



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



i-PROSES SEBAGAI TRANSFORMER DALAM TEKNOLOGI KIMIA

Profesor Yogi Wibisono Budhi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Bandung

Aula Barat ITB
11 Februari 2023

Orasi ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

i-PROSES SEBAGAI TRANSFORMER DALAM TEKNOLOGI KIMIA

Orasi ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

i-PROSES SEBAGAI TRANSFORMER DALAM TEKNOLOGI KIMIA

Profesor Yogi Wibisono Budhi

11 Februari 2023
Aula Barat ITB

Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:

i-PROSES SEBAGAI TRANSFORMER DALAM TEKNOLOGI KIMIA

Penulis : Profesor Yogi Wibisono Budhi
Editor Bahasa : Rina Lestari
Layout : Ripky
Cetakan I : 2023
ISBN : 978-623-297-275-9



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

PRAKATA

Dalam buku ini, penulis mempersembahkan kepada pembaca sebuah paradigma baru dalam transformasi pengembangan proses yang kreatif, inovatif, dan kompetitif yang dikenal sebagai Intensifikasi Proses (i-Proses). Selain memberikan bahasan terkait pentransformasian proses-proses dalam teknik kimia, penulis juga menyampaikan sejumlah hasil penelitian yang telah dilakukan sejak tahun 2000 yang mengusung topik terkait intensifikasi proses. Karenanya, buku ini diberi judul **“i-Proses sebagai Transformer dalam Teknologi Kimia”**.

Penulis memanjatkan puji syukur kehadiran Allah Swt., bahwasanya atas berkat dan rahmat-Nya, penulis dapat menuntaskan naskah orasi ilmiah ini dengan baik. Penulis juga ingin menyampaikan penghargaan, rasa hormat, dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar ITB yang telah memberikan kesempatan untuk menyampaikan orasi ilmiah pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar ITB. Orasi ilmiah ini merupakan salah satu bentuk pertanggungjawaban dan komitmen akademik atas jabatan Guru Besar dalam bidang Intensifikasi Proses. Semoga tulisan ini dapat memberikan pengetahuan baru yang inspiratif dan membuka cara berpikir yang kreatif dan inovatif yang bermanfaat bagi para pembaca.

Bandung, 11 Februari 2023

Yogi Wibisono Budhi

SINOPSIS

Intensifikasi proses (i-proses) merupakan salah satu kaidah baru dalam pengembangan proses atau metode proses yang mentransformasikan paradigma konvensional menjadi paradigma modern yang bersifat kreatif dan inovatif, dan jika dibandingkan dengan proses konvensional akan membawa perubahan secara radikal dan perbaikan yang sangat substansial. Terjadinya pergeseran paradigma (*paradigm shift*) dalam merancang dan mengembangkan proses ini mengubah pola lama menjadi pola baru yang harus mampu meningkatkan kinerja proses secara berarti. Transformasi dalam pengembangan proses ini membuka terobosan baru dengan karakteristik *smaller, cheaper, safer, dan slicker*. Sejumlah keuntungan dalam intensifikasi proses yang dapat diidentifikasi adalah reduksi ukuran peralatan hingga ribuan kali, proses lebih mudah dan aman, reduksi kebutuhan energi, memanipulasi selektivitas untuk mencapai distribusi produk yang diinginkan, waktu mencapai tahap komersial lebih singkat, produktivitas tinggi, dan citra yang lebih baik. Pola aliran searah dalam reaktor unggun tetap dikembangkan menjadi pola aliran bolak-balik (*reverse flow operation*), pendekatan *scale-up* untuk mencapai kapasitas komersial dikembangkan menjadi *numbering-up* atau *scale-out*, rancangan pada skala besar dikembangkan menjadi skala *microscale* atau bahkan *nanoscale*. Pengembangan berbagai rancangan peralatan dan metode baru tersebut mampu mempercepat proses-proses perpindahan massa dan panas sehingga limitasi proses selanjutnya hanya ditentukan oleh kinetiknya. *Re-engineering* dalam intensifikasi proses ini merupakan transformer dalam menyederhanakan mekanisme proses dan mencapai kinerja yang unggul.

Dalam perkembangannya sejak zaman Renaissance, intensifikasi proses telah dipahami dalam konteks yang lebih luas yang mencakup *sustainable technology development* dan *green engineering*. Dalam struktur intensifikasi proses, pilar-pilar yang menopang ilmu intensifikasi proses bahkan telah berkembang dari 2 pilar utama berupa pengembangan peralatan proses dan metode proses, menjadi 3 pilar utama dengan tambahan pengembangan material maju. Ketiga pilar tersebut dapat diterapkan baik secara tunggal maupun kombinasi 2 atau bahkan 3 pilar guna mencapai kinerja proses yang unggul.

Di dalam naskah ini, berbagai hasil penelitian yang mengusung tema intensifikasi proses disajikan. *Reverse flow reactor* (RFR) telah dikaji untuk mengolah tar, emisi gas metana, emisi uap bensin, oksidasi VOC, dan oksidasi amoniak. *Dynamic catalytic converter* dikembangkan untuk menurunkan *light-off temperatur* dan waktu pemanasan yang lebih cepat selama *start-up*, teknologi pemisahan hidrogen dari campuran gas hasil reformasi menggunakan membran berbasis Pd dengan paduan Ag yang dioperasikan secara dinamik, pengembangan *nanobubble-nanocatalyst-nanosupport* (Nano³) dalam fotokatalitik CO₂ menjadi solar fuel (metana, metanol, asam format, dll.), nanokatalis Ni dengan penyangga MCM-41 atau penyangga berbasis serium dan zirconium untuk *dry reforming of methane* (kasus gas alam Natuna), dan proses hidrolisis minyak nabati secara enzimatis menggunakan lipase/CNCs untuk menghasilkan asam lemak sebagai prekursor *green diesel*.

Berbagai aplikasi intensifikasi proses masih sangat terbuka untuk dikembangkan di berbagai bidang dalam teknologi proses guna mengolah sumber daya alam yang terkandung dalam bumi Indonesia secara kreatif, inovatif, dan kompetitif. Karenanya, teknologi yang dikembangkan yang mentransformasikan paradigma konvensional menjadi paradigma modern ini diharapkan mampu berdiri kokoh dan tidak akan padam.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	v
SINOPSIS	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
1. PENDAHULUAN	1
2. PENGERTIAN, PERAN, DAN KEMASLAHATAN	2
3. KELAHIRAN DAN PERKEMBANGAN INTENSIFIKASI PROSES	3
4. MANFAAT DAN STRUKTUR INTENSIFIKASI PROSES	6
5. IMPLEMENTASI INTENSIFIKASI PROSES	13
5.1 Teknologi <i>Reverse Flow Reactor</i>	13
5.2 Teknologi <i>Dynamic Catalytic Converter</i>	17
5.3 Teknologi <i>Dense Membrane dan Membrane Reactor</i>	18
5.4 Teknologi <i>Nanobubble-Nanocatalyst-Nanosupport (Nano³)</i>	19
5.5 <i>Material Maju</i>	21
6. PENUTUP	23
7. UCAPAN TERIMA KASIH	25
DAFTAR PUSTAKA	27
CURRICULUM VITAE	29

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	I-proses sebagai transformer menuju paradigma baru pengembangan teknologi proses yang kompetitif	5
Gambar 2.	Keutamaan intensifikasi proses dalam meningkatkan kinerja proses.	7
Gambar 3.	Integrasi proses dalam transformasi rancangan yang dapat menyederhanakan unit proses secara berarti.	7
Gambar 4.	Integrasi HTS-LTS-PSA menjadi reaktor membran Pd.	8
Gambar 5.	Transformasi paradigma perancangan reaktor. Microreactor mampu meningkat laju perpindahan massa, perpindahan panas, dan kinetika reaksi yang cepat sehingga memungkinkan volume reaktor menjadi kecil.....	9
Gambar 6.	<i>Scale-up</i> (tradisional) ditransformasi menjadi <i>scale-out</i>	9
Gambar 7.	Struktur intensifikasi proses yang terdiri dari pilar utama pengembangan metode proses, peralatan proses dan material maju.....	12
Gambar 8.	<i>Re-engineering</i> dalam intensifikasi proses sebagai transformer dalam menyederhanakan mekanisme proses. ..	13
Gambar 9.	Konfigurasi: (a) reaktor aliran searah, (b) RFR RFR dengan Modulasi Komposisi.....	14
Gambar 10.	Peningkatan konsentrasi oksigen teradsorp akibat mode RFR dengan modulasi komposisi.	15
Gambar 11.	Konfigurasi RFR dengan aliran umpan samping: transformasi mode operasi gabungan antara sistem <i>batch</i> dan kontinu.	15
Gambar 12.	Distribusi oksigen teradsorpsi konvensional (kiri) dan RFR umpan samping (kanan).....	16
Gambar 13.	Model mekanisme oksidasi CH ₄ dalam sistem dinamik.	17
Gambar 14.	Rancangan aliran fluida di dalam modul membran: pengaruh laju alir/aliran tangensial terhadap waktu tinggal.	19
Gambar 15.	Peta penelitian nano ³ untuk mencapai kinerja tinggi.	20

1. PENDAHULUAN

Industri proses memainkan peran sentral yang penting dalam mengaktivasi dan mentransformasi roda perekonomian bangsa. Hal ini dapat dilihat dari tingginya tingkat penyerapan modal, penciptaan lapangan kerja, pengolahan sumber daya alam, dan pemenuhan berbagai produk untuk kebutuhan domestik dan bahkan ekspor. Kondisi ini yang kemudian akan memberikan nilai tambah secara berlipat di berbagai sektor kehidupan. Karena itu, industri kimia diharapkan menjadi penggerak utama pembangunan industri nasional untuk mendukung proses pembangunan bangsa secara berkelanjutan dan menuju visi Indonesia Emas 2045, yaitu untuk mewujudkan tingkat kesejahteraan rakyat Indonesia yang lebih baik dan merata dengan kualitas manusia yang lebih tinggi, ekonomi Indonesia yang meningkat menjadi negara maju dan salah satu dari 5 kekuatan ekonomi terbesar dunia, pemerataan yang berkeadilan di semua bidang pembangunan dalam bingkai Negara Kesatuan Republik Indonesia yang berdaulat dan demokratis.

Dalam industri proses, intensifikasi proses telah membuka khazanah baru secara spektakuler yang pengembangan teknologinya dibangun melalui pilar-pilar teknik kimia yang ditransformasi menjadi teknik kimia modern. Dalam perkembangan terkini, ilmu intensifikasi proses mulai dimekarkan secara terstruktur dan sistematis menurut jalur pemutakhiran peralatan proses maupun jalur kebaruan metodologi, dan bahkan jalur material maju. Dalam satu dekade terakhir, perkembangan material maju yang sangat kreatif dan mampu menghasilkan kinerja proses yang lebih unggul telah menjadikannya sebagai pilar baru dalam yang mempercepat proses transformasi teknologi kimia melalui intensifikasi proses. Beberapa contoh intensifikasi proses yang sedang dikembangkan adalah reaktor mikro atau *microreactor* (pemutakhiran peralatan) untuk menghasilkan gas hidrogen secara insitu dengan menggunakan bahan baku metanol, reaktor aliran bolak-balik atau *reverse flow reactor* (kebaruan metodologi) untuk mengkonversikan emisi gas metana yang sangat encer secara katalitik, reaktor membran berbasis Pd untuk melangsungkan reaksi penggeseran gas air untuk menghasilkan dan sekaligus memisahkan hidrogen (integrasi sistem), dan lain-lain. Mengacu pada tuntutan untuk memperbaiki kinerja proses secara berarti di industri kimia dan dengan dikembangkannya kaidah intensifikasi proses, penyampaian pengetahuan tentang intensifikasi proses dalam bidang

teknik kimia dinilai sangat relevan pada saat ini, khususnya kepada para dosen dan mahasiswa di bidang proses, serta para praktisi yang bekerja di berbagai bidang yang terkait dengan proses. Intensifikasi proses merupakan bukti nyata untuk menjawab tuntutan isu-isu kontemporer untuk dipahami oleh mahasiswa sebagaimana yang juga menjadi perhatian badan akreditasi internasional. Di dalam buku ini, intensifikasi proses akan dikemukakan secara komprehensif yang mengacu dari berbagai pustaka dan hasil-hasil penelitian. Secara umum, pengembangan bidang intensifikasi proses ini dipandang perlu dan relevan dengan kebutuhan pengembangan proses di industri kimia saat ini dan masa yang akan datang. Karena itu, buku ini juga ditujukan untuk memberikan sebuah pandangan akan pentingnya materi intensifikasi proses sebagai salah satu penopang pengembangan teknologi proses.

Adapun lingkup kajian yang menjadi pokok perhatian dalam buku ini adalah pengertian dasar, peran, dan kemaslahatan; sejarah perkembangan intensifikasi proses; manfaat dan struktur intensifikasi proses, dan signifikansi intensifikasi proses dalam pendidikan tinggi teknik kimia. Adapun harapan yang diinginkan dari uraian materi dalam buku ini adalah dideseminasikannya ilmu intensifikasi proses sehingga pembaca mampu memahami, menguasai, dan menerapkan serta mengembangkan pengetahuan dan ketrampilan di bidang teknik kimia dengan motivasi, inovasi, dan kreativitas yang terpacu untuk mengembangkan teknologi proses secara kompetitif.

2. PENGERTIAN, PERAN, DAN KEMASLAHATAN

Salah satu kecenderungan yang sangat penting dalam pengembangan teknologi proses adalah intensifikasi proses (*Process Intensification*). Intensifikasi proses yang dalam buku ini dijuluki dengan i-Proses (*i* sebagai Intensifikasi) telah menarik perhatian banyak peneliti di berbagai negara. Untuk menjembatani pertukaran informasi dan ajang diskusi para peneliti dan praktisi, berbagai seminar internasional yang bertemakan intensifikasi proses telah dilakukan. Di samping itu, sejumlah aplikasi intensifikasi proses skala komersial juga telah terjadi.

Intensifikasi proses merupakan kaidah baru yang dikembangkan di industri kimia untuk memperbaiki kinerja proses secara berarti. Perbaikan kinerja proses yang dimaksud dalam konteks ini harus menunjukkan angka kelipatan yang sangat besar, atau bermakna besar sekalipun secara kuantitatif mempunyai kelipatan yang relatif kecil. Intensifikasi proses didefinisikan sebagai metode pengembangan proses dan sistem pemroses yang bersifat inovatif dan kreatif yang mampu membawa perubahan secara substansial dalam fabrikasi (bio)-kimia, terutama jika dibandingkan dengan metode proses atau peralatan yang digunakan saat ini (konvensional). Intensifikasi proses bahkan telah menunjukkan kecenderungan yang banyak diminati oleh ilmuwan dan praktisi dalam bidang teknik kimia dan teknologi proses yang ditunjukkan dengan munculnya kompetisi guna menghasilkan teknologi yang lebih unggul. Filosofi intensifikasi proses telah dikarakteristikan secara tradisional dengan kata kunci: *smaller*, *cheaper*, *safer*, dan *slicker*.

Beberapa pengembang intensifikasi proses menuliskan makna intensifikasi proses dalam slogan “*using much less to produce much more*”. “*Using much less*” dapat diartikan sebagai penggunaan bahan baku, waktu proses, ruang, konsumsi energi, investasi, dll. yang lebih sedikit dibandingkan cara konvensional; sedangkan “*produce much more*” dapat diartikan sebagai derajat konversi, efisiensi, selektivitas, produktivitas, laju perpindahan panas dan massa, dll. Dalam beberapa kasus, perubahan persentase kinerja proses melalui intensifikasi dapat mencapai puluhan hingga ribuan kali lebih besar.

3. KELAHIRAN DAN PERKEMBANGAN INTENSIFIKASI PROSES

Menurut Miriam-Webster's Collegiate Dictionary, kata intensif (*intensive*) mungkin telah muncul sekitar abad ke-15. Tidak berselang lama kemudian, tepatnya pada puncak masa Renaissance, yaitu ketika Georgius Agricola mempublikasikan buku “*De Re Metallica*” yang dikenal sebagai buku teks komprehensif yang pertama pada rekayasa pertambangan dan metalurgi. “*De Re Metallica*” banyak memberikan ilustrasi potongan-potongan kayu yang menunjukkan peralatan dan metode proses yang digunakan pada zaman

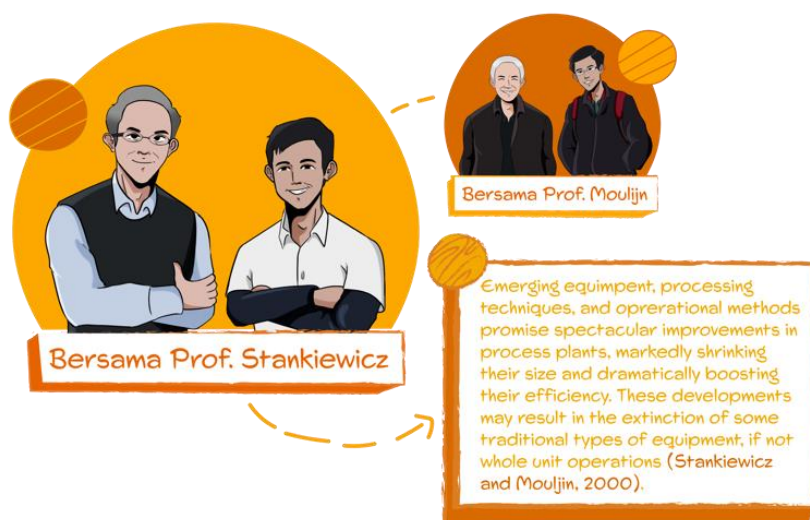
Agricola. Dalam berbagai potongan kayu tersebut, banyak dijumpai secara jelas adanya pemikiran yang berorientasi elemen-elemen yang menggambarkan rangkaian unit proses suatu pabrik kimia.

Dalam literatur ilmiah, istilah intensifikasi mulai muncul pada pertengahan tahun 1960-an dan awal 1970-an, yang sebagian besar publikasinya berasal dari kawasan Eropa Timur dengan kajian pada pemrosesan metalurgi, dan bukan pada pemrosesan kimia. Tentu saja, makalah-makalah tersebut masih memahami intensifikasi proses sebagai perbaikan proses (*process improvement*).

Kelahiran intensifikasi proses sebagai disiplin teknik kimia muncul beberapa tahun kemudian di Inggris yang ditandai dengan publikasi dari Ramshaw (1983) dari ICI New Science Group yang menggambarkan aplikasi medan sentrifugal (disebut “HiGee”) dalam proses distilasi. Beberapa bulan kemudian, Annual Research Meeting bertajuk *Process Intensification* berlangsung di UMIST, Manchester. Yang menarik dalam pertemuan itu adalah disajikannya sebuah artikel yang membahas tentang pemrosesan biji emas menggunakan metode yang intensif. Baik dalam artikel Ramshaw maupun laporan dari seminar di UMIST, definisi pertama dari intensifikasi proses berkenaan dengan upaya pembuatan alat yang lebih kompak yang ukurannya dapat direduksi dalam order 2–3 kalinya.

Hingga tahun 1990-an, intensifikasi proses masih merupakan bagian dari disiplin-disiplin di Inggris dengan fokus pada 4 hal utama: penggunaan gaya sentrifugal, alat perpindahan panas yang kompak, pencampuran yang intensif, dan teknologi-teknologi yang diintegrasikan. Mulai pada masa-masa tersebut, intensifikasi proses mulai menjadi bisnis internasional yang mendorong para peneliti untuk mengembangkan bidang-bidang baru yang terkait. Di Belanda, Technische Universiteit Delft (TUD) yang bekerja sama dengan DSM mengembangkan sebuah reaktor terstruktur. Grup lain di TUD mengembangkan teknologi adsorpsi sentrifugal. Di Perancis, Greth CEN melangsungkan penelitian dengan topik alat penukar panas yang kompak. Di Jerman, penelitian tentang mikroteknologi dilakukan di Institut für Mikrotechnik Mainz. Di USA, sejumlah pusat penelitian mengembangkan peralatan baru seperti *microchannel heat exchanger* (Pacific Northwest National Laboratory) dan *microreactor* (MIT). Di Indonesia, penelitian tentang reaktor tak tunak mulai dikembangkan sejak 2005 yang terdiri dari reaktor aliran

bolak-balik (*reverse flow reactor*) dan *automotive catalytic converter*. Reaktor aliran bolak-balik dikembangkan untuk mengolah tar yang terkandung di dalam gas produser hasil gasifikasi biomassa. Selain itu, reaktor aliran bolak-balik juga dikembangkan untuk menyingkirkan emisi metan yang sangat encer yang dilepaskan dari tambang batu bara, atau emisi uap bahan bakar minyak yang terlepas dari SPBU. Gas metan ini, jika tidak diolah, dapat menyebabkan efek rumah kaca yang tingkat bahayanya adalah 21 kali lebih besar daripada CO₂. Reaktor aliran bolak-balik yang digunakan dapat bersifat ototermal dan bahkan dapat menghasilkan sejumlah panas yang cukup berarti dan dapat digunakan untuk menghasilkan energi, seperti energi listrik.



Gambar 1. I-proses sebagai transformer menuju paradigma baru pengembangan teknologi proses yang kompetitif

Pada tahun 2007, para peneliti di bidang intensifikasi proses di Belanda memotori European Roadmap for Process Intensification yang mengundang ahli-ahli di berbagai bidang dari berbagai negara. Penulis yang dikenal sebagai *leading expert* di bidang teknologi *reverse flow reactor* diundang untuk menyampaikan pandangannya terhadap perkembangan teknologi di bidang tersebut bersama 70 ahli berbagai bidang di seluruh dunia (Gambar 1). Sebagai hasilnya, 46 laporan teknologi telah dideskripsikan oleh para ahli di bidangnya dalam “*technology report*”. Stankiewicz dan Moulijn telah memelopori pengembangan dan perumusan intensifikasi proses di perguruan tinggi dan juga implementasinya di dunia industri. Di Teknik Kimia

ITB, Intensifikasi Proses telah dimasukkan ke dalam kurikulum program studi Teknik Kimia sebagai mata kuliah pilihan untuk mahasiswa S1 dan S2 yang sekaligus juga untuk merespon *contemporary issue*, khususnya dalam kegiatan akreditasi internasional.

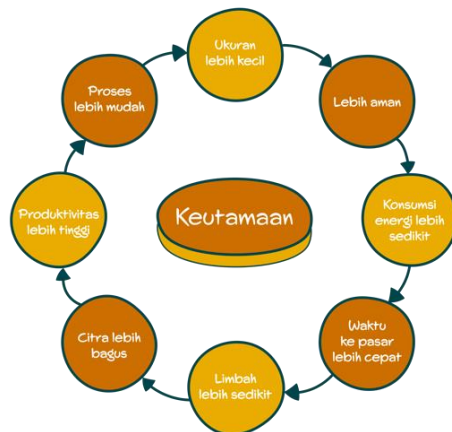
Intensifikasi proses, selain telah memasuki sektor kimia komoditas, juga telah berkembang ke arah bioproses dan fermentasi. Karena itu, definisi intensifikasi proses juga telah berubah secara drastis. Intensifikasi proses tidak lagi secara eksklusif dikenal sebagai pengembangan peralatan yang berukuran sangat kecil, melainkan juga dipahami sebagai pengembangan peralatan, pemrosesan, dan metode proses baru yang jika dibandingkan dengan proses konvensional dapat menawarkan perbaikan yang sangat substansial. Filosofi intensifikasi awalnya proses dicirikan dengan *smaller, cheaper, safer, dan slicker*. Saat ini, intensifikasi proses telah dipahami dalam konteks yang lebih luas yang mencakup *sustainable technology development* dan *green engineering*. Dalam struktur intensifikasi proses, pilar-pilar yang menopang ilmu intensifikasi proses bahkan telah berkembang sebagaimana yang akan dibahas pada bagian berikut.

4. MANFAAT DAN STRUKTUR INTENSIFIKASI PROSES

Manfaat Intensifikasi Proses

Transformasi proses melalui intensifikasi proses memberikan banyak manfaat. Beberapa manfaat yang telah diidentifikasi sampai saat ini ditunjukkan dalam Gambar 2 dan diuraikan dalam butir-butir berikut.

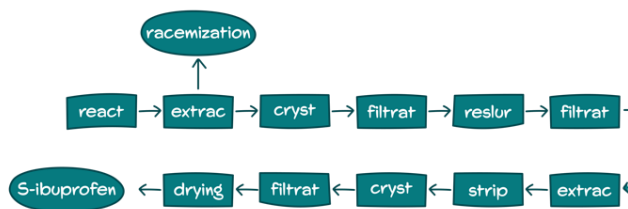
- a. Ukuran alat lebih kecil
 - Menggabungkan fungsi alat yang berbeda menjadi satu alat yang lebih kompak (integrasi proses) diperankan oleh reaktor membran, *microreactor*, dll. Dalam proses produksi S-ibuprofen, DSM telah menerapkan hasil integrasi proses dari yang sebelumnya melibatkan 11 unit proses, kemudian direduksi menjadi hanya 5 unit proses (Gambar 3). UF (Ultrafiltrasi) mengintegrasikan fungsi-fungsi ekstraksi, kristalisasi, dan pelucutan sehingga biaya proses UF dapat ditekan menjadi < \$ 1/kg S-ibuprofen.



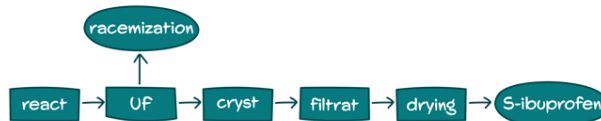
Gambar 2. Keutamaan intensifikasi proses dalam meningkatkan kinerja proses.

Membrane Reactors

Examples of PI at DSM - membrane reactor



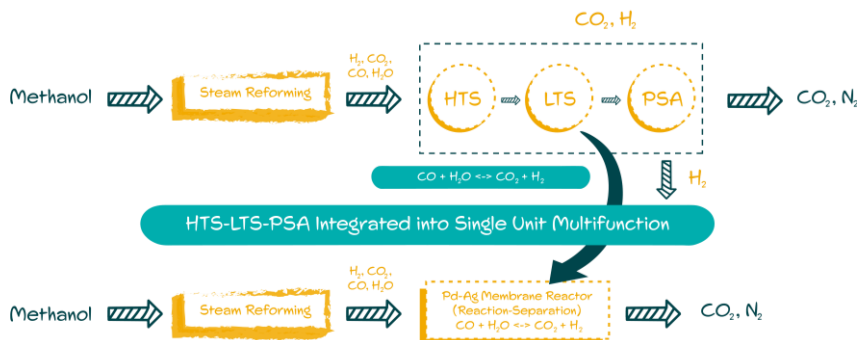
-UF replaces 6 unit operations
-Costs UF: < \$ 1,-/kg S-ibuprofen



Gambar 3. Integrasi proses dalam transformasi rancangan yang dapat menyederhanakan unit proses secara berarti.

- Reaktor membran Pd dapat mengintegrasikan reformasi gas alam yang menghasilkan campuran gas CO, H₂, CO₂, sisa hidrokarbon dan kukus dan sekaligus reaktor penggeseran gas air (High Temperature Shift/HTS dan Low Temperature Shift/LTS) untuk meningkatkan produktivitas H₂ (Gambar 4). Dalam integrasi reaktor membran,

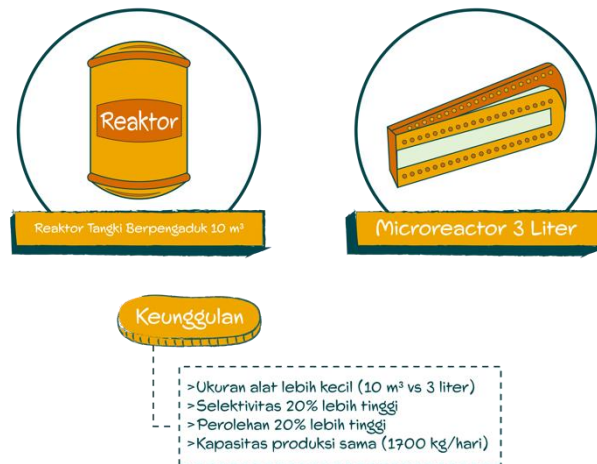
fungsi-fungsi proses dari masing-masing alat akan diakomodasikan dalam satu alat yang terintegrasi.



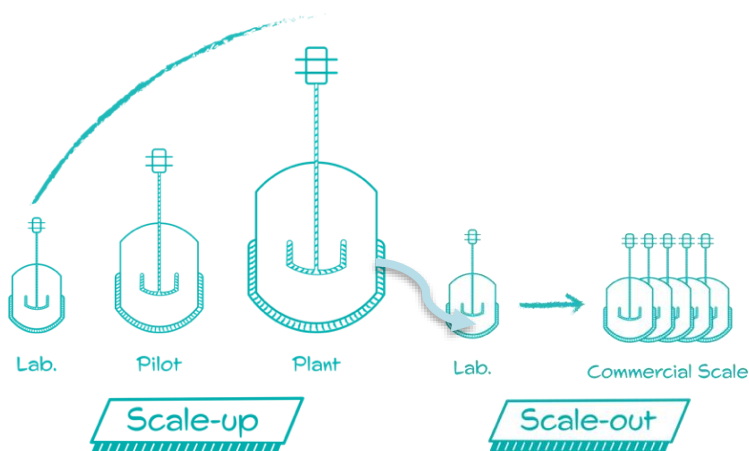
Gambar 4. Integrasi HTS-LTS-PSA menjadi reaktor membran Pd.

- Mereduksi ukuran alat dari skala makro menjadi skala mikro. Dalam hal ini, kapasitas produksi harus dikompensasi melalui *numbering-up* atau *scale-out*. Dalam Gambar 5 disajikan sebuah proses produksi berkapasitas 1700 kg/hari yang diselenggarakan dalam *microreactor* dengan ukuran volume 3333 kali lebih kecil dibandingkan reaktor tangki berpengaduk konvensional.
- Operasi lebih aman
Dalam skala yang kecil, proses produksi umumnya dapat dilakukan secara lebih terkendali sehingga faktor keamanan operasi dapat lebih diutamakan. Pada rasio luas permukaan per volume yang meningkat dalam *microsystem*, laju perpindahan panas dapat berlangsung sangat cepat sehingga tingkat keamanan proses menjadi lebih baik.
 - Konsumsi Energi Lebih Sedikit
Melalui manajemen integrasi panas, konsumsi energi dapat dikurangi secara berarti. Bahkan dengan menggunakan operasi reaktor aliran bolak-balik, temperatur umpan reaktor dapat menjadi lebih rendah. Kenaikan temperatur reaksi tidak lagi dilakukan dalam sebuah *preheater*, tetapi cukup dilakukan dalam sebuah rekuperator yang berisi material dengan kapasitas panas yang tinggi.
 - Waktu ke pasar lebih cepat
Proses konvensional menerapkan prinsip *scale-up* guna mencapai kapasitas produksi komersial sehingga waktu yang diperlukan dari skala laboratorium hingga skala komersial menjadi sangat lama (orde puluhan

tahun). Intensifikasi proses telah mentransformasi paradigma lama (*scale-up*) dengan paradigma baru, yaitu *scale-out* atau *numbering-up* sebagaimana disajikan dalam Gambar 6. Jika *microsystem* masih dirasakan kurang, maka duplikasi alat skala kecil sebanyak N kali dapat dilakukan. Keberhasilan alat yang dicapai pada skala laboratorium dapat langsung diimplementasikan pada skala komersial sehingga tidak diperlukan lagi waktu untuk mengembangkan proses hingga skala yang lebih besar (*shorter time to commercial*).



Gambar 5. Transformasi paradigma perancangan reaktor. Microreactor mampu meningkat laju perpindahan massa, perpindahan panas, dan kinetika reaksi yang cepat sehingga memungkinkan volume reaktor menjadi kecil.



Gambar 6. *Scale-up* (tradisional) ditransformasi menjadi *scale-out*.

e. Limbah lebih sedikit

Selektivitas produk reaksi pada dasarnya dapat diubah baik dengan penggantian katalis, kondisi operasi (terutama temperatur), dan metode operasi. Dalam hal jenis katalis dan temperatur reaksi tetap, transformasi metode operasi dapat mengubah arah reaksi kimia dan selektivitas produk. Metode operasi memberi peran dalam mengubah laju reaksi lokal di dalam reaktor yang berkaitan dengan selektivitas.

f. Citra lebih bagus

Dalam bisnis komoditas kimia, pandangan manusia terhadap reputasi pabrik sangat penting. Pabrik yang memiliki citra buruk terhadap lingkungan akan menerima dampak yang merugikan dalam bisnis. Di USA, hanya industri rokok dan nuklir yang mempunyai reputasi lebih buruk dibandingkan industri kimia.

g. Produktivitas lebih tinggi

Hasil yang berlipat ganda dengan basis umpan yang sama menunjukkan adanya alur sintesis yang lebih efisien. Selektivitas ke arah produk samping dan/atau limbah dapat ditekan dan diarahkan ke produk utamanya. Di samping itu, tingkat konversi yang lebih baik juga akan mendorong produktivitas yang lebih unggul. Kedua faktor, konversi dan selektivitas, merupakan parameter yang penting dalam memperbaiki produktivitas proses.

h. Proses lebih murah

Dengan adanya produktivitas yang lebih baik, efisiensi proses yang lebih tinggi, peralatan yang lebih sedikit, lahan yang lebih kecil, dan lain-lain, proses produksi dapat dirancang proses lebih murah. Suatu proses katalitik yang menggunakan temperatur reaksi yang lebih rendah, namun dengan konversi dan selektivitas yang sama juga berpeluang untuk membuat usia katalis lebih lama sehingga biaya regenerasi atau penggantian katalis dapat ditekan.

Struktur Intensifikasi Proses

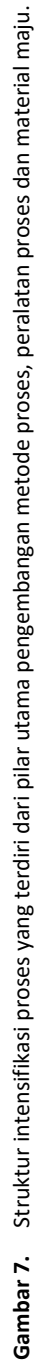
Pada awalnya, struktur intensifikasi proses dapat dikategorikan menjadi dua, yaitu peralatan (*hardware*) dan metode (*software*). Peralatan-peralatan yang dimaksud meliputi reaktor-reaktor (*microreactor*, *spinning disk reactor*, *static mixer reactor*, dll.) dan alat-alat lain untuk operasi tak-reaktif (*static mixer*, *compact heat exchanger*, *rotating packed bed*, dll.). Sedangkan metode yang dimaksud meliputi reaktor multifungsi, pemisahan hibrid, sumber energi

alternatif, dan teknik operasi reaktor. Pada saat ini, struktur intensifikasi proses tersebut telah berkembang menjadi 3 pilar dengan penambahan material maju (Gambar 7).

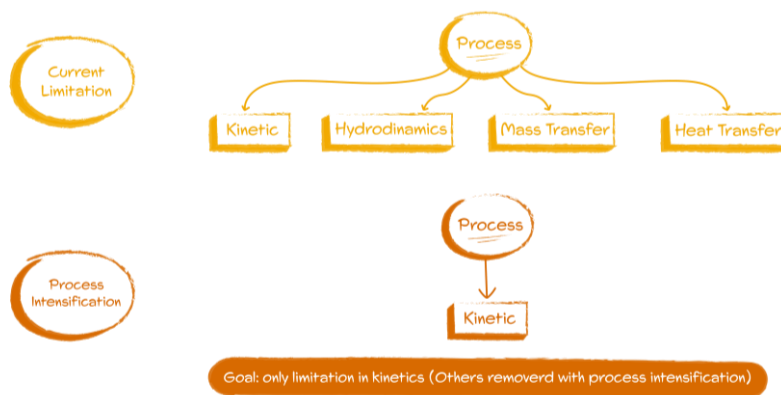
Pengembangan unit proses juga dapat ditinjau dari dua sudut pandang, yaitu secara analitik dan holistik. Pengembangan proses secara analitik menitikberatkan pada sebuah unit secara mendalam. Sebagai contoh, pengembangan sebuah reaktor mikro untuk melangsungkan reaksi fasa cair-gas dalam lapisan katalis padatan. Sebaliknya, pengembangan proses secara holistik mengarah pada kajian-kajian secara umum/universal. Sebagai contoh, integrasi proses dapat dilakukan dengan mereduksi 28 unit proses menjadi hanya 3 unit proses dalam produksi metil asetat oleh Eastman Chemical. Dalam hal pengembangan proses secara analitik, identifikasi terhadap unit-unit proses dapat dikelompokkan seperti yang telah ditunjukkan dalam Gambar 7.

Intensifikasi proses telah membedakan secara jelas terhadap teknologi konvensional. Proses perpindahan yang sangat cepat yang berlangsung dalam dimensi yang sangat kecil memungkinkan dapat diabaikannya faktor hambatan perpindahan (massa dan panas) dan hidrodinamika sehingga rancangan proses hanya tertuju pada aspek kinetika (*re-engineering*) (Gambar 8).

Peralatan baru, teknik pemrosesan, dan metode operasional menjanjikan peningkatan spektakuler di pabrik proses: secara nyata mengecilkan ukurannya dan secara dramatis meningkatkan efisiensinya. Perkembangan ini dapat mengakibatkan punahnya beberapa jenis peralatan tradisional, jika bukan seluruh unit operasi. Perkembangan proses tradisional menjadi jenuh pada beberapa kesempatan di mana tidak ada strategi keluar kecuali perubahan revolusioner dalam paradigma proses.



Gambar 7.



Gambar 8. *Re-engineering* dalam intensifikasi proses sebagai transformer dalam menyederhanakan mekanisme proses.

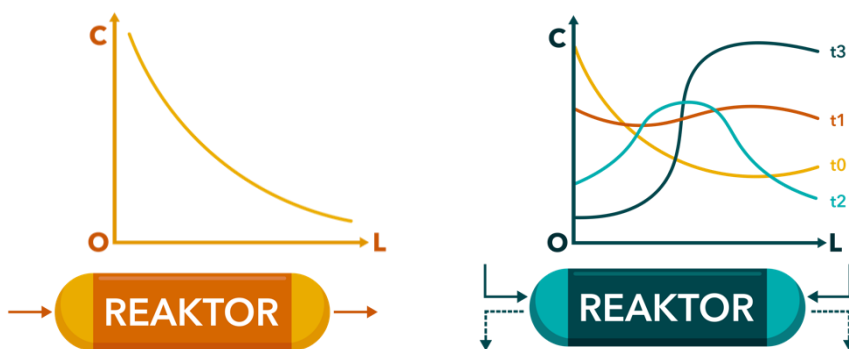
5. IMPLEMENTASI INTENSIFIKASI PROSES

5.1 Teknologi *Reverse Flow Reactor*

Di antara berbagai opsi untuk operasi reaktor secara transien, operasi periodik menawarkan keuntungan gabungan dari rezim keadaan tidak stabil permanen dan rezim waktu rata-rata konstan. Mengubah arah aliran melalui reaktor unggun tetap secara reguler, atau yang lebih dikenal sebagai operasi aliran balik (*reverse flow operation/RFO*), belum diterapkan secara luas untuk peningkatan konversi maupun selektivitas. Namun metode ini telah terbukti bermanfaat untuk reaksi eksotermik dari sudut pandang penghematan energi. Penggunