INSIGHT

| Volume 1 | Tahun 2016 | ISSN 2338-1043 |

Abduktif-Deduktif: Strategi Baru Pengembangan Bahan Ajar Matematika untuk Meningkatkan Kemampuan Penalaran dan Pemecahan Masalah **(Ali Shodikin)**

Pencitraan Jarum Anestesi dengan Gelombang Ultrasonik **(Hesty Susanti)**

Aplikasi Molekuler dalam Mendukung Pemuliaan Bibit Unggul Berbasis Sumber Daya Itik Lokal **(Irma)**

Pemodelan dan Simulasi Jendela Virtual dalam Bangunan **(Rizki A. Mangkuto)**

Mengenal Lebih Dekat Katalisis Otomotif Sebagai Pembersih Gas Buang Kendaraan Diesel **(Muhammad Mufti Azis)**

Ulasan Optimisasi Lini Produksi: Alokasi *Buffer* dan Mesin Fleksibel **(Vina Sari Yosephine)**

Nanoplasmonics: Pemberi Cahaya pada Sains dan Teknologi **(Ferry Anggoro Ardy Nugroho)**

Desain Produk Suplemen Labu dan Minyak Sawit Merah untuk Pencegahan Kekurangan Vitamin A **(Anton Rahmadi, Ilyas, Sukmiyati Agustin, Miftakhur Rohmah, Bernatal Saragih)**

Synthetic Scaffold System sebagai Solusi untuk Meningkatkan Efisiensi Proses Produksi Senyawa Kimia Bernilai Tinggi Menggunakan Mikroorganisme **(Almando Geraldi)**

Desain Sistem Pembelajaran *Blended Learning*: Upaya Peningkatan Kualitas Pendidikan di Indonesia **(Ulfia Rahmi)**

Indonesian Scholars Journal

ISSN Print : 2338-1043
ISSN Online : 2338-8099

Indonesian Scholars Journal

INSIGHT

Editor:
Dr Bagus Nugroho
Department of Mechanical Engineering
The University of Melbourne, VIC, 3010, Australia
bagus.nugroho@unimelb.edu.au

Dr Hutomo Suryo Wasisto
School of Electrical and Computer Engineering,
Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, United States
hutomo.wasisto@ece.gatech.edu

IS Journal Details:
Email : info@isjournal.org
Website: www.isjournal.org
Alamat : Jl KH Marzuki Yahya, no 59, rt01/21 Kel Baktijaya, Kel Sukmajaya, Depok, Jawa Barat, 16418.

PENGURUS

Executive board
Hadi Teguh Yudhistira
Bagus Nugroho
Hutomo Suryo Wasisto

Sekretaris
Dany Perwita Sari

Bendahara
Nindita Hapsari

Publikasi
Fadhilah Muslim
Windy Iriana
Roy B. V. B. Simorangkir
Gabriella Alodia
Dira Larasati
Dedy Mahardika
Kirana Yuniati Putri
Erza Aminanto

Sponsorship dan Kerja sama
Riezqa Andika
Rusdy Zulfan

Kepengurusan
Kurnia Yohana Yulianti
Nadira Erawan

Website dan IT
Belfrit Victor Batlajery
Alfan Presekal

PR dan Media
Elok Pratiwi
Eryan Ramadhani
Tangguh Chairil
Jessica Natalia Widjaja

PENGANTAR

Puji syukur yang dalam kita sampaikan ke pada Tuhan, karena berkat rahmat dan kemurahan-Nya jurnal akademik edisi khusus dari *Indonesian Scholar Journal* (ISJ) yang berjudul ***"Insight"*** dapat terbit.

ISJ adalah jurnal akademik yang lahir dari hasil kolaborasi Perhimpunan Pelajar Indonesia Dunia. Ide dari pembuatan jurnal ini lahir dari konferensi pelajar Indonesia Internasional yang diadakan di Malaysia pada tahun 2012. ISJ bertujuan untuk memperkuat kemampuan akademik para mahasiswa, peneliti, serta akademisi Indonesia, serta mendorong semangat menulis, menerbitkan, serta berbagi ilmu pengetahuan. Sejauh ini ISJ telah menerbitkan dua jurnal akademik berbahasa Inggris yang terdiri dari berbagai macam bidang.

Tahun ini ISJ menerbitkan jurnal edisi khusus berbahasa Indonesia yang berjudul "Insight". Jurnal ini merupakan kumpulan hasil karya akademisi Indonesia baik yang berada di dalam maupun luar negeri. Tidak seperti jurnal pada umumnya, sasaran pembaca edisi "Insight" ini bukanlah spesialis di bidangnya, namun pelajar baik tingkat akhir SLTA maupun mahasiswa universitas tingkat awal. "Insight" bertujuan untuk mengenalkan berbagai jenis penelitian akademisi-akademisi Indonesia dari berbagai negara kepada para pelajar-pelajar muda dengan harapan untuk menumbuhkan rasa keingintahuan serta minat untuk melanjutkan pendidikan ke jenjang yang lebih tinggi. Edisi khusus ini menampilkan 10 penelitian yang terdiri dari bidang teknik, fisika, biologi, pendidikan, serta kesehatan.

Dalam penyusunan jurnal ini, kami dari editorial mendapatkan banyak tantangan, namun dengan bantuan berbagai pihak dapat kami atasi. Terima kasih yang sebesar-besarnya kami ucapkan kepada seluruh kontributor dan penulis yang telah menyumbangkan waktu dan ilmu dalam pembuatan edisi khusus "Insight" ini.

Akhir kata semoga jurnal ini dapat memberikan manfaat kepada para pembaca.

DAFTAR ISI

ABDUKTIF-DEDUKTIF: STRATEGI BARU PENGEMBANGAN BAHAN AJAR MATEMATIKA UNTUK MENINGKATKAN KEMAMPUAN PENALARAN DAN PEMECAHAN MASALAH 1
Ali Shodikin

PENCITRAAN JARUM ANESTESI DENGAN GELOMBANG ULTRASONIK 13
Hesty Susanti

APLIKASI MOLEKULER DALAM MENDUKUNG PEMULIAAN BIBIT UNGGUL BERBASIS SUMBER DAYA ITIK LOKAL 28
Irma

PEMODELAN DAN SIMULASI JENDELA VIRTUAL DALAM BANGUNAN..... 43
Rizki A. Mangkuto

MENGENAL LEBIH DEKAT KATALISIS OTOMOTIF SEBAGAI PEMBERSIH GAS BUANG KENDARAAN DIESEL..... 54
Muhammad Mufti Azis

ULASAN OPTIMISASI LINI PRODUKSI: ALOKASI *BUFFER* DAN MESIN FLEKSIBEL 68
Vina Sari Yosephine

NANOPLASMONICS: PEMBERI CAHAYA PADA SAINS DAN TEKNOLOGI 80
Ferry Anggoro Ardy Nugroho

DESAIN PRODUK SUPLEMEN LABU DAN MINYAK SAWIT MERAH UNTUK PENCEGAHAN KEKURANGAN VITAMIN A..... 91
Anton Rahmadi, Ilyas, Sukmiyati Agustin, Miftakhur Rohmah, Bernatal Saragih

***SYNTHETIC SCAFFOLD SYSTEM* SEBAGAI SOLUSI UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI PROSES PRODUKSI SENYAWA KIMIA BERNILAI TINGGI MENGGUNAKAN MIKROORGANISME 107**
Almando Geraldi

DESAIN SISTEM PEMBELAJARAN *BLENDED LEARNING*: UPAYA PENINGKATAN KUALITAS PENDIDIKAN DI INDONESIA 122
Ulfia Rahmi

ABDUKTIF-DEDUKTIF: STRATEGI BARU PENGEMBANGAN BAHAN AJAR MATEMATIKA UNTUK MENINGKATKAN KEMAMPUAN PENALARAN DAN PEMECAHAN MASALAH

Ali Shodikin*

Jurusan Pendidikan Matematika, Universitas Islam Darul Ulum, Lamongan, Indonesia

ABSTRAK

Bahan ajar memiliki andil besar dalam meningkatkan kemampuan siswa, termasuk kemampuan matematis. Namun kenyataannya, penelitian yang dilakukan baik oleh peneliti dari dalam maupun luar negeri menunjukkan kemampuan matematis masih rendah, khususnya kemampuan penalaran dan pemecahan masalah. Tentunya ini sebuah ironi. Telah dikembangkan sebelumnya suatu pembelajaran dengan strategi abduktif-deduktif dan terbukti mampu meningkatkan kemampuan penalaran dan pemecahan masalah siswa. Kerangka umum strategi abduktif-deduktif, bersifat terbuka dan sangat memungkinkan untuk digunakan dalam pengembangan bahan ajar matematika. Maka dari itu, tujuan artikel ini adalah membahas pengembangan kerangka umum strategi abduktif-deduktif dalam pengembangan bahan ajar untuk meningkatkan kemampuan penalaran dan pemecahan masalah matematika.

Kata kunci: *pengembangan, bahan ajar, abduktif-deduktif, penalaran, pemecahan masalah*

1. PENDAHULUAN

Bahan ajar memiliki peran penting dalam meningkatkan kemampuan yang dimiliki siswa. Tidak hanya kemampuan yang bersifat umum, dalam bentuk hasil belajar siswa (Iji, *et al* [1]) dan kognitif siswa (Nwike dan Catherine [2]). Namun juga kemampuan berdasarkan tingkatan berpikir siswa, yakni kemampuan berpikir siswa tingkat rendah: membaca dan memahami (Eskey dan Grabe [3]); kemampuan berpikir siswa tingkat sedang: representasi (Mahardika [4]) dan kemampuan komunikasi (Ramdani [5]; Herman [6]; Sutardi [7]); hingga kemampuan berpikir tingkat tinggi (Arisanto, *et al* [8]): kemampuan penalaran (Ramdani [5]; Herman [6]), kemampuan koneksi (Ramdani [5]), pemecahan masalah (Herman [6]), berpikir ilmiah (Sutardi [7]), berpikir kritis (Zakiyah [9]; Pangesti [10]) dan juga berpikir kreatif (Pangesti [10]). Hayati [11] mengemukakan bahwa peran bahan ajar dalam proses pendidikan menempati posisi yang sangat strategis dan turut menentukan tercapainya tujuan pendidikan. Karena peran penting tersebut, telah banyak penelitian yang dilakukan yang bertujuan mengembangkan bahan ajar yang kegunaannya disesuaikan dengan perkembangan kebutuhan masyarakat saat ini, kebutuhan masyarakat di masa depan dan penguasaan materi oleh siswa serta analisis kebutuhan siswa. Telah dikenal beberapa pendekatan pengembangan bahan ajar yang dilakukan diantaranya melalui penelitian desain (Mulyana [12]), matakognitif (Istianah, *et al* [13]), menulis sendiri, pengemasan kembali informasi, dan penataan informasi (Sungkono [14]). Meskipun pendekatan-pendekatan ini mempunyai keunggulan masing-masing, namun tetap saja memiliki beberapa kelemahan, diantaranya keterbatasan objek sasaran yang dilakukan harus memiliki karakteristik yang sama, kemampuan yang

ditingkatkan hanya spesifik, dan perlakuan terhadap objek sasaran harus mendapat perlakuan yang sama secara simultan, serta objek sasaran harus mampu menggunakan bahan ajar, karena jika tidak, justru akan menghambat pembelajaran (Uzuegbu [15]). Kelebihannya adalah kemampuan yang ditingkatkan akan lebih mendalam dan terarah.

Terlepas dari kelebihan dan kelemahan masing-masing pendekatan pengembangan bahan ajar, ketika suatu kesenjangan berpeluang menimbulkan efek yang besar, maka perlu diutamakan pemecahan masalahnya (Dick dan Carey [16]). Kesenjangan terjadi karena adanya perbedaan antara kenyataan dan keinginan. Kebutuhan dan keinginan bukanlah hal yang sama. Suparman [17] mengartikan kebutuhan adalah kesenjangan antara keadaan sekarang dengan yang seharusnya dalam redaksi yang berbeda tetapi sama. Morrison [18] menyatakan bahwa kebutuhan (*need*) diartikan sebagai kesenjangan antara apa yang diharapkan dengan kondisi yang sebenarnya, sedangkan keinginan adalah harapan ke depan atau cita-cita yang terkait dengan pemecahan terhadap suatu masalah. Analisa kebutuhan merupakan alat untuk mengidentifikasi masalah guna menentukan tindakan yang tepat (Morrison, *et al* [18]). Pernyataan ini juga didukung oleh Brown [19] dimana analisis kebutuhan merupakan cara untuk mengumpulkan informasi yang mengidentifikasi faktor-faktor pendukung dan penghambat (kesenjangan) proses pembelajaran yang dimiliki siswa untuk mencapai tujuan pembelajaran yang mengarah pada peningkatan mutu pendidikan. Oleh karena itu, perlu suatu pengembangan yang didasarkan pada temuan tujuan akhir dan temuan di lapangan. Hal ini dilakukan untuk mengurangi kesenjangan kebutuhan yang ada di lapangan sekaligus memperhatikan analisis kebutuhan siswa.

Bahan ajar juga berperan sebagai instrumen input bersama dengan kurikulum, pengajar, media, dan evaluasi. Kualitas proses dan hasil pendidikan dipengaruhi antara lain oleh bahan ajar yang digunakan yang harus memenuhi aspek-aspek keterbacaan, kebenaran isi, dan grafika, serta ilustrasi (Belawati [20]). Sehingga, selain analisis kebutuhan siswa, kemampuan awal siswa, keminatan dan bahkan kondisi sosial, dalam pengembangan bahan ajar harus juga memperhatikan aspek-aspek yang ada secara internal yang berupa keterbacaan, kebenaran isi, grafika, dan ilustrasi. Pendekatan pembelajaran, spesifikasi mata pelajaran dan kemampuan yang akan ditingkatkan juga menjadi acuan yang sangat penting. Dalam penelitian ini, dipilih pengembangan buku ajar matematika dengan berbagai alasan, bukan hanya karena mata pelajaran ini menjadi momok dan ditakuti oleh siswa. Reys dan Chavez [21] mengungkapkan bahwa dalam pembelajaran matematika peran bahan ajar benar-benar memiliki peran yang sangat besar. Bahan ajar sering mengarahkan guru tentang bagaimana seharusnya guru menyampaikan materi, menyarankan bagaimana guru seharusnya mengajar, serta menyediakan aktivitas dan tugas yang menarik bagi siswa. Keterbatasan buku yang ada saat ini lebih menunjukkan bahwa matematika sebagai fakta untuk dihafalkan, bukan dilihat dari kebermaknaannya (Reys dan Chavez [21]). Selain bagi guru, Belawati [20] menambahkan peran bahan ajar bagi siswa di antaranya memfasilitasi siswa untuk bisa belajar mandiri dan menyesuaikan dengan kecepatannya sendiri. Hal ini akan membuat siswa lebih

nyaman dalam proses memperoleh materi. Oleh karena alasan tersebut, perlu dikembangkan bahan ajar matematika yang sesuai harapan.

2. PEMBAHASAN

1. Studi Kasus: Masalah Penalaran dan Pemecahan Masalah

Kemampuan penalaran dan pemecahan masalah siswa merupakan kemampuan matematis yang perlu ditingkatkan dalam mata pelajaran matematika. Hal ini menyusul hasil buruk dari hasil survei lembaga internasional PISA dan TIMMS yang diperoleh Indonesia dalam sepuluh tahun terakhir (TIMMS [22]; Balitbang [23]). Sesuai dengan kompetensi siswa yang diharapkan dalam kurikulum 2013 yakni anak didik menjadi lebih aktif, mampu berpikir lebih kreatif, peka terhadap permasalahan yang ada di lapangan dan mampu memanfaatkan potensi lingkungan untuk memecahkan masalah, maka kemampuan penalaran dan pemecahan masalah sangat mendukung tujuan ini. Namun, kenyataan di lapangan menunjukkan rendahnya kompetensi-kompetensi yang diharapkan tersebut, diantaranya kemampuan penalaran dan pemecahan masalah. Hasil ujicoba soal kemampuan penalaran dan pemecahan masalah matematis oleh Shodikin [24] yang dilakukan di salah satu SMA di Kota Bandung juga menunjukkan bahwa rata-rata skor yang diperoleh siswa baru mencapai 36%. Hal ini menunjukkan bahwa hasil belajar siswa terutama kemampuan penalaran dan pemecahan masalah masih rendah. Hasil dokumentasi nilai siswa kelas XI yang dilakukan di salah satu SMA di Kabupaten Pati juga menunjukkan hasil belajar yang serupa, yakni hanya mencapai 48% (Shodikin [24]). Hasil studi yang dilakukan oleh Rahayu [25] juga menyatakan hasil yang sama dan menambahkan alasan rendahnya hasil belajar disebabkan diantaranya karena kurangnya penalaran.

Kemampuan penalaran merupakan karakteristik utama matematika yang tidak dapat dipisahkan dari kegiatan mempelajari dan menyelesaikan masalah matematika (Ansjar dan Sembiring [26]), dan implementasinya dalam pembelajaran juga direkomendasikan oleh NCTM [27]. Analisis penyelesaian masalah matematika, seperti yang dilaporkan Wahyudin [28] dari hasil penelitiannya menyatakan bahwa kegagalan menguasai matematika dengan baik, disebabkan diantaranya karena siswa kurang menggunakan nalar dalam menyelesaikan masalah. Demikian juga kesimpulan Kennedy (Hudoyo, [29]) dalam hasil penelitiannya tentang penelitian penalaran di Amerika Serikat serta pernyataan Ansjar dan Sembiring [26] yang menyatakan bahwa kemampuan penalaran sangat diperlukan siswa untuk menyelesaikan suatu masalah matematika. Bahkan sering kali kemampuan penalaran ini masih sering diabaikan (Nizar [30]). Oleh karena itu, dalam pembelajaran matematika kemampuan penalaran matematis perlu diperhatikan mengingat untuk dapat menyelesaikan suatu masalah matematika diperlukan kemampuan nalar siswa.

Laporan hasil studi Henningsen dan Stein [31], Mullis, *et al* [32], Suryadi [33], dan Murni [34] diungkapkan bahwa pembelajaran matematika pada umumnya belum terfokus pada pengembangan kemampuan berpikir tingkat tinggi. Siswa lebih dominan menyelesaikan soal dari buku teks dan kurang memperoleh masalah non rutin yang dapat melatih kemampuan berpikir matematika tingkat tinggi. Dengan demikian perlu adanya upaya untuk

mengembangkan pembelajaran matematika yang berorientasi pada pengembangan kemampuan berpikir tingkat tinggi.

Fakta lain yang ada di Indonesia menunjukkan bahwa kemampuan pemecahan masalah matematis siswa di tingkat sekolah menengah masih rendah adalah penelitian Ibrahim [35]. Demikian pula berdasarkan hasil studi pendahuluan yang dilakukan oleh Azhar [36] di beberapa Madrasah Aliyah di DKI Jakarta menyatakan bahwa siswa-siswi MA hanya mampu menyelesaikan masalah yang hanya melibatkan suatu konsep matematika saja (kemampuan pemahaman matematis), namun kesulitan dalam menghadapi permasalahan yang melibatkan beberapa konsep matematika seperti pemecahan masalah. Pada umumnya, taraf minimal dianggap memuaskan atau mencapai kriteria ketuntasan belajar minimal jika lebih dari 60% dari skor ideal (Wahidmurni, *et al* [37]).

Berdasarkan analisis studi kasus dan penelitian sebelumnya, kemampuan penalaran dan pemecahan masalah dipandang perlu untuk ditingkatkan, salah satu cara yang strategis untuk melakukannya selain melalui pembelajaran adalah dengan pengembangan bahan ajar siswa.

2. Solusi Sebelumnya

Penguasaan konten matematika secara benar dapat dilakukan melalui penguasaan materi secara multirepresentasi. Waldrip [38] mengatakan bahwa penyajian multirepresentasi dapat dikelompokkan secara khusus seperti pengetahuan tentang: gambar, model tabel, grafik, dan diagram. Dengan demikian multirepresentasi adalah perpaduan format-format representasi yaitu format verbal, matematis, gambar, dan grafik.

Teoretikus pendidikan seperti Bruner dan Piaget menekankan pentingnya keterlibatan siswa dalam proses belajar. Pandangan pembelajaran konstruktivisme menolak pemikiran bahwa siswa dapat secara efektif memperoleh pengetahuan baru hanya dengan menyerap informasi yang disediakan oleh guru. Seharusnya siswa menjadi pencari aktif dan pemroses informasi, bukan penerima pasif (Schunk [39]; Davis dan Murrell [40]). Hal ini bermakna bahwa siswa perlu diberi kesempatan untuk belajar mandiri dan menghubungkan konsep-konsep yang telah dimiliki sebelumnya, sehingga terjadilah pembelajaran yang bermakna. Oleh karena itu perlu diciptakan suatu kondisi belajar yang memungkinkan anak belajar mandiri (Rifa'i, [41]). Supaya terjadi pembelajaran bermakna, siswa juga harus mampu membangun pengetahuan mereka sendiri dengan mengasimilasi dan mengintegrasi konsep-konsep baru. Pendekatan pengajaran konstruktivisme "menempatkan siswa pada tempat duduk supir" (Perkins [42]) dan menekankan pentingnya keterlibatan siswa yang aktif.

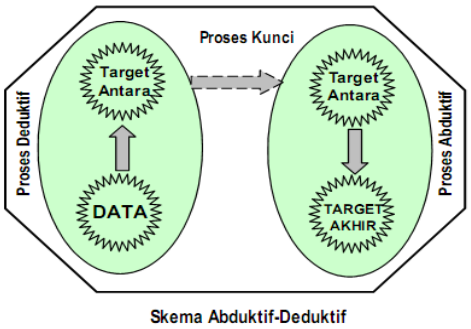
Untuk dapat terlibat di dalam mengikuti pembelajaran dengan baik, kemampuan awal matematika (KAM) siswa merupakan prasyarat yang sangat penting (Arend [43]). Gagasan-gagasan yang muncul seringkali berkembang secara bertahap sehingga diperlukan kemampuan awal yang cukup untuk mampu membangun suatu konsep matematika yang komprehensif dari informasi yang diperoleh sebelumnya. Siswa yang memiliki kemampuan awal yang rendah akan mengalami kesulitan untuk memperoleh pengetahuan baru atau mengasimilasi konsep yang baru datang kepada dirinya dan mengaitkan dengan pengetahuan yang ada di dalam dirinya. Di sisi lain, siswa

yang memiliki kemampuan awal tinggi akan mudah menerima informasi dan mengaitkan dengan informasi yang ada dalam dirinya sehingga terjadi proses belajar. Hal ini dapat diartikan bahwa dalam pembelajaran matematika, guru perlu diperhatikan kemampuan awal matematis siswa dalam meningkatkan kemampuan matematis siswa.

Pengembangan pembelajaran merupakan salah satu alternatif yang digunakan dalam meningkatkan suatu kemampuan siswa, termasuk kemampuan penalaran dan pemecahan masalah (Shodikin [24]). Selain pengembangan pembelajaran, keberhasilan pembelajaran dipengaruhi juga dipengaruhi oleh bahan ajar, guru, proses pembelajaran dan materi-materi yang diajarkan, serta hubungan antar masing-masing aspek (Ball dan Cohen [44]). Hal ini menunjukkan bahwa masing-masing faktor saling terkait dan mendukung satu sama lain. Dalam pembelajaran dengan strategi abduktif-deduktif, telah dikembangkan kerangka umum dan strategi pembelajarannya. Dalam penelitian Shodikin [24] menunjukkan bahwa dalam peningkatan kemampuan penalaran dan pemecahan masalah pembelajaran dengan strategi abduktif-deduktif lebih baik dibandingkan dengan pembelajaran konvensional. Maka dari itu, untuk memaksimalkan pembelajaran yang telah dikembangkan, akan dikembangkan pula bahan ajar dengan pendekatan abduktif-deduktif.

3. Kerangka Umum: Abduktif-Deduktif

Secara umum suatu masalah dalam matematika berupa kemampuan mengidentifikasi fakta-fakta yang diberikan (data) dan merumuskan apa yang ditanyakan dalam masalah itu (target akhir). Dalam menentukan target akhir berdasarkan data yang diberikan, diperlukan kemampuan mengelaborasi dengan menerapkan konsep esensial yang relevan terhadap data yang diberikan untuk memperoleh target antara sebelum menemukan jawaban dari target akhir. Tidak sedikit masalah dalam matematika dapat lebih mudah diselesaikan dengan merumuskan suatu kondisi (target antara) sehingga berdasarkan suatu konsep esensial yang relevan tiba pada target akhir yang ditanyakan (lihat gambar 1).

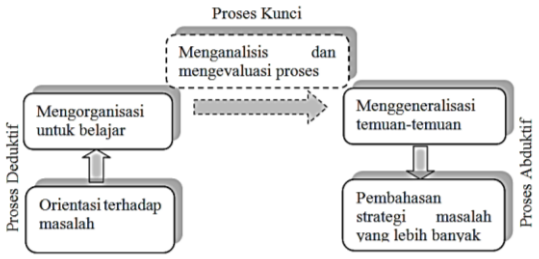


Gambar 1. Model Kerangka Kerja PSAD (Kusnandi, 2008)

Kerangka umum seperti yang diuraikan di atas telah dikembangkan pada penelitian Kusnandi [45] dalam pembelajaran dengan strategi abduktif-deduktif (PSAD). Abduktif sendiri merupakan kemampuan berpikir matematik (penalaran) yang tidak bisa secara utuh menjawab permasalahan tapi proses menawarkan alasan sebagai dasar untuk tindakan tertentu (Aliseda [46]). Kerangka umum ini pada mulanya dikembangkan untuk menumbuhkembangkan kemampuan membuktikan pada mahasiswa pemula yang belajar pembuktian. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa mahasiswa calon guru yang belajar dengan PSAD memiliki kemampuan membuktikan yang lebih baik daripada mahasiswa yang belajar secara

ekspositori. Kemungkinan penerapan PSAD (dengan nama lain CBR) juga telah dikaji oleh Sun, *et al* [47] untuk permasalahan kemampuan penalaran (*reasoning*) dan pemecahan masalah (*problem solving*). Kemungkinan penerapan kerangka kerja PSAD ini pada masalah yang cakupannya lebih luas (literasi matematika) untuk siswa di sekolah menengah juga telah dikaji secara teoretis (Shodikin [48]). Hasil penelitian menunjukkan bahwa adanya interaksi antara pembelajaran dengan kemampuan awal matematis siswa, sedangkan kemampuan pemecahan masalah, dipengaruhi faktor kemampuan lain selain kemampuan penalaran matematis dan kemampuan awal matematis (Shodikin, *et al* [49]).

Berdasarkan pengertian tentang pembelajaran dengan strategi abduktif-deduktif (PSAD) dan kerangka umumnya, dalam penelitian Shodikin [49] dikembangkan sintak pembelajaran dengan strategi abduktif-deduktif (PSAD) yang lebih operasional sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2 berikut.

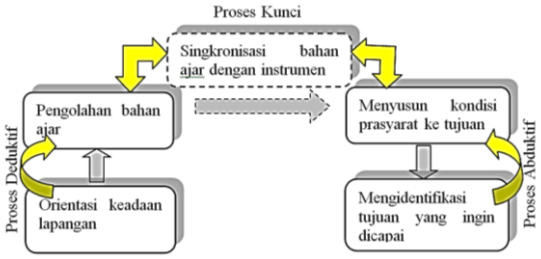


Gambar 2. Skema Pembelajaran dengan Strategi Abduktif-Deduktif (Shodikin, 2014)

Sintak PSAD yang diterapkan dimulai dengan: (1) orientasi terhadap masalah, (2) mengorganisasi siswa untuk belajar, sebagai proses deduktif; (3) menganalisis dan mengevaluasi proses, sebagai proses kunci; (4) menggeneralisasi temuan-temuan dan (5) pembahasan strategi masalah yang lebih banyak, sebagai proses abduktif. Berdasarkan skema dasar yang telah ada, dikembangkan skema abduktif-deduktif dan alternatif metode penerapannya dalam pengembangan bahan ajar matematika dalam meningkatkan kemampuan penalaran dan pemecahan masalah siswa.

4. Pengembangan: Abduktif-Deduktif Untuk Pengembangan Bahan Ajar

Berdasarkan kerangka umum abduktif-deduktif, skema dalam pengembangan bahan ajar matematika dengan strategi abduktif-deduktif juga terdiri dari tiga proses, yakni proses abduktif, proses deduktif dan proses kunci. Skema pengembangan bahan ajar dengan strategi abduktif-deduktif, disajikan pada gambar 3 sebagai berikut.



Gambar 3. Skema Strategi Abduktif-Deduktif dalam Pengembangan Bahan Ajar

Pola pikir yang dibentuk dimulai dari proses abduktif, yakni dimulai (1) mengidentifikasi tujuan yang ingin dicapai (disebut tahap target akhir) dan (2) menyusun kondisi yang menjadikan syarat sehingga tercapai target akhir (disebut tahap target antara). Dalam hal ini, target akhir yang ingin dicapai adalah menyusun bahan ajar yang mampu meningkatkan kemampuan penalaran dan pemecahan masalah siswa. Oleh karena itu, yang diperlukan adalah mengenal seperti apa

ciri-ciri kemampuan yang akan ditingkatkan. Oleh karena itu, diperlukan identifikasi dan pendaftaran indikator-indikator kemampuan penalaran dan pemecahan masalah.

Selanjutnya, tahap menyusun kondisi yang menjadikan syarat (target antara) sehingga tercapai target akhir adalah penyiapan membuat instrumen evaluasi sesuai dengan indikator kemampuan penalaran dan pemecahan masalah, melaksanakan tes, proses penilaian hasil tes, dan evaluasi hasil tes, serta pelaksanaan ujian perbaikan atau remidi (jika diperlukan).

Pola pikir yang dibentuk selanjutnya adalah proses deduktif. Proses deduksi dimulai dengan (3) pengumpulan data yang ada di lapangan (data awal) berupa analisis bahan ajar sebelumnya, analisis kebutuhan siswa, kemampuan awal matematis siswa, keminatan siswa, kondisi sosial masyarakat, gender, dan faktor-faktor lain yang memungkinkan berpengaruh, baik yang mendukung dan yang menghambat proses pembelajaran. Istianah [14] menambahkan faktor-faktor penyebab kesulitan belajar antara lain, faktor internal yang bersumber dari diri siswa yang berupa sikap, perkembangan, kognitif, kemampuan dan jenis kelamin; dan faktor eksternal yang bersumber dari luar siswa terdiri dari metode, pengajaran, materi fungsi dan lingkungan sosial. Data inilah yang nantinya digunakan sebagai pertimbangan dalam pengembangan bahan ajar. Pengumpulan data dapat dilakukan dengan cara penelitian pendahuluan.

Proses deduktif yang dituju adalah (4) proses pengolahan data untuk penyiapan bahan ajar untuk siswa. Proses ini dimungkinkan membutuhkan waktu yang cukup panjang, karena evaluasi dan penyusunan bahan ajar harus disesuaikan dengan kaidah-kaidah penyusunan bahan ajar dan pengemasan materi, soal latihan, dan proses pembelajaran lainnya mendukung siswa peningkatkan kemampuan penalaran dan pemecahan masalah dengan tetap memperhatikan faktor yang mempengaruhi siswa dan data awal yang diperoleh di lapangan. Pengemasan materi dan latihan soal disusun dengan menggunakan pendekatan abduktif-deduktif. Demikian pula dalam proses pembelajaran digunakan pembelajaran dengan strategi abduktif-deduktif.

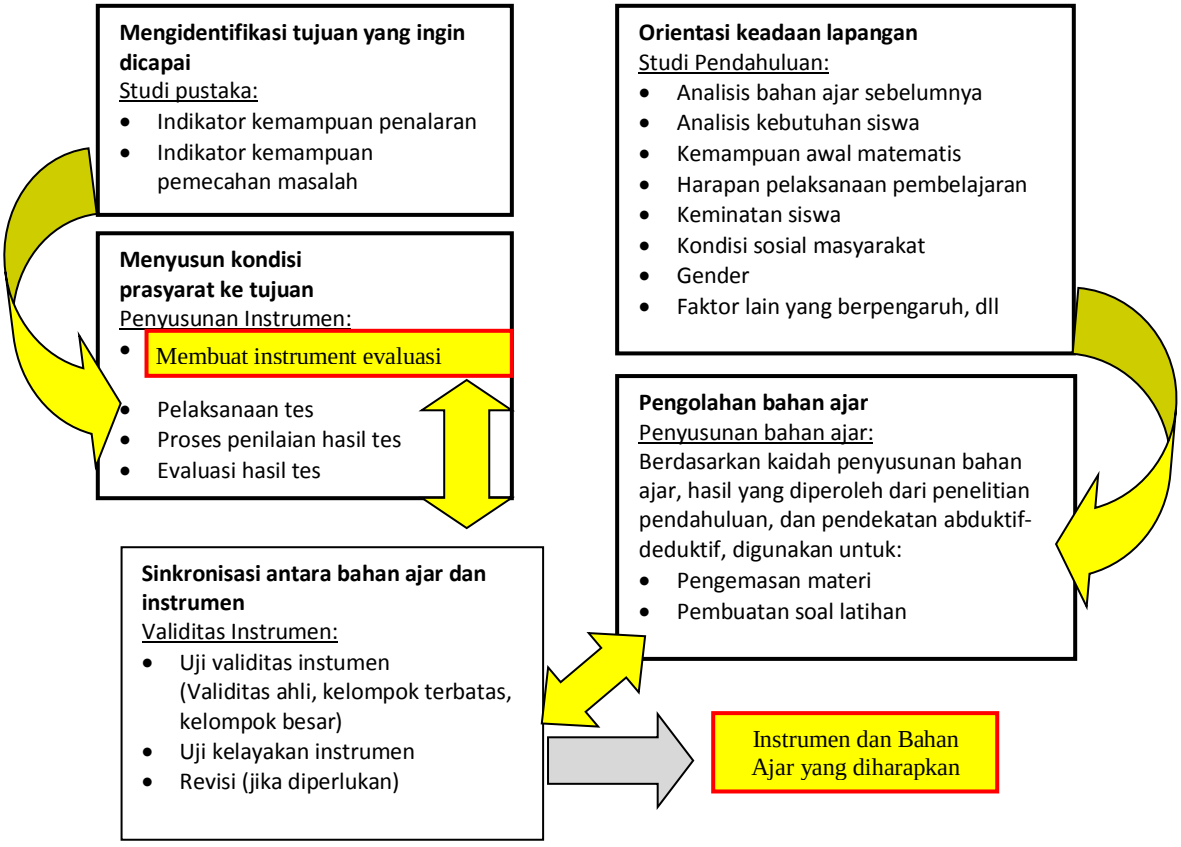
Proses yang menjadi proses kunci dalam pengembangan bahan ajar adalah (5) sinkronisasi antara bahan ajar dengan instrumen. Proses ini merupakan proses validasi bahan ajar dan instrumen secara bersamaan. Hal ini yang akan menghubungkan dan menentukan apakah bahan ajar yang akan digunakan sesuai atau tidak dengan apa yang diukur. Dalam proses ini diperlukan uji validitas dan kelayakan instrumen, baik bahan ajar maupun instrumen evaluasi. Proses ini memungkinkan terjadi beberapa kali revisi, sehingga akan memerlukan waktu yang cukup lama juga dalam pelaksanaannya. Validasi instrumen yang dilakukan meliputi tiga tahapan, yakni: validasi oleh ahli, validasi terbatas (kelompok terbatas) dan validasi lapangan (kelompok besar).

5. Penerapan Pengembangan

Penerapan pengembangan bahan ajar matematika untuk meningkatkan kemampuan penalaran dan pemecahan masalah, sesuai dengan tahapan yang disajikan dalam pengembangan abduktif-deduktif untuk pengembangan bahan ajar, yakni: (1) mengidentifikasi tujuan yang ingin dicapai; (2) menyusun kondisi prasyarat ke tujuan; (3) orientasi keadaan lapangan; (4) pengolahan bahan ajar; dan

(5) sinkronisasi antara bahan ajar dan instrumen.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam penyusunan bahan ajar meliputi: (1) telaah kurikulum; (2) penyusunan silabus; (3) pengorganisasian buku; (4) pemilihan materi; (5) penyajian materi; dan (6) penggunaan bahasa dan keterbacaan, sedangkan faktor yang menjadi harapan dalam pembelajaran adalah (1) menekankan berpusat kepada siswa, (2) siswa berperan aktif dan (3) dikaitkan dengan dunia nyata. Temuan-temuan ini dimungkinkan akan diperoleh dalam studi pendahuluan. Selanjutnya, skema penerapan pengembangan bahan ajar matematika untuk meningkatkan kemampuan penalaran dan pemecahan masalah disajikan dalam gambar 4.



Gambar 4. Penerapan Strategi Abduktif-Deduktif dalam Pengembangan Bahan Ajar

Berdasarkan bagan dalam gambar 4 tersebut, kita dapat mengembangkan dan membangun strategi abduktif-deduktif dalam mengembangkan bahan ajar untuk meningkatkan kemampuan penalaran dan pemecahan masalah.

Penerapan strategi abduktif-deduktif dalam pengembangan bahan ajar telah coba dikembangkan dalam penelitian yang dilakukan oleh Shodikin [24] [50] dan Kusnandi [45] dengan cakupan materi yang masih terbatas. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pengembangan ini adalah keterlaksanaan masing-masing tahapan. Tahapan orientasi keadaan lapangan yang diperoleh melalui studi pendahuluan perlu menjadi perhatian khusus dalam mempertimbangkan ketercapaian tujuan pengembangan bahan ajar.

3. KESIMPULAN

Dimungkinkan untuk mengembangkan membangun strategi abduktif-deduktif dalam mengembangkan bahan ajar untuk meningkatkan kemampuan penalaran dan pemecahan masalah. Langkah-langkah yang harus dilakukan dalam mengembangkan bahan ajar dengan strategi ini, meliputi: yakni: (1) mengidentifikasi tujuan yang ingin dicapai; (2) menyusun kondisi prasyarat ke tujuan; (3) orientasi keadaan lapangan; (4) pengolahan bahan ajar; dan (5) sinkronisasi antara bahan ajar dan instrumen.

UCAPAN TERIMA KASIH

Prof. Dr. H. Tatang Herman, M. Ed. dan Dr. Kusnandi, M.Si selaku pembimbing yang penuh kesabaran membimbing, menginspirasi, memotivasi, membangkitkan ide kreatif, memberikan nasihat dan arahan serta memberikan ilmunya kepada penulis.

*korespondensi : aliandr4@gmail.com

4. REFERENSI

[1] C.O. Iji, P.O. Ogbole, N.K. Uka. "Effect of Improvised Instructional Materials on Students' Achievement in Geometry at the Upper Basic Education Level in Makurdi Metropolis, Benue State, Nigeria". *American Journal of Educational Research*, vol. 2, no. 7, pp. 538-542, 2014. DOI: 10.12691/education-2-7-17.

[2] M. C. Nwike, dan O. Catherine, "Effects of Use of Instructional Materials on Students Cognitive Achievement in Agricultural Science", *Journal of Educational and Social Research*, vol. 3, no. 5, August 2013. ISSN 2239-978X. Doi:10.5901/jesr.2013.v3n5p10.

[3] D.E. Eskey, dan W. Grabe, "Teaching Second Language: Reading for Academic Purposes". Addison: Wesley Publishing Co., 1986.

[4] I. M. Mahardika, "Pengembangan Bahan Ajar Mekanika untuk Meningkatkan Kemampuan Representasi Verbal, Matematis, Gambar, dan Grafik Mahasiswa Calon Guru Fisika", *Disertasi*, Bandung, Universitas Pendidikan Indonesia, 2011.

[5] Y. Ramdani, "Pengembangan Instrumen dan Bahan Ajar Untuk Meningkatkan Kemampuan Komunikasi, Penalaran, dan Koneksi Matematis Dalam Konsep Integral". *Jurnal Penelitian Pendidikan*, vol. 13, no. 1, April 2012. ISSN 1412-565X.

[6] T. Herman, "Pengembangan Bahan Ajar Matematika untuk Meningkatkan Kemampuan Pemecahan Masalah, Penalaran, dan Komunikasi Matematik Siswa SMU", *Proposal Penelitian Dana Rutin*, Universitas Pendidikan Indonesia, 2002.

[7] Sutardi, "Pengembangan Bahan Ajar Fisika SMA Berbasis Spreadsheet Untuk Meningkatkan Kemampuan Siswa Berkomunikasi Ilmiah", *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXIV HFI Jateng & DIY*, Semarang 10 April 2010, pp. 168-179, 2010.

[8] I. Arisanto, A. Suyudi, dan L. Yuliati, "Pengembangan Bahan Ajar Integratif untuk Meningkatkan Kemampuan Berpikir Tingkat Tinggi Siswa Pada Mata Pelajaran Fisika Kelas X SMA Materi Optik", *Jurnal Online Universitas Negeri Malang*, 2013. http://jurnal-online.um.ac.id/data/artikel/artikelD222D0AC13E9D1348930327F0F42DD55.pdf

[9] M. Zakiyah, "Pengembangan Bahan Ajar Pendidikan Berpikir Kritis Melalui Pembelajaran Menulis Karya Ilmiah Di SMA/MA Kelas XI",

Jurnal Online Universitas Negeri Malang, 2012. http://jurnal-online.um.ac.id/data/artikel/artikel7FCEEE9CC1FAF56E9B661B2F44619E45.pdf

[10] F. Pangesti, "Pengembangan Bahan Ajar Pendidikan Berpikir (Kritis dan Kreatif) Berbahasa Indonesia SMA Melalui Pembelajaran Lintas Mata Pelajaran", *Jurnal Online Universitas Negeri Malang*, 2012. http://jurnal-online.um.ac.id/data/artikel/artikel285C26E2B1E88FF769234C6254865E8A.pdf

[11] S. Hayati, "Pengembangan Bahan Ajar Berorientasi Kehidupan dan Alam Pekerjaan", Bandung, Lembaga Penelitian Universitas Pendidikan Indonesia, 2001.

[12] T. Mulyana, "Pengembangan Bahan Ajar Melalui Penelitian Desain", *Jurnal Ilmiah Program Studi Matematika STKIP Siliwangi Bandung*, vol 1, no. 2, September 2012.

[13] Istianah, J. Widodo dan E. Prasetya, "Pengembangan Bahan Ajar Dengan Pendekatan Metakognisi Pada Materi Permintaan dan Penawaran Kelas X SMA Negeri 3 Demak. *Journal of Educational Social Studies* (JESS), vol. 1, no. 1, 2012. http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/jess.

[14] Sungkono, "Pengembangan Bahan Ajar". Yogyakarta, FIP Universitas Negeri Yogyakarta, 2003.

[15] C.P. Uzuegbu, H. C. Mbadiwe, dan J. C. Anulobi, "Availability and utilisation of instructional materials in teaching and learning of library education in tertiary institutions in Abia state". *Wudpecker Journal of Educational Research*, vol. 2, no. 8, pp. 111 - 120, October 2013. ISSN 2315-7267.

[16] W. Dick, dan L. Carey, "The Systematic Design of instruction 3rd Ed", Includes Bibliographical References, USA, Walter Dick and Lou Carey, 1990.

[17] A. Suparman, "Desain Instructional; Proyek pengembangan Universitas Terbuka", Ditjen Dikti, Jakarta, Departemen Pendidikan Nasional, 2001.

[18] G. Morrison, M. Steven, Ross, dan J.E. Kemp, "Designing Effective Instruction, 3rd Ed.", USA: John Wiley and Sons, 2001.

[19] J.D. Brown, "The Elements of Language Curriculum". Boston, Mass: Heinle & Heinle Publishers, 1995.

[20] Belawati, T., "Pengembangan Bahan Ajar", Jakarta, Universitas Terbuka, 2006.

[21] B. J. Reys, R. E. Reys, dan O. Chavez, "Why Mathematics Textbooks Matter", *Educational Leadership*, vol. 61, no.5, pp. 61-66, 2004.

[22] TIMMS, "Overview TIMSS and PIRLS 2011 Achievement", Lynch School of Education, Boston College, TIMSS and PIRLS, 2011.

[23] Balitbang, "Laporan Hasil TIMMS 2011", Jakarta, Kemendikbud, 2011.

[24] A. Shodikin, "Strategi Abduktif-Deduktif pada Pembelajaran Matematika dalam Peningkatan Kemampuan Penalaran Siswa SMA", *Edusentris: Jurnal Ilmu Pendidikan dan Pengajaran*, vol. 1, no. 2, pp. 103-116, 2014. ISSN 2356-0703. DOI: http://ejournal.sps.upi.edu/index.php/edusentris

[25] S.H. Rahayu, "Kemampuan Pemahaman dan Penalaran Matematis dalam Pembelajaran Inkuiri Terbimbing dengan Penguatan E-Learning Berbasis Aplikasi Moodle",

Tesis, Bandung, Universitas Pendidikan, 2013.

[26] M. Ansjar dan Sembiring, "Hakikat Pembelajaran MIPA dan Kiat Pembelajaran Matematika di Perguruan Tinggi", Jakarta, Dirjen Dikti Departemen Pendidikan Nasional, 2000.

[27] National Council of Teacher of Mathematics (NCTM), "Principles and Standards for School Mathematics", USA, NCTM, 2000.

[28] Wahyudin, "Kemampuan Guru Matematika, Calon Guru Matematika, dan Siswa dalam Mata Pelajaran Matematika", *Disertasi*, Bandung, IKIP Bandung, 1999.

[29] H. Hudojo, "Matematika dan Pelaksanaannya di Depan Kelas", Jakarta, Departemen Pendidikan dan Kebudayaan, 1990.

[30] A. Nizar, "Kontribusi Matematika dalam Membangun Daya Nalar dan Komunikasi Siswa". *Jurnal Pendidikan Inovatif*. 2 (2), 74-80, 2007.

[31] M. Henningsen dan M.K. Stein, "Mathematical Tasks and Student Cognition: Classroom-Based Factors That Support and Inhibit High-Level Mathematical Thinking and Reasoning". *Journal for Research in Mathematics Education*, vol. 28, pp. 524-549, 1997.

[32] I. Mullis, M.O. Martin, G.J. Ruddock, C.Y.O'Sullivan dan C. Preuschoff, "*TIMMS 1999, International Mathematics Report*", Boston: The International Study Boston College, 2000.

[33] D. Suryadi, "Penggunaan Pendekatan Pembelajaran Tidak Langsung serta Pendekatan Gabungan Langsung dan Tidak Langsung dalam Rangka Meningkatkan Kemampuan Berpikir Matematik Tingkat Tinggi Siswa SLTP", *Disertasi*, Bandung, Universitas Pendidikan Indonesia, 2005.

[34] A. Murni, "Peningkatan Kemampuan Pemecahan Masalah dan Representasi Matematis Siswa SMP Melalui Pembelajaran Metakognitif Berbasis Softskill", *Disertasi*, Bandung, Universitas Pendidikan Indonesia, 2013.

[35] Ibrahim, "Peningkatan Kemampuan Komunikasi, Penalaran, dan Pemecahan Masalah Matematis serta Kecerdasan Emosional Melalui Pembelajaran Berbasis Masalah pada Siswa Sekolah Menengah Atas", *Disertasi*, pada SPs UPI Bandung, 2011.

[36] E. Azhar, "Peningkatan Kemampuan Pemahaman, Penalaran, dan Komunikasi Matematis Siswa Madrasah Aliyah dengan Pendekatan RME", Tesis, SPs UPI Bandung, 2013.

[37] Wahidmurni, A. Mustikawan, dan A. Ridho, "Evaluasi Pembelajaran: Kompetensi dan Praktik". Yogyakarta: Nuha Litera, 2013.

[38] B. Waldrip, V. Prain, dan J. Carolan. "Learning Junior Secondary Science through Multi-Modal Representations", *Electronic Journal of Science Education*, vol. 11, no.1, pp. 88-107, 2006.

[39] Schuck, D. H., "Verbalization and Children's Self-Regulated Learning". *Contemporary Education Pshycology*, vol. 11, pp. 347-369, 1986.

[40] Davis, T. M. dan Murrell, P., "Turning Teaching into Learning: The Role of Student Responsibility in the Collegiate Experience". (Report No.EDO-HE 93-8). Washington, DC: George Washington University, School of Education and Human Development., 1994. (ERIC Document Reproduction Service No. ED 372 702).

[41] A. Rifa'i dan T.A. Cathrina, "Psikologi Pendidikan". Semarang: Universitas Negeri Semarang Press, 2009.

[42] D. Perkins,"Smart Schools". New York, Macmillan, Inc., 1992.

[43] R.I. Arends, "Learning to Teach, Belajar untuk Mengajar (Edisi Ketujuh Buku Satu)". Penerjemah: Helly Prajitno dan Sri Mulyamtini Soetjipto,Yogyakarta, Pustaka Pelajar, 2008.

[44] D. L. Ball, dan D. K. Cohen, "Reform by the book: What Is or might be the role of curriculum materials in teacher learning and instructional reform?" *Educational Researcher*, vol. 25, no. 9, pp. 6–14, 1996.

[45] Kusnandi, "Pembelajaran Matematika dengan Strategi Abduktif-Deduktif untuk Menumbuhkembangkan Kemampuan Membuktikan pada Mahasiswa", *Disertasi*, Bandung, Universitas Pendidikan Indonesia, 2008.

[46] A. Aliseda, "Abductive Reasoning: Challenges Ahead", *Theoria*, vol. 60, pp. 261-270, 2007.

[47] Z. Sun, G. Finnie dan K. Weber, "Abductive Case Based Reasoning", *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 20, no. 9, pp. 957-983, 2005.

[48] A. Shodikin,"Abductive-Deductive Strategy: How To Apply It In Improving Student Mathematics Literacy In Junior High School?", *International Seminar on Mathematics, Science, and Computer Science Education*, Bandung, 19 Oktober 2013. DOI: http://fpmipa.upi.edu/seminar.html.

[49] A. Shodikin, T. Herman, dan Kusnandi, "Studi Interaksi Antara Pembelajaran dan Kemampuan Awal Matematis Siswa Terhadap Peningkatan Kemampuan Penalaran Dan Pemecahan Masalah Pada Pembelajaran dengan Strategi Abduktif-Deduktif", *Konferensi International UPI-UPSI*, Bandung, 16 Juni 2014. DOI: http://icteupiupsi.upsi.edu.my/index.php/2-uncategorised/1-the-6th-international-conference-on-teacher-education.

[50] A. Shodikin, "Strategi Abduktif-Deduktif pada Pembelajaran Matematika dalam Peningkatan Disposisi Siswa", *Madrasah: Jurnal Pendidikan dan Pembelajaran Dasar*, vol. 7, no. 2, pp.181-202, 2015. ISSN 1979-5599. DOI: http://fitk.uin-malang.ac.id/jurnal-madrasah

PENCITRAAN JARUM ANESTESI DENGAN GELOMBANG ULTRASONIK

Hesty Susanti*

*Lab Instrumentasi Medik, Teknik Fisika, Institut Teknologi Bandung, Indonesia
Chair of Medical Engineering, Ruhr Universität Bochum, Germany.

ABSTRAK.

Pemanfaatan ultrasonik dalam *minimally invasive interventional procedure*, khususnya untuk tujuan anestesi telah menjadi metode yang menjanjikan dalam satu dekade terakhir. Namun, hingga saat ini berbagai keterbatasan masih ditemui para dokter dalam aplikasi klinis. Visibilitas jarum menjadi faktor penting yang mempengaruhi keberhasilan dari prosedur yang dilakukan. Peningkatan visibilitas jarum memberikan berbagai keuntungan, antara lain mengurangi jumlah tusukan, sehingga meminimalkan ketidaknyamanan pada pasien dan mempercepat waktu pelaksanaan prosedur. Selain itu, pencitraan yang bersifat real time ini akan mengurangi risiko kontak antara jarum dan saraf yang dapat menyebabkan luka pada saraf, serta mencegah kesalahan-kesalahan penusukan lainnya yang dapat menimbulkan risiko yang tidak diinginkan.

Kata kunci : *minimally invasive interventional procedure; pencitraan; ultrasonic; visibilitas jarum.*

1. APA ITU *MINIMALLY INVASIVE INTERVENTIONAL PROCEDURE*?

Dalam dunia kedokteran dikenal istilah *invasive interventional procedure*, yaitu prosedur penanganan atau diagnosis yang melibatkan proses pengirisan, penusukan, atau memasukkan alat ke dalam rongga tubuh. Prosedur ini terbagi menjadi *minimally invasive procedure* dan prosedur operasi biasa. *Minimally invasive procedure* dikembangkan salah satunya dengan tujuan untuk mempercepat pemulihan pasien, karena prosedur ini menekankan pada upaya-upaya untuk meminimalkan luka yang mungkin ditimbulkan. Prosedur ini umumnya melibatkan penggunaan jarum. *Minimally invasive procedure* biasanya dilakukan dalam proses injeksi atau penyuntikan (seperti anestesi/pembiusan), *biopsy* (pencuplikan sel atau *tissue* (jaringan tubuh) untuk pemeriksaan), dan lain-lain.

2. PRINSIP PENCITRAAN ULTRASONIK DALAM DUNIA MEDIS

Gelombang ultrasonik adalah gelombang suara yang mempunyai frekuensi sangat tinggi melebihi ambang batas pendengaran manusia, yaitu di atas 20 kHz. Dalam pencitraan medis, biasanya digunakan gelombang ultrasonik dengan frekuensi berkisar antara 2 - 18 MHz. Gelombang ultrasonik merupakan suatu bentuk energi akustik yang dihasilkan oleh kristal-kristal *piezoelectric* yang terdapat di dalam *transducer*. Pembangkitan energi ini didasarkan pada fenomena *reverse piezoelectric effect*, yaitu ketika material kristal *piezoelectric* dikenai tegangan elektrik, maka kristal tersebut akan bergetar dengan frekuensi yang sangat tinggi, membangkitkan energi akustik dalam bentuk gelombang ultrasonik.

Gelombang ultrasonik yang ditembakkan oleh *transducer* ini

selanjutnya ditransmisikan ke tubuh pasien, merambat secara longitudinal sebagai rangkaian rapatan (tekanan tinggi) dan renggangan (tekanan rendah). Gelombang ultrasonik dibedakan berdasarkan panjang gelombang spesifik (jarak antara puncak gelombang) dan frekuensi (jumlah puncak gelombang per detik). Kecepatan rambat gelombang ultrasonik di dalam tubuh manusia relatif konstan, yaitu sekitar 1.540 m/detik.

Untuk menghasilkan citra klinis yang dapat dimanfaatkan, gelombang ultrasonik harus dipantulkan kembali oleh *tissue* (jaringan tubuh) yang dijadikan objek pencitraan untuk diterima kembali oleh *transducer*. Pada tahap ini, *transducer* yang tadinya berada dalam *transmission mode* akan berganti menjadi *receive mode*. Selanjutnya akan terjadi fenomena *piezoelectric effect*, dimana energi akustik berupa pantulan gelombang ultrasonik dari *tissue* tadi menyebabkan perubahan bentuk pada kristal *piezoelectric* di dalam *transducer* sehingga membangkitkan energi elektrik yang selanjutnya akan diproses oleh mesin ultrasonik untuk diterjemahkan menjadi citra klinis. Proses kirim-terima ini dapat diulangi lebih dari 7.000 kali per detik, dan jika digabungkan dengan proses komputasi maka mampu menghasilkan citra 2 dimensi *real time* yang dapat dimanfaatkan secara klinis.

Jumlah gelombang ultrasonik yang dipantulkan oleh objek dan diterima kembali oleh *transducer* akan terukur dalam intensitas sinyal yang direpresentasikan oleh skala abu-abu (*gray scale*) dari citra yang dihasilkan. Objek yang memantulkan gelombang ultrasonik dengan kuat akan menghasilkan sinyal dengan intensitas yang lebih besar dan tampak lebih putih (*hyperechoic*). Sebaliknya, objek-objek yang mempunyai daya pantul lemah (*hypoechoic*) akan tampak lebih gelap (hitam).

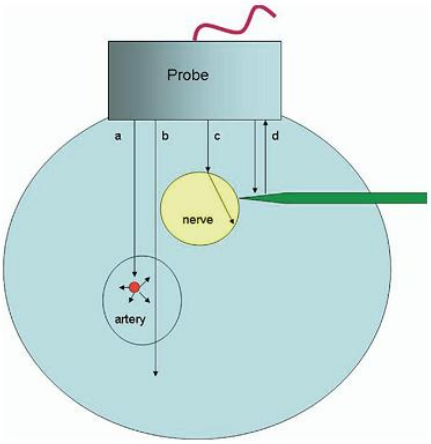
a. Interaksi antara Gelombang Ultrasonik dan Tissue

Ketika gelombang ultrasonik merambat melalui jaringan-jaringan tubuh, maka gelombang-gelombang tersebut akan mengalami fenomena-fenomena akustik, seperti refleksi (pemantulan), refraksi (pembiasan) dan atenuasi.

Jika gelombang ultrasonik mengenai perbatasan antara dua tipe *tissue*, maka sebagian gelombang akan dipantulkan dan sebagian lainnya akan diteruskan (ditransmisikan). Objek dengan permukaan mulus dan memiliki ukuran yang relatif besar (misalnya jarum) akan berperilaku seperti cermin, sehingga disebut sebagai reflektor (pemantul) spekular. Sedangkan objek dengan permukaan tidak beraturan akan berperilaku sebagai *scattering reflector* atau *scatterer*, di mana pola pemantulan yang terjadi menyebar ke segala arah. Sebagian besar citra jaringan saraf dihasilkan oleh fenomena pemantulan *scattering*. Besarnya pemantulan yang terjadi dipengaruhi oleh perbedaan impedansi akustik antara 2 tipe *tissue* tersebut. Semakin besar perbedaannya, maka semakin besar pula energi yang akan dipantulkan dan diterima kembali oleh *transducer*, sehingga dihasilkan 2 citra yang dapat dibedakan.

Jika gelombang ultrasonik mengenai perbatasan *tissue* (non-refleksi), maka gelombang tersebut akan cenderung berubah arah perambatannya. Peristiwa ini dikenal dengan refraksi atau pembiasan. Refraksi terjadi ketika gelombang mengenai perbatasan antara dua tipe *tissue* yang mempunyai perbedaan kecepatan rambat akustik yang sangat kecil. Fenomena refraksi ini biasanya menyebabkan efek kurang menguntungkan

bagi pencitraan ultrasonik jika jumlah gelombang ultrasonik yang terbuang dan tidak diterima kembali oleh *transducer* lumayan besar.



Gambar 1. Berbagai fenomena akustik yang dialami oleh gelombang ultrasonik yang merambat melalui jaringan-jaringan tubuh. (a). *Scattering reflection.* (b). Transmisi (c). Refraksi. (d). *Specular reflection.* (Sites et al [32])

Sedangkan, atenuasi adalah fenomena berkurangnya energi akustik secara terus menerus seiring dengan perambatan gelombang melewati jaringan-jaringan tubuh. Fenomena ini menyebabkan berkurangnya intensitas sinyal yang akan diterima kembali oleh *transducer*, seiring dengan semakin dalamnya gelombang ultrasonik merambat melewati jaringan-jaringan tubuh. Penyebab utama atenuasi adalah perubahan sebagian energi akustik menjadi kalor, yang dikenal sebagai peristiwa absorpsi. Atenuasi mempengaruhi secara langsung tingkat penetrasi gelombang. Perubahan atenuasi dipengaruhi secara tidak langsung oleh frekuensi dari gelombang ultrasonik yang digunakan.

b. Resolusi

Dalam pencitraan ultrasonik dikenal istilah resolusi aksial, lateral dan temporal. Ketiga istilah ini terkait dengan kemampuan mesin ultrasonik untuk membedakan suatu objek dengan objek lainnya di dalam sebuah citra.

Resolusi aksial adalah kemampuan mesin ultrasonik untuk membedakan dua objek yang terletak pada kedalaman berbeda, sejajar terhadap arah berkas gelombang ultrasonik yang ditembakkan oleh *transducer*. Resolusi aksial setara dengan setengah dari panjang gelombang ultrasonik yang digunakan. Jika jarak antara dua objek lebih besar dari setengah panjang gelombang ultrasonik, maka objek-objek tersebut akan tampak sebagai dua objek yang terpisah. Frekuensi ultrasonik yang lebih tinggi (panjang gelombang lebih pendek) akan menghasilkan resolusi aksial yang lebih baik. Akan tetapi, gelombang ultrasonik frekuensi tinggi akan lebih mudah teratenuasi, sehingga *transducer-transducer* frekuensi tinggi hanya mampu menjangkau objek-objek yang lebih dangkal dibandingkan dengan *transducer-transducer* frekuensi rendah. *Transducer-transducer* frekuensi rendah mempunyai kemampuan penetrasi yang lebih dalam.

Resolusi lateral adalah kemampuan mesin ultrasonik untuk membedakan dua objek yang terletak berdampingan dalam arah lateral, tegak lurus terhadap arah berkas gelombang ultrasonik yang ditembakkan oleh *transducer*. Resolusi lateral biasanya lebih buruk dibandingkan dengan resolusi aksial.

Resolusi temporal adalah kemampuan mesin ultrasonik untuk mendeteksi objek bergerak. Resolusi ini berhubungan langsung dengan *frame rate*. *Frame rate* merupakan parameter yang menunjukkan seberapa cepat suatu alat dapat menghasilkan citra-citra unik yang berurutan (yang disebut *frame*). Dengan bahasa yang lebih sederhana, *frame rate*

kurang lebih diartikan sebagai kecepatan pencuplikan citra.

c. *Bagaimana Ultrasonik dikawinkan dengan Minimally Invasive Interventional Procedure?*

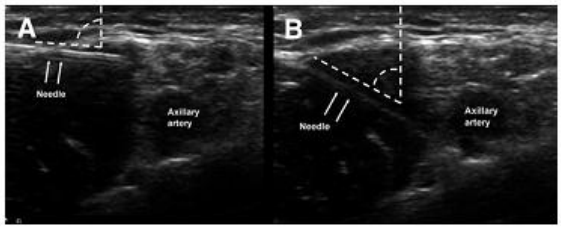
Penggunaan ultrasonik sebagai media pemandu untuk mencitrakan jarum dalam *minimally invasive procedure* telah menjadi metode yang menjanjikan selama lebih dari satu dekade terakhir. Namun, baru mengalami perkembangan yang cukup signifikan sejak awal tahun 2000-an. Metode ultrasonik dipilih karena mempunyai keunggulan-keunggulan dibandingkan teknik pencitraan lainnya seperti X-Ray, CT-Scan, *Magnetic Resonance Imaging* (MRI), dan lain-lain.

Ultrasonik tidak memiliki risiko radiasi pada tubuh. Selain itu, ukuran peralatan yang digunakan (mesin dan *transducer*) relatif kecil. Dibandingkan dengan metode pencitraan lainnya, ultrasonik relatif murah dan mudah dipakai. Dari segi kualitas pencitraan, metode ini mempunyai resolusi temporal yang baik. Selain itu, metode pencitraan ultrasonik ini memungkinkan pendekatan dari berbagai bidang pencitraan (arah pengambilan gambar).

Khusus dalam penelitian ini, kami menekankan pada kasus *minimally invasive* untuk prosedur anestesi (pembiusan). Dari penelitian-penelitian sebelumnya, diketahui bahwa penggunaan gelombang ultrasonik untuk mencitrakan jarum sebagai pemandu dalam anestesi regional memiliki berbagai keuntungan.

Dalam beberapa kasus ditemukan bahwa metode ini mampu meningkatkan kecepatan prosedur serta mempercepat pemblokan saraf dibandingkan dengan metode konvensional (tanpa pemandu ultrasonik). Selain itu, metode ultrasonik relatif tidak menimbulkan rasa sakit, sebab tidak terjadi kontraksi otot yang disebabkan oleh penggunaan stimulasi saraf. Metode ini mampu mengurangi risiko komplikasi yang berhubungan dengan kesalahan pemblokan saraf. Di samping itu, mampu pula mengurangi risiko keracunan anestesi lokal sistematik, karena dengan metode ini dosis obat anestesi yang digunakan dapat diturunkan secara signifikan.

Ultrasonik tidak hanya mampu mencitrakan pergerakan jarum yang ditusukkan, akan tetapi di saat bersamaan dapat pula mencitrakan struktur anatomi tubuh maupun pola penyebaran lokal obat anestesi yang disuntikkan. Pencitraan yang bersifat *real time* ini akan mengurangi risiko kontak antara jarum dan saraf yang dapat menyebabkan luka pada saraf, serta mencegah kesalahan-kesalahan penusukan lainnya yang dapat menimbulkan risiko yang tidak diinginkan. Metode ini juga memungkinkan dokter untuk mereposisi jarum jika diperlukan setelah prosedur injeksi anestesi lokal yang pertama.



Gambar 2. Citra ultrasonik dari jarum yang ditusukkan menuju axillary brachial plexus. (A) dengan sudut penusukan kecil (mendekati 0°) terhadap permukaan *transducer*. (B) dengan sudut penusukan lebih besar (sekitar 30°) terhadap permukaan *transducer*. [6]

Topik penelitian ini menjadi menarik karena melibatkan pengetahuan lintas bidang, yaitu bidang keteknikan (*engineering*), sekaligus bidang kedokteran. Pengetahuan dan keahlian bidang

keteknikan yang diperlukan dalam upaya untuk meningkatkan visibilitas jarum, harus beriringan dengan pengetahuan dalam bidang kedokteran, sehingga diharapkan nantinya hasil dari penelitian ini dapat diterapkan dalam praktik klinis. Sinergi dan kepercayaan harus senantiasa terbangun antara peneliti-peneliti dari kedua bidang tersebut, sehingga diharapkan akan diperoleh hasil yang optimal. Selama ini, terutama di tanah air, belum terlalu jamak kita temui kerja sama yang solid antara kedua bidang ini. Namun, sedikit demi sedikit, upaya ini akan terus dilakukan sehingga penelitian-penelitian serupa mampu berkembang dan membawa manfaat bagi bangsa Indonesia.

3. PERKEMBANGAN PENCITRAAN JARUM DENGAN METODE ULTRASONIK

Penelitian serupa yang mempelajari pencitraan jarum dengan metode ultrasonik mulai berkembang sejak awal dekade 1990-an. Perkembangan pesat terjadi dalam 10 tahun terakhir, di mana para peneliti berlomba-lomba untuk melakukan berbagai upaya peningkatan visibilitas jarum sehingga diharapkan mampu meningkatkan *safety* dan performansi dari *minimally invasive interventional procedure* yang dilakukan oleh para dokter.

Ultrasonik sebelumnya telah lebih dahulu digunakan untuk mencitrakan organ-organ tubuh manusia. Kemudian pada era selanjutnya, para peneliti mulai melirik kemungkinan penggunaan gelombang ultrasonik untuk mencitrakan jarum dalam *minimally invasive interventional procedure*. Dalam hal ini, visibilitas jarum menjadi faktor yang sangat penting bagi kesuksesan prosedur yang dilakukan. Visibilitas jarum dipengaruhi antara lain oleh ukuran jarum yang digunakan, sudut penusukan, kedalaman, serta jenis jarum yang digunakan. Bagian tip (ujung) jarum biasanya akan lebih tampak dalam citra ultrasonik dibandingkan dengan bagian batang jarum.

4. PERMASALAHAN YANG INGIN DISELESAIKAN

Dalam hal ini, tujuan utama yang ingin dicapai oleh para peneliti adalah bagaimana mengembangkan teknik pencitraan jarum dengan gelombang ultrasonik secara optimal, sehingga dalam citra yang dihasilkan dapat diketahui secara akurat lokasi jarum, area target berupa jaringan saraf atau *tissue* lainnya, serta penyebaran lokal dari cairan anestesi yang diinjeksikan. Dengan tercapainya hal-hal tersebut, maka diharapkan prosedur anestesi yang dilakukan menjadi lebih efektif. Visibilitas jarum yang optimal diharapkan mampu meningkatkan performansi prosedur, yang terukur dari peningkatan kecepatan prosedur, waktu *onset* pemblokan saraf, *safety* yang ditinjau dari risiko kesalahan penusukan, serta kenyamanan pasien dan biaya.

Sampai saat ini, para peneliti telah melakukan berbagai upaya untuk meningkatkan visibilitas jarum dengan mengembangkan teknologi jarum *echogenic*, memanipulasi teknik penusukan jarum, mengembangkan teknologi pencitraan ultrasonik, dan berbagai metode lainnya. Namun, dari berbagai macam pendekatan tersebut, para dokter masih menemukan berbagai keterbatasan terkait visibilitas jarum dan performansi dari prosedur yang dilakukan.

a. *Fokus Penelitian*

Salah satu masalah yang masih menjadi tantangan saat ini adalah pencitraan jarum anestesi menggunakan *transducer* frekuensi rendah. Dokter

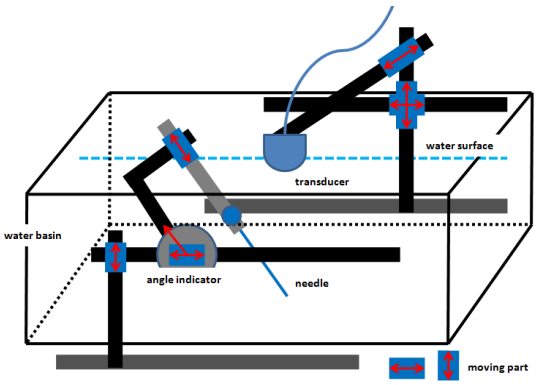
menggunakan *transducer* frekuensi rendah untuk menjangkau bagian-bagian tubuh yang lebih dalam karena kemampuan penetrasinya yang lebih baik jika dibandingkan dengan *transducer* frekuensi tinggi. Akan tetapi, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, frekuensi rendah akan menghasilkan citra dengan resolusi yang rendah pula. Sampai saat ini, belum ada jenis jarum anestesi yang tersedia di pasaran yang dapat dicitrakan secara optimal oleh *transducer-transducer* frekuensi rendah. Panjang gelombang ultrasonik yang relatif besar yang dihasilkan oleh *transducer* frekuensi rendah jika dibandingkan dengan ukuran pola permukaan jarum-jarum *echogenic*, akan membatasi jumlah refleksi atau *scattering* dari permukaan jarum, sehingga visibilitas jarum menjadi kurang optimal.

Selain itu, dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, belum ada yang menjelaskan secara terperinci mengenai visibilitas jarum ditinjau dari segi fisis, yaitu teori-teori akustik, tentang bagaimana fenomena perambatan gelombang ultrasonik pada jarum dan material di sekitarnya dihubungkan dengan proses pencitraan ultrasonik yang dilakukan.

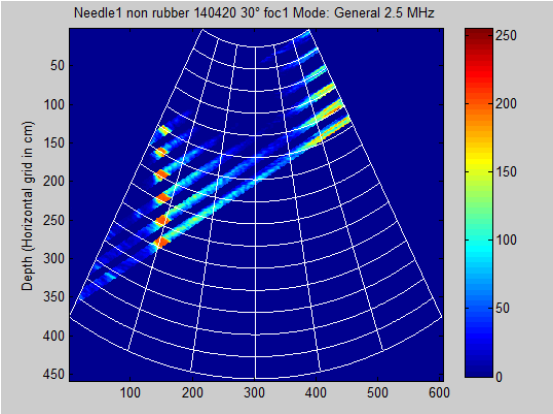
Gambar 3. Convex transducer (kiri) dan linear array transducer (kanan). (Ultrasonix [37])

Pada kasus-kasus tertentu, dokter menggunakan jenis *curved array/convex transducer* karena jenis *transducer* ini mempunyai area sektor pemindaian yang lebih luas dibandingkan dengan *linear transducer*. Sampai saat ini, belum ada penelitian yang membahas mengenai pencitraan jarum anestesi menggunakan jenis *convex transducer* ini, baik ditinjau dari evaluasi citranya secara umum, maupun penjelasan terperinci dari segi fisiknya.

Dari serangkaian eksperimen yang telah dilakukan sampai saat ini, kami masih berfokus pada teknik penusukan jarum secara *in plane*. Eksperimen masih dilakukan di dalam medium air, karena air memiliki sifat *anechoic* (tidak memantulkan gelombang ultrasonik). Bak air yang digunakan terbuat dari kaca, sehingga pada setiap sisi bagian dalamnya perlu diletakkan bahan penyerap (*absorber*) untuk mencegah refleksi pada bagian-bagian antarmuka air dan kaca. Sebelum dilakukan pengujian klinis pada pasien, nantinya jarum-jarum tersebut akan diuji pada medium *phantom* yang memiliki sifat mendekati *tissue* manusia, seperti *polyvinyl alcohol phantom*, daging babi, dan lain-lain.



Gambar 4. Skema *setting* eksperimen



Gambar 5. Contoh pola visibilitas jarum pada berbagai kedalaman untuk sudut penusukan 30°, menggunakan *convex transducer* di dalam medium air.

Selanjutnya akan dilakukan evaluasi visibilitas dari jarum-jarum yang telah diuji pada kasus-kasus yang telah disebutkan di atas, baik dari jenis jarum konvensional, maupun jarum *echogenic*. Dari pola-pola visibilitas jarum-jarum tersebut pada berbagai kedalaman dan sudut penusukan, akan didefinisikan "*dead area*" yang menunjukkan daerah-daerah di mana jarum tidak dapat terlihat. Setelah dilakukan uji klinis pada pasien, pola-pola ini nantinya dapat digunakan untuk menyusun rekomendasi prosedur dalam praktik klinis. Misalnya, dokter harus menghindari "*dead area*" tertentu atau menghindari sudut-sudut penusukan tertentu agar diperoleh visibilitas jarum yang optimal.

Pola-pola inilah yang kemudian akan dipelajari lebih lanjut untuk menjelaskan fenomenanya secara fisis. Hasil evaluasi ini kemudian digunakan sebagai dasar untuk merancang langkah-langkah peningkatan visibilitas jarum secara efektif, baik dengan metode-metode yang telah dilakukan para peneliti sebelumnya, maupun metode-metode baru yang nantinya mungkin ditemukan.

5. *SKILL* YANG DIPERLUKAN DALAM PENELITIAN

Untuk mendukung penelitian ini diperlukan pengetahuan yang dalam tentang teori-teori fisis yang mendasari prinsip perambatan gelombang akustik, khususnya ultrasonik pada *tissue* dan medium jarum. Selain itu, perlu dipahami pula-pula prinsip-prinsip pencitraan ultrasonik, khususnya dalam dunia medis. Pengetahuan-pengetahuan ini kemudian harus ditambah pula dengan *skill-skill* perencanaan dan manajemen penelitian, pemrograman, evaluasi data serta statistik, dan lain-lain. Maka, diperlukan segenap usaha, ketekunan, dan kesabaran yang terus menerus agar diperoleh hasil yang optimal.

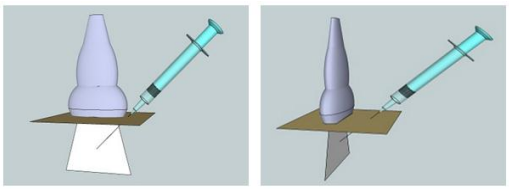
6. *STATE OF THE ART*

a. Memanipulasi Teknik Penusukan Jarum

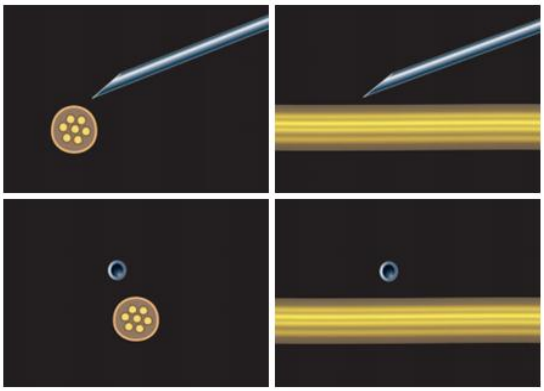
Pada awalnya, para peneliti baru mempelajari kemungkinan penggunaan ultrasonik untuk prosedur ini. Belum ada upaya-upaya secara signifikan yang dilakukan untuk meningkatkan visibilitas jarum. Kemudian selanjutnya berkembang teknik-teknik penusukan yang memungkinkan pencitraan jarum menjadi lebih bervariasi, bergantung kepada tujuan yang ingin dicapai. Teknik penusukan ini ditinjau dari orientasi jarum relatif terhadap berkas gelombang ultrasonik yang ditembakkan oleh *transducer*, yang dibagi menjadi teknik *in plane* (IP) dan *out of plane* (OOP).

Kedua teknik ini memiliki keunggulan masing-masing, tergantung citra seperti apa yang ingin dihasilkan, termasuk pertimbangan tingkat kesulitan untuk menjangkau bagian-bagian tubuh yang ingin dicitrakan. Dalam teknik *in plane*, bagian tip (ujung) dan batang jarum tampak lebih jelas untuk sudut-sudut

penusukan kecil. Dalam hal ini, sudut penusukan diukur antara posisi jarum terhadap permukaan *transducer*. Sudut penusukan optimal dalam teknik *in plane* yaitu sekitar 35 derajat atau lebih kecil. Sedangkan, dalam teknik *out of plane* visibilitas bagian tip akan lebih baik pada sudut-sudut yang lebih besar. Penyebab perbedaan ini sampai sekarang masih belum diketahui.



Gambar 6. Skema teknik *in plane* (kiri) dan *out of plane* (kanan). [35]



Gambar 7. Citra jarum (warna silver) dan pembuluh darah (warna kuning), dengan teknik *in plane* (atas) dan *out of plane* (bawah). “(Gray [16])

b. *Memodifikasi Permukaan Jarum (Echogenic Technology)*

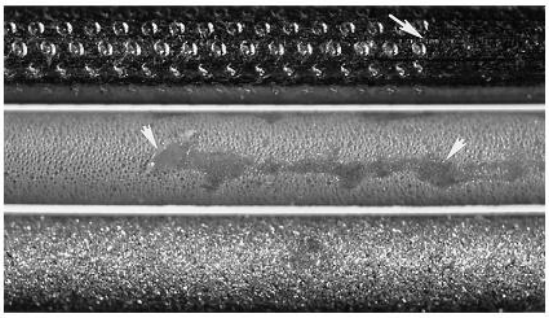
Dalam fase perkembangan selanjutnya, para peneliti mulai berpikir untuk meningkatkan visibilitas jarum dengan memanipulasi atau memodifikasi permukaan jarum yang digunakan. Pendekatan ini kemudian memunculkan istilah *echogenic needle* atau *ultrasonic enhanced needle*. Kedua istilah ini mengacu kepada jarum-jarum yang telah dimodifikasi permukaannya, sehingga mampu memantulkan kembali gelombang ultrasonik secara optimal atau dengan kata lain dapat "dilihat" lebih baik dengan menggunakan gelombang ultrasonik.

Jenis pertama dari *echogenic needle* adalah *coated needle*, yaitu jarum yang permukaannya dilapisi material khusus dengan karakteristik akustik tertentu, seperti polimer. Lapisan ini memiliki nilai impedansi akustik yang berbeda dari medium di sekelilingnya (*tissue* atau fluida). Perbedaan impedansi akustik ini mampu mengoptimalkan terjadinya refleksi spekular gelombang ultrasonik dari permukaan jarum, sehingga diharapkan intensitas sinyal yang akan diterima kembali oleh *transducer* menjadi lebih besar. Selain itu, lapisan polimer yang ditambahkan pada permukaan jarum dapat menjebak gelembung-gelembung udara berukuran kecil. Gelembung-gelembung udara ini akan bertindak sebagai *scatterer* yang mampu meningkatkan intensitas sinyal dalam bentuk sinyal *back scattering* yang akan diterima kembali oleh *transducer*.

Upaya lain yang dilakukan oleh para peneliti untuk memodifikasi permukaan jarum pada bagian batang dan/atau tip, yaitu dengan membuat permukaan jarum menjadi kasar (*roughening*) atau membentuk cekungan-cekungan dengan pola tertentu (*dimpling*). Kedua teknik ini (*roughening* dan *dimpling*) berangkat dari ide yang hampir serupa dengan *coating*, yaitu mengoptimalkan fenomena refleksi yang terjadi (baik spekular maupun *scattering*) sehingga mampu meningkatkan intensitas sinyal yang akan diterima kembali oleh *transducer*. Para peneliti mempelajari pula kemungkinan untuk menggabungkan teknik *coating*,

roughening, dan *dimpling* dalam satu jarum.

Tingkat keefektifan masing-masing dari teknik ini maupun gabungannya masih terus diteliti sampai sekarang. Meskipun hasil yang menjanjikan dari teknik modifikasi jarum ini tampak dari berbagai penelitian yang telah dilakukan, namun para peneliti masih menemui berbagai masalah dan keterbatasan hingga saat ini. Beberapa penelitian melaporkan bahwa tidak ada perbedaan performansi yang terlalu signifikan antara penggunaan jarum konvensional dibandingkan dengan jarum *echogenic*. Selain itu, keterbatasan penggunaan jarum *echogenic* juga disebabkan oleh harganya yang relatif lebih mahal.



Gambar 8. Penampakan mikroskopik (perbesaran 40x) dari jarum *echogenic*. (atas) Jarum Cook yang dibuat dengan teknik *dimpling*. (tengah) Jarum Echo-Coat (STS Biopolymers) yang dibuat dengan teknik *coating*. (bawah) Jarum Mini-Stick yang dibuat dengan teknik *roughening*. (Nichols et al [29])

c. *Pendekatan dari Segi Teknologi Pencitraan Ultrasonik*

Pendekatan lain yang dilakukan oleh para peneliti untuk meningkatkan visibilitas jarum adalah dengan melakukan upaya-upaya dari segi teknologi pencitraannya. Pendekatan ini antara lain dilakukan dengan teknik *compound imaging*, *electronic beam streering*, 3D-*ultrasound*, dan *Color Doppler*.

c.1.Compound Imaging

Compound imaging dilakukan dengan proses pengambilan citra dari objek yang sama lebih dari satu kali, kemudian menggabungkannya menjadi satu citra akhir. Citra-citra dapat diambil dari sudut-sudut pengambilan gambar yang berbeda-beda dalam satu bidang gambar (*spatial compound imaging*), atau dari berbagai nilai frekuensi yang berbeda-beda (*frequency compound imaging*).

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Cohnen *et al*.[7] pada tahun 2003, diketahui bahwa teknik *real time compound imaging* mampu meningkatkan visibilitas jarum. Akan tetapi, *spatial compound imaging* konvensional hanya dapat meningkatkan visibilitas jarum pada tingkat tertentu. Teknik ini hanya menguntungkan jika digunakan untuk jarum-jarum yang ditusukkan dengan sudut-sudut penusukan kecil, relatif terhadap permukaan *transducer*.

Pada tahun 2011 Zhuang *et al* [38]. mengajukan teknik *adaptive spatial compounding* yang lebih kompleks dibandingkan *spatial compound imaging* konvensional. Teknik ini dikembangkan berdasarkan algoritma pengolahan citra *tensor-based*. Metode ini menggunakan *multiple frame* dengan sudut *steering* yang divariasikan dalam rentang yang luas. Dalam penelitian ini, Zhuang *et al* [38]. melaporkan bahwa teknik *adaptive spatial compounding* mampu meningkatkan visibilitas jarum pada sudut berapa pun jarum ditusukkan.

c.2. Electronic Beam Steering

Teknik *beam steering* telah diterapkan pada mesin-mesin ultrasonik komersial yang diproduksi dalam beberapa tahun terakhir. Cara ini dapat meningkatkan

intensitas refleksi gelombang ultrasonik secara efektif jika jarum ditusukkan pada sudut-sudut mendekati 0° terhadap permukaan *transducer*. Untuk mencapai hasil citra terbaik, *user* harus mengatur arah *beam steering* tergantung dari sisi mana *transducer*, jarum akan ditusukkan. Jika posisi jarum diubah selama dilakukannya prosedur *invasive*, maka arah *beam steering* harus disesuaikan pula. Hal ini akan menambah kompleksitas dari proses yang sedang berlangsung.

Keterbatasan dari metode *beam steering* ini antara lain kualitas citra yang tidak terlalu baik serta sangat rentan dipengaruhi oleh *noise* dan berbagai distorsi. Selain itu, fitur ini belum menjadi fitur standar pada sebagian besar mesin ultrasonik komersial.

c.3. 3D-Ultrasound

Penelitian-penelitian awal menunjukkan bahwa 3D-*ultrasound* mampu memberikan informasi tambahan mengenai lokasi jarum dan kateter yang digunakan dalam prosedur *invasive*. Metode ini memiliki keterbatasan, antara lain *frame rate* yang relatif lebih lambat dibandingkan dengan 2D-*ultrasound* konvensional, serta ukuran *transducer* yang relatif besar. Kedua hal ini membuat proses penyesuaian antara arah pergerakan dan posisi jarum dengan berkas gelombang ultrasonik menjadi lebih sulit.

c.4. Color Doppler untuk Mendeteksi Tip

Pergerakan suatu objek yang dikenai berkas gelombang ultrasonik akan menghasilkan pergeseran frekuensi Doppler pada gelombang pantulnya. Berdasarkan fenomena ini, para peneliti mengembangkan metode-metode untuk menghasilkan pergerakan (getaran) pada bagian tip (ujung) jarum.

Penggetar mekanis yang menginduksikan vibrasi frekuensi tinggi pada bagian tip jarum dipertimbangkan sebagai salah satu cara yang efektif dan praktis. *The Color Mark device* adalah alat yang dikembangkan dengan prinsip tersebut. Alat ini dijepitkan pada bagian batang jarum dan menginduksikan vibrasi pada bagian tip dalam orde menit. Amplitudo maksimum vibrasi yang dikenakan pada jarum yaitu sebesar 15 µm, yang dianggap cukup untuk membangkitkan sinyal dengan pergeseran frekuensi Doppler.

Teknik lain yang dilakukan untuk menghasilkan pergeseran frekuensi Doppler adalah dengan mengisolasi kolom udara, menggerakkan jarum secara manual, atau vibrasi yang diinduksikan dengan cara memutar bagian *stylet* (yang sengaja dirancang berbentuk bengkok) di dalam jarum. Akan tetapi, menggerakkan jarum secara manual akan menimbulkan terlalu banyak *artefak* sepanjang bagian batang jarum, sehingga pendeteksian bagian tip menjadi kurang akurat.

Color Doppler memiliki keterbatasan, antara lain kualitas citra yang tidak terlalu baik di bagian area target yang ingin dideteksi, yang dapat menyebabkan penampakan jaringan saraf hampir-hampir menjadi tak terlihat. Akan menjadi kontraproduktif ketika peningkatan visibilitas jarum justru malah mengorbankan visibilitas area target.

d. Metode Lain-lain

Selain metode-metode yang telah diuraikan di atas, para peneliti mempelajari kemungkinan-kemungkinan lain untuk meningkatkan visibilitas jarum, terutama pada bagian tip. Metode-metode ini dilakukan di antaranya dengan cara menggerakkan bagian *tissue* yang menjadi

area penusukan (*tissue movement*), *hydrolocation*, dan *microbubbles injection*.

d.1. Tissue Movement

Metode ini dilakukan dengan melakukan gerakan *jiggling* (mengguncang) pada jarum, dengan gerakan *in-out* pelan dan terkendali. Teknik ini akan menyebabkan *tissue* pada area target di sekitar bagian tip ikut bergerak. Akan tetapi perlu diperhatikan bahwa pergerakan *tissue* di sekitar bagian tip dapat pula menjalar ke bagian batang jarum, sehingga akan lebih sulit untuk mendeteksi bagian tip secara akurat, terutama jika digunakan teknik penusukan OOP (*out of plane*). Oleh karena itu, gerakan *jiggling* harus dilakukan dengan sangat teliti dan hati-hati.

d.2. Hydrolocation

Metode ini dilakukan dengan menyuntikkan sedikit cairan (0,5-1 ml) secara cepat ke area target. Penyuntikkan ini dapat membantu dokter untuk mengetahui lokasi tip berdasarkan pergerakan *tissue* yang terjadi serta penampakan akumulasi cairan di sekitar tip yang berperan sebagai *small anechoic "pocket"*. Cairan yang digunakan biasanya berupa obat anestesi (jika prosedur yang dilakukan untuk tujuan pembiusan) atau dextrose 5%.

d.3 Microbubble Injection

Microbubble atau gelembung udara berukuran mikro bersifat sangat *echogenic* (mampu memantulkan kembali gelombang ultrasonik dengan sangat baik), sehingga sering digunakan sebagai *ultrasonic contrast agent*. Seperti halnya teknik *hydrolocation*, penyuntikan *microbubbles* dilakukan untuk mengetahui lokasi tip jarum. Teknik ini memiliki beberapa kekurangan, antara lain kualitas citra yang tidak terlalu baik, karena *microbubble* dapat menyebabkan *acoustic shadowing* sehingga mengaburkan area target. *Acoustic shadowing* terjadi ketika objek yang memiliki koefisien attenuasi lebih tinggi dibandingkan *tissue* di sekitarnya menyebabkan *tissue* yang terletak lebih dalam akan tampak jauh lebih tidak *echogenic* (jauh lebih gelap) dibandingkan seharusnya.

7. IMPLEMENTASI PENELITIAN

Secara umum, implementasi dari penelitian ini dapat berupa rekomendasi prosedur dalam praktik klinis yang diberikan kepada praktisi/dokter. Dalam rekomendasi ini akan dijelaskan "*dead area*" tertentu yang harus dihindari, sudut-sudut penusukan optimal, atau jenis-jenis jarum tertentu yang direkomendasikan untuk kasus tertentu pula, agar diperoleh visibilitas jarum yang optimal. Visibilitas jarum yang optimal diharapkan mampu meningkatkan performansi dari *minimally invasive interventional procedure* yang dilakukan, yang terukur dari peningkatan kecepatan prosedur, waktu *onset* pemblokan saraf, *safety* yang ditinjau dari risiko kesalahan penusukan, serta kenyamanan pasien dan biaya. Implementasi lebih lanjut berupa rancangan jarum-jarum *echogenic* yang lebih efektif dan ekonomis.

Selain kedua implementasi tersebut, khususnya di Indonesia, hasil penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran secara lebih terperinci dan terbuka tentang aplikasi ultrasonik dalam pencitraan medis. Sehingga diharapkan di masa yang akan datang, akan terjalin kerja sama yang lebih solid antara para peneliti di bidang keteknikan/*engineering* dan peneliti di bidang kedokteran maupun para dokter yang memfokuskan diri pada praktik klinis. Pada akhirnya, masyarakat luas juga bisa lebih mengenal dan lebih bijak dalam memanfaatkan teknologi ultrasonik untuk

keperluan medis, sehingga dapat meminimalkan risiko yang terjadi akibat berbagai kesalahpahaman dan ketidaktahuan mengenai teknologi ini.

8. ARAH PENGEMBANGAN PENELITIAN DI MASA DEPAN

Untuk menjawab tantangan-tantangan ke depan, bidang penelitian ini perlu lebih ditingkatkan menuju aplikasi klinis yang lebih spesifik. Sampai saat ini, keterbatasan-keterbatasan yang masih ditemui oleh para dokter juga belum sepenuhnya terjawab. Di lain pihak, teknologi peralatan *invasive* yang digunakan dalam *minimally invasive interventional procedure* semakin berkembang, sehingga perlu dibarengi pula dengan peningkatan baik dari segi teknologi pencitraannya maupun metode-metode lain untuk meningkatkan visibilitas peralatan *invasive* tersebut. Sebagai contoh, aplikasi klinis spesifik dari *minimally invasive interventional procedure* dengan metode pencitraan ultrasonik yang belum terlalu banyak diteliti adalah *central venous catheter* (CVC).

9. KESIMPULAN DAN MOTIVASI

Melihat perkembangan teknologi kedokteran yang amat pesat yang terjadi dalam beberapa dekade terakhir ini, maka dirasa semakin penting untuk memperkuat sektor-sektor penelitian di tanah air. Indonesia memiliki potensi pasar yang sangat besar, sehingga pemenuhan kebutuhan dalam negeri harus menjadi fokus utama terlebih dahulu, sehingga kita tidak terus menerus tergantung kepada pasokan impor dari negara lain. Kita dapat memulai dari teknologi-teknologi yang lebih sederhana, misalnya modifikasi jarum *echogenic* yang ekonomis, yang dapat kita rintis sedikit demi sedikit.

Saat ini, generasi muda Indonesia yang tersebar di berbagai penjuru dunia, berada dalam fase penyerapan teknologi dan semangat kemajuan dari negara-negara yang sudah lebih dahulu unggul dalam peradaban dunia. Tantangan-tantangan yang datang silih berganti dalam dunia penelitian menuntut kerja keras, ketekunan, dan kesabaran yang terus menerus. Di samping itu, yang tidak kalah penting adalah kesadaran akan tanggung jawab untuk membangun dan memajukan tanah air. Sehingga di masa yang akan datang, bangsa Indonesia akan mampu tampil bersaing sebagai bangsa yang maju di kancah internasional.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada Direktorat Pendidikan Tinggi, Kementrian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi, Republik Indonesia atas Beasiswa Unggulan Luar Negeri yang diterima penulis. Penelitian ini juga tidak akan terwujud tanpa bimbingan dan dukungan penuh dari Prof. Dr.-Ing. Georg Schmitz, Dr.-Ing. Stefanie Dencks (Chair of Medical Engineering, Ruhr Universität Bochum), dan Dr.-med. Tim Maecken (Bergmannsheil Hospital Uni-klinikum, Ruhr Universität Bochum)

*korespondensi : hesty.billiton@gmail.com

REFERENSI

[1] Armstrong G, Cardon L, Vilkomerson D, Lipson D, Wong J, Rodriguez LL, Thomas JD, Griffin BP. Localization of needle tip with color Doppler during pericardiocentesis: In vitro validation and initial clinical application. *J Am Soc Echocardiogr* 2001;14:29-37.

[2] Baker JA, Soo MS, Mengoni P. Sonographically guided percutaneous

interventions of the breast using a steerable ultrasound beam. *AJR Am J Roentgenol* 1999;172:157-159.

[3] Bergin D, Pappas JN, Hwang JJ, Sheafor DH, Paulson EK. Echogenic polymer coating: Does it improve needle visualization in sonographically guided biopsy? *American Journal of Roentgenology* 2002;178:1188-1190.

[4] Bosley Jr RW, Thomson PG, Thomas LF. Echogenic devices material and method. *US Patent* Jan 21, 1992;51081:997.

[5] Bradley MJ. An in-vitro study to understand successful free-hand ultrasound guided intervention. *Clin Radiol* 2001;56:495-498.

[6] Chin KJ, Perlas A, Chan VWS, Brull R. Needle visualization in ultrasound-guided regional Anesthesia: Challenges and solutions. *Reg Anesth Pain Med* 2008;33:532-544.

[7] Cohnen M, Saleh A, Lüthen R, Bode J, Mödder U. Improvement of sonographic needle visibility in cirrhotic livers during transjugular intrahepatic portosystemic stent-shunt procedures with use of realtime compound imaging. *J Vasc Interv Radiol* 2003;14:103-106.

[8] Culp WC, McCowan TC, Goertzen TC, Habbe TG, Hummel MM, LeVeen RF, Anderson JC. Relative ultrasonographic echogenicity of standard, dimpled, and polymeric-coated needles. *J Vasc Interv Radiol* 2000;11:351-358.

[9] De Korte CL, Weijers G, Vriezema DM, Keereweer AR, Thijssen JM, Hansen HHG. Quantitative analysis of coated needles for ultrasound guided intervention. *IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings* 2011;1571-1574.

[10] Deam RK, Kluger R, Barrington MJ, McCutcheon CA. Investigation of a new echogenic needle for use with ultrasound peripheral nerve blocks.Anaesth Intensive Care 2007;35:582-586.

[11] Department of Health, Social Services and Public Safety. (2007). NICE Interventional Procedures Programme. Retrieved July 14, 2014, from http://www.dhsspsni.gov.uk/interventional_procedures

[12] Dhir S, Ganapathy S. Use of ultrasound guidance and contrast enhancement: A study of continuous infraclavicular brachial plexus approach. *Acta Anaesthesiol Scand* 2008;52:338-342.

[13] Feinglass NG, Clendenen SR, Torp KD, Wang RD, Castello R, Greengrass RA. Real-time 3-dimensional ultrasound for continuous popliteal blockade: A case report and image description. *Anesth Analg* 2007;105:272-274.

[14] Feld R, Needleman L, Goldberg BB. Use of needlevibrating device and color Doppler imaging for sonographically guided invasive procedures. *AJR Am J Roentgenol* 1997;168:255-256.

[15] Foxall GL, Hardman JG, Bedforth NM. Three-dimensional, multiplanar, ultrasound-guided, radial nerve block. *Reg Anesth Pain Med* 2007;32:516-521.

[16] Gray AT. Ultrasound-guided regional anesthesia: Current state of the art. *Ansthesiology* 2006;104: 368-373.

[17] Hamper UM, Savader BL, Sheth S. Improved needletip visualization by color Doppler sonography. *AJR Am J Roentgenol* 1991;156:401-402.

[18] Harmat A, Rohling RN, Salcudean SE. Needle tip localization using stylet vibration. *Ultrasound Med Biol* 2006;32:1339-1348.

[19] Jones CD, McGahan JP, Clark KJ. Color Doppler ultrasonographic detection of a vibrating needle system. *J Ultrasound Med* 1997;16:269-274.

[20] Joseph AE, Kellar EJC, Tavakoli SM, Nassiri D. Enhanced visualisation of devices for ultrasound guided interventional procedures. *Annual Meeting of British Ultrasound Society* 1999.

[21] Joseph EA. Instrument having enhanced ultrasound visibility. *International Patent* No WO 98/18387.

[22] Kellar EJ, Tavakoli SM. Ultrasound detectable instrument. *International Patent* Nov 9 2000;No WO 00/66004

[23] Kort A, Kronzon I. Microbubble formation: In vitro and in vivo observation. *J Clin Ultrasound* 1982;10:117-120.

[24] Lawrence P. Instrument having enhanced ultrasound visibility. *European Patent Application* 4/5/1994;0624342:A1

[25] Longo JM, Bilbao JI, Barettino MD, Larrea JA, Pueyo J, Idoate F, deVilla VH. Percutaneous vascular and nonvascular puncture under US guidance: Role of color Doppler imaging. *Radiographics* 1994;14:959-972.

[26] Maecken T, Zenz M, Grau T. Ultrasound characteristics of needles for regional anesthesia. *Reg Anesth Pain Med* 2007;32:440-447.

[27] Marhofer P, Chan VW. Ultrasound-guided regional anesthesia: Current concepts and future trends. *Anesth Analg* 2007;104:1265-1269.

[28] Matalon TA, Silver B. US guidance of interventional procedures. *Radiology* 1990;174:43-47.

[29] Nichols K, Wright LB, Spencer T, Culp WC. Changes in ultrasonographic echogenicity and visibility of needles with changes in angles of insonation. *J Vasc Interv Radiol* 2003;14:1553-1557.

[30] Perlas A. A concerning direction: In response. *Anesthesiology* 2004;100:1326-1327.

[31] Schafhalter-Zoppoth I, McCulloch CE, Gray AT. Ultrasound visibility of needles used for regional nerve block: An in vitro study. *Reg Anesth Pain Med* 2004;29:480-488.

[32] Sites BD, Brull R, Chan VW, Spence BC, Gallagher J, Beach ML, Sites VR, Hartman GS. Artifacts and pitfall errors associated with ultrasound-guided regional anesthesia. Part I: Understanding the basic principles of ultrasound physics and machine operations. *Reg Anesth Pain Med* 2007;32:412-418.

[33] Takatani J, Takeshima N, Okuda K, Oyama Y, Uchino T, Noguchi T. New ultrasound software delineates the needle brightly even at the angle of 60 degrees. *European Journal of Anesthesiology* 2011;28:42.

[34] Taylor KJ, Holland S. Doppler US. Part I. Basic principles, instrumentation, and pitfalls. *Radiology* 1990;174:297-307.

[35] Toronto general Hospital Department of Anesthesia, Perioperative Interactive Education. Needling Techniques. Retrieved November 18, 2013, from http://pie.med.utoronto.ca/OBAnesthesia/OBAnesthesia_content/OBA_needling_module.html

[36] Tsui BC, Kropelin B, Ganapathy S, Finucane B. Dextrose 5% in water: Fluid medium for maintaining electrical stimulation of peripheral nerves during stimulating catheter placement. *Acta Anaesthesiol Scand* 2005;49:1562-1565.

[37] Ultrasonix. (00.050.134, Rev. A). Transducer Product Specification Sheet.

[38] Zhuang B, Dickie K, Pelissier L. Adaptive spatial compound imaging for needle visualization. *IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings* 2011;1989-1992.

APLIKASI MOLEKULER DALAM MENDUKUNG PEMULIAAN BIBIT UNGGUL BERBASIS SUMBER DAYA ITIK LOKAL

Irma*

*Direktorat Perbibitan dan Produksi Ternak, Direktorat Jenderal Peternakan dan Kesehatan Hewan, Kementerian Pertanian, Indonesia

ABSTRAK

Indonesia memiliki keanekaragaman itik yang telah ditetapkan sebagai rumpun. Optimalisasi dan eksplorasi sumber daya ternak itik tersebut dapat dilakukan dengan meningkatkan mutu genetik melalui aplikasi pemuliaan ternak baik melalui seleksi, persilangan, maupun perpaduan antara keduanya. Itik persilangan pekin dan mojosari putih menjadi salah satu contoh manfaat dari pemuliaan ternak untuk menghasilkan bibit unggul. Aplikasi MAS (*Marker Assisted Selection*) untuk mendukung pemuliaan ternak perlu dirintis sebagai jawaban dari perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang sedang berkembang. Konsep pemuliaan berbasis konservasi dan pewilayahan dapat menjadi solusi untuk memanfaatkan keanekaragaman itik tanpa meninggalkan upaya pelestarian. Diharapkan dengan upaya pemuliaan tersebut, ternak-ternak itik di Indonesia dapat menjadi salah satu andalan sebagai sumber variasi pemenuhan konsumsi protein hewan.

Kata kunci*:* *daging, telur, itik, molekuler, pemuliaan, marker assisted selection,*

NOMENKLATUR

MAS : *Marker Assisted Selection*
PMp : Pekin Mojosari Putih
FCR : *Feed Convertion Ratio*
BBPB : Bobot Badan Pertama Bertelur
HBR : Heritabilitas Bobot Telur
HBS : Heritabilitas Bobot Tetas
UB : Umur Bertelur
DT : Daya Tetas
BT : Bobot Telur
IT : Indeks Telur
DOD : *Day Old Duck*
GWAS : *Genome Wide Association Study*

PENDAHULUAN

Ternak itik yang dibudidayakan dan tersebar di berbagai kepulauan di nusantara adalah tipe itik petelur dengan karakteristik bertubuh kecil, ramping dan perototan rendah. Seiring dengan diversifikasi produk dari ternak itik, permintaan akan daging itik pun semakin meningkat. Saat ini, pemenuhan daging itik tersebut mengandalkan impor dan ternak lokal betina maupun jantan yang memiliki pertumbuhan lambat. Ketergantungan terhadap impor maupun pemotongan itik-itik petelur produktif akan berdampak pada sektor ekonomi maupun kelestarian dari sumber daya ternak lokal.

Alternatif solusi bijak yang dapat dilakukan yakni dengan memanfaatkan keanekaragaman sumber daya itik yang dimiliki untuk disilangkan dengan jenis itik pedaging dari luar, dengan menyinergikan pewilayahan yang jelas dan upaya konservasi dari galur murni (*pure line*). Upaya seleksi, persilangan, maupun perpaduan keduanya dilakukan pada itik petelur lokal, dalam hal ini mojosari putih, dengan itik pedaging dari luar yakni itik pekin. Itik persilangan pekin mojosari putih (PMp) berpotensi menjadi galur induk itik pedaging dengan produksi telur yang tinggi. Induk itik pedaging dengan produksi telur yang tinggi sangat diperlukan dalam

mendukung peternakan unggas. Hal dikarenakan telur fertil yang dihasilkan akan ditetaskan untuk memproduksi DOD (*Day Old Duck*) atau meri sebagai komponen utama budidaya.

Saat ini berkembang teknologi yang mampu mempercepat proses seleksi dalam pemuliaan yang memberikan waktu yang cepat, efisien, dengan biaya relatif murah, yang disebut dengan seleksi berbasis marka penanda molekuler atau *Marker Assisted Selection* (MAS). Melalui *screening* gen-gen kandidat yang mengontrol sifat tertentu, maka keunggulan genetik dari suatu individu ternak dapat diketahui sejak dini. Hal ini tentu saja akan memotong biaya dan waktu yang lama pada seleksi-seleksi dengan periode panjang seperti produksi daging dan produksi telur pada unggas, atau sifat-sifat produksi susu pada mamalia.

Upaya menyeleksi itik persilangan PMp telah dilakukan oleh para peneliti di Balai Penelitian Ternak Ciawi berbasis data fenotipik baik itu bobot badan, produksi telur maupun usia dewasa kelamin. Variasi produksi antar individu masih terdapat pada itik persilangan PMp tersebut. Induk dengan produksi telur yang rendah akan menghasilkan jumlah calon meri tetas pedaging yang rendah. Aplikasi MAS, dalam hal ini marka gen prolaktin sebagai gen kandidat, pertama kali diterapkan oleh Balitnak pada ternak ayam kampung di tahun 2005. Gen prolaktin yang secara spesifik mengontrol variasi jumlah produksi telur melalui reduksi biosintesis telur selama periode mengeram. Ayam dengan sifat mengeram akan berhenti berproduksi dan menjadikan sistem usaha budidaya inefisien. Pengetahuan karakteristik genetik ayam yang mengeram atau tidak dapat diketahui sejak dini melalui MAS sehingga efisiensi usaha dapat dilakukan. Upaya untuk mendukung seleksi itik persilangan PMp dapat dilakukan dengan memanfaatkan MAS tersebut dengan pendekatan gen yang sama. Hal ini sangat mendukung untuk ketersediaan data bioinformatik mengenai keragaman gen prolaktin pada itik lokal yang sampai saat ini masih belum tersedia.

Upaya membantu ketepatan seleksi secara molekuler pada itik PMp melalui pendekatan gen prolaktin dapat mempercepat program seleksi yang sedang dilaksanakan oleh Balitnak. Hal ini penting untuk dilakukan mengingat penelitian pendahuluan MAS dapat membantu kegiatan seleksi pada sifat-sifat dengan nilai heritabilitas rendah seperti pada produksi telur. Penelitian ini disusun dalam rangka mengidentifikasi keberadaan polimorfisme gen prolaktin ekson dua, produksi telur, dan kualitas telur pada itik persilangan PMp generasi kelima serta menelusuri sumber keragaman yang berasal dari kedua tetuanya. Studi literatur berbagai penelitian sebelumnya yang berkaitan dilakukan sebagai bahan komparasi. Harapan dari penelitian ini yakni tersedianya bioinformasi dari ternak itik lokal mojosari, itik persilangan PMp dan pekin. Lebih jauh, analisis asosiasi dari keragaman genetik yang diperoleh dapat diteliti untuk melihat hubungannya dengan sifat yang diekspresikan melalui pendekatan *Genome Wide Association Study* (GWAS). Sistem seleksi berbasis penanda genetik atau MAS dapat bermanfaat dalam mendukung seleksi yang selama ini telah dilakukan.

PEMBAHASAN

1. Bermodalkan Keanekaragaman

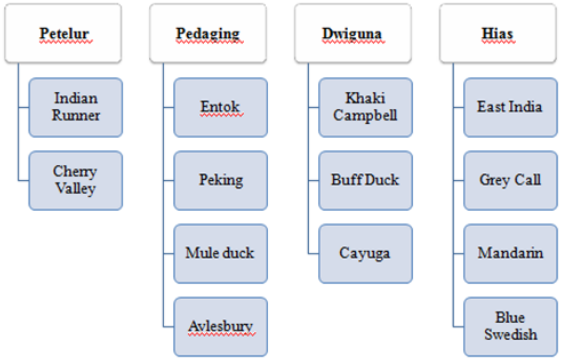
Sebagai negara kaya dalam biodiversitas, Indonesia memiliki kekayaan alam dalam hal keragaman genetik termasuk di dalamnya adalah sumber daya

tumbuhan dan hewan. Salah satu keanekaragaman tersebut yaitu ternak itik. Hingga saat ini tercatat telah sepuluh jenis itik yang ditetapkan sebagai rumpun oleh pemerintah melalui keputusan Menteri Pertanian Republik Indonesia. Kesepuluh rumpun tersebut diantaranya adalah itik alabio, itik mojosari, itik pegagan, itik rambon, itik talang benih, itik tegal, itik pitalah, itik kerinci, itik magelang dan itik bayang. Selain dari itik yang telah ditetapkan sebagai rumpun, masih terdapat jenis itik lain yang tersebar di berbagai daerah seperti itik bali, itik ambarawa, itik solo, itik turi, dan itik cihateup (Gambar 1).

Gambar 1. Macam-macam rumpun itik lokal (Sumber: bibit.ditjenak. pertanian.go.id)

Penetapan itik tersebut ke dalam sebuah rumpun didasarkan atas keseragaman bentuk fisik dan komposisi genetik serta kemampuan adaptasi yang baik pada keterbatasan lingkungan. Perlu diketahui bahwa ternak itik merupakan salah satu jenis ternak lokal dan bukan merupakan ternak *indigenous* Indonesia seperti ayam kampung. Crawford [1] menyatakan bahwa itik yang banyak dibudidayakan di seluruh dunia termasuk di Indonesia merupakan hasil domestikasi dari itik liar atau *wild mallard*. Itik liar tersebut memiliki ciri-ciri diantaranya warna bulu penutup tubuh cokelat, warna kepala hijau, warna paruh dan kaki kuning, serta bulu sayap berwarna biru. Cherry dan Morris [2] mengatakan bahwa itik liar tersebut didomestikasi sejak 40.000-10.000 tahun yang lalu pada zaman Neolitikum.

Berdasarkan ciri morfologi tubuh, itik yang tersebar di berbagai wilayah di nusantara termasuk ke dalam tipe itik petelur (*layer*). Karakteristik yang mencolok dari itik petelur yakni tubuhnya seperti botol dengan perototannya yang kecil. Itik petelur tersebut merupakan keturunan dari itik pelari atau *indian runner* [2]. Di Indonesia, itik telah beradaptasi dengan lingkungan tropis dan telah dipelihara sejak lama. Hal tersebut terlihat dari penamaan itik yang disesuaikan dengan nama daerah masing-masing seperti yang dipaparkan sebelumnya. Berdasarkan fungsi dan kegunaannya, jenis itik diklasifikasikan sebagai itik petelur, itik pedaging, itik dwiguna, dan itik hias atau ornamental (Gambar 2).

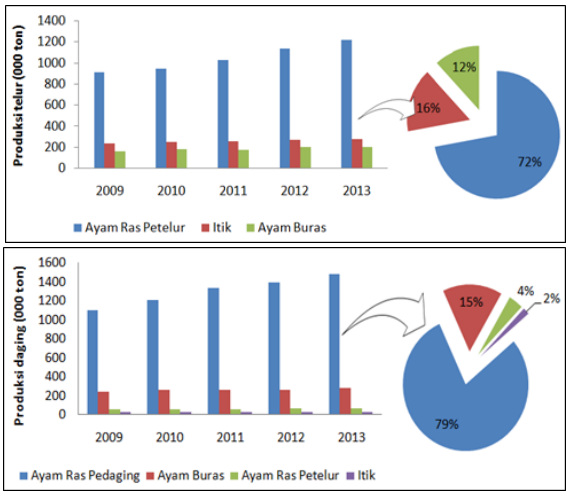


Gambar 2. Jenis itik berdasarkan fungsinya

2. Fungsi Ternak Itik

Itik banyak dibudidayakan untuk dimanfaatkan telurnya. Salah satu produk yang terkenal dan banyak digemari oleh masyarakat dari telur itik yakni telur asin. Hal ini wajar mengingat tipe itik di Indonesia pada umumnya adalah tipe petelur. Data dari Direktorat Peternakan

dan Kesehatan Hewan [3] menunjukkan bahwa kontribusi ternak itik dalam produksi total telur nasional tahun 2013 yakni 16% menduduki urutan kedua setelah ayam ras petelur (*layer*). Adapun produksi daging itik tahun 2013 menyumbang 2% dari total produksi daging unggas nasional, yang posisinya berada dibawah urutan keempat setelah ayam ras pedaging (*broiler*), ayam lokal, dan ayam ras petelur (*layer*).

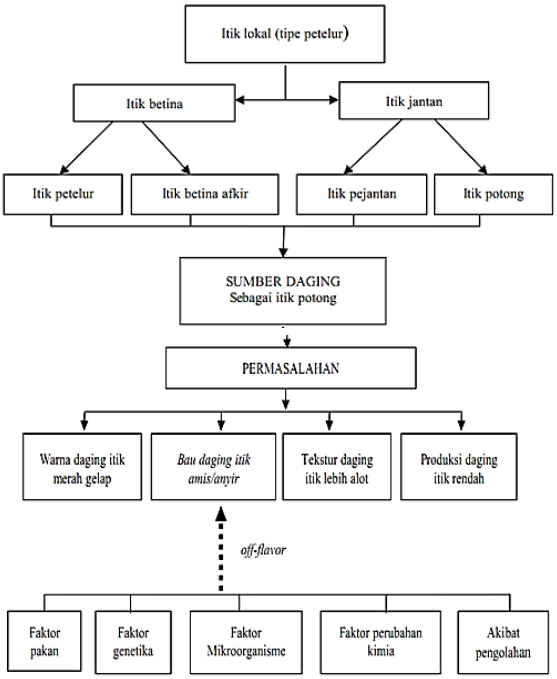


Gambar 3. Produksi daging dan telur unggas (Data diolah dari Statistik Peternakan)

Itik dikategorikan sebagai unggas air karena tingkah laku yang lebih banyak dihabiskan di perairan. Sistem rangka mendukung bagi itik untuk dapat mengapung di permukaan air. Bulu itik yang kedap air merupakan komoditas yang dapat dimanfaatkan untuk pembuatan bulu pada *shuttlecock* badminton maupun isi bantal. Selain telur dan bulu, produk lain yang dapat dimanfaatkan dari ternak ini yaitu daging. Konsumen kurang menyukai daging itik karena sifatnya yang amis (*off-flavor*). Kandungan lemak yang tinggi, terutama asam-asam lemak tidak jenuh memberikan kecenderungan aroma amis daging untuk menghasilkan *off-flavor*. Hustiani [4] melaporkan bahwa oksidasi asam lemak berkontribusi menyebabkan amis daging itik.

Permasalahan ternak itik sebagai penghasil daging selain dari aroma adalah warna dan tekstur. Daging itik memiliki warna yang lebih gelap dengan tekstur yang lebih alot dibandingkan dengan daging ayam broiler. Lawrie [5] menyatakan bahwa perbedaan warna daging pada unggas disebabkan oleh kadar pigmen daging (myoglobin), pigmen darah (hemoglobin) dan komponen lain seperti protein, lemak, vitamin B_{12} dan flavin. Mioglobin dan hemoglobin dalam daging menjadi faktor yang mempercepat laju oksidasi lemak yang dapat menyebabkan ketengikan dan off-flavor. Seiring berkembangnya teknologi pakan dan pangan, upaya menghilangkan bau dapat diminimalisir dengan pengolahan dan manajemen pakan

Selama ini kebutuhan daging itik menurut Matitaputty *et al.* [6], dipenuhi dari itik petelur afkir dan itik pejantan (Gambar 4). Konsumsi daging unggas nasional masih didominasi oleh ternak ayam ras pedaging (*broiler*). Hal ini disebabkan industrialisasi ayam ras (*layer* dan *broiler*) yang sangat maju berkembang dibandingkan jenis ternak unggas lain. Seiring perkembangan diversifikasi produk dari ternak itik, permintaan terhadap daging itik pun semakin meningkat dan hal ini tidak diimbangi dengan suplai yang memadai. Beragam aneka daging olahan itik seperti *plum duck, duck balls, steam duck, tasty duck, pot cooked duck* dan bebek cina disajikan di pusat-pusat kuliner, namun itik yang digunakan adalah itik pekin impor [6]. Pemerintah pun membuka keran impor untuk memenuhi kebutuhan tersebut.

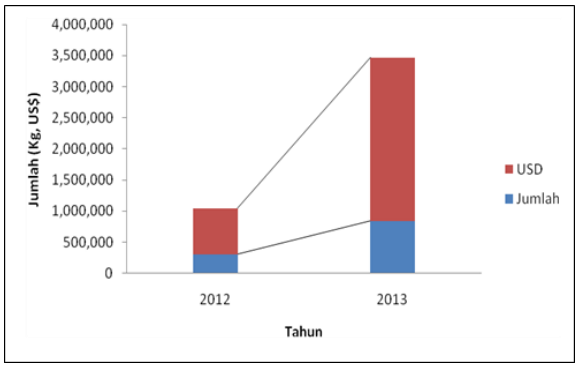


Gambar 4. Permasalahan dan faktor yang berkaitan dengan flavour daging itik [6]

Berdasarkan data ekspor-impor Kementan, Malaysia merupakan negara asal importir terbesar untuk daging itik ke Indonesia dalam kurun tahun 2012-2014. Sekitar hampir 1.300 ton daging itik diimport dari negara tersebut. Jumlah tersebut senilai dengan 2.885.772 US$ atau hampir setara dengan 31 miliar. Prancis dan Amerika merupakan negara kedua dan ketiga yang mengimpor daging itik tersebut ke Indonesia. Selain mengimport dagingnya, negara Belanda pernah mengimpor ternak itik hidup ke Indonesia. Penelusuran lebih data ekspor-import di *website* Kementerian Pertanian, tidak tersedia data ekspor daging itik ke negara lain.

3. Peluang dan Tantangan Pemuliaan

Pemaparan diatas menunjukkan bahwa di satu sisi Indonesia memiliki keanekaragaman ternak sebagai sebuah sumber daya namun di sisi lain negara kita tidak mampu memenuhi kebutuhan tersebut. Alternatif solusi yang dapat dilakukan untuk jangka panjang yaitu pemuliaan ternak itik. Hal ini penting dilakukan untuk menghindari pemotongan itik betina produktif atau terus menerus bergantung kepada impor. Faktor lainnya selain dari importasi daging itik yakni upaya pencegahan penyebaran penyakit unggas yang bersifat zoonosis. Tahun 2013, Pemerintah memberlakukan penghentian pemasukan produk daging unggas dari Republik Rakyat Cina ke Indonesia dalam mencegah mewabahnya virus flu burung atau *Avian Influenza* (AI). Keputusan tersebut dituangkan dalam Peraturan Menteri Pertanian Nomor 44/Permentan/OT.140/4/2013. Namun selang setahun kemudian pemerintah membuka kembali keran impor pemasukan daging unggas tersebut melalui Peraturan Menteri Pertanian Nomor 69/Permentan/OT.140/5/2014. Importasi daging itik dari Malaysia menjadi solusi jangka pendek.

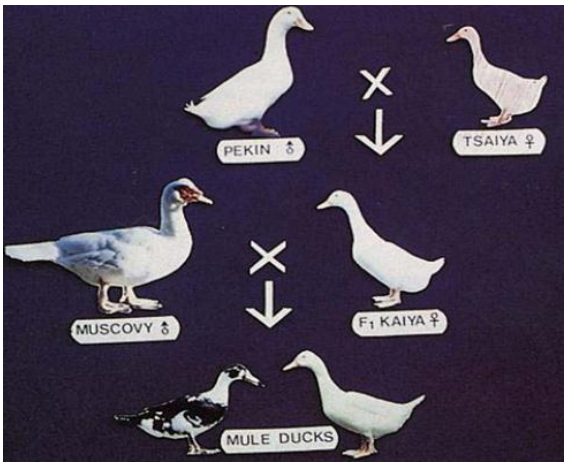


Gambar 5. Data impor daging itik dan nilai impor (Data diolah dari data ekspor-impor)

Upaya pemuliaan ternak yakni dengan menyeleksi itik lokal yang merupakan itik petelur dapat diarahkan ke itik pedaging. Hal ini tentu membutuhkan waktu lama karena perbedaan tipe itik. Prasetyo dan Susanti [7], menyatakan bahwa itik petelur lokal pada umur pertama

bertelur (±176 hari) mencapai bobot badan 1.6 kg sedangkan Tai *et.al* [8] melaporkan bahwa itik pedaging mencapai bobot hampir 3 kg pada umur 140 hari. Susanti [9] melaporkan bahwa itik lokal masih memiliki sifat bulu meranggas (*molting*) di fase awal produksi dengan periode ranggas lama (*early and slow molting*) dibandingkan itik pedaging yang meranggas di akhir periode produksi dengan waktu singkat (*late and rapid molting*). Hal ini menjadi kendala dalam membentuk tipe itik yang akan dijadikan induk (*parent stock*) untuk menghasilkan telur tetas bagi produksi DOD itik pedaging.

Alternatif solusi lain yakni dengan pendekatan kombinasi seleksi dan persilangan (*cross breeding*). Persilangan dapat memanfaatkan jenis itik lokal yang berproduksi tinggi dengan itik pedaging yang teruji pertumbuhannya. Riset serupa telah dilakukan Taiwan melalui *Taiwan Livestock Research Institute* (TLRI) untuk meningkatkan produksi daging itik dari ternak lokal yaitu itik Tsaiya. Itik Tsaiya putih dipilih untuk menghasilkan karkas yang bersih. Tsaiya putih disilangkan dengan itik pedaging unggul Pekin untuk menghasilkan galur induk pedaging itik Kaiya putih. Persilangan dilakukan secara terarah untuk menguji kestabilan produksi telur dan daging. Riset dilanjutkan dengan menyilangkan Kaiya putih dengan spesies entok putih (*Chairina moschata*) untuk menghasilkan ternak hibrid baru *mule duck*. Di Indonesia, istilah *mule duck* dikenal dengan serati atau tiktok (persilangan itik dan entok).



Gambar 6. Skema persilangan itik di TLRI, Taiwan

4. Pemuliaan Ternak Itik di Indonesia

Balai Penelitian Ternak Ciawi melakukan riset dalam rangka meningkatkan produksi daging itik lokal. Upaya yang dilakukan serupa dengan *Taiwan Livestock Research Institute* yakni dengan menyeleksi dan menyilangkan itik lokal Mojosari putih dengan itik pekin. Warna bulu putih itik Mojosari digunakan untuk menghasilkan karkas yang bersih dan putih. Saat penelitian ini dilakukan generasi itik persilangan PMp telah mencapai generasi kelima yang diperoleh dari hasil persilangan *interse*. Sistem perkawinan tersebut dipilih untuk program pemantapan galur karena sistem *inbreeding* secara tidak langsung akan meningkatkan frekuensi gen-gen menjadi homozigot. Hartl [10] menyatakan bahwa pada setiap individu normal terdapat dua alel pada lokus apapun yang menunjukkan pasangan dari maternal dan paternal. Gen-gen pada sebuah lokus di kromosom ternak yang homozigot memiliki sekuens nukleotida penyusun DNA yang identik secara kimia. Hal tersebut memberikan manfaat positif yakni menurunkan tingkat keragaman (heterozigositas). Keberagaman terjadi karena gen-gen pada lokus di kromosom memiliki sekuens nukleotida penyusun

DNA yang berbeda secara kimiawi. Faktor keseragaman (*uniformity*) sangat penting dalam efisiensi usaha maupun manajemen budidaya seperti pemberian pakan dan pengaturan densitas.

Berdasarkan studi literatur, penelitian sebelumnya di tahap pertama dilakukan dengan menyeleksi galur itik yang akan dijadikan induk (*pure line*) yakni mojosari putih. Hasil penelitian Suparyanto *et al*. [11a] memperlihatkan tidak terdapat perbedaan produksi dan kualitas telur baik itik mojosari putih maupun itik mojosari cokelat. Hal ini menunjukkan bahwa itik berwarna putih tidak bersifat inferior. Warna putih merupakan sifat yang muncul dari gen-gen pengontrol warna dalam kondisi homozigot dan resesif (*cc*). Gen inhibitor yang menghambat munculnya warna pada itik tertutup ekspresinya karena aksi gen yang bersifat epistatis resesif [11b]. Ternak itik Mojosari putih merupakan jenis minoritas di tengah-tengah itik cokelat yang dominan. Warna cokelat dapat muncul dalam kondisi homozigot dominan (*CC*) atau heterozigot (*Cc*).

Gambar 7. Itik persilangan pekin dan mojosari putih (Sumber gambar : lokasi riset di Balitnak)

Setelah didapat pola pewarisan warna dan evaluasi produksi-kualitas telur, studi literatur menunjukkan bahwa riset dilanjutkan dengan menyilangkan itik mojosari putih dengan itik pekin jantan. Pemilihan tetua betina didasarkan pada sifat produksi telur yang diharapkan muncul. Peningkatan bobot badan, peningkatan bobot telur, dan usia masak kelamin yang lebih awal terlihat dari itik PMp generasi pertama [9b] (Tabel 1). Fenomena meningkatnya performa itik hasil persilangan dikenal dengan efek heterosis (*hybrid vigour*). Bourdon [12] menyebutkan bahwa *hybrid vigour* ini akan sangat tampak pada generasi pertama atau F_1 dan menurun pada generasi selanjutnya hingga stabil pada generasi tertentu. Dalam program persilangan komersial, keuntungan maksimal dari program persilangan diperoleh untuk sifat dengan heritabilitas atau daya waris rendah seperti sifat produksi dan reproduksi.

Tabel 1. Gambaran performans itik persilangan PMp F_1 [9b]

Parameter	Rataan + SD	Parameter	Rataan + SD
BT (g)	63.7 ± 0.8	DOD J (g)	39.7
IT (%)	76.2	DOD B(g)	40.5
FCR (2bln)	3.5-4.0	HBS	0.95
Produksi (%)	72.1± 5.6	UB (h	191.9 ± 2.7
Fertilitas (%)	92.5	BBPB (g)	2277.08 ± 18.0
DT (%)	59.2	HBR	0.10

5. Ranggas Bulu dan Reproduksi Itik

Hasil penelitian Irma [13] menunjukkan rata-rata persentase produksi telur itik PMp generasi kelima sebesar 67% atau sekitar 112 butir/ekor/6 bulan. Nilai ini menurun dibandingkan dengan produksi telur PMp F_1 yang mencapai 72%. Hasil riset Indriati [14] menyebutkan bahwa itik

persilangan PMp F_5 memasuki usia dewasa kelamin yang dicirikan dengan dimulainya fase bertelur (*laying*) pada usia enam bulan (± 180 hari). Peningkatan usia dewasa kelamin PMp F_5 semakin pendek dibandingkan PMp F_1 yang mencapai usia 191 hari. Penurunan produksi terjadi pada bulan ketiga yaitu pada umur itik mencapai delapan bulan sebagai tanda itik-itik akan memasuki fase ranggas bulu (*molting*). Supriyadi [15] menyatakan bahwa pada umumnya itik mengalami rontok bulu bagian dada dan pantat pada umur tujuh bulan. Hasil riset Susanti [9] melaporkan bahwa mekanisme ranggas bulu pada itik selalu diawali dengan berhentinya produksi telur yang diikuti meranggas dan kemudian berproduksi telur kembali.

Beragam ikhtisar penelitian (Tabel 2) tentang produksi telur itik persilangan yang dilakukan oleh banyak peneliti menunjukkan bahwa produksi telur PMp ini lebih tinggi dibandingkan produksi itik persilangan lainnya seperti itik persilangan pekin dengan alabio (PA) atau itik persilangan alabio dengan pekin (AP). Penelitian Ketaren *et al*. [16] menunjukkan bahwa itik persilangan mojosari alabio (MA) pada waktu periode pengamatan enam bulan menghasilkan produksi telur yang lebih rendah. Itik persilangan PMp F_5 yang mengalami ranggas bulu menyebabkan produksi telur terhenti. Kejadian ranggas bulu pada itik persilangan pekin dengan alabio (PA) dan itik persilangan alabio dengan pekin (AP) sangat nyata mempengaruhi produksi telur tahunan. Itik persilangan PA dan AP yang tidak mengalami rontok bulu dapat mencapai produksi telur tahunan yang lebih tinggi dibanding itik yang sama namun mengalami rontok bulu

Tabel 2. Performans produksi telur aneka itik hasil persilangan

Jenis Itik Persilangan	Produksi	Periode	Referensi
Mojosari X Alabio	74 Butir	3 bulan PK 20%	Prasetyo dan Susanti [17]
Mojosari X Mojosari	66 Butir		
Alabio X Alabio	66 Butir		
Alabio X Mojosari	61 Butir		
Tegal X Tegal	72 Butir	12 bulan PK 14%	Prasetyo [18]
Tegal X Mojosari	75 Butir		
Mojosari X Tegal	63 Butir		
Mojosari X Mojosari	80 Butir		
Alabio X Pekin	62% *vs* 86%	6 Bulan	Susanti [9]
Pekin X Alabio	63% *vs* 73%		
PMp Putih F_5	112 (67%)	6 Bulan	Irma [13]

Fenomena ranggas bulu pada unggas merupakan peristiwa alamiah. Banyak faktor yang mempengaruhi ranggas bulu pada itik diantaranya genetik, lingkungan, dan stres. Hafez [19] menyatakan bahwa kadar hormon prolaktin yang tinggi dalam darah dapat menjadi salah satu pemicu terjadinya rontok bulu. Ramesh *et al*. [20] melaporkan bahwa kadar hormon prolaktin yang tinggi dapat menyebabkan regresi ovarium. Selain kondisi fisiologis, faktor pakan turut mempengaruhi produksi telur. Penelitian Ketaren *et al.* [21] menunjukkan bahwa produksi telur itik persilangan mojosari dengan alabio (MA) mampu berproduksi hingga 83% pada kondisi pakan *ad libitum* sedangkan pembatasan pakan 15% dan 30% menghasilkan produksi telur yang lebih rendah (64% dan 46%). Pakan yang diberikan untuk itik periode *layer* sebaiknya memiliki kandungan protein kasar (PK) minimal 15%

sesuai dengan Standar Nasional Indonesia pakan itik petelur (SNI:01-3910-2006) dan NRC *(Nutrient Requirement Council)* agar produksi telur berjalan baik.

Variasi genetik antar individu merupakan kendala lain yang sering ditemukan dalam proses menurunkan keragaman dalam program seleksi dalam pemuliaan bibit unggul. Keragaman produksi telur itik menunjukkan bahwa produksi telur antar individu masih heterogen. Produksi telur yang tinggi dengan keragaman yang rendah merupakan faktor penting dalam menyeleksi calon induk itik betina. Beragam dan tidaknya peubah pengamatan dapat dilihat dari koefisien keragaman (*coefficient of variance*) yang diperoleh dari hasil perhitungan. Kurnianto [22] menyatakan bahwa keragaman dikatakan sudah kecil apabila nilainya kurang dari 5% dan dikategorikan masih besar apabila nilainya lebih dari 15%.

Upaya mengurangi keragaman dapat diminimalisir melalui perkawinan dari pejantan dan induk itik dari generasi yang sama (*interse*). Jenis perkawinan tersebut dapat menjadi alternatif sistem seleksi pada ternak dengan interval generasi yang pendek. Sistem seleksi berdasarkan catatan keturunan (*progeny test*) akan kurang efektif manakala diterapkan pada unggas karena singkatnya interval generasi. Seleksi individu pada itik jantan dapat saja dilakukan terhadap sifat produksi telur. Namun karena sifat yang akan diseleksi terbatas dengan jenis kelamin (*sex limited*) maka ekspresinya akan tampak jelas pada ternak betina dibandingkan jantan. Di samping itu, pengaruh lingkungan uterus terhadap laju ovulasi pada ternak betina, tidak ditemukan pada ternak jantan. Noor [23] menyimpulkan bahwa pengaruh pejantan hasil persilangan sangat kecil dalam program pemuliaan.

Hasil penelitian Cheng *et al*. [24] dan Hu *et al*. [25] bahwa produksi telur itik merupakan sifat yang memiliki nilai heritabilitas atau daya waris yang rendah dengan kisaran antara 0.15-0.22. Rendahnya nilai heritabilitas tersebut menunjukkan kecilnya proporsi kontribusi genetik yang bersifat aditif akibat tingginya pengaruh lingkungan. Faktor heritabilitas yang rendah pada produksi telur dapat menjadi pendukung untuk memperkuat dilakukannya program persilangan antar kedua jenis itik yang memiliki perbedaan sifat. Pendekatan lain untuk mendukung seleksi sifat-sifat dengan heritabilitas rendah dapat melalui marka atau penanda genetik. Penelitian pengaruh gen tertentu terhadap produksi telur pada itik dilaporkan spesifik dengan pendekatan gen kandidat prolaktin (*prl*). Wang *et al*. [26] melaporkan bahwa produksi telur itik dipengaruhi oleh adanya mutasi pada gen prolaktin ekson empat. Itik mutan akibat mutasi gen prolaktin di wilayah koding protein menghasilkan produksi telur tahunan lebih tinggi yaitu 317 butir.

Ketepatan *breeder* dalam menyeleksi perlu mempertimbangkan hubungan antar sifat yang akan diseleksi apakah terdapat korelasi baik positif maupun negatif antar satu sifat dengan sifat yang lainnya. Seleksi terhadap bobot badan pada itik misalnya memiliki korelasi negatif dengan sifat produksi telur [24]. Intensitas seleksi yang tinggi terhadap bobot badan yang dilakukan pada itik pedaging telah menghasilkan itik yang memiliki pertumbuhan sangat cepat dengan produksi telur rendah. Seleksi bobot badan pada itik lokal terkendala dengan sifat itik petelur yang berproduksi tinggi namun memiliki pertumbuhan lambat dibandingkan itik pedaging. Tingginya

persentase produksi telur itik PMp F_5 merupakan kontribusi dari itik lokal petelur dan hasil persilangannya berpotensi dijadikan sebagai bibit induk (*parent stock*) pedaging. Hal ini sesuai dengan Standar Nasional Indonesia No.7557 dan No.7558 Tahun 2009, kriteria calon bibit itik induk yang baik memiliki rata-rata produksi telur minimal 60% .

6. Gen sebagai Marka Seleksi

Prolaktin merupakan hormon polipeptida rantai tunggal yang dihasilkan dari ekspresi gen prolaktin (*prl*). Gen prolaktin itik berhasil dikloning oleh Kansaku *et al.* [27]. Gen prolaktin terdiri dari lima wilayah pengkode protein (ekson) yang diapit oleh empat intron (bagian non koding protein). Hormon prolaktin disusun oleh 229 asam amino hasil translasi dari mekanisme ekspresi gen prolaktin [27]. Pada jenis unggas, hormon prolaktin berkaitan erat dengan sifat mengeram (*brooding*) pada ayam dan bulu meranggas (*molting*) pada itik. Penelitian sifat mengeram pada ayam lokal yang dikaitkan dengan prolaktin dipaparkan oleh Sartika *et al.* [28]. Adapun sifat bulu meranggas pada itik dipaparkan oleh Purba [29] dan Susanti *et al.* [30].

Ayam dengan status fisiologis mengeram akan berhenti berproduksi telur. Begitu pula dengan itik yang mengalami bulu meranggas (*molting*). Itik yang dibudidayakan telah kehilangan sifat mengeram akibat proses domestikasi. Pada umumnya peternak itik tradisional yang belum memiliki mesin tetas, menitipkan telur-telur itik pada entok agar dapat dierami dan ditetaskan. Kedua sifat tersebut merupakan sifat alamiah. Namun seiring dengan sistem seleksi yang ketat, kedua sifat tersebut sedikit demi sedikit menghilang seperti pada industri peternakan ayam petelur yang tidak mengalami mengeram (*brooding*). Bagi sisi efisiensi usaha, kedua sifat tersebut kurang menguntungkan karena ternak berhenti berproduksi telur namun manajemen pemberian pakan terus berlangsung.

Produksi sebagai sifat kuantitatif dipengaruhi oleh banyak gen (*poligen*). Bu *et al*. [31] dan Radhakrisnan *et al*. [32] menyatakan bahwa gen prolaktin, berdasarkan analisis jalur sinyal (*pathways*), memperlihatkan sistem kerja yang kompleks dan bersama-sama dengan gen lainnya seperti gen prolaktin reseptor (*prl-r*), *janus kinase* (*jak*) dan gen *signal transducing activating transcription* (*stat*) dalam mengontrol sifat-sifat tertentu. Penelitian Wang *et al.* [26] dan Wang *et al*. [33] menunjukkan bahwa gen prolaktin itik bersifat polimorfik di wilayah ekson. Namun hasil riset Irma *et.al* [34] dan Indriati *et al*. [14] menunjukkan bahwa gen prolaktin ekson dua dan ekson empat pada itik bersifat seragam (monomorfik). Situs polimorfik banyak ditemukan di wilayah intron atau non-koding. Penelusuran lebih lanjut lokasi mutasi intron menunjukkan bahwa mutasi tidak terletak pada situs-situs *splicing* baik pada bagian donor, akseptor maupun situs percabangan (*branch site*). Chorev dan Liran [35] menyatakan bahwa lokasi mutasi penting untuk diklarifikasi mengingat mutasi pada situs pemotongan (*splicing*) mempengaruhi ekspresi gen. Mekanisme yang terjadi dapat melalui pemanjangan atau pemendekan ekson atau *alternative splicing* untuk menghasilkan protein-protein yang isoform yang dihasilkan dari aktivitas translasi.

7. Pertumbuhan dan Adaptasi

Dampak positif kombinasi seleksi dan persilangan tidak hanya meningkatkan produksi telur. Sistem pemuliaan yang

terarah mampu meningkatkan sifat pertumbuhan ternak. Penulis merangkum beragam riset berdasarkan studi literatur terkait performans ketiga jenis itik yang digunakan yakni itik lokal mojosari putih, itik pekin, dan itik persilangan pekin mojosari putih generasi kelima.

Tabel 3. Perbandingan Ternak Hasil Silangan dan Tetuanya

Parameter	Jenis itik		
	Pekin	Mojosari	PMp[6]
Umur Dewasa Kelamin (hari)	191[1]	176[4]	180
Bobot Badan Dewasa (kg)	3.8[2]	1.6[5]	2.3
Produksti Telur Tahunan (%)	42[3]	87[5]	67[7]

Sumber : 1) Tai [8]; 2) Cherry dan Moris [2]; 3) Pingel [36]; 4) Prasetyo dan Susanti [37]; 5) Prasetyo dan Susanti [7]; 6) Indriati *et.al* [14]; 7) Irma [13] (Pengamatan 6 bulan)

Itik persilangan memiliki bobot badan yang meningkat dibandingkan dengan tetua itik lokal mojosari putih. Peningkatan sifat tersebut diikuti dengan peningkatan produksi telur yang lebih tinggi dibandingkan dengan produksi telur tetua itik pekin. Umur dewasa kelamin itik PMp sesuai dengan persyaratan dalam SNI No.7558-2009 yakni itik calon bibit induk sebaiknya memiliki usia dewasa kelamin minimal enam bulan. Hal penting lain untuk dipertimbangkan dalam rangka efisiensi usaha peternakan itik adalah sifat ketahanan terhadap penyakit. Seperti diketahui bahwa itik pekin merupakan itik sub-tropis yang memiliki keterbatasan adaptasi di lingkungan tropis. Persilangan dengan itik tropis menghasilkan ternak silangan yang lebih toleran baik pakan maupun suhu.

Menarik untuk pengamatan lebih jauh bagaimana sifat ketiga jenis itik tersebut dalam toleransi terhadap faktor non-klimatik seperti penyakit yang sering ditemukan pada unggas. Pendekatan fisiologis dengan mengukur titer jumlah antibodi yang dihasilkan pada tingkat paparan tertentu atau melihat ekspresi gen dapat dilakukan untuk melihat toleransi ternak unggas pada penyakit AI seperti gen *mx*. Faktor lain yang menjadi perhatian selain toleransi penyakit adalah efisiensi pakan. Nilai rasio konversi pakan itik PMp masih di atas 3.5 yang berarti dibutuhkan sekitar 3.5 kg untuk menghasilkan daging dengan berat 1 kg [9b]. Padahal tren seleksi terhadap itik Pekin pedaging telah mengalami peningkatan hingga dapat mencapai 2.5 [2].

8. Peternakan: Sinergi Industrialisasi dan Konservasi

Perkembangan sektor perunggasan yang didominasi oleh industri peternakan ayam ras masih belum memperlihatkan peningkatan konsumsi produk peternakan. Konsumsi produk peternakan tahun 2013 masih minim yaitu 3.5 kg/kapita/tahun untuk daging ayam dan 6.5 kg/kapita/tahun untuk telur ayam ras [3]. Malaysia telah mencapai konsumsi daging ayam 35 kg/kapita/tahun dan telur 14 kg/kapita/tahun. Siagian [38] menyatakan bahwa kontribusi energi dari protein hewani terhadap total energi relatif di Indonesia masih rendah yaitu 4% dan jauh dari standar FAO yang sebaiknya sekitar 15% dari total energi. Padahal diantara semua jenis protein hewani yang ada, telur dan daging ayam relatif terjangkau. Harga sekilo telur ayam ras (isi $\pm$ 16 butir) Rp 22.000/kg sedangkan harga daging ayam Rp 32.000/kg. Pola konsumsi menjadi faktor penyebab selain akses daya beli antara desa dan kota yang tidak merata.

Peningkatan konsumsi protein hewani perlu didukung dengan ketersediaan sumber

dan akses kepada pangan tersebut. Keberhasilan sektor pembibitan ayam ras dapat menjadi contoh bagaimana industrialisasi peternakan memberikan manfaat yang besar. Isu monopoli sektor pembibitan dan pola kemitraan yang "berat sebelah" menjadi bumerang yang membuat peternak mitra terombang-ambing di tengah ketidakpastian harga sarana produksi ternak. Industri global perunggasan petelur saat ini dikuasai oleh dua perusahaan raksasa PHW-Jerman dan Hendrix Genetics-Belanda. Industri ayam pedaging dikuasai oleh Aviagen, Grimaud, Cobb-Vantress dan Hybro. Gura [39] menyatakan bahwa sekitar 50% produksi telur global dan 67% daging ayam diproduksi dari sektor industrialisasi.

Lembaga Swadaya Masyarakat lebih tertarik menyoroti dampak industrialisasi terhadap pengurasan sumber daya genetik ternak, selain isu emisi gas rumah kaca. *Greenpeace* mencantumkan bahwa akselerasi pengurasan sumber daya genetik rata-rata hilang satu jenis per tahunnya [37]. Persilangan ternak menjadi isu pro-kontra yang berkontribusi dalam pengurasan sumber daya genetik. Keberlangsungan (*sustainability*) dan pelestarian sumber daya memang menjadi prioritas dari konservasi. Program pengembangan peternakan tidak perlu dibentur-benturkan dan tetap dapat dilakukan dengan pola atau skema yang terarah dan sistematis melalui pewilayahan yang jelas dan pemeliharaan galur murni. Konservasi bukan akhir cerita dari pemanfaatan sumber daya. Akan tetapi awal dari pemanfaatan agar tetap berlanjut

Keragaman memberikan arti penting untuk saling melengkapi. Keanekaragaman itik yang dimiliki merupakan modal untuk mengembangkan peternakan sub sektor perunggasan sebagai salah satu penyedia protein asal hewan. Perkembangan teknologi yang mengakselerasi kemajuan di berbagai bidang termasuk rekayasa genetik perlu disikapi dengan bijak oleh semua pihak termasuk peneliti, pemerintah, swasta, asosiasi, LSM, bahkan peternak itu sendiri.

UCAPAN TERIMAKASIH

Karya tulis ilmiah ini merupakan pengembangan hasil riset dan studi beragam literatur terkait mengenai identifikasi gen prolaktin ekson dua dan produksi telur pada itik persilangan Pekin Mojosari putih generasi kelima. Riset dilaksanakan di Kompleks Itik, Balai Penelitian Ternak Ciawi dan Laboratorium Genetika Molekuler Ternak Fakultas Peternakan IPB sejak bulan April 2013 sampai Januari 2014. Sumber dana riset dan sampel itik berasal dari Balai Penelitian Ternak Ciawi. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Balai Penelitian Ternak Ciawi atas kesempatan riset yang telah diberikan. Ucapan terima kasih disampaikan kepada Biro Perencanaan dan Kerja sama Luar Negeri, Kementerian Riset dan Teknologi – Pendidikan Tinggi (Kemenristek-Dikti) atas Beasiswa selama studi Pascasarjana di IPB.

Penulis menyampaikan terima kasih kepada pembimbing riset : Prof Dr Ir Cece Sumantri, MSc.Agr dan Dr Ir Triana Susanti, MSi. Ucapan terima kasih Penulis ucapkan kepada semua dosen khususnya di Laboratorium Genetika dan Molekuler Ternak (Prof. Dr. Ir. Muladno, MSA, Prof. Ronny Rachman Noor, M.Rur.Sc, Dr. Jakaria, SPt, MSi, Dr. Ir. Sri Darwati, MSi, Dr. Asep Gunawan, SPt, MSc.Agr, dan Erik Andreas, SPt, MSi) serta penguji Dr. Ir. Farajallah, MSi yang telah mengajarkan disiplin ilmu pemuliaan ternak. Ucapan terima kasih disampaikan kepada rekan-rekan di *Animal Breeding and Genetics Club* Fakultas Peternakan IPB, staf

Kompleks Itik Balitnak Ciawi, staf Laboratorium Puslitbangnak Bogor dan Dept. IPTP IPTP.

*korespondensi :
irma_fapetipb@yahoo.co.id

REFERENSI

[1] R.D. Crawford, "Origin and history of poultry species". In *Poultry Breeding Genetics*, R.D. Crawford, Amsterdam: Elseviers, 1993.

[2] P. Cherry P, T.R. Morris, "*Domestic Duck Production"*, London: CABI, 2008.

[3] Direktorat Peternakan dan Kesehatan Hewan, "Statistik Peternakan dan Kesehatan Hewan", Jakarta: Direktorat Jenderal Peternakan Kementrian Pertanian RI, 2013.

[4] R. Hustiany, "Identifikasi dan karakterisasi komponen *off-odou*r pada daging itik" (Tesis), Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor, Bogor, 2001.

[5] R.A Lawrie. 2003. *Ilmu Daging*. Edisi Ke-5. Penerjemah: Parakkasi, A. Penerbit UI-Press. 344 Hlm

[6] P.R. Matitaputty, Suryana, "Karakteristik daging itik dan permasalahan serta upaya pencegahan off-flavor akibat oksidasi lipida", *Wartazoa* 20(3) : 130-138, 2010.

[7] L.H. Prasetyo, T. Susanti. "Karakterisasi dan potensi plasma nutfah itik Mojosari", *Bul Plasma Nutfah* 1 (1): 35-37, 1996.

[8] C. Tai, L.J.J Tai, H.H. Huang HH, "Estimation of genetic parameters for egg quality characters in laying ducks", *J Chin Soc Anim Sci* 14: 105–110, 1985.

[9] T. Susanti, "Keterkaitan Genetis Sifat Rontok Bulu dengan Produksi Telur pada Itik Alabio dan Itik Pekin" , (Disertasi), Bogor : Institut Pertanian Bogor, 2012.

[10] D.L. Hartl. 1987. *A Primer of Population Genetics*. Sinauer : USA

[11a] A. Suparyanto, A.R. Setioko, L.H. Prasetyo, T. Susanti, "Ekspresi gen homosigot resesif (c/c) pada performans telur pertama itik Mojosari", *JITV* 10(1): 6-11, 2005a.

[11b] A. Suparyanto, "Peningkatan Produktivitas Daging Itik Mandalung melalui Pembentukan Galur Induk" (Disertasi), Bogor: Institut Pertanian Bogor, 2005b.

[12] R.M. Bourdon, "*Understanding Animal Breeding"*, New Jersey: Prentice Hall, 2000.

[13] Irma, "Identifikasi gen prolaktin ekson dua dan produksi telur pada itik persilangan pekin mojosari putih (PMp) generasi kelima", (Tesis), Bogor : Institut Pertanian Bogor, 2014.

[14] M. Indriati, C. Sumantri, T. Susanti, "Analysis of diversity prolactin gene exon 4 in Pekin, White Mojosari and Pekin Mojosari Crossbred". *Media Peternakan*, 2014.

[15] Supriyadi, "*Panduan Lengkap Itik"*, Jakarta: Penebar Swadaya, 2009.

[16] P.P. Ketaren, L.H. Prasetyo, T. Murtisari, "Karakter produksi telur pada itik silang Mojosari x Alabio", Seminar Nasional Peternakan dan Veteriner, 1999.

[17] L.H. Prasetyo, T. Susanti, "Persilangan timbal balik antara itik Alabio dan Mojosari : periode awal bertelur", *JITV* 5(4): 210-214, 2000.

[18] L.H. Prasetyo, "Heterosis of the crossbred between Tegal and Mojosari ducks under sub-optimal condition", *JITV* 12(1): 22-26, 2007.

[19] E.S.E. Hafez, "*Reproduction in Farm Animal", 6th Ed*, Philadelphia: Lea & Febiger, 2000.

[20] R. Ramesh, W.J. Kuenzel, J.A. Proudman, "Increased proliferative activity and programmed cellular death in the turkey hen pituitary gland following interruption of incubation behavior", *Reg Artie Biol Repro* 64: 611-618, 2004.

[21] P.P. Ketaren, L.H. Prasetyo, "Pengaruh pemberian pakan terbatas terhadap produksi telur itik silang Mojosari x Alabio (MA): 1. Masa bertelur fase pertama umur 20-43 minggu", *JITV* 7(1): 38-45, 2002.

[22] E. Kurnianto, "*Buku Ajar Ilmu Pemuliaan Ternak"*, Semarang : Lembaga Pengembangan dan Penjaminan Mutu Pendidikan Universitas Diponegoro, 2010.

[23] R.R Noor, "*Genetika Ternak"*, Edisi VI. Jakarta: Penebar Swadaya, 2010

[24] Y.S. Cheng, R. Rouvier, J.P Poivey, C. Tai, "Genetic parameters of body weight, egg production and shell quality traits in the Brown Tsaiya laying duck", *Genet Select Evol* 27: 459–472, 1995.

[25] Y.H. Hu, J.P. Poivey, R. Rouvier, S.C. Liu, C. Ta., "Heritabilities and genetic correlations of laying performances in Muscovy selected in Taiwan", *British Poultr Sci* 45: 180–185, 2004.

[26] C. Wang, Z. Liang, W. Yu, Y. Feng, X. Peng, Y. Gong, S. Li S, "Polymorphism of the prolactin gene and its association with egg production traits in native Chinese ducks", *S Afr J Anim Sci* 41:63-70, 2011.

[27] N. Kansaku, T. Ohkubo, H. Okabayashi, D. Guémené, U. Kuhnlein, D. Zadworny, K. Shimada, "Cloning of duck PRL cDNA and genomic DNA", *Gener Compar Endocrinol*: 39–47, 2005.

[28] T. Sartika, D. Duryadi, S.S. Mansjoer, A. Saefuddin, H. Martojo, "Gen promotor prolaktin sebagai penanda pembantu seleksi untuk mengontrol sifat mengeram pada ayam Kampung", *JITV* 9(4): 239-245, 2004.

[29] M. Purba, "Pola rontok bulu itik betina alabio (*Anas plotyrhynchos Borneo*) dan Mojosari (*Anas plarhynchos javanicus*) serta pengaruhnya terhadap lemak darah (trigliserida), produksi dan kualitas telur", (Tesis), Bogor: Institut Pertanian Bogor, 2004.

[30] T. Susanti, R.R Noor, P.S. Hardjosworo, L.H. Prasetyo, "Keterkaitan kejadian dan lamanya rontok bulu terhadap produksi telur itik hasil persilangan Pekin dengan Alabio", *JITV* 17(2): 112-119, 2012.

[31] G. Bu, C.Y. Wang, G. Cai, F.C. Leung, M. Xu, H. Wang, G. Huang, J. Li, W. Wang, "Molecular characterization of prolactin receptor (cPRLR) gene in chickens: Gene structure, tissue expression, promoter analysis, and its interaction with chicken prolactin (cPRL) and prolactin-like protein (cPRL-L)", *Mol Cell Endocrinol* 370: 149–162, 2013.

[32] Radhakrisna *et al*, "A pathway map of prolactin signaling", *J Cell Commun Sign* 6 : 169-173, 2012.

[33] S.K. Wang, X. Wu, H. Wang, A. Li, H.Y. Jia, G.Y., "Correlation analysis between nucleotide polymorphism of the prolactin exon and broodiness in ducks", *J Shanghai Jiaotong Univ* 27(4): 331-334, 2009.

[34] Irma, C. Sumantri, T. Susanti, "Single nucleotide polymorphism of prolactin gene exon two in pekin, mojosari and pekin mojosari crossbred", JITV 19(2), 2014.

[35] M. Chorev, C. Liran, "*The Function of Introns"*, Frontiers in Genetics, 2012.

[36] H Pingel, "Genetics of egg production and reproduction in waterfowl". In *Poultry Breeding and Genetics*, Crawford RD. Elsevier, Amsterdam. p.771- 780, 1990.

[37] L.H. Prasetyo, T. Susanti, "Persilangan timbal balik antara itik Tegal dan Mojosari: I. Awal pertumbuhan dan awal bertelur", *JITV* 2 (3): 152-156, 1997.

[38] V. Siagian, "Peningkatan Protein Hewani Untuk Ketahan Pangan", Dimuat dalam Harian Bisnis Indonesia, 2 Januari 2008.

[39] S. Gura, "Livestock genetics companies: Concentration and proprietary strategies of an emerging power in the global food economy", League for Pastoral Peoples and Endogenous Livestock Development, Ober-Ramstadt, Germany, 2007.

PEMODELAN DAN SIMULASI JENDELA VIRTUAL DALAM BANGUNAN

Rizki A. Mangkuto*

*Teknik Fisika, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

ABSTRAK

Dalam proses desain dan operasional bangunan, penggunaan cahaya alami sangatlah dianjurkan dari aspek estetika, kesehatan, dan energi. Akan tetapi, cahaya alami pada praktiknya terbatas oleh ruang dan waktu. Sebagai contoh, dalam ruang operasi pada rumah sakit serta ruang kendali pada pabrik, umumnya tidak ditemukan bukaan jendela, atas pertimbangan kebersihan dan keselamatan. Pada situasi-situasi tersebut, konsep 'jendela virtual', yaitu sistem yang menyediakan cahaya dan pemandangan secara virtual namun realistis, adalah sangat menjanjikan. Dengan sistem jendela virtual, terbuka kemungkinan untuk memanfaatkan luas lantai yang tadinya memiliki keterbatasan akses kepada cahaya alami. Penelitian ini bertujuan untuk memprediksi pengaruh aplikasi jendela virtual pada kondisi pencahayaan dan kenyamanan visual dalam bangunan, dengan menggunakan pemodelan dan simulasi berbantukan komputer. Proses pengembangan didasarkan pada pengukuran purwarupa 'generasi pertama'; kemudian dilanjutkan dengan pemodelan jendela virtual 'generasi kedua', yang terdiri dari sumber-sumber cahaya berukuran kecil yang dapat menyebarkan cahaya ke berbagai arah, guna menghasilkan kinerja yang serupa atau bahkan lebih baik daripada jendela yang sejati.

Kata kunci : *jendela virtual, kenyamanan visual, kondisi penchayaan*

PENDAHULUAN

Manusia memiliki kecenderungan yang kuat untuk menyukai kehadiran cahaya matahari pada siang hari. Dalam konteks ruangan pada suatu bangunan, diketahui bahwa cahaya alami siang hari lebih disukai daripada cahaya buatan (sebagai contoh: lampu), oleh karena cahaya alami siang hari memberikan efek positif pada kesehatan dan kepuasan dari pengguna bangunan (Farley dan Veitch [1], Boyce [2], Chang dan Chen [3], Galasiu dan Veitch [4], Aries *et al* [5]). Cahaya alami mampu menyediakan berbagai stimulus yang senantiasa bervariasi sepanjang hari, yang dipercaya dapat menurunkan tingkat depresi dan meningkatkan produktivitas (Boyce *et al* [6], Heschong [7], Heschong [8]). Berbagai peneliti telah menemukan adanya hubungan antara stres atau depresi dengan minimnya paparan terhadap cahaya alami, yang mana kajian lengkap tentang hal ini dapat dirujuk pada, a.l. (Boyce *et al* [6], Edwards dan Torcellini [9], Boubekri [10], Beute dan de Kort [11]).

Pada praktiknya, cahaya alami senantiasa terbatas oleh ruang dan waktu. Sebagai contoh, cahaya alami dari matahari tidaklah tersedia pada malam hari; bangunan-bangunan tertentu memiliki ruangan yang berlokasi di tengah-tengah, tanpa cukup akses kepada jendela atau fasad bangunan; serta ruangan-ruangan tertentu tidak dimungkinkan untuk memiliki bukaan untuk lubang cahaya atau udara, atas pertimbangan kebersihan dan/atau keselamatan, misalnya pada ruang operasi di rumah sakit serta pada ruang kendali proses di pabrik industri.

Dalam situasi di mana pencahayaan alami dalam bangunan tidak tersedia secara mencukupi, konsep 'jendela virtual', yaitu sistem yang menyediakan cahaya dan pemandangan ke luar secara virtual namun realistis, adalah sangat menjanjikan. Manfaat dari pemasangan jendela virtual dalam bangunan ialah terbukanya kemungkinan untuk memanfaatkan luas lantai yang sebelumnya hanya memiliki sedikit akses kepada cahaya alami. Sistem jendela virtual juga memberikan kemungkinan kepada pengguna bangunan untuk mengendalikan kualitas dari cahaya dan pemandangan yang tersedia.

Pada saat ini, produk jendela virtual yang ideal, yang mampu menghasilkan cahaya dan pemandangan berkualitas tinggi, belumlah tersedia. Meskipun demikian, penelitian telah membuktikan bahwa cahaya buatan yang sangat terang (tanpa tampilan gambar atau pemandangan apa pun) dapat dimanfaatkan untuk penyembuhan gejala-gejala penyakit tertentu ataupun untuk menjaga tingkat kesehatan pengguna (Beute dan de Kort [11], Lingjærde *et al* [12], Avery *et al* [13], Mottram *et al* [14], Smolders *et al* [15], Smolders *et al* [16]). Menariknya, tampilan gambar atau pemandangan buatan, walaupun tanpa memancarkan cahaya, juga dapat memberikan efek yang positif pada kesehatan manusia, seperti menambah konsentrasi, mengurangi rasa lelah, mengurangi kejenuhan, dsb (Heerwagen dan Orians [17], Heerwagen [18], Ulrich *et al* [19]).

Secara rinci, penelitian terhadap pengaruh dari aplikasi jendela virtual terhadap persepsi dan efek psiko-fisiologis manusia masih terus dikembangkan. Sebagai contoh, de Vries *et al*. [20] telah menjalankan suatu eksperimen untuk mengetahui kinerja dari 10 naracoba di dalam sebuah ruang kantor yang dilengkapi dua unit purwarupa (prototipe) jendela virtual yang ditutupi oleh sebuah layar putih (Gambar 1). Hasilnya antara lain menunjukkan bahwa kinerja dari naracoba meningkat ketika pemandangan pada jendela dihilangkan dan ketika cahaya alami digantikan oleh cahaya buatan.

Purwarupa yang sama digunakan di dalam eksperimen dari Smolders *et al*. [15] yang meneliti hubungan antara tingkat pencahayaan pada mata dan kinerja serta variasi denyut jantung dari naracoba. Tingkat pencahayaan yang lebih tinggi pada mata dapat meningkatkan kesiagaan, kebugaran, serta kinerja naracoba yang diukur secara objektif.

Gambar 1. Tampilan purwarupa dari suatu jendela virtual [20]

Beberapa peneliti seperti Tuaycharoen dan Tregenza [21], Shin *et al* [22], Rodriguez dan Pattini [23] telah pula mengadakan sejumlah eksperimen untuk mengamati persepsi naracoba terhadap tingkat kesilauan dari berbagai jenis purwarupa jendela virtual. Enrech Xena [24] menjalankan sejumlah studi jangka pendek (1 hari) dan jangka panjang (3 dan 10 tahun) atas keberterimaan suatu purwarupa jendela virtual yang menampilkan pemandangan langit yang baur (blur), dilengkapi dengan berbagai modus pengaturan yang dapat disesuaikan

dengan tampilan warna cahaya matahari sepanjang hari (Gambar 2). Hasilnya antara lain menunjukkan adanya keberterimaan yang tinggi pada jendela virtual untuk jangka panjang serta pentingnya ketersediaan kontrol individu untuk mengatur sumber cahaya yang digunakan.

LINGKUP PENELITIAN

Dalam kaitannya dengan desain dan operasional bangunan, meskipun hubungan antara jendela virtual dengan persepsi pengguna bangunan telah cukup banyak diteliti, ternyata penelitian tentang pengaruh jendela virtual terhadap aspek visual dari bangunan itu sendiri, masih sangatlah terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk menjawab tantangan yang terakhir, yaitu memperkirakan besarnya pengaruh dari pemasangan jendela virtual terhadap kondisi pencahayaan dan kenyamanan visual dalam bangunan.

KONDISI PENCAHAYAAN

Kondisi pencahayaan dapat dideskripsikan antara lain dengan ‘iluminansi’ atau tingkat pencahayaan. Secara sederhana, iluminansi adalah banyaknya cahaya yang diterima oleh suatu permukaan per satuan luas permukaan itu sendiri; dinyatakan dalam satuan lux [lx]. Besarnya iluminansi dalam suatu ruangan haruslah memenuhi nilai tertentu, tergantung pada jenis aktivitas dalam ruangan tersebut. Semakin detail pekerjaan yang dilakukan, semakin tinggi nilai iluminansi yang dipersyaratkan. Sebagai gambaran, untuk aktivitas kerja yang umum dilakukan di ruang kantor, direkomendasikan nilai iluminansi sebesar 350 ~ 500 lx (BSN [25], CEN [26]). Nilai ini umumnya diukur pada ‘bidang kerja’, yaitu bidang datar yang pada umumnya terletak pada ketinggian 75 cm dari lantai.

Gambar 2. Tampilan purwarupa jendela virtual pada eksperimen Enrech Xena [24] dengan berbagai modus pengaturan

Persentase luas bidang kerja yang memenuhi kriteria iluminansi disebut sebagai ‘ketersediaan ruang’. Perbandingan antara nilai terkecil dengan nilai rata-rata dari iluminansi pada bidang kerja disebut sebagai ‘kemerataan’. Suatu jendela virtual dapat dianggap berkinerja baik, apabila menghasilkan ketersediaan ruang dan kemerataan yang sama atau lebih tinggi jika dibandingkan dengan jendela sejati dalam kondisi ruangan dan tampilan yang sama.

KENYAMANAN VISUAL

Kenyamanan visual adalah situasi di mana seseorang berada pada kondisi rileks dalam suatu lingkungan, tanpa disertai perasaan tidak nyaman yang mungkin disebabkan oleh stimulus visual yang berada di luar ambang batas toleransi orang

tersebut. Manusia memiliki kemampuan untuk beradaptasi dalam lingkungan (visual) yang berbeda-beda. Kenyamanan visual antara lain dapat dinyatakan dengan 'kontras', yaitu perbandingan antara kecerahan dari bidang kerja dan kecerahan dari bidang-bidang lain di sekitarnya. Pada kondisi ruang kantor yang umum, perbandingan kontras sebaiknya bernilai di antara 1 : 3 dan 3 : 1 (Rea [27]). Artinya, pada kondisi minim cahaya (seperti pada malam hari), bidang kerja sebaiknya tidak lebih dari tiga kali lebih 'cerah' daripada bidang sekitarnya; sedangkan pada kondisi cukup cahaya (siang hari), bidang sekitar tidak lebih dari tiga kali lebih 'cerah' daripada bidang kerja.

Kenyamanan visual dapat pula dinyatakan dengan besarnya silau yang muncul pada medan penglihatan. Besarnya silau tergantung pada 'kontras', yaitu perbandingan kecerahan dari dua buah objek atau bidang yang saling bersebelahan. Silau dapat timbul apabila kontras antara bidang kerja dan bidang sekitarnya lebih kecil dari 1 : 20 atau lebih besar dari 20 : 1. Silau dapat pula dinyatakan dalam berbagai jenis 'indeks kesilauan'. Semakin tinggi indeks kesilauan, semakin besar ketidaknyamanan visual yang ditimbulkan. Dalam penelitian ini, suatu jendela virtual dianggap berkinerja baik apabila menghasilkan indeks kesilauan yang sama atau lebih rendah, jika dibandingkan dengan jendela sejati dalam kondisi ruangan dan dengan tampilan yang sama.

Oleh karena sistem jendela virtual yang ideal belum benar-benar ada, penelitian ini diarahkan untuk merancang suatu konsep jendela virtual yang dapat menghasilkan 'ketersediaan ruang', 'kemerataan', dan 'indeks kesilauan' yang optimal, dalam pengertian setara atau lebih baik daripada jendela sejati. Untuk mempercepat proses desain, pemodelan dan simulasi berbantukan komputer digunakan untuk membangun model dan memperkirakan kinerja dari sistem tersebut, guna mendapatkan desain jendela virtual yang lebih baik.

Secara ringkas, penelitian ini bertujuan untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan berikut:

1. Idealnya, fitur atau properti apa sajakah yang harus dimiliki oleh suatu jendela virtual?
2. Bagaimana cara yang tepat untuk memodelkan suatu jendela virtual?
3. Bagaimana cara mengevaluasi kondisi pencahayaan dan kenyamanan visual dari suatu model jendela virtual?
4. Bagaimana cara mengukur potensi dan kinerja dari jendela virtual dengan berbagai konfigurasi dan skenario pengoperasian?

Untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan tersebut, dilakukan langkah-langkah antara lain sebagai berikut:

1. Tinjauan literatur yang terkait dengan perkembangan purwarupa jendela virtual terkini;
2. Pengukuran purwarupa jendela virtual yang bercahaya baur (disebut juga purwarupa 'generasi pertama') serta purwarupa yang bercahaya terarah (disebut juga purwarupa 'generasi kedua');
3. Simulasi purwarupa dan model jendela virtual, menggunakan perangkat lunak simulasi komputer untuk memprediksi kinerja pencahayaan dan kenyamanan visual;
4. Pemodelan komputasi dari jendela virtual, melibatkan rangkaian

sumber cahaya berukuran kecil dengan berbagai sudut kemiringan;

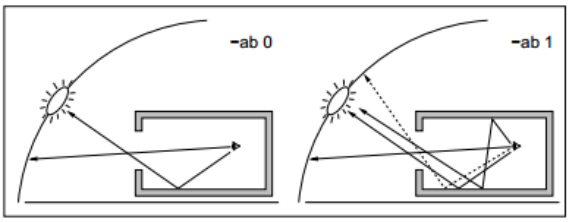
5. Perbandingan kinerja jendela virtual dengan jendela sejati untuk mengetahui seberapa besar manfaat pemasangan jendela virtual dalam suatu ruangan;

TREN PENELITIAN

Pada sub-bab sebelumnya, disebutkan bahwa jendela virtual yang benar-benar ideal belumlah ada pada saat ini. Pada proses desain suatu produk baru, haruslah dilaksanakan sejumlah tahap evaluasi dan pengujian. Pada tahap awal, pemodelan dan simulasi komputasi adalah perangkat yang sangat bermanfaat untuk menciptakan beragam alternatif desain serta untuk memperkirakan kinerja dari masing-masing desain tersebut, dalam waktu yang relatif singkat dan dengan biaya yang relatif murah.

Dalam konteks penelitian ini, diinginkan untuk mengetahui bagaimana suatu purwarupa jendela virtual mempengaruhi kondisi pencahayaan dan kenyamanan visual dalam ruangan, pada berbagai skenario pengoperasian. Kemudian, diinginkan pula untuk menciptakan sistem jendela virtual yang lebih mendekati kondisi ideal. Oleh karena itu, haruslah dibangun suatu model yang dapat merepresentasikan jendela virtual secara akurat. Untuk keperluan tersebut, dibutuhkan teknik pemodelan dan simulasi pencahayaan yang komprehensif.

Dalam konteks penelitian ini, perangkat lunak *Radiance* (Ward dan Shakespeare [28]) digunakan untuk memprediksi kondisi pencahayaan dan kenyamanan visual yang ditimbulkan oleh jendela virtual, dalam berbagai skenario pengoperasian. Untuk mengevaluasi indeks kesilauan, digunakan program Evalglare (Wienold dan Christoffersen [29]) yang perhitungannya juga berbasis pada *Radiance*.



Gambar 3. Ilustrasi pergerakan cahaya (diilustrasikan dengan arah panah) dari posisi pengamat (diilustrasikan sebagai mata) ke sumber cahaya (diilustrasikan sebagai matahari) pada *Radiance*, disadur dari Jacobs [30]. Semakin banyak pantulan cahaya yang diasumsikan, semakin akurat hasil simulasi yang didapat.

Pada prinsipnya, *Radiance* bekerja dengan cara menghitung banyaknya cahaya yang keluar dari suatu permukaan, dengan menjumlahkan cahaya yang dipantulkan dan yang dipancarkan langsung ke titik penerima. Untuk menyederhanakan proses perhitungan, berkas cahaya dianggap bergerak dari posisi pengamat ke arah sumber cahaya (Gambar 3). Proses ini diulang berkali-kali, dengan mengasumsikan jalur pergerakan berkas cahaya yang berbeda-beda setiap kali, sampai didapatkan tingkat akurasi tertentu yang dikehendaki (Ward dan Shakespeare [28]).

HASIL PENELITIAN

Hasil dari penelitian ini antara lain sebagai berikut:

1. Berdasarkan tinjauan literatur, diketahui bahwa seluruh purwarupa jendela virtual yang saat ini tersedia hanya memiliki sebagian dari fitur atau properti yang dimiliki oleh jendela sejati. Salah satu tantangan terbesar dari jendela virtual ialah

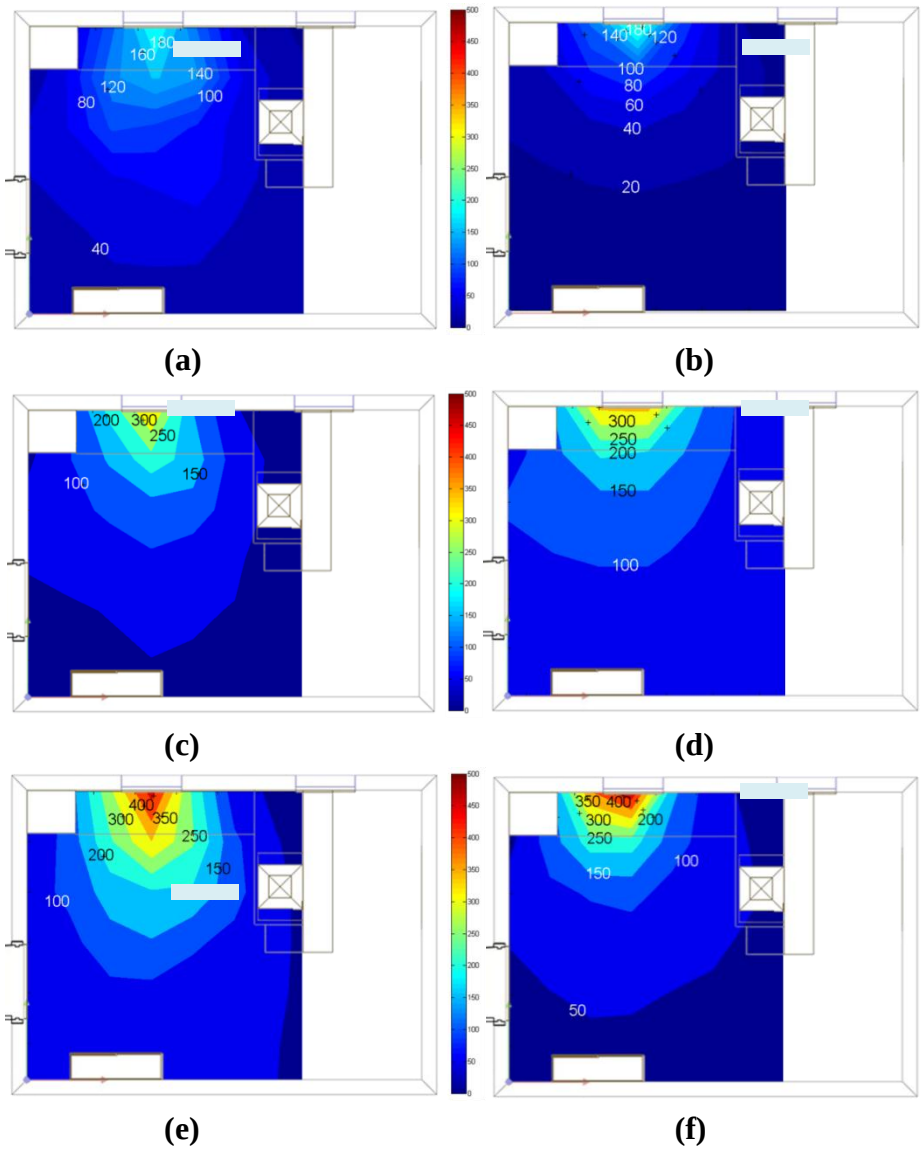
menciptakan cahaya langsung yang terarah dan senantiasa berubah mengikuti waktu, sebagaimana ditemui pada cahaya matahari. Isu yang tak kalah pentingnya ialah menciptakan tampilan pemandangan yang dinamis (terus bergerak secara kontinu, tidak diam) dan realistis (seperti pemandangan dari jendela yang sesungguhnya).

2. Berdasarkan pengukuran suatu purwarupa jendela virtual ‘generasi pertama’ yang dibangun oleh Philips [31], yang menampilkan pemandangan langit pada tiga kondisi: cerah, berawan, dan berawan sebagian (Gambar 4); didapatkan bahwa kriteria iluminansi minimum 500 lx pada bidang kerja tidaklah terpenuhi. Adapun Gambar 5 menampilkan distribusi iluminansi pada denah bidang kerja (dilihat dari atas), di bawah jendela virtual dan jendela sejati. Terlihat bahwa jendela virtual tersebut pada umumnya menghasilkan lebih banyak daerah yang terang (berwarna cerah) dibandingkan dengan jendela sejati.
3. Sebuah purwarupa jendela virtual ‘generasi kedua’ telah dirancang dan secara khusus dibangun dalam penelitian ini, di lingkungan *Experience Lab* dari *Philips Research, Eindhoven.* Purwarupa tersebut terdiri dari rangkaian *Light-Emitting Diode* (LED) yang disusun dalam wadah berbentuk persegi dan ditutup oleh kaca baur, sehingga menghasilkan cahaya yang menyebar dan tidak silau; serta rangkaian lampu LED berbentuk tabung yang disusun sedemikian sehingga menampilkan kesan cahaya yang terarah (Gambar 6), seolah-olah seperti cahaya matahari yang datang dari samping. Pengukuran dan simulasi (dengan *Radiance*) iluminansi pada lokasi titik-titik ukur yang bersesuaian menunjukkan hasil yang serupa satu sama lain, sehingga model komputasi yang dibangun dapat dianggap valid.

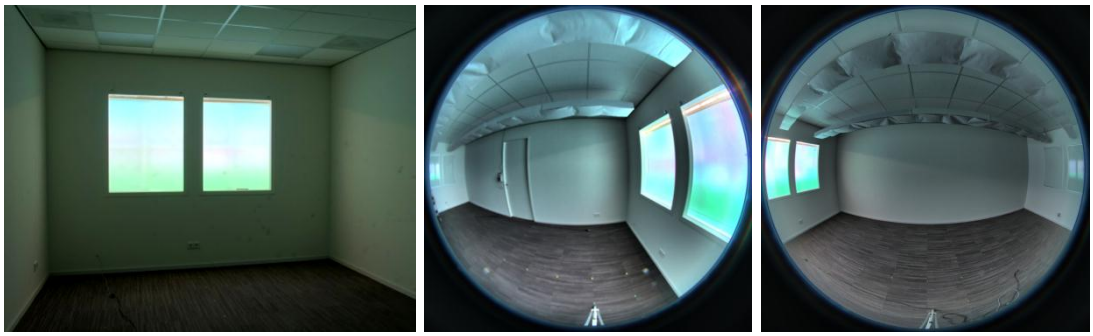
Dengan melihat distribusi iluminansi pada bidang kerja, diketahui bahwa ketersediaan ruang yang paling baik (optimal) dapat dicapai dengan menempatkan dua bukaan pada setiap dinding pendek, atau dengan menempatkan empat bukaan pada sebuah dinding panjang (Gambar 7).

(a) **(b)** **(c)**

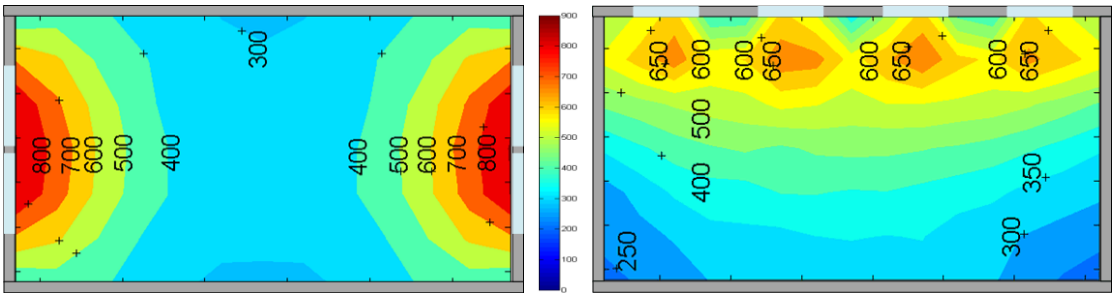
Gambar 4. Tampilan purwarupa jendela virtual ‘generasi pertama’ yang dibangun oleh Philips [31] di bawah kondisi langit (a) cerah, (b) berawan, dan (c) berawan sebagian



Gambar 5. Distribusi iluminansi (dalam lx) pada denah bidang kerja dalam ruang uji, di bawah kondisi langit (a) berawan, jendela virtual, (b) berawan, jendela sejati, (c) cerah, jendela virtual, (d) cerah, jendela sejati, (e) berawan sebagian, jendela virtual, (f) berawan sebagian, jendela sejati (Mangkuto *et al* [32]). Warna merah menunjukkan iluminansi yang tinggi, warna biru tua menunjukkan iluminansi yang rendah.



Gambar 6. Tampilan purwarupa jendela virtual ‘generasi kedua’ (dengan dua bukaan) yang dibangun di *Experience Lab Philips Research* (Mangkuto *et al* [33])



(a) **(b)**

Gambar 7. Distribusi iluminansi (dalam lx) pada denah bidang kerja dalam ruang uji, dengan (a) dua bukaan pada setiap dinding pendek serta (b) empat bukaan pada sebuah dinding panjang (Mangkuto *et al* [33]). Warna merah menunjukkan iluminansi yang tinggi, warna biru tua menunjukkan iluminansi yang rendah.

KESIMPULAN DAN KONTRIBUSI PENELITIAN

Konsep 'jendela virtual', yaitu sistem yang menyediakan cahaya dan pemandangan secara virtual namun realistis, sangat menjanjikan sebagai solusi atas ketiadaan akses jendela pada ruangan-ruangan yang tertutup. Pengaruh dari pemasangan jendela virtual aspek visual dalam bangunan diteliti dengan menggunakan pengukuran, pemodelan, dan simulasi komputer. Jendela virtual 'generasi pertama' menunjukkan kinerja yang tidak cukup baik jika dibandingkan dengan jendela sejati. Untuk itu dikembangkan suatu purwarupa jendela virtual 'generasi kedua', yang terdiri dari rangkaian LED yang ditutup oleh kaca baur sehingga menghasilkan cahaya yang menyebar dan tidak silau; serta rangkaian LED berbentuk tabung yang disusun sehingga memberikan kesan cahaya yang terarah, seolah-olah seperti cahaya matahari yang datang dari samping.

Penelitian tentang jendela virtual ini dapat diaplikasikan pada situasi di mana pencahayaan alami sangat dibutuhkan tetapi tidak dapat dihadirkan, seperti yang telah disebutkan pada sub-bab Pendahuluan, contohnya dalam kantor-kantor dengan cubicle atau ruangan yang tidak terhubung langsung dengan jendela atau fasad bangunan; serta dalam ruangan-ruangan tertentu yang tidak dimungkinkan untuk memiliki bukaan untuk lubang cahaya atau udara, atas pertimbangan kebersihan dan/atau keselamatan, misalnya pada ruang operasi di rumah sakit serta pada ruang kendali proses di pabrik industri.

Indonesia memiliki potensi cahaya matahari yang sangat berlimpah sepanjang tahun dan relatif stabil, karena kita tidak mengenal adanya empat musim. Indonesia seharusnya mampu memanfaatkan matahari sebagai sumber cahaya alami dalam bangunan dengan baik, dan untuk itulah pengetahuan tentang fisika bangunan dan teknik pencahayaan menjadi sangat berperan.

REKOMENDASI UNTUK PENELITIAN SELANJUTNYA

Rekomendasi yang dapat diberikan untuk menentukan arah penelitian selanjutnya dapat dirangkum sebagai berikut:

1. Secara umum, purwarupa jendela virtual generasi pertama dalam penelitian ini memiliki keterbatasan tidak hanya dalam hal kompleksitas pemandangan dan informasi, namun juga dalam hal kemungkinan untuk

mengganti-ganti pemandangan. Fitur tambahan seperti paralaks dan transmisi suara dapat ditambahkan untuk meningkatkan kemiripan purwarupa dengan jendela sejati.

2. Purwarupa jendela virtual generasi kedua yang telah dibangun dalam penelitian ini juga terbatas dalam resolusi tampilan dan efisiensi cahaya yang dihasilkan (relatif terhadap daya listrik yang digunakan). Dengan menerapkan teknologi pencahayaan yang terkini, dimungkinkan untuk menciptakan pemandangan yang lebih detail dengan keluaran cahaya yang lebih tinggi, yang pada saat bersamaan mengkonsumsi lebih sedikit energi. Untuk menambahkan aspek dinamis pada tampilan, teknik pemrograman komunikasi digital dapat diterapkan, sehingga tampilan pada jendela virtual dapat berubah-ubah secara otomatis pada setiap saat tertentu.
3. Terakhir, diperlukan suatu studi mendalam tentang properti termal dari komponen-komponen jendela virtual. Informasi tersebut akan sangat bermanfaat sebagai masukan dari perangkat simulasi energi bangunan, untuk menentukan banyaknya energi yang dibutuhkan untuk memanaskan dan/atau mendinginkan ruangan atau bangunan di mana jendela virtual tersebut diletakkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada *the Intelligent Lighting Institute, Eindhoven University of Technology*, yang telah mendanai penelitian doktoral yang dilaporkan pada artikel ini, serta kepada Prof. Dr. Ir. J.L.M. Hensen, Prof. Dr. Ir. E.J. van Loenen, dan Dr. Ir. M. B. C. Aries dari Unit *Building Physics and Services, Department of the Built Environ-ment, Eindhoven University of Technology*, selaku promotor dan kopromotor penulis pada penelitian doktoral ini.

*korespondensi : rizki.a.mangkuto@gmail.com

REFERENSI

[1] K. M. J. Farley dan J. A Veitch. A Room with a View: A Review of the Effects of Window on Work and Well-being (Rep. No. RR-136). IRC Research, 2001.

[2] P. R. Boyce. Human Factors in Lighting. (2nd ed.) London: Taylor and Francis, 2003.

[3] C.-Y Chang dan P.-K. Chen. (2005). Human response to window views and indoor plants in the workplace. HortScience, 40, 1354-1359.

[4] A. D. Galasiu dan J. A. Veitch. (2006). Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylit offices: a literature review. Energy and Buildings, 38, 728-736.

[5] M. B. C. Aries, J. A. Veitch, dan G. Newsham. (2010). Windows, view, and office characteristics predict physical and psychological discomfort. Journal of Environmental Psychology, 30, 533-541.

[6] P. R. Boyce, C. Hunter, dan O. Howlett. The Benefits of Daylight Through Windows. Capturing the Daylight Dividend Program, 2003.

[7] L. Heschong. Window and Classrooms: A Study of Student Performance and the Indoor Environment (Rep. No. P500-03-082-A-7). California, USA: Heschong Mahone Group, 2003.

[8] L. Heschong. Window and Offices: A Study of Office Worker Performance and the Indoor Environment (Rep. No. P500-03-082-A-9). California, USA: Heschong Mahone Group, 2003.

[9] L. Edwards dan P. Torcellini. A Literature Review of the Effects of Natural Light on Building Occupants (Rep. No. NREL/TP-550-30769). Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2002.

[10] M. Boubekri, M. Daylighting, Architecture and Health: Building Design Strategies. Oxford: Architectural Press, 2008.

[11] F. Beute dan Y. A. W. de Kort. (2014). Salutogenic effects of the environment: Review of health protective effects of nature and daylight. Applied Psychology, 6, 67-95.

[12] O. Lingjærde, O. Føreland, dan J. Dankertsen. (1998). Dawn simulation vs. lightbox treatment in winter depression: a comparative study. Acta Psychiatrica Scandinavica, 98, 73-80.

[13] D. H. Avery, D. N. Eder, M. A. Bolte, C. J. Hellekson, D. L. Dunner, M. V. Vitielllo, *et al*. (2001). Dawn simulation and bright light in the treatment of SAD: a controlled study. Biological Psychiatry, 50, 205-216.

[14] V. Mottram, B. Middleton, P. Williams, dan J. Arendt. (2011). The impact of bright artificial white and 'blue-enriched' light on sleep and circadian phase during the polar winter. Journal of Sleep Research, 20,154-161.

[15] K. C. H. J. Smolders, Y. A. W. de Kort, dan P. J. M. Cluitmans. (2012). A higher illuminance induces alertness even during office hours: Findings on subjective measures, task performance and heart rate measures. Physiology and Behavior, 107, 7-16.

[16] K. C. H. J. Smolders, Y. A. W. de Kort, dan S. van den Berg. (2013). Diurnal light exposure and feelings of vitality: Results of a field study during regular weekdays. Journal of Environmental Psychology, 36, 270 - 279.

[17] J. H. Heerwagen dan G. Orians. (1986). Adaptation to windowlessness: A study on the use of visual decor in windowed and windowless offices. Environment and Behavior, 18, 623-639.

[18] J. H. Heerwagen. “The psychological aspects of windows and window design”, Annual Conference of the Environmental Design Research Association, pp. 269-280, 1990.

[19] R. S. Ulrich, O. Lundén, dan J. L. Eltinge. (1993). Effects of exposure to nature and abstract pictures on patients recovering from heart surgery. Psychophysiology, 30, 7.

[20] H. J. A.de Vries, M. P. J. Aarts, M. Knoop, dan H. Cornelissen (2009). “Beneficial non-visual effects of daylight, Research into the influential parameters,” Proceedings of Lux Europa 2009 - the 11th European Lighting Conference. Istanbul, Turkey, 2009.

[21] N. Tuaycharoen dan P. R. Tregenza. (2005). Discomfort glare from interesting images. Lighting Research and Technology, 37, 329-341.

[22] J. Y. Shin, G. Y. Yun, dan J. T. Kim. (2012). View types and luminance effects on discomfort glare assessment from windows. Energy and Buildings, 46, 139-145.

[23] R. G. Rodriguez dan A. Pattini (2014). Tolerance of discomfort glare from a large area source for work on a visual display. Lighting Research and Technology, 46, 157-170.

[24] C. Enrech Xena. Simulation de la lumiere naturelle par des sources

artificielles: Enjeux architecturaux. PhD dissertation, Université de Nantes, Nantes, France, 1999.

[25] Badan Standardisasi Nasional (BSN). SNI 03-2396-2001 – Tata cara perancangan sistem pencahayaan alami pada bangunan gedung. Jakarta: BSN, 2001.

[26] Comité Européen de Normalisation (CEN). Light and Lighting – Lighting of Work Places – Part 1: Indoor Work Places. Brussels: CEN, 2011.

[27] M.S. Rea (ed). The IESNA Lighting Handbook: Reference and Application, 9th edition. New York, Illuminating Engineering Society of North America (2010).

[28] G. Ward dan R. A. Shakespeare. Rendering with Radiance: The Art and Science of Lighting Visualization. San Francisco: Morgan Kaufman Publishers, 1998.

[29] J. Wienold dan J. Christoffersen. (2006). Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. Energy and Buildings, 38, 743-757.

[30] A. Jacobs. (2012). RADIANCE Cookbook. Retrieved 12-3-2012. Available:http://www.jaloxa.eu/resources/radiance/documentation/docs/radiance_cookbook.pdf

[31] E. J. van Loenen, W. Oosting, I. Vogels, T. Lashina, R. van Hasen, C. Staats, *et al*. Virtual Windows. In E. Aarts dan E. Diederiks (Eds.), Ambient Lifestyle: From Concept to Experience (pp. 148-161). Amsterdam: BIS Publishers, 2007.

[32] R. A. Mangkuto, S. Wang, M. B. C. Aries, E.J. van Loenen, dan J.L.M. Hensen (2014). Comparison between lighting performance of a virtual natural lighting solutions prototype and a real window based on computer simulation. Frontiers of

[33] R. A. Mangkuto, M. B. C. Aries, E.J. van Loenen, dan J.L.M. Hensen (2014). Analysis of various opening configurations of a second-generation virtual natural lighting solutions prototype. LEUKOS, 10, 223-236.

MENGENAL LEBIH DEKAT KATALISIS OTOMOTIF SEBAGAI PEMBERSIH GAS BUANG KENDARAAN DIESEL

Muhammad Mufti Azis*

* Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

ABSTRAK

Dengan semakin menipisnya cadangan minyak bumi, penggunaan kendaraan diesel yang ramah lingkungan semakin dibutuhkan di masa yang akan datang. Tingkat konsumsi bahan bakar yang lebih irit serta jumlah emisi CO_2 yang lebih rendah membuat kendaraan diesel memiliki potensi besar sebagai kendaraan yang ramah lingkungan dan berperan besar dalam mengurangi dampak pemanasan global. Guna mencapai tujuan tersebut, kendaraan diesel terus ditantang untuk dapat mengurangi kadar polutan dalam gas buangnya yaitu dengan pemanfaatan teknologi katalisis. Teknologi pembersihan gas buang kendaraan diesel dengan pemanfaatan katalis menjadi fokus utama dalam artikel ini. Disini akan dibahas 3 unit dasar dalam sistem pembersihan gas buang kendaraan diesel dan terkait dengan teknologi katalis yaitu *Diesel Oxidation Catalyst* (DOC), *Diesel Particulate Filter* (DPF) dan *Selective Catalytic Reduction* (SCR). Fungsi dari masing-masing unit serta material katalis yang digunakan juga akan dibahas dalam artikel ini. Dengan sistem pembersihan gas buang yang modern dan berteknologi tinggi maka kendaraan diesel diharapkan menjadi semakin ramah lingkungan serta berkontribusi bagi peningkatan kualitas udara di masa depan.

Kata kunci: *katalisis otomotif; diesel; polusi udara; DOC; DPF;SCR*

NOMENKLATUR

A/F	:	Rasio udara dan bahan bakar
DOC	:	*Diesel oxidation catalysts*
DPF	:	*Diesel particulate filters*
HC	:	*Hydrocarbon*
NSR	:	NO_x *storage and reduction catalyst*
PM	:	*Particulate matter*
PGM	:	*Platinum Group Metal*
SCR	:	*Selective catalytic reduction*
TWC	:	*Three-way catalysts*
WHTC	:	*World Harmonized Transient Cycle*
WLTP	:	*Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure*

A. KATALISIS DALAM DUNIA OTOMOTIF

Seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk, kebutuhan transportasi guna mendukung mobilitas manusia dan logistik juga semakin meningkat. Untuk itu, kebutuhan akan kendaraan yang modern dan efisien mutlak diperlukan. Di samping itu, kendaraan modern hendaknya juga ramah lingkungan dengan menekan kandungan polutan dalam emisi gas buang seperti CO, CO_2, NO + NO_2 (NO_x), senyawa hidrokarbon dan *particulate matter* (PM).

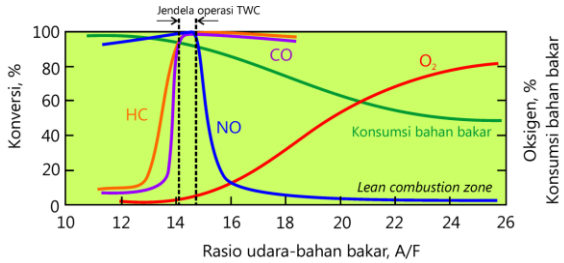
Pada tahun 70an, regulasi *Clean Air Act* di Amerika Serikat telah mendorong inovasi teknologi dalam dunia otomotif yaitu dengan munculnya penggunaan

katalisis untuk memproses gas buang kendaraan (Heck *et al* [1]). Hal ini menjadi tonggak sejarah masuknya dunia teknik reaksi kimia dan katalisis ke dalam dunia otomotif.

Friederich Ostwald (penerima nobel kimia 1909) mendefinisikan katalis sebagai zat yang dapat mempercepat sebuah reaksi kimia dan tak terkonsumsi selama berlangsungnya reaksi kimia (Murzin [2]). Katalis umumnya berbentuk padatan dan digunakan hampir dalam semua produk kimia yang kita temui di sekitar kita. Katalis dapat digolongkan menjadi 2 yaitu *heterogeneous catalyst* (bila fase reaktan dan katalisnya berbeda) dan *homogeneous catalyst* (bila fase reaktan dan katalis sama). Katalis mempercepat sebuah reaksi kimia dengan menurunkan energi aktivasi sebuah reaksi kimia dengan memberikan rute alternatif dalam sebuah reaksi kimia melalui berbagai tahap reaksi (Murzin [2]). Salah satu pemanfaatan katalis adalah untuk mengurangi kandungan polutan gas dalam kendaraan bermotor.

Pada awal pemanfaatan katalis dalam dunia otomotif, katalis digunakan untuk mengurangi emisi CO dalam mesin bensin dengan dukungan katalis yang mengoksidasi CO menjadi CO_2. Pada perkembangan selanjutnya, katalis otomotif berkembang menjadi *three-way catalyst (TWC)* dengan fungsi oksidasi dan reduksi. TWC mengubah 3 polutan yaitu CO dan Hidrokarbon menjadi CO_2 (fungsi oksidasi) serta mengubah NO_x menjadi N_2 (fungsi reduksi) secara simultan (Heck *et al* [1]). TWC merupakan penemuan katalis yang sangat penting dalam dunia otomotif dan masih digunakan hingga saat ini. Pembaca yang tertarik mendalami lebih jauh mengenai katalis otomotif khususnya TWC disarankan untuk membaca referensi 1 yang ditulis oleh Ronald M. Heck dkk.

Meski efektif dalam menekan polutan gas, TWC hanya efektif digunakan pada mesin berbahan bakar bensin yang beroperasi pada *stoichimoetric conditions.* Pada mesin bensin, jumlah O_2 yang disuplai kedalam mesin pembakaran dikontrol secara ketat sesuai dengan jumlah bahan bakar yang masuk ke dalam ruang bakar. Untuk mencapai kondisi stoikiometris, rasio antara udara (sumber pembawa O_2) dan bahan bakar ini berkisar 14.7 (massa/massa) atau dikenal juga sebagai *lambda ratio* 1 untuk mesin bensin. Gambar 1 mengilustrasikan kinerja TWC (konversi NO_x, CO dan hidrokarbon) dalam berbagai nilai rasio udara-bahan bakar atau yang dikenal juga sebagai *lambda window.*



Gambar 1. Kinerja *three-way catalyst* (TWC) dalam berbagai rasio udara-bahan bakar. Jendela operasi TWC yang cukup sempit menunjukkan keterbatasan bahwa TWC hanya aktif untuk mesin bensin. Mesin diesel beroperasi pada rasio udara-bahan bakar yang tinggi (*lean combustion zone).* Direproduksi dari Pereda-Ayo dan González-Velasco [3]

Dengan fenomena pemanasan global yang dirasakan saat ini, kesadaran untuk menekan emisi CO_2 ke atmosfer semakin meningkat khususnya yang berasal dari sektor transportasi. Salah satu cara untuk menekan emisi CO_2 yaitu dengan meningkatkan rasio udara-bahan bakar dalam mesin kendaraan. Penggunaan O_2 dalam jumlah berlebih akan meningkatkan tingkat pembakaran bahan bakar serta

sekaligus menurunkan konsumsi bahan bakar dan emisi CO_2. Penggunaan O_2 atau udara berlebih dalam mesin kendaraan menyebabkan mesin beroperasi dalam kondisi *lean burn* dan hal ini ditunjukkan dalam *lean combustion zone* pada gambar 1 dengan rasio A/F yang tinggi. Kendaraan mesin diesel adalah salah satu jenis kendaraan *lean burn* yang umumnya digunakan pada *heavy duty vehicles* (kendaraan tugas berat). Untuk memudahkan penyebutan jenis mesin ini, kendaraan *lean burn* dan diesel selanjutnya disebut sebagai kendaraan diesel dalam artikel ini. Gambar 1 juga menunjukkan bahwa dengan penggunaan rasio A/F yang tinggi maka konsumsi bahan bakar juga semakin menurun. Sayangnya, penggunaan TWC dalam kendaraan bermesin diesel tidak efektif lagi dalam menurunkan emisi NO (seperti yang tertera dalam gambar 1).

Dengan demikian, kita juga dapat membandingkan kelebihan dan kekurangan kendaraan mesin diesel dan mesin bensin. Keunggulan mesin diesel antara lain lebih irit bahan bakar dan memiliki emisi yang lebih rendah (utamanya gas rumah kaca dan CO) (Jässkeläinen dan. Khair [4]). Namun demikian, mesin diesel memiliki emisi *particulate matter (PM)* dan NO_x yang lebih tinggi daripada mesin bensin yang dilengkapi dengan TWC, (DieselNet Technology Guide [5])

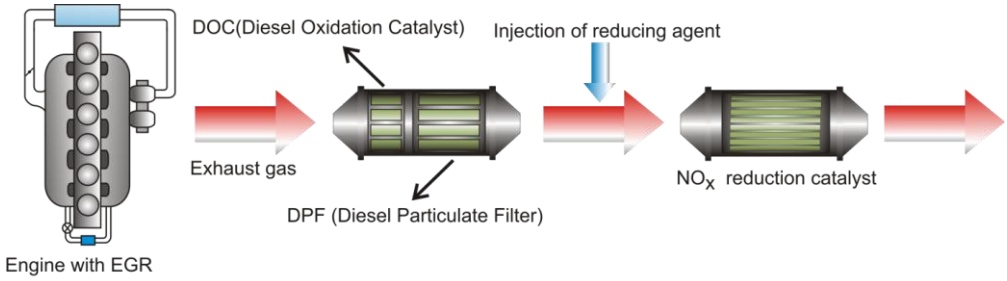
Guna menekan keseluruhan emisi gas buang kendaraan diesel, belum ada katalis tunggal (seperti layaknya TWC untuk kendaraan bensin) yang mampu secara efektif menurunkan emisi HC, CO dan NO_x secara simultan. Oleh karena itu, proses pembersihan gas buang (*aftertreatment process)* pada kendaraan diesel lebih rumit dengan melibatkan berbagai unit yang akan diuraikan dalam artikel ini. Unit-unit ini dapat diibaratkan seperti layaknya sebuah pabrik kimia mini yang terus beroperasi di dalam saluran gas buang kendaraan diesel.

Sistem pembersihan gas buang kendaraan diesel berbasis katalis umumnya menggunakan 3 unit dasar yaitu *Diesel Oxidation Catalyst (DOC), Diesel Particulate Filter (DPF)* dan *Selective Catalytic Reduction (SCR) catalyst* seperti yang diilustrasikan dalam gambar 2. Meski demikian, pemasangan katalis tambahan dalam beberapa kasus juga dimungkinkan seperti penambahan *Ammonia Slip Catalyst* yang diletakkan setelah katalis NH_3-SCR. Konfigurasi dari katalis-katalis ini pun dapat berubah tergantung dari beberapa faktor seperti ketersediaan tempat serta faktor efisiensi seperti dengan memanfaat-kan *multi layer washcoat* yang memungkin-kan penggabungan beberapa unit katalis. Di dalam setiap unit sistem pembersihan gas buang, terjadi beragam reaksi kimia dalam waktu singkat yang mampu mengubah berbagai jenis polutan gas menjadi gas yang lebih ramah bagi lingkungan.

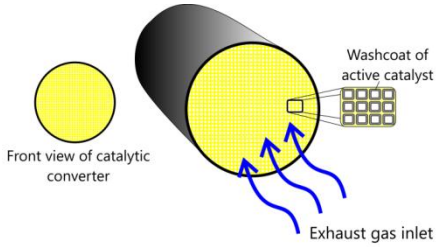
Di dalam penerapannya, katalisis otomotif memiliki karakteristik yang unik, antara lain: harus memberikan luas permukaan kontak yang luas, memiliki nilai *pressure drop* yang minimal dalam saluran gas buang serta aktif bekerja dalam waktu yang relatif singkat (Heck *et al* [1]). Untuk itu, desain reaktor atau yang sering dikenal dengan *catalytic converter* ini umumnya berupa reaktor monolit seperti yang diilustrasikan dalam gambar 3.

Reaktor monolit terdiri dari ribuan saluran kecil (*channel*) berupa persegi atau menyerupai sarang lebah (*honeycomb*) yang terbuat dari bahan keramik yang mampu bekerja hingga suhu 1000°C. Di dalam setiap saluran, bubuk katalis aktif ditempelkan pada setiap dinding saluran berupa *washcoat* dengan bantuan pelekat (dikenal sebagai *binder)*. Di dalam saluran

kecil ini, gas buang akan berkontak dengan dinding-dinding *channel* dan reaksi akan terjadi pada permukaan katalis.



Gambar 2. Sistem pembersihan gas buang kendaraan diesel. Sistem ini terdiri dari 3 komponen utama yaitu DOC, DPF dan NO_x *reduction catalyst*. Sumber Aziz [6]



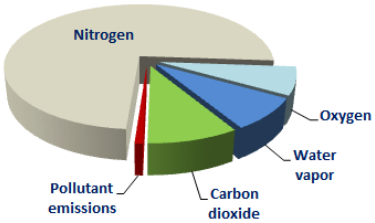
Gambar 3. Ilustrasi katalis otomotif atau yang juga dikenal sebagai *catalytic converter*. Sebuah *catalytic converter* terdiri dari ribuan saluran-saluran kecil. Katalis otomotif terletak dalam dinding setiap saluran berupa *washcoat*. Beragam reaksi kimia untuk membersihkan gas buang terjadi dalam katalis-katalis tersebut.

Di dalam artikel ini, penulis akan memberikan gambaran mengenai teknologi katalisis dalam sistem pembersihan gas buang kendaraan diesel. Penulis akan mengawalinya dengan perkenalan gas buang kendaraan diesel secara singkat dan bagaimana regulasi standar emisi mampu berperan sebagai pendorong inovasi bagi industri otomotif. Selanjutnya, teknologi katalisis dalam sistem pembersihan gas buang akan dibahas secara lebih mendetail yang meliputi *Diesel Oxidation Catalyst (DOC), diesel particulate filter(DPF)* dan *selective catalytic reduction (SCR).* Oleh karena itu, mari kita telusuri satu persatu unit pembersih gas buang dalam kendaraan diesel.

B. MENGENAL EMISI GAS BUANG KENDARAAN DIESEL

Gas buang kendaraan diesel mengandung komponen utama berupa CO_2 (2-12%) H_2O (2-12%) dan N_2 yang sebagian besar berasal dari udara. Selain itu, dalam jumlah relatif kecil juga terdapat gas polutan berupa CO, HC, NO_x (antara 50-1000 ppm) dan *particulate matters* (PM) (Majewski [7] dan DieselNet Technology Guide [8])

Gambar 4 menunjukkan proporsi gas polutan dalam gas buang kendaraan diesel. Dari sini kita dapat melihat bahwa pada dasarnya proporsi gas polutan dalam gas buang kendaraan diesel relatif kecil. Namun demikian, dengan jumlah kendaraan yang meningkat maka dampak *multiplier* dari kadar polutan ini tetap berbahaya. Tanpa pengolahan yang memadai, kandungan polutan dalam gas buang dapat mencemari udara dan menyebabkan gangguan kesehatan bagi manusia.



Gambar 4. Perbandingan proporsi kandungan polutan terhadap total komponen dalam gas buang tanpa sistem

pembersihan gas buang. Sumber (Majewski [7]).

Tabel 1 menyatakan beberapa dampak polutan gas bagi lingkungan dan manusia.

Tabel 1. Dampak polutan gas bagi manusia dan lingkungan. Sumber [5] (Majewski [7] dan DieselNet Technology Guide [8])

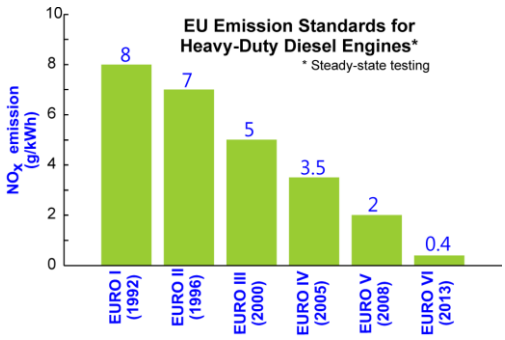
No	Jenis polutan	Dampak terhadap manusia dan lingkungan
1	CO	sangat beracun terhadap sistem pernafasan manusia dengan menghambat O_2
2	NO_x	membahayakan sistem pernafasan manusia, berkontribusi terhadap pembentukan SMOG (*smoke and fog*) serta penyebab hujan asam dan *eutrophication*
3	CO_2	komponen utama gas rumah kaca
4	HC	dapat membahayakan sistem pernafasan dan berkontribusi bersama NO_x dalam pembentukan *ground-level ozone*
5	PM	elemen karbon yang berukuran kecil ini dapat masuk kedalam paru-paru (alveoli) dan menyebabkan pembengkakan paru-paru

Dengan dampak yang berbahaya bagi manusia dan lingkungan, beberapa negara maju seperti negara-negara Eropa, Amerika Serikat dan Jepang berusaha menekan emisi kendaraan bermotor dengan menerapkan standar regulasi yang ketat (Majewski [7] dan DieselNet Technology Guide [9]). Standar regulasi ini misalnya di Eropa dikenal dengan nama standar Euro I, Euro II hingga yang berlaku saat ini (tahun 2013) yaitu standar Euro VI. Beberapa komponen polutan dalam gas buang yang dikontrol dalam regulasi ini adalah NO_x, *particulate matters (PM)*, hidrokarbon dan CO (Majewski [7]). Selain itu, regulasi di masa yang akan datang tak menutup kemungkinan juga akan mengontrol jumlah emisi gas rumah kaca yang terkandung dalam gas buang seperti: CO_2, CH_4 dan N_2O "(Majewski [7])". Beberapa gas lain yang terdapat dalam jumlah lebih kecil dari gas polutan umumnya termasuk dalam kategori emisi yang tidak dikontrol seperti SO_x, *aldehydes* dan *particle numbers* (Majewski [7])

Pengujian emisi kendaraan umumnya dilakukan dengan standar protokol internasional di balai pengujian sertifikasi kendaraan. Jenis pengujian ini dapat digolongkan menjadi dua yaitu uji laboratorium dan uji lapangan. Untuk penyeragaman metode pengujian emisi kendaraan di seluruh dunia, maka berbagai negara telah menyetujui metode pengujian semacam *World Harmonized Transient Cycle (WHTC)* atau *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP)*.

Dengan adanya standar regulasi yang ketat seperti yang diterapkan di Eropa, Jepang dan Amerika Serikat, hal ini secara otomatis mendorong industri otomotif untuk terus berinovasi guna menekan emisi gas buang mereka demi mengikuti standar regulasi yang berlaku. Sebagai ilustrasi, gambar 5 menunjukkan besarnya penurunan standar emisi NO_x di Eropa untuk kendaraan berat diesel dalam rangka menuju *zero emission vehicle*. Untuk mencapai target ini, mutlak diperlukan beberapa perbaikan yang meliputi perbaikan kualitas bahan bakar, efisiensi performa mesin, sistem pemanfaatan panas

secara efisien serta penggunaan teknologi katalis guna membersihkan gas buang.



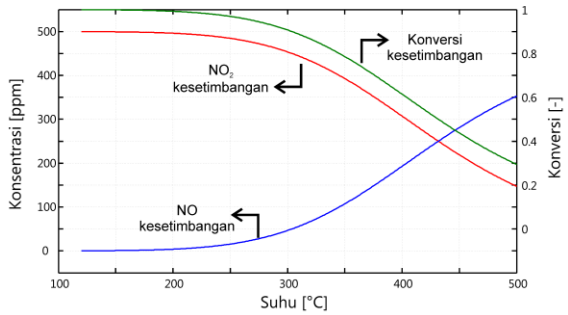
Gambar 5. Standar emisi NO_x di Eropa untuk kendaraan *heavy duty diesel*. Penurunan drastis dalam legislasi lingkungan mendorong industri otomotif untuk meningkatkan kualitas sistem pembersihan gas buang. Sumber (DieselNet Technology Guide) [9].

C. DIESEL OXIDATION CATALYST (DOC)

Seperti yang terlihat dalam gambar 2, katalis pertama yang mengolah gas buang adalah *Diesel Oxidation Catalyst (DOC)*. Katalis ini berfungsi membantu proses oksidasi komponen NO, CO dan HC (lihat gambar 2). Karena memiliki fungsi oksidasi, maka katalis DOC umumnya berbasis logam mulia atau yang dikenal sebagai PGM *(Platinum Group Metal)* yaitu Pt/Al_2O_3 (Auvray [10]). Secara sederhana, reaksi kimia yang terjadi dalam DOC adalah (Auvray [10]):

$$Hidrokarbon + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$$
$$CO + 0.5\,O_2 \rightarrow CO_2$$
$$NO + 0.5O_2 \rightarrow NO_2$$

Idealnya, produk utama dari DOC akan didominasi oleh NO_2 dan CO_2. Meski demikian, selain ketiga reaksi utama di atas, ada juga reaksi samping yang tidak diharapkan yaitu konversi SO_2 menjadi H_2SO_4 yang dapat membentuk padatan dan dikenal sebagai *particulate sulphate*. Pembentukan padatan sulfat ini secara tidak langsung akan meningkatkan emisi *particulate matters (PM)* secara keseluruhan (Majewski [7]).



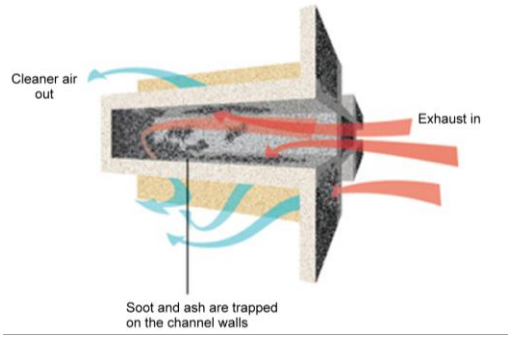
Gambar 6. Konversi kesetimbangan untuk reaksi oksidasi NO dalam DOC dengan kondisi umpan: 500 ppm NO+ 20% O_2. Aspek termodinamika memegang peranan penting dalam menentukan kinerja katalis DOC. Sumber (DieselNet Technology Guide) [9].

Reaksi oksidasi NO merupakan salah satu reaksi utama dalam DOC. Meski DOC tidak mengubah sebagian besar NO menjadi N_2, pembentukan NO_2 dari oksidasi NO menguntungkan bagi proses regenerasi DPF serta proses NH_3-SCR. Oleh karena itu, rasio NO dan NO_2 dalam DOC perlu dikontrol. Di dalam sebuah reaksi kimia, aspek termodinamika memegang peranan penting bahkan seringkali menjadi pembatas konversi pada sebuah reaksi. Inilah yang menjadi karakteristik utama dari reaksi oksidasi NO dimana pada suhu tinggi reaksi ini akan dibatasi oleh konversi termodinamika seperti yang diilustrasikan dalam gambar 6. Dengan kondisi ini, DOC harus bekerja aktif dalam rentang suhu rendah-menengah sebelum dibatasi oleh termodinamika (keseimbangan reaksi oksidasi NO) pada suhu tinggi (Auvray [10]).

D. DIESEL PARTICULATE FILTER (DPF)

Setelah melewati DOC, gas buang selanjutnya diolah dalam *diesel particulate filter (DPF)* guna menyaring dan mengoksidasi polutan padatan PM. Kandungan utama dalam PM (dikenal juga sebagai *soot atau jelaga)* adalah karbon *graphit*. Selain karbon, komponen lainnya yang tergolong PM adalah komponen sulfat dan berbagai elemen yang terdapat dalam abu yang terbentuk dari pemakaian oli (Majewski [7]). Karbon grafit ini selanjutnya membentuk bulatan bulatan kecil yang akhirnya bergabung menjadi partikel ukuran mikrometer (μm). PM umumnya berukuran kurang lebih 10 μm dan dikenal sebagai PM_{10} (Wang-hansen [11]). PM_{10} seperti yang telah disebutkan dalam tabel 1 dapat terserap dalam paru-paru dan menjadi penyebab penyakit berat bagi manusia. Selain itu, ukuran PM yang lebih halus yaitu $PM_{2.5}$ atau $PM_{0.1}$ ditengarai memiliki tingkat bahaya yang lebih tinggi bagi kesehatan manusia.

Prinsip kerja DPF dapat diibaratkan seperti *filter* (penyaring) pada umumnya yang didesain untuk menangkap padatan. Umumnya, DPF terbuat dari bahan keramik mengandung *cordierite* ($2MgO.\ 2Al_2O_3.\ 5SiO_2$) yang terdiri dari ribuan saluran kecil. Masing-masing saluran bersifat tertutup dan hanya terbuka pada salah satu sisi saja (sisi depan atau belakang). Dengan begitu, gas buang akan dipaksa menembus material keramik DPF yang berfungsi menahan padatan PM. Prinsip kerja DPF dijelaskan dalam gambar 7.



Gambar 7. Skema kerja *Diesel Particulate Filter* (DPF). Polutan padat berupa PM akan terjerap dalam DPF. Setelah filter jenuh, maka PM akan dioksidasi menjadi CO_2 dalam proses regenerasi. Sumber (Majewski) [12].

Padatan PM yang tertahan selanjutnya akan dioksidasi dalam proses "regenerasi". (Wang-hansen [11]) menguraikan bahwa ada 2 jenis regenerasi dalam DPF yaitu regenerasi aktif dan regenerasi pasif. Dalam regenerasi aktif, suhu gas buang dalam DPF ditingkatkan hingga 600°C sehingga PM dapat dioksidasi oleh O_2. Untuk tujuan regenerasi ini, katalis oksidasi seperti Pt dapat pula ditambahkan dalam DPF yang berfungsi meningkatkan kontak antara karbon dan O_2. Sementara itu, strategi regenerasi pasif dijalankan dengan cara mengondisikan gas buang agar gas buang dapat secara terus menerus mengoksidasi PM dalam DPF. Hal ini dilakukan dengan mengandalkan gas buang dari DOC antara lain dengan cara:

a. Menggunakan NO_2 sebagai produk DOC untuk mengoksidasi PM. Oksidasi PM dengan NO_2 memerlukan suhu yang lebih rendah dibandingkan O_2 dan untuk tujuan ini penambahan katalis Pt lagi-lagi dapat membantu proses regenerasi DPF.
b. Meningkatkan suhu DPF dengan memanfaatkan panas yang dihasilkan dari oksidasi CO dan hidrokarbon dalam DOC.

E. SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION (SCR)

Setelah melewati DPF, tahapan berikutnya dalam pembersihan gas buang adalah penghilangan senyawa NO_x. Penghilangan senyawa NO_x umumnya dilakukan dalam 2 teknik yaitu *lean NO_x storage and reduction (NSR)* dan *Selective Catalystic Reduction (SCR).*

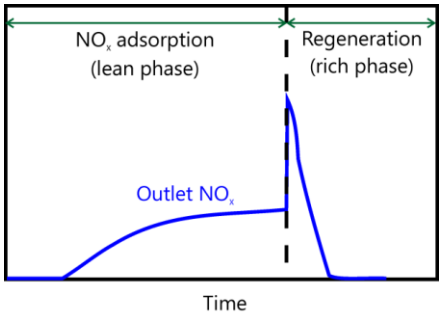
Selain dari 2 teknologi tersebut, ada juga teknologi lain seperti *direct decomposition* komponen NO_x yang saat ini masih berada dalam tahap penelitian (Olsson [13]). Teknologi ini merupakan teknologi yang menarik karena tidak memerlukan komponen tambahan untuk mengubah NO_x menjadi N_2 dan dua jenis katalis berbasis logam mulia (Pt) dan *zeolite* (Cu-ZSM-5) telah banyak diteliti. Namun sayangnya hingga kini teknologi ini belum menunjukkan tingkat konversi NO_x yang memuaskan khususnya dalam kondisi O_2 berlebih. Dalam kondisi O_2 berlebih (*lean* burn), O_2 umumnya akan menutupi seluruh katalis sehingga tidak dapat bekerja aktif untuk dekomposisi NO_x (Olsson [13]).

Selain itu, teknologi pengurangan NOx lainnya dengan mengubah gas buang ke dalam fase plasma juga banyak dibahas dalam literatur dan tidak akan dibahas dalam artikel ini. Dengan demikian, teknologi pengurangan NOx yang akan menjadi fokus dalam artikel ini adalah teknologi NSR dan SCR. Berikut akan diuraikan kedua teknologi ini.

1. Teknologi *Lean NO_x Storage and Reduction (NSR)*

Salah satu teknologi yang berpotensi untuk mengurangi emisi NO_x adalah teknologi *NO_x Storage and Reduction (NSR)* (Pereda-Ayo dan González-Velasco [3], Olsson [13], dan Majewski [14]). Seperti yang tersurat dalam namanya, teknologi NSR terdiri atas 2 tahapan proses yang terdiri dari proses *lean NO_x adsorption (storage)* dan *reduction* (Gambar 8) (Majewski [14]).

Pada tahap adsorpsi, senyawa NO_x dalam gas buang akan dijerap oleh katalis. Selanjutnya, senyawa NO_x yang terjerap akan direduksi dengan cara mengurangi jumlah O_2 atau yang dikenal juga dengan *rich phase*. Perubahan kondisi ini



Gambar 8. Penangkapan dan pelepasan NO_x dalam teknologi NSR. Pada tahap pertama (*lean phase*), NOx dijerap oleh katalis hingga jenuh. Pada tahap berikutnya (*rich phase)*, NOx yang terjerap akan direduksi menjadi N_2. Direproduksi dari (DieselNet Technology Guide) [9].

Dilakukan dengan mengubah kondisi operasi mesin. Dengan jumlah O_2 yang semakin berkurang, maka gas buang akan mengandung proporsi $HC/H_2/CO$ yang lebih besar dan selanjutnya digunakan untuk mereduksi NO_x yang telah terlebih dahulu terjerap dalam katalis dan mengubahnya menjadi N_2. Dalam tinjauan rentang waktu, waktu regenerasi memiliki waktu yang relatif singkat jika dibandingkan dengan tahap penjerapan (*lean phase*) (Majewski [14]).

Dengan 2 zona operasi yang berubah secara terus menerus (*transient*), mesin harus memiliki fleksibilitas dalam mengontrol O_2 yang umumnya dilakukan dengan pemasangan sensor. Untuk penerapannya, jenis mesin GDI (*Gasoline Direct Injection)* lebih sesuai untuk

penerapan teknologi NSR karena mampu mengakomodasi kedua zona operasi *lean* dan *rich phase.* Tahapan operasi NSR untuk pengurangan NO_x dalam gas buang terdiri dari beberapa tahapan yang diuraikan dalam tabel 2.

Tabel 2. Tahapan operasi penghilangan NO_x dengan teknologi NSR. Sumber (Majewski [14])

• Oksidasi NO ke NO_2. • Penjerapan NO_2 menjadi spesies permukaan *nitrate*.	Tahap adsorpsi (*lean phase*)
• Pembentukan komponen reduktan HC/CO/H_2 dengan berpindah dari *lean phase* menuju *rich phase.* • Pelepasan komponen nitrat dalam bentuk NO atau NO_2 dalam keadaan *rich phase.* • Reduksi NO_x ke N_2 dalam *rich phase* dengan bantuan reduktan gabungan HC/CO/H_2.	Tahap regenerasi (*rich phase*)

Sistem katalis yang digunakan untuk NSR adalah kombinasi dari katalis dengan fungsi oksidasi, adsorpsi dan reduksi dengan Al_2O_3 sebagai *support*. Umumnya kombinasi yang digunakan untuk tujuan ini adalah Pt (katalis oksidasi), Ba (katalis penjerap) dan Rh (katalis reduksi). Untuk tujuan penjerapan, komponen selain Ba yang dapat juga digunakan umumnya terletak dalam golongan alkali dan alkali tanah seperti K, Ca, Sr, Na, Li dlsb (Pereda-Ayo dan González-Velasco [3], Olsson [13], dan Majewski [14])

Salah satu permasalahan yang sering dihadapi dalam pengoperasian NSR adalah ketahanan katalis terhadap komponen belerang (*sulphur)* dalam gas buang (Olsson [13]). *Sulphur* umumnya terkandung dalam bahan bakar khususnya di negara-negara Asia. Kandungan *sulphur* dalam gas buang akan menyebabkan pembentukan sulfat pada permukaan katalis sehingga menurunkan kuantitas penjerapan NO_x. Pada tahap regenerasi, komponen sulfat terus terjerap pada permukaan katalis sehingga dalam waktu lama akan menurunkan kinerja katalis NSR (Majewski [14]). Untuk itu diperlukan komponen tambahan untuk mengurangi kadar *sulphur* dalam gas buang.

2. Teknologi SCR

2.1 Teknologi Ammonia-SCR atau urea-SCR.

Teknologi pengurangan NO_x yang lebih lazim dijumpai khususnya dalam industri kimia atau pembangkit energi adalah NH_3-SCR (dibaca ammonia-SCR). Diilhami dari teknologi yang telah matang dalam skala industri, maka NH_3-SCR juga ingin dimanfaatkan dalam proses pembersihan gas buang kendaraan diesel (Majewski [15], dan Nova dan Tronconi [16]). Teknologi NH_3-SCR memanfaatkan penambahan urea kedalam umpan katalis SCR (Nova dan Tronconi [16]). Oleh karena itu, katalis tambahan dapat juga ditambahkan didepan katalis SCR guna membantu dekomposisi urea ($CO(NH_2)_2$) yang menghasilkan NH_3 dan CO_2. Selanjutnya, NH_3 yang dihasilkan akan bereaksi dengan NO_x di dalam katalis SCR

dan mereduksi NO_x menjadi N_2. Pembaca yang ingin mendalami lebih jauh mengenai teknologi urea-SCR dapat membaca referensi 16 yang membahas tuntas perkembangan teknologi NH_3-SCR.

Sebagai reduktan, NH_3 umumnya didapatkan dari larutan NH_3 atau larutan urea demi alasan keselamatan. Larutan ini selanjutnya diletakkan dalam tangki tambahan yang dikontrol oleh sopir. Salah satu larutan urea yang tersedia di pasaran Eropa dan Amerika dikenal sebagai adBlue yang banyak tersedia di berbagai fasilitas pengisian bahan bakar. Larutan ini selanjutnya diinjeksikan kedalam saluran gas buang antara DPF dan katalis SCR (lihat gambar 2). Selanjutnya, campuran gas dan cairan ini akan bereaksi di dalam katalis SCR seperti yang tertera dalam reaksi berikut (Majewski [15], dan Nova dan Tronconi [16])

$4NO + 4NH_3 + O_2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O$	Reaksi SCR standar
$NO + NO_2 + 2NH_3 \rightarrow 2N_2 + 3H_2O$	Reaksi SCR cepat

Seperti yang terlihat dalam kedua reaksi diatas, perbandingan stoikiometri antara NO_x ($NO+NO_2$) dan NH_3 adalah 1:1 (mol) yang membuat teknologi ini efisien dalam hal penggunaan reduktan.

Secara umum, ada 3 jenis katalis yang kerap dipandang berpotensial untuk penerapan NH_3-SCR yaitu katalis berbasis logam mulia (*nobel metal)*, katalis yang berbasis vanadium dan katalis yang berbasis *zeolite* (Majewski [15], dan Nova dan Tronconi [16]). Berikut akan dibahas secara singkat mengenai ketiga jenis katalis ini.

a. Katalis berbasis logam mulia

Saat pengembangan NH_3-SCR pertama kali, Majewski [15] menguraikan bahwa katalis berbasis Pt kerap diuji coba dan menunjukkan aktivitas yang cukup tinggi pada suhu rendah. Puncak kinerja katalis Pt ditunjukkan pada rentang suhu 225-250°C. Diatas 250°C, reaksi samping berupa oksidasi NH_3 menjadi lebih dominan yang menyebabkan turunnya aktivitas SCR (karena menipisnya jumlah NH_3 yang tersedia untuk reaksi SCR). Karena keterbatasan jendela operasi ini, maka penggunaan katalis Pt untuk NH_3-SCR menjadi sangat terbatas dan kalah populer jika dibandingkan dengan 2 jenis katalis lainnya.

b. Katalis berbasis vanadium

Katalis berbasis vanadium atau dikenal sebagai V_2O_5/TiO_2 telah banyak digunakan untuk menurunkan emisi NO_x dalam skala industri / pembangkitan energi. Seperti yang diuraikan dalam referensi Majewski [15]) katalis vanadia memiliki puncak kinerja pada suhu medium dalam rentang 260-450°C. Tungsten trioxide (WO_3) kerap ditambahkan sebagai *stabilizer* yang memberikan ketahanan (*durability*) pada suhu tinggi >700°C. Kekurangan utama dari katalis berbasis vanadia adalah risiko penguapan vanadium yang sangat beracun pada suhu tinggi. Oleh karena itu, penggunaan katalis jenis ini dibatasi pada proses yang bersuhu dibawah 450°C. Dalam penerapan NH_3-SCR untuk tujuan otomotif, katalis jenis ketiga yang berbasis *zeolite* sering menjadi pilihan yang lebih menarik karena dapat beroperasi pada suhu tinggi tanpa ada risiko penguapan zat beracun.

c. Katalis berbasis zeolite

Zeolite adalah kristal *aluminasilicat* (kombinasi Si dan Al) dengan karakteristik *micropores* yang khas. Ada ratusan jenis *zeolite* yang telah diidentifikasi baik dari

alam maupun sintetis. Sebagai katalis, *zeolite* umumnya digunakan sebagai *support* (pengemban) logam aktif. Logam aktif dapat digunakan dengan *zeolite* melalui mekanisme *ion exchange* dan aktif sebagai katalis NH_3-SCR. Logam aktif yang umum digunakan adalah tembaga (Cu) dan besi (Fe) yang secara berurutan aktif pada rentang suhu rendah (200-400°C) dan rentang suhu tinggi hingga 600°C. Umumnya jenis yang banyak diteliti untuk aplikasi SCR adalah Cu/ZSM5 dan Fe/ZSM5 atau yang berbasis *mordenite* (Majewski [15], dan Nova dan Tronconi [16]) Salah satu tantangan dalam penggunaan katalis *zeolite* adalah ketahanan katalis jenis ini terhadap uap air pada suhu tinggi di atas 600°C. Pada kondisi ini, proses deaktivasi pada katalis dapat terjadi melalui mekanisme *de-alumination* yaitu berpindahnya ion logam yang keluar dari dalam struktur (Majewski [15]). Untuk itu, *zeolite* dengan pori yang lebih kecil seperti SAPO dan SSZ-13 saat ini semakin dikembangkan karena memiliki kinerja dan ketahanan yang lebih baik (Nova dan Tronconi [16]). Untuk lebih mengetahui mengenai beragam jenis *zeolite*, pembaca dapat merujuk pada laman *database* struktur *zeolite*: http://www.iza-structure.org/.

2.2 *Teknologi HC-SCR (hydrocarbon-selective catalytic reduction)*

Pengembangan teknologi hidrokarbon-SCR (HC-SCR) didorong oleh keinginan untuk memanfaatkan hidrokarbon yang terkandung dalam gas buang (pasif) atau bahan bakar (aktif) sebagai reduktan (Iwamoto dan Hamada [17], dan Majewski [18]). Agar dapat berkompetisi dengan NH_3-SCR secara ekonomis, maka penggunaan bahan bakar (jika menggunakan bahan bakar sebagai reduktan) untuk tujuan pengurangan NO_x hendaknya seminimal mungkin (*fuel penalty* rendah). Di samping itu, formulasi dan konfigurasi katalis yang digunakan hendaknya memiliki ketahanan terhadap suhu tinggi, kandungan air serta ketahanan terhadap sulfur (Majewski [18]). Secara umum reaksi HC-SCR dapat dituliskan sebagai:

$$HC + NO_x + O_2 \rightarrow N_2 + CO_2 + H_2O$$

Konsep HC-SCR sendiri sebenarnya sudah digagas sejak lama yaitu awal tahun 90an oleh Iwamoto dan Hamada dari Jepang (Iwamoto dan Hamada [17]). Dengan menggunakan katalis berbasis *zeolite* (Cu-ZSM5), puncak konversi NO_x berada pada suhu 350°C. Selain itu, katalis seperti Pt/Al_2O_3 juga menunjukkan kinerja yang menjanjikan pada suhu rendah (dengan konversi maksimum pada suhu 250°C) (Majewski [18]). Dengan segala keterbatasannya, kedua katalis ini belum begitu banyak digunakan untuk teknologi HC-SCR saat ini. Dengan demikian, diperlukan formulasi katalis HC-SCR yang memiliki jendela operasi yang lebar (aktif pada suhu rendah dan suhu tinggi) serta memiliki ketahanan yang baik.

Salah satu katalis yang saat ini banyak diteliti untuk penerapan HC-SCR adalah Ag/Al_2O_3 (Aziz [6], dan Majewski [18]). Katalis ini sendiri sebenarnya bukanlah katalis baru karena kemampuannya dalam HC-SCR sendiri sebenarnya sudah dilaporkan sejak tahun 1993 oleh Tatsuo Miyadera dari Jepang (Aziz [6]). Berbagai pengembangan tetap dilakukan untuk meningkatkan aktivitas dan ketahanan jenis katalis ini. Dalam pengembangannya, katalis Ag/Al_2O_3 menunjukkan aktivitas yang memuaskan dengan ethanol atau hidrokarbon rantai

panjang (oktana atau dekana) yang memiliki kemiripan dengan bahan bakar diesel. Hanya saja, beragam aspek teknis dan kinerja masih membatasi produksi Ag/Al_2O_3 dalam skala besar. Selain itu, penambahan H_2 dalam gas buang dapat meningkatkan kinerja HC-SCR pada Ag/Al_2O_3 (Aziz [6]). Menariknya, dengan penambahan H_2, katalis ini juga aktif bekerja sebagai katalis NH_3-SCR. Untuk beberapa hidrokarbon atau NH_3, penambahan H_2 sayangnya menjadi mutlak diperlukan. Sehingga, diperlukan teknologi tambahan guna memproduksi H_2 seperti teknologi *reformer* yang efisien di atas kendaraan (Aziz [6]). Pada tahun 2010, kerja sama perusahan General Electric (GE), Teneco dan Umicore telah melaporkan komersialisasi katalis berbasis Ag untuk pengurangan emisi NO_x dan menunjukkan kinerja yang tinggi dengan ethanol sebagai reduktan (RTTNEWS [19]). Jika dibarengi dengan pengembangan bahan bakar terbarukan, maka campuran ethanol-bensin atau ethanol akan menjadi bahan bakar alternatif potensial di masa datang sehingga potensi pengembangan Ag/Al_2O_3 untuk HC-SCR pun akan semakin terbuka.

F. PENUTUP

Setelah diuraikan mengenai konsep pembersihan gas buang kendaraan diesel, penulis berharap artikel ini dapat menambah khazanah pengetahuan pembaca mengenai ”pabrik-pabrik kimia kecil” yang tersembunyi dalam saluran pembuangan gas buang kendaraan diesel. Ketiga unit yang meliputi DOC, DPF dan SCR ini bekerja secara simultan dan terus menerus guna mengurangi polusi CO, NO_x, hidrokarbon dan PM dalam kendaraan diesel yang ramah lingkungan. Dengan mengurangi emisi kendaraan bermotor, pengembangan teknologi ini telah ikut berkontribusi menciptakan kualitas udara yang lebih baik bagi lingkungan dan manusia. Meski telah dibahas mengenai berbagai jenis katalis yang lazim digunakan dalam dunia otomotif, tak menutup kemungkinan jenis katalis-katalis lain seperti logam-logam *rare earth* atau *perovskite* dapat juga menjadi katalis-katalis otomotif yang kompetitif. Seperti layaknya dunia sains yang lain, perkembangan teknologi dan inovasi dalam katalisis otomotif pun terus berlangsung.

Dengan semakin kompleksnya permasalahan lingkungan dewasa ini seperti fenomena pemanasan global yang kita rasakan saat ini, maka mutlak diperlukan sebuah solusi yang menyeluruh seperti yang tertuang dalam konsep *sustainable development*. Sebuah masyarakat modern yang berkelanjutan (*sustainable society*) akan selalu mengedepankan kesinambung-an konsep lingkungan, sosial dan ekonomi seperti yang dicontohkan dalam tulisan kali ini mengenai perbaikan kualitas udara dengan teknologi katalisis otomotif. Didorong oleh standar emisi yang ketat (faktor sosial), maka setiap perusahaan dan institusi penelitian akan berlomba-lomba untuk berinovasi dengan teknologi yang memenuhi faktor lingkungan dan ekonomi.

G. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada *Indonesian Scholar Journal* atas inisiatif positifnya untuk memopuler-kan sains bagi masyarakat Indonesia. Semoga dapat terus berkelanjutan. Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan di *Chalmers University of Technology*, Swedia: Ferry Anggoro Ardi Nugroho dan Kurnia Wijayanti atas segala diskusi dan masukan terhadap rancangan tulisan yang saya persiapkan.

*korespondensi:
muhammad.azis@ugm.ac.id

REFERENSI

[1] R.M. Heck, R. J. Farrauto dan S.T. Gulati, 'Catalytic Air Pollution Conttrol: Commercial Technology (3rd ed.), John Wiley & Sons, 2012.

[2] D.Y. Murzin, 'Engineering Catalysis", Göttingen, Walter de Gruyter GmbH, 2013, pp. 1-6

[3] Beñat Pereda-Ayo dan Juan R. González-Velasco (2013). NOx Storage and Reduction for Diesel Engine Exhaust Aftertreatment, Diesel Engine - Combustion, Emissions and Condition Monitoring, Dr. Saiful Bari (Ed.), ISBN: 978-953-51-1120-7, InTech, DOI: 10.5772/55729. Available from: http://www.intechopen.com/books/diesel-engine-combustion-emissions-and-condition-monitoring/nox-storage-and-reduction-for-diesel-engine-exhaust-aftertreatment (diakses pada 27 Oktober 2014).

[4] H. Jässkeläinen dan M.K. Khair, "Diesel Engines", website: www.dieselnet.com (diakses pada 6 Agustus 2015)

[5] DieselNet Technology Guide, "Health and Environmental Effects", website: www.dieselnet.com (diakses pada 27 Oktober 2014).

[6] M.M. Azis, 2015, "Experimental and kinetic studies of H2 effect on lean exhaust aftertreatment processes: HC-SCR and DOC", PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

[7] W. Addy Majewski, "What are diesel emissions", website: www.dieselnet.com (diakses pada 27 Oktober 2014).

[8] DieselNet Technology Guide, "Health effects of gas phase components", website: www.dieselnet.com (diakses pada 27 Oktober 2014).

[9] DieselNet Technology Guide, "Emission standards: European Union heavy duty trucks and bus engines", website: www.dieselnet.com (diakses pada 27 Oktober 2014).

[10] X. Auvray, 2013, "Fundamental studies of catalytic system for diesel emission control", PhD thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

[11] C. Wang-hansen, 2012, "Kinetic Analysis of Automotive Soot Oxidation: Development and Application of Experimental and Evaluation Methods", Ph.D thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

[12] W. Addy Majewski,"Wall-flow monoliths" Available from: https://www.dieselnet.com/tech/dpf_wall-flow.php (diakses pada 30 Maret 2016).

[13] L. Olsson, 2002, "Fundamental Studies of Catalytic NOx removal", Ph.D thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

[14] W. Addy Majewski, "NOx Adsorbers", website: www.dieselnet.com (diakses pada 27 Oktober 2014).

[15] W. Addy Majewski, "Selective Catalytic Reduction", website: www.dieselnet.com (diakses pada 27 Oktober 2014).

[16] I. Nova dan E. Tronconi, "Urea-SCR Technology for deNOx Aftertreatment of Diesel Exhausts", Springer, 2014.

[17] Iwamoto, M. dan Hamada, H.,1991, "Removal of Nitrogen Monoxide From Exhaust gases Through Novel Catalytic Processes", Catalysis Today (10).

[18] W. Addy Majewski, “Lean NOx Catalyst”, website: www.dieselnet.com (diakses pada 27 Oktober 2014).

[19] RTTNEWS, “GE Reveals Breakthrough Result On Hydrocarbon Lean NOx Catalyst Technology - Quick Facts Available from “http://www.rttnews.com/1268106/ge-reveals-breakthrough-result-on-hydrocarbon-lean-nox-catalyst-technology-quick-facts.aspx (diakses pada 30 Maret 2016).

ULASAN OPTIMISASI LINI PRODUKSI: ALOKASI *BUFFER* DAN MESIN FLEKSIBEL

Vina Sari Yosephine*

*Department of Industrial and System Engineering , Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, South Korea

ABSTRAK

Manufaktur merupakan salah satu industri yang kuat dan berkembang di Indonesia. Dalam pelaksanaan produksi ada banyak sekali proses yang saling berinteraksi untuk mengubah bahan baku menjadi barang jadi. Di tengah berkembangnya teknologi di Indonesia, industri manufaktur juga semakin berkembang dan bertambah tingkat kerumitannya. Parameter-parameter produksi sudah tidak dapat lagi diputuskan dengan metode tradisional. Untuk mengejar kemajuan teknologi diperlukan pendekatan tingkat lanjut dan model optimisasi yang dapat diterapkan pada industri manufaktur Indonesia yang memiliki lini produksi. Metode ini dimaksudkan untuk meraih laju produksi setinggi-tingginya dengan cara alokasi mesin dan buffer dalam lini produksi karena secara umum, buffer telah digunakan oleh industri untuk meningkatkan laju produksi. Artikel ini menyajikan ulasan mengenai pemodelan lini produksi tingkat lanjut untuk meningkatkan efisiensi produksi dan juga contoh optimisasi yang dapat diaplikasikan pada industri manufaktur di Indonesia

Kata kunci : *lini produksi, buffer, optimalisasi, pemodelan*

PENDAHULUAN

Tidak diragukan bahwa Indonesia merupakan negara yang besar dengan perekonomian yang kuat. Sebagai negara berkembang dengan sumber daya yang melimpah, Indonesia memiliki berbagai industri yang menopang perekonomian. Perkembangan ekonomi Indonesia yang berada di atas 6% selama tiga tahun terakhir ini tidak lepas dari dukungan industri manufaktur. Hingga saat ini, industri manufaktur di Indonesia sangat berkembang secara teknologi, namun masih banyak menggunakan sistem operasi yang tradisional. Dengan tujuan untuk memberikan kontribusi dari sisi akademik terhadap industri manufaktur di Indonesia, artikel ini membahas mengenai salah satu teknologi dan manajemen operasi tingkat lanjut yang dapat digunakan oleh industri manufaktur termasuk di Indonesia.

Cakupan pembahasan dalam artikel ini berupa lini produksi dan bagaimana komponen-komponen di dalamnya saling berinteraksi. Komponen utama dalam manufaktur adalah mesin-mesin yang digunakan untuk transformasi bahan baku dan bahan setengah jadi menjadi produk akhir (Koenigsberg [2]). Material diproses dimulai dari mesin di bagian hulu yang kemudian dilanjutkan ke mesin di bagian hilir. Sekumpulan mesin yang secara seri atau paralel memproses produk didefinisikan sebagai lini produksi. Lini produksi dapat berbentuk proses perakitan mobil, pengecatan model, proses permesinan, dll.

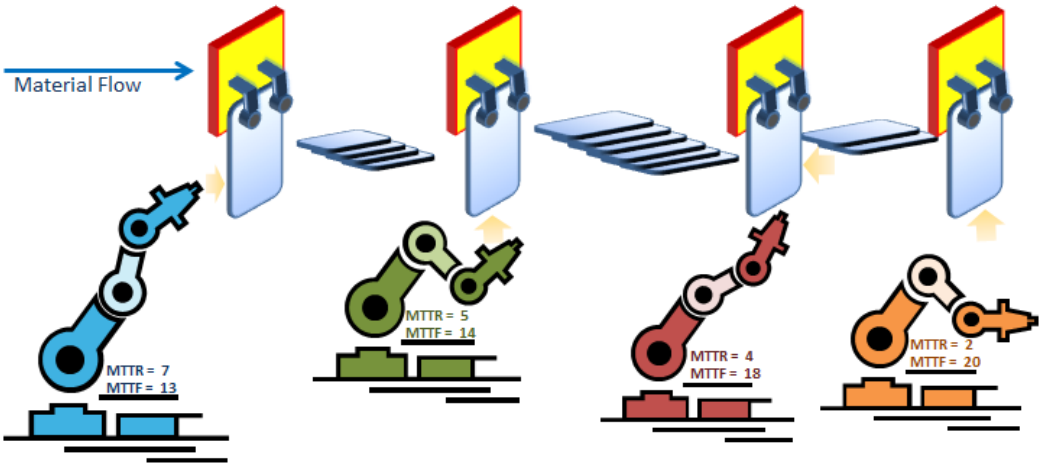
LINI PRODUKSI SERIAL

Untuk memusatkan fokus pada artikel ini, kita dapat mengambil contoh beberapa lini produksi. Contoh pertama adalah pembuatan kaca panel LCD (*Liquid Crystal Display*), seperti pada gambar 1. Tujuan dari proses ini adalah untuk transformasi lembaran kaca khusus yang besar menjadi beberapa kaca LCD yang nantinya akan digunakan sebagai monitor TV atau komputer personal. Ukuran awal dari kaca tersebut yaitu ± 2m x 2.5m. Proses yang kita fokuskan di sini adalah proses penghalusan seluruh sisi dari kaca setelah proses pemotongan. Proses ini bisa disebut dengan proses penghalusan progresif.

Dalam proses penghalusan progresif, suatu *system conveyor* memindahkan material mulai dari mesin pertama ke mesin berikutnya sehingga akhirnya sampai ke mesin paling akhir. Setiap proses memiliki satu mesin khusus untuk menghaluskan bagian dari panel LCD. Walaupun setiap proses memiliki mesin sendiri-sendiri, namun mesin-mesin tersebut memiliki fungsi yang sama yaitu untuk menghaluskan permukaan kaca. Perbedaan utama yang dimiliki mesin-mesin tersebut yaitu mata pisau penghalus yang berbeda dengan parameter yang berbeda juga. Mesing-mesin dengan karakter yang demikian kita namakan Mesin-Mesin Fleksibel. Dengan karakter mesin yang mirip, lini produksi dapat mengubah lokasi dari mesin-mesin fleksibel tersebut. Berdasarkan observasi lokasi mesin mempengaruhi laju produksi dalam pembuatan barang jadi. Dalam praktiknya, jumlah mesin dalam suatu lini produksi berkisar antara 6-10 mesin.

Selain alur material dan sifat-sifat mesin, karakter utama lain yang dapat kita temukan pada lini produksi adalah buffer di antara mesin-mesin produksi. Dikarenakan keterbatasan ruang dalam pabrik, jumlah buffer juga dibatasi oleh besarnya bangunan pabrik. Keseluruhan karakter ini menentukan performa dari lini produksi.

Contoh lain dengan karakter yang mirip adalah proses pengecatan *body* mobil. Pada industri perakitan mobil, terdapat beberapa tahap akhir untuk mendapatkan bentuk akhir dari mobil. Setelah kerangka dan *body* mobil selesai dibentuk.

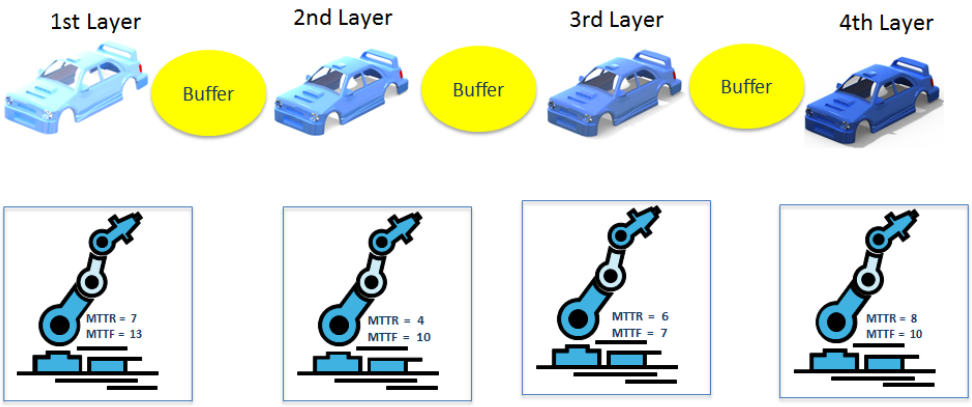


Gambar 1 Lini Produksi pada Panel Kaca LCD

Body dari mobil akan melewati beberapa tahap dari pengecatan untuk mendapatkan warna akhir sesuai dengan ketentuan. Misalnya untuk mendapatkan warna biru metalik, *body* mobil harus melewati beberapa tahap warna mulai dari yang terang sampai warna yang gelap.

Dengan konsep yang sama dengan kaca panel LCD, suatu sistem *conveyor* digunakan untuk memindahkan *body* mobil untuk diberi warna yang sesuai dengan tahapannya. *Body* mobil bergerak dari hulu sampai proses akhirnya di hilir. Dengan logika yang sama, mesin-mesin untuk pengecatan *body* mobil dapat dikatakan sebagai mesin-mesin fleksibel. Kebanyakan proses perakitan mobil memiliki ruangan terbatas yang mengakibatkan hanya sedikit *buffer* yang dapat dialokasikan di antara mesin-mesin fleksibel. Secara general, proses ini dapat dilihat pada gambar 2.

Kedua contoh di atas dapat dimodelkan sebagian lini produksi seri. Berdasarkan definisinya, lini produksi merupakan suatu sistem manufaktur dimana mesin-mesin (M_1,…,M_(k-1)) terhubung secara seri dan dipisahkan oleh buffer (B_1,…,B_(k-1)). Material diproses mulai dari mesin pertama di hulu menuju mesin ke dua dan dilanjutkan sampai ke mesin paling akhir. Di literatur yang lain, sistem ini dikenal dengan *flow line* atau *tandem queuing system*.



Gambar 2 Proses Pengecatan *Body* Mobil

Seiring berkembangnya industri, penelitian mengenai Lini produksi menjadi sangat populer dikarenakan efeknya yang besar terhadap ekonomi dan juga nilai inventaris. Walaupun buffer dapat meningkatkan laju produksi, penambahan buffer akan memberikan pengaruh ekonomi yang besar terhadap investasi awal. Buffer membutuhkan ruang dan perawatan selama proses. Untuk membantu pengambilan keputusan, artikel ini akan berfokus kepada pengukuran laju produksi dan jumlah rata-rata inventaris.

PEMODELAN UNTUK MENCAPAI LAJU PRODUKSI YANG OPTIMAL

Secara lazim diketahui bahwa industri menginginkan agar lini produksi dapat menghasilkan produk akhir dalam waktu sesingkat-singkatnya, dengan demikian maka semakin banyak produk yang dapat dijual, dan akhirnya dapat meningkatkan pendapatan. Untuk itu laju produksi adalah indikator utama dalam proses produksi. Dengan asumsi bahwa kapasitas maksimal produksi adalah tetap, laju produksi merupakan suatu angka yang menentukan

kecepatan produksi dalam suatu periode waktu.

Dalam proses manufaktur, mesin memiliki sifat yang absolut yaitu: akan mengalami kerusakan dan waktu produksi tidak dapat diprediksi (atau dapat diprediksi namun tidak konstan). Sifat-sifat ini dapat menyebabkan lini produksi berhenti dan seluruh proses terhenti. Terhentinya proses mengakibatkan kerugian dalam proses manufaktur. Secara teknis, mesin-mesin dalam proses produksi memiliki ciri-ciri alami yang dikenal dengan MTTR (*Mean Time to Repair*) dan MTTF (*Mean Time to Failure*) yang memprediksi keandalan dari mesin.

Untuk mengantisipasi terhentinya proses produksi secara keseluruhan, banyak industri menempatkan buffer di antara mesin. *Buffer* merupakan material setengah jadi yang akan diproses oleh mesin selanjutnya. Untuk mempermudah penggambaran sistem, lini produksi dapat dimodelkan dengan gambar seperti pada gambar 3.

Dengan kenyataan bahwa besarnya pabrik adalah terbatas dan tertentu, pertanyaan yang paling yang sering ditanyakan oleh para pelaku industri adalah "berapa banyak *buffer* yang harus ditempatkan di antara mesin untuk mendapatkan laju produksi yang paling tinggi?". Perlu disiasati juga bahwa buffer merupakan stok yang belum dapat dijual dan mengakibatkan munculnya penambahan biaya produksi.

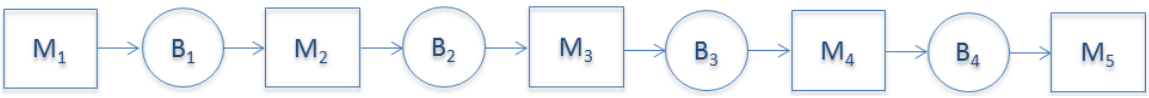
Lini produksi adalah sistem yang sangat kompleks dikarenakan sifat ketidakpastian di dalamnya. Pemodelan ini juga dikategorikan sebagai proses kombinatorial stokastik. Sebelum diskusi mengenai optimisasi dibahas secara detail, bagian selanjutnya membahas pemodelan dasar dari lini produksi.

ULASAN PEMODELAN LINI PRODUKSI

Dasar pemodelan untuk lini produksi diawali dengan sistem yang paling sederhana yaitu mesin tunggal, mesin dengan buffer tunggal, dan pada akhirnya lini produksi dengan banyak mesin. Untuk mempermudah pemodelan, berikut notasi yang akan digunakan dalam artikel ini.

p_i	=	Probabilitas kegagalan $\mathrm{M_i}$ ketika mesin sedang beroperasi (mesin tidak terhambat karena *block* atau *starvation*)
$\mathrm{r_i}$	=	Probabilitas perbaikan ketika mesin sedang diperbaiki (probabilitas mesin dapat beroperasi kembali ketika sedang dalam perbaikan)
$\mathrm{N_i}$	=	Besarnya jumlah *buffer* $\mathrm{B_i}$
E	=	Efisiensi total atau laju produksi
$E(i)$	=	Efisiensi pada setiap sistem *buffer* tunggal
E^*	=	Efisiensi optimum
e_i	=	Efisiensi terisolasi : efisiensi ketika tidak ada pengaruh dari mesin atau *buffer*
$p_d(i)$	=	Probabilitas kegagalan dari mesin sebelah kanan $\mathrm{M_d(i)}$ dari sistem *buffer* tunggal $\mathrm{L(i)}$
$p_u(i)$	=	Probabilitas kegagalan dari mesin sebelah kiri $\mathrm{M_d(i)}$ dari sistem *buffer* tunggal $\mathrm{L(i)}$
$r_d(i)$	=	Probabilitas perbaikan dari mesin sebelah kanan $\mathrm{M_d(i)}$ dari sistem *buffer* tunggal $\mathrm{L(i)}$

$r_u(i)$ = Probabilitas perbaikan dari mesin sebelah kiri $M_d(i)$ dari sistem *buffer* tunggal L(i)
$E(i)$ = Efisiensi sistem *buffer* tunggal L(i)
$MTTF$ = *Mean Time to Failure*
$MTTR$ = *Mean Time to repair*
S_j = *Sequence* yang terpilih untuk dioptimisasi
n = jumlah *buffer* sesaat (dalam 1 periode waktu)
α_i = Status mesin (1 untuk beroperasi dan 0 untuk tidak beroperasi)



Gambar 1 Lini produksi dengan 5 Mesin

MESIN PRODUKSI

Pada pemodelan lini produksi, mesin dapat dikategorikan menjadi 3 jenis: deterministik, eksponensial, dan kontinu (Gershwin [4]). Pada model deterministik, waktu yang dibutuhkan suatu material di dalam mesin diketahui, tetap dan sama di seluruh mesin saat mesin tidak gagal. Waktu dapat dimodelkan secara diskret. Model ini dapat merepresentasikan pabrik secara natural namun terbatas karena waktu pengerjaan yang sama. Untuk model eksponensial mesin-mesin dapat beroperasi dengan waktu pengerjaan yang berbeda-beda dan parameter operasi terdistribusi secara eksponensial. Model kontinu berasumsi bahwa material yang mengalami proses bersifat fluida. Mesin-mesin beroperasi dengan kecepatan produksi yang berbeda-beda dan probabilitas kegagalan mesin dipengaruhi oleh jumlah buffer.

Mesin deterministik adalah contoh yang paling sederhana dari pemodelan mesin produksi namun sangat penting sebagai dasar ilmu untuk mempelajari sistem produksi. Komponen dasar dari lini produksi adalah mesin tunggal yang bekerja tanpa dipengaruhi oleh buffer. Mesin tunggal ini bisa dimodelkan dengan Rantai Markov dengan *state* (keadaan) yang dinotasikan dengan (n,α_1,α_2). Keseluruhan *state* kemudian digabungkan untuk mendapatkan satu nilai kecepatan produksi pada kondisi setimbang (*steady state*).

Pada artikel ini, mesin tunggal diadaptasi dari model mesin Buzacott. Mesin hanya dapat mengalami dua kondisi yaitu beroperasi atau tidak. Pada pemodelan kali ini tidak dibahas mengenai mesin yang beroperasi secara parsial. Penyebab mesin tidak beroperasi adalah rusak atau idle. Laju produksi dapat dihitung dengan formula (1)

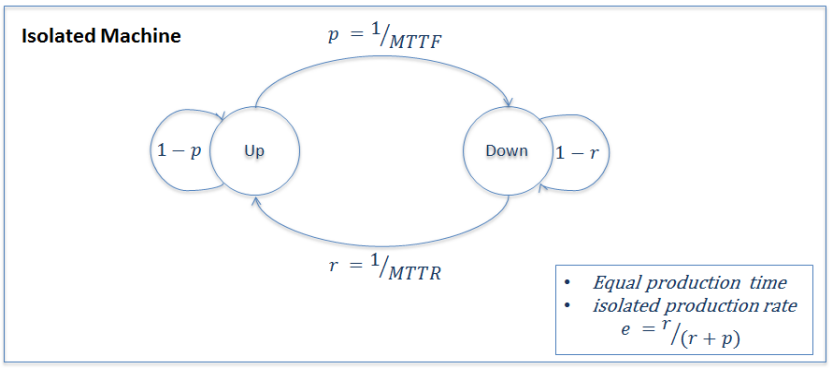
$$e = \frac{r}{r+p} \tag{1}$$

Untuk penjelasan lebih lengkap dan mendalam mengenai pemodelan mesin lini produksi, pembaca dapat mendalami lebih lanjut buku *Manufacturing System Engineering* (Gershwin [4]).

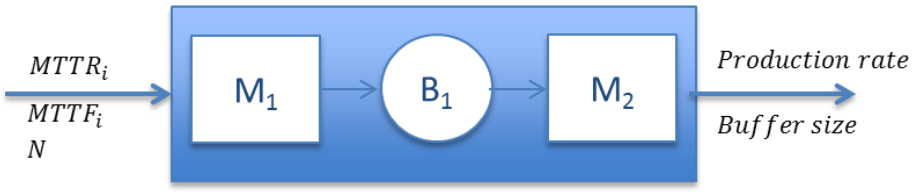
BUFFER TUNGGAL

Buffer tunggal merupakan model *production* paling sederhana yang merupakan dasar perhitungan laju produksi dari lini produksi (Gershwin [4]). Pada sistem ini kita dapat mempelajari interaksi antara mesin dan *buffer* dan sebaliknya.

Fenomena yang paling menarik adalah ketika jumlah buffer mempengaruhi kinerja dari mesin.



Gambar 4 *Markov Chain* Model untuk Mesin dengan Waktu Deterministik



Gambar 5 Sistem *Buffer* Tunggal

Buffer kosong	***Buffer maksimum***	***Buffer = n (1,…,N-1)***
(0,0,0)	*(N,0,0)*	*(n,0,0)*
(0,0,1)	*(N,0,1)*	*(n,0,1)*
(0,1,0)	*(N,1,0)*	*(n,1,0)*
(0,1,1)	*(N,1,1)*	*(n,1,1)*

Gambar 2 Kondisi Mesin pada *Steady State*

Gambar 5 merupakan representasi dari sistem buffer tunggal. Ketika buffer B1 mencapai jumlah maksimum atau penuh, mesin M1 tidak dapat beroperasi, kondisi ini dinamakan "*block*". Demikian juga jika B1 kosong, M2 tidak dapat beroperasi; kondisi ini dinamakan "*starvation*". Pada model deterministik, probabilitas masing-masing kondisi dapat dihitung dengan teori *conditional probability*. *State* dinotasikan dengan (n,α_1,α_2), dengan n merupakan jumlah buffer yang bernilai [0,N], α_1adalah kondisi mesin 1 dan α_2 adalah kondisi mesin 2 yang bernilai 0 jika rusak (tidak beroperasi) atau 1 jika sebaliknya. Seluruh kemungkinan yang dimaksud dapat dilihat pada tabel di gambar 6.

Dari seluruh kemungkinan di atas, maka efisiensi total E dari sistem didapatkan dengan cara penggabungan seluruh probabilitas secara kumulatif atau disebut dengan fungsi kepekatan probabilitas. Sebagai catatan, karena model deterministik berasumsi bahwa waktu produksi adalah sama, maka komponen waktu dianggap 1. Hal ini menyebabkan nilai laju produksi dianggap sama dengan efisiensi.

$$E = \sum_{\Pi} p(n, \alpha_1, \alpha_2) \tag{2}$$

dimana Π adalah jumlah total dari kondisi seperti disebutkan dalam tabel.

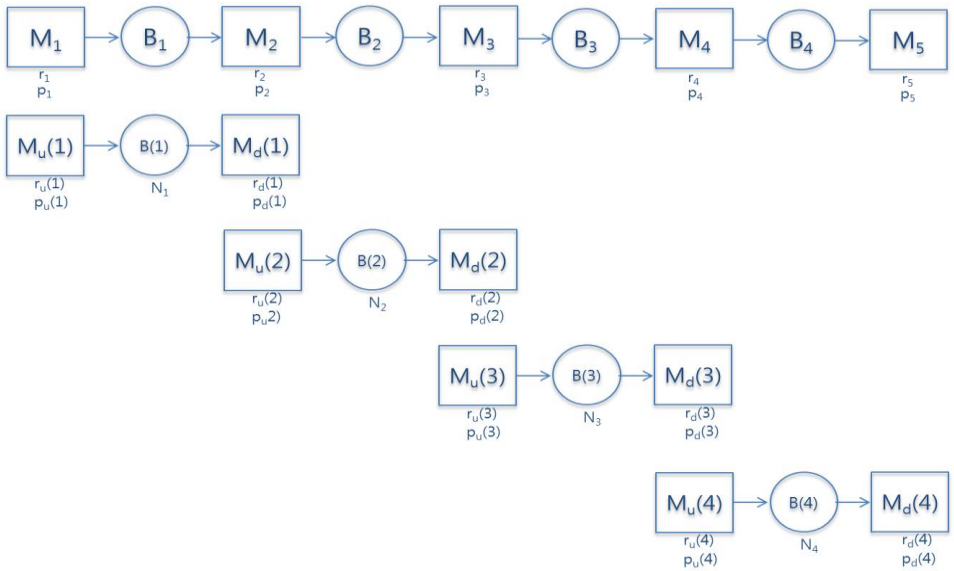
LINI PRODUKSI

Pada umumnya lini produksi terdiri dari sekumpulan mesin dengan buffer di antara mesin-mesin. Sistem ini menjadi sangat kompleks karena jumlah states yang bertambah secara eksponensial yang menyebabkan perhitungan sistem buffer tunggal tidak dapat diterapkan. Hingga saat ini, belum didapatkan perhitungan matematik secara pasti, namun pendekatan matematik oleh Gershwin [1] cukup akurat untuk menggambarkan kondisi lini produksi yang sesungguhnya. Pendekatan yang serupa juga dilakukan oleh peneliti lain seperti *Decomposition Method Heavey* [11], namun pada artikel kali ini akan digunakan pendekatan oleh Gershwin [1].

Perhitungan lini produksi ini dinamakan *Decomposition Method* karena lini produksi didekomposisi menjadi bagian yang lebih kecil. Sistem pada gambar 3 dikelompokkan menjadi beberapa sistem buffer tunggal L(i). Masing-masing buffer tunggal dapat dihitung dengan perhitungan buffer tunggal seperti pada penjelasan sebelumnya. Metode ini memperkirakan laju produksi dengan cara menghitung probabilitas hubungan antara sistem buffer tunggal dengan sistem sebenarnya. Metode ini mengiterasi parameter-parameter pada mesin buffer tunggal supaya interaksinya serupa dengan aliran material pada sistem sebenarnya. Metode ini telah dibuktikan melalui percobaan simulasi numerik.

Untuk memperkirakan aliran material pada sistem yang terpisah dan sistem sebenarnya, parameter-parameter dipilih dengan konsep seperti berikut (Gershwin [4]):

1. Laju material keluar dan masuk *buffer* B_i pada line *L(i)* mendekati nilai laju material di *buffer* B_i pada line *L*.
2. Probabilitas *buffer L(i)* menjadi kosong atau penuh sama dengan probabilitas pada line *L*
3. Probabilitas aliran material keluar dan masuk *buffer* B_i pada line *L(i)* saat mendapatkan gangguan mendekati nilai probabilitas pada line *L*.
4. Jumlah rata-rata material pada *buffer* B_i mendekati jumlah rata-rata material B_i pada line *L*.



Gambar 7 Decomposition Method

Untuk menghitung laju produksi, *Decomposition Method* membutuhkan 4 parameter dari masing-masing sistem *buffer* tunggal *L(i):* $r_u(i), r_d(i), p_u(i), p_d(i)$ dan menghasilkan $4(\mathrm{K}-1)$ parameter pada keseluruhan lini produksi. Seluruh parameter diasumsikan mempunyai distribusi *geometric*.

Metode ini memanfaatkan sifat-sifat *conservation of flow, flow-rate idle time relationship*, dan *resumptions of equation*. Indikator yang dicari dengan metode ini adalah laju produksi dan jumlah *buffer* rata-rata pada kondisi *steady state*.

1. *Conservation of Flow*
   Menurut hukum ini laju produksi pada setiap sistem *buffer* tunggal adalah sama.
   $\mathrm{E(i)} = E(1), i = 2, .., k-1$
2. *Flow rate – Idle time relationship*
   Hubungan ini menunjukkan hubungan antara laju material dan probabilitas mesin mengalami *block* atau *starvation* yang menyebabkan mesin *idle*.
3. *Resumption of flow*
   Hubungan ini menunjukkan hubungan antara probabilitas perbaikan mesin antara dua sistem *buffer* tunggal yang kemudian dibandingkan dengan lini produksi yang asli.

Ketiga sifat di atas melengkapi *Decomposition Method* untuk mengevaluasi lini produksi deterministik.

OPTIMISASI LINI PRODUKSI

Dimulai dengan kebutuhan industri untuk memperbaiki kinerja produksinya, penelitian dengan tujuan optimisasi lini produksi semakin banyak dilakukan. Bagian ini akan membahas optimisasi dengan model yang sederhana yaitu model deterministik. Tujuan dari optimisasi lini produksi ini adalah untuk mendapatkan laju produksi yang setinggi-tingginya dengan luas ruangan yang sudah ditentukan. Pada kasus ini, variabel yang dapat diubah-ubah yaitu lokasi buffer dan lokasi mesin. Lewat kasus ini kita dapat melihat bahwa optimisasi dilakukan di tahap produksi.

Terdapat dua kasus ekstrem dalam proses produksi berdasarkan jumlah *buffer*-nya: *zero buffer* dan *infinite buffer*. Tanpa adanya buffer di antara mesin-mesin produksi, laju produksi dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$E^0 = \mu_0 \times \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{k} \frac{p_i}{r_i}} \tag{3}$$

Untuk kasus ekstrem lainnya, lini produksi memiliki buffer dengan jumlah tak terhingga. Dalam kasus *infinite buffer*, jika ada satu mesin yang tidak dapat beroperasi (*fail*), performa keseluruhan lini produksi tidak akan terpengaruh, sehingga laju produksi dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$E^\infty = \min_k(e_1, \dots, e_k) \times \mu_0 \tag{4}$$

Walaupun buffer tak hingga sangat diharapkan untuk memaksimalkan proses produksi, untuk proses produksi berskala besar, penambahan buffer di antara mesin bukanlah keputusan yang mudah dikarenakan penambahan inventaris, dan dengan kata lain penambahan biaya pada produksi. Salah satu parameter kinerja dari lini produksi adalah untuk menghasilkan produk akhir seefisien mungkin. Tujuan dari subbagian ini adalah untuk mencoba menjawab pertanyaan berdasarkan fakta-fakta di atas: berapa jumlah buffer yang

harus dialokasikan di antara mesin untuk mencapai laju produksi tertentu.

Beberapa pendekatan sudah dilakukan oleh peneliti di pabrik dengan teknologi yang sudah maju. Optimisasi dapat dilakukan dengan simulasi numerik (Aksoy [5], meta-heuristik (Dolgui [8], Nahas [9], Vitanov [10]), pendekatan analitik (Gershwin [3]), ataupun heuristik (Papadopoulos [7],). Hasil yang didapatkan dapat dianggap akurat dan baik, namun terbatas pada model lini produksi tertentu saja.

Dengan semakin berkembangnya ilmu mengenai lini produksi, penelitian spesifik juga semakin banyak dilakukan. Pada bagian ini akan dibahas contoh optimisasi yang dilakukan dengan menggunakan kombinasi antara metode analitik, heuristik, dan meta-heuristik. Dengan metode ini. industri dapat mengambil yang terbukti dapat menghitung optimisasi dengan cukup akurat dan cepat. Untuk mempermudah pemahaman, metode-metode yang dijelaskan pada bagian sebelumnya akan disebut sebagai metode evaluasi dan metode selanjutnya disebut metode optimisasi.

Ada dua variabel keputusan yang akan dicari. Untuk memudahkan pencarian, optimisasi akan dibagi menjadi 2 tahap: Optimisasi lokasi mesin dan optimisasi buffer. Optimisasi tersebut dapat dimodelkan sebagai berikut :

$$maximize\ E(N_{1,\dots,}N_{K-1}) \tag{5}$$

$$subject\ to\ N^{max} = \sum_{i=1}^{K-1} N_i\,,\ N^{max}\ constant$$

$$N_i \geq N^{min}, i = 1, \dots, K-1$$

nonlinear. Pada model ini, laju produksi merupakan fungsi dari jumlah buffer pada masing-masing lokasi. Laju produksi dapat dihitung dengan *Decomposition Method*.

Iteration #	B1	B2	B3	Throughput	
0	1	5	3	0.6453	initial buffer
1	2 1+1	4 5-1	3	0.6408	Smaller than #2
2	0 1-1	6 5+1	3	0.6471	Increase, start #3 from #2
3	0	7 6+1	2 3-1	0.6470	reduce, ignore
4	0	5 6-1	4 3+1	0.6431	reduce, ignore start #5 from #2
5	0	5 5-1	4 3+1	0.6431	reduce, ignore
6	0	7 5+1	2 3-1	0.6470	reduce, ignore
7	0	6	3	0.6471	

Maximum, kept as initial buffer allocation for second search

Termination criteria : no change on best throughput value

Gambar 8 Sectioning Method

Optimisasi dengan model ini dapat mengadaptasi *Sectioning Method* yang merupakan metode heuristik untuk pemodelan nonlinear. Contoh dari algoritma dapat dilihat dari Gambar Metode ini melakukan iterasi pencarian *buffer* optimal dengan cara:

1. Membuat perkiraan secara acak nilai dari *buffer* sesuai degan kapasitas maksimum dari lini produksi.
2. Menambah dan mengurangi 1 nilai *buffer* dari sisi kiri dan kanan *buffer*.
3. Mengevaluasi laju produksi
4. Membandingkan laju produksi terkaan baru dengan laju produksi yang maksimal.
5. Jika laju produksi bertambah maka iterasi dilanjutkan dari poin 2, jika tidak maka algoritma berhenti.

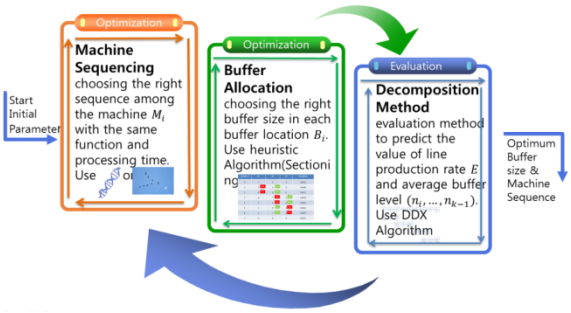
Lebih lanjut lagi, akan dibahas pengaruh lokasi mesin terhadap laju produksi. Variabel keputusan bertambah menjadi 2 yaitu jumlah buffer dan lokasi mesin. Pada bagian ini kedua optimisasi dapat diselesaikan secara bersamaan. Model Optimisasi yang baru dapat dimodelkan sebagai berikut:

Algoritma dimulai dengan pemilihan lokasi mesin secara acak. Kemudian, pada pilihan lokasi tersebut dilakukan pemilihan *buffer* secara optimal dengan menggunakan pemodelan *dual algorithm*. Cara termudah untuk mendapatkan hasil optimal adalah dengan menggunakan kaidah pencacahan yaitu menghitung semua kemungkinan yang dapat terjadi dalam suatu percobaan. Cara ini dapat membuktikan bahwa dugaan lokasi mesin mempengaruhi performa dari lini produksi. Alur algoritma dapat dilihat pada gambar 9.

CONTOH HASIL PERCOBAAN NUMERIK

Pada bagian ini akan dibahas salah satu contoh hasil percobaan untuk lini produksi dengan tujuh mesin dan enam lokasi buffer. Terdapat 7! kemungkinan lokasi mesin, dari percobaan ini terbukti bahwa pemilihan urutan lokasi yang benar berpotensi untuk meningkatkan laju produksi, pada kasus ini 7.2%.

Hasil yang disajikan pada artikel ini merupakan hasil awal yang hanya dapat diaplikasikan pada lini produksi yang pendek yang maksimal terdiri dari 7 mesin saja. Untuk mengaplikasikannya pada lini produksi yang lebih panjang dibutuhkan bantuan algoritma yang mempunyai kemampuan lebih luas. Untuk metode lebih lengkap pembaca dapat merujuk kepada artikel yang berjudul *Flexible Machine Allocation and Buffer Optimization in a Serial Production Lines* (Yosephine [12]).



Gambar 9 Optimisasi Pemilihan Lokasi Mesin dan Jumlah *Buffer*

Objective : Maximize Production Rate

Sequence No	M[1]	M[2]	M[3]	M[4]	M[5]	M[6]	M[7]	Production Rate
1	3	2	7	5	1	6	4	0.79022
2	4	2	7	1	3	5	6	0.815339
⋮								
568	4	2	3	6	7	1	5	0.811958
567	4	1	6	2	3	7	5	0.799635
⋮								
3000	3	6	7	2	5	4	1	0.816019
3001	4	2	3	5	7	1	6	0.862641
3002	3	5	6	7	2	4	1	0.812662
3003	3	5	1	4	6	2	7	0.802989
⋮								
5040	1	2	3	4	5	6	7	0.81346

Worst Sequence

Best Sequence

Gambar 10 Contoh Hasil Percobaan 7 Mesin

KESIMPULAN

Pada artikel ini, disajikan ulasan mengenai lini produksi, evaluasi performa dan metode optimisasinya. Evaluasi performa dilakukan dengan memodelkan mesin tunggal, buffer tunggal, dan line produksi yang sesungguhnya. Evaluasi lini produksi dilakukan dengan cara pendekatan matematis yang terbukti secara empiris cukup akurat dan menggambarkan situasi sebenarnya. Metode Optimisasi dilakukan dengan cara mengolaborasikan pemilihan buffer dan pemilihan lokasi mesin dalam satu model yang sama dan diselesaikan dengan cara kaidah pencacahan dan *Sectioning Method*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Young Jae Jang, *Department of Industrial and System Engineering* KAIST, yang telah mendukung riset mengenai lini produksi di Korea Selatan sejak tahun 2012 sampai artikel ini ditulis.

*korespondensi :
vinasariyosephine@gmail.com

REFERENSI

[1] Gershwin, S.B., An efficient Decomposition Method for the approximate evaluation of tandem queues with finite storage space and blocking. Operations Research, 1987. 35(2): p. 291-305.

[2] Koenigsberg, E., Productisn lines and internal storage—A review. Management Science, 1959. 5(4): p. 410-433.

[3] Gershwin, S.B. dan J.E. Schor, Efficient algorithms for buffer space allocation. Annals of Operations Research, 2000. 93(1-4): p. 117-144.

[4] Gershwin, S. B., dan Gershwin, S. (1994). Manufacturing systems engineering: PTR Prentice Hall Englewood Cliffs, New Jersey.

[5] Aksoy, H.K. dan S.M. Gupta, Buffer allocation plan for a remanufacturing cell. Computers dan Industrial Engineering, 2005. 48(3): p. 657-677.

[6] Yamamoto, H., J. Abu Qudeiri, dan E. Marui, Definition of FTL with bypass lines and its simulator for buffer size decision. International Journal of Production Economics, 2008. 112(1): p. 18-25.

[7] Papadopoulos, H. dan M. Vidalis, A heuristic algorithm for the buffer allocation in unreliable unbalanced production lines. Computers dan Industrial Engineering, 2001. 41(3): p. 261-277.

[8] Dolgui, A., *et al*., A genetic algorithm for the allocation of buffer storage capacities in a production line with unreliable machines. Journal of Mathematical Modelling and Algorithms, 2002. 1(2): p. 89-104.

[9] Nahas, N. dan M. Nourelfath, Ant system for reliability optimization of a series system with multiple-choice and budget constraints. Reliability Engineering dan System Safety, 2005. 87(1): p. 1-12.

[10] Vitanov, I.V., V.I. Vitanov, dan D.K. Harrison. Buffer capacity allocation using ant colony optimisation algorithm. in Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2009 Winter. 2009. IEEE..

[11] Heavey, C., H. Papadopoulos, dan J. Browne, The throughput rate of multistation unreliable production lines. European Journal of Operational Research, 1993. 68(1): p. 69-89.

[12] Yosephine, V, Jang, YJ, Flexible Machine Allocation and Buffer Optimization in a Serial Production Lines. Asia Pacific Industrial Engineering and Management System Proceeding, 2013

NANOPLASMONICS: PEMBERI CAHAYA PADA SAINS DAN TEKNOLOGI

Ferry Anggoro Ardy Nugroho*

*Department of Physics, Chalmers University of Technology, Sweden

ABSTRAK

Ketika cahaya berinteraksi dengan nanopartikel logam terjadilah suatu fenomena unik yang dinamakan nanoplasmonics. Nanoplasmonics dihasilkan oleh osilasi serentak elektron pada nanopartikel sebagai respons terhadap gelombang cahaya. Fenomena ini, secara sederhana, memungkinkan kita untuk "mengendalikan" cahaya. Fenomena yang sudah terobservasi sejak abad ke empat ini baru mencuat hanya dalam dua dekade terakhir. Bidang yang sangat baru ini berkembang dengan pesatnya melintasi berbagai disiplin ilmu. Beberapa aplikasi unggul di antaranya adalah sensor dengan sensitivitas luar biasa, penangkap cahaya pada sel surya dan metode alternatif penghancur sel-sel kanker pada tubuh secara selektif..

Kata kunci : *Nanoplasmonics, nano partikel, aplikasi nanoplasmonics*

FENOMENA BERUSIA 1600 TAHUN

Jika Anda punya kesempatan untuk pergi ke London, Inggris, sempatkanlah sedikit waktu untuk melihat satu peninggalan yang menunjukkan betapa hebatnya (dan mengejutkannya) peradaban manusia pada zaman dahulu. Anda mungkin akan menebak Big Ben, Istana Buckingham, atau mungkin Stadion Wembley? Kalau iya maka sayang sekali, Anda salah. Walaupun mungkin mereka dibangun dengan "indah" (indah atau tidak itu relatif) tapi mereka masih tergolong baru. Benda yang saya maksud tersimpan di salah satu museum terbesar di dunia, *The Brisith Museum* atau Musium Inggris. Benda ini bernama Lycurgus Cup atau Cawan Lycurgus. Cawan ini dibuat sekitar abad keempat oleh bangsa Romawi di Alexandria (sekarang Roma). Cawan ini secara fisik terlihat biasa saja. Secara ukuran, dengan tinggi sekitar 15 cm dan diameter cawan sekitar 13 cm tidak ada yang spesial. Kita bisa menemui gelas seukuran ini di warung-warung makan pinggir jalan. Bagaimana dengan ornamen? Untuk menjawab ini cukuplah kita mengetahui sebuah fakta: pada masa itu Romawi sedang mengalami masa-masa kejayaannya, termasuk di antaranya keunggulan di bidang metalurgi dan kerajinan. Cawan Lycurgus dihiasi dengan sosok Dionycus, sang Dewa Anggur, yang sedang merayakan kemenangannya atas Raja Lycurgus, yang terukir dengan indah. Walau demikian, bukan faktor inilah yang membuat cawan ini begitu terkenal. Banyak peradaban lain yang juga memiliki keahilan di bidang kerajinan. Lalu apa? Jawabannya hanya terungkap ketika kita menyinari cawan tersebut. Ketika sumber cahaya berada di luar cawan, maka cawan akan terlihat berwarna hijau. Tetapi ketika sumber cahaya berada di dalam, maka warna indah merah rubi akan tampak! Bagaimana mungkin?

Keberadaan Cawan Lycurgus sudah tercatat pada sebuah dokumen di tahun 1845. Tapi baru pada tahun 1950 penelitian dilakukan untuk menemukan penyebab

keajaiban warna pada cawan tersebut. Pada awalnya para peneliti meragukan bahwa

Gambar 1. Cawan Lycurgus. Cawan Lycurgus berwarna hijau ketika sumber cahaya berada di luar cawan (kiri), dan merah ketika sumber cahaya berada di dalam cawan (kanan) © *The Trustees of the British Museum*. Inset: Nanopartikel berukuran sekitar 50 nm yang ditemukan pada kaca Cawan Lycurgus (Barber dan Freestone [1]). Bangsa Romawi bisa menghasilkan efek warna ganda hanya dengan kaca biasa. Kenyataannya pada tahun 1959 hasil penelitian mengonfirmasi penggunaan kaca biasa pada Cawan Lycurgus (British Museum [2]). Penelitian lanjutan pada akhir tahun 1980 ternyata mengungkapkan sebuah fakta menarik: Cawan Lycurgus memiliki kandungan *nanopartikel* emas, perak dan tembaga dengan ukuran 50-100 nm (1000 kali lebih tipis dari rambut kita!) (Barber dan Freestone [1]).

bahan dasar cawan adalah kaca. Mereka menganggap dengan pengetahuan dan teknologi pada masa itu tidak mungkin Bangsa Romawi telah mengenal nanoteknologi pada abad keempat! (yang mungkin mereka sendiri tidak menyadarinya). Sampai sekarang para ilmuwan masih berspekulasi tentang bagaimana bangsa Romawi pada masa itu dapat berhasil membuat nanopartikel. Sebagian berpendapat mereka secara manual menghancurkan emas dan perak sampai berukuran super kecil. Sebagian lagi berpendapat mereka berhasil membuat nanopartikel dengan metode reduksi, yaitu pemisahan suatu unsur (emas, perak) dari senyawa lain melalui reaksi kimia dari berbagai macam senyawa organik (Wagner dan Haslbeck [3]).

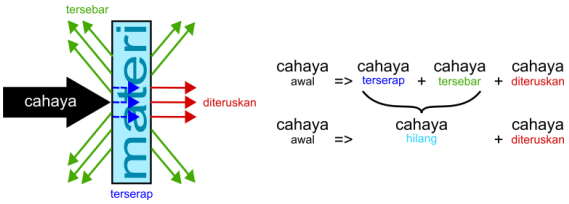
Namun demikian, penggunaan nanopartikel logam bangsa Romawi pada zaman itu hanya terbatas untuk menghasilkan efek warna pada kaca. Hal ini pun terus berlanjut pada generasi-generasi berikutnya dengan meluasnya penggunaan kaca berwarna ini sebagai mozaik pada jendela-jendela gereja di Eropa. Keterbatasan aplikasi “keajaiban cahaya” pada nanopartikel logam ini sedikit banyak dipengaruhi dua faktor utama. Pertama, ada kemungkinan bahwa bangsa Romawi sendiri tidak menyadari bahwa mereka berhasil membuat nanopartikel dengan ukuran tertentu (pada zaman tersebut tidak ada alat untuk melihat benda berukuran nanometer, bahkan mikroskop belum ditemukan!). Andaikan alasan pertama tidak valid (dan saya tidak percaya kalau itu tidak valid), maka ada alasan kedua yang lebih berpengaruh. Penjelasan ilmiah mengapa nanopartikel logam bisa menghasilkan efek cahaya baru berhasil dipecahkan 16 abad kemudian! Adalah ilmuwan dari Jerman yang pertama kali berhasil menjelaskan fenomena tersebut melalui pendekatan gelombang elektromagnetik. Fenomena yang sekarang kita kenal dengan nama *Localized Surface Plasmon Resonance* (Resonansi Plasmon Permukaan Terlokalisasi) atau dikenal juga dengan nama lain *nanoplasmonics*.

Kini hampir 17 abad usia Cawan Lycurgus, bidang nanoplasmonics sudah berkembang secara pesat dalam dua dekade terakhir. Andai saja bangsa Romawi dulu bisa menyaksikan kemajuan bidang ini

sekarang tentu mereka akan merasa sangat bangga. Mungkin lebih bangga daripada peninggalan lain seperti Colosseum. Mengapa tidak? Dari penggunaannya yang sangat sederhana sebagai pewarna pada kaca, kini nanoplasmonics dianggap sebagai salah satu bidang yang sangat berkembang dan sangat potensial baik secara keilmuan maupun aplikasi. Beberapa aplikasi yang akan saya bahas pada tulisan ini di antaranya sensor dengan sensitivitas luar biasa sebagai metode untuk mendeteksi kejadian pada entitas berukuran nanometer. Aplikasi sebagai pembantu penangkapan cahaya matahari pada sel surya dan salah satu cara alternatif untuk membunuh sel kanker secara selektif pun akan dibahas.

APA ITU NANOPLASMONICS?

Tak kenal maka tak sayang. Sebelum kita masuk lebih dalam pada aplikasi *nanoplasmonics* ada baiknya kita mengenal *nanoplasmonics* terlebih dahulu. Pertama mari kita mengenal bagaimana respons suatu materi ketika terkena cahaya (atau yang lebih umum, sebuah gelombang elektromagnetik.) Ketika cahaya mengenai sebuah materi, ada tiga kemungkinan yang bisa terjadi: terserap, tersebar, atau diteruskan (lihat Gambar 2.) Intensitas ("jumlah") cahaya awal akan sama dengan total intensitas cahaya yang terserap, tersebar dan diteruskan. Cahaya terserap akan menghilang dan berubah menjadi bentuk energi lain pada material (misalnya panas). Cahaya tersebar didefinisikan sebagai cahaya yang terbelokkan dari arah cahaya awal. Cahaya tersebar adalah alasan mengapa benda tidak transparan dan memiliki warna. Bagian terakhir, cahaya yang diteruskan, adalah cahaya yang memiliki arah yang sama dengan cahaya awal setelah melalui materi. Cahaya, seperti yang kita tahu, terdiri dari spektrum warna. Mulai dari ungu, cahaya dengan panjang gelombang terpendek (sekitar 400 nm), nila, biru, dan seterusnya sampai cahaya dengan panjang gelombang terpanjang (sekitar 700 nm) yaitu merah. *Setiap materi* memiliki *karakteristik unik* perihal bagian warna apa yang mereka serap, sebarkan dan teruskan. Emas, misalnya, menyebarkan dengan sangat efektif bagian warna merah sampai kuning, sehingga menghasilkan warna emas yang kita tahu. Sedangkan warna lain, hijau sampai ungu, tidak begitu efektif disebarkan dan lebih banyak terserap. Pada emas tidak ada cahaya yang diteruskan karena emas bukanlah materi transparan. Dalam definisinya, sering juga cahaya terserap dan tersebar dikelompokkan menjadi satu yaitu cahaya yang hilang (Gambar 2.)

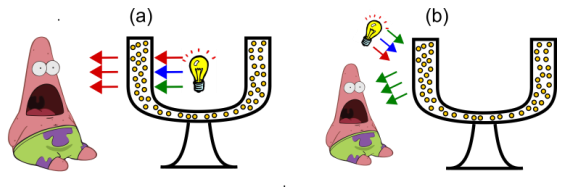


Gambar 2. Interaksi cahaya dan materi. Cahaya datang akan disebarkan, diserap, diteruskan atau kombinasi ketiganya ketika mengenai materi. Cahaya hilang didefinisikan sebagai cahaya terserap dan tersebar.

Jawaban dibalik misteri indahnya Cawan Lycurgus sedikit terbuka ketika Michael Faraday, salah satu ilmuwan terbesar yang pernah kita miliki, berhasil melakukan sintesis nanopartikel emas dan logam lainnya dalam bentuk koloid (larutan dengan zat terlarut berukuran 1-1000 nm) pada tahun 1857 (Faraday [4]). Faraday menemukan bahwa larutan emas ini memiliki warna berbeda sesuai dengan ukuran nanopartikelnya. Warna-warna yang ditemukan antara lain merah dan biru,

sangat berbeda dengan warna emas yang kita tahu. Pada penelitiannya ini Faraday hanya menyimpulkan adanya interaksi spesial antara cahaya dan logam berskala nanometer yang menyebabkan munculnya warna yang tak biasa tanpa memberikan teori dibalik itu.

Barulah sekitar setengah abad kemudian seorang ilmuwan Jerman, Gustav Mie, berhasil secara kuantitatif menjelaskan interaksi tersebut setelah menyelesaikan persamaan interaksi gelombang elektromagnetik dengan nanopartikel logam. Mie menemukan bahwa cahaya dapat beresonansi (bergerak bersama) dengan elektron pada nanopartikel (Mie [5]). Frekuensi resonansi ini ternyata tidak hanya bergantung *pada jenis logam*, tapi juga kepada *bentuk, suhu, ukuran*, dan bahkan *keadaan di sekitar* nanopartikel. Frekuensi resonansi inilah yang menentukan cahaya apa yang bisa disebarkan dan diserap oleh nanopartikel; warna logam bisa berubah menjadi berbagai macam warna pada ukuran nanometer bergantung pada faktor-faktor seperti yang disebut sebelumnya. Tidak hanya itu, bahkan cahaya mana yang diserap dan disebarkan pun dapat pula diatur. Kita memiliki kemampuan untuk "mengendalikan" cahaya! Teori Mie ini pulalah yang akhirnya menjawab keajaiban dibalik Cawan Lycurgus. Campuran nanopartikel emas, perak dan tembaga pada ukuran 50-100 nm hanya akan menyebarkan cahaya pada rentang hijau dan meneruskan cahaya pada rentang merah, lihat Gambar 3.

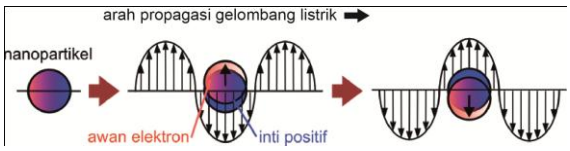


Gambar 3. Penjelasan mengenai asal keajaiban warna Cawan Lycurgus. Nanopartikel yang terkandung di dalam cawan secara selektif hanya meneruskan cahaya merah (kiri) dan menyebarkan cahaya hijau (kanan) mengakibatkan perbedaan warna yang tampak tergantung posisi sumber cahaya.

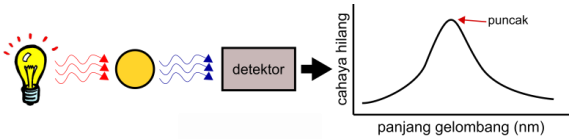
Untuk memahami apa yang sebenarnya terjadi saat cahaya mengenai nanopartikel logam, kita bisa melihat Gambar 4. Bayangkan sebuah nanopartikel terdiri dari dua buah bagian yaitu inti positif dan awan elektron negatif yang menyelubunginya. Kita pun tahu bahwa massa inti positif sangat berat dibandingkan dengan massa elektron. Maka kita bisa asumsikan bahwa inti atom cenderung tidak bergerak sedangkan elektron sangatlah dinamis dan selalu bergerak. Cahaya adalah gelombang elektromagnetik; ia memiliki medan listrik. Saat terpapar oleh medan listrik, benda bermuatan positif akan bergerak sesuai arah medan listrik sedangkan benda bermuatan negatif akan bergerak kearah sebaliknya. Pada Gambar 4, medan listrik ini digambarkan dengan tanda panah. Jarak antara dua puncak gelombang didefinisikan sebagai panjang gelombang. Ketika cahaya dengan panjang gelombang lebih besar daripada ukuran nanopartikel mengenai nanopartikel, *seluruh* elektron pada nanopartikel akan bergerak *serentak* ke arah yang sama karena semua elektron berada dalam pengaruh medan listrik yang sama (dan keduanya bergerak ke arah yang berlawanan, lihat gambar) sedangkan inti atom cenderung diam. Ketika elektron bergerak menjauhi inti atom, gaya tarik-menarik antar mereka pun bekerja. Seolah tak ingin dipisahkan, elektron bergerak kembali menuju inti atom (ingat, benda dengan muatan berbeda akan tarik-

menarik). Medan listrik dari cahaya akan terus berosilasi seiring dengan bergeraknya cahaya. Begitu pula dengan elektron, ia akan bergerak berlawanan dengan medan listrik tapi kemudian tertarik kembali oleh inti elektron. Elektron bergerak bolak-balik di sekitar inti atom seperti sebuah pendulum. Kondisi optimal akan tercapai saat frekuensi osilasi yang ditimbulkan oleh medan listrik dari cahaya sama dengan frekuensi osilasi yang ditimbulkan oleh gaya tarik dari inti atom. Kondisi ini sangat menarik karena pada kondisi inilah nanopartikel menyerap dan menyebarkan cahaya secara *maksimal*.

Kita bisa menemukan frekuensi (atau panjang gelombang, ingat frekuensi berhubungan dengan panjang gelombang $f=1/\lambda$, mulai sekarang kita akan menggunakan istilah panjang gelombang) osilasi yang terjadi pada nanopartikel dengan cara yang digambarkan pada Gambar 5. Panjang gelombang osilasi terjadi dimana cahaya hilang (terserap, tersebar, atau keduanya, ingat Gambar 2) mencapai maksimal, ditandai dengan sebuah "puncak." Panjang gelombang dimana puncak ini terjadi merupakan *sidik jari* bagi setiap nanopartikel. Ingat, cahaya apa yang bisa diserap dan disebarkan oleh nanopartikel sangat bergantung kepada jenis logam, ukuran, suhu, bentuk dan kondisi di sekitarnya. Maka bentuk spektrum (dan lokasi puncaknya) pun berbeda-beda untuk nanopartikel dengan kondisi yang berbeda.



Gambar 4. Osilasi elektron oleh gelombang elektromagnetik. Ketika cahaya (gelombang elektromagnetik, dengan arah gerakan mengikuti tanda panah) mengenai nanopartikel logam, seluruh elektron pada nanopartikel akan bergerak serentak menjauhi medan listrik. Elektron ini akan berosilasi terhadap inti positif seiring dengan osilasi gelombang listrik dan juga gaya tarik oleh inti positif.



Gambar 5. Penentuan panjang gelombang osilasi pada nanopartikel. Setiap nanopartikel menghasilkan spektrum yang berbeda ketika terkena cahaya. Panjang gelombang dimana cahaya hilang mencapai maksimal (puncak) menunjukkan panjang gelombang osilasi elektron pada nanopartikel. Spektrum menjadi sidik jari bagi nanopartikel. Ia berubah bergantung pada jenis logam, ukuran, bentuk, suhu dan kondisi di sekitar nanopartikel.

Penemuan Mie bahwa nanopartikel logam dapat "mengendalikan" cahaya ternyata tidak langsung membuat dunia sains gempar seperti halnya penemuan *graphene* pada tahun 2004. Alasannya sederhana, teknologi pada awal 1900 (bahkan sampai awal 1970) belum mampu untuk membuat berbagai macam nanopartikel dengan bentuk dan ukuran sesuai keinginan. Walau begitu, perhitungan Mie tetap diapresiasi sebagai salah satu penemuan penting walau tanpa aplikasi. Barulah sekitar tiga dekade terakhir ini riset tentang bagaimana cahaya berinteraksi dengan nanopartikel logam kembali terangkat; terima kasih kepada perkembangan nanoteknologi yang memungkinan fabrikasi nanopartikel secara akurat. Sekarang kita bisa dengan mudah membuat berbagai macam bentuk nanopartikel: disk, kubus, piramid, cincin, segitiga, dan sebagainya (Burda *et al* [6]).

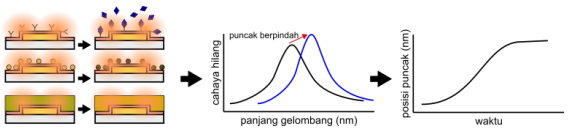
Nama "plasmonics" sendiri baru muncul pada tahun 2000, berasal dari kata "plasmon" yang berarti *osilasi plasma* (gas bermuatan, misal elektron) (Wadel *et al* [7]). Dari sinilah muncul nama *nanoplasmonics*, sebuah bidang sains yang mempelajari interaksi cahaya dengan nanopartikel logam. Nanoplasmonics sendiri terbilang masih sangat muda. Bidang ini baru benar-benar muncul kurang dari dua dekade terakhir. Walau begitu, perkembangan aplikasi nanoplasmonics sangatlah pesat. Nanoplasmonics memberikan cahaya untuk mempelajari banyak proses yang terjadi pada skala nanometer. Nanoplasmonics juga berpotensi merevolusi teknologi yang kita punya sekarang. Sedikit contoh aplikasi nanoplasmonics akan dijelaskan pada bagian berikut, meliputi sensor, sel surya dan terapi kanker.

APLIKASI NANOPLASMONICS 1 : SENSOR

Sensor adalah aplikasi teknologi yang tak bisa dilepaskan dari hidup kita. Tingginya standar hidup manusia sekarang menuntut teknologi untuk ikut terus berkembang. Sensor sekarang ditantang untuk bisa lebih sensitif, mendeteksi lebih cepat, berukuran lebih kecil, lebih awet, murah, dan sebagainya. Untuk semua tantangan ini, sensor nanoplasmonics mampu menjawabnya.

Kita sudah tahu sekarang bahwa panjang gelombang osilasi nanoplasmonics sangat bergantung kepada jenis logam, ukuran, bentuk, suhu dan kondisi di sekitarnya. Panjang gelombang osilasi ini digambarkan sebagai spektrum, lihat kembali Gambar 5. Posisi puncak pada spektrum merupakan sidik jari bagi setiap nanopartikel. Apabila terjadi perubahan pada nanopartikel, baik itu ukuran, bentuk, suhu, ataupun kondisi di sekitarnya, maka sidik jari ini pun akan *berubah*; sebuah sensor.

Aplikasi sensor pada nanoplasmonics mayoritas bergantung pada perubahan sidik jari nanopartikel terhadap perubahan kondisi di sekitarnya. Pada saat elektron berosilasi, akan tercipta medan listrik lain di sekitar nanopartikel dengan intensitas yang sangat tinggi. Medan listrik ini hanya menjangkau jarak beberapa puluh nanometer dari nanopartikel. Apapun yang terjadi, *sekecil apapun*, di dalam jangkauan medan listrik ini akan menggeser posisi puncak pada spektrum nanopartikel. Sifat ini membuat sensor nanoplasmonics menjadi salah satu sensor paling sensitif. Bayangkan, kehadiran beberapa partikel berukuran satu nanometer pun dapat terdeteksi. Gambar 6 menunjukkan beberapa contoh fenomena yang bisa dideteksi oleh sensor nanoplasmonics. Keberadaan molekul atau nanopartikel dan bahkan perubahan yang terjadi pada nanopartikel atau pada lapisan materi tipis (berukuran nanometer) yang berada di sekitar sensor dapat terdeteksi dengan mengikuti perubahan posisi puncak pada spektrum.



Gambar 6. Sensor nanoplasmonics. Apabila terjadi sesuatu pada sekitar (ditandai dengan medan listrik berwarna oranye) elemen *nanoplasmonics*, baik itu kehadiran molekul lain (kiri atas), perubahan yang terjadi pada nanopartikel (kiri tengah) atau lapisan materi tipis (kiri bawah), maka posisi puncak pada spektrum akan bergeser (tengah). Kita bisa mengikuti fenomena yang terjadi pada sensor dengan mengikuti perpindahan puncak seiring dengan waktu (kanan).

Selain sensitivitasnya, sensor *nanoplasmonics* juga sangat unggul dalam hal kecepatan. Respons yang dibutuhkan sensor untuk mendeteksi bergantung pada fenomena dibalik proses pendeteksiannya. *Nanoplasmonics* adalah fenomena yang disebabkan oleh osilasi elektron. Maka kecepatan respons pendeteksian sensor *nanoplasmonics* ditentukan oleh kecepatan osilasi elektron itu sendiri. Dalam proses ini, elektron pada umumnya berosilasi pada skala femto detik (0.000000000000001 detik)! Pada realisasinya tentu sensor ini tidak akan merespons secepat ini dikarenakan keterbatasan alat pendukung lainnya. Tapi sensor *nanoplasmonics* dapat dengan mudah mencapai waktu respons 1 mili detik. Angka yang sudah sangat tinggi untuk sebuah sensor. Keunggulan lain dari sensor *nanoplasmonics* adalah tidak banyak membutuhkan alat-alat pendukung. Fenomena *nanoplasmonics* dicapai hanya dengan cahaya. Maka untuk membuat sebuah sistem sensor *nanoplasmonics* kita hanya membutuhkan sebuah sumber cahaya, sensor yang terdiri dari nanopartikel logam, dan sebuah detector cahaya. Sederhana.

Aplikasi sensor nanoplasmonics yang ada sekarang masih didominasi untuk kepentingan sains dibandingkan komersial. Salah satu sensor nanoplasmonics yang sudah beredar di pasaran adalah alat pendeteksi kehamilan ClearBlue®. Alat ini digunakan untuk mendeteksi hormon hCG pada urine yang menandakan kehamilan. Penulis sendiri sekarang sedang mencoba mengembangkan sensor *nanoplasmonics* menggunakan nanopartikel campuran emas dan palladium sebagai sensor gas hidrogen (WAdell *et al* [7]). Sedangkan untuk aplikasi sains, sensor *nanoplasmonics* telah banyak membuka dan membantu kemajuan studi di berbagai bidang terutama yang berhubungan dengan fenomena pada skala nano. Beberapa di antaranya sensor nanoplasmonics telah digunakan untuk mempelajari penyimpanan hidrogen sebagai sumber energi masa depan pada nanopartikel paladium, mempelajari bagaimana molekul terserap pada *Dye-sensitized Solar Cell (DSSC)*, mempelajari terbentuknya lapisan lipid, interaksi sel, difusi partikel pada polimer, proses katalisis, sampai mendeteksi virus DNA dan virus AIDS (Mayer dan Hafner [8], Anker *et al* [9], Larrson *et al* [10]). Daftar aplikasi sensor *nanoplasmonics* masih terus bertambah sampai sekarang dan mencakup semua bidang keilmuan.

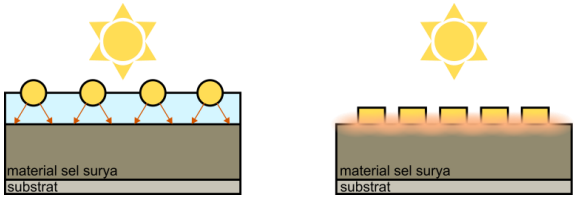
APLIKASI NANOPLASMONICS 2: ENERGI

Salah satu tantangan terbesar ilmuwan saat ini adalah mencari alternatif energi untuk menggantikan bahan bakar fosil yang akan habis dalam beberapa puluh tahun ke depan. Alternatif utama jatuh kepada matahari. Satu jam cahaya matahari yang mencapai bumi menyediakan cukup energi untuk kebutuhan dunia selama satu tahun (Sandia [11])! Ketersediaan energi yang luar biasa ini sangat sayang untuk dilewatkan. Usaha untuk menuai energi dari matahari telah berlangsung sejak lama. Salah satu teknologi yang dikembangkan untuk tujuan ini ialah sel surya.

Sel surya dapat mengubah cahaya matahari menjadi energi. Materi tertentu digunakan pada sel surya untuk mengubah cahaya ini menjadi aliran listrik. Ketika cahaya terserap oleh materi ini, energi pada cahaya digunakan untuk memisahkan elektron dari inti atom. Elektron ini pun kemudian harus *bergerak* menuju sebuah elektroda untuk kemudian menjadi aliran listrik. Semakin banyak elektron yang berhasil mencapai elektroda, semakin besar

pula arus yang dihasilkan; semakin besar efisiensi dari sel surya. Tapi perjalanan elektron menuju elektroda ini tidak semudah yang kita bayangkan. Elektron harus menghadapi banyak "rintangan." Salah satunya adalah bersatunya kembali elektron dan inti atom. Untuk meningkatkan peluang keberhasilan elektron menuju elektroda, teknologi sel surya mulai bergeser menuju materi yang lebih tipis. Dengan menipisnya materi, semakin pendek pula jalan yang harus dilalui elektron menuju elektroda. Tipis dalam hal ini merujuk kepada ketebalan hanya beberapa puluh nanometer. Namun hidup selalu penuh tantangan. Saat kita membuat sel surya semakin tipis kita juga kehilangan banyak sumber elektron untuk diubah menjadi arus listrik. Hal ini menjadi salah satu fokus banyak ilmuwan dalam bidang sel surya. Bagaimana membuat sel surya setipis mungkin dengan tetap menjaga kuantitas elektron yang dapat dipisahkan dari inti atom. Di sinilah *nanoplasmonics* dapat digunakan sebagai solusi.

Kemampuan *nanoplasmonics* untuk mengendalikan cahaya dapat digunakan pada sel surya dengan dua pendekatan seperti pada Gambar 7. Pertama, dengan menggunakan nanopartikel dengan bentuk dan ukuran tertentu, kita bisa secara efektif menyebarkan *hampir semua* cahaya yang mengenai sel surya. Cahaya yang tersebar ini akan bergerak ke segala arah di dalam sel surya dan meningkatkan peluangnya untuk bertemu elektron dan melepaskannya dari inti atom. Terkadang ditambahkan pula sebuah pemantul di bawah materi sel surya untuk mengembalikan cahaya yang akan meninggalkan sel surya. Dengan dua cara ini, cahaya akan lebih lama (dan lebih banyak) berada di dalam sel surya sehingga peluang elektron terlepas akan semakin besar. Cara kedua adalah dengan menggunakan sifat penyerapan cahaya oleh *nanoplasmonics*. Lagi, dengan ukuran dan bentuk tertentu, nanopartikel bisa dibuat efektif dalam menyerap cahaya. Penyerapan ini tidak hanya terjadi pada nanopartikel tapi juga pada material di sekitarnya yang terpengaruh oleh medan listrik yang dihasilkan (seperti medan listrik yang digunakan sebagai sensor). Peningkatan penyerapan ini tentu saja dapat memperbanyak jumlah elektron yang dapat diubah menjadi listrik. Dua metode ini sudah banyak digunakan oleh ilmuwan dan berhasil meningkatkan efisiensi sel surya tipis secara signifikan (Atwater dan Polman [12]).



Gambar 7. *Nanoplasmonics* untuk sel surya. *Nanoplasmonics* dapat membantu meningkatkan efisiensi sel surya dengan cara menyebarkan cahaya matahari ke seluruh material sel surya (kiri) atau dengan meningkatkan kapasitas penyerapannya melalui adanya medan listrik (kanan). Gambar diadopsi dari referensi (Atwater dan Polman [12]).

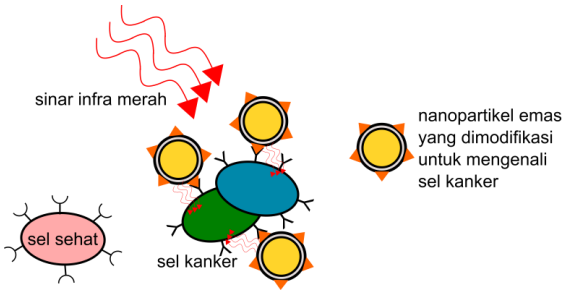
APLIKASI NANOPLASMONICS 3: MEDIS

Kanker masih menjadi momok terbesar dalam dunia kesehatan. Tidak hanya kanker dapat terjadi pada bagian tubuh mana pun, kanker juga "sulit" disembuhkan. Kesulitan dalam menyembuhkan kanker terletak pada sulitnya membunuh *hanya sel* yang terkena kanker. Metode yang umum kita miliki sekarang, kemoterapi, tanpa pandang bulu menghancurkan baik sel yang rusak maupun yang sehat. Impian kita semua

untuk memiliki metode pengobatan "pintar" dimana proses yang berlangsung bisa membunuh spesifik sel yang terkena kanker dan membiarkan sel yang lain tetap hidup walaupun pada posisi yang berdekatan.

Perkembangan dunia kesehatan sampai kepada teknik yang bernama *targeted therapy* atau pengobatan tertarget. Ilmuwan mengembangkan strategi dan cara membunuh hanya sel yang sakit. Cara yang paling umum adalah membawa sang penghancur sel menggunakan *agen spesial* yang bisa mengenali sel yang sakit. Pada umumnya agen ini dilengkapi dengan zat kimia ataupun molekul yang secara otomatis akan menempel hanya pada sel yang sakit. Sel yang sakit memiliki suatu karakteristik yang berbeda dari sel lain baik secara kimiawi maupun morfologis. Bayangkan sistem ini sebagai kunci dan gembok. Kunci (dalam kasus ini agen pembawa penghancur sel) hanya akan menempel pada gembok yang tepat, dalam hal ini sel kanker. Ketika kita sudah memiliki agen ini maka hal selanjutnya adalah mencari sang penghancur sel.

Ada beberapa alternatif untuk menghancurkan sel. Yang utama digunakan adalah obat (atau molekul) yang bisa membunuh sel kanker secara kimiawi. Hal ini dikenal juga sebagai *targeted drug delivery* atau pengantaran obat tertarget. Obat ini biasanya dimasukan ke dalam sebuah kapsul berukuran nanometer yang bisa menempel pada sel kanker. Ketika menempel kapsul ini akan pecah dan obat dapat langsung bereaksi. Salah satu kekurangan metode ini ialah efisiensi obat yang kurang baik karena proses pelepasan obat yang masih sulit dikontrol. Dalam hal ini *nanoplasmonics* bisa digunakan sebagai alternatif. Dengan menggunakan nanopartikel logam, kita bisa menggunakan cahaya sebagai agen penghancur sel kanker. Gambar 8 menunjukkan proses ini. Nanopartikel emas dimodifikasi sedemikian rupa sehingga mengandung molekul kunci untuk mengenali sel kanker. Ketika nanopartikel ini sudah menempel, maka kita bisa menyinari bagian yang terkena kanker dengan sinar infra merah. Sinar infra merah ini dengan mudah menembus kulit dan tidak berbahaya. Pada saat sinar ini terkena nanopartikel, sinar ini bisa dengan efektif disebarkan ke sel kanker. Sinar ini akan menimbulkan panas yang bisa membunuh sel kanker. Sebagaimana aplikasi untuk sel surya, kita juga bisa menggunakan sifat penyerap cahaya nanopartikel dalam hal ini. Alih-alih menyebarkan cahaya, nanopartikel dapat menyerap semua sinar infra merah yang mengenainya. Nanopartikel pun menjadi panas dan menghanguskan sel kanker. Panas ini hanya akan dirasakan sel yang sangat dekat sehingga sel-sel yang sehat tidak ikut terbunuh. Riset mengenai penggunaan *nanoplasmonics* untuk membunuh kanker sudah dimulai sejak beberapa tahun lalu. Pada Juni tahun 2014 uji coba pertama metode ini telah dilakukan pada sel kanker payudara pada tikus. Hasilnya sangat menggembirakan, lebih dari 80% tikus yang diuji coba terbebas dari kanker setelah 60 hari terapi (Ayala-Oroczo *et al* [13]). Mari kita menunggu munculnya sejarah baru dalam dunia medis!



Gambar 8. Terapi sel kanker dengan nanoplasmonics. Logam nanoplasmonics

bisa dimodifikasi sedemikian rupa sehingga hanya menempel pada sel kanker. Sinar infra merah kemudian dipancarkan dan disebarkan dengan efektif oleh nanopartikel ke sel kanker. Panas dari sinar ini kemudian membunuh sel kanker.

REFLEKSI

Sangat menarik melihat bagaimana penemuan dan perkembangan sains dan teknologi terjadi. Banyak penemuan, nanoplasmonics salah satunya, dimulai tidak dengan niat dan tujuan sebagaimana mereka dipakai sekarang. Mereka bisa ditemukan kapan saja, dimana saja, oleh siapa saja. Perkembangan ilmu pengetahuan pun di abad 21 ini sangatlah cepat. Satu bidang keilmuan bias dengan cepat menjadi bercabang-cabang menjadi berbagai macam bidang. Hanya langit yang membatasi kreativitas para ilmuwan di dunia ini. Begitu juga dengan *nanoplasmonics*. Para ilmuwan telah memprediksi bahwa bidang ini masih akan berkembang pesat dalam beberapa dekade ke depan untuk menghasilkan terobosan-terobosan spektakuler dalam dunia sains dan teknologi. Saya pribadi benar-benar penasaran akan dibawa ke mana lagi dunia *nanoplasmonics* ini. *Nanoplasmonics* benar-benar berpotensi besar untuk memberikan cahaya bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi kita. Mau ikut serta?

UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillahirabbil 'alamin, puji dan syukur saya panjatkan hanya untuk Allah Swt. atas kehidupan ini, dan juga terima kasih dan shalawat untuk nabi-Nya, Rasullullah saw., atas cahaya yang dibawanya. Tulisan ini selesai tentunya dengan dukungan berbagai pihak. Pertama terima kasih untuk *Indonesian Scholar Journal* yang menyediakan wadah untuk para peneliti menyampaikan bidang yang digelutinya secara lebih informal dan membumi. Semoga usaha ini berbuah manis. Terima kasih juga untuk professor dan kampus saya, Christoph Langhammer dan *Chalmers University of Technology* atas kesempatan yang diberikan kepada saya untuk melakukan penelitian seperti yang tertulis di atas. Terima kasih juga untuk *Swedish Foundation for Strategic Research framework* program RMA 11-0037 yang menunjang pembiayaan pendidikan S3 saya. Yang terakhir tentu saja terima kasih untuk keluarga tercinta atas segala dukungannya, terutama istri tercinta Dery Hefimaputri dan juga buah hati kami, Asiyah Rania Sveanisa Adefys. Tulisan ini untuk kalian berdua.

Korespondensi : ferryn@chalmers.se

REFERENSI

[1] D. J. Barber and I. C. Freestone, "An Investigation of the Origin of the Colour of the Lycurgus Cup by Analytical Transmission Electron Microscopy," Archaeometry 32, pp. 33-45, 1990.

[2] British Museum Research Laboratory File 1144, letter dated 5.2.59 to Dr. Mackey, Department of Physics, Birkbeck College, London.

[3] F. E. Wagner, S. Haslbeck, L. Stievano, S. Calogero, Q. A. Pankhurst, and K. P. Martinek, "Before Striking Gold in Gold-Ruby Glass" Nature 407, pp. 33-45, 2000.

[4] M. Faraday, "The Bakerian Lecture: Experimental Relations of Gold (and Other Metals) to Light" Philosophical Transactions of the Royal Society of London 147, 1857.

[5] G. Mie, "Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler

Metallösungen" Annalen Der Physik 3, pp. 377-445, 1908.

[6] C. Burda, X. Chen, R. Narayanan, and M. A. El-Sayed, "Chemistry and Properties of Nanocrystals of Different Shapes" Chemical Reviews 105, pp. 1025-1102, 2005.

[7] C. Wadell, F. A. A. Nugroho, E. Lidström, B. Iandolo, J. B. Wagner, and C. Langhammer, "Hysteresis-Free Nanoplasmonic Pd-Au Alloy Hydrogen Sensors" Nano Letters 15 (5), pp. 3563–3570, 2015.

[8] K. M. Mayer and J. H. Hafner, "Localized Surface Plasmon Resonance Sensors" Chemical Reviews 111, pp. 3828-3857, 2011.

[9] J. N. Anker, W. P. Hall, O. Lyanders, N. C. Shah, J. Chao, and R. P. van Duyne, Biosensing with Plasmonic Nanosensors" Nature Materials 7, pp. 442-453, 2008.

[10] E. M. Larsson, S. Syrenova, and C. Langhammer, "Nanoplasmonic Sensing for Materials Science" Nanophotonics 1, pp. 249-266, 2012.

[11] Solar FAQs. Available: http://www.sandia.gov/~jytsao/Solar%20FAQs.pdf

[12] H. A. Atwater and A. Polman, "Plasmonics for Improved Photovoltaic Devices" Nature Materials 9, pp. 205-213, 2010.

[13] C. Ayala-Oroczo, C. Urban, M. W. Knight, A. S. Urban, O. Neumann, S. W. Bishnoi, S. Mukherjee, A. M. Goodman, H. Charron, T. Mitchell, M. Shea, R. Roy, S. Nanda, R. Schiff, N. J. Halas, and A. Joshi, "Au Nanomatryoshkas as Efficient Near-Infrared Photothermal Transducers for Cancer Treatment: Benchmarking against Nanoshells," ACS Nano 8 (6), pp. 63720-6381, 2014.

DESAIN PRODUK SUPLEMEN LABU DAN MINYAK SAWIT MERAH UNTUK PENCEGAHAN KEKURANGAN VITAMIN A

Anton Rahmadi*, Ilyas*, Sukmiyati Agustin*, Miftakhur Rohmah*, Bernatal Saragih*

*Jurusan Teknologi Hasil Pertanian, Universitas Mulawarman, Samarinda, Indonesia

ABSTRAK

Tema sentral di sektor pangan adalah pemenuhan gizi melalui pemberdayaan pangan lokal. Gizi buruk seperti kekurangan vitamin A merupakan permasalahan yang hingga kini belum tuntas ditangani. Desain produk suplemen labu dan minyak sawit merah merupakan salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mengatasi kekurangan vitamin A sekaligus menjawab tantangan pemberdayaan pangan lokal. Kedua bahan baku secara alamiah mengandung pro-vitamin A dalam kadar yang sangat tinggi, tetapi kurang terutilisasi dalam pemanfaatan aspek fungsional. Produk hasil desain yaitu 90% labu dan 10% minyak sawit merah, yang kemudian diencerkan 1:4 dengan air, secara umum dapat diterima konsumen dengan ciri produk manis, agak asam, tidak terasa pahit, tidak tercium aroma tengik dan tidak terasa mentah. Dari sisi fungsional, produk ini memiliki konsentrasi trans β-karoten 141,65±0,46 mg/L atau setara 236,667 UI aktivitas vitamin A. Dosis yang dapat diberikan untuk dewasa, ibu melahirkan dan ibu menyusui adalah maksimal 15 mL per konsumsi, sementara dosis untuk anak-anak adalah maksimal 5 mL per konsumsi. Perhitungan dosis dilakukan dengan asumsi produk akan dikonsumsi sebanyak tiga kali per hari. Emulsi labu dan minyak sawit dapat dibuat dengan biaya Rp. 15.000 pada basis produksi 500 mL. Pengembangan produk suplemen berkaitan dengan upaya intervensi gizi buruk lainnya dapat dilakukan dengan cara serupa, yaitu memanfaatkan produk lokal hasil bumi Indonesia

Kata kunci : *vitamin A, suplemen, karoten*

PENDAHULUAN

Seiring dengan program pemerintah tentang kedaulatan pangan dan pemberdayaan produk lokal, diperlukan suatu upaya diversifikasi produk yang juga ditujukan untuk mencegah masalah akibat gizi buruk, misalnya kekurangan vitamin A. Berdasarkan data yang disampaikan Nadya [1], di Indonesia terdapat satu orang per menit yang mengalami kebutaan akibat kurang vitamin A. Cakupan program vitamin A secara nasional berkisar 85-90% untuk balita dan 60-75% untuk ibu nifas (Nadya [1]).

Masalah ini berkomplikasi dengan ketidakseimbangan konsumsi ataupun kemiskinan dan keterpencilan yang menyebabkan masyarakat tidak mampu mengakses suplemen kaya vitamin A, umumnya merupakan produk impor. Sebenarnya, sumber-sumber vitamin A dalam bentuk karotenoid dapat diperoleh dari laut berupa minyak ikan, atau darat berupa sayuran, buah-buahan, dan telur. Desain produk suplemen lokal kaya vitamin atau pro-vitamin A kombinasi pangan lokal yaitu labu dan minyak sawit merah menjadi signifikan. Ini disebabkan potensi wilayah Indonesia sebagai pusat produksi kelapa

sawit sekaligus tanaman hortikultura seperti labu.

Penelitian terkait labu sebagai suplemen telah dimulai 20 tahun silam oleh Setyahartini [2], sementara produk diet kaya minyak sawit telah disampaikan oleh Wulandari [3] dan Bell *et al*. [4]. Untuk mengembangkan upaya-upaya terdahulu, Rahmadi *et al*. [5] mendesain produk emulsi dengan bahan baku labu dan minyak sawit merah yang telah dibiayai oleh Pemerintah Propinsi Kalimantan Timur sebagai salah satu penelitian unggulan daerah.

Berkaitan dengan misi yang ingin disampaikan buku ini, tulisan disajikan dalam kerangka penyediaan informasi dan ide kepada generasi muda terkait potensi riset dan pengembangan produk berbasis lokal di Indonesia. Pada bagian awal akan dijelaskan tentang vitamin A berkaitan dengan karotenoid, sintesis karoten pada tumbuhan, sumber-sumber vitamin A, intervensi vitamin A, dan dosis vitamin A. Bagian selanjutnya menjelaskan proses desain produk emulsi, uji penerimaan produk, uji kadar karotenoid, analisis biaya produksi, dan perhitungan dosis.

VITAMIN A

Vitamin A merupakan salah satu zat gizi mikro esensial yang dibutuhkan oleh tubuh untuk mendukung pertumbuhan, pemeliharaan penglihatan, dan perkembangan sel juga embrio (Tang [6]). Dalam klasifikasi vitamin, vitamin A atau yang biasa disebut retinol merupakan salah satu vitamin yang larut dalam lemak/minyak, sehingga seringkali ditemukan pada produk berbasis minyak dan lemak, seperti susu, telur, hati dan minyak hati, serta mentega.

Kekurangan vitamin A sudah diindikasikan terjadi di komunitas balita dari masyarakat Indonesia, utamanya di Kalimatan Timur, sejak dua dekade yang lalu berdasarkan hasil penelitian Setyahartini [2]. Padahal, Kalimantan Timur memiliki potensi buah-buahan dan sayuran yang kaya akan karotenoid. Labu (*Cucurbita moschata*) adalah salah satu tanaman hortikultura yang banyak ditemukan di Kalimantan Timur. Produk kaya karotenoid merupakan salah satu pasar makanan fungsional yang memiliki tingkat penjualan yang tinggi (Rahmadi *et al*. [5]).

KAROTENOID SEBAGAI PRO-VITAMIN A

Selain dalam bentuk aktif (retinol), terdapat prekursor vitamin A, yaitu karotenoid yang ditemukan pada kloroplas tanaman dan berfungsi sebagai katalisator dalam fotosintesis. Karotenoid umum terdapat di alam dan merupakan antioksidan alami larut lemak. Karotenoid, selain sebagai prekursor vitamin A, juga berperan dalam pemberian warna pada beberapa jenis buah, sayuran, dan kerang-kerangan (Jaswir *et al*. [7]).

Di dalam tubuh, selama masa penyerapan, karotenoid akan dikonversi menjadi retinol. Aktivitas pro-vitamin A dari β-karoten terjadi secara enzimatik di dalam mukosa intestinal melalui bantuan enzim dioksigenase menjadi senyawa retinal yang kemudian direduksi menjadi retinol (Groeber [8]). Aktivitas antioksidan karotenoid diperoleh dari senyawa likopen, β-karoten, dan lutein yang semuanya membantu proses penghambatan peroksidasi lemak dengan mekanisme peningkatan resistensi *low density lipoprotein* (LDL) dari proses oksidasi. Perlindungan oksidatif terhadap cahaya ditemukan pada proses penghambatan inflamasi sel kulit dan pembentukan katarak. Efek antioksidatif selanjutnya

diperoleh dengan cara inaktivasi oksigen singlet pada sitoplasma (Groeber [8]).

Salah satu bentuk karotenoid yang paling aktif adalah β-karoten, sebuah padatan berwarna merah dengan ukuran molekul yang lebih besar bila dibandingkan dengan retinol dan merupakan hidrokarbon tak jenuh, bukan alkohol (Lean [N]). β-karoten merupakan salah satu prekursor vitamin A, dicirikan dengan cincin β-ionon (Groeber [8]).

Selain β-karoten, lutein, likopen, zeaxanthin, cryptoxanthin, dan α-karoten juga merupakan karotenoid penting sumber pro-vitamin A (Almatsier [10]). Karotenoid dan turunannya seperti retinol dan asam trans-retinoat memiliki fungsi menjaga kesehatan saraf penglihatan dan motorik, juga berguna dalam menjaga jalinan komunikasi antar sel saraf sendiri (Rahmadi [11]). Ayustaningwarno [12] menyebutkan bahwa α-karoten merupakan antioksidan kuat yang berpotensi mengurangi risiko beberapa kanker seperti kanker hati, paru-paru, pankreas, dan lambung, selain itu juga berpotensi mengurangi atheroslerosis di dalam arteri.

SINTESIS KAROTEN PADA TUMBUHAN

Berdasarkan beberapa penelitian (Hannoufa dan Hossain [13]; Norman [14]; Setyahartini [2]), karotenoid dapat dibiosintesis dari asam asetat, asam absisat dan D-glukosa melalui proses kondensasi enzimatik yang ketiganya akan bertemu pada jalur farnesil pirofosfat untuk kemudian membentuk β-karoten. Pembentukan karotenoid ini berbanding lurus dengan kematangan buah dan berbanding terbalik dengan kadar klorofil daging buah. Semakin tua, kadar karotenoid buah akan semakin meningkat, sementara kadar klorofilnya menurun. D-glukosa dan asam asetat diubah melalui jalur terpenoid membentuk GGPP dan selanjutnya fitoen dengan rantai C-40 (Hannoufa dan Hossain [13]; Setyahartini [2]). Dehidrogenasi, siklisasi, dan isomerasi fitoen akan menghasilkan isomer-isomer senyawa karotenoid. Isomer α-, β-, τ-, dan δ-karoten terdapat pada daging buah labu merah secara bersamaan. Pada pematangan buah, peningkatan karoten juga diikuti dengan penurunan kadar glukosa, fruktosa, dan sukrosa, serta asam askorbat. Ditinjau dari siklus biosintesis karotenoid, perubahan D-glukosa menjadi β-karoten menjelaskan sebab penurunan kadar glukosa di buah labu matang (Hannoufa dan Hossain [13]).

Sintesis karoten pada pematangan buah dipengaruhi oleh iklim yang terdiri dari komposisi gas di udara, cahaya ultraviolet, dan suhu. Selain itu, kandungan mineral tanah dan varietas tanaman. Pemberian senyawa pengontrol aktivitas enzim seperti difenil amin, 2-hidroksi bifenil, dan 9-fereorema akan menghambat dehidrogenasi fitofluen, tetapi memacu siklisasi dan isomerase karoten. (Setyahartini [2])

SUMBER VITAMIN A

Sumber-sumber vitamin A secara umum banyak terdapat pada sayuran, buah-buahan, hati, minyak ikan, dan kuning telur. Dilihat dari sumbernya, minyak hati ikan dan minyak sawit merah merupakan penyedia terbesar yang banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku produk emulsi kaya pro-vitamin A.

LABU

Cucurbita moschata dikenal sebagai labu merah atau labu kuning. Labu kuning, dikenal di Kalimantan Timur dan Selatan sebagai waluh, merupakan tumbuhan menjalar yang memiliki potensi tinggi

sebagai penyedia mikronutrien β-karoten. Labu kuning mudah ditanam dan dipelihara. Di samping kandungan β-karoten yang cukup tinggi, buah labu kuning memiliki daya tahan yang kuat dan dapat disimpan dalam waktu yang lama tanpa mengurangi kualitas. Labu dapat memiliki umur simpan mencapai enam bulan setelah dipanen, asalkan kulit buah tidak mengalami kerusakan dan tempat penyimpanan bersih dan tidak lembab (Santosa dan Kusumayanti [15]).

Labu memiliki komposisi dominan karbohidrat dalam bentuk senyawa fruktosa, glukosa, sukrosa, maltosa, selulosa, pektin dan oligosakarida lainnya. Labu memiliki kandungan lemak sekitar 0,3 g/100 g buah dalam bentuk senyawa tidak berbau, tidak berwarna, namun mudah teroksidasi pada pH netral. Karoten pada labu terdapat pada daging buah yang didominasi oleh β-karoten sekitar 832 µg/g buah, atau 37,2 % total karoten dari buah labu (Setyahartini [2]).

Schoefs [16] menyebutkan bahwa karotenoid merupakan salah satu komponen pigmen yang umum ditemukan di sayuran dan buah-buahan. Setyahartini [2] menemukan beberapa komponen karotenoid di dalam labu seperti β-karoten dan cucurbitaxanthin. Penelitian terbaru (Jacobo-Valenzuela *et al*. [17]) menghasilkan karakterisasi kimia dan fisikokima dari C. moschata, dimana kadar total serat sebanyak 19,1%, pektin 7,3%, dan karotenoid 2,7 mg β-karoten/g produk. Dari sisi mineral, daging buah C. moschata unggul dalam kandungan K sebanyak 42,194 g/kg, Ca sebanyak 6,685 g/kg, dan P sebanyak 3,040 g/kg. Buah-buahan, termasuk labu, memiliki karakteristik sensoris, kandungan β-karoten dan antioksidan (dalam %DPPH) yang berkaitan dengan kualitas kultivar yang ditanam (Gajewski *et al*. [18]).

Menurut Wijayakusuma [19] labu kuning menyimpan beragam manfaat bagi kesehatan karena mengandung Vitamin A, B1, B2, C, lemak tak jenuh, protein, dan mineral. Berdasarkan penelitian terdahulu, bioavailabilitas dari sari labu sebagai sumber karotenoid terhadap balita termasuk yang cukup baik dibandingkan dengan sayuran hijau dan wortel (Setyahartini [2]). Ekstrak labu kuning juga mampu menurunkan kadar kolestrol total, trigliserida, LDL (*Low Density Lipoprotein*), dan meningkatkan kadar HDL (*High Density Lipoprotein*) atau kolestrol baik dalam darah dengan memberi 130 g labu atau 40 ml ekstrak labu kuning kepada 27 tikus putih yang sebelumnya diberi diet tinggi lemak (Trubus [20]). Labu kuning juga mengandung inulin dan serat pangan yang sangat dibutuhkan untuk pemeliharaan kesehatan (Ramadhani *et al*. [21]).

MINYAK SAWIT

Minyak sawit, berasal dari ekstrak buah sawit (*Elaeis guineensis*), merupakan salah satu sumber karotenoid yang tinggi (Sirait [22]; Rossi *et al*. [23]). Minyak sawit merah mengandung setidaknya 12 komponen karotenoid dengan komponen dominan α- dan β-karoten. Komponen lainnya adalah mono- dan di-epoksida, α- dan β-hidrokarbon isomerik dari karoten, serta fitoene. Konsentrasi α- dan β-karoten dari minyak sawit yang diperoleh adalah minimum 506 ppm sebelum dibuat menjadi konsentrat (Ng dan Tan, [24]). Pemekatan total karotenoid dengan proses distilasi molekuler mampu menghasilkan 30,000 ppm karotenoid dari minyak sawit merah (Batistella *et al*, [25]).

Minyak sawit diketahui memiliki nutrisi makro dan mikro yang bermanfaat

untuk kesehatan manusia, antara lain α-, β-, γ- karoten, vitamin E (tokoferol dan tokotrienol), likopene, lutein, sterol, asam lemak tidak jenuh dan ubiquinone. (Ayustaningwarno [12]). Karoten terdapat dalam jumlah 500-700 ppm dengan didominasi oleh α dan β-karoten dengan variasi konsentrasi 1-30%. Syahputra *et al.* [26] menyebutkan kandungan karoten dalam minyak sawit kasar (CPO) dipengaruhi oleh varietas dan kematangan buah. Kandungan karotenoid CPO dari varietas Tenera berkisar antara 500-700 ppm, sedangkan varietas Dura yang berasal dari Nigeria berkisar antara 800-1600 ppm. Hal ini menjadi perhatian utama setelah adanya persyaratan minimum kadar total karoten sebesar 500 mg/kg CPO dari negara-negara importir.

Tabel 1. Nilai rata-rata kandungan vitamin A dalam makanan

Makanan	Equivalensi Retinol (µg/100g)
Makanan yang mengandung retinol	
Minyak hati ikan halibut*	90.000
Minyak hati ikan kod*	18.000
Hati sapi**	13.170
Mentega*	1.059
Kuning telur bebek**	861
Makanan yang mengandung karoten	
Minyak sawit merah*	20.000
Daun pepaya**	5.475
Daun katuk**	3.111
Ubi jalar merah**	2.310
Wortel*	2.233
Labu**	7.385 (UI)

Sumber : * Almatsier [10], ** USDA [41]

Vitamin E juga terdapat pada minyak sawit dengan kisaran konsentrasi 600-1000 ppm, terdapat dalam bentuk tokotrienol (70%) dan tokoferol (30%). Minyak sawit juga mengandung sterol dengan kisaran 250-620 ppm, dengan didominasi oleh β-sitosterol yang bersifat hipokolesterolemik (Basiron [27]).

Minyak sawit merah telah digunakan sebagai intervensi untuk menurunkan prevalensi penyakit terkait defisiensi vitamin A. Misalnya, serum ibu untuk α-karoten dan β-karoten meningkat dua kali setelah intervensi minyak sawit merah selama 10 hari pada konsentrasi 90 mg setara β-karoten. Hasil ini juga menunjukkan bahwa keterserapan minyak sawit merah adalah 67% lebih baik daripada suplemen β-karoten murni (Canfield *et al*. [28]). Salah satu penyebab bioavailabilitas minyak sawit merah yang tinggi dibandingkan dengan suplemen β-karoten murni adalah sinergisme antara tokotrienol dan karotenoid sebagai antioksidan di minyak sawit merah (Rossi *et al*. [23]; Batistella *et al*. [25]).

Minyak sawit dahulu sering diklaim meningkatkan kolesterol darah dibandingkan dengan minyak jagung, minyak kedelai, minyak biji bunga saff, dan minyak biji bunga matahari. Akan tetapi, total kolesterol endogenus ternyata berkurang. Fenomena ini dijelaskan sebagai peningkatan ketersediaan tokotrienol dengan posisi isomer yang unik dan mampu menurunkan risiko trombosis arteri,

aterosklerosis, agregasi platelet, dan sekaligus menurunkan biosintesis kolesterol (Edem [29]). Akan tetapi, diet kaya minyak sawit merah harus diimbangi dengan minyak kaya PUFA, dikarenakan diet eksklusif minyak sawit (>50% CPO) yang diujikan pada ikan salmon ternyata menurunkan kadar omega-3 dan omega-6 dari ikan salmon (Bell *et al*. [4]).

INTERVENSI VITAMIN A

Di negara-negara berkembang, kecenderungan anak-anak mengalami defisiensi vitamin A cukup banyak. Sebagai contoh, di Kongo, Afrika, terdapat 0,7% anak terindikasi rabun senja, 7,7% memiliki titik-titik bitot pada mata (Samba *et al*. [30]). Di Indonesia pada tahun 2008 terdapat pernyataan bahwa setiap satu menit, terdapat satu orang yang mengalami kebutaan akibat gizi buruk, utamanya karena kurang vitamin A (Nadya [1]). Intervensi vitamin A perlu dilakukan utamanya di daerah pedesaan yang asupan gizinya tidak imbang disebabkan oleh kemiskinan atau keterbelakangan. Serum β-karoten balita di Kalimantan timur setelah intervensi vitamin A menurut Setyahartini [2] meningkat sebesar 30-80 µg/dl setelah balita mengkonsumsi daging buah labu setara 250-400 µg ekivalen retinol. Hal ini diperkuat dengan penelitian yang menyatakan bahwa dua minggu pasca intervensi vitamin A dalam dosis tinggi, kadar retinol, retinol terikat protein, hemoglobin, hematokrit, besi darah, dan transferrin meningkat (Bloem *et al*. [31]).

Model-model intervensi vitamin A menurut WHO [32] terbagi ke dalam tiga kategori: (a) suplementasi, (b) fortifikasi, dan (c) diversifikasi diet. Suplementasi dilakukan setiap enam bulan untuk balita berusia 6 bulan hingga 5 tahun. Penyediaan vitamin A dosis tinggi terbukti aman, murah, dan efisien dalam mencegah defisiensi vitamin A dan ketahanan balita. Suplementasi juga dapat diberikan kepada ibu menyusui untuk meningkatkan kemampuan bertahan hidup bayi pada usia sangat muda. Selain itu, suplementasi vitamin A bagi ibu juga mengembalikan konsentrasi vitamin A yang umumnya terkikis dalam periode kehamilan dan menyusui (WHO [32]).

Fortifikasi dilakukan di beberapa negara untuk meningkatkan kontrol ketersediaan vitamin A dalam jangka panjang. Produk-produk yang dapat difortifikasi adalah gula, minyak goreng, susu, margarin, makanan balita, dan beberapa jenis tepung. Dalam banyak kasus, fortifikasi baru akan memberikan hasil lebih lama dibandingkan suplementasi. Fortifikasi bertujuan sebagai alat untuk menjaga ketersediaan vitamin A setelah proses suplementasi dilakukan, utamanya di negara-negara Amerika latin untuk anak-anak berusia 6 hingga 24 bulan. Kontrol fortifikasi dilakukan secara reguler melalui lembaga seperti posyandu (WHO [32]).

Diversifikasi diet dilakukan dengan meningkatkan konsumsi sumber-sumber makanan nabati. Diversifikasi makanan ini berpengaruh terhadap 80% dari *intake* vitamin A di masyarakat negara maju. Peningkatan diversifikasi asupan dari sumber-sumber nabati perlu dilakukan dikarenakan bioavailabilitas dari vitamin A asal nabati sangat baik, misalnya dari buah dan sayuran (WHO [32]).

DOSIS VITAMIN A

Rekomendasi asupan vitamin A dan nutrisi lain yang disediakan dalam rekomendasi asupan diet (DRIs) bervariasi menurut usia dan jenis kelamin. Batas asupan maksimal (*recommended dietary*

allowance, RDA) untuk vitamin A diberikan sebagai mcg (µg) setara aktivitas retinol (RAE) untuk menjelaskan bioavailabilitas yang berbeda antara retinol dan karotenoid sebagai provitamin A. Tubuh akan mengkonversi semua sumber makanan dari vitamin A ke dalam bentuk retinol. Secara fisiologis, 1 µg retinol setara dengan 12 µg β-karoten, atau 24 µg α-karoten atau β-cryptoxanthin. Apabila sumber β-karoten berasal dari produk suplemen, tubuh akan mengkonversi 2 µg β-karoten untuk 1 µg retinol (Otten *et al*. [33]).

Bentuk lain dari pengukuran aktivitas vitamin A sebanyak 1 UI dapat diperoleh dengan konversi sebanyak 0,6 µg β-karoten, sehingga 20-30 mg β-karoten setara dengan 33.000 – 50.000 UI (Groeber [8]). Dalam perhitungan berbasis nilai equivalen setara retinol (retinolic activity equivalent, RAE) 1 UI retinol setara dengan 0,3 µg RAE, 1 UI β-karoten (suplemen) setara 0.15 µg RAE, 1 UI β-karoten (makanan) setara 0.05 µg RAE, dan 1 UI α-karoten atau β-cryptoxanthin setara 0.025 µg RAE (Otten *et al*. [33]).

Asupan maksimal (RDA) vitamin A bagi pria remaja dan dewasa adalah 900 µg RAE atau setara dengan 3.000 UI suplemen retinol. Akan tetapi, RDA ini juga setara dengan 6.000 UI β-karoten dari suplemen, 18.000 UI β-karoten dari makanan, atau 36.000 UI alfa-karoten atau β-cryptoxanthin dari makanan. Diet campuran yang mengandung 900 µg RAE perlu menyediakan antara 3.000 dan 36.000 IU vitamin A, tergantung pada jenis makanan yang dikonsumsi (Otten *et al*. [33]). Status karotenoid yang baik menurut Groeber [8] adalah β-karoten > 0,4 µmol/L (21 µg/dL), likopen > 0.5 µmol/L, lutein > 0,6 µmol/L. Seseorang dikatakan menderita defisiensi vitamin A apabila kadar serum β-karotennya < 0,3 µmol/L.

Status vitamin A berdasarkan konsentrasi plasma pada wanita dan pria normal berturut-turut adalah 40-70 µg/dL dan 42,5-83 µg/dL (Groeber [8]), sedangkan dalam Asfianti *et al*. [34], defisiensi vitamin A terjadi apabila kadar vitamin A serum <20 µg/dL. Apabila kekurangan vitamin A, penderita akan mengalami buta senja (penurunan fungsi penglihatan), perubahan pada kulit, gangguan pertumbuhan, infeksi, dan keratinisasi sel rasa pada lidah. Namun, konsumsi vitamin A wajib memperhatikan batas maksimal karena kelebihan vitamin A akan memicu beberapa masalah kesehatan seperti pusing, rasa nek, rambut rontok, kulit kering, anoreksia, dan sakit pada tulang. Akan tetapi, menurut Almatsier [10], gejala kelebihan ini hanya terjadi apabila Vitamin A dikonsumsi dalam bentuk retinol.

Batas asupan maksimal vitamin A diatur berdasarkan usia, jenis kelamin, dan keadaan biologis seperti kehamilan dan menyusui (Institute of Medicine [35]). Kelebihan vitamin A akan menyebabkan keracunan yang berujung pada peningkatan risiko penyakit jantung dan kanker (Solomons [36]).

Karoten tidak menimbulkan gejala kelebihan asupan, karena penyerapan karoten akan menurun/terhenti apabila kebutuhan telah terpenuhi. Karoten yang berlebih tidak diubah menjadi vitamin A, akan tetapi disimpan di dalam lemak. Apabila lemak di bawah kulit mengandung banyak karoten, warna kulit akan menjadi kekuningan. Konsumsi karoten akan lebih aman dalam pemenuhan kebutuhan vitamin A harian. (Groeber [8]).

Tabel 2. Asupan maksimal vitamin A menurut kelompok umur, jenis kelamin, dan kondisi biologis.

Umur	Laki-laki	Perempuan	Ibu Hamil	Ibu Menyusui
0–12 bulan	600 µg RAE (2.000 UI)	600 µg RAE (2.000 UI)		
1–3 tahun	600 µg RAE (2.000 UI)	600 µg RAE (2.000 UI)		
4–8 tahun	900 µg RAE (3.000 UI)	900 µg RAE (3.000 UI)		
9–13 tahun	1.700 µg RAE (5.667 UI)	1.700 µg RAE (5.667 UI)		
14–18 tahun	2.800 µg RAE (9.333 UI)	2.800 µg RAE (9.333 UI)	2.800 µg RAE (9.333 UI)	2.800 µg RAE (9.333 UI)
19+ tahun	3.000 µg RAE (10.000 UI)	3.000 µg RAE (10.000 UI)	3.000 µg RAE (10.000 UI)	3.000 µg RAE (10.000 UI)

Sumber: Institute of Medicine [35].

DESAIN PRODUK SUPLEMEN PRO-VITAMIN A

Untuk mengatasi kekurangan vitamin A, sekaligus diversifikasi pangan berbasis lokal, maka dilakukan desain produk emulsi kaya pro-vitamin A dengan bahan dasar labu dan minyak sawit merah.

PERSIAPAN BAHAN

Dalam persiapan bahan yang terpenting untuk diperhatikan adalah kesegaran bahan baku. Labu dipilih yang berwarna kuning tua dan matang. Selanjutnya labu dikupas, dikecilkan ukurannya, diambil sari buahnya menggunakan food processor, untuk selanjutnya di pasteurisasi dan disaring. Sari labu yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk pembuatan produk emulsi.

CPO harus dicek kadar asam lemak bebas awal, dimana standar CPO segar memiliki kadar FFA < 3%. Proses netralisasi asam lemak bebas dan penghilangan gum dilakukan dengan penambahan air hangat dan penambahan NaOH 10 % sebanyak perkiraan mL yang cukup untuk menetralkan kadar FFA awal (3%). Pembilasan dilakukan secara berulang untuk memastikan gum dan Na-FFA atau sabun terbuang sempurna. Selanjutnya, produk didiamkan selama satu malam untuk proses pemisahan fraksi olein dan stearin. Dalam hal ini, minyak sawit merah diambil hanya dari fraksi olein dengan yield berkisar 60-70% CPO. Proses deodorisasi dilakukan menggunakan rotavapor dengan beberapa alternatif cara sesuai kemampuan alat dan kapasitas produksi.

Berbagai proses deodorisasi pada minyak sawit merah telah diteliti sebelumnya. Wulandari [3] menggunakan suhu 180 °C selama 20 menit untuk menghasilkan produk minyak sawit merah dengan kadar karotenoid 249 ppm dan asam lemak bebas 0,2%. Siahaan *et al*. [4] melaporkan bahwa deodorisasi pada suhu 160 °C selama 120 menit di bawah tekanan 15 cmHg menghasilkan minyak sawit merah dengan kandungan karoten 518 ppm dan asam lemak bebas 0,171%.

Teknik deodorisasi yang digunakan dalam penelitian Rahmadi *et al*. [5] mengacu pada prosedur Rismawati [6]. Dedodorisasi dilakukan pada suhu disekitar titik didih air (100 °C) dibantu dengan kondisi tekanan yang rendah (60 mmHg) agar mampu menjaga kadar karotenoid total

untuk olein dan stearin minyak sawit merah sampai dengan lama waktu deodorisasi 6 jam. Berdasarkan hasil penelitian Rismawati [6], kandungan karotenoid pada olein dan stearin minyak sawit merah sebelum dideodorisasi adalah 494,070 ppm dan 221,870 ppm, diukur menggunakan metode PORIM. Kadar karotenoid total setelah proses deodorisasi selama 6 jam pada olein dan stearin minyak sawit merah adalah 458,600 ppm dan 218,370 ppm.

FORMULASI

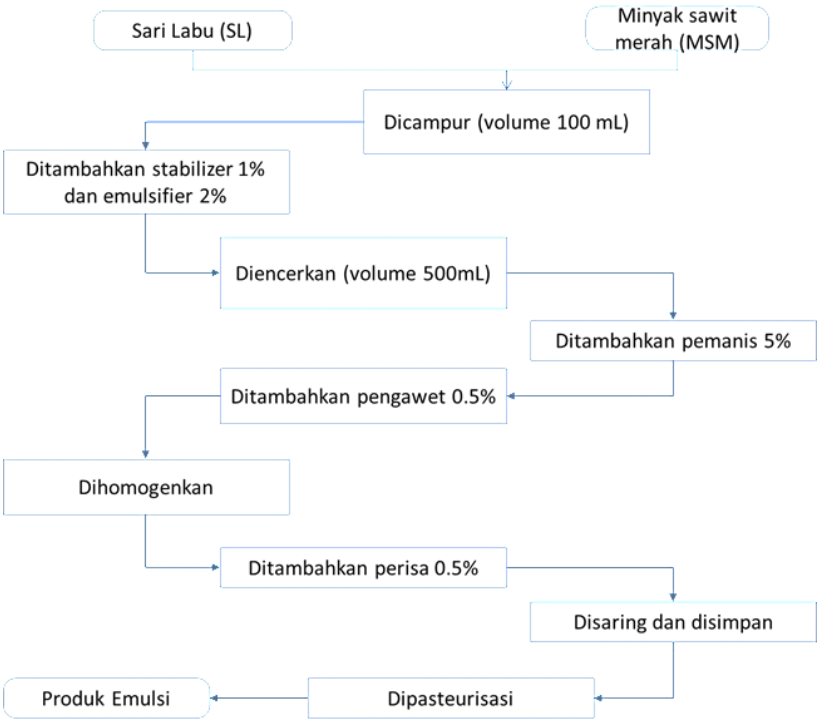
Proses formulasi emulsi labu dan minyak sawit merah dilakukan dengan penambahan stabilizer yang berfungsi untuk menstabilkan emulsi. Selain itu digunakan pula emulsifier yang berfungsi untuk menjaga tegangan permukaan antara droplet lemak di dalam minyak tetap dalam kondisi stabil dan tidak berpisah (Rahmadi *et al*. [39]). Dalam formulasi ini digunakan gum sebagai emulsifier dan karboksi metil selulase (CMC) sebagai stabiliser. Adapun penentuan konsentrasi gum dan CMC dilakukan dengan cara trial and error sehingga diperoleh konsentrasi optimal per batch produksi. Basis produksi yang digunakan untuk setiap resepnya adalah 500 mL.

Proses penambahan emulsi dan stabilizer dilakukan diawal sebelum proses pengenceran ,yang berfungsi untuk pembentukan produk emulsi dengan lebih baik untuk kemudian diencerkan dengan perbandingan 1:4 untuk memudahkan perhitungan dosis. Beberapa jenis pemanis yang mungkin digunakan adalah pemanis buatan foodgrade, gula, ataupun pemanis berbasis buah-buahan (fruktosa). Hasil awal formulasi menunjukkan properti rasa manis dan enak lebih muncul pada pemanis berbasis fruktosa. Pengawet asam sitrat ditambahkan dengan kadar 0,5% disertai dengan penambahan perasa oranye/lemon dengan konsentrasi 0,5%. Penambahan pewarna dan perasa makanan dilakukan untuk menyembunyikan rasa dan aroma khas minyak sawit. Produk akhir disimpan di botol gelap kemasan 100mL. Selanjutnya, pasteurisasi dilakukan di akhir yang bertujuan untuk memusnahkan bakteri patogen yang mungkin mengkontaminasi selama proses pengolahan.

PENERIMAAN DAN KARAKTERISTIK PRODUK

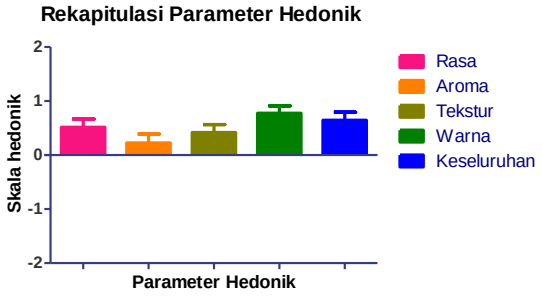
Uji mutu hedonik digunakan untuk mengetahui preferensi panelis terhadap ke-enam formulasi emulsi labu-minyak sawit merah. Sebanyak 30 panelis diminta penilaiannya akan parameter palatabilitas yang terdiri dari rasa (manis, asam, dan pahit), aroma (mentah dan tengik). Angka yang diperoleh kemudian ditransformasikan dalam skala positif dan negatif, yaitu: minus dua (-2) untuk sangat tidak terasa, minus satu (-1) untuk tidak terasa, nol (0) untuk netral, positif satu (1) untuk terasa, dan positif dua (2) untuk sangat terasa. Bila terdapat pengaruh yang berbeda nyata pada taraf α 5% pada sidik ragam maka dilakukan uji lanjut dengan metode Tukey test.

Berdasarkan hasil penelitian Rahmadi *et al*. [5] didapatkan bahwa produk sari labu dan minyak sawit (90%:10%) adalah yang terbaik dari sisi penerimaan konsumen. Produk emulsi ini selanjutnya dikarakterisasi berdasarkan parameter penerimaan yang terdiri dari rasa, aroma, tekstur, warna, dan penerimaan keseluruhan. Dari Gambar 2, didapatkan profil produk emulsi 90% labu memiliki tingkat penerimaan netral untuk aroma (skor mendekati nol) dan cenderung disukai (skor mendekati 1) untuk parameter-parameter hedonik lainnya.

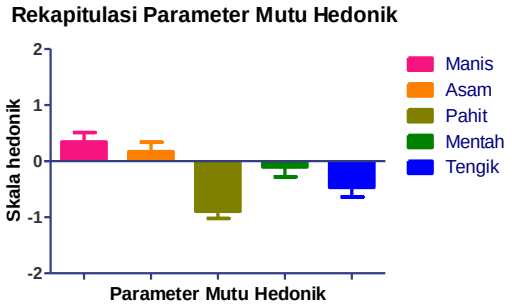


Gambar 1. Bagan alir tahap formulasi produk emulsi sari labu dan minyak sawit merah (Rahmadi *et al*. [5])

Produk emulsi 90% labu selanjutnya dikarakterisasi berdasarkan parameter penerimaan yang terdiri dari rasa manis, rasa asam, rasa pahit, aroma mentah, dan aroma tengik Angka yang diperoleh kemudian ditransformasikan dalam skala positif dan negatif, yaitu: minus dua (-2) untuk sangat tidak disukai, minus satu (-1) untuk tidak disukai, nol (0) untuk netral, positif satu (1) untuk disukai, dan positif dua (2) untuk sangat disukai. Didapatkan profil produk emulsi 90% labu memiliki tingkat penerimaan netral untuk aroma mentah dan rasa asam, mendekati manis, tidak pahit, dan tidak tengik (Gambar 3).



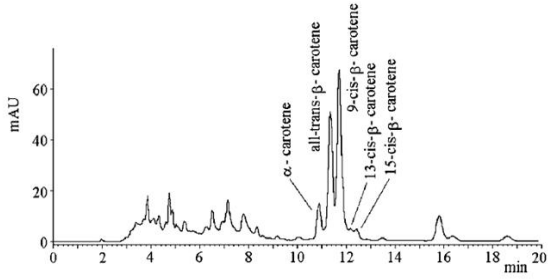
Gambar 2. Rekapitulasi hasil uji hedonik produk emulsi 90% labu (Rahmadi *et al*. [5])



Gambar 3. Rekapitulasi hasil uji mutu hedonik produk emulsi 90% labu (Rahmadi *et al*. [5])

KADAR KAROTENOID

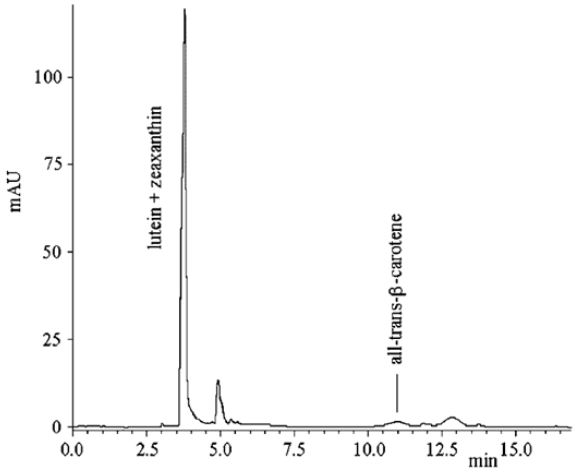
Dalam proses deteksi karotenoid menggunakan HPLC (*High Performance Liquid Chromatography*), urut-urutan senyawa terdeteksi adalah α-karoten, all-trans-β-karoten, 9-cis-β-karoten, 13-cis-β-karoten, dan 15 cis-β-karoten (Bononi *et al*. [40]). Hasil ini identik dengan laporan Syahputra *et al*. [26] yang menyebutkan bahwa α-karoten, all-trans-β-karoten akan terdeteksi lebih awal dibandingkan dengan senyawa-senyawa cis-β-karoten.



Gambar 4. Deteksi puncak α-karoten, all-trans-β-karoten, 9-cis-β-karoten, 13-cis-β-karoten, dan 15 cis-β-karoten dengan HPLC-DAD (Bononi *et al*. [40]).

Selain senyawa α-zeakaroten, β-zeakaroten, α-karoten, all-trans-β-karoten, 9-cis-β-karoten, 13-cis-β-karoten, dan 15 cis-β-karoten, terdapat senyawa lutein dan zeaxanthin alami pada buah-buahan, misalnya pada labu merah. Lutein dan zeaxanthin akan memiliki puncak di awal deteksi seperti yang dilaporkan oleh Bononi *et al*. [40]. Hasil ini memperkuat penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa komponen zeaxanthin terdapat secara alamiah di dalam labu (Setyahartini [2]).

Hasil analisis HPLC terhadap produk emulsi sari labu 90% dan minyak sawit 10% menunjukkan bahwa komponen karotenoid dari produk emulsi didominasi oleh lutein, zeaxanthin, trans-β-karoten dan cis-β-karoten. Keempat komponen ini menjadi kekhasan dari produk emulsi yang diteliti. Dikarenakan keterbatasan standar, maka hanya dilakukan perhitungan berdasarkan kandungan trans-β-karoten, dimana produk emulsi memiliki kadar trans-β-karoten sebesar 141,65±0,47mg/L.



Gambar 5. Puncak lutein, zeaxanthin, dan all-trans-β-karoten dalam uji HPLC-PDA (Bononi *et al*. [40]).

ANALISIS BIAYA PRODUKSI SEDERHANA

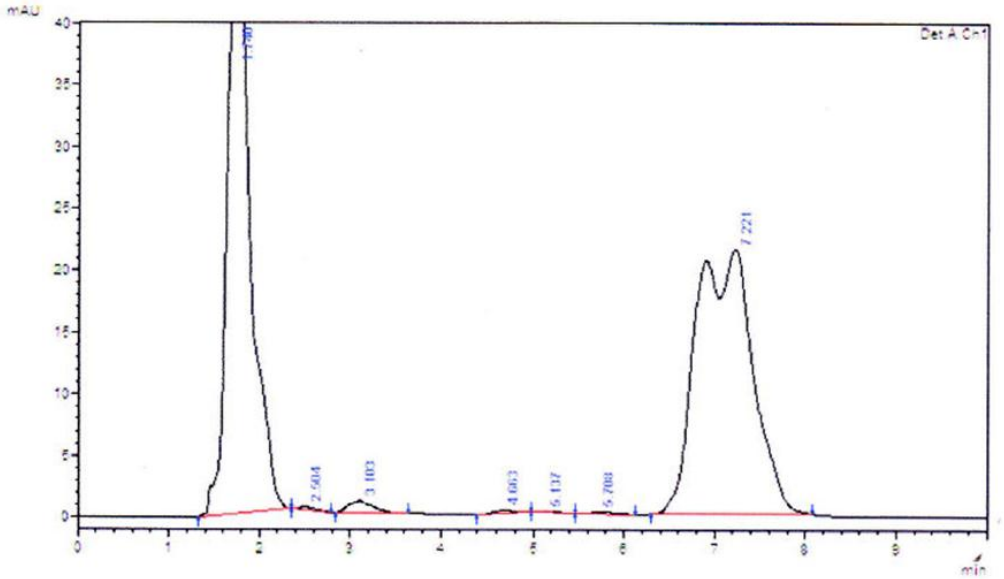
Diperlukan 1 buah labu segar sekira dua kg untuk menghasilkan 500 mL sari labu, sedangkan CPO akan menghasilkan rendemen sekitar 60-70% minyak sawit merah fraksi olein yang selanjutnya di deodorisasi selama lima jam. Penggunaan

bahan tambahan pangan (BTP) adalah pada stabilizer sebanyak 0,2% (b/v), emulsifier 0,4% (b/v), pemanis berbasis fruktosa 5% (b/v), pengawet 0,5% (b/v), pewarna dan perasa makanan 0,5% (b/v). Komponen air ditambahkan sebagai pengencer konsentrat emulsi labu da minyak sawit merah. Faktor produksi yang termahal selain proses deodorisasi adalah bahan baku, kemasan, dan biaya tenaga kerja (Tabel 3). Berdasarkan analisis sederhana terhadap faktor-faktor produksi, diperoleh harga dasar produk emulsi labu dan minyak sawit merah ini adalah Rp. 15,000 per Desember 2014. Bila menggunakan kemasan 300 mL, produk diharapkan mampu bertahan selama 3 minggu untuk konsumsi rutin seorang anak.

PERHITUNGAN DOSIS

Hasil analisis total karotenoid dengan metode HPLC memberikan hasil rata-rata 142 mg/L setara trans β-karoten. Berdasarkan Groeber [8], pengukuran aktivitas vitamin A sebanyak 1 UI dapat diperoleh dengan konversi sebanyak 0,6 µg β-karoten. Artinya, setiap liter produk emulsi labu dan minyak sawit merah mengandung 236,667 UI aktivitas vitamin A, atau 237 UI/mL produk. Adapun asupan harian maksimal vitamin A menurut *Institute of Medicine* [35] adalah 3,000 UI untuk anak-anak usia 4-8 tahun dan 10.000 UI untuk dewasa, ibu melahirkan, dan ibu menyusui.

Berdasarkan asumsi tiga kali konsumsi per hari, maka ditetapkan dosis maksimal harian per konsumsi adalah 3 sendok makan (sdm) atau 15 mL untuk dewasa dan 1 sendok makan (sdm) atau 5 mL untuk anak-anak. Adapun dosis rekomendasi harian dengan asumsi tiga kali konsumsi per hari adalah 1-2 sendok makan (sdm) atau 9 mL untuk dewasa dan 1-2 sendok teh (sdt) atau 4 mL untuk anak-anak.



Gambar 6. Hasil analisis HPLC terhadap produk emulsi labu dan minyak sawit merah (Rahmadi *et al*. [5]).

Tabel 3. Analisis biaya produksi sederhana dengan basis produksi 500 mL (Rahmadi *et al.* [5])

Komponen harga	Persen	Satuan	Unit	Biaya (Rp)
Sari labu	18%	90	Ml	3.000
Minyak Sawit Merah	2%	10	Ml	2.400
Air	75,0%	400	Ml	250
Stabiliser (b/v)	0,2%	1	G	500
Emulsifier (b/v)	0,4%	2	G	500
Pemanis (b/v)	5,0%	25	G	500
Pengawet (b/v)	0,5%	2,5	G	250
Perisa (b/v)	0,5%	2,5	G	250
Botol dan kemasan				3.500
Biaya tenaga kerja dan energi				3.850
Harga dasar per basis produksi		500	mL	15.000

Tabel 4. Dosis per konsumsi produk emulsi untuk anak-anak dan dewasa (Rahmadi *et al.* [5])

	Asupan harian		Dosis*	
Usia/Kondisi	Rekomendasi (UI)	Maksimal (UI)	Rekomendasi (mL)	Maksimal (mL)
Anak-anak	2,600	3,000	4	5
Dewasa	6,000	10,000	9	15
Ibu Melahirkan	5,000	10,000	7	15
Ibu Menyusui	8,600	10,000	12	15

* asumsi tiga kali konsumsi sehari

PENUTUP

Desain produk suplemen labu dan minyak sawit merupakan suatu contoh pengembangan produk berbasis sumber daya lokal yang dimaksudkan untuk pencegahan kekurangan vitamin A. Kedua bahan baku secara alamiah mengandung pro-vitamin A dalam kadar yang sangat tinggi yang kurang terutilisasi dalam pemanfaatan aspek fungsionalnya. Emulsi labu dan minyak sawit merah secara umum dapat diterima konsumen dengan ciri produk manis, agak asam, tidak pahit, tidak tengik dan tidak terasa aroma mentah. Dari sisi fungsional, produk emulsi memiliki kadar trans β-karoten sebesar 141,65±0,46 mg/L atau setara 236,667 UI aktivitas vitamin A. Dosis yang diberikan maksimal untuk dewasa, ibu melahirkan dan ibu menyusui adalah 15 mL per konsumsi, sementara dosis maksimal untuk anak-anak adalah 5 mL per konsumsi. Dari sisi harga, emulsi labu dan minyak sawit dapat dibuat dengan biaya Rp. 15.000 pada basis produksi 500 mL. Pengembangan produk suplemen berkaitan dengan upaya intervensi gizi buruk lainnya dapat dilakukan dengan cara serupa, yaitu memanfaatkan produk lokal hasil bumi Indonesia.

*korespondensi :
antonrahmadi@gmail.com

REFERENSI

[1] Nadya, R. 2010. Pengaruh Penyuluhan terhadap Pengetahuan Ibu yang Mempunyai Balita Tentang Pemberian Kapsul Vitamin A di Lingkungan IX Kelurahan Paya Pasir

Kecamatan Medan Marelan Tahun 2009. [Diakses 4 Juni 2014] http://repository.usu.ac.id/handle/123456789/16580

[2] Setyahartini, S. 1994. Identifikasi Senyawa Karoten pada Labu Merah (Cucurbita moschata). Makalah Seminar Bulanan Jurusan Budidaya Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman, tanggal 25 Juli 1994.

[3] Wulandari, OV. 2000. Pemanfaatan Minyak Sawit untuk Produksi Emulsi Kaya Beta-Karoten Sebagai Suplemen Vitamin A. Skripsi Sarjana Jurusan Teknologi Pangan dan Gizi, Fateta IPB. Bogor.

[4] Bell, J.G., Henderson, R.J., Tocher, D.R., McGhee, F., Dick, J.R., Porter, A., Smullen, R.P., Sargent, J.R. J. 2002. Substituting Fish Oil with Crude Palm Oil in the Diet of Atlantic Salmon (Salmo salar) Affects Muscle Fatty Acid Composition and Hepatic Fatty Acid Metabolism. Nutr. 132(2): 222-230.

[5] Rahmadi, A., Agustin, S., Rohmah, M. 2014. Laporan Hasil Penelitian Unggulan PTN/PTS Kalimantan Timur: Produk Olahan Emulsi Labu dan Minyak Sawit untuk Intervensi Balita Kurang Vitamin A di Kalimantan Timur. Universitas Mulawarman dan Balitbangda Prop. Kaltim, 2014.

[6] Tang, Guangwen. 2010. Bioconversion of Dietary Provitamin A Carotenoids to Vitamin A in Humans. Am J Clin Nutr 2010;91(suppl):1468S–73S.

[7] Jaswir, I., Noviendri, D., Hasrini, R. F., dan Octavianti F.. 2011. Carotenoids : Sources, Medicinal Properties and Their application in Food and Nutraceutical Industry. Journal of Medicinal Plants Research Vol. 5 (33), pp. 7119-7131, 31 December, 2011.

[8] Groeber, U. 2013. Mikronutrien: Penyelarasan Metabolik, Pencegahan, dan Terapi. Penerbit Buku Kedokteran EGC, Jakarta.

[9] Lean, M. E. J. 2013. Ilmu Pangan, Gizi dan Kesehatan Edisi ke-7. Pustaka Pelajar. Yogyakarta.

[10] Almatsier, S. 2006. Prinsip Dasar Ilmu Gizi. PT. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.

[11] Rahmadi, A. 2013. Establishment of High Content Co-culture Screening for Anti-Inflammatory Drugs in Alzheimer's Disease. Disertasi S3. University of Western Sydney, Campbelltown, Australia.

[12] Ayustaningwarno, F. 2012. Proses Pengolahan dan Aplikasi Minyak Sawit Merah pada Industri Pangan. Vitasphere, volume II, Agustus 2012, hal. 1-11.

[13] Hannoufa, A., Hossain, Z. 2011. Carotenoid biosynthesis and regulation in plants. Plant Lipid Biochemistry. The AOCS Lipid Library. [Diakses tanggal: 26 September 2014]. http://lipidlibrary.aocs.org/plantbio/carotenoids/index.htm

[14] Norman, S.M. 1991. β-carotene from the abscisic acid producing strain of Cercospora rosicola. Plant Growth Regulation 10: 103-108.

[15] Santosa, H., Kusumayanti, H. 2012. Likuifasi Enzimatik β-karoten Sebagai Functional Food yang Terdapat Dalam Pomace Dari Buah Labu Kuning (Cucurbitae moschata). TEKNIK – Vol. 33 No.2, ISSN 0852-1697

[16] Schoefs, B. 2002. Chlorophyll and carotenoid analysis in food products: Properties of the pigments and methods of analysis. Trends in Food Science dan Technology 13: 361–371.

[17] Jacobo-Valenzuela, N., Zazueta-Morales J.D.J., Gallegos-Infante, .A., Aguilar-Gutierrez, J., Camacho-Hernández, I.L., Rocha-Guzman, N.L., Gonzalez-Laredo, R.F. 2011. Chemical and Physicochemical Characterization of Winter Squash (Cucurbita moschata D.) Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca 39(1): 34-40.

[18] Gajewski, M., Radzanowska, J., Danilcenko, H., Jariene, E., Cerniauskiene, J. 2008. Quality of Pumpkin Cultivars In Relation To Sensory Characteristics. Not. Bot. Hort. Agrobot. Cluj 36 (1): 73-79.

[19] Wijayakusuma, M. H. 2005. Penyembuhan dengan Labu Parang. Pustaka Populer Obor. Jakarta.

[20] Trubus. 2013. 100 Plus Herbal Indonesia Bukti Ilmiah dan Racikan. Trubus vol. 11. Jakarta.

[21] Ramadhani, G. A., Izzati, M., dan Parman, S.. 2012. Analisis Proximat, Antioksidan dan Kesukaan Sereal Makanan Dari Bahan Dasar Tepung Jagung (Zea mays L.) Dan Tepung Labu Kuning (Cucurbita moschata Durch). Buletin Anatomi dan Fisiologi Volume XX, Nomor 2, Oktober2012.

[22] Sirait, K.E.E. 2007. Kinetika Adsorpsi Isotermal B-Karoten Olein Sawit Kasar dengan Menggunakan Atapulgit. Skripsi. Fateta, IPB. [Diakses tanggal: 20 Mei 2014] http://repository.ipb.ac.id/xmlui/bitstream/handle/123456789/11778/F07kee.pdf.

[23] Rossi, M., Gianazza, M., Alamprese, C., Stanga, F. 2001. The effect of bleaching and physical refining on color and minor components of palm oil. Journal of the American Oil Chemists' Society 78(10): 1051-1055.

[24] Ng, J.H., Tan, B. 1988. Analysis of Palm Oil Carotenoids by HPLC with Diode-Array Detection. J Chromatogr Sci (1988) 26 (9): 463-469.

[25] Batistella, C.B., Moraes, E.B., Maciel Filho, R., Wolf Maciel, M.R. 2002. Molecular Distillation Process for Recovering Biodiesel and Carotenoids from Palm Oil. Applied Biochemistry and Biotechnology 2002: 1149-1159.

[26] Syahputra, M. R., Karwur, F. F., Limantara, L.. 2008. Analisis Komposisi dan Kandungan Karotenoid Total dan Vitamin A Fraksi Cair dan Padat Minyak Sawit Kasar (CPO) Menggunakan KCKT Detektor PDA. Jurnal Natur Indonesia 10 (2), April 2008: 89-97

[27] Basiron, Y., dan Weng, C. K.. 2004. The Oil Palm and Its Sustainability. Journal of Oil Palm Research Vol. 16 No. 1, June 2004, p. 1-10

[28] Canfield, L.M., Kaminsky, R.G., Taren, D.L., Shaw, E., Sander, J.K. 2001. Red palm oil in the maternal diet increases provitamin A carotenoids in breastmilk and serum of the mother-infant dyad. European Journal of Nutrition 40(1): 30-38.

[29] Edem, D.O. 2002. Palm oil: Biochemical, physiological, nutritional, hematological and toxicological aspects: A review. Plant Foods for Human Nutrition 57(3-4): 319-341.

[30] Samba C, Tchibindat F, Houze P, Gourmel B, Malvy D. 2006. Prevalence of infant Vitamin A deficiency and undernutrition in the Republic of Congo. Acta Trop. 97(3):270-83.

[31] Bloem, M.W., Wedel, M., van Agtmaal, E.J., Speek, A.J., Saowakontha, S. Schreurs, W.H.P. 1990. Vitamin A intervention: short-term effects of a single, oral, massive dose on iron metabolism. Am J Clin Nutr 5l:76-9.

[32] WHO. 2009. Global Prevalence of Vitamin A Deficiency in Populations at Risk: WHO global database on vitamin A deficiency, WHO, Geneva.

[33] Otten J.J., Hellwig J.P., Meyers L.D., eds. 2006. Dietary Reference Intakes: The Essential Guide to Nutrient Requirements, The National Academies Press, Washington DC.

[34] Asfianti, F., Nazir, H. M., Husin, S., dan Theodorus. 2013. Pengaruh Suplementasi Seng dan Vitamin A Terhadap Kejadian ISPA dan Diare pada Anak. Sari Pediatri, Vol. 15, No. 2, Agustus 2013.

[35] Institute of Medicine. 2001. Food and Nutrition Board. Dietary Reference Intakes for Vitamin A, Vitamin K, Arsenic, Boron, Chromium, Copper, Iodine, Iron, Manganese, Molybdenum, Nickel, Silicon, Vanadium, and Zinc. National Academy Press, Washington DC.

[36] Solomons NW. Vitamin A. In: Bowman B, Russell R, eds. Present Knowledge in Nutrition. 9th ed. Washington, DC: International Life Sciences Institute; 2006:157-83.

[37] Siahaan D, Sinaga J, dan Tumanggor A. 2003. Pengembangan Deodorizer dan Proses Deodorisasi Skala Bench Berbahan Baku Olein Sawit Kasar. Jurnal Penelitian Kelapa Sawit Medan 11(2): 95-106.

[38] Rismawati. 2009. Pengaruh Waktu Deodorisasi Terhadap Olein dan Stearin Minyak Sawit Merah serta Aplikasinya Sebagai Medium Penggorengan Tempe dan Ubi Jalar Putih. Skripsi. Departemen Ilmu dan Teknologi Pangan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Bogor.

[39] Rahmadi, A., Abdiah, A., Sukarno, M.D., Ningsih, T.P. 2013. Karakteristik Fisikokimia dan Antibakteri Virgin Coconut Oil Hasil Fermentasi Bakteri Asam Laktat. Jurnal Teknologi dan Industri Pangan 24(2): 178-183.

[40] Bononi, M., Commissati, I., Lubian, E., Fossati, A. 2002. A simplified method for the HPLC resolution of α-caroten and β-caroten (trans and cis) isomers. Short Communication. Anal. Bioanal. Chem. 372: 401-403. DOI: 10.1007/s00216-001-1144-3.

[41] USDA. 2014. Nutrient data for: 0405 - Oil, palm and 11422 - Pumpkin, raw. USDA National Nutrient Database for Standard Reference 27 Software v.2.0b http://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/

SYNTHETIC SCAFFOLD SYSTEM SEBAGAI SOLUSI UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI PROSES PRODUKSI SENYAWA KIMIA BERNILAI TINGGI MENGGUNAKAN MIKROORGANISME

Almando Geraldi*

*Department of Biological Sciences, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, South Korea

ABSTRAK

Pendekatan rekayasa metabolisme (*metabolic engineering*) memungkinkan produksi senyawa kimia bernilai tinggi menggunakan mikroorganisme secara lebih cepat, ekonomis, dan ramah lingkungan. Dalam aplikasinya, seringkali dijumpai tantangan berupa rendahnya efisiensi reaksi biokimia dalam mengonversi bahan baku menjadi senyawa kimia berharga. Salah satu solusi permasalahan tersebut adalah dengan merancang *Synthetic scaffold system. Synthetic scaffold system* memiliki kemampuan untuk memastikan enzim-enzim yang terlibat dalam suatu reaksi kimia spesifik yang diinginkan berada pada jarak yang berdekatan sehingga reaksi kimia tersebut dapat berjalan secara efisien. Dalam artikel ini akan dipaparkan jenis-jenis *synthetic scaffold system* beserta kelebihan dan kekurangan masing-masing.

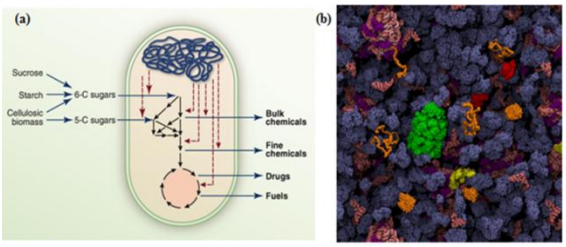
Kata kunci: *metabolic engineering; DNA scaffolds; protein scaffolds; RNA scaffolds; synthetic biology.*

A. PENDAHULUAN

Sistem biologis, dengan fleksibilitas dan keanekaragamannya, merupakan suatu solusi ideal untuk memecahkan permasalahan-permasalahan penting dalam kehidupan sehari-hari; antara lain dalam proses konversi bahan baku murah dan terbarukan (biomassa) menjadi senyawa kimia kompleks berenergi tinggi, produksi obat-obatan murah untuk penyakit-penyakit mematikan dan bioremediasi pada daerah tercemar limbah berbahaya. Solusi tersebut hadir dengan lahirnya bidang ilmu *metabolic engineering* yang dapat didefinisikan sebagai optimisasi faktor genetik dan regulasi metabolisme pada sel, terutama sel mikroorganisme, untuk meningkatkan kemampuannya dalam memproduksi suatu senyawa kimia yang dikehendaki (Lee *et al* [1], Na *et al* [2]) (Gambar 1(a)). Dalam *metabolic engineering*, rekayasa dilakukan pada tingkatan *chemical network* dalam sel yang terdiri dari rangkaian reaksi biokimia dan enzim-enzim yang diperlukan untuk konversi bahan baku menjadi senyawa kimia yang diharapkan. Pada prosesnya, *chemical network* tersebut dimodelkan terlebih dahulu dalam persamaan matematika, kemudian dilakukan penghitungan jumlah produk yang dapat dihasilkan, dan dilakukan modifikasi pada reaksi biokimia maupun enzim yang menghambat proses produksi untuk meningkatkan hasil senyawa kimia yang diharapkan (Nielsen dan Keasling [3]).

Sejak kemunculannya pada awal 1990-an, *metabolic engineering* telah merevolusi sistem produksi senyawa kimia dari yang sebelumnya menggunakan bahan baku yang mahal dan tersedia dalam jumlah terbatas di alam, seperti minyak bumi,

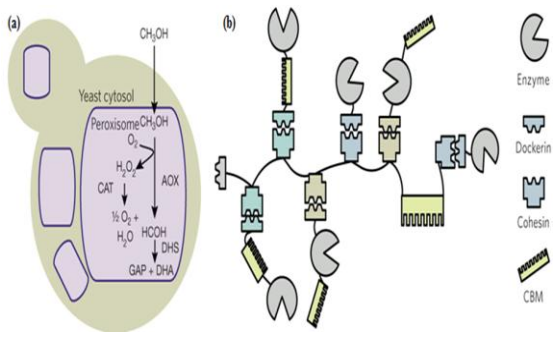
menjadi bahan baku yang mudah diperoleh, murah, dan terbarukan, seperti gula dan limbah industri (Keasling [4]). Sebagai contoh adalah proses produksi asam amino, vitamin, esens, dan wewangian yang pada awalnya memerlukan proses kimia yang rumit dan memerlukan biaya produksi yang tinggi, saat ini dapat diproduksi secara ekonomis dengan sistem produksi biologis menggunakan pendekatan *metabolic engineering* (Sun dan Alper [5]). Contoh lain adalah proses produksi bahan pelarut dan polimer, dimana pendekatan *metabolic engineering* memberikan solusi yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan karena senyawa-senyawa kimia tersebut diproduksi dari glukosa dengan menggunakan sistem biologis dan tidak menggunakan senyawa turunan minyak bumi seperti yang dilakukan pada proses kimia (Curran dan Alper [6]).



Gambar 1. (a) Ilustrasi mengenai *metabolic engineering*. Enzim-enzim (panah merah) di dalam sel mikroorganisme membantu konversi bahan mentah berupa gula maupun selulosa menjadi senyawa kimia bernilai tinggi (Keasling [4]). (b) Permasalahan dalam aplikasi *metabolic engineering*. Enzim-enzim yang digunakan dalam reaksi (ditunjukkan dengan warna jingga) tersebar secara acak di sitoplasma yang penuh dengan molekul-molekul lain (Gershenson dan Gierasch [7]).

Dalam rekayasa mikroorganisme untuk menghasilkan suatu senyawa kimia spesifik dengan pendekatan *metabolic engineering* seringkali dijumpai tantangan berupa ketidakefisienan rangkaian reaksi-reaksi biokimia dalam mengonversi bahan baku menjadi produk yang diinginkan. Hal tersebut umumnya disebabkan ketidakseimbangan *flux* (aliran) dari reaksi-reaksi biokimia, pembentukan produk sampingan, dan akumulasi senyawa intermediet beracun yang dapat mempengaruhi viabilitas (kelangsungan hidup) mikroorganisme yang digunakan dalam proses produksi (Chen dan Silver [8], Polka dan Silver [9]). Enzim-enzim yang dihasilkan oleh mikroorganisme untuk mengatalisis reaksi-reaksi metabolisme terkait diekspresikan secara acak dan tersebar di sitoplasma mikroorganisme, sehingga rangkaian reaksi-reaksi kimia yang diharapkan menjadi tidak efisien (Gambar 1(b)).

Pada hakikatnya enzim-enzim yang diperlukan dalam proses metabolisme alami untuk mendukung kehidupan sel, juga terletak berjauhan di dalam sel, namun alam memiliki mekanisme tersendiri untuk mengatasi masalah tersebut (Agapakis *et al* [10]). Mekanisme yang umum ditemui dalam sel adalah pengaturan jarak antar enzim yang bertujuan meningkatkan efisiensi transfer senyawa intermediet antar enzim. Pengaturan jarak tersebut dapat dicapai dengan melokalisir sekelompok enzim dalam suatu organel maupun kompartemen khusus, maupun melalui pembentukan suatu kompleks enzim (Boyle dan Silver [11], Lee *et al* [12]).



Gambar 2. (a) Ilustrasi pengelompokkan enzim-enzim yang terlibat dalam metabolisme methanol dalam satu kompartemen pada *P. pastoris*. (b) Ilustrasi *cellulosome*, *dockerin* berfungsi sebagai ligan sedangkan *cohesin* berfungsi sebagai *protein scaffolds* yang melokalisir enzim-enzim yang terlibat dalam metabolisme selulosa dan *carbohydrate binding module* (CBM). (Agapakis *et al* [10]).

Pengelompokkan enzim dalam satu kompartemen dapat ditemui pada ragi *Pichia pastoris* yang mampu hidup dalam media yang mengandung methanol dan menggunakannya sebagai sumber energi (Gambar 2(a)). Enzim-enzim yang terlibat dalam metabolisme methanol dilokalisir dalam suatu organel yaitu peroksisom, sehingga intermediet beracun berupa formaldehid (HCOH) dan hidrogen peroksida (H_2O_2) tidak lepas ke sitoplasma dan membunuh sel (van der Klei *et al* [13]). Tak hanya di organisme eukariot seperti ragi, pengelompokkan enzim juga ditemukan pada prokariot yaitu *cyanobacteria Synechococcus elongatus* PCC 7942 dan bakteri pathogen *Salmonella* sp. Kompartemen pada *S. elongatus* yang disebut *carboxysomes* berfungsi melokalisasi enzim-enzim yang berperan dalam proses fiksasi karbon, sedangkan pada *Salmonella* kompartemen berfungsi untuk melokalisir proses metabolisme 1,2-propanediol agar senyawa intermediet beracun propionaldehid tidak terekspos ke sitoplasma (Agapakis *et al* [10], Kerfeld *et al* [14]).

Optimasi jarak antar enzim juga dilakukan melalui pembentukan suatu kompleks enzim maupun lokalisasi enzim-enzim dalam suatu *scaffolds*. Strategi ini biasanya ditemui pada suatu proses kimia untuk memproduksi atau memecah suatu senyawa yang sangat kompleks dan berukuran besar yang tidak dapat ditampung dalam suatu kompartemen seperti yang telah dipaparkan sebelumnya. Contoh yang paling populer adalah enzim-enzim yang terlibat dalam proses metabolisme selulosa atau *cellulosome* dari bakteri anaerobik *Clostridium thermocellum* (Fontes dan Gilbert [15]). *Cellulosome* terdiri dari enzim-enzim yang terlibat dalam proses metabolisme selulosa, protein-protein yang berfungsi mengikat selulosa, dan protein-protein non katalitik yang berfungsi sebagai rangka (*protein scaffolds*) (gambar 2(b)). Dalam *cellulosome*, *protein scaffolds* berfungsi melokalisir enzim-enzim pemecah selulosa sehingga saling berdekatan satu sama lain, selain itu *protein scaffolds* juga berfungsi melokalisir protein-protein yang berfungsi mengikat selulosa untuk mempercepat transfer selulosa kepada enzim-enzim pemecah selulosa.

Terinspirasi dari sistem-sistem alami tersebut dan menggunakan pendekatan salah satu ilmu pendukung *metabolic engineering* yaitu *synthetic biology*, struktur *scaffolds* sintetis telah berhasil dibangun dan dikembangkan, tidak hanya menggunakan rangka dasar protein seperti yang ditemui pada *cellulosome*, namun juga DNA (*deoxyribonucleic acid*), dan RNA (*ribonucleic acid*) (Chen *et al* [16]). Penggunaan struktur *scaffolds* sintetis tersebut berhasil meningkatkan *yield* (rendemen reaksi) dari berbagai *metabolic*

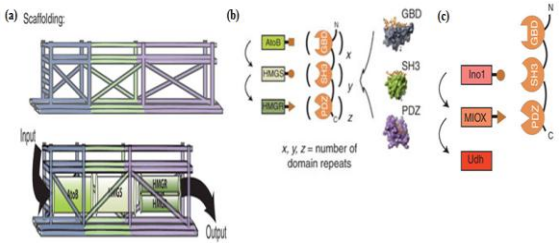
pathways (jalur reaksi metabolik) (Keasling [4]). Dalam artikel ini akan dijelaskan deskripsi dari masing-masing struktur *scaffolds* sintetis dan aplikasinya, serta potensi Indonesia dalam pengembangan struktur *scaffolds* sintetis yang andal untuk digunakan dalam skala industri.

B. MENINGKATKAN YIELD REAKSI METABOLIK MENGGUNAKAN STRUKTUR *SCAFFOLDS* SINTETIS

1. Protein *Scaffold System*

Struktur *scaffolds* sintetis yang pertama dikembangkan adalah *protein scaffold system* oleh Dueber dan kolega [17]. *Protein scaffold system* dikembangkan dari *scaffold system* pada *cellulosome* yang menggunakan *dockerin* dan *cohesin* untuk melokalisir enzim pemecah selulosa. Jalur produksi senyawa kimia bernilai tinggi yaitu, *mevalonate* yang merupakan prekursor bagi senyawa-senyawa isoprenoid yang dapat diolah lebih lanjut menjadi *biofuel* seperti *farnese* dan *bisabolene*, karet sintetik, maupun obat-obatan seperti obat anti malaria *artemisinin* (Peralta-Yahya *et al* [18]) dan asam glukarat yang merupakan prekursor bagi polimer-polimer seperti nilon dan polyester, digunakan sebagai model untuk membuktikan keefektifan penggunaan *protein scaffolds* untuk meningkatkan produksi suatu senyawa kimia bernilai tinggi dalam bakteri *Escherichia coli* (*E. col*.).

Garis besar desain dari *protein scaffold system* yang dikembangkan oleh Dueber dan kolega [17] adalah menggabungkan enzim-enzim yang terlibat dalam sintesis *mevalonate* dan asam glukarat dengan ligan yang akan berinteraksi dengan *protein scaffolds* (SH3, PDZ, dan GBD), sehingga enzim-enzim tersebut dapat dilokalisir pada suatu struktur rangka yang terdiri dari ketiga *protein scaffolds* tersebut (Gambar 3(b)). Tiga enzim yang terlibat dalam produksi mevalonate, *acetoacetyl-CoA thiolase* (AtoB) yang berasal dari *E. coli*, serta *hydroxy-methylglutaryl-CoA synthase* (HMGS), dan *hydroxymethylglutarylCoA reductase* (HMGR) yang berasal dari ragi tape *Saccharomyces cerevisae* digunakan dalam penelitian ini. AtoB digabungkan dengan ligan dari GBD (GTPase *binding domain* dari *actin polymerization switch N-WASP*), HMGS dengan ligan dari SH3 (*SRC Homology 3 domain*), dan HMGR dengan ligan dari PDZ (PSD95/DlgA/Zo-1 *domain* dari protein adaptor *syntrophin*) (Gambar 3(b)). Ketiga enzim tersebut akan terlokalisir dalam struktur *scaffolds* sehingga terletak berdekatan satu sama lain dan berurutan sesuai dengan urutan reaksi kimia yang dikatalisis oleh enzim-enxim tersebut sehingga menyebabkan transfer senyawa intermediet antar enzim dapat berlangsung dengan lebih cepat. Dengan *protein scaffold system*, produksi *mevalonate* meningkatk 77 kali lipat dibandingkan dengan produksi tanpa *protein scaffold system* (Dueber *et al* [17]). Peningkatan produksi juga ditemui pada aplikasi *protein scaffold system* pada jalur sintesis asam glukarat. Dua enzim yang terlibat dalam sintesis asam glukarat, *myo-inositol-1-phosphate synthase* (Ino1) dan *myo-inositol oxygenase* (MIOX), dilokalisir dalam struktur *scaffold*, setelah sebelumnya digabungkan dengan ligan dari SH3 dan PDZ (Gambar 3(c)). Sebagai hasilnya, penggunaan *protein scaffold system* meningkatkan produksi asam glukarat 4 kali lipat dibandingkan dengan produksi tanpa *scaffolds* (Dueber *et al* [17]).



Gambar 3. (a) Ilustrasi prinsip *scaffold system*, di mana struktur *scaffolds* berfungsi menempatkan enzim-enzim yang terlibat dalam suatu reaksi berdekatan satu sama lain. Dueber *et al* [17] mengaplikasikan protein *scaffold system* untuk melokalisir enzim-enzim yang terlibat dalam produksi *mevalonate* (b) dan asam glukarat (c).

Kelompok peneliti dari Korea Selatan juga menggunakan sistem yang dikembangkan oleh Dueber dan kolega untuk meningkatkan produksi *butyrate* yang berperan dalam industri makanan, plastik, dan farmasi. Dalam penelitian ini 3 enzim yang terlibat dalam produksi *butyrate* yaitu *3-hydroxybutyryl-CoA dehydrogenase* (Hbd), *3-hydroxybutyryl-CoA dehydratase* (Crt), dan *trans-enoyl-coenzyme A reductase* (Ter) dilokalisir dalam *scaffolds*. Hbd digabungkan dengan ligan dari GBD, Crt dengan ligan dari SH3, dan Ter dengan ligan dari PDZ (Baek *et al* [19]). Sebagai hasilnya diperoleh peningkatan produksi *butyrate* sebesar 3 kali lipat dibandingkan dengan produksi tanpa *scaffolds* (Baek *et al* [19]).

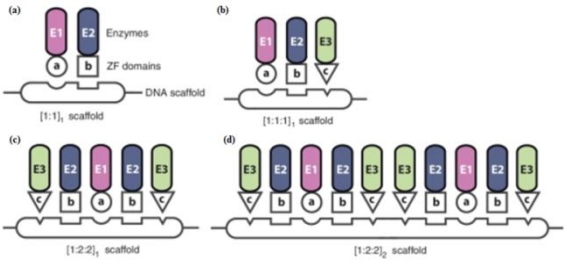
Aplikasi *protein scaffold system* terbukti meningkatkan output dari *metabolic pathways*. Fenomena tersebut terutama disebabkan karena transfer senyawa intermediet antar enzim dapat berlangsung secara efisien dan jumlah senyawa intermediet yang lepas dapat diminimalisir di dalam *scaffolds* karena jarak antar enzim yang berdekatan, sehingga efisiensi konversi dari substrat ke produk yang dikehendaki dapat dimaksimalkan. *Protein scaffold system* juga memiliki kelebihan lain yaitu strukturnya yang modular, dapat dimodifikasi dengan mudah untuk meningkatkan efektifitasnya. Jumlah masing-masing *scaffolding proteins* dalam *scaffolds* dapat diubah untuk menyesuaikan rasio jumlah enzim-enzim yang yang akan terikat pada *scaffolds* (Chen *et al* [16], Yadav *et al* [20]). Hal tersebut sangat bermanfaat karena masing-masing enzim memiliki laju reaksi yang berbeda-beda. Pengaturan jumlah enzim akan mencegah terhambatnya reaksi pada suatu titik dan meningkatkan laju reaksi secara keseluruhan.

Dengan keefektifan dan fleksibilitasnya, *protein scaffold system* memiliki potensi yang besar untuk meningkatkan output dari berbagai reaksi kimia. Dalam pengembangannya terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan karena dapat mengganggu kinerja enzim-enzim dalam *scaffolds*. Yang pertama adalah pengaturan jarak antar enzim; jika jarak antar enzim terlalu dekat, transfer senyawa intermediet tidak dapat berjalan dengan baik karena kemungkinan sisi aktif suatu enzim yang menerima substrat tertutup oleh enzim lainnya; sebaliknya jika jarak antar enzim terlalu jauh, peluang senyawa intermediet untuk lepas akan semakin besar dan mengurangi efisiensi reaksi secara keseluruhan. Terkait hal ini, studi mengenai struktur enzim-enzim yang digunakan dalam *scaffolds* amat diperlukan, sehingga dapat didesain suatu *scaffolds* di mana enzim-enzim yang terikat padanya memiliki sisi aktif yang terekspos dan saling berdekatan untuk menjamin transfer intermediet antar enzim yang efisien. Salah satu solusi yang dapat dilakukan adalah melalui pengaturan panjang dari *linker* (asam amino penghubung) antara enzim dan ligan serta *linker* antara *scaffolding*

proteins yang satu dengan lainnya pada struktur *scaffolds*, sehingga jarak antar enzim dan posisi enzim yang optimal dalam *scaffolds* dapat dicapai. Hal yang perlu diperhatikan selanjutnya adalah kespesifikan *scaffolding proteins* dan ligan yang digunakan dalam *protein scaffold system*. *Scaffolding proteins* dan ligan yang digunakan harus berinteraksi satu sama lain secara eksklusif. Jika ligan ataupun *scaffolding proteins* dapat berinteraksi dengan protein lain dalam sel tempat reaksi berlangsung, maka terdapat kompetisi yang mengganggu interaksi eksklusif antara ligan dan *scaffolding proteins* dan akan mengurangi efektifitas kinerja sistem secara keseluruhan. Pemilihan dan seleksi ligan dan *scaffolding proteins* adalah langkah yang sangat penting dalam konstruksi *protein scaffold system*. Seperti yang ditunjukkan oleh Dueber dan kolega [17], dalam konstruksi *protein scaffold system* yang akan digunakan dalam sel bakteri *E. coli*, digunakan ligan dan *scaffolding proteins* yang berasal dari hewan (tikus dan mencit) yang memiliki kemungkinan kecil berinteraksi dengan protein-protein yang terdapat dalam sel *E. coli*.

2. DNA *Scaffold System*

Terlepas dari keefektifannya meningkatkan output reaksi kimia, *protein scaffold system* memiliki keterbatasan dalam jumlah enzim yang dapat dilokalisir, terlalu banyak enzim akan menyebabkan struktur *scaffolds* menjadi terlalu besar dan sulit diproduksi di dalam sel inang seperti bakteri dan ragi. Oleh karena itu, telah dikembangkan *scaffolds* dari makromolekul yang lebih stabil yaitu DNA (Conrado *et al* [21]). Pemilihan DNA sebagai *scaffolds* memiliki berbagai kelebihan: DNA memiliki struktur yang stabil dan mudah diprediksi dan memberikan fleksibilitas yang tinggi untuk mengatur jumlah enzim dan jarak antar enzim yang akan dilokalisir pada *scaffolds* (Conrado *et al* [21]). Fleksibilitas DNA sebagai *scaffolds* juga didukung dengan banyaknya *DNA binding proteins* di alam yang dapat digunakan sebagai ligan untuk melokalisir enzim-enzim yang dikehendaki pada struktur DNA. *DNA binding proteins* yang umum digunakan adalah *zinc finger proteins* yang berinteraksi dengan DNA pada suatu urutan DNA tertentu secara spesifik. Hal ini sangat menguntungkan, karena rasio dan jarak antar enzim pada *scaffolds* dapat diatur dengan mengubah urutan DNA.



Gambar 4. Ilustrasi *DNA scaffold system* dalam melokalisir dua (a) dan tiga (b) enzim yang telah digabungkan dengan *zinc finger proteins* (ZF). Pengaturan rasio antar enzim dalam *DNA scaffold system* digambarkan dalam (c), sedangkan pengaturan rasio dan jumlah enzim digambarkan dalam (d) (Conrado *et al* [21]).

Keefektifan *DNA scaffold system* dalam meningkatkan output dari suatu reaksi kimia telah dilaporkan oleh Conrado [21] dan Lee beserta kolega (Chen, *et al* [16]). Dalam kedua laporan tersebut, *plasmid* (DNA berbentuk sirkular) digunakan sebagai *scaffolds* untuk melokalisir enzim-enzim yang terlibat dalam reaksi (Gambar 4 (a) dan (b)). Plasmid tersebut memiliki urutan DNA tertentu yang akan dikenali dan berinteraksi dengan *zinc finger proteins* yang

digabungkan pada enzim-enzim yang terlibat dalam jalur sintesis *mevalonate*, *resveratrol*, *1,2-propadienol*, dan asam amino *threonine*. Seperti yang ditunjukkan dengan *protein scaffolds system*, penerapan *DNA scaffolds system* berhasil meningkatkan produksi *mevalonate*, sebanyak tiga kali lipat dibandingkan dengan produksi tanpa *scaffolds*. Dalam eksperimen tersebut, *acetoacetyl-CoA thiolase* (AtoB) yang berasal dari *E. coli* serta *hydroxy-methylglutaryl-CoA synthase* (HMGS) dan *hydroxymethylglutarylCoA reductase* (HMGR) yang berperan dalam konversi *acetyl-CoA* menjadi *mevalonate* digabungkan dengan *zinc finger proteins*, kemudian diekspresikan di sel *E. coli* yang telah mengandung struktur *scaffolds* berupa *plasmid DNA* dengan urutan yang dikenali oleh *zinc finger proteins*. Aplikasi *DNA scaffold system* juga terbukti efektif meningkatkan output dari jalur sintesis lain seperti konversi asam koumarat menjadi *resveratrol* yang dikatalisis *4-coumarate:CoA ligase* (4CL) dan *stilbene synthase* (STS), konversi *dihydroxyacetone phosphate* (DHAP) menjadi *1,2 propadienol* yang dikatalisis *methylglyoxal synthase* (MgsA), *2,5-diketo-D-gluconic acid reductase* (DkgA) dan *glyceroldehydrogenase* (GldA), serta konversi *aspartate semialdehyde* menjadi *threonine* yang dikatalisis *homoserine dehydrogenas*e (HDH), *homoserine kinase* (HK), dan *threonine synthase* (TS). Sebagai hasilnya, peningkatan produksi *resveratrol* sebesar 5 kali lipat, *1,2 propadienol* sebesar 4-5 kali lipat, dan *threonine* sebesar 3 kali lipat dibandingkan dengan produksi tanpa *scaffolds* dapat diraih (Conrado *et al* [21]).

Hasil penelitian yang dipaparkan di atas membuktikan kelebihan *DNA scaffold system* dalam meningkatkan output berbagai reaksi kimia dengan enzim-enzim yang berbeda ukuran dan strukturnya. Faktor utama yang menunjang hal tersebut adalah fleksibilitas desain dari urutan *DNA plasmid* yang digunakan sebagai *scaffolds*. Dengan memodifikasi urutan *DNA plasmid*, jumlah dan rasio enzim yang terikat pada *scaffolds*, serta jarak dan posisi relatif antar enzim dapat diatur dengan mudah. Pengaturan jumlah dan rasio dapat dilakukan dengan menambahkan atau mengubah susunan urutan DNA yang dikenali oleh *zinc finger proteins* (*binding sites*) (Gambar 4 (c) dan (d)). Sedangkan jarak dan posisi relatif antar enzim dapat diatur dengan memodifikasi jumlah pasang basa antar *binding sites*. Jarak dan posisi relatif antar enzim adalah faktor yang menentukan keefektifan transfer senyawa intermediet antar enzim. Sisi aktif satu enzim harus terekspos pada pada sisi aktif enzim berikutnya agar transfer senyawa intermediet dapat berlangsung secara cepat dan efisien. Pentingnya jumlah pasang basa antar *binding sites* ditunjukkan pada kasus produksi *resveratrol* di mana, dengan jumlah enzim dan rasio antar enzim yang sama, jarak antar binding sites sebesar 2 pasang basa meningkatkan produksi sebesar 3 kali lipat dibandingkan jarak 4 pasang basa. Efek dari jumlah pasang basa antar binding sites sendiri terutama terkait dengan struktur DNA yang berbentuk *double helix*, di mana satu putaran *helix* (360°) terjadi setiap 10 pasang basa DNA (setara dengan jarak 3.4 nm). Sebagai gambaran, jika dua *binding site* terpisah sejauh 10 pasang basa, enzim-enzim yang terikat pada *scaffolds* terletak paralel satu sama lain. Penambahan atau pengurangan 1 pasang basa akan mengubah jarak kedua enzim tersebut sebesar 0.34 nm dan mengubah sudut antar enzim sebesar 36°. Pengetahuan mengenai struktur enzim-enzim yang digunakan dapat memberikan

informasi tentang jarak dan sudut optimal antar enzim agar transfer senyawa intermediet dalam reaksi dapat berlangsung secara efisien.

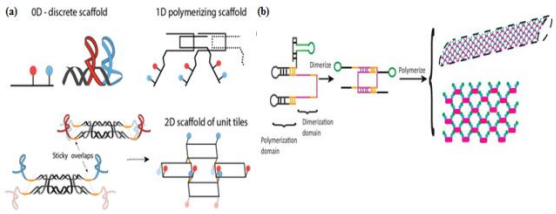
Terakhir namun tak kalah penting adalah pemilihan *zinc finger proteins* sebagai faktor yang menentukan keberhasilan aplikasi *DNA scaffold system*. Faktor ini menentukan apakah enzim-enzim yang digunakan benar-benar terlokalisir di *plasmid DNA* yang berperan sebagai *scaffolds* atau malah terikat pada lokasi lain semisal *genomic DNA* dari sel tempat reaksi berlangsung (misal: *E. coli*). Sebagai gambaran, satu *zinc finger motif* pada protein dapat berinteraksi dengan 3-4 basa DNA dengan urutan tertentu. Spesifitas interaksi *zinc finger proteins* dapat ditingkatkan dengan menambah jumlah basa DNA tempat berinteraksi, yang dapat dilakukan dengan membuat suatu *zinc finger proteins* yang memiliki lebih dari satu *zinc finger motif* sehingga dapat mengenali urutan DNA dengan panjang tertentu (misal: *zinc finger proteins* dengan 4 *zinc finger motif* yang dapat mengenali urutan DNA spesifik sepanjang 12 basa). Analisis bioinformatika dapat dimanfaatkan untuk menentukan urutan DNA yang dikenali oleh *zinc finger proteins* (*binding sites*), dengan membandingkan urutan *genomic DNA* dari sel tempat reaksi berlangsung dengan urutan DNA pada *plasmid* yang digunakan sebagai *scaffolds*, sehingga dapat didesain suatu *binding sites* dengan urutan DNA yang tidak ditemui pada *genomic DNA*.

3. RNA *Scaffold System*

Sistem yang terakhir adalah *RNA scaffold system* yang menawarkan fleksibilitas tertinggi dibandingkan sistem lainnya. Berbeda dengan *protein* dan *DNA scaffold system* di mana enzim-enzim yang digunakan disusun dalam satu bidang linear, *RNA scaffold system* memungkinkan enzim-enzim dilokalisir dalam suatu komplek multidimensi (Jones *et al* [22]). Sebagai gambaran, dalam protein dan *DNA scaffold system* satu enzim hanya berdekatan dengan satu enzim yang terletak di belakang atau depannya, sedangkan dalam *RNA scaffold system* dimungkinkan satu enzim terletak berdekatan dengan enzim lain tidak hanya di depan atau belakangnya namun juga di dan atas atau bawahnya. Hal ini menguntungkan karena efisiensi transfer senyawa intermediet antar enzim dalam reaksi akan semakin tinggi. *RNA scaffold system* terdiri dari unit-unit kecil tempat enzim dilokalisir yang dapat disusun seperti LEGO membentuk struktur yang dikehendaki. Satu unit *scaffolds* terdiri dari *aptamer* (Lingkaran dan pita biru dan merah pada gambar 5 (a)) yang berfungsi mengikat ligan atau *RNA binding proteins* untuk melokalisir enzim dan *polymerization* dan *dimerization domains* (bagian yang berinteraksi dengan unit *scaffolds* lain yang ditunjukkan pada gambar 5 (b)) untuk membentuk suatu struktur kompleks. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 5 (a), satu unit *scaffolds* yang terdiri dari dua *aptamer* dapat melokalisir dua enzim saling berdekatan satu sama lain (0 dimensi). Keberadaan *polymerization* dan *dimerization domains* memungkinkan unit-unit *scaffolds* saling berinteraksi sehingga enzim-enzim dari satu unit terletak bersebelahan dengan enzim-enzim dari unit yang lain secara linear (1 dimensi). Modifikasi dari *polymerization* dan *dimerization domains* memungkinkan enzim-enzim dari satu unit terletak bersebelahan dengan enzim-enzim dari unit yang lain secara linear pada 2 sisi (2 dimensi) dan membentuk suatu struktur

kompleks semisal *nanotube* seperti pada gambar 5 (b) (Chen dan Silver [8]).

Keefektifan *RNA scaffold system* dalam meningkatkan output suatu reaksi kimia berbanding lurus dengan kompleksitas strukturnya. Dalam laporannya, Delebecque *et al* [24] menunjukkan bahwa peningkatan produksi hidrogen sebanyak 48x lipat diperoleh dengan mengaplikasikan *RNA scaffold system* 2 dimensi untuk melokalisir enzim-enzim yang terlibat dalam produksi hidrogen ([FeFe]-*hydrogenase* dan *ferredoxin*) dibandingkan dengan produksi tanpa *scaffolds*, sementara penggunaan *RNA scaffold system* 1 dimensi dan 0 dimensi hanya menunjukkan peningkatan sebesar 11x dan 4x lipat dibandingkan dengan produksi tanpa *scaffolds*. Konsisten dengan hasil tersebut, Sachdeva *et al* [23] menunjukkan bahwa peningkatan produksi pentadekana (salah satu senyawa yang dibutuhkan dalam produksi bahan bakar penerbangan) sebesar 80% dibandingkan dengan produksi tanpa *scaffolds* diperoleh dalam penggunaan *RNA scaffold system* 2 dimensi untuk melokalisir *acyl-ACP reductase* (AAR) dan *aldehyde deformylating oxygenase* (ADO), lebih tinggi dibandingkan penggunaan 1 dan 0 dimensi yaitu sebesar 67% dan 10% dibandingkan dengan produksi tanpa *scaffolds*.



Gambar 5. (a) Ilustrasi kemampuan *RNA scaffold system* membentuk kompleks multi-dimensi (Sachdeva *et al* [23]). (b) Ilustrasi interaksi dimerisasi dan polimerisasi antar unit *RNA scaffold system* untuk membentuk struktur kompleks seperti *nanotube* (Chen dan Silver [8]).

Dalam laporan yang sama juga didemonstrasikan kemampuan *RNA scaffold system* meningkatkan output suatu reaksi kimia dengan melokalisir lebih dari dua enzim. *RNA scaffold system* 2 dimensi dapat digunakan untuk meningkatkan produksi suksinat (salah satu senyawa yang dibutuhkan dalam industri tekstil dan pangan) sebesar 83% dengan melokalisir 3 enzim yang terlibat dalam produksi suksinat dari piruvat yaitu *pyruvate carboxylase* (PYC), *malate dehydrogenase* (MDH) dan *NAD-formate-dehydrogenase* (FDH) dibandingkan dengan produksi tanpa *scaffolds*. Penambahan satu enzim, *carbonic anhydrase* (eCA), pada *RNA scaffold system* 2 dimensi memungkinkan produksi suksinat dari karbon dioksida mengalami peningkatan sebesar 88% dibandingkan dengan produksi tanpa *scaffolds*.

Berdasarkan paparan di atas keefektifan *RNA scaffold system* ditentukan oleh strukturnya, semakin tinggi dimensi suatu *RNA scaffold system* semakin banyak enzim yang dapat dilokalisir, sehingga transfer senyawa intermediet menjadi semakin efisien. Satu unit *scaffolds* yang terdiri dari *aptamer polymerization* dan *dimerization domains* dapat dengan mudah didesain dengan *software* yang mampu memprediksi struktur *scaffolds* yang akan terbentuk dengan memberikan input berupa urutan basa RNA dari unit *scaffolds*. Dalam proses desain ini pula dapat ditentukan bagaimana satu unit *scaffolds* dapat berinteraksi dengan unit lainnya untuk membentuk struktur multi dimensi dengan memodifikasi bagian *polymerization* dan *dimerization domains*. Faktor lain yang tak kalah penting dalam menunjang keefektifan

RNA scaffold system adalah pengaturan jarak dan posisi antar enzim dalam *scaffolds*. Pengaturan jumlah basa di antara dua *aptamer* menentukan jarak antar enzim dalam *scaffolds*, sementara pengaturan panjang struktur batang (*stem*) dari *aptamer* menentukan sudut antar enzim. Perbedaan satu pasang basa pada struktur batang *aptamer* yang satu dengan lainnya akan memberikan perbedaan sudut antar enzim sebesar 32.8^{o} (Sachdeva *et al* [23]). Seperti halnya pada *DNA scaffold system*, pengaturan sudut antar enzim berfungsi untuk membuat sisi aktif antar kedua enzim saling berhadapan sehingga meningkatkan efisiensi transfer senyawa intermediet antar enzim.

Faktor lain yang perlu diperhatikan adalah kemampuan sel inang untuk memproduksi unit *RNA scaffold system* dalam jumlah besar. Dibandingkan dengan unit *DNA scaffold system* yang hanya memiliki jumlah maksimal beberapa ratus kopi di dalam sel, unit *RNA scaffold system* dapat dihasilkan dalam jumlah yang tidak terbatas karena ukurannya yang relatif kecil. Seperti halnya *messenger RNA* yang merupakan RNA alami dalam sel, unit *RNA scaffold system* juga dihasilkan melalui proses transkripsi. Jumlah *output* dalam proses transkripsi tergantung dari promoter dan urutan *ribosome binding site* yang digunakan. Pemilihan promoter kuat seperti T7 dan penggunaan *ribosome binding site* kuat yang dapat didesain menggunakan *softwares* seperti *Ribosome Binding Sites* (RBS) *calculator* oleh Borujeni dan kolega [25] serta 5' *Untranslated Region* (UTR) designer oleh Seo dan kolega [26] akan menjamin dihasilkannya unit-unit *scaffolds* dalam jumlah besar di dalam sel (Delebecque *et al* [27]).

C. POTENSI INDONESIA DALAM PENGEMBANGAN SYNTHETIC SCAFFOLD SYSTEM

Tujuan utama dari pengembangan sistem *scaffolds* adalah untuk meningkatkan produksi senyawa-senyawa kimia berharga yang dihasilkan di sel mikroorganisme dalam skala industri (Lee *et al* [28]). Bioproses dalam skala industri dilakukan pada kondisi fisik yang berbeda jika dibandingkan dengan bioproses dalam skala laboratorium. Pada skala industri, temperatur yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan bioproses skala laboratorium seringkali digunakan untuk meningkatkan laju reaksi, mencegah kontaminasi, dan menghemat energi yang digunakan untuk menurunkan suhu media (Limtong *et al* [29], Babiker *et al* [30]. Namun temperatur tinggi memiliki efek negatif pada makromolekul yang terdapat dalam sel. Denaturasi dan perubahan struktur dapat terjadi pada protein, DNA, RNA, dan makromolekul lainnya apabila terekspos dengan suhu tinggi (Tehei dan Zaccai [31]).

Dalam kaitannya dengan *scaffold system*, temperatur tinggi dapat melemahkan interaksi antara ligan, DNA, atau RNA binding protein dengan struktur *scaffolds*, sehingga mengurangi jumlah enzim yang dapat dilokalisir. Pada kasus yang ekstrem suhu yang tinggi bahkan dapat merusak struktur dasar *scaffolds*. Sehingga dapat disimpulkan, dalam aplikasi *scaffold system* pada bioproses dengan temperatur tinggi, diperlukan makromolekul yang *themostable* (tahan terhadap paparan suhu tinggi).

Solusi dari permasalahan tersebut, ternyata dapat ditemukan jawabannya di alam. Terdapat sekelompok organisme yang mampu hidup di kondisi suhu yang ekstrem seperti sumber air panas, geiser, maupun

hydrothermal vents (retakan di dasar lautan yang secara geothermal memanaskan perairan) di laut dalam yang disebut sebagai organisme thermofilik. Organisme thermofilik yang terutama terdiri dari bakteri dan archaea tersebut memiliki makromolekul dengan struktur khusus yang mampu mempertahankan kestabilannya jika terpapar suhu tinggi (Rothschild dan Mancinelli [32], Tehei *et al* [33], Zeldovich *et al* [34]). Penggunaan *scaffolds* dari makromolekul yang berasal dari organisme-organisme tersebut dapat menjadi solusi dalam aplikasi *scaffold system* pada bioproses dengan suhu tinggi. Terkait hal tersebut, diperlukan eksplorasi makromolekul dari organisme thermofilik. Penelitian mengenai struktur dan perilaku makromolekul thermofilik akan sangat bermanfaat dalam membangun suatu *scaffold system* yang andal dan *thermostable*. Hal yang tak kalah penting adalah melakukan survei keberagaman makromolekul *thermostable* di alam dan mengisolasi makromolekul-makromolekul tersebut. Semakin banyak makromolekul *thermostable* yang diperoleh dan dipelajari, semakin mudah mengonstruksi suatu *scaffold system* karena terdapat berbagai macam pilihan yang dapat disesuaikan dengan enzim yang akan digunakan.

Dalam eksplorasi makromolekul *thermostable*, ilmuwan-ilmuwan Indonesia memiliki kesempatan yang besar untuk memegang peranan utama. Indonesia terkenal akan keanekaragaman hayatinya tak terkecuali keanekaraman organisme thermofilik. Tingginya aktivitas vulkanik di Indonesia menunjukkan banyaknya ekosistem-ekosistem dengan suhu ekstrem yang memiliki potensi ditemukannya berbagai jenis organisme thermofilik. Sejauh ini peneliti-peneliti dari Indonesia telah mempublikasikan hasil penemuannya dalam jurnal-jurnal ilmiah mengenai eksplorasi dan identifikasi organisme termofilik (Baker *et al* [35], Aminin *et al* [36], Aditiawati *et al* [37]). Studi lebih lanjut mengenai makromolekul yang dimiliki oleh organisme-organisme tersebut masih perlu dilakukan. Dengan demikian diharapkan Indonesia dapat menjadi salah satu negara dengan koleksi organisme thermofilik dan makromolekul *thermostable* terbesar. Data-data mengenai organisme dan makromolekul tersebut selanjutnya harus dilindungi dengan hak kekayaan intelektual seperti hak paten. Di masa depan Indonesia dapat diharapkan menjadi sumber "suku cadang" untuk konstruksi suatu *scaffold system* yang andal.

D. KESIMPULAN

Penggunaan *synthetic scaffold system* merupakan strategi yang efektif dalam meningkatkan output suatu reaksi kimia. Penempatan enzim-enzim yang terlibat dalam reaksi dalam *scaffolds* memiliki berbagai kelebihan yaitu: meningkatkan efisiensi transfer senyawa intermediet antar enzim, mencegah senyawa intermediet lepas ke reaksi kimia lain, dan mengisolasi senyawa intermediet beracun sehingga tidak menimbulkan efek negatif pada sel. Terkait desainnya, *scaffold system* memiliki kelebihan jika dibandingkan dengan strategi penyusunan enzim yang lain seperti kompartementalisasi dan pembentukan kompleks enzim, terutama dalam hal fleksibilitas. Jumlah enzim dan posisi antar enzim dapat diatur dengan mudah dengan melakukan modifikasi sederhana pada struktur *scaffolds*.

Sejauh ini terdapat tiga makromolekul yang dapat digunakan sebagai struktur *scaffolds*: protein, DNA, dan RNA. Protein *scaffold* merupakan *scaffold system* yang

pertama dikembangkan. *Scaffold system* ini memiliki kelebihan dalam hal fleksibilitas dalam pengaturan jarak dan posisi antar enzim, namun memiliki keterbatasan dalam jumlah enzim yang dapat dilokalisir pada struktur *scaffolds* sehingga output yang dihasilkan tidak semaksimal seperti yang dapat dicapai oleh *scaffold system* yang lain. Selanjutnya adalah sistem yang menggunakan asam nukleat (DNA dan RNA) sebagai *scaffolds*. *DNA scaffold system* yang menawarkan kemudahan dalam pengaturan jarak dan jumlah enzim dalam *scaffolds*, serta kestabilan struktur scaffold. *RNA scaffold system* memberikan fleksibilitas tertinggi di antara *scaffold system* lainnya dengan kemampuannya membentuk struktur multi dimensi yang mampu melokalisir enzim dalam jumlah besar, namun memiliki kelemahan dalam hal kestabilan.

Terlepas dari kemampuan *synthetic scaffold system* dalam meningkatkan output berbagai *metabolic pathway*, terdapat beberapa tantangan yang harus dihadapi dalam penggunaan sistem tersebut dalam skala industri. Salah satunya adalah pengembangan *synthetic scaffold system* yang mampu bekerja pada kondisi fisik yang digunakan pada industri bioproses seperti suhu tinggi. Terkait hal ini Indonesia dapat memegang peranan penting dengan kekayaan hayatinya yaitu mengembangkan "suku cadang" *thermostable* untuk membangun suatu *synthetic scaffold system* yang mampu berfungsi optimal pada suhu tinggi.

Tantangan lain yang harus dijawab adalah mengenai universalitas dari *synthetic scaffold system*. *Synthetic scaffold system* harus dapat diaplikasikan pada semua *metabolic pathway* untuk menghasilkan senyawa-senyawa kimia berharga tidak hanya terbatas pada apa yang telah didemonstrasikan dalam laporan-laporan ilmiah yang dijelaskan sebelumnya. Untuk menjawab tantangan tersebut, studi mengenai mekanisme kerja *synthetic scaffold system* masih perlu dikembangkan lebih lanjut. Pengetahuan mengenai mekanisme molekuler perekrutan enzim dan transfer senyawa intermediet akan sangat berguna untuk mendesain suatu *synthetic scaffold system* yang optimal sehingga dapat meningkatkan produksi senyawa kimia bernilai tinggi dalam skala industri.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan dari *Korea Advanced Institute of Science and Technology* (KAIST) dan tim *International Genetically Engineered Machine* (iGEM) Institut Teknologi Bandung (ITB) yang terlibat secara aktif dalam diskusi mengenai *metabolic engineering*, *synthetic biology*, dan *synthetic scaffold system* yang dibahas dalam artikel ini. Tak lupa penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada *Indonesian Scholar Journal* atas kesempatan yang diberikan untuk berbagi ide dan pengetahuan kepada rekan-rekan di seluruh Indonesia melalui ISJ Insight.

*korespondensi : almandogeraldi@gmail.com

REFERENSI

[1] J. W. Lee, D. Na, J. M. Park, J. Lee, S. Choi, and S. Y. Lee, "Systems metabolic engineering of microorganisms for natural and non-natural chemicals," *Nature Chemical Biology*, vol. 8, no. 6, pp. 536-546, Jun, 2012.

[2] D. Na, T. Y. Kim, and S. Y. Lee, "Construction and optimization of

synthetic pathways in metabolic engineering," *Current Opinion in Microbiology,* vol. 13, no. 3, pp. 363-370, Jun, 2010.

[3] J. Nielsen, and J. D. Keasling, "Synergies between synthetic biology and metabolic engineering," *Nature Biotechnology,* vol. 29, no. 8, pp. 693-695, Aug, 2011.

[4] J. D. Keasling, "Manufacturing Molecules Through Metabolic Engineering," *Science,* vol. 330, no. 6009, pp. 1355-1358, Dec 3, 2010.

[5] J. Sun, and H. Alper, "Metabolic engineering of strains: from industrial-scale to lab-scale chemical production," *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology,* pp. 1-14, 2014/11/21, 2014.

[6] K. A. Curran, and H. S. Alper, "Expanding the chemical palate of cells by combining systems biology and metabolic engineering," *Metabolic Engineering,* vol. 14, no. 4, pp. 289-297, Jul, 2012.

[7] A. Gershenson, and L. M. Gierasch, "Protein folding in the cell: challenges and progress," *Curr Opin Struct Biol,* vol. 21, no. 1, pp. 32-41, Feb, 2011.

[8] A. H. Chen, and P. A. Silver, "Designing biological compartmentalization," *Trends in Cell Biology,* vol. 22, no. 12, pp. 662-670, Dec, 2012.

[9] J. K. Polka, and P. A. Silver, "Building synthetic cellular organization," *Molecular Biology of the Cell,* vol. 24, no. 23, pp. 3585-3587, Dec 1, 2013.

[10] C. M. Agapakis, P. M. Boyle, and P. A. Silver, "Natural strategies for the spatial optimization of metabolism in synthetic biology," *Nature Chemical Biology,* vol. 8, no. 6, pp. 527-535, Jun, 2012.

[11] P. M. Boyle, and P. A. Silver, "Parts plus pipes: Synthetic biology approaches to metabolic engineering," *Metabolic Engineering,* vol. 14, no. 3, pp. 223-232, May, 2012.

[12] H. Lee, W. C. DeLoache, and J. E. Dueber, "Spatial organization of enzymes for metabolic engineering," *Metabolic Engineering,* vol. 14, no. 3, pp. 242-251, May, 2012.

[13] I. J. van der Klei, H. Yurimoto, Y. Sakai, and M. Veenhuis, "The significance of peroxisomes in methanol metabolism in methylotrophic yeast," *Biochimica Et Biophysica Acta-Molecular Cell Research,* vol. 1763, no. 12, pp. 1453-1462, Dec, 2006.

[14] C. A. Kerfeld, S. Heinhorst, and G. C. Cannon, "Bacterial Microcompartments," *Annual Review of Microbiology, Vol 64, 2010,* vol. 64, pp. 391-408, 2010.

[15] C. M. G. A. Fontes, and H. J. Gilbert, "Cellulosomes: Highly Efficient Nanomachines Designed to Designed to Deconstruct Plant Cell Wall Complex Carbohydrates," *Annual Review of Biochemistry, Vol 79,* vol. 79, pp. 655-681, 2010.

[16] R. Chen, Q. Chen, H. Kim, K. H. Siu, Q. Sun, S. L. Tsai, and W. Chen, "Biomolecular scaffolds for enhanced signaling and catalytic efficiency," *Current Opinion in Biotechnology,* vol. 28, pp. 59-68, Aug, 2014.

[17] J. E. Dueber, G. C. Wu, G. R. Malmirchegini, T. S. Moon, C. J. Petzold, A. V. Ullal, K. L. J. Prather, and J. D. Keasling, "Synthetic protein scaffolds provide modular control

over metabolic flux," *Nature Biotechnology,* vol. 27, no. 8, pp. 753-U107, Aug, 2009.

[18] P. P. Peralta-Yahya, F. Z. Zhang, S. B. del Cardayre, and J. D. Keasling, "Microbial engineering for the production of advanced biofuels," *Nature,* vol. 488, no. 7411, pp. 320-328, Aug 16, 2012.

[19] J. M. Baek, S. Mazumdar, S. W. Lee, M. Y. Jung, J. H. Lim, S. W. Seo, G. Y. Jung, and M. K. Oh, "Butyrate Production in Engineered Escherichia coli With Synthetic Scaffolds," *Biotechnology and Bioengineering,* vol. 110, no. 10, pp. 2790-2794, Oct, 2013.

[20] V. G. Yadav, M. De Mey, C. G. Lim, P. K. Ajikumar, and G. Stephanopoulos, "The future of metabolic engineering and synthetic biology: Towards a systematic practice," *Metabolic Engineering,* vol. 14, no. 3, pp. 233-241, May, 2012.

[21] R. J. Conrado, G. C. Wu, J. T. Boock, H. S. Xu, S. Y. Chen, T. Lebar, J. Turnsek, N. Tomsic, M. Avbelj, R. Gaber, T. Koprivnjak, J. Mori, V. Glavnik, I. Vovk, M. Bencina, V. Hodnik, G. Anderluh, J. E. Dueber, R. Jerala, and M. P. DeLisa, "DNA-guided assembly of biosynthetic pathways promotes improved catalytic efficiency," *Nucleic Acids Research,* vol. 40, no. 4, pp. 1879-1889, Feb, 2012.

[22] J. A. Jones, O. D. Toparlak, and M. A. Koffas, "Metabolic pathway balancing and its role in the production of biofuels and chemicals," *Curr Opin Biotechnol,* vol. 33C, pp. 52-59, Nov 25, 2014.

[23] G. Sachdeva, A. Garg, D. Godding, J. C. Way, and P. A. Silver, "In vivo co-localization of enzymes on RNA scaffolds increases metabolic production in a geometrically dependent manner," *Nucleic Acids Res,* vol. 42, no. 14, pp. 9493-503, 2014.

[24] C. J. Delebecque, A. B. Lindner, P. A. Silver, and F. A. Aldaye, "Organization of intracellular reactions with rationally designed RNA assemblies," *Science,* vol. 333, no. 6041, pp. 470-4, Jul 22, 2011.

[25] A. Espah Borujeni, A. S. Channarasappa, and H. M. Salis, "Translation rate is controlled by coupled trade-offs between site accessibility, selective RNA unfolding and sliding at upstream standby sites," *Nucleic Acids Res,* vol. 42, no. 4, pp. 2646-59, Feb, 2014.

[26] S. W. Seo, J. S. Yang, I. Kim, J. Yang, B. E. Min, S. Kim, and G. Y. Jung, "Predictive design of mRNA translation initiation region to control prokaryotic translation efficiency," *Metab Eng,* vol. 15, pp. 67-74, Jan, 2013.

[27] C. J. Delebecque, P. A. Silver, and A. B. Lindner, "Designing and using RNA scaffolds to assemble proteins in vivo," *Nat Protoc,* vol. 7, no. 10, pp. 1797-807, Oct, 2012.

[28] S. Y. Lee, D. Mattanovich, and A. Villaverde, "Systems metabolic engineering, industrial biotechnology and microbial cell factories," *Microbial Cell Factories,* vol. 11, Dec 11, 2012.

[29] B. A. Abdel-Banat, H. Hoshida, A. Ano, S. Nonklang, and R. Akada, "High-temperature fermentation: how can processes for ethanol production

at high temperatures become superior to the traditional process using mesophilic yeast?," *Applied Microbiology and Biotechnology,* vol. 85, no. 4, pp. 861-867, 2010/01/01, 2010.

[30] S. Limtong, C. Sringiew, and W. Yongmanitchai, "Production of fuel ethanol at high temperature from sugar cane juice by a newly isolated Kluyveromyces marxianus," *Bioresource Technology,* vol. 98, no. 17, pp. 3367-3374, Dec, 2007.

[31] M. Tehei, and G. Zaccai, "Adaptation to extreme environments: Macromolecular dynamics in complex systems," *Biochimica Et Biophysica Acta-General Subjects,* vol. 1724, no. 3, pp. 404-410, Aug 5, 2005.

[32] L. J. Rothschild, and R. L. Mancinelli, "Life in extreme environments," *Nature,* vol. 409, no. 6823, pp. 1092-1101, Feb 22, 2001.

[33] M. Tehei, B. Franzetti, D. Madern, M. Ginzburg, B. Z. Ginzburg, M. T. Giudici-Orticoni, M. Bruschi, and G. Zaccai, "Adaptation to extreme environments: macromolecular dynamics in bacteria compared in vivo by neutron scattering," *Embo Reports,* vol. 5, no. 1, pp. 66-70, Jan, 2004.

[34] K. B. Zeldovich, I. N. Berezovsky, and E. I. Shakhnovich, "Protein and DNA sequence determinants of thermophilic adaptation," *Plos Computational Biology,* vol. 3, no. 1, pp. 62-72, Jan, 2007.

[35] G. C. Baker, S. Gaffar, D. A. Cowan, and A. R. Suharto, "Bacterial community analysis of Indonesian hot springs," *FEMS Microbiol Lett,* vol. 200, no. 1, pp. 103-9, Jun 12, 2001.

[36] A. L. Aminin, F. M. Warganegara, P. Aditiawati, and Akhmaloka, "Simple enrichment and independent cultures to expand bacterial community analysis from Gedongsongo hot spring," *J Biosci Bioeng,* vol. 106, no. 2, pp. 211-4, Aug, 2008.

[37] P. Aditiawati, H. Yohandini, F. Madayanti, and Akhmaloka, "Microbial diversity of acidic hot spring (kawah hujan B) in geothermal field of kamojang area, west java-indonesia," *Open Microbiol J,* vol. 3, pp. 58-66, 2009.

DESAIN SISTEM PEMBELAJARAN BLENDED LEARNING : UPAYA PENINGKATAN KUALITAS PENDIDIKAN DI INDONESIA

Ulfia Rahmi*

*Program Studi Teknologi Pendidikan, Fakultas Ilmu Pendidikan, Universitas Negeri Padang, Indonesia

ABSTRAK

Tujuan penulisan artikel ini adalah untuk menjelaskan pentingnya mendesain sistem pembelajaran *blended learning* dengan mempertimbangkan komponen-komponen pembelajaran. Pentingnya desain sistem pembelajaran dilakukan karena pembelajaran merupakan inti pendidikan, ketika memperbaiki kualitas pendidikan maka tingkatkan kualitas pembelajaran. Desain sistem pembelajaran inilah yang menjadi salah satu upaya dalam meningkatkan kualitas pembelajaran. Pembelajaran saat ini yang sedang digandrungi adalah pembelajaran berbasis teknologi menggunakan internet. Pembelajaran yang menggunakan internet melahirkan sistem pembelajaran yang lebih fleksibel, dapat dilakukan dimana saja dan kapan saja (*online learning*). Namun, di Indonesia belum dapat dilakukan sepenuhnya karena keterbatasan sarana dan sumber daya untuk melakukan *fully online learning*. Perlu mempertahankan pertemuan tatap muka dengan mengombinasikan dengan *online learning* yaitu *blended learning,* sehingga potensi peserta didik dapat dikembangkan. Oleh sebab itu, agar *blended learning* dapat diimplementasikan dibutuhkan desain sistem pembelajaran. Sistem terdiri dari banyak bagian yang saling berhubungan satu dengan yang lainnya. Ketika satu komponen tidak berjalan sesuai perannya maka tujuan dari sistem juga akan terganggu, misalnya tujuan pembelajaran, materi, metode dan media, peserta didik, pendidik dan evaluasi. Komponen pembelajaran inilah yang saling melengkapi dalam mencapai tujuan desain sistem pembelajaran yaitu menciptakan suasana belajar yang kondusif agar peserta didik secara optimal mengembangkan potensi diri. Artinya, desain sistem pembelajaran *blended learning* yang dilakukan adalah mendesain sebuah pembelajaran dengan mempertimbangkan komponen pembelajar, tidak hanya terfokus pada salah satu komponen saja.

Kata kunci: *blended learning, desain, sistem pembelajaran*

A. PENDAHULUAN

Selama ini kita selalu mengeluhkan rendahnya kualitas pendidikan di Indonesia, tidak tersentuhnya setiap warga negara oleh pendidikan dan semakin banyaknya jumlah pengangguran. Beranjak dari isu Depdiknas 2005 untuk meningkatkan pendidikan, perlu dilakukan a) pemerataan dan perluasan, b) peningkatan mutu, relevansi dan daya saing, c) penguatan tata kelola, akuntabilitas dan pencitraan publik. Jika diklasifikasifikaskan menjadi tiga permasalahan besar, Menurut Nanang [1] pendidikan Indonesia pada dasarnya terkover oleh tiga permasalahan yaitu; kualitas, pemerataan dan relevansi. Ketiga permasalahan tersebut saling terkait, ketika fokus memecahkan masalah kualitas, pemerataan dan relevansi cenderung terabaikan, begitu pula sebaiknya. Sehingga, dibutuhkan upaya peningkatan kualitas sumber daya manusia untuk meminimalisir permasalahan-permasalah tersebut. Ternyata, dalam meminimalisir

permasalahan tersebut tidak semudah membalikkan telapak tangan.. Contohnya beberapa tahun yang lalu di Indonesia diselenggarakan pendidikan Sekolah Berstandar Internasional (SBI) untuk meningkatkan mutu pendidikan Indonesia agar mampu bersaing di kancah internasional. Masalah yang muncul saat itu adalah tidak tersebar secara merata sarana dan prasarana di sekolah-sekolah karena terfokus pada SBI. Kritikan yang muncul untuk SBI adalah terjadinya diskriminasi antara si kaya dan si miskin. Orang yang lebih mampu membiayai pendidikan anaknya di SBI lebih berkesempatan mendapatkan layanan pendidikan yang lebih baik. Sedangkan kalangan menengah ke bawah yang terkendala pada biaya terbatas kesempatannya untuk menikmati fasilitas pendidikan seperti yang ada pada SBI. Fasilitas SBI diatur dalam UU nomor 20 tahun 2003 pasal 50 ayat 3 [2] bahwa sarana dan prasarana SBI wajib setiap ruang kelas dilengkapi sarana pembelajaran berbasis TIK, perpustakaan dilengkapi dengan sarana digital, memberikan akses ke sumber pembelajaran berbasis TIK di seluruh dunia, dilengkapi dengan ruang multimedia, ruang unjuk seni dan budaya, fasilitas klinik, fasilitas olahraga dan lain-lain. Namun pada sekolah biasa tidak ada aturan yang mewajibkan sarana minimal. Kelengkapan sarana inilah yang menyebabkan biaya pendidikan pada SBI tinggi, sehingga berdampak pada biaya tambahan yang harus dikeluarkan oleh orang tua.

Sebaliknya, ketika mengupayakan meminimalisir masalah pemerataan, pada saat yang sama juga muncul masalah kualitas. Kita masih ingat bahwa sekolah dasar Inpres dan sekolah Satu Atap diselenggarakan dalam upaya pemerataan pendidikan di Indonesia, agar warna negara yang tinggal di daerah yang sulit dijangkau mendapatkan hak mereka untuk menempuh pendidikan. Upaya pemerataan tersebut patut diberi apresiasi karena ketika upaya tersebut tidak dilakukan maka sampai sekarang barangkali daerah-daerah terpencil dan sulit dijangkau belum memiliki sekolah. Namun di sisi lain, dalam pelaksanaan pendidikan di sekolah dasar Inpres dan sekolah Satu Atap kualitas jangan ditanya. Di sekolah Satu Atap misalnya, berdasarkan survei di SMP satu atap Kecamatan IV Koto Aua Malintang, Kabupaten Padang Pariaman, sekolah terdiri dari sekolah dasar dan sekolah menengah pertama berada pada satu lokasi, ternyata pendidiknya juga satu untuk semua. Terakhir, masalah ketiga adalah relevansi. Keluhan mengenai jumlah pengangguran yang semakin meningkat erat kaitannya dengan relevansi pendidikan yang dilalui oleh peserta didik. Sesungguhnya, permasalahan relevansi ini sudah muncul sejak masa orde baru. Waktu itu diminimalisir dengan program *mix and match* (Tilaar [3]). Program *mix and match* ini sebagai upaya untuk menyelaraskan kompetensi yang dimiliki peserta didik ketika menyelesaikan pendidikan dengan kompetensi yang dibutuhkan di dunia kerja. Program tersebut tidak berjalan maksimal, sehingga sampai sekarang permasalahan relevansi masih betah bertahan sebagai salah satu dari permasalahan pendidikan di Indonesia. Buktinya,

Berbagai upaya lain sudah dilakukan pemerintah, masyarakat dan sekolah, namun karena beberapa faktor seperti pergantian pimpinan, arus politik, keamanan, kesejahteraan sampai pada cara pandang masyarakat mempengaruhi permasalahan tersebut sehingga belum tuntas sampai sekarang. Peningkatan kualitas, pemerataan dan relevansi yang

menjadi permasalahan utama pendidikan di Indonesia sesungguhnya dapat diatasi dengan meningkatkan kualitas pembelajaran. Hal ini merujuk pada pendapat Nanang [1] bahwa peningkatan mutu, relevansi, dan daya saing dilakukan dengan peningkatan kualitas pembelajaran melalui pengembangan kurikulum, metode pembelajaran dan sistem penilaian. Meskipun sebuah kelas (dalam kegiatan pembelajaran) merupakan tataran mikro dalam pendidikan yang begitu luas, namun pembelajaran menentukan proses dan hasil selanjutnya karena menurut Cloud [4] pendidikan dilakukan untuk masa depan yang berkelanjutan. Hasil pembelajaran pada tingkat dasar sebagai modal untuk pendidikan menengah, dan pendidikan menengah untuk modal pendidikan tinggi. Hal inilah yang menyebabkan proses pendidikan harus terus menerus dan berkelanjutan. Secara eksplisit, proses pendidikan itu dapat dilihat pada proses pembelajaran sehingga pembelajaran menjadi inti pendidikan. Oleh sebab itu, ketika ingin meningkatkan kualitas pendidikan hal utama yang harus dilakukan adalah meningkatkan kualitas pembelajaran. Sehingga dengan peningkatan kualitas pembelajaran, relevansi dan pemerataan ikut serta meningkat. Pendidikan yang berkualitas dapat dilakukan dengan mewujudkan pembelajaran bermakna dan pembelajaran yang dapat menanamkan nilai-nilai yang peserta didik butuhkan di masa mendatang. Misalnya penanaman nilai-nilai dari pembakaran hutan ilegal. Dalam proses pembelajaran peserta didik tidak saja dituntut mampu mengucapkan akibat dari menebang hutan sembarangan, tetapi mampu memaknai materi. Para penebang hutan sekarang mereka mampu mengungkapkan akibat dari menebang hutan secara ilegal namun mereka tidak melakukan yang mereka ucapkan. Mereka hanya mampu verbalisme tanpa memaknai pesan dari menebang hutan secara ilegal.

Ketika pembelajaran menjadi inti dari pendidikan, maka pembelajaran pada intinya merupakan perwujudan suasana belajar dalam upaya mengembangkan potensi peserta didik dalam upaya meningkatkan kualitas sumber daya manusia. Transfer pengetahuan akan terjadi dalam proses interaksi sosial antara peserta didik dan pendidik sehingga hasil interaksi pendidikan tersebut akan membentuk tingkah laku yang berpendidikan pula. Cara terbaik dalam membelajarkan itu dengan mencontohkan melalui interaksi antara pendidik dengan peserta didik, bukan sekadar justifikasi. Hal ini sebenarnya juga termaktub dalam UU nomor 20 tahun 2003 [2] tentang Sistem Pendidikan Nasional bahwa pendidikan merupakan usaha sadar dan terencana untuk mewujudkan suasana belajar dan proses pembelajaran agar peserta didik secara aktif mengembangkan potensi dirinya untuk memiliki kekuatan spiritual keagamaan, pengendalian diri, kepribadian, kecerdasan, akhlak mulia serta keterampilan yang diperlukan dirinya, masyarakat, bangsa dan negara. Oleh sebab itu, untuk memecahkan permasalahan pendidikan, tersebut perlu peningkatan kualitas pembelajaran melalui sebuah rancangan sistem pembelajaran. Sistem pembelajaran inilah yang membantu pendidik menciptakan pembelajaran berkualitas. Rancangan sistem pembelajaran yang sedang digandrungi saat ini adalah rancangan sistem pembelajaran yang berbasis teknologi karena relevan dan sangat disukai oleh anak-anak usia sekolah.

Kehadiran teknologi komputer dan jaringan di Indonesia, telah mempengaruhi proses belajar di ruang kelas. Dengan

munculnya teknologi ini belajar bisa saja dilakukan dimana saja. Jika sebelum teknologi komputer dan jaringan digunakan di Indonesia, orang-orang mengirim modul pembelajaran untuk belajar mandiri dalam bentuk *printout*, maka pengoptimalan komputer dan internet dalam pembelajaran dapat mempermudah distribusi modul menggunakan email atau dapat di-*download* pada website tertentu yang sudah disediakan. Menurut Smaldino [5], istilah pembelajaran berbasis komputer yang menggunakan jaringan internet disebut dengan *online learning*. Meskipun *online learning* menawarkan media yang bervariasi dan fleksibel waktu serta tempat, ternyata pembelajaran ini memiliki kelemahan-kelemahan tertentu (Bersin [6]). Hal ini melahirkan pembelajaran yang mencampurkan pembelajaran *online* dengan pembelajaran tatap muka yang disebut dengan *blended learning*. Pencampuran tersebut dengan mengombinasikan kelebihan pertemuan tatap muka dengan kelebihan *online learning* dan meminimalisir kekurangan pertemuan tatap muka dengan *online learning*. Berdasarkan perkembangan tersebut, maka saat ini fokus pengembangan sistem pembelajaran adalah sistem pembelajaran yang berbasis *blended learning*. Sistem pembelajaran *blended learning* seperti apa yang dapat meningkatkan interaksi pendidikan antara peserta didik dan pendidik dalam upaya mengembangkan potensi peserta didik sehingga ketiga masalah pokok pendidikan di Indonesia terpecahkan.

B. PEMBAHASAN

1. Desain Sistem Pembelajaran

Desain merupakan satu dari lima ranah keilmuan Teknologi Pendidikan di samping pengembangan, pemanfaatan, pengelolaan dan evaluasi. Kawasan desain menurut Seels [7] adalah proses untuk menentukan kondisi belajar dengan tujuan agar tercipta strategi dan produk pada tingkat makro, seperti program dan kurikulum, dan pada tingkat mikro, seperti pelajaran dan modul. Dalam Teknologi Pendidikan, ranah desain meliputi desain sistem pembelajaran, desain pesan, strategi pembelajaran dan karakteristik pembelajar. Ranah desain pada Teknologi Pendidikan ini memiliki kaitan erat dengan pendidikan yang dimaksud oleh UU Sisdiknas [2] bahwa pendidikan sebagai usaha sadar dan terencana untuk menciptakan suasana belajar dan proses pembelajaran. Untuk mencapai pendidikan seperti yang disebutkan dalam UU tersebut, Teknologi Pendidikan sangat berperan dalam menciptakan suasana belajar dan proses pembelajaran melalui ranah desain ini, yaitu dengan mendesain sistem pembelajaran melalui model pengembangan 4D. Model ini mencakup *Define, Design, Develop and Disiminate* (Thiagarajan [8]). Menggunakan model inilah dikembangkan berbagai pembelajaran termasuk *blended learning*

Desain sistem pembelajaran sangat tepat karena sebagaimana yang dibahas sebelumnya, bahwa inti pendidikan itu terletak pada pembelajarannya. Dengan mendesain sistem pembelajaran berarti berupaya meningkatkan interaksi peserta didik dan pendidik untuk mengembangkan potensi mereka. Karena sistem merupakan suatu kesatuan yang utuh dan terstruktur, menurut Dewi Salma [9] desain sistem pembelajaran juga dilengkapi oleh komponen-komponen pembelajaran dan tersusun secara terstruktur. Desain sistem pembelajaran menurut Seels [7] merupakan suatu prosedur yang terorganisir, meliputi: langkah-langkah di antaranya: a) penganalisisan, yaitu proses perumusan apa

yang akan dipelajari; b) perancangan, yaitu proses penjabaran bagaimana cara mempelajarinya; c) pengembangan, yaitu proses penulisan atau produksi bahan-bahan pelajaran; d) pelaksanaan , yaitu pemanfaatan dan strategi; e) penilaian, yaitu proses penentuan ketepatan pembelajaran. Dalam desain sistem pembelajaran, proses sama pentingnya dengan produk, sebab kepercayaan atas produk berlandaskan pada proses. Apapun model pembelajaran yang dipilih, lima langkah ini menjadi inti sistem desain pembelajarannya. Dengan mengikuti prosedur tersebut, dapat tercipta suasana belajar dan proses pembelajaran seperti yang termaktub dalam PP nomor 32 tahun 2013 [10] pembelajaran yang interaktif, inspiratif, menyenangkan, menantang, memotivasi peserta didik untuk berpartisipasi aktif, memberikan ruang gerak yang cukup bagi prakarsa, kreativitas dan kemandirian sesuai dengan bakat, minat dan perkembangan fisik serta psikologi peserta didik. Untuk menyelenggarakan pembelajaran seperti yang disebutkan dalam PP tersebut, Richey, Klein dan Tracey [11] mengingatkan bahwa perlu beberapa pengetahuan dasar dalam desain pembelajaran.

Sistem pembelajaran sangat berperan dalam mengembangkan potensi peserta didik. Proses tersebut berlangsung karena terdapatnya interaksi antara peserta didik dan pendidik. Ketika interaksi tersebut terjadi dalam konteks pembelajaran-pendidikan, maka akan terbentuk perilaku peserta didik. Abizar [12] menjelaskan bahwa skemata atau pengetahuan awal pada diri individu itu terbentuk dan berkembang melalui kematangan, belajar dan pengalaman. Tiga hal tersebut dapat terjadi ketika individu atau peserta didik tertentu melakukan interaksi selama proses pembelajaran, baik dengan pendidik, dengan peserta didik lainnya, media pembelajaran maupun dengan materi pembelajaran. Artinya, untuk mengembangkan potensi peserta didik, yang mereka perlukan adalah interaksi. Seperti yang dikemukakan Shambaugh [13] bahwa desain pembelajaran menangani tentang kebutuhan manusia dalam konteks pembahasan ini kebutuhan belajar, dan manfaat kegiatan desain pembelajaran ini hasil dari interaksi sosial peserta didik dengan peserta didik lainnya. Seperti yang dikemukakan oleh Dewi Salma [9] tentang komponen pembelajaran, maka dalam pembahasan mengenai sistem pembelajaran, proses pengembangan potensi tersebut didukung oleh komponen-komponen sistem pembelajaran, diantaranya tujuan pembelajaran, materi, metode dan media, peserta didik, pendidik dan evaluasi. Jadi, ketika mengembangkan desain sistem pembelajaran, tidak terlepas dari mempertimbangkan komponen tersebut. Karena sistem merupakan suatu kesatuan utuh yang terbentuk dari komponen pembangunnya, seperti yang dikatakan oleh Richey, Klein dan Tracey [14] bahwa sebuah sistem itu terdiri dari banyak bagian yang saling berhubungan satu dengan yang lainnya. Oleh sebab itu, ketika satu komponen tidak berjalan sesuai perannya maka tujuan dari sistem juga akan terganggu. Sistem pembelajaran ini jika dianalogikan ke dalam sistem lain seperti sebuah mobil. Meskipun sebuah pentil yang kecil sekalipun pada sebuah mobil tidak berfungsi atau tidak ada maka larinya mobil tidak optimal. Jika dijadwal ingin sampai pukul 8, maka tanpa pentil bisa sampai di tempat tujuan pukul 10.

2. *Blended Learning*

Blended learning, menurut Smaldino [5] merupakan pencampuran dan pengaturan pembelajaran yang divariasikan agar sesuai dan tepat untuk memenuhi kebutuhan belajar peserta didik. Sejalan dengan itu, menurut Graham [15], *blended learning* adalah sebuah sistem yang mengombinasikan pembelajaran tatap muka dan pembelajaran berbantuan komputer dengan mengintegrasikan penggunaan media berbasis komputer untuk membantu penyampaian materi ajar. Sedangkan Watson [16] merinci pengertian *blended learning* sebagai kegiatan pembelajaran yang mengombinasikan komponen terbaik dari *online learning* dengan pendidikan tatap muka. Secara garis besar, media berbantuan komputer sangat luas sedangkan *online learning* merupakan pembelajaran berbantuan komputer melalui jaringan. Dari tiga pendapat ini dapat disimpulkan bahwa pembelajaran *blended* merupakan campuran tentang pembelajaran berdasarkan kebutuhan peserta didik, pembelajaran berbantuan komputer dan pembelajaran *online learning.*

Berbeda dengan apa yang dikemukakan di atas, Rossette [17] mengatakan bahwa *blended learning* itu adalah mencampurkan pendekatan yang berbeda, misalnya *formal and informal learning, face-to-face and online learning experience, directed paths and reliance on self-direction or digital references and collegial connections.* Pendapat Smaldino [5], Graham [15], Watson [16] dan Rossette [17] mengandung satu makna mencampur untuk menjelaskan masing-masing pengertian *blended.* Namun Bersin [6] mengemukakan bahwa *blended learning is not a new concept, but the tools available to us today are now.* Artinya, *blended learning* bukanlah konsep baru karena jauh sebelum ada pencampuran pembelajaran *online* dan tatap muka, sudah ada pencampuran pembelajaran tatap muka dengan video langsung berbasis satelit, pencampuran pembelajaran tatap muka dan Komputer Personal (PC) menggunakan CD-ROM dan baru beralih ke pencampuran pembelajaran tatap muka dan *online learning* ketika internet mulai dikenal banyak orang. Di sini Bersin [6] menegaskan bahwa pencampuran yang dilakukan dalam kegiatan tatap muka adalah pencampuran dengan alat baru yang tersedia saat ini. Jika dilihat kekiniannya, alat terbaru berbantuan komputer yang ada saat ini adalah *online* seperti yang diungkapkan oleh Watson [16]. Dengan begitu dapat dikatakan *blended learning* merupakan pencampuran antara pembelajaran tatap muka dan pembelajaran berbantuan komputer yang ada pada saat itu (*today*). Pada intinya, pembelajaran *online* merupakan pembelajaran yang didukung oleh infrastruktur pendukung dengan memanfaatkan kemajuan teknologi komputer dan jaringan internet. Ini adalah sebuah sistem yang dapat memfasilitasi peserta didik untuk belajar lebih luas, lebih banyak dan lebih bervariasi, sehingga peserta didik bisa belajar kapan saja dan dimana saja.

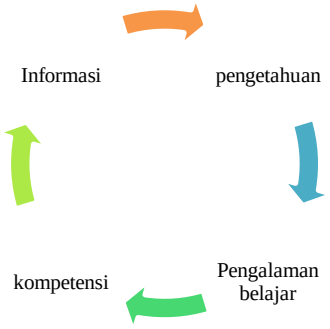
Melalui *blended learning,* dengan keleluasaan dan pilihan media yang bervariasi dapat meningkatkan interaksi peserta didik untuk memberikan mereka pengalaman belajar. Pandangan Behaviorisme (stimulus dan respons, S-R) yang dikemukakan Ivan P Pavlov, B. F. Skinner, J. B. Watson, C. L Hull, Guthrie dan Thorndike dalam Gredler [18], menganggap bahwa pengalaman belajar akan terjadi ketika peserta didik diberikan stimulus melalui berbagai media pembelajaran berbasis *online.* Stimulus-

stimulus (S) dari media tersebut membantu dan mendorong peserta didik untuk memberikan respons (S) sehingga mereka terbiasa untuk belajar. Dalam desain sistem *blended learning* bagaimana mendesain pembelajaran yang memberikan stimulus-stimulus melalui komponen pembelajaran untuk meningkatkan respons peserta didik. Sedangkan menurut pandangan Kognitivisme yang dikemukakan oleh Piaget, dan Jerome Bruner dalam Gredler [18] berpendapat bahwa peserta didik memiliki potensi yang bisa dikembangkan, sehingga untuk membentuk pengalaman belajar dilakukan dengan meningkatkan *insight* (pemahaman) mereka. Aplikasinya dalam desain sistem *blended learning* adalah bagaimana mendesain sistem pembelajaran yang dapat mengembangkan kognisi peserta didik untuk meningkatkan pemahaman mereka.

Dari dua pandangan teori belajar Behaviorisme dan Kognitivisme tersebut, pengalaman belajar melalui interaksi dapat ditingkatkan melalui kegiatan pembelajaran. Jika dalam Behaviorisme kegiatan pembelajaran dengan memberikan stimulus-stimulus kepada peserta didik, maka dalam Kognitivisme kegiatan pembelajaran dengan memberikan mereka kesempatan untuk mengeksplor sendiri pengetahuan yang mereka butuhkan. Kedua hal ini dalam desain sistem *blended learning* bukan hal yang bertolak belakang, namun saling melengkapi. Artinya dengan meningkatkan resonansi aplikasi dua pandangan teori belajar yang berbeda tersebut, dapat mengoptimalkan pengalaman belajar itu sendiri. Kedua pandangan ini dapat mengoptimalkan pembelajaran *blended*, misalnya pemberian tugas melalui *online learning* dan pembahasan serta diskusinya pada pertemuan tatap muka. Hal yang demikian praktik behaviorisme, pemberian tugas merupakan stimulus dan tugas yang ditulis merupakan respons. Sedangkan pembahasan dan diskusi merupakan proses kognitif karena selama proses itu berlangsung terjadi proses pemaknaan. Misalnya, pemberian stimulus dalam *blended learning* melalui website pembelajaran yang dirancang khusus untuk pembelajaran dengan konten materi ajar yang sudah disusun sedemikian rupa, dan kemudian dengan wadah website pembelajaran dilengkapi dengan *google* peserta didik dapat mengeksplor berbagai pengetahuan lain yang relevan dengan tujuan pembelajaran.

Proses diskusi inilah yang membentuk interaksi sosial. Menurut Sudardja [19] interaksi sosial merupakan kata kunci dalam proses pendidikan. Keberhasilan pendidikan ditentukan oleh mutu interaksi tersebut, dengan siapa berinteraksi, pesan yang disampaikan, bagaimana interaksi berlangsung, media dan sara prasarana yang digunakan serta bagaimana dampak dari interaksi tersebut. Oleh sebab itu, diskusi sebagai salah satu bentuk kegiatan belajar (*learning activity*) menjadi penting dalam mengembangkan potensi peserta didik karena melalui kegiatan tersebut memberikan kesempatan kepada peserta didik untuk berinteraksi dengan lingkungan sosial mereka. Maka, ketika kegiatan belajar terjadi, informasi yang mereka dapatkan di ruang kelas bukan sekadar menjadi catatan rapi bagi peserta didik dan disimpan di rumah, namun agar mereka dapat secara aktif mengembangkan potensi diri. Dengan *learning activity*, informasi yang peserta didik terima di ruang kelas ataupun belajar di website dapat menjadi pengetahuan. Ketika peserta didik yang sudah berbekal pengetahuan ditingkatkan lagi dengan *learning activity*,

maka pengetahuan tersebut akan menjadi pengalaman belajar bagi mereka. Selanjutnya, pengalaman yang mereka miliki tersebut dikembangkan lagi melalui *learning activity*, maka akan terbentuk kompetensi pada diri individu. Proses tersebut dapat diilustrasikan seperti gambar di bawah ini:



Gambar 1. Siklus Kegiatan Belajar

Berdasarkan ilustrasi tersebut dapat dimaknai bahwa dari informasi, pengetahuan, pengalaman belajar sampai kompetensi merupakan suatu siklus yang terjadi akibat kegiatan belajar. Menjadi sebuah siklus karena belajar itu tidak pernah berakhir. Ketika peserta didik sudah mencapai kompetensi pada satu tujuan pembelajaran, bukan berarti peserta didik berhenti sampai di situ. Namun kompetensi yang sudah dimiliki akan menjadi pengetahuan awal untuk mencapai kompetensi-kompetensi selanjutnya. Agar siklus tersebut berjalan sebagaimana mestinya, proses atau siklus dibantu oleh komponen-komponen pembelajaran pada setiap kegiatan belajar (*learning activity*). Seperti yang dijelaskan Santrock [20] bahwa seseorang ketika mengaplikasikan pengalaman dan pengetahuan yang dimilikinya untuk mempelajari dan memecahkan masalah dalam situasi baru. Artinya, materi yang dipelajari peserta didik sebelumnya dan saat ini diharapkan dapat menjadi modal awal mereka untuk memecahkan masalah di masa mendatang. Siklus transfer belajar seperti itu perlu dipertahankan, sehingga ilustrasi siklus pembelajaran yang dilengkapi komponen pembelajaran akan menjadi seperti ilustrasi berikut ini:

Gambar 2. Posisi Komponen Pembelajaran dalam Siklus Kegiatan Belajar

Gambar 2 dapat dimaknai bahwa dalam siklus pembelajaran melalui kegiatan pembelajaran, untuk mengembangkan informasi menjadi pengetahuan, pengetahuan menjadi pengalaman belajar dan pengalaman belajar menjadi kompetensi, untuk setiap kegiatan pembelajaran tidak mungkin tidak melibatkan komponen pembelajaran di dalamnya. Menurut Richey, Klein dan Tracey [14] sebuah sistem, desain sistem pembelajaran dari komponen penyusunnya saling berinteraksi, yaitu berhubungan secara aktif dan saling mempengaruhi. Misalnya menentukan metode pembelajaran merujuk pada tujuan pembelajaran, karakteristik peserta didik, materi, serta evaluasi yang akan digunakan. Begitu pula ketika menentukan evaluasi pembelajarannya merujuk pada tujuan pembelajaran, materi pembelajaran, dan metode pembelajaran. Dalam konteks pembahasan ini, bagaimana interaksi komponen *blended learning*.

3. Penelitian dalam Desain *Blended Learning*

Berdasarkan pembahasan di atas, maka sangat penting dilakukan riset dalam bidang desain sistem *blended learning*. Riset dalam desain sistem pembelajaran merupakan riset yang bergerak dalam bidang pendidikan, terkonsentrasi pada bidang Teknologi Pendidikan. Yaitu riset-riset yang memecahkan permasalahan pendidikan melalui sentuhan ilmu Teknologi Pendidikan. Dalam artian, memecahkan permasalahan belajar menggunakan teknologi. Teknologi bagi seorang Teknolog Pendidikan tidak sebatas teknologi komputer, internet dan perangkat *mobile* lainnya. Namun bagi seorang Teknolog Pendidikan segala upaya untuk menyelesaikan masalah belajar (Yusufhadi [21]) dapat dilakukan melalui teknologi; berupa perkembangan teknologi (alat) untuk pengembangan media pembelajaran dan teknologi *non* alat untuk pengembangan metode-metode pembelajaran. Riset mengenai desain sistem *blended learning* berkenaan dengan komponen yang membangun sistem tersebut, artinya ketika melakukan riset yang berhubungan dengan desain sistem pembelajaran akan melibatkan seluruh komponen pembelajaran, yaitu tujuan, materi, media, metode/strategi, pendidik dan peserta didik serta evaluasi pembelajaran.

Riset mengenai desain sistem *blended learning* sangat penting dilakukan karena kebutuhan akan *blended learning* itu sendiri. Berbagai penelitian yang dilakukan, seperti Bersin [6], Kurniawati [22], Luhde Irin Pradnyawati, I Nengah Suparta, dan Sariyasa [23], Alwen dan Ulfia [24]. Hasil penelitian membuktikan bahwa saat ini, dengan perkembangan teknologi bukan saja berdampak pada komunikasi sosial saja, namun juga pada komunikasi pembelajaran. Artinya interaksi pembelajaran dipengaruhi oleh perkembangan teknologi pada saat ini agar pembelajaran yang terjadi bersifat kontekstual. Anak usia sekolah sangat menyukai dan tertarik dengan perkembangan teknologi. Bagi seorang Teknolog Pendidikan, hal itu dipandang sebagai salah satu upaya untuk menyelesaikan permasalahan belajar karena saat ini masalah belajar menjadi masalah yang cukup sulit dipecahkan. Masalah belajar yang dihadapi sekarang itu adalah peserta didik bosan dengan suasana belajar dan proses pembelajaran yang biasa mereka lakukan, dan peserta didik membutuhkan media pembelajaran yang bervariasi dan menarik seperti mereka membutuhkan sosial media.

Sehubungan dengan hal itu, riset dalam desain sistem *blended learning* juga urgen dilakukan mengingat definisi pendidikan yang disampaikan dalam UU nomor 20 tahun 2003 [2] bahwa pendidik merupakan usaha sadar dan terencana untuk mewujudkan suasana belajar dan proses pembelajaran. Kemudian urgensi riset ini dilakukan juga berkaitan erat dengan PP nomor 32 tahun 2013 [10] bahwa proses pembelajaran itu harus dilakukan secara interaktif, inspiratif, menyenangkan, menantang, memotivasi peserta didik untuk berpartisipasi aktif, memberikan ruang gerak yang cukup bagi prakarsa, kreativitas dan kemandirian sesuai dengan bakat, minat dan perkembangan fisik serta psikologi peserta didik. Dan secara teoretis seperti yang John Dewey katakan dalam Smaldino [5] bahwa peserta didik belajar banyak melalui *learning by doing*. Secara yuridis dan teoretis pendidikan dapat dilakukan melalui *blended learning* dan *learning by doing* untuk membentuk interaksi bermedia dan interaksi

interpesonal/ interaksi sosialnya. Ketika hal itu terjadi dalam kegiatan pembelajaran maka akan dapat dikembangkan informasi menjadi pengetahuan, pengetahuan menjadi pengalaman belajar dan pengalaman belajar menjadi kompetensi. Sehingga dari hal itu diharapkan peserta didik belajar sesuai dengan bakat, minat, perkembangan fisik serta psikologi sesuai dengan tugas perkembangan mereka dalam rangka mengembangkan potensi diri.

Selain urgensi dilakukannya riset dalam desain sistem pembelajaran *blended*, riset ini sesungguhnya sudah berkembang jauh sebelum teknologi komputer dan internet lahir. Pada masa munculnya televisi, menurut Bersin [6] *blended learning* dilakukan dengan mengombinasikan pembelajaran tatap muka dengan belajar menggunakan televisi. Kemudian muncul komputer, kombinasi pembelajaran berkembang menjadi kombinasi pembelajaran berbasis komputer (*elearning*) dengan pembelajaran tatap maka. Dan saat internet juga berpengaruh terhadap pendidikan, pengombinasian pembelajaran terjadi antara pembelajaran menggunakan jaringan internet (*online learning*) dengan pembelajaran tatap muka. Artinya bahwa *blended learning* merupakan pengombinasian pertemuan tatap muka dengan kemajuan teknologi yang ada pada saat itu. Berbeda dengan pendapat Smaldino [5] bahwa *blended learning* merupakan pengombinasian antara pembelajaran *synchronous* dengan *asynchronous*. Pada saat ini pembelajaran *asynchronous* dibantu dengan layanan internet. Penulis memprediksi bahwa internet akan bertahan lama dan belum ada perkembangan yang akan mengalahkan internet. Prediksi yang sama juga dilakukan terhadap desain sistem *blended learning*, bahwa selama internet dioptimalkan dalam komunikasi pembelajaran selama itu pula *blended learning* akan bertahan. Dari perjalanan perkembangan teknologi, komunikasi dan pengaruhnya terhadap pembelajaran, juga berdampak pada desain sistem pembelajaran di kelas. Artinya adalah bahwa pembelajaran yang terjadi di kelas jangan terpisah dengan dunia realita di mana peserta didik tinggal. Karena peserta didik sangat jatuh cinta pada hal-hal baru, maka ketika terjadi perkembangan teknologi maka di situ peserta didik mencoba menyatu dengan perkembangan tersebut. Sebagai seorang Teknolog Pendidikan yang ingin menciptakan suasana belajar dan proses pembelajaran seperti yang disebutkan PP nomor 32 tahun 2013 [10] maka tidak ada salahnya mengadopsi teknologi komunikasi sosial dan menjadikannya menjadi teknologi untuk komunikasi pembelajaran.

Oleh sebab itu, agar mampu melakukan riset dalam bidang desain sistem pembelajaran maka untuk menunjang riset tersebut seorang peneliti harus memiliki keahlian, diantaranya berpikir holistik, memahami teori belajar, memahami teori motivasi, teori persepsi, teori pembelajaran, memahami kurikulum, dan kreatif serta inovatif dalam mengembangkan teknologi dan rekayasa pembelajaran. Keahlian yang harus dimiliki oleh seorang peneliti yang pertama adalah a) berpikir holistik dan komprehensif karena akan terjun dalam bidang yang terbentuk dari sebuah sistem yang terdiri dari komponen-komponennya. Jika berpikir sebagian-sebagian atau berpikir terpisah, maka dalam mendesain sistem pembelajaran akan melupakan atau mengabaikan komponen sistem pembelajaran itu sendiri. Karena bekerja dalam sistem berarti memberdayakan komponen-komponen penyusunnya untuk mencapai tujuan dari sistem itu sendiri. Hal

yang sama juga dikemukakan oleh Atwi [25] bahwa pengembangan pembelajaran merupakan salah satu wujud penerapan teori sistem dalam kegiatan pembelajaran. Maka ketika salah satu komponen pembelajaran tidak berperan sesuai fungsinya maka tujuan sistem pembelajaran juga sulit untuk dicapai. oleh sebab itu, seorang peneliti dalam bidang desain sistem pembelajaran harus memahami betul teori sistem itu sendiri.

Selanjutnya, keahlian yang harus dimiliki peneliti yang kedua adalah b) memahami teori-teori belajar, karena desain sistem pembelajaran berakar pada teori belajar. Teori belajar utama yang mendukung desain sistem pembelajaran adalah Behaviorisme dan Kongnitivisme (Richey, Klein dan Tracey [14]). Pandangan pakar perilaku seperti P Pavlov, B. F. Skinner, J. B. Watson, C. L Hull, Guthrie dan Thorndike, secara tradisi sangat mendominasi dalam aplikasi desain sistem pembelajaran. Saat ini, desain sistem pembelajaran menekankan pada Kognitivisme sehingga muncullah paradigma pembelajaran yang terpusat pada peserta didik dan banyak juga berdasarkan pada prinsip-prinsip konstruktivisme dalam pengembangan selanjutnya (Seels [7]). Pandangan konstruktivisme beranggapan bahwa pengetahuan yang sudah dimiliki peserta didik sebagai modal awal bagi mereka untuk membangun pengetahuan baru (Suparno [26]). Maka sangat tepat sekali memberikan *learning by doing* melalui *blended learning* untuk membentuk pengalaman belajar peserta didik. Kognitivisme lebih tertarik pada perubahan pengetahuan peserta didik dan struktur pengetahuannya (Gredler [18]). Mereka lebih menekankan pada bagaimana peserta didik mengingat informasi. Kognitivisme berpandangan bahwa pengetahuan seseorang dan proses belajar itu sendirilah yang menjadi akar dari penerjemahan yang unik seseorang terhadap dunia. Pandangan ini ditentukan oleh pengalaman seseorang dan penafsirannya terhadap pengalaman itu sendiri. Orientasi Kognitivisme menekankan pada peran konteks, baik konteks pembelajaran maupun konteks situasi berlangsung proses transfer lebih bersifat internal (Santrock) [20]. Kebalikannya dari pendekatan eksternal pakar perilaku bahwa teori perilaku/ Behaviorisme mempunyai perhatian khusus pada kinerja peserta didik sebagai bukti utama bahwa proses belajar sudah dilalui. Terdapat kecenderungan dari hasil penelitian mengenai perilaku yang menekankan pada pengaruh stimulus pada pembelajaran peserta didik. Hal ini mengisyaratkan bahwa dalam pembelajaran yang perlu dilakukan oleh peserta didik itu adalah unjuk kerja karena ketika terjadi perubahan dari tingkah laku peserta didik maka disitulah terjadi proses belajar bagi Behaviorisme. Makanya Behaviorisme sering mendefinisikan pembelajaran sebagai perubahan tingkah laku, dan Kognivisme mendefinisikan pembelajaran sebagai sebuah pemahaman hasil dari proses kognisi (internal).

Selain itu, keahlian yang harus dimiliki oleh peneliti dalam bidang desain sistem pembelajaran *blended* adalah memahami teori motivasi. Keller [27] juga menyajikan model desain pembelajaran untuk motivasi yang didasarkan pada sejumlah teori lainnya. Modelnya menunjukkan strategi desain yang mencakup empat komponen motivasi: membangkitkan minat, menciptakan relevansi, mengembangkan harapan keberhasilan, dan memproduksi kepuasan melalui intrinsik/ imbalan ekstrinsik. Artinya, dalam mendesain sistem *blended*

learning juga mempertimbangkan teori motivasi ini karena untuk mengimplementasikan rencana susunan suasana belajar dan proses pembelajaran yang kondusif dibutuhkan motivasi dari peserta didik. Motivasi tersebut dapat dimunculkan dengan menimbulkan minat peserta didik terhadap belajar, menciptakan relevansi dengan memfasilitasi dengan media yang bervariasi dan menarik, mengembangkan harapan keberhasilan peserta didik dengan memberikan kesempatan melakukan (*learning by doing*) banyak hal dalam pembelajaran. Misalnya menggunakan media yang bervariasi dan relevan dengan peserta didik, pada *online learning* menggunakan *website* pembelajaran dan pada saat pertemuan di kelas menggunakan media presentasi dan multimedia interaktif.

Keahlian berikutnya atau keahlian keempat yang harus dimiliki peneliti dalam bidang desain sistem pembelajaran adalah d) memahami teori persepsi. Dalam persepsi stimulus dapat datang dari luar (menurut pandangan Behaviorisme), tetapi juga dapat datang dalam diri individu sendiri (Kognitivisme). Namun pada proses pembelajaran, sebagian besar stimulus datang dari luar individu yang bersangkutan yaitu dari desain sistem pembelajaran yang *reseacher* rancang. Menurut Bimo [28], persepsi dilakukan melalui macam-macam alat indra yang ada pada diri individu, media dan metode pembelajaran, tetapi sebagian besar persepsi melalui alat indra penglihatan. Karena itulah banyak riset mengenai persepsi berkaitan dengan alat penglihatan. Persepsi merupakan aktivitas yang terintegrasi dalam diri individu, maka apa yang ada dalam diri individu akan ikut aktif dalam persepsi. Berdasarkan hal tersebut, maka dalam persepsi dapat dikemukakan (faktor-faktor mempengaruhi persepsi) karena perasaan, kemampuan berpikir, pengalaman-pengalaman individu tidak sama, persepsi itu bersifat individual, maka dalam mempersepsi sesuatu stimulus, hasil persepsi mungkin akan berbeda antara individu satu dengan individu lain.

Keahlian yang tidak kalah pentingnya yang harus dimiliki oleh peneliti adalah e) keahlian memahami teori pembelajaran. Teori pembelajaran difokuskan pada bagaimana seseorang mempengaruhi orang lain agar terjadi proses belajar. Hal ini juga dikemukakan oleh Reigeluth [29] bahwa teori desain pembelajaran secara eksplisit menjadi pedoman bagaimana membantu seseorang belajar dan berkembang. Artinya, dalam desain sistem pembelajaran, teori belajarlah yang berperan untuk menciptakan suasana belajar dan proses pembelajaran itu sendiri, karena teori belajar ini merupakan kumpulan prinsip yang terintegrasi dan memberikan petunjuk untuk mengatur lingkungan belajar seperti apa yang dapat meningkatkan aktivitas pembelajaran, meningkatkan motivasi, membentuk persepsi dan mengembangkan potensi diri peserta didik. Oleh sebab itu, teori pembelajaran tidak berdiri sendiri, tetapi didasari oleh teori motivasi, persepsi dan teori belajar. Teori pembelajaran merupakan teori yang memberikan arahan bagaimana meramu komponen-komponen sistem pembelajaran agar terwujud suasana belajar dan proses pembelajaran seperti yang diharapkan. Dengan demikian, teori pembelajaran berhubungan dengan upaya mengontrol komponen sistem pembelajaran untuk mencapai tujuan pembelajaran.

Berikutnya, keahlian yang harus dimiliki oleh peneliti dalam bidang desain sistem pembelajaran adalah f) memahami teori kurikulum. Kurikulum dimaknai berbeda dari seorang orang yang mencoba memahami kurikulum, diantaranya sebagai

lapangan, sebagai dokumen, sebagai program studi, sebagai seperangkat rencana, dan sebagai pengalaman belajar. Namun dari perdebatan ahli kurikulum, dapat dimaknai bahwa kurikulum adalah semua hal yang dirancang dan tidak dirancang oleh sekolah yang harus diikuti oleh peserta didik selama ini menempuh jalur pendidikan tertentu dalam bentuk sejumlah pengalaman belajar. Dalam mengembangkan pengalaman belajar sebagai implementasi dari kurikulum atau wujudnya dari sebuah kurikulum menurut Zais [30] dan Ornstein dan Hunkins [31] perlu mempertimbangkan komponen kurikulum, yaitu tujuan, materi/ konten/ organisasi dan evaluasi.

Terakhir, menurut penulis keahlian yang harus dimiliki oleh *reseicher* ataupun Teknolog Pendidikan dalam bidang desain sistem pembelajaran g) harus kreatif, inovatif dalam mengembangkan teknologi dan rekayasa pembelajaran. Artinya dengan pertimbangan komponen pembelajaran, teori-teori pendukung yakni teori sistem, teori belajar, teori motivasi, teori persepsi, teori pembelajaran dan teori kurikulum, kemampuan yang tidak kalah pentingnya adalah bagaimana kreativitas dan inovasi yang *researcher* ataupun Teknologi Pendidikan miliki untuk mengembangkan teknologi dalam pembelajaran dan rekayasa pembelajaran untuk menwujudkan suasana belajar dan proses pembelajaran seperti yang disebutkan dalam PP nomor 32 tahun 2013 [10]. Sehingga perkembangan teknologi dapat memecahkan permasalahan pembelajaran yang dihadapi. Artinya, pengoptimalan teknologi dalam pembelajaran tidak hanya membutuhkan kemajuan teknologi yang canggih, tetapi harus kreatif dan inovatif dalam memilih teknologi untuk memecahkan masalah belajar tertentu.

4. Riset Tren

Permasalahan yang sering dihadapi dalam riset desain sistem pembelajaran *blended* ini adalah memformulasikan campuran antara *online learning* dan tatap muka, belum siapnya seluruh peserta didik belajar melalui *online learning,* kurang memadainya fasilitas untuk *online learning* dan kurang termotivasinya peserta didik dalam belajar. Beberapa masalah ini masih menjadi kendala dalam mengaplikasikan *blended learning.* Penulis dengan tim peneliti masih berupaya dalam memecahkan masalah tersebut. Misalnya penelitian Alwen dan Ulfia tahun 2014-2015 [24] tentang formulasi strategi penerapan *blended learning,* penelitian survei penulis 2015-2016 [32] tentang kesiapan peserta didik dan pendidik dalam melakukan *online learning dan* penelitian mengenai motivasi peserta didik dalam belajar khususnya membahas desain pesan pembelajaran dalam *blended learning* untuk meningkatkan motivasi dan pemaknaan materi oleh peserta didik. Hal ini dapat diatasi dengan mengaplikaskan berbagai desain sistem pembelajaran seperti model ADDIE [33], ASSURE [34], Dick dan Carey [35], Morison, Ross dan Kemp [36] dan berbagai model sistem pembelajaran lainnya. Semua model sistem pembelajaran tersebut dimulai dengan melakukan analisis kebutuhan yang mencakup analisis tujuan pembelajaran, analisis materi ajar, analisis peserta didik dan analisis kelayakan. Hal yang sama pula dilakukan untuk *blended learning* pada satu mata kuliah atau mata pelajaran. Sehingga, dengan cara demikian sistem *blended learning* dapat diterapkan di Indonesia meskipun pada saat ini beberapa guru dalam ruang lingkup mikro dan perguruan tinggi dalam ruang lingkup makro sudah melakukan sistem *blended learning.*

Selanjutnya, prediksi penulis terhadap riset dalam bidang desain sistem pembelajaran ini akan terus berkembang karena selama proses pembelajaran masih terjadi maka persoalan belajar itu tidak akan pernah usai. Seorang Teknolog Pembelajaran harus peka terhadap permasalahan belajar yang terjadi, harus kreatif dan inovatif untuk mengembangkan teknologi dalam pembelajaran dan melakukan rekayasa pembelajaran karena menurut Yusufhadi, objek Teknologi Pendidikan itu adalah masalah belajar. Jadi, dalam konteks *blended learning,* teknolog pembelajaran harus peka dengan masalah belajar yang terjadi di kelas. Di masa mendatang, ketika kemajuan lebih canggih muncul melebihi internet, *blended learning* tidak akan tertinggal. Karena seperti yang Bersin [6] kemukakan bahwa *blended learning* itu tidak saja pencampuran antara pertemuan tatap muka dan *online learning* saja, namun teknologi yang ada pada saat itu (*today*). Saat ini, perkembangan teknologi yang relevan adalah belajar menggunakan jaringan maka pencampurannya antara pertemuan tatap muka dan *online learning,* dan itu bersifat relatif berubah selama teknologi terus berkembang. Sehingga, dengan sistem pembelajaran yang mengikuti arah perkembangan teknologi komunikasi juga dapat meningkatkan interaksi peserta didik dalam interaksi pembelajaran.

C. KESIMPULAN

Desain sistem pembelajaran terdiri dari komponen-komponen penyusunnya, yaitu tujuan pembelajaran, materi, metode dan media, peserta didik, pendidik dan evaluasi. Seperti pada teori sistem lainnya, bahwa sistem itu terdiri dari komponen-komponen penyusunnya yang saling bersinergi. Ketika salah satu komponen tidak berperan sesuai fungsinya maka tujuan dari sistem sulit untuk tercapai. Jika ditarik ke pembelajaran, tujuan akhir dari desain sistem pembelajaran adalah menciptakan suasana belajar yang kondusif agar peserta didik secara optimal mengembangkan potensi diri. Artinya, ketika salah satu komponen pembelajaran tidak melakukan fungsinya maka tujuan pembelajaran tidak tercapai optimal.

Sehubungan dengan upaya untuk menciptakan suasana belajar, dengan perkembangan internet saat ini, sangat memungkinkan melakukan pembelajaran yang lebih fleksibel, dilakukan dimana saja dan kapan saja (*online learning*). Namun, belum dapat dilakukan sepenuhnya karena keterbatasan dari *online learning* itu sendiri. Oleh sebab itu, untuk mempertahankan pertemuan tatap muka perlu dilakukan kombinasi dengan *online learning* yaitu *blended learning,* sehingga potensi peserta didik dapat dikembangkan. Dan perlu dilakukan riset-riset yang berkenaan dengan desain sistem *blended learning* agar dapat memberdayakan komponen pembelajaran dalam upaya mewujudkan suasana belajar dan proses pembelajaran seperti yang disebutkan UU nomor 20 tahun 2003 [2] dan menyelenggarakan pendidikan seperti yang disebutkan PP nomor 32 tahun 2013 [10]. Untuk itu, periset atau *researcher* dalam bidang desain sistem pembelajaran harus memiliki keahlian dalam memahami masalah secara komprehensif, menguasai teori sistem umum, harus menguasai teori belajar, menguasai teori motivasi, menguasai teori persepsi, menguasai teori pembelajaran dan teori kurikulum serta memiliki kreativitas dan inovasi-inovasi dalam mengembangkan teknologi pembelajaran. Dengan tercapainya suasana belajar (UU nomor 20 tahun 2003) dan

penyelenggaraan pendidikan (PP nomor 32 tahun 2013) menjadi salah satu upaya untuk menangani permasalahan pokok dalam pendidikan, yaitu kualitas, pemerataan dan relevansi

D. UCAPAN TERIMA KASIH

Upaya untuk mewujudkan suasana belajar dan proses pembelajaran melalui desain sistem *blended learning* merupakan pekerjaan yang cukup melelahkan, karena menyiapkan pembelajaran di dua dunia, dunia nyata dan dunia maya. Dalam proses perumusan *blended learning* Penulis selalu melibatkan berbagai kalangan untuk melakukan diskusi. Atas waktu yang mereka berikan tanpa menyebutkan satu-persatu nama mereka penulis mengucapkan terima kasih. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada *reviewer* penulisan artikel ini.

*korespondensi : ulfia24@gmail.com

REFERENSI

[1] Nanang Fattah. 2012. *Analisis Kebijakan Pendidikan.* Bandung:Remaja Rosdakarya

[2] Undang-undang nomor 20 tahun 2013 tentang Sistem Pendidikan Nasional

[3] Tilaar. 2004. *Paradigma Pendidikan Nasional.* Jakarta: Rineka Cipta

[4] Cloud, Jaime P. 2010. " *Educating for a Sustainable Future". Curriculum 21 Essential Education for a Changing World. (Heidi. H Jacobs, Ed.).* Alexandria, Virginia USA: ASCD

[5] Smaldino, Sharon E; Lowther, Deborah L; and Russel, James D. 2012. *Instructional Technology and Media for Learning.* Boston: Allyn & Bacon

[6] Bersin, Josh. 2004. *The Blended Learning Book; Best Practices, Proven Methodologies and Lessons Learned.* United Stated: John Wiley & Sona, Inc.

[7] Seels, Barbara B. dan Richey, Rita C. 1994. *Instructional Technology*. Terjemahan. Washington DC: AECT

[8] Thiagarajan. 1974. *Instructional Development for Training Teachers of ExceptionalChildren.* Bloomington: Center for Innovation in Teaching the Handicapped

[9] Dewi Salma Prawiradilaga. 2009. *Prinsip-prinsip Desain Pembelajaran.* Jakarta: Kencana

[10] Peraturan Pemerintah nomor 32 tahun 2013 tentang Standar Pendidikan Nasional

[11] Richey, Rita C., Klein, James D., dan Tracey, Monica W. 2011. *The Instructional Design Knowledge Base.* New York: Routledge

[12] Abizar. 2008. *Interaksi Komunikasi dan Pendidikan.* Padang. UNP Press

[13] Shambaugh, Neal dan Magliaro, Susan D. 2006. *Instructional Design; a Systematic Approache for Reflective Practice.* New York: Pearson Education, Inc,

[14] Richey, Rita C.; Klein, James D dan Tracet, Monika. 2011. *The Instructional Design Knowledge Base.* New York: Routledge

[15] Graham, Charles R. 2005. *The Handbook of Blended Learning.* Bloomington: Indiana University

[16] Watson. John. 2008. *Blended Learning: The Convergence of Online and Face-to-Face Education*. iNACOL Promising Pravtices in Online Learning

[17] Rossert, Allison. & Frazee, R.V. 2006. *Blended Learning Oppurtunities.* www.amanet.org. American Management Assosiation

[18] Gredler, Margaret E. 2011. *Learning and Instruction.* Jakarta: Kencana

[19] Sudardja Adiwikarta. 2007. *"Landasan Sosiologi". Rujukan Filsafat, Teori dan Praktis Ilmu Pendidikan.* Bandung: UPI Press

[20] Santrock, John W. 2007. *Psikologi Pendidikan. Ed*[2]*. Terjemahan.* Jakarta: Kencana

[21] Yusufhadi Miarso. 2011. *Menuai Benih Teknologi Pendidikan.* Jakarta: Kencana

[22] Kurniawati, Rita. 2014. "Pengembangan Model Pembelajaran *blended Learning*

pada Mata Pelajaran Keterampilan Komputer dan Pengelolaan nformasi (KKPI) Kelas XI di SMK Negeri 2 Purwodadi". *Skipsi* tidak diterbitkan. Semarang: Kurikulum dan Teknologi Pendidikan FIP UNNES

[23] Luhde Irin Pradnyawati, I Nengah Suparta, dan Sariyasa. 2014. Pengaruh Strategi *Blended Learning* dalam Pembelajaran Kooperatif terhadap Motivasi Belajar Matematika ditinjau dari Gaya Belajar Siswa di SMP K 2 Harapan. Artikel download

[24] Alwen dan Ulfia. 2015. *Formulasi Strategi Penerapan Blended Learning dalam Mengimplementaskan Kurikulum di Program Studi Teknologi Pendidikan FIP Universitas Negeri Padang.* Penelitian Fundamental

[25] Atwi Suparman. 2005. *Desain Instructional.* Jakarta: PAU-PPAI, Universitas Terbuka

[26] Suparno. 1997. *Filsafat Konstruktivisme dalam Pendidikan.* Yogyakarta: Kanisius

[27] Keller. 2013. *Motivation.* http://www.instructionaldesign.org/concepts/motivation.html. Diakses 25 Agustus 2015

[28] Bimo Walgito. 2010. *Pengantar Psikologi Umum.* Yogyakarta: Andi

[29] Reigeluth, Charles M. 1999. *Instructional-Design Theories and Models: a new paradigm of instructional theory Volume II.* New Jersey: Lawrance Erlbaum Associates, Publishers

[30] Zais, R.S. 1976. *Curriculum: Principles, Foundations*. New York: Harper & Row Publishers

[31] Orntein, A.C. & Hunkins, F.P. 2013. *Curriculum: Principles, Foundations and Issues.* Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall

[32] Ulfia Rahmi. 2015. *Survey Kesiapan Peserta Didik dan Pendidik Dalam Melakukan Online Learning.* Penelitian Mandiri

[33] Branch, Robert Maribe. 2009. *Instructional Design: The ADDIE Approach*. London: Spinger

[35] Brown, Abbie & Green Timpthy. D. 2011. *The Essentials of Instructional Design; Connecting Fundamental Principles with Process and Practice.* Boston: Pearson Education, Inc.

[36] Morrison, Gari R,; Ross, Steven M,; and Kemp, Jerrold E. 2004. *Designing Effevtive Instruction. 4th Edition.* John Wiley & Sons, Inc

BIODATA PENULIS

1. Ali Shodikin

Judul Karya:
Pengembangan Bahan Ajar Matematika untuk Meningkatkan Kemampuan Penalaran dan Pemacahan Masalah dengan Strategi Abduktif-Deduktif.

Ali Shodikin, M.Pd. menamatkan S1 Program Studi Pendidikan Matematika di Universitas Negeri Semarang (UNNES) pada tahun 2012. Setelah menyelesaikan S1, penulis melanjutkan program magister Program Studi Pendidikan Matematika di Universitas Pendidikan Indonesia (UPI) Bandung dengan program Beasiswa Unggulan. Selama menempuh S2, penulis bersama Forum Komunikasi Mahasiswa (FKM) UPI telah menerbitkan beberapa buku, diantaranya bertajuk “Ekspedisi Kurikulum 2013”, “Generasi Emas Pendidikan Indonesia”, dan “Lentera Indonesia”. Pada tahun 2014, penulis menyelesaikan pendidikan magister di UPI kemudian mengabdi sebagai dosen di Universitas Islam Darul ‘Ulum (UNISDA) Lamongan hingga saat ini. Selain mengembangkan strategi abduktif-deduktif untuk pembelajaran dan bahan ajar, penulis tengah fokus pada pengembangan strategi ini dalam pengembangan media video matematika (videomatografi). Penulis juga berminat dalam penelitian pengembangan pendidikan luar sekolah, media pembelajaran interaktif, dan etnomatematik.

2. Hesty Susanti

Judul Karya:
Pencitraan Jarum Anestesi dengan Gelombang Ultrasonic.

Hesty Susanti lahir di Tanjungpandan, Belitung. Setelah menamatkan sekolah menengah di SMAN 1 Pangkalpinang, ia menempuh pendidikan sarjana di Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung dan pendidikan Magister di Instrumentasi dan Kontrol, di kampus yang sama. Saat ini, ia sedang melakukan penelitian untuk melanjutkan studi doktoralnya di bidang *medical engineering*, khususnya di bidang pencitraan ultrasonik untuk keperluan diagnostik medik di Institut Teknologi Bandung bekerja sama dengan Ruhr University Bochum, Jerman, sambil menjadi asisten riset paruh waktu di Laboratorium Instrumentasi Medik di kampus almamaternya. Perempuan yang bercita-cita menjadi peneliti dan *science journalist* ini biasa mengisi waktu luangnya dengan bepergian, hiking, membaca, menulis dan memotret. Selain bergelut di dunia riset *medical engineering*, ia aktif dalam bidang sastra dan telah menerbitkan buku pertamanya yang berjudul “Harum Hujan Bulan November”, yang berisi kumpulan puisi dan esai sastra.

3. Irma

Judul Karya:
Aplikasi Molekuler dalam Mendukung Pemuliaan Bibit Unggul Berbasis Sumber Daya Itik Lokal.

Penulis dilahirkan di Bogor, 04 Oktober 1986. Tahun 2005 memperoleh beasiswa dari *Tanoto Foundation* untuk studi di Ilmu Produksi dan Teknologi Peternakan, Fakultas Peternakan, IPB. Pernah bekerja sebagai *System and Procedure Officer* di *Business Process Improvement Departement*, PT. Sierad Produce Tbk sejak 2009 hingga 2012. Penulis berkesempatan melanjutkan studi magister pada tahun 2012 di Sekolah Pascasarjana IPB yang berasal dari beasiswa Kementerian Pendidikan Nasional dengan jurusan Ilmu Pemuliaan Ternak dan Genetika Molekuler pada departemen yang sama. Sejak tahun 2015 diterima menjadi pegawai negeri sipil di Direktorat Perbibitan dan Produksi Ternak, Direktorat Jenderal Peternakan dan Kesehatan Hewan, Kementerian Pertanian, kantor pusat Ragunan-Jakarta. Beberapa prestasi, penghargaan dan training yang pernah diperoleh diantaranya yaitu *2nd Best Workshop, Mie University-Japan*, 2013; 2nd *Winner Young Entrepreneur* APEC, *Unthinkable Weeks*, Bali, 2013; *3rd Best Essai, Sugeng Sarjadi School of Government*, Jakarta, 2013; *3rd Best Business Plan, Technopreneur Camp*, Kemenristek, Serpong, 2013; Anugrah Penulis Muda, Kementerian Pertanian, Tahun 2012 dan 2013; Mahasiswa Berprestasi, Dept. IPTP IPB, Tahun 2008 dan 2009; Mahasiswa Berprestasi Bidang Ekstrakurikuler, IPB *Rector Award*, 2008; *2nd Award in National Food Innovation Competition*, Bogor, 2007; *3rd Scientific Article Award, RS. Bogor Medical Care*, 2005.

4. Rizki A. Mangkuto

Judul Karya:
Pemodelan dan Simulasi Jendela Virtual dalam Bangunan.

Rizki A. Mangkuto menamatkan pendidikan S1 pada Program Studi Teknik Fisika, Institut Teknologi Bandung pada tahun 2006, S2 pada program studi yang sama (2009), serta S3 pada Unit Building Physics and Services, Technische Universiteit Eindhoven, Negeri Belanda di bidang fisika bangunan (2014). Fokus penelitian doktoralnya adalah tentang pemodelan dan simulasi pencahayaan alami virtual di dalam bangunan. Sejak tahun 2015 sampai sekarang, penulis bekerja sebagai staf pengajar di Program Studi Teknik Fisika ITB, dengan bidang keahlian fisika bangunan, khususnya teknik pencahayaan, baik pencahayaan alami maupun buatan. Selain itu, penulis juga aktif menjadi anggota serta memiliki sertifikasi ahli iluminasi madya dari Himpunan Teknik Iluminasi Indonesia (HTII).

5. Muhammad Mufti Azis

Judul Karya:
Mengenal Lebih Dekat Katalisis Otomotif Sebagai Pembersih Gas Buang kendaraan Diesel.

Muhammad Mufti Azis menamatkan pendidikan S1 Teknik Kimia dari Universitas Gadjah Mada Yogyakarta pada tahun 2007. Selepas itu, ia melanjutkan pendidikan jenjang S2 dan S3 pada bidang yang sama di *Chalmers University of Technology, Sweden* hingga tahun 2015. Saat ini, ia bekerja sebagai tenaga pendidik dan peneliti pada Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta. Minat penelitiannya meliputi teknik reaksi kimia, energi dan *sustainable development*. Pada tahun 2012-13, ia menjadi ketua perhimpunan pelajar Indonesia di Swedia atau yang lebih dikenal sebagai PPI Swedia. Saat ini, juga turut aktif menjembatani kerja sama penelitian antara kedua negara. Sebagai tenaga pendidik, ia mengajar pada Universitas Gadjah Mada yang meliputi teknik reaksi kimia dan metodologi penelitian pada jenjang Sarjana dan Magister

6. Vina Sari Yosephine

Judul Karya:
Ulasan Optimisasi Lini Produksi: Alokasi Buffer dan Mesin Fleksibel.

Vina Sari Yosephine menyelesaikan pendidikan S1 di bidang Teknik Mesin dari Institut Teknologi Bandung pada tahun 2006 dan S2 Teknik Industri dari Departemen Industrial dan *System Engineering* di *Korea Advanced Institute of Science and Technology* (KAIST) pada tahun 2013. Saat ini ia sedang mengikuti program Doktoral di Departemen Industrial dan Sistem KAIST hingga tahun 2016. Riset yang ditekuninya yaitu teknologi dan juga pengajaran inovatif di area Teknik Industri dan *Operation Research*. Saat ini ia sedang aktif melakukan penelitian di bidang rekayasa sistem produksi terdepan.

7. Ferry Anggoro Ardy Nugroho

Judul Karya:
Nanoplasmonics: Pemberi Cahaya pada Sains dan Teknologi.

Ferry Anggoro Ardy Nugroho adalah seorang mahasiswa S3 di *Chalmers University of Technology*, Swedia. Sebelumnya, Ferry mendapatkan gelar S1 (*B. Eng Electrical and Electronics Engineering, First Class Honor*) dari *Nanyang Technological University*, Singapura dan S2 (*M.Sc Nanoscience and Nanotechnology, summa cum laude*) dari *Katholieke Universiteit Leuven*, Belgia, dan *Chalmers University of Technology*, Swedia. Selama masa pendidikan ini, Ferry memiliki pengalaman riset di berbagai bidang nanoteknologi mulai dari *supercapacitor*, *graphene*, nanopartikel magnetik, dll. Saat ini riset Ferry berfokus kepada interaksi gelombang elektromagnetik (cahaya) dengan nanopartikel logam, atau lebih dikenal dengan *nanoplasmonics*. Lebih detailnya, Ferry mengembangkan aplikasi *nanoplasmonics* sebagai sensor nano untuk mempelajari materi untuk bidang energi seperti sensor hidrogen, detektor CO2 dan juga *polymer* untuk sel surya. Selain aplikasi, dengan *nanoplasmonic* Ferry juga mencoba mempelajari sifat fundamental nanopartikel seperti interaksi hidrogen dengan logam dan logam *alloy* (campuran) dan juga mengembangkan metode-metode nanofabrikasi baru menggunakan metode *colloidal lithography*.

8. Anton Rahmadi

Judul Karya:
Desain Produk Suplemen Labu dan Minyak Sawit Merah untuk Pencegahan Kekurangan Vitamin A.

Anton Rahmadi, lahir 1 April 1980, adalah dosen di Jurusan Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman, Samarinda, Indonesia. Gelar PhD diperoleh pada tahun 2013 dari Fakultas Kedokteran, *University of Western Sydney*, Australia dengan penghargaan *Best Presenter in Session* pada PhD Annual Research Forum 2012. Sebelumnya, ia dianugerahi dengan M.Sc dari *University of New South Wales*, Australia di bidang Ilmu dan Teknologi Pangan pada tahun 2008 dengan *High Distinction* dalam *Research Project*. Sarjana Teknologi Pertanian diselesaikannya di Institut Pertanian Bogor, Indonesia dengan Cum Laude dan mendapat penghargaan sebagai Finalis Mahasiswa Teladan tahun 2001. Saat ini ia adalah Ketua Perhimpunan Ahli Teknologi Pangan Indonesia (PATPI) cabang Kalimantan Timur. Pada tahun 2014, h-indexnya 4 dan i10-indeksnya 2. Minat penelitiannya saat ini adalah pangan fungsional, antioksidan dan penanganan pascapanen dari produk olahan lokal.

9. Almando Geraldi

Judul Karya:
Synthetic Scaffold System sebagai Solusi untuk Meningkatkan Efisiensi Proses Produksi Senyawa Kimia Bernilai Tinggi Menggunakan Mikroorganisme.

Almando Geraldi dilahirkan di Yogyakarta pada tanggal 21 April 1987. Setelah menyelesaikan pendidikannya di SMA 3 Yogyakarta, melanjutkan ke jenjang S1 di Institut Teknologi Bandung jurusan Mikrobiologi hingga akhirnya meraih gelar Sarjana Sains pada tahun 2008. Pengalaman profesional pertamanya adalah sebagai kepala laboratorium mikrobiologi di perusahaan farmasi, PT Taisho Pharmaceutical Indonesia yang dijalani pada tahun 2009-2011. Pada tahun 2011 keinginannya untuk kembali menuntut ilmu membawanya melanjutkan jenjang S2 dan S3 di salah satu universitas terbaik di Korea Selatan dan Asia yaitu *Korea Advanced Institute of Science and Technology* (KAIST) yang dijalaninya hingga saat ini. Di departemen *Biological Sciences*, KAIST, Almando Geraldi atau lebih dikenal dengan panggilan Gerry, aktif sebagai *research assistant* di *Genome and Peptide Engineering Laboratory*. Bidang yang menjadi minatnya adalah *synthetic biology* khususnya konstruksi *synthetic structure* untuk meningkatkan kualitas produksi protein di bakteri *E. coli*. Hasil penelitiannya di bidang tersebut telah dipublikasikan melalui berbagai konferensi internasional antara lain: *The Sixth International Meeting of Synthetic Biology* di London pada 2013, dan *Metabolic Engineering* X di Vancouver pada 2014. Gerry bercita-cita memopulerkan *synthetic biology* ke pelajar dan mahasiswa di Indonesia dan bersama-sama mengaplikasikan *synthetic biology* di bidang energi dan kesehatan khususnya produksi biofuel, vaksin, dan antibodi menggunakan mikroba.

10. Ulfia Rahmi

Judul Karya:
Desain Sistem Pembelajaran *Blended Learning* : Upaya Peningkatan Kualitas Pendidikan di Indonesia

Ulfia Rahmi berasal dari nagari Sariak Laweh Kabupaten Lima Puluh Kota, Sumatera Barat. Lahir tanggal 24 Mei 1987 dan dibesarkan dalam lingkungan keluarga yang sederhana namun memiliki cita-cita tinggi. Riwayat pendidikan penulis SD N 39 Sariak Laweh (2000), MTsN Payakumbuh (2003), SMA N 2 Payakumbuh (2006), S1 Teknologi Pendidikan Universitas Negeri Padang (UNP) (2010), dan S2 Teknologi Pendidikan UNP (2013). Penulis bergabung dengan program Studi Teknologi Pendidikan UNP sebagai salah satu dosen sejak tahun 2014. Ketertarikan penulis terhadap ilmu pengetahuan dan memiliki hobi membaca menjadikan penulis aktif meneliti mengenai *blended learning*, *message design*, media pembelajaran dan desain sistem pembelajaran. Hasil penelitian tersebut di-*publish* dalam beberapa jurnal dan disampaikan pada pertemuan-pertemuan ilmiah. Saat ini penulis dalam tahap penyelesaian program doktoral.

9 772338 1043