat, murah, dan secara geografis di setiap kawasan memiliki sebaran relatif merata dibanding jenis sumber air lain; bahkan keberadaannya sangat dekat dengan tempat tinggal penduduk. Oleh karena itu wajar jika air tanah difungsikan oleh penduduk sebagai sumber utama penyediaan air bersih di kota. Realitas ini benar-benar sangat meringankan beban pemerintah, karena dalam penyediaan air bersih bagi penduduk, pemerintah tidak perlu mengeluarkan dana yang terlampau besar untuk kepentingan pembangunan infrastruktur pengadaan air bersih. Penduduk kota dapat dengan mudah memenuhi kebutuhan airnya dengan cara mengambil air yang berada di bawah tempat tinggalnya.

Pemanfaatan air tanah sebagai sumber air bersih cukup tepat karena air tanah selain ketersediaan cukup melimpah, juga memiliki kelebihan dibanding sumber air lain. Air tanah relatif memiliki kualitas lebih baik dan lebih aman dibanding sumberdaya air lain seperti air sungai. Menurut Amri (2005) dari 5.860 sungai yang tersebar di Indonesia, hanya 25% saja yang masih bisa diandalkan sebagai sumber air bersih layak konsumsi, itupun sebagian besar berada di kawasan

Indonesia Timur terutama Papua. Sementara itu sumber air lain kondisinya juga kurang mengembirakan, misalnya sumber air mata air sekarang jumlahnya juga semakin terbatas, bahkan sebagian besar mata air sudah padam sebagai akibat terjadinya kerusakan hutan di daerah umpan (*recharge area*). Berdasarkan realitas tersebut, maka belakangan ini PDAM dalam mencari sumber-sumber air baru banyak memanfaatkan air tanah, terutama air tanah dalam.

Hadirin sekalian yang saya muliakan,

Akhir-akhir ini kebutuhan penduduk akan air bersih cenderung semakin meningkat. Peningkatan kebutuhan air bersih di daerah perkotaan terutama disebabkan oleh faktor pertumbuhan penduduk dan perkembangan sosial budaya masyarakat. Pertumbuhan penduduk mengakibatkan jumlah pengguna air semakin bertambah banyak, sedangkan perkembangan sosial budaya mengakibatkan jumlah kebutuhan air per-kapita semakin meningkat. Dengan demikian pada kota yang telah berkembang dan semakin modern, maka kebutuhan air bersih akan semakin besar.

Peningkatan jumlah kebutuhan air bersih berdampak pada meningkatnya eksploitasi air tanah di kota. Eksploitasi air tanah dilakukan baik pada air tanah bebas/dangkal maupun air tanah tertekan/dalam. Secara tidak langsung eksploitasi air tanah terjadi karena tingginya permintaan sebagai akibat pertumbuhan penduduk dan peningkatan aktivitas penduduk di kota (Todd, 1980). Pertumbuhan penduduk meningkatkan jumlah kebutuhan air, dan pada gilirannya akan meningkatkan besarnya eksploitasi air tanah. Eksploitasi air tanah secara besar-besaran dan terus-menerus tidak dapat dihindarkan, bahkan hal ini akan terus berlangsung seiring dengan banyaknya jumlah dan ragam pemanfaatan air tanah di kota. Konig (2002) berpendapat bahwa semakin besar suatu kota akan semakin besar jumlah air tanah yang dieksploitasi.

Eksploitasi air tanah yang semakin meningkat dapat mengancam keberadaan air tanah di daerah perkotaan. Hal tersebut terjadi karena eksploitasi air tanah yang dilakukan secara terus-menerus dan kurang memperhatikan upaya pengembaliannya telah mengganggu keberadaan air tanah di Kota (Konig, 2002). Secara tegas Todd (1980) menyatakan bahwa meningkatnya eksploitasi air tanah dapat menurunkan jumlah cadangan air tanah, dan pada gilirannya akan mengganggu keseimbangan air tanah di kota. Fenomena yang menjadi kekhawatiran bersama tersebut saat ini benar-benar telah terjadi di kota-kota di Indonesia. Jika hal ini terus berlangsung, maka dapat dipastikan bahwa di masa mendatang penduduk kota akan semakin sulit dalam mendapatkan air bersih.

Hadirin sekalian yang saya hormati,

Saat ini, air tanah sebagai sumber utama pemenuhan kebutuhan air bersih di kota kondisinya semakin mengkhawatirkan. Fenomena yang belakangan muncul dan senantiasa menjadi berita hangat di berbagai media, seperti kelebihan air (*too much*) yang menimbulkan banjir di musim penghujan dan kekurangan air (*too little*) di musim kemarau yang mengakibatkan kekeringan, tampaknya sangat terkait dengan keberadaan air tanah di kota. Fenomena hidrologi tersebut mengindikasikan bahwa keseimbangan air (*water balance*) di perkotaan telah mulai mengalami gangguan. Dalam hal ini, adanya peristiwa banjir sebenarnya menunjukkan bahwa sebagian besar air hujan yang jatuh telah menjadi aliran permukaan (*overland flow*), dan hanya sebagian kecil saja yang tertahan dan meresap ke dalam tanah. Air hujan yang semestinya lebih banyak tertahan dan meresap ke dalam tanah, kenyataannya justru berubah menjadi aliran permukaan. Proporsi air hujan yang menjadi limpasan permukaan sudah semakin jauh melampaui batasan limpasan ideal pada lahan alami yang sebesar 10%; demikian juga proporsi air hujan yang meresap ke dalam tanah semakin jauh di bawah resapan lahan alami yang sebesar 50% (Duluth Stream, 2004). Kondisi seperti ini pada gilirannya mengakibatkan penurunan jumlah cadangan air tanah di kota.

Penurunan cadangan air tanah dapat mengganggu keseimbangan air tanah di kota. Hal itu disebabkan eksploitasi air tanah di kota yang kurang memperhatikan keseimbangan antara jumlah pengambilan dan pengisian kembali, dapat mengakibatkan berkurangnya cadangan air tanah di kota, yang ditunjukkan oleh semakin menurunnya tinggi muka air tanah. Menurut Todd (1980) kondisi yang merusak keseimbangan air tanah yaitu: (1) menurunnya umpan air ke dalam tanah sebagai akibat penutupan permukaan tanah dan pembuangan air hujan berlebihan melalui saluran drainase, dan (2)

meningkatnya debit eksploitasi air tanah yang dilakukan dengan sumur pompa. Sebagai contoh, akibat pengambilan air tanah yang berlebihan maka permukaan air tanah di Kota Jakarta mengalami penurunan sebesar 1,5—3,34 meter, Kota Bandung mengalami penurunan 1—2 meter, dan Kota Yogyakarta dalam kurun waktu 25 tahun terakhir mengalami penurunan sampai 6 meter (Suripin, 2002). Fenomena seperti ini terjadi hampir di semua kota di Indonesia terutama yang telah mengalami pertumbuhan cepat.

Gangguan keseimbangan air tanah akan berdampak pada menurunnya kemampuan air tanah dalam menyangga kehidupan penduduk kota. Hal ini karena meningkatnya eksploitasi air tanah dapat menurunkan jumlah cadangan air tanah di Kota (Todd, 1980). Oleh karena kebutuhan air senantiasa mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk dan perubahan sosial budaya di kota, maka pada umumnya semakin besar suatu kota akan semakin semakin besar eksploitasi air tanah, sehingga penduduk akan cenderung semakin sulit dalam mendapatkan air bersih (Konig, 2002).

Hadirin sekalian yang berbahagia,

Masalah pokok dalam kajian air tanah di kota adalah bagaimana cara mempertahankan kondisi air tanah sehingga dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan. Sehubungan dengan itu maka eksploitasi air tanah harus memperhatikan banyaknya air yang boleh diambil dari suatu kawasan. Jumlah air ini disebut hasil aman (*safe yield*) yaitu air yang dapat diambil untuk memenuhi kebutuhan manusia tanpa mengurangi persediaannya sampai batas tertentu. Hasil aman harus dianggap sebagai suatu jumlah yang ditetapkan sebagai perangkat kontrol. Hasil aman air tanah ditentukan oleh banyak faktor, dan salah satu faktor terpenting adalah batasan hidrologi yang berupa jumlah air yang tersedia (Linsley et al., 1996). Sehubungan dengan itu Kodoatie (1995) menyatakan bahwa karena potensi air tanah di kota jumlahnya sangat terbatas, maka air tanah harus dikelola dengan memperhatikan prinsip-prinsip keseimbangan air (Kodoatie, 1995). Keseimbangan air tanah dapat tercapai apabila jumlah pengambilan air tanah selalu lebih kecil dibanding pengisian kembali air tanah dari daerah resapan (Suripin, 2002). Apabila jumlah pengambilan air tanah jauh lebih besar dari pengisiannya, maka akan menyebabkan terjadinya penurunan muka air tanah secara permanen.

Sebenarnya terjadinya penyusutan sumberdaya air tanah tidak terlepas dari masalah utama kota yaitu masalah perubahan tata guna lahan yang umumnya berlangsung sangat cepat dan cenderung kurang terkendali. Perubahan tata guna lahan yang buruk tersebut disebabkan oleh implementasi rencana tata ruang kota yang umumnya banyak melenceng dari ketetapan yang tertuang dalam RTRW. Tak dapat dipungkiri bahwa RTRW sebagai penjabaran UU No.24/1992 tentang Penataan Ruang masih bersifat sektoral dan belum memuat materi sebagaimana yang dimaksud oleh UUPR tersebut, sehingga RTRW tidak dapat dipedomani dan dilaksanakan secara operasional. Dengan demikian kelemahan tata ruang kota terjadi selain pada tataran konsep rencana (RTRW), juga pada tataran implementasi. Dalam kaitannya dengan tata guna lahan, tampaknya konsep kota ekologis yang menjadi cita-cita seluruh masyarakat kota cenderung terlupakan, sedangkan pada tataran implementasi kendala utama yang sering timbul dalam penataan kota di Indonesia adalah terjadinya benturan antara kepentingan publik dan ekonomi. Tak sedikit rencana tata ruang hijau sebuah kota dikalahkan oleh kepentingan bisnis; dan tidak jarang pula demi peningkatan pendapatan asli daerah (PAD), penataan lingkungan sering diterabas demi kepentingan bisnis.

Sebagai akibat adanya berbagai penyimpangan tersebut, maka perkembangan tata guna lahan kota menjadi kurang terkendali. Untuk menghasilkan kota yang ideal perlu adanya perencanaan tata ruang yang baik dan implementasi tata ruang yang terkendali. Selama ini rencana tata guna lahan yang merupakan titik pusat dari semua rencana menyeluruh dan menjadi tali pengikat unsur-unsur terkait lain, seringkali kurang mendapat penanganan yang semestinya. Padahal, rencana tata guna lahan merupakan kunci pengarah bagi pembangunan kota dan menjadi kerangka dasar bagi berbagai aspek termasuk penyediaan ruang terbuka (Roberts, 1988). Sementara itu dalam tahap implementasi seperti dalam hal pengawasan, perijinan, dan penertiban seringkali berjalan kurang terkendali. Sebagai pedoman pengendalian tata guna lahan seyogyanya penguasaan hak atas tanah menggunakan hukum perdata, tetapi untuk penggunaan tanah berlaku hukum publik, artinya orang

boleh menguasai tanah, tetapi penggunaannya harus sesuai dengan peruntukan yang telah ditetapkan dalam RTRW.

Perubahan tata guna lahan di kota yang berlangsung cepat telah berdampak pada berkurangnya luas lahan terbuka dan tertutupnya lubang/pori sebagai jalan masuknya air hujan ke dalam tanah, sehingga menurunkan kapasitas resapan air hujan. Hal ini terjadi karena konversi lahan terbuka menjadi lahan terbangun telah menghalangi masuknya air ke dalam tanah, sehingga menurunkan resapan air hujan dan meningkatkan limpasan permukaan (Anonymous, 2001). Perubahan tata guna lahan dapat mengubah sifat biofisik tanah menjadi lebih buruk (Sullivan, 2002), padahal masuknya air hujan ke dalam tanah tergantung pada kondisi biofisik permukaan tanah (Asdak, 2002).

Penurunan resapan air hujan terjadi karena perubahan tata guna lahan telah terjadi di banyak kota-kota besar di Indonesia. Sebagai contoh, pada tahun 1990 nilai koefisien resapan beberapa kota di Jawa Barat sudah sangat rendah, yaitu Kota Bandung sebesar 17 %, Bogor sebesar 17,3 %, dan Tangerang sebesar 15 % (Asdak, 2002). Bahkan, menurut Wirakusumah (2006) saat ini jika di Kota Bandung turun hujan hanya sekitar 5% air hujan yang meresap ke dalam tanah, sedangkan sisanya melimpas ke jalanan dan sungai. Kondisi hidrologi kota seperti ini jelas tidak bisa dibiarkan, tetapi harus dicarikan jalan keluarnya agar tidak terus berkembang kearah yang lebih buruk dan mengancam kehidupan penduduk kota.

Hadirin sekalian yang saya muliakan,

Terkait dengan masalah tata guna lahan, sebenarnya semua pemerintah daerah di Indonesia telah memiliki kebijakan untuk mempertahankan komposisi tata guna lahannya. Sebagai contoh, kebijakan tata guna lahan di Kota Malang menyatakan bahwa walaupun lahan yang ada di kawasan perkotaan dapat dialihfungsikan untuk kegiatan perkotaan yang berorientasi pada sektor non-pertanian, tetapi kawasan perkotaan tetap menyediakan ruang terbuka hijau (RTH) untuk menjaga keseimbangan ekologi kota (BAPEDALDA Kota Malang, 2002). Dalam hal ini kegiatan pembangunan fisik kota harus sesuai dengan prinsip keseimbangan ekologi perkotaan, sehingga Kota Malang harus menyediakan RTH yang cukup sesuai dengan standar kebutuhan ruang yang ada (BAPPEDA Kota Malang, 2001).

Kebijakan konkrit tentang RTH yang tertuang dalam Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kota Malang sampai tahun 2010 adalah: (1) Untuk jalur hijau di jalan utama, RTH difungsikan sebagai paru-paru kota dan menjaga estetika, (2) Untuk kawasan konservasi di bantaran sungai, RTH difungsikan sebagai taman kota, pengendali erosi, dan peresapan air, (3) Untuk Kawasan tangkapan hujan, RTH difungsikan sebagai daerah resapan air, (4) Untuk lapangan olah raga, RTH difungsikan sebagai tempat olah raga, taman kota, dan resapan air, (5) Untuk area makam, RTH difungsikan sebagai fasilitas umum, hutan kota, dan resapan air, (6) Pembuatan taman-taman kota harus dikaitkan dengan program pemasyarakatan Malang Kota Bunga, (7) Pembuatan kawasan penyangga antara kawasan industri dan permukiman, (8) Pengembangan lapangan olah raga terbuka di setiap unit lingkungan permukiman, (9) Pengembangan kawasan olah raga seperti velodrom, jogging track, sepatu roda dan stadion sebagai sport centre baik secara terbuka maupun tertutup, (10) Untuk kawasan yang memiliki lahan cukup luas seperti Unibraw, UM, dan APP dikembangkan RTH yang ramah lingkungan dan dapat difungsikan pula sebagai obyek wisata lingkungan dan pendidikan lingkungan, (11) Untuk RTH yang sekarang masih ada harus tetap dipertahankan dan dihindarkan dari peralihan fungsi untuk pemanfaatan lain. RTRW tentang RTH ini sebenarnya cukup baik, tetapi untuk menguji apakah secara hidrologi juga dapat berfungsi dalam pengendalian air tanah di kota, tampaknya masih perlu kajian secara mendalam.

Hadirin sekalian yang kami hormati,

Untuk menanggulangi masalah air tanah di kota, berbagai riset telah banyak dilakukan oleh para ahli hidrologi, tetapi kenyataannya sampai saat ini masalah air tanah di kota belum menemukan solusi yang jitu. Penyebabnya, mungkin model yang ditemukan sangat baik, tetapi seringkali kurang realistis sehingga sulit diterapkan di lapang. Atau mungkin model sudah baik dan cukup realistis,

tetapi karena tidak sinkron dengan program pemerintah daerah, terutama dengan rencana tata guna lahan dalam RTRW kota, maka model penanggulangan sebagai hasil penelitian terpaksa tidak bisa dijalankan. Atau model cukup baik dan pemerintah daerah siap melaksanakan, tetapi masyarakat kurang mendukung karena dianggap merugikan/kurang memberi manfaat langsung pada mereka, maka model terpaksa tidak dapat dijalankan. Padahal, jika model tidak segera direalisasikan, masalah akan semakin rumit karena perubahan tata guna lahan terus berjalan dan tidak dapat dihentikan, sehingga semakin lama akan semakin sulit diimplementasikan.

Pada dasarnya penyusutan cadangan air tanah di kota hanya dapat ditanggulangi dengan cara pengimbuhan air buatan. Pengimbuhan tanah buatan merupakan upaya meningkatkan masuknya air permukaan ke dalam formasi air tanah dengan cara-cara tertentu (Todd, 1980). Banyak cara yang telah dikembangkan misalnya dengan penghijauan, pembuatan daerah retensi banjir, sistem sumur suntikan, sumur resapan, dan sebagainya (Winanti, 1996). Upaya pengimbuhan air tanah tersebut secara tradisional telah lama dilakukan oleh masyarakat Indonesia yaitu dengan cara membuat lubang-lubang galian di kebun halaman serta memanfaatkan sumur-sumur yang tidak terpakai sebagai penampung air telah banyak dilakukan oleh nenek moyang kita (Suripin, 2002).

Teknik pengimbuhan air tanah dapat menggunakan air permukaan (sungai dan danau), tetapi pengimbuhan air tanah menggunakan air sungai cukup beresiko, karena saat ini sungai yang ada di kota umumnya telah mengalami pencemaran berat, sehingga dikhawatirkan air tanah yang dihasilkan sudah tercemar. Sehubungan dengan itu sumberdaya air potensial di kota yang dapat dimanfaatkan untuk pengimbuhan air tanah adalah air hujan, karena air hujan mempunyai kelebihan yaitu dapat diperbaharui, mudah diperoleh, murah, dan relatif dapat terhindar dari pencemaran (Konig, 2002).

Upaya pengimbuhan air tanah buatan harus mempertimbangkan faktor kondisi fisik lahan. Menurut Todd (1980) pemilihan metode pengimbuhan air tanah ditentukan oleh faktor topografi, geologi, dan kondisi tanah. Lebih teknis Linsley et al. (1996) menyatakan bahwa bila transmisibilitas tanah tidak menjadi masalah, maka pengimbuhan air dapat dilakukan dengan cara memasukkan air ke dalam akifer secara buatan. Beberapa metode yang dapat diterapkan untuk pengimbuhan air tanah buatan antara lain: (1) Menyimpan air banjir dalam reservoir yang dibangun di atas daerah yang permeabel, (2) Mengalirkan air sungai ke daerah yang tanahnya sangat permeabel, (3) Menggali cekungan imbuhan sampai mencapai formasi yang permeabel, (4) Memompa air melalui sumur imbuhan ke dalam akifer, (5) Memberi air irigasi berlebih pada daerah yang sangat permeabel, dan (6) Membangun sumur-sumur dekat sungai untuk meningkatkan perkolasi air sungai (Linsley et al., 1996). Sebagai gambaran, contoh beberapa teknik pengimbuhan air tanah buatan yang pernah diterapkan di California dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Table 1. Distribusi Proyek Umpan Air Tanah Buatan di California (Todd, 1980).

| No | Metode | Jumlah Proyek (%) | Jumlah Umpan Air (%) |
|--------|-----------------------------------|-------------------|----------------------|
| 1 | Basin (Danau Buatan) | 54 | 58,4 |
| 2 | Stream channel (Sungai terbuka) | 15 | 29,5 |
| 3 | Ditch and furrow (Selokan, parit) | 8 | 9,4 |
| 4 | Pit (Lubang galian) | 7 | 1,3 |
| 5 | Well (sumur resapan) | 12 | 1,0 |
| 6 | Flooding (luapan air) | 4 | 0,4 |
| Jumlah | | 100 | 100,0 |

Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa proyek umpan air tanah yang banyak dikembangkan dan memberikan sumbangan umpan terbesar adalah danau buatan dengan sumbangan 58,4%. Metode umpan melalui alur sungai juga memberi sumbangan cukup besar yaitu 29,5%. Sedangkan metode sumur resapan dengan jumlah proyek 12% memberi sumbangan umpan 1,0%. Pada masalah air tanah di kota-kota di Indonesia, walaupun telah banyak cara dilakukan untuk

pengimbuhan air tanah, tetapi cara-cara untuk meresapkan air hujan perlu dicari dan terus dikembangkan (Winanti, 1996).

Hadirin sekalian yang berbahagia,

Masalah air tanah di kota dapat terselesaikan jika kita dapat mengelola air hujan secara sistematis. Dari total air hujan jatuh harus diupayakan hanya 10% saja (sesuai kriteria lahan alami) yang menjadi aliran permukaan; atau dapat lebih ekstrem dipakai pathokan aliran permukaan 0% (*zero overland flow*). Secara teknik upaya pengendalian air tanah dapat dilakukan dengan cara meningkatkan resapan air melalui pengelolaan lahan terbuka yang masih ada dan rekayasa pengimbuhan air tanah buatan dengan sumur resapan. Pengendalian air tanah akan efektif jika dilakukan dengan mempertimbangkan faktor ruang yang mencakup kondisi dan sebaran keruangan. Menurut hemat kami, kekurangberhasilan dalam pengendalian air tanah di kota karena model yang ditawarkan belum mencakup analisis keruangannya.

Pengendalian keseimbangan air tanah sangat efektif jika dilakukan dengan menggunakan pendekatan geografi. Geografi memiliki tiga (3) macam pendekatan yang menjadi ciri khas dan kekuatan dalam menganalisis masalah di suatu wilayah, yaitu pendekatan keruangan, pendekatan kelingkungan, dan pendekatan kewilayahan. Adapun karakteristik dan aplikasi masing-masing pendekatan untuk pengendalian air tanah di kota adalah:

1. Pendekatan Keruangan

Pendekatan keruangan dapat diimplementasikan dalam bentuk analisis keruangan guna mempelajari perbedaan lokasi mengenai sifat-sifat penting ruang yang bersangkutan. Dalam analisis keruangan diperhatikan aspek penyebaran penggunaan ruang yang telah ada dan penyediaan ruang yang akan digunakan untuk berbagai kegunaan yang dirancangkan. Dalam kaitannya dengan masalah pengendalian air tanah di kota, maka lokasi RTH sebagai areal resapan air diidentifikasi terlebih dahulu guna menentukan bagian wilayah RTH mana yang harus dipertahankan dan wilayah RTH mana yang harus ditambahkan. Jika keharusan membangun sumur resapan sebagai konsekuensi atas Perda yang telah ditetapkan Pemkot sebagai sebuah kebijakan, maka kawasan prioritas di dalam kota harus ditentukan melalui analisis keruangan. Pada prinsipnya lokasi RTH dan sumur resapan harus dipilih pada kawasan hulu dari sistem air tanah di kota. Hal ini dimaksudkan agar air tanah yang dihasilkan benar-benar dapat berfungsi sebagai penyangga kehidupan penduduk kota.

2. Pendekatan Kelingkungan/ekologi

Bagi geografi, ekologi menyumbangkan suatu bentuk pendekatan yang dikenal sebagai pendekatan ekologi, yaitu suatu metodologi untuk mendekati, menelaah, dan menganalisis suatu gejala atau masalah dengan menerapkan konsep dan prinsip ekologi. Dalam hal ini interelasi antara manusia dan lingkungan dalam geografi didekati dengan pendekatan kelingkungan/ekologi. Aplikasi pendekatan kelingkungan pada pengendalian air tanah di kota adalah dengan merubah bentuk interelasi yang bersifat negatif menjadi interelasi positif. Pendirian bangunan rumah dan bangunan fisik lain oleh penduduk kota, secara hidrologi merupakan bentuk interelasi negatif, karena menghambat proses peresapan air sehingga mengganggu sistem keseimbangan air tanah. Sedangkan pembangunan sumur resapan dan pengadaan hutan kota, taman, dan ruang terbuka lain, secara hidrologi merupakan bentuk interelasi positif bagi lingkungan karena dapat meningkatkan umpan air ke dalam tanah. Aplikasi pendekatan kelingkungan dengan interelasi positif bukan pekerjaan mudah, karena hal itu menyangkut kesediaan penduduk untuk melaksanakan program secara suka rela. Jika program dijalankan, maka kendala sosial, ekonomi, dan psikologi benar-benar harus mendapat perhatian sungguh-sungguh. Upaya memobilisasi masyarakat untuk membuat sumur resapan dan menyediakan RTH di sekitar tempat tinggalnya perlu didahului dengan pendekatan kemanusiaan untuk menumbuhkan kesadarannya.

3. Pendekatan Kewilayahan.

Analisis kompleks wilayah merupakan kombinasi analisis keruangan dengan analisis ekologi. Dalam pendekatan ini wilayah-wilayah yang akan dikaji didekati dengan prinsip perbedaan karakteristik wilayah (*areal differentiation*). Pada hakekatnya interaksi antar wilayah akan

berkembang karena suatu wilayah berbeda dengan wilayah lain, sebagai akibat adanya permintaan dan penawaran antar wilayah tersebut. Dalam analisis ini diperhatikan pula tentang penyebaran fenomena tertentu (analisis keruangan) dan hubungan interaksi antara variabel manusia dan lingkungannya (analisis ekologi). Dalam hubungannya dengan analisis kompleks wilayah, ramalan wilayah (*regional forecasting*) dan perancangan wilayah (*regional planning*) merupakan aspek yang dikaji dalam analisis tersebut. Aplikasi pendekatan kewilayahan pada upaya pengendalian air tanah didasarkan pada perbedaan kondisi geografis setiap kawasan di dalam kota. Di dalam suatu kota umumnya terdiri dari beberapa kawasan yang secara hidrologis memiliki karakteristik tersendiri. Sehubungan dengan itu, maka model solusi yang dipilih tentu akan berbeda antara kawasan satu dengan lainnya. Pilihan model solusi ini hampir luput dari perhatian para pengambil kebijakan perkotaan di Indonesia.

Aplikasi pendekatan geografi tentu harus mempertimbangkan aspek teknis hidrologi. Dalam hal ini model solusi yang ditawarkan harus didasarkan pada hasil perhitungan hidrologi secara cermat, sehingga ketika dilaksanakan benar-benar model solusi dapat berfungsi sebagai antara variabel manusia dan lingkungannya (analisis ekologi). Dalam hubungannya dengan analisis kompleks wilayah, ramalan wilayah (*regional forecasting*) dan perancangan wilayah (*regional planning*) merupakan aspek yang dikaji dalam analisis tersebut. Aplikasi pendekatan kewilayahan pada upaya pengendalian air tanah didasarkan pada perbedaan kondisi geografis setiap kawasan di dalam kota. Di dalam suatu kota umumnya terdiri dari beberapa Kawasan yang secara hidrologis memiliki karakteristik tersendiri. Sehubungan dengan itu, maka model solusi yang dipilih tentu akan berbeda antara kawasan satu dengan lainnya. Pilihan model solusi ini hampir luput dari perhatian para pengambil kebijakan perkotaan di Indonesia.

Aplikasi pendekatan geografi tentu harus mempertimbangkan aspek teknis hidrologi. Dalam hal ini model solusi yang ditawarkan harus didasarkan pada hasil perhitungan hidrologi secara cermat, sehingga ketika dilaksanakan benar-benar model solusi dapat berfungsi sebagai pengendali keseimbangan air tanah yang handal. Dengan demikian selain faktor lokasi, faktor luas RTH, jenis tanaman, serta jumlah dan ukuran sumur resapan harus diperhitungkan secara matang.

Hadirin sekalian yang saya muliakan,

Oleh karena upaya pengendalian keseimbangan air tanah bukan hanya menjadi tugas pemerintah kota semata, tetapi juga menjadi tanggungjawab semua penduduk kota; maka pengetahuan tentang lingkungan hidup terutama yang menyangkut masalah sumberdaya air menjadi penting untuk dimasyarakatkan. Hal ini agar seluruh kalangan masyarakat kota tahu dan faham tentang masalah bersama tersebut, sehingga ketika pemkot melaksanakan program perbaikan lingkungan, mereka tidak bersikap apriori dan menolak program tersebut, tetapi sebaliknya mereka bisa memahami dan menyadari pentingnya program, dan pada gilirannya dapat memberikan dukungan penuh terhadap program pengembangan RTH dan sumur resapan yang dicanangkan pemkot.

Sehubungan dengan itu, pendidikan lingkungan khususnya materi tentang sumberdaya air penting diberikan kepada siswa sejak TK, SD, SMP, SMA, hingga Perguruan Tinggi. Bahkan, pendidikan lingkungan perlu diberikan melalui pendidikan non-formal bagi masyarakat umum. Hal tersebut agar masyarakat memiliki pengetahuan dan pemahaman tentang pentingnya menjaga sumberdaya air demi kelangsungan kehidupan penduduk kota. Pada mata pelajaran geografi di SD, SMP, dan SMA, materi tentang sumberdaya air sudah ada; Sedangkan di Perguruan Tinggi materi sumberdaya air sebagai salah satu komponen geografi fisik juga sudah diberikan, bahkan wajib muncul sebagai suatu matakuliah tersendiri. Di Jurusan Pendidikan Geografi UM, materi sumberdaya air disajikan dengan beban 3 sks (4 js) dengan judul matakuliah hidrologi/hidrografi. Selain itu pada matakuliah lain juga dibahas materi sumberdaya air yaitu matakuliah geografi lingkungan dan matakuliah konservasi tanah dan air.

Berdasarkan realitas tersebut, maka sudah selayaknya jika pendidikan geografi dikatakan sangat sejalan bahkan identik dengan pendidikan lingkungan. Kurikulum pendidikan geografi dari SD hingga PT sudah memuat materi tentang lingkungan hidup, termasuk materi tentang sumberdaya air. Secara keilmuan geografi juga memiliki pendekatan (pendekatan kelingkungan) yang dapat

diandalkan untuk mengkaji dan memecahkan berbagai masalah lingkungan. Namun demikian yang masih menjadi pekerjaan rumah bersama (para geograf) adalah bagaimana mengembangkan model pembelajaran yang efektif, sehingga pesan lingkungan dari materi yang diberikan dapat sampai pada benak (*head*) dan hati (*heart*) anak didik, yang selanjutnya dapat mendorong mereka untuk bertindak positif (*hand*). Penetapan UM sebagai *Learning University* tentu sangat mendukung untuk mewujudkan harapan mulia tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Amri, 2005. Ketersediaan Sumber Air Bersih Indonesia Tinggal 25%. <http://kapanlagi.com>.
- Anonymous, 2001. Air Bawah Tanah (Groundwater). <http://www.lablinc.or.id/Hidro/air-bawah-tanah.htm>.
- Asdak, Chay. 2002. Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- BAPPEDA Kota Malang, 2001. Evaluasi/Revisi Rencana Tata Ruang Wilayah Kota Malang Tahun 2001 – 2010. BAPPEDA Kota Malang.
- BAPPEDALDA Kota Malang, 2002. Neraca Sumberdaya Alam Spasial Daerah Tahun 2002. Pemerintah Kota Malang.
- BAPPEKO, 2005. Evaluasi dan Revisi Rencana Tata Ruang Wilayah Kota Malang. Pemerintah Kota Malang.
- Bintarto, R dan Hadisumarno, S. 1988. Metode Analisa Geografi. Jakarta: LP3ES.
- Dear, M dan Wolch, J. 1989. The Power of Geography, How Territory Shapes Social Life, Unwin Hyman Inc., Winchester USA.
- Duluth Stream. 2004. Moving Water Around Duluth, Citizen and Schools Storm Water. [www.DuluthStream .Com](http://www.DuluthStream.Com), diakses tanggal 26 April 2006.
- KLH, 1991. Kualitas Lingkungan Indonesia Tahun 1990, Kantor Menteri Negara Lingkungan Hidup, Jakarta
- Kodoatie, Robert J. 1995. Pengantar Hidrogeologi, Penerbit Andi, Yogyakarta.
- Konig, Klaus W. 2002. Air Hujan Perkotaan: Sebuah Catatan Mengenai Ekologi dan Praktik. Hal. 245—259. dalam Eko Budihardjo (ed) Kota dan Lingkungan, Pendekatan Baru Masyarakat Berwawasan Ekologi, LP3ES, Jakarta.
- Linsley, Ray K., et al. 1996. Hidrologi Untuk Insinyur, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Parker, B. dan Parker, L. 1985. Geography Today, MacMillan Company of Australia PTY LTD, South Melbourne.
- Roberts, Thomas H. 1988. Perencanaan Tata Guna Lahan, p. 266-291. dalam Catanese dan Snyder (ed.) Perencanaan Kota, Erlangga, Jakarta.
- Sumaatmadja, Nursid. 1988. Studi Geografi , Suatu Pendekatan dan Analisa Keruangan. Bandung: Alumni.
- Strahler, A.N. dan Strahler, A.H. 1984. Elements of Physical Geography, John Wiley & Sons, Inc., Canada.
- Suripin. 2002. Pelestarian Sumberdaya Tanah dan Air. Penerbit Andi, Yogyakarta
- Suwarno, Djoko. 1996. Drainase Berwawasan Lingkungan, Makalah disajikan dalam Konferensi Nasional Pusat Studi Lingkungan BKPSL, Tanggal 22-24 Oktober 1996 di Denpasar Bali.
- Todd, David K. 1980. Groundwater Hydrology, John Willey & Son, New York.
- Utaya, Sugeng. 2009. Dampak Hidrologi Perubahan Tata Guna Lahan Kota Malang, Surya Pena Gemilang, Malang.
- Utaya, Sugeng. 2009. Pengaruh Perubahan Penggunaan Lahan Terhadap Sifat Biofisik Tanah dan Kapasitas Infiltrasi Di Kota Malang, J. Forum Geografi, Vol. 22 No.2, hal 99-112.
- Wirakusumah, Ade Djumarma. 2006. Air Tanah Bandung Susut. Makalah disajikan dalam Workshop Nasional Geologi Teknik dalam Perencanaan Tata Ruang dan Pembangunan Infrastruktur, Bandung, 14 November 2006.
- Winanti, T. 1996. Pekarangan Sebagai Media Peresapan Air Hujan Dalam Upaya Pengelolaan Sumberdaya Air, Makalah disajikan dalam Konferensi Nasional Pusat Studi Lingkungan BKPSL, Tanggal 22-24 Oktober 1996 di Denpasar Bali.

Bahan Bakar Terbarukan dari Mikroalga: Peluang dan Tantangan untuk Pasokan Energi Masa Depan

Prof. Dr. Sukarni, S.T., M.T.

Bismillahirrahmanirrahim

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakaatuh,

Yth. Ketua Senat Universitas Negeri Malang, Bapak Prof. Dr. Sukowiyono, S.H., M.Hum.

Yth. Rektor Universitas Negeri Malang, Bapak Prof. Dr. Ah. Rofi'uddin, M.Pd.

Yth. Para Anggota Senat, Ketua dan para Anggota Komisi Guru Besar Universitas Negeri Malang

Yth. Para Pejabat Struktural Universitas Negeri Malang

Yth. Rekan sejawat dosen, tenaga fungsional, dan mahasiswa Universitas Negeri Malang

Yth. Para tamu undangan dan Hadirin yang berbahagia

Mengawali pidato ini, izinkahlah pertama-tama saya menyampaikan puji syukur *alhamdulillah*, segala puji bagi Allah SWT, Dzat yang telah menciptakan langit dan bumi dengan segala fenomena dan keteraturannya. Atas kekuasaan Allah semata, yaitu Dzat yang telah mengkaruniakan nikmat yang tiada terhingga, yang terlimpahkan kepada kita semua dan kami sekeluarga khususnya, sehingga pagi ini kita dapat berbagi kebahagiaan melalui majelis terhormat ini. Lebih khusus, saya bersyukur, pada hari ini, saya masih diberi kesempatan dan kehormatan untuk memenuhi tradisi akademik yang terpelihara dengan baik di Universitas Negeri Malang, yaitu menyampaikan pidato pengukuhan sebagai Guru Besar dalam Bidang Ilmu Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran di Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Negeri Malang.

Kedua, saya juga menyampaikan rasa terima kasih yang mendalam kepada Ketua Senat Universitas Negeri Malang, Bapak Prof. Dr. H. Sukowiyono, S.H., M. Hum, beserta segenap anggota Senat dan Komisi Guru Besar, dan rasa terimakasih yang setinggi-tingginya juga saya sampaikan kepada Rektor Universitas Negeri Malang, Bapak Prof. Dr. Ah. Rofi'uddin, M.Pd, serta segenap jajaran pimpinan dan staf yang telah menghantarkan saya untuk berdiri di mimbar yang terhormat ini.

Hadirin yang saya hormati,

Pada kesempatan ini, perkenankanlah saya menyampaikan sedikit sumbangsih pemikiran, dari hasil kegiatan akademik saya sebagai dosen. Materi yang saya sampaikan ini merupakan rangkuman pengetahuan dari berbagai sumber dan sebagian besarnya adalah gagasan yang telah saya tindaklanjuti dengan sejumlah kegiatan penelitian yang saya lakukan bersama-sama dengan dosen, baik dosen dari dalam UM, dosen mitra kerjasama dari luar UM, dan dosen kolaborator riset dari luar negeri, sejumlah balai penelitian dan pengembangan, serta melibatkan sejumlah mahasiswa program sarjana dan pascasarjana yang dalam masa pendidikannya saya bimbing.

Materi ini saya kemas dan saya paparkan secara berurutan mulai dari gambaran umum kecenderungan energi global dan nasional, kebijakan energi dan isu lingkungan, sejarah *biofuel*, mengapa mikroalga, *trend* riset mikroalga untuk bahan bakar, teknik konversi mikroalga menjadi bahan bakar, sumbangsih pemikiran dan hasil penelitian untuk pengembangan bahan bakar dari mikroalga, serta tantangan dan hambatan yang perlu secara terus menerus diteliti dan dicarikan solusi. Berdasarkan gambaran umum tadi, maka pidato ilmiah ini saya beri judul: "*Bahan Bakar Terbarukan dari Mikroalga: Peluang dan Tantangan untuk Pasokan Energi Masa Depan*".

I. Kecenderungan Energi Global

Hadirin yang saya muliakan,

Faktor penting yang menjadi penggerak kenaikan kebutuhan energi adalah peningkatan jumlah penduduk dan naiknya standar kehidupan, terutama pada negara dengan pendapatan perkapita rendah dan menengah (BP, 2020a; ExxonMobil, 2018). Antara tahun sekarang dan 2040,

populasi dunia diperkirakan akan tumbuh dari 7,5 miliar menjadi lebih dari 9 miliar, dan produk domestik bruto (PDB) global diperkirakan akan meningkat hampir dua kali lipat (BP, 2021b), yang mengangkat lebih dari 2,5 miliar orang dari pendapatan rendah menjadi kelas menengah (BP Energy Outlook, 2018). Hal ini akan mendorong permintaan energi primer secara global naik sekitar 25%, merujuk kepada skenario *business-as-usual* (BAU) (BP, 2020a).

Tragedi kemanusiaan berupa pandemi Covid-19, sangat berpengaruh terhadap permintaan energi global, khususnya pada tahun 2020, dimana konsumsi energi primer turun 4,5% (BP, 2021b). Namun demikian, kondisi ini diperkirakan hanya akan berdampak dalam jangka pendek, sehingga permintaan energi global sampai dengan 2040 diperkirakan akan terus tumbuh pada kisaran 25% (ExxonMobil, 2021).

Badan Energi Internasional (IEA, 2020, 2021) memproyeksikan bahwa permintaan energi sampai dengan tahun 2040 masih didominasi oleh minyak dan gas dengan jumlah pasokan mencapai 55% (ExxonMobil, 2018). Persoalan serius terkait dengan energi fosil adalah jumlah cadangan yang terbatas dan emisi dari hasil pembakarannya. Berdasarkan rasio cadangan terhadap produksi (*reserves-to-production (R/P) ratio*), cadangan minyak terbukti saat ini diperkirakan hanya akan bertahan 50 tahun (BP, 2020b), cadangan gas akan bertahan sampai 48,8 tahun (BP, 2021a) dan batubara hanya cukup untuk 114 tahun lagi (Our World in Data, 2021). Oleh karena itu, upaya pencarian sumber energi terbarukan adalah sebuah kewajiban dan menjadi tanggungjawab bagi para peneliti bidang energi di seluruh dunia untuk menjamin keberlangsungan generasi di masa yang akan datang, agar mereka bisa hidup dengan sumber energi yang cukup.

II. Kecenderungan Energi Nasional

Hadirin yang saya hormati,

Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi pada tahun 2021 memproyeksikan kebutuhan energi nasional tahun 2019-2050 terus meningkat dengan laju pertumbuhan rata-rata 3,5% per tahun (BPPT, 2021). Komposisi jenis energi baik saat ini sampai dengan tahun 2050 masih didominasi oleh bahan bakar minyak (BBM), dari 42% (2019) menjadi 33% (2050), batubara 17% (2019) menjadi 18% (2050), listrik 16% (2019) menjadi 23% (2050) dan gas dari 10% (2019) menjadi 11% (2050). Data ini menunjukkan bahwa sampai dengan tahun 2050, ketergantungan pada sumber energi fosil berupa BBM, batubara dan gas masih sangat tinggi. Jika dilihat secara keseluruhan pada tahun 2019, penyediaan energi primer nasional 90,7% dipenuhi dari sumber energi fosil (BPPT, 2021). Sektor transportasi, sebagai pengguna energi terbesar nasional (42%), hampir keseluruhan sumber energinya, yaitu 90,9%, menggunakan BBM.

Ketergantungan Indonesia terhadap sumber energi fosil menghadapi 2 masalah besar dan serius: *pertama*, keterbatasan cadangan energi fosil dan *kedua*, isu lingkungan terkait dengan peningkatan emisi gas rumah kaca (GRK). Kementerian ESDM melalui siaran pers nomor 028.Pers/04/SJI/2021 tanggal 19 Januari 2021 menyampaikan bahwa dengan asumsi tidak ada penemuan baru dan tingkat produksi saat ini sebanyak 700 ribu *barrel oil per day* (bopd) dan gas 6 *billion standard cubic feet per day* (bscfd), maka cadangan minyak bumi Indonesia hanya akan tersedia selama 9,5 tahun dan cadangan gas bumi hanya akan bertahan selama 19,9 tahun (ESDM, 2021b). Kementerian ESDM melalui siaran pers nomor: 246.Pers/04/SJI/ 021 tanggal 26 Juli 2021 juga mengumumkan bahwa dengan rata-rata produksi batubara sebesar 600 juta ton per tahun, maka ketersediaan cadangan batubara hanya tinggal 65 tahun lagi (ESDM, 2021a). Kondisi ini tentunya membutuhkan perhatian serius dari seluruh pemangku kepentingan agar generasi yang akan datang bisa lestari dengan kecukupan jumlah energi untuk hidup mereka.

III. Kebijakan Energi dan Isu Lingkungan

Hadirin yang saya muliakan,

Kebijakan energi baik secara global dan nasional tidak bisa dilepaskan dari isu lingkungan, khususnya isu pemanasan global sebagai akibat meningkatnya jumlah gas rumah kaca (GRK) dari hasil pembakaran bahan bakar fosil. Konsentrasi CO₂ di atmosfer mengalami peningkatan dari 280 ppm pada masa pra-industri menjadi 412 ppm saat ini, dimana 35 miliar ton CO₂ dilepaskan ke

atmosfer per tahun (NOAA, 2021a), dan ini menyebabkan perubahan iklim yang merusak. Pemanasan global telah terjadi secara nyata. *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)* telah melaporkan kenaikan temperatur global mendekati 1 C pada bulan Oktober 2015 (NOAA, 2015), tertinggi selama kurun waktu pencatatan sejak tahun 1880. Data tahun 2021 juga menunjukkan bahwa rata-rata temperatur permukaan bumi selama Januari-Oktober 2021 adalah 0,84 ° C di atas rata-rata temperatur selama abad ke-20 (NOAA, 2021b). Simulasi yang menggambarkan dampak buruk dan serius akibat kenaikan temperatur 1,5 dan 2°C dibandingkan sebelum era pra-industri, telah dipaparkan dalam tulisan Alan Buis, seorang penulis Science dari *NASA Jet Propulsion Laboratory* (Buis, 2019), diantaranya:

- (1) Terjadinya temperatur yang ekstrem pada tanah dengan intensitas panas yang berbeda-beda terjadi antara satu tempat dengan tempat yang lain. Hal ini akan mengakibatkan 14-37 % populasi di bumi ditimpa gelombang panas yang berbahaya setidaknya sekali dalam lima tahun.
- (2) Terjadinya kekeringan dan kelangkaan air. Pemanasan global akan berdampak pada menipisnya kandungan air di dalam tanah. Jika kenaikan temperatur melampaui batas 2 C, maka sekitar 61 juta atau lebih banyak orang di daerah urban akan terkena kekeringan yang parah.
- (3) Pemanasan 2 C mengakibatkan beberapa tempat mengalami peningkatan hujan lebat dengan risiko banjir yang lebih tinggi. Badai siklon tropis diproyeksikan akan terjadi lebih tinggi.
- (4) Pemanasan global juga akan berdampak pada biodiversitas dan ekosistem. Hilang dan punahnya spesies penyerbuk, akan berdampak pada ketahanan produktivitas terestrial, termasuk pertanian untuk konsumsi makanan manusia. Peluang terjadinya kebakaran hutan dan cuaca yang ekstrem akan lebih besar akibat kenaikan pemanasan 2°C. Membatasi kenaikan temperature 1,5°C, akan mempertahankan 2,5 juta kilometer persegi tanah *permafrost* tetap beku dan mencegah hilangnya cadangan karbon tersimpan di dalam tanah.
- (5) Jika pemanasan mencapai 2°C, lebih dari 70 persen garis pantai bumi akan mengalami kenaikan permukaan laut lebih besar 0,2 meter, mengakibatkan peningkatan banjir pesisir, erosi pantai, salinisasi pasokan air dan dampak lainnya pada manusia dan sistem ekologis.
- (6) Peningkatan kadar CO₂ akan menyebabkan kenaikan temperatur air laut, meningkatkan keasaman dan mengurangi kadar oksigen dalam air. Kondisi ini akan menjadikan laut sebagai zona mematikan bagi makhluk hidup perairan.

Didasarkan pada kesadaran untuk menjaga kelestarian lingkungan ini, maka *Paris Agreement* tahun 2015 yang diikuti oleh 196 negara, telah menetapkan beberapa point penting (IESR, 2021; UNFCCC, 2021), yaitu: (1). Membatasi pemanasan global di bawah 2°C dan lebih disukai menjaga pada 1,5 C dibandingkan dengan pra-industri. (2). *Net-zero emission* sebagai tujuan jangka panjang. Untuk mencapai target ini, *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* menetapkan bahwa emisi dari bahan bakar fosil harus turun pada rentang tahun 2040-2070 dan setelah itu menjadi *net-zero emission*. Berdasarkan dua latar belakang tersebut, yaitu adanya keterbatasan cadangan energi fosil dan perlunya menjaga kelestarian lingkungan, maka upaya pencarian sumber energi alternatif yang *renewable* dan ramah lingkungan menjadi sebuah keharusan. Skenario apapun yang dirancang untuk pengembangan energi ke depan harus mempertimbangkan dua hal penting tersebut. Maka dalam konteks penyediaan bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar fosil, perhatian dunia kembali kepada *biofuel*, yaitu bahan bakar yang berasal dari tumbuhan, dimana CO₂ hasil pembakarannya akan diserap kembali untuk proses fotosintesis selama proses pertumbuhannya, sehingga *biofuel* bisa *net-zero emission*.

IV. Sejarah Biofuel

Hadirin yang saya muliakan,

Istilah *biofuel* mengacu pada biomassa tanaman dan produk turunannya yang akan dibakar untuk energi. *Biofuel* ada dalam bentuk padat, cair, dan gas. Manusia telah memanfaatkan *bioenergy* dan *biofuel* untuk keperluan rumah tangga sejak pra sejarah. Kayu dibakar untuk mendapatkan panas guna memasak makanan, menerangi malam, penghangat ruangan, dan merawat artefak tanah liat. Sebelum abad ke-19, kayu adalah bahan bakar utama untuk memasak dan memanaskan, dan minyak nabati adalah bahan bakar utama untuk penerangan di seluruh dunia (Guo et al., 2015).

Etanol telah dikembangkan sebagai bahan bakar alternatif jauh hari sebelum ditemukannya minyak bumi oleh Edwin Drake pada tahun 1859. Sebelum tahun ini, minyak ikan paus yang biasa digunakan sebagai minyak lampu. Minyak lampu lainnya yang berasal dari sayuran dan hewan juga digunakan, tetapi minyak ikan paus lebih disukai. Pada akhir tahun 1830-an, etanol yang dicampur dengan terpentin (dimurnikan dari pohon pinus) digunakan untuk menggantikan minyak ikan paus yang lebih mahal (Songstad et al., 2009).

Penggunaan *biofuel* pertama untuk bahan bakar mesin dimulai ketika tahun 1826, penemu Amerika Samuel Morey merancang mesin pembakaran dalam berbahan bakar etanol dan terpentin untuk menjalankan perahu dengan kecepatan 7 hingga 8 mph (mil per jam). Pada tahun 1860, insinyur Jerman Nicolaus August Otto mengembangkan mesin pembakaran dalam yang menggunakan campuran bahan bakar etanol. Kemudian industrialis Amerika Henry Ford membuat traktor yang dapat digerakkan oleh etanol (Guo et al., 2015; Songstad et al., 2009). Hambatan yang mencegah etanol digunakan sebagai bahan bakar mesin di AS adalah pajak alkohol yang diberlakukan pada tahun 1860-an untuk mendanai perang saudara. Hal membuat etanol lebih mahal daripada bensin dan lebih disukai penggunaan bensin untuk mesin pembakaran dalam. Ketika pajak ini dihapus tahun 1906, sulit bagi infrastruktur etanol untuk bersaing dengan bensin, sehingga bensin menjadi bahan bakar utama mobil sampai sekarang (Guo et al., 2015; Songstad et al., 2009).

Sejarah penggunaan minyak nabati sebagai pengganti solar sebagai bahan bakar dimulai ketika insinyur Jerman Rudolf Diesel menemukan mesin diesel dengan penyalan kompresi pada tahun 1893. Rudolf Diesel termotivasi menggunakan minyak nabati murni pada mesin pertanian, karena ini akan lebih menguntungkan petani di daerah terpencil karena mereka bisa memproduksi minyak secara mandiri. Demonstrasi pertama mesin diesel dilakukan pada Pameran Dunia tahun 1900 di Paris dimana perusahaan Otto Francis mendemonstrasikan mesin diesel yang berbahan bakar minyak kacang. Perhatian untuk mengembangkan bahan bakar berbasis minyak nabati, bagaimanapun, terkalahkan oleh ketersediaan yang solar yang meluas dengan harga yang lebih murah (Guo et al., 2015; Songstad et al., 2009). Namun saat ini, ketika ancaman krisis energi fosil sudah sangat dekat dan bahaya rusaknya lingkungan akibat CO₂ dari pembakaran bahan bakar fosil sudah sangat mengancam, upaya untuk kembali ke bahan bakar yang *renewable* dan *net-zero emission* menjadi perhatian yang sangat serius bagi para peneliti dan pengambil kebijakan di seluruh dunia.

V. Mengapa Mikroalga

Hadirin yang saya hormati,

Pangsa konsumen terbesar energi nasional adalah sektor transportasi (42%), industri (39%) dan rumah tangga (13%). Sumber energi untuk transportasi hampir semuanya menggunakan BBM, mengingat teknologi yang ada pada kendaraan yang melayani transportasi hampir semuanya digerakkan dengan BBM. Sumber energi utama untuk industri adalah batubara, karena semua teknologi *boiler* yang ada di industri memerlukan batubara untuk bahan bakar. Kebutuhan energi rumah tangga yang utama adalah listrik dan gas. Listrik kita utamanya dibangkitkan dengan bahan bakar batubara dan gas. Oleh karena itu, penyediaan energi alternatif yang *renewable* dan *net-zero emission* untuk kendaraan transportasi, industri dan rumah tangga adalah sangat penting untuk terus menggerakkan roda perekonomian dan menjaga kelestarian lingkungan.

Salah satu sumber energi alternatif yang *renewable* dan *net-zero emission* dan sesuai dengan teknologi yang ada pada kendaraan transportasi, mesin industri dan pembangkit listrik sekarang adalah biomassa (untuk menghasilkan *bio-fuel*). Biomassa bersifat *renewable* karena bisa ditanam kembali dan diproduksi secara terus menerus, dan bersifat *net-zero emission* karena produk CO₂ yang dihasilkan dari pembakaran akan diserap selama proses fotosintesis. Namun demikian, pengembangan *biofuel* generasi pertama yang berasal tanaman pangan (seperti tebu, jagung, kedelai, ketela, minyak sawit) menghadapi kendala karena bersaing dengan kebutuhan pangan, sedangkan *biofuel* generasi kedua yang berasal dari biomassa kayu menghadapi tantangan terkait dengan kelestarian hutan dan perubahan orientasi penggunaan lahan (Sukarni, 2020; Sukarni, Sumarli, et al.,

2018). Berbagai studi menunjukkan pada keyakinan pada sumber *biofuel* generasi ketiga, yaitu mikroalga, sangat potensial untuk menggantikan peran bahan bakar fosil.

Mikroalga adalah mikroorganisme bersel satu (Demirbas, 2010; Demirbas & Fatih Demirbas, 2011) atau multisel dengan struktur sederhana (Mata et al., 2010) dan beberapa diantaranya multisel dengan struktur kompleks (Singh et al., 2011) yang memiliki kemampuan fotosintesis, prokariotik atau eukariotik, yang dapat tumbuh dengan cepat di lingkungan air garam atau air tawar yang mengkonversi sinar matahari, air dan karbon dioksida (CO₂) menjadi biomassa.

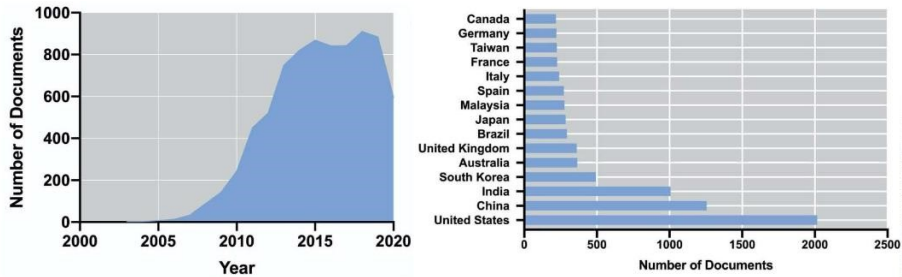
Beberapa alasan yang didasarkan pada hasil riset tentang keutamaan mikroalga sebagai sumber energi alternatif diantaranya adalah:

- (1) Mikroalga memiliki memiliki produktivitas biomassa yang tinggi, sehingga keberlangsungan pasokan bahan baku sebagai sumber energi akan terjamin. Siklus pertumbuhan mikroalga relatif pendek dengan hasil biomassa yang dapat berlipat ganda, karena mikroalga menggandakan biomasanya antara 1-3 per 24 jam (Hu et al., 2008). Produksi biomassa mikroalga adalah 50 kali lebih tinggi dibandingkan dengan tanaman darat (Li et al., 2008).
- (2) Potensi *biofuel* dari mikroalga tertentu diproyeksikan setidaknya 60 kali lebih tinggi daripada kedelai, kira-kira 15 kali lebih produktif daripada tanaman darat, dan hampir 5 kali lipat minyak sawit per hektar setiap tahun. Mikroalga kaya akan minyak, beberapa spesies mengandung lebih dari 60% dari berat kering biomassa (Chen et al., 2015).
- (3) Mikroalga mengkonsumsi 2g CO₂ untuk menghasilkan 1g biomassa. Dengan tingkat pertumbuhan 50 g/m²/hari, maka untuk satu hektar 2 kolam mikroalga akan menyerap hingga 1 ton CO₂ per hari (Schenk et al., 2008). Dengan demikian, budidaya mikroalga akan menetralkan CO₂ dari hasil pembakarannya.
- (4) Mikroalga memungkinkan untuk dikonversi menjadi berbagai jenis produk bahan bakar seperti biohidrogen (H₂), biodiesel, bahan bakar jet, bensin, dan bioetanol (De Bhowmick et al., 2019; Khan et al., 2018; Kumar et al., 2020).
- (5) Keseluruhan biomassa mikroalga juga dapat dimanfaatkan dalam produksi syngas dengan proses Fischer-Tropsch, produksi H₂ dan metana (CH₄) dengan *hydrothermal liquefaction* (HTL), produksi CH₄ dengan *anaerobic digestion*, dan produksi listrik dengan pembakaran (De Bhowmick et al., 2019; Kumar et al., 2020).

VI. Trend Riset Mikroalga untuk Bahan Bakar

Hadirin yang saya hormati,

Riset terkait potensi mikroalga untuk bahan bakar masih relatif baru jika dibandingkan dengan riset *biofuel* secara keseluruhan. Penelusuran pustaka berupa artikel jurnal pada database Scopus dengan bantuan *software Publish or Perish* mendapatkan artikel pertama terkait mikroalga sebagai bahan bakar adalah terbit tahun 1999 yang berjudul "*Possibility of renewable energy production and CO₂ mitigation by thermochemical liquefaction of microalgae*" yang ditulis oleh peneliti Jepang (Sawayama et al., 1999). Dalam kurun waktu 1999-2005 hanya ditemukan 6 artikel terkait *microalgae biofuel*. Selanjutnya dalam kurun waktu 5 tahun berikutnya (2006-2011) terdapat kurang lebih 443 artikel dan tahun 2012 saja lebih dari 200 artikel dalam 1 tahun. Total jumlah artikel sampai tahun 2021 ada 8022 (Zuorro et al., 2021). Hal ini menunjukkan besarnya perhatian para peneliti terhadap upaya eksplorasi sumber energi terbarukan berbahan dasar mikroalga, terutama para peneliti dari negara-negara maju sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.

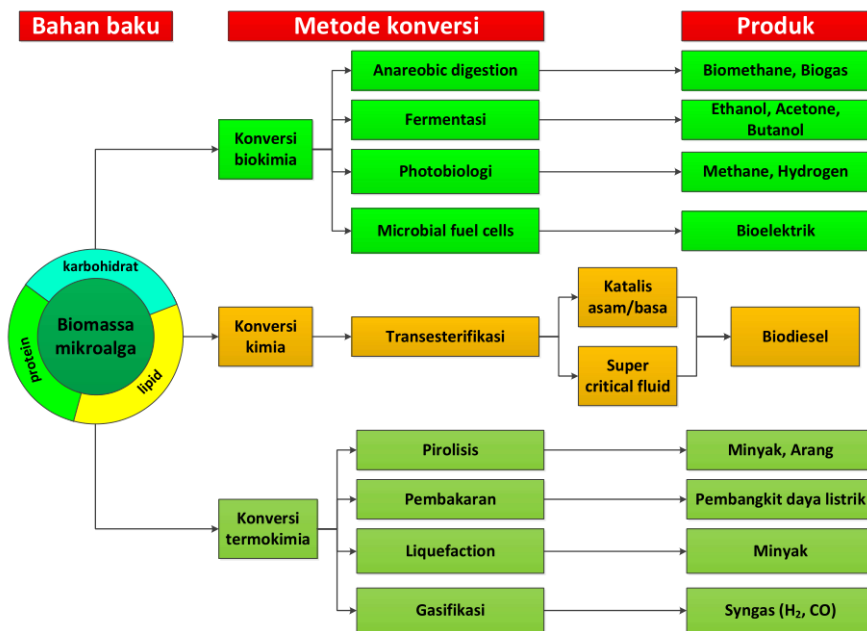


Gambar 1. Trend riset *biofuel* mikroalga secara global dari 2003-2020 (Zuorro et al., 2021)

VII. Teknik Konversi Mikroalga Menjadi Bahan Bakar

Hadirin yang saya hormati,

Mikroalga dapat dikonversi secara langsung untuk menghasilkan panas yang diperlukan untuk pembangkit listrik atau dikonversi menjadi bahan bakar dalam bentuk yang lain. Proses konversi tersebut secara garis besar ditunjukkan pada skema Gambar 2.



Gambar 2. Konversi mikroalga menjadi bahan bakar

Konversi Biokimia

Anaerobic digestion adalah proses biokimia kompleks yang mengubah biomassa mikroalga menjadi biogas dalam kondisi anaerob melalui sejumlah reaksi seperti (a) hidrolisis, (b) asidogenesis, (c) asetogenesis dan (d) metanogenesis. Dalam proses ini, produk dari satu fase digunakan sebagai substrat dalam fase lain. Pada fase pertama, senyawa organik yang tidak larut dihidrolisis, dan senyawa dengan berat molekul tinggi seperti polisakarida, lipid, protein, dan asam nukleat diubah menjadi senyawa organik terlarut. Pada fase kedua, produk yang diperoleh dari hidrolisis didegradasi oleh bakteri asidogenik yang menghasilkan amonia, asam lemak volatil, dan karbon dioksida sebagai hasil asidogenesis. Selama asetogenesis, produk dari fase awal dicerna oleh asetogen menjadi asam asetat, karbon dioksida, dan hidrogen. Metanogenesis adalah fase terminal yang mengubah produk dari fase asetogenesis menjadi metana (55%– 75%), karbon dioksida (25%–45%) dan air dengan menggunakan bakteri metanogenik (De Bhowmick et al., 2019)

Fermentasi adalah proses anaerobik di mana mikroorganisme (misalnya, bakteri, ragi, dan jamur) menghidrolisis dan memfermentasi polisakarida mikroalga seperti pati, glikogen, dan selulosa menjadi etanol dan karbon dioksida. Karena dinding sel mikroalga sangat kuat, perlakuan awal biomassa sangat penting untuk memfasilitasi pelepasan pati intraseluler dan mengubahnya menjadi gula sederhana melalui sakarifikasi untuk fermentasi. Teknik *pretreatment* yang paling umum digunakan adalah fisik atau mekanik (misalnya, sonikasi, penggilingan), biologis (misalnya enzimatik) dan kimia (misalnya, perlakuan termal, asam atau alkali). Etanol diperoleh melalui fermentasi dan selanjutnya dilakukan distilasi untuk menghilangkan air dan kotoran, dan akhirnya, etanol pekat (sekitar 95%) dicampur dengan bahan bakar fosil untuk digunakan pada mesin (De Bhowmick et al., 2019).

Photobiologi untuk menghasilkan hidrogen. Ada tiga mekanisme yang melaluinya biohidrogen dapat diproduksi (a) biofotolisis langsung, (b) biofotolisis tidak langsung, (c) dua tahap produksi hidrogen/foto fermentasi hidrogen. Dalam biofotolisis langsung, molekul hidrogen diproduksi tanpa oksigen sebagai hasil dari aktivitas pemisahan air dari fotosistem II (PSII). Mekanisme ini dikatalisis oleh enzim hidrogenase mikroalga hijau. Biofotolisis tidak langsung adalah proses dua fase di mana mikroalga awalnya tumbuh di bawah kondisi fotosintesis normal dan dibiarkan bereplikasi dan terakumulasi karbohidrat sebanyak mungkin. karbohidrat sebanyak mungkin. Dua tahap produksi hidrogen/foto fermentasi hidrogen, yaitu awalnya biofotolisis langsung dilakukan oleh mikroalga untuk menghasilkan hidrogen. Setelah produksi hidrogen oleh mikroalga dihentikan, biomassa alga berfungsi sebagai substrat bagi bakteri fermentatif untuk melakukan evolusi hidrogen melalui fermentasi gelap (Mishra et al., 2019). *Microbial fuel cells* (MFC) berbasis mikroalga juga dikenal sebagai sistem bioelektrokimia adalah teknologi baru yang menjadi pusat perhatian karena pendekatan barunya dalam mengolah limbah, memanen listrik, dan menumbuhkan mikroalga secara bersamaan. MFC adalah perangkat bioelektrik yang memanfaatkan mikroalga untuk mengubah cahaya dan energi biokimia menjadi energi listrik secara biologis (Mishra et al., 2019).

Konversi kimia

Reaksi transesterifikasi adalah proses yang mengubah trigliserida menjadi alkil ester asam lemak rantai panjang (*fatty acid alkyl esters*, FFAE) dengan adanya alkohol dan katalis. FFAE, juga dikenal sebagai biodiesel yang secara konvensional diproduksi dari mikroalga melalui rute ekstraksi lipid diikuti dengan konversi ke FFAE dan gliserol. Faktor-faktor seperti suhu reaksi, waktu, rasio lipid-alkohol, dan pemuatan katalis dianggap mengoptimalkan proses untuk konversi FFAE yang signifikan (Mishra et al., 2019).

Konversi termokimia

Pirolisis adalah teknik yang menjanjikan untuk mengubah mikroalga menjadi biofuel bernilai tinggi. Proses pirolisis terjadi dengan pemanasan antara 300 dan 600 °C tanpa adanya oksigen, yang mengubah biomassa menjadi bio-oil, biochar, dan syngas. Secara umum, teknologi pirolisis diklasifikasikan menjadi pirolisis lambat, menengah, cepat, dan kilat. Pada pirolisis lambat, biochar adalah produk utama dan terjadi pada laju pemanasan dan temperatur yang lebih rendah dengan waktu tinggal yang lebih lama. Sebaliknya, pirolisis cepat menghasilkan bio-oil sebagai produk utama, dilakukan dengan pemanasan yang tinggi dan waktu tinggal yang singkat. Selama pirolisis, dihasilkan senyawa yang mengandung oksigen (aldehid, fenol, keton, dan asam organik) yang menyebabkan bio-oil tidak stabil dan bersifat asam (Ong et al., 2020).

Pembakaran mikroalga dilakukan dalam tungku atau boiler untuk menghasilkan energi panas. Kadar air biomassa harus <50% (McKendry, 2002; Sukarni, 2020), dan biomassa kadar air tinggi sering dikeringkan untuk mencapai kadar air yang diinginkan. Biomassa dengan kandungan abu tinggi dan nilai kalori rendah dapat dijadikan sebagai bahan baku. Namun demikian, pengeringan, penggilingan, dan pemanfaatan langsung energi panas dari hasil pembakaran mikroalga masih menjadi salah satu tantangan utama. Pembakaran bersama biomassa mikroalga dengan bahan baku lain seperti, batubara dan biomassa limbah dapat dipertimbangkan untuk operasi dalam skala komersial (Mishra et al., 2019).

Pencairan hidrotermal (*hydrothermal liquefaction*, HTL) adalah proses konversi termokimia yang mengubah biomassa mikroalga basah menjadi *biocrude* (bahan bakar bio cair). HTL dioperasikan pada kondisi mendekati superkritis (temperature 250–370 °C), di mana air bertindak seperti katalis asam dan basa. Ini memicu isomerisasi, depolimerisasi dan repolimerisasi yang menghasilkan konversi biomolekul (misalnya, protein, polisakarida, lipid, klorofil) menjadi biofuel. Keuntungan dari likuifaksi adalah kemampuannya untuk memproses sumber biomassa apa pun untuk menghasilkan bio-oil tanpa mempertimbangkan kadar air bahan baku (Mishra et al., 2019; Seepana et al., 2019).

Gasifikasi adalah proses termokimia dimana produksi syngas dilakukan dalam dua metode berbeda (1) gasifikasi konvensional dan (2) gasifikasi air superkritis (*supercritical water gasification*, SCWG). Gasifikasi konvensional dilakukan pada kisaran temperatur 800–1000 °C dan tekanan 1–10 bar menggunakan biomassa mikroalga kering. Sedangkan SCWG biomassa mikroalga basah diproses pada kondisi super kritis (400–500 °C dan 24-36 MPa) untuk menghasilkan gas yang mudah terbakar (CH₄ atau H₂) (Mishra et al., 2019).

VIII. Sumbangsih Pemikiran dan Hasil Penelitian untuk Pengembangan Bahan Bakar dari Mikroalga

Hadirin yang saya hormati,

Sesuai bidang keilmuan saya, yaitu bidang ilmu bahan bakar dan teknologi pembakaran, maka penelitian yang saya lakukan lebih fokus ke arah proses konversi mikroalga melalui pembakaran dan sebagian diantaranya pirolisis. Meskipun demikian, karena potensi mikroalga sebagai bahan bakar harus dilihat secara keseluruhan, mulai dari potensi kelimpahan biomassa untuk menjamin keberlangsungan ketersediaan bahan baku, potensi secara fisik dan kimia, potensi pemanfaatan residu sisa pembakaran, maka adanya irisan dengan bidang ilmu yang lain menjadi keniscayaan. Ilmu biologi diperlukan untuk memahami proses budidaya mikroalga dan memahami struktur biologi mikroalga dalam kaitannya dengan perubahan struktur selama proses konversi termal. Ilmu kimia untuk memahami keterkaitan kandungan unsur dalam mikroalga dengan potensi yang timbul dalam proses pembakaran. Ilmu material untuk menganalisis struktur material sisa pembakaran dan kemungkinan pemanfaatannya. Demikianlah, bidang ilmu teknik mesin khususnya bidang ilmu bahan bakar dan teknologi pembakaran tidak bisa dipisahkan dengan berbagai bidang ilmu yang lain.

Hadirin yang saya muliakan,

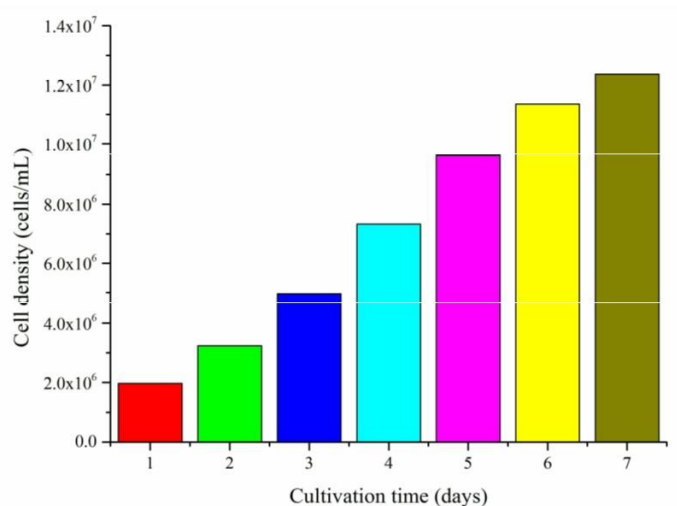
Penelitian pertama telah saya lakukan tahun 2013 terkait karakteristik pembakaran mikroalga *Nannochloropsis oculata* dengan dukungan pendanaan dari Hibah Fundamental DRPM DIKTI. Penelitian ini dilakukan secara menyeluruh mulai dari kultur atau budidaya mikroalga, menghitung laju pertumbuhannya, menganalisis kandungan unsur kimia dan komponen fisik (kadar air, *voaltile matter*, *fixed carbon* dan abu), melakukan uji pembakaran dan menganalisis parameter kinetiknya sehingga didapatkan energi aktivasi untuk proses pembakarannya, menganalisis perubahan komposisi unsur pada setiap tahap dekomposisi termal dan juga menganalisis unsur yang terkandung pada abu sisa pembakarannya. Gambar 3 menunjukkan sebagian kegiatan kultur mikroalga yang saya lakukan di Balai Budidaya Air Payau (BBAP) Situbondo. Gambar 4 menunjukkan proses pemanenan dengan melakukan penyaringan dan Gambar 5 menunjukkan laju pertumbuhan mikroalga *Nannochloropsis oculata*.



Gambar 3. Kultur mikroalga *Nannochloropsis oculata* pada kolam terbuka di BBAP Situbondo



Gambar 4. Penyaringan mikroalga *Nannochloropsis oculata* sebelum dikeringkan



Gambar 5. Produktivitas *Nannochloropsis oculata* hari ke 1 sampai hari ke 7

Penelitian pertama ini telah menghasilkan luaran 3 jurnal internasional bereputasi dan mengantarkan saya untuk lulus program doctoral, dengan rincian artikel sebagai berikut:

- (1) Artikel pertama dengan judul “*Potential and properties of marine microalgae Nannochloropsis oculata as biomass fuel feedstock*” terbit di Springer (Scopus, Q2) tahun 2014 (Sukarni et al., 2014). Artikel ini berisi informasi mendasar tentang bahan baku bahan bakar biomassa *Nannochloropsis oculata* meliputi kecepatan pertumbuhan biomassa dalam media kultur dan karakteristik fisik dan kimia yang mempengaruhi kinerjanya sebagai bahan bakar meliputi nilai kalor, kadar air dan sifat fisokimia yang lain. Analisis spektroskopi dengan Fourier transform infrared (FTIR) juga dilakukan terhadap biomassa dan residu hasil pembakaran untuk mengidentifikasi kandungan makromolekulnya. Artikel ini cukup banyak mendapatkan perhatian dari para peneliti di berbagai belahan dunia dan sampai saat ini telah diakses sebanyak 12.000 kali.
- (2) Artikel kedua berjudul “*Thermogravimetric kinetic analysis of Nannochloropsis oculata combustion in air atmosphere*” terbit di Springer (Web of Science, IF 2,7) tahun 2015 (Sukarni et al., 2015). Dalam artikel ini, perilaku termal pembakaran *Nannochloropsis oculata* diteliti dengan menggunakan teknik termogravimetri. Kehilangan massa, laju kehilangan massa dan diferensial termal dianalisis pada berbagai laju pemanasan dianalisis untuk memprediksi perilaku termal material. Lebih dari itu, parameter kinetika dekomposisi dievaluasi dengan metode Kissinger dan Ozawa untuk mengetahui besaran energi aktivasi selama proses pembakaran.
- (3) Artikel ketiga dengan judul “*Combustion of microalgae Nannochloropsis oculata biomass: Cellular macromolecular and mineralogical content changes during thermal decomposition*” terbit di Songklanakarin Journal of Science and Technology (Scopus, Q3) tahun 2018 (Sukarni, Yanuhar, et al., 2018). Artikel ini menyajikan tentang dekomposisi termal pembakaran *Nannochloropsis oculata* ditinjau dari perubahan kandungan makromolekul dan mineral sebagai fungsi temperatur, untuk mengetahui dekomposisi elemen biomassa pada setiap tahapnya. Karakteristik biomassa dan residunya pada suhu 1200°C juga diteliti, terutama morfologi dan komposisinya.

Hadirin yang saya hormati,

Beberapa catatan penting dari penelitian mikroalga *Nannochloropsis oculata* yang menunjukkan peluang dan tantangannya sebagai bahan bakar padat untuk keperluan pembangkit daya adalah:

- (1) Dari aspek kelimpahan, *Nannochloropsis oculata* memiliki produktivitas yang tinggi, yaitu memiliki laju pertumbuhan 0,27/hari dalam kondisi dibudidayakan pada kolam terbuka tanpa ada rekayasa. Laju pertumbuhan ini lebih tinggi dibandingkan dengan beberapa spesies yang lain *Dunaliella*

salina (García-González et al., 2005), *Scenedesmus obliquus* (de Morais & Costa, 2007) dan *Chlorella vulgaris* (Converti et al., 2009).

- (2) Proses pemanenan *Nannochloropsis oculata* cukup mudah, hanya dilakukan pengendapan dengan NaOH, disaring dan dikeringkan baik dengan oven atau sinar matahari.
- (3) Analisis unsur kimia menunjukkan bahwa *Nannochloropsis oculata* tinggi kandungan mineral yang cukup tinggi, terutama Mg, Ca, Na, Si dan Cl. Hal ini tidak menguntungkan sebagai bahan baku bahan bakar karena akan menurunkan nilai kalor dan menghasilkan abu yang merugikan pada sistem perpindahan kalor di dalam boiler.
- (4) Analisis kinetika menunjukkan bahwa nilai energi aktivasi pembakaran *Nannochloropsis oculata* cukup tinggi, yaitu sekitar 250 KJ/mol. Hal ini kemungkinan karena struktur dinding sel *Nannochloropsis oculata* cukup kuat sehingga proses pemecahan termal (*thermal cracking*) pada tahap awal sulit dilakukan dan membutuhkan energi yang tinggi. Kemungkinan yang kedua adalah karena kadar mineral dalam *Nannochloropsis oculata* cukup tinggi, terutama unsur Mg dan Ca.
- (5) Residu hasil pembakaran *Nannochloropsis oculata* cukup tinggi, yaitu sekitar 45%. Jika dikaitkan dengan pembakaran, hal ini tidak menguntungkan karena bahan bakar yang baik seharusnya meninggalkan sedikit residu. Meskipun demikian, analisis residu menunjukkan adanya kandungan yang berguna, seperti (a) senyawa melilit dapat digunakan sebagai bahan pembuatan kaca (Reddy et al., 2012) (b) senyawa silikon dioksida digunakan sebagai bahan baku industri elektronika (Green et al., 2001) (c) *di-calcium silicate* (Ca SiO₂) adalah salah satu 25 bahan pembuatan *portland cement* (Adamu et al., 2008; Méducin et al., 2007) dan (d) Magnesium karbonat digunakan untuk produksi magnetium oksida dengan proses kalsinasi. Magnesit juga digunakan untuk memproduksi batu bata tahan api dan *fireproofing* (Seeger et al., 2000).

Hadirin yang saya muliakan,

Penelitian kedua terkait potensi mikroalga *Isochrysis galbana* telah saya lakukan tahun 2015-2016 dengan dukungan dana Hibah Fundamental DRPM DIKTI. Budidaya *Isochrysis galbana* dilakukan bekerjasama dengan Balai Besar Pengembangan Budi Daya Air Payau (BBPBAP) Jepara. Penelitian ini telah menghasilkan luaran jurnal internasional bereputasi berjudul "*Exploring the prospect of marine microalgae Isochrysis galbana as sustainable solid biofuel feedstock*" terbit di Journal of Applied Research and Technology (Scopus, Q2) tahun 2018 (Sukarni, Sumarli, et al., 2018).

Beberapa catatan penting terkait penelitian ini adalah:

- (1) Budidaya *Isochrysis galbana* saat itu hanya bisa dilakukan pada skala laboratorium dengan gelas Erlenmeyer, sehingga belum diketahui secara pasti potensi kelimpahan jika dibudidayakan secara massal. Laju pertumbuhan *Isochrysis galbana* adalah 0,18/hari, lebih rendah dibandingkan *Nannochloropsis oculata* yang dibudidayakan pada kolam terbuka sebagaimana yang dilakukan pada penelitian sebelumnya.
- (2) Hasil analisis unsur menunjukkan bahwa *Isochrysis galbana* memiliki kandungan mineral yang tinggi, yaitu 28%Mg, 6%Ca, 2%Si, 2%Cl dan 1%Na.
- (3) Hasil uji pembakaran dan pirolisis menunjukkan bahwa *Isochrysis galbana* menyisakan residu yang cukup tinggi, yaitu sekitar 45%. Dari dua penelitian *Nannochloropsis oculata* dan *Isochrysis galbana* terdapat kendala utama yaitu terkait dengan tingginya kadar abu sebagai konsekuensi dari tingginya kadar mineral di dalam biomassa mikroalga.

Hadirin yang saya hormati,

Penelitian ketiga terkait potensi mikroalga *Spirulina platensis* yang dikonversi termal dengan sampah padat anorganik mampubakar telah saya lakukan selama 3 tahun, yaitu dari 2018-2020, dengan mendapatkan dukungan pendanaan dari DRPM DIKTI. Penelitian ketiga ini juga dilakukan bekerjasama dengan Balai Besar Pengembangan Budi Daya Air Payau (BBPBAP) Jepara. Gambar 6 menunjukkan kegiatan budidaya *Spirulina platensis* yang dilakukan di Jepara dan hasilnya setelah dikeringkan.

Penelitian ini telah menghasilkan luaran berupa 10 publikasi internasional bereputasi, yaitu 6 prosiding dan 4 jurnal ilmiah. Publikasi berupa jurnal ilmiah adalah sebagai berikut:

- (1) Artikel dengan judul "*Thermogravimetric Analysis on Combustion Behavior of Marine Microalgae Spirulina Platensis Induced by MgCO₃ and Al₂O₃ Additives*" telah terbit di International Journal of Technology (IJTech) (Scopus, Q1) pada tahun 2019 (Sukarni et al., 2019).
- (2) Artikel berjudul "*The Catalytic Impact of MnO Additive on the Selected Municipal Solid Waste Combustion Behavior Determined by Thermogravimetric Analysis*" terbit di Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences (Scopus, Q3) tahun 2020 (Sukarni et al., 2020).
- (3) Artikel berjudul "*Combustion Behaviors and Isoconversional Kinetics Analysis of Mixed of Natural and Synthetic Combustible of Municipal Solid Waste*" sedang proses review di Engineering Journal (Scopus, Q3).
- (4) Artikel berjudul "*Thermogravimetric analysis of the combustion of marine microalgae Spirulina platensis and its blend with synthetic waste*" terbit di Heliyon (Scopus, Q1) tahun 2020 (Sukarni, 2020).



Gambar 6. Budidaya *Spirulina platensis* dan hasil biomassa setelah dikeringkan

Hadirin yang saya muliakan,

Bagian yang lebih membuat bahagia dari penelitian yang ketiga ini adalah keterlibatan mahasiswa. Selama 3 tahun pelaksanaan penelitian, sejumlah 18 mahasiswa terlibat di dalam penelitian ini, 17 diantaranya telah lulus dan 1 mahasiswa telah selesai menyusun skripsi.

Cakupan kegiatan penelitian yang ketiga ini cukup luas, dari budidaya *Spirulina platensis*, pemilihan sampah, karakterisasi dasar, uji pembakaran dengan termogravimetrik, menganalisis kinetika pembakaran sampai melakukan percobaan pembakaran pada prototipe reaktor. Gambar 7 menunjukkan prototipe dari *circulating fluidized bed combustor* (CFBC) yang digunakan untuk uji pembakaran *Spirulina platensis*.



Gambar 7. Prototipe circulating fluidized bed combustor (CFBC)

Capaian penting dari penelitian *Spirulina platensis* diantaranya:

- (1) Hasil uji nilai kalor menunjukkan bahwa *Spirulina platensis* memiliki nilai kalor sebesar 20,97 MJ/kg, tertinggi diantara 3 spesies mikroalga yang diuji. Nilai kalor ini setara dengan batubara subbituminous SB-C (Annamalai & Puri, 2007).
- (2) Sampah sintetik memiliki nilai kalor sebesar 31,92 MJ/kg, dimana nilai ini setara dengan batubara bituminous C (Annamalai & Puri, 2007). Sedangkan residu sampah sintetik yaitu sekitar 8%.
- (3) Hasil analisis proksimat dan hasil analisis termogravimetrik menunjukkan bahwa *Spirulina platensis* memiliki kandungan residu yang rendah, yaitu sekitar 10%, paling rendah diantara 3 spesies mikroalga yang diuji.
- (4) Energi aktivasi pembakaran *Spirulina platensis* cukup rendah, yaitu sekitar 67 kJ/mol, lebih rendah dari energi aktivasi pembakaran *Nannochloropsis oculata*, yaitu sekitar 250 KJ/mol.
- (5) Hasil uji pembakaran pada prototipe *circulating fluidized bed combustor* (CFBC) menunjukkan capaian temperatur tertinggi di ruang bakar sebesar 813°C dimana temperatur ini berada pada rentang temperatur yang direkomendasikan di dalam sistem pembangkit listrik, yaitu antara 750-900°C (Loo & Koppejan, 2012). Dengan demikian, mikroalga, *Spirulina platensis* berpotensi digunakan sebagai bahan bakar pada *power plant* untuk menghasilkan energi listrik.

Hadirin yang saya hormati,

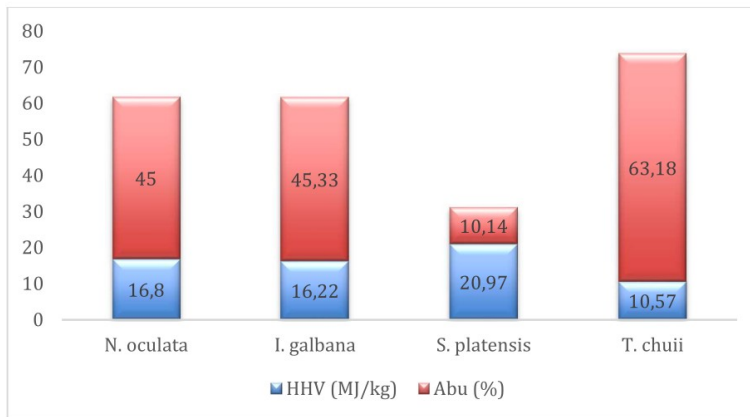
Penelitian keempat terkait potensi mikroalga *Tetraselmis chuii* telah saya lakukan bersama tim 2 mahasiswa program magister (S2) Teknik Mesin tahun 2019 dengan dukungan dana dari Hibah Tesis Magister DRPM DIKTI. Penelitian ini telah menghasilkan luaran 7 publikasi ilmiah internasional bereputasi, 1 diantaranya berupa jurnal internasional Scopus Q3 (Prasetyo et al., 2020).

Beberapa hal penting yang menjadi catatan terkait mikroalga *Tetraselmis chuii*:

- (1) *Tetraselmis chuii* mengandung kadar abu yang tinggi, mencapai 63,18%.
- (2) Nilai kalor *Tetraselmis chuii* cukup rendah, yaitu 10,57 MJ/kg.
- (3) *Tetraselmis chuii* memiliki kandungan unsur mineral yang tinggi, terutama 18%Cl, 10%Na, 3%Mg, 2%K dan 1%Ca.

- (4) Analisis kinetika dari data uji termogravimetrik mendapatkan nilai energi aktivasi pembakaran *Tetraselmis chuii* cukup tinggi yaitu sekitar 202 kJ/mol.
- (5) Penambahan katalis 5%TiO₂ menurunkan energi aktivasi pembakaran *Tetraselmis chuii* sebesar 43%, yaitu dari 202 kJ/mol menjadi 115 kJ/mol.

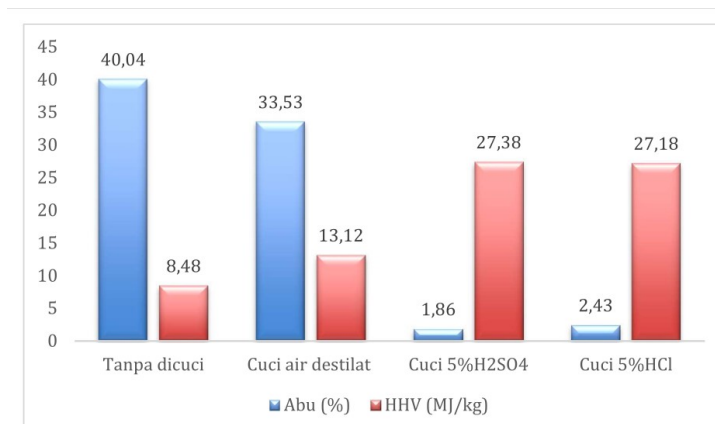
Gambar 8 menunjukkan hubungan antara nilai kalor (*higher heating value*, HHV) dengan kandungan residu (abu) pada beberapa sampel yang pernah diteliti. Dari gambar ini terlihat bahwa semakin sedikit residu (abu) suatu sampel, maka semakin besar kandungan nilai kalornya, dan sebaliknya semakin besar residu (abu) yang ada di dalam sampel, maka semakin rendah nilai kalornya. Berdasarkan gambar ini diketahui bahwa *Spirulina platensis* memiliki nilai kalor tertinggi dan memiliki kadar residu (abu) paling rendah dibandingkan dengan *Nannochloropsis oculata*, *Isochrysis galbana* dan *Tetraselmis chuii*. 80 70 60 50 40 30 20 10 0 6 1 3,18 0,57 4 5 45,33 16,22 1 0,14 20,97 1 6,8 N. oculata I. galbana S. platensis Abu (%) T. chuii HHV (MJ/kg)



Gambar 8. Hubungan nilai kalor (HHV) dengan kandungan residu (abu)

Hadirin yang saya muliakan,

Menyadari salah satu problem utama yang menjadi kendala dalam pemanfaatn mikroalga menjadi bahan bakar adalah tingginya kandungan mineral yang menyebabkan residu abu sisa pembakaran yang tinggi dan juga menyebabkan nilai kalor yang rendah, maka dengan dukungan dana Hibah Penelitian Percepatan Profesor (PNBP UM tahun 2020) saya telah melakukan penelitian untuk mengurangi kandungan mineral dalam mikroalga. Gambar 9 menunjukkan pengaruh pencucian terhadap kandungan residu (abu) dan nilai kalor (HHV) mikroalga.



Gambar 9. Kandungan abu dan HHV *Nannochloropsis oculata* sebelum dan setelah pencucian.

Nilai HHV mikroalga *Nannochloropsis oculata* tanpa pencucian sebesar 8,48 MJ/kg, nilai ini menjadi lebih tinggi setelah dilakukan proses demineralisasi menggunakan air destilat menjadi 13,12 MJ/kg atau mengalami kenaikan hampir 63%. Nilai HHV terjadi peningkatan yang lebih besar hingga 3x lipat setelah pencucian dengan larutan 5% H₂SO₄ dan 5% HCl, 2 4 dimana masing-masing sebesar 27,38 dan 27,18 MJ/kg atau mengalami kenaikan sekitar 237%. Kandungan abu juga turun sangat signifikan pada sampel yang dicuci dengan larutan 5% H₂SO₄ dan 5% HCl.

Hadirin yang saya muliakan,

Selain keempat penelitian yang sudah saya sebutkan sebelumnya, penelitian untuk menggali potensi mikroalga sebagai alternatif bahan bakar ini masih terus saya lakukan, baik secara mandiri maupun dengan dukungan dana institusi Universitas Negeri Malang dan DIKTI.

Penelitian mandiri telah saya lakukan pada tahun 2020 untuk mengetahui pengaruh pencucian dengan larutan 5% HCl terhadap karakteristik pembakaran mikroalga *Spirulina platensis* pada *circulating fluidized bed combustor* (CFBC). Hasilnya menunjukkan bahwa temperatur ruang bakar tertinggi sebesar 1023,75 °C bisa dicapai dengan *Spirulina platensis* yang telah mengalami pencucian, naik signifikan dibanding tanpa pencucian (839,25 °C).

Penelitian lain sedang berjalan atas dukungan dana DRPM DIKTI tahun 2021 sampai tahun 2023 untuk melihat pengaruh karbon aktif pada proses pirolisis dan pembakaran *Arthrospira platensis*. Penelitian ini direncanakan berlangsung selama 3 tahun.

Penelitian berikutnya adalah skema Penelitian Kerjasama Internasional yang melibatkan mitra dari Universitas Negeri Semarang dan Universiti Teknologi Malaysia (UTM) juga sedang berjalan tahun 2021. Penelitian ini berfokus kepada upaya optimasi konversi mikroalga dengan teknik pirolisis dengan melihat pengaruh katalis terhadap karakteristik pirolisis masing-masing komponen yang ada di dalam mikroalga, yaitu komponen protein, karbohidrat dan lipid, untuk selanjutnya dianalisis distribusi produk yang dihasilkan dari proses pirolisis ini. Ketersediaan peralatan penelitian yang ada pada masing-masing perguruan tinggi yang terlibat, diharapkan menjadikan penelitian akan bisa menghasilkan data yang lebih komprehensif guna mengeksplorasi potensi mikroalga untuk diubah menjadi bahan bakar dalam bentuk yang lain, yaitu menjadi bahan bakar cair dan gas.

IX. Penutup

Hadirin yang saya hormati,

Optimisme untuk mencari sumber energi alternatif didasarkan pada data yang mengungkap 2 hal penting, yaitu (a) keterbatasan cadangan bahan bakar fosil, dan (b) pemanasan global yang menyebabkan kerusakan lingkungan yang mengancam masa depan kehidupan secara keseluruhan. Oleh karena itu, berbagai upaya yang secara ilmiah bisa dipertanggungjawabkan, harus terus dilakukan sebagai wujud kepedulian dan *awareness* untuk mencari solusi atas 2 persoalan tersebut. Penelitian saya ini hanyalah bagian sangat kecil dari upaya penelitian secara global dan nasional untuk mencari sumber energi alternatif yang *renewable* dan *net-zero emission*. Di tengah upaya pengembangan sumber energi alternatif yang lain seperti surya, bayu dan hidro, sumber energi alternatif untuk bahan bakar tetaplah sangat penting karena 2 alasan:

- (1) Sampai dengan tahun 2050, peran bahan bakar, baik berupa batubara, minyak, dan gas tetap dominan, yaitu memasok 62% kebutuhan energi nasional, terutama untuk transportasi dan industri (BPPT, 2021)
- (2) Pangsa bio-energi dunia, 97% diantaranya didominasi pembakaran (Demirbas, 2004).

Dengan demikian, sampai tahun 2050 peran mesin pembakaran tetap akan dominan baik untuk transportasi dan industri, dimana semuanya membutuhkan bahan bakar. Hanya saja untuk mendukung target menekan kenaikan temperatur bumi di bawah 2 °C, diperlukan bahan bakar yang *net-zero emission*. Salah satu bahan baku bahan bakar yang *net-zero emission* adalah mikroalga, karena produksi mikroalga 1-ton akan menyerap hampir 2 ton CO₂.

Optimisme dan harapan pengembangan bahan bakar dari mikroalga masih memerlukan banyak pengkajian. Kendala pengembangan bahan bakar dari mikroalga dalam skala besar adalah

penyediaan bahan baku dengan kandungan minyak yang tinggi dan kandungan air yang tinggi pada biomassa sebagai akibat mikroalga tumbuh pada media air (Ganesan et al., 2020). Penelitian yang telah saya lakukan juga menunjukkan adanya kendala terkait kandungan mineral yang tinggi pada biomassa mikroalga. Namun demikian, berbagai studi menunjukkan bahwa *biofuel* alga bekerja sangat baik pada mesin (Ganesan et al., 2020). Demikian juga penerapan mikroalga sebagai bahan bakar pada prototipe *circulating fluidized bed combustor* (CFBC) menunjukkan kinerja yang sesuai dengan yang dipersyaratkan pada sistem pembangkit listrik, yaitu pada rentang temperatur 750-900°C.

Kita juga bisa melihat optimisme pengembangan bahan bakar dari mikroalga itu dari apa yang dilakukan oleh ExxonMobil bekerjasama dengan perusahaan Viridos. Mereka menargetkan untuk memproduksi minyak alga yang rendah emisi sebanyak 10.000 barrel per hari dan akan dikomersialisasi pada tahun 2025 (Viridos, 2021). Oleh karenanya, berbagai kendala untuk mengembangkan bahan bakar alternatif yang *netzero emission* demi kebaikan masa depan umat manusia dan planet bumi, tidak boleh mengendorkan semangat dan upaya kita, tetapi sebaliknya harus menjadikan kita semakin termotivasi. Kiranya sangatlah tepat, jika di akhir pidato ini kita merenungkan makna ungkapan bijak berikut sebagai *selft-reminder*:

“Bumi kita hari ini adalah masa depan mereka”

“Jika terjadi hari kiamat sementara di tangan salah seorang dari kalian ada sebuah tunas, maka jika ia mampu sebelum terjadi hari kiamat untuk menanamnya, maka tanamlah”

Daftar Rujukan

- Adamu, K. M., Audu, B. S., & Audu, E. L. (2008). Toxicity and Histopathological Effects of Portland Cement Powder in Solution on the Structure of the Gill and Liver Tissues of the Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus*: A Microscopic Study. *Tropical Freshwater Biology*, 17(1), 25–36. <https://doi.org/10.4314/tfb.v17i1.20915>
- Annamalai, K., & Puri, I. K. (2007). *Combustion Science and Engineering*. Taylor & Francis Group, LLC.
- BP. (2020a). Energy Outlook 2020 edition explores the forces shaping the global energy transition out to 2050 and the surrounding that. *BP Energy Outlook 2030, Statistical Review*. London: *British Petroleum*, 81.
- BP. (2020b). *Oil | Energy economics | Home*. Bp Plc. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/oil.html#oil-production>
- BP. (2021a). *Natural gas | Energy economics | Home*. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/natural-gas.html>
- BP. (2021b). Statistical Review of World Energy globally consistent data on world energy markets . and authoritative publications in the field of energy. *BP Energy Outlook 2021*, 70, 8–20. *BP Energy Outlook*. (2018).
- BPPT. (2021). *OUTLOOK ENERGI INDONESIA 2021 Perspektif Teknologi Energi Indonesia: Tenaga Surya untuk Penyediaan Energi Charging Station*.
- Buis, A. (2019). *A Degree of Concern: Why Global Temperatures Matter – Climate Change: Vital Signs of the Planet*. <https://climate.nasa.gov/news/2865/a-degree-of-concern-why-global-temperatures-matter/>
- Chen, Y., Wu, Y., Hua, D., Li, C., Harold, M. P., Wang, J., & Yang, M. (2015). Thermochemical conversion of low-lipid microalgae for the production of liquid fuels: Challenges and opportunities. *RSC Advances*, 5(24), 18673–18701. <https://doi.org/10.1039/c4ra13359e>
- Converti, A., Casazza, A. a., Ortiz, E. Y., Perego, P., & Del Borghi, M. (2009). Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* for biodiesel production. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48(6), 1146–1151. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2009.03.006>
- De Bhowmick, G., Sarmah, A. K., & Sen, R. (2019). Zero-waste algal biorefinery for bioenergy and biochar: A green leap towards achieving energy and environmental sustainability. *Science of the Total Environment*, 650, 2467–2482. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.002>
- de Morais, M. G., & Costa, J. A. V. (2007). Biofixation of carbon dioxide by *Spirulina* sp. and *Scenedesmus obliquus* cultivated in a three- stage serial tubular photobioreactor. *Journal of Biotechnology*, 129(3), 439–445. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2007.01.009>
- Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(2), 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2003.10.004>
- Demirbas, A. (2010). Use of algae as biofuel sources. *Energy Conversion and Management*, 51(12), 2738–2749. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.010>
- Demirbas, A., & Fatih Demirbas, M. (2011). Importance of algae oil as a source of biodiesel. *Energy Conversion and Management*, 52(1), 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.055>
- ESDM. (2021a). *Kementerian ESDM RI - Media Center - Arsip Berita - Cadangan Batubara Masih 38,84 Miliar Ton, Teknologi Bersih Pengelolaannya Terus Didorong*. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/cadangan-batubara-masih-3884-miliar-ton-teknologi-bersih-pengelolaannya-terus-didorong>
- ESDM. (2021b). *Kementerian ESDM RI - Media Center - Arsip Berita - Menteri ESDM: Cadangan Minyak Indonesia Tersedia untuk 9,5 Tahun dan Cadangan Gas 19,9 Tahun*. Statistic. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/menteri-esdm-cadangan-minyak-indonesia-tersedia-untuk-95-tahun-dan-cadangan-gas-199-tahun>
- ExxonMobil. (2018). *2018 Outlook for Energy: A View to 2040*.

- ExxonMobil. (2021). *Updated 2021 Energy & Carbon Summary*.
- Ganesan, R., Manigandan, S., Samuel, M. S., Shanmuganathan, R., Brindhadevi, K., Lan Chi, N. T., Duc, P. A., & Pugazhendhi, A. (2020). A review on prospective production of biofuel from microalgae. *Biotechnology Reports*, 27, e00509. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00509>
- García-González, M., Moreno, J., Manzano, J. C., Florencio, F. J., & Guerrero, M. G. (2005). Production of *Dunaliella salina* biomass rich in 9-cis-beta-carotene and lutein in a closed tubular photobioreactor. *Journal of Biotechnology*, 115(1), 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2004.07.010>
- Green, M. L., Gusev, E. P., Degraeve, R., & Garfunkel, E. L. (2001). Ultrathin (<4 nm) SiO₂ and Si-O-N gate dielectric layers for silicon microelectronics: Understanding the processing, structure, and physical and electrical limits. *Journal of Applied Physics*, 90(5), 2057–2121. <https://doi.org/10.1063/1.1385803>
- Guo, M., Song, W., & Buhain, J. (2015). Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 712–725. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.013>
- Hu, Q., Sommerfeld, M., Jarvis, E., Ghirardi, M., Posewitz, M., Seibert, M., & Darzins, A. (2008). Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances. *The Plant Journal*, 54(4), 621–639.
- IEA. (2020). *World Energy Outlook 2020*. 2050(October), 1–461. IEA. (2021). *World Energy Outlook 2021 - revised version October 2021*.
- IESR. (2021). *Paris Agreement dan Implikasinya terhadap [I]NDC Indonesia - IESR*. <https://iesr.or.id/en/paris-agreement-dan-implikasinya-terhadap-indc-indonesia>
- Khan, M. I., Shin, J. H., & Kim, J. D. (2018). The promising future of microalgae: Current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. *Microbial Cell Factories*, 17(1), 1–21. <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0879-x>
- Kumar, M., Sun, Y., Rathour, R., Pandey, A., Thakur, I. S., & Tsang, D. C. W. (2020). Algae as potential feedstock for the production of biofuels and value-added products: Opportunities and challenges. *Science of the Total Environment*, 716, 137116. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137116>
- Li, Y., Horsman, M., Wu, N., Lan, C. Q., & Dubois-Calero, N. (2008). Biofuels from microalgae. *Biotechnology Progress*, 24(4), 815–820.
- Loo, S. Van, & Koppejan, J. (2012). The handbook of biomass combustion and co-firing. In *Earthscan* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 217–232. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresourc Technology*, 83(1), 47–54. [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(01\)00119-5](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(01)00119-5)
- Méducin, F., Bresson, B., Lequeux, N., Noirfontaine, M. De, & Zanni, H. (2007). Calcium silicate hydrates investigated by solid-state high resolution ¹H and ²⁹Si nuclear magnetic resonance. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 631–638. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.011>
- Mishra, S., Roy, M., & Mohanty, K. (2019). Microalgal bioenergy production under zero-waste biorefinery approach: Recent advances and future perspectives. *Bioresourc Technology*, 292(August), 122008. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122008>
- NOAA. (2015). *Global Climate Report - November 2015 | Top 25 Monthly Temperature Departures from Average | National Centers for Environmental Information (NCEI)*. <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201511/supplemental/page-1>
- NOAA. (2021a). *Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide | NOAA Climate.gov*. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>

- NOAA. (2021b). *Global Climate Report - October 2021 | 2021 Year-to-Date Temperatures Versus Previous Years | National Centers for Environmental Information (NCEI)*. <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202110/supplemental/page-1>
- Ong, H. C., Chen, W. H., Singh, Y., Gan, Y. Y., Chen, C. Y., & Show, P. L. (2020). A state-of-the-art review on thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A TG-FTIR approach. *Energy Conversion and Management*, 209 (December 2019), 112634. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112634>
- Our World in Data. (2021). *Years of fossil fuel reserves left*. <https://ourworldindata.org/grapher/years-of-fossil-fuel-reserves-left>
- Prasetyo, A., Sukarni, S., Wulandari, R., & Puspitasari, P. (2020). A Kinetic Study on Tetraselmis chuii Combustion: The Catalytic Impact of Nanoparticle Titanium Dioxide (TiO₂) Additive. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 71(1), 39–49. <https://doi.org/10.37934/arfm.71.1.3949>
- Reddy, A. A., Tulyaganov, D. U., Kapoor, S., Goel, A., Pascual, M. J., Kharton, V. V., & Ferreira, J. M. F. (2012). Study of melilite based glasses and glass-ceramics nucleated by Bi₂O₃ for functional applications. *RSC Advances*, 2(29), 10955. <https://doi.org/10.1039/c2ra22001f>
- Sawayama, S., Minowa, T., & Yokoyama, S. Y. (1999). Possibility of renewable energy production and CO₂ mitigation by thermochemical liquefaction of microalgae. *Biomass and Bioenergy*, 17(1), 33–39. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(99\)00019-7](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00019-7)
- Schenk, P. M., Thomas-Hall, S. R., Stephens, E., Marx, U. C., Mussgnug, J. H., Posten, C., Kruse, O., & Hankamer, B. (2008). Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production. *BioEnergy Research*, 1(1), 20–43. <https://doi.org/10.1007/s12155-008-9008-8>
- Seeger, M., Retired, W. O., Flick, W., Bickelhaupt, F., & Akkerman, O. S. (2000). *Magnesium Compounds in "Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry."* Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Seepana, M. M., Jerold, M., & Rajmohan, K. S. (2019). Production of biofuels from algal biomass. In *Biochemical and Environmental Bioprocessing: Challenges and Developments* (pp. 123–137). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429198045-7/PRODUCTION-BIOFUELS-ALGAL-BIOMASS-MURALI-MOHAN-SEEPANA-JEROLD-RAJMOHAN>
- Singh, A., Nigam, P. S., & Murphy, J. D. (2011). Mechanism and challenges in commercialisation of algal biofuels. *Bioresour Technol*, 102(1), 26–34.
- Songstad, D. D., Lakshmanan, P., Chen, J., Gibbons, W., Hughes, S., & Nelson, R. (2009). Historical perspective of biofuels: Learning from the past to rediscover the future. *In Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant*, 45(3), 189–192. <https://doi.org/10.1007/s11627-009-9218-6>
- Sukarni, S. (2020). Thermogravimetric analysis of the combustion of marine microalgae Spirulina platensis and its blend with synthetic waste. *Heliyon*, 6(9), e04902. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04902>
- Sukarni, S., Sumarli, S., Firdaus, T. A., Prasetyo, A., & Puspitasari, P. (2020). The Catalytic Impact of MnO Additive on the Selected Municipal Solid Waste Combustion Behavior Determined by Thermogravimetric Analysis. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 71(1), 50–59. <https://doi.org/10.37934/arfm.71.1.5059>
- Sukarni, S., Sumarli, S., Nauri, I. M., Prasetyo, A., & Puspitasari, P. (2019). Thermogravimetric analysis on combustion behavior of marine microalgae Spirulina platensis induced by MgCO₃ and Al₂O₃ additives. *International Journal of Technology*, 10(6), 1174–1183. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v10i6.3611>
- Sukarni, S., Sumarli, S., Nauri, I. M., Purnami, P., Al Mufid, A., & Yanuhar, U. (2018). Exploring the prospect of marine microalgae Isochrysis galbana as sustainable solid biofuel feedstock. *Journal of Applied Research and Technology*, 16(1), 53–66. <https://doi.org/10.22201/icat.16656423.2018.16.1.703>
- Sukarni, S., Yanuhar, U., Wardana, I. N. G., Sudjito, S., Hamidi, N., Wijayanti, W., Wibisono, Y., Sumarli, S., Nauri, I. M., & Suryanto, H. (2018). Combustion of Microalgae Nannochloropsis

- oculata Biomass: Cellular Macromolecular and Mineralogical Content Changes During Thermal Decomposition. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 40(6), 1456–1463. <https://doi.org/10.14456/sjst-psu.2018.178>
- Sukarni, Sudjito, Hamidi, N., Yanuhar, U., & Wardana, I. N. G. (2014). Potential and properties of marine microalgae *Nannochloropsis oculata* as biomass fuel feedstock. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 5(4), 279–290. <https://doi.org/10.1007/s40095-014-0138-9>
- Sukarni, Sudjito, Hamidi, N., Yanuhar, U., & Wardana, I. N. G. (2015). Thermogravimetric kinetic analysis of *Nannochloropsis oculata* combustion in air atmosphere. *Frontiers in Energy*, 9(2), 125–133. <https://doi.org/10.1007/s11708-015-0346-x>
- UNFCCC. (2021). *The Paris Agreement* | UNFCCC. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- Viridos. (2021). *Algal Genomics and Biotechnology* | Viridos. <https://www.viridos.com/about-us/>
- Zuorro, A., García-Martínez, J. B., & Barajas-Solano, A. F. (2021). The application of catalytic processes on the production of algae-based biofuels: A review. *Catalysts*, 11(1), 1–25. <https://doi.org/10.3390/catal11010022>.



Excellence in Learning Innovation

ISBN 9786024707477 (PDF)



9 786024 707477

Anggota IKAPI No. 059/JTI/89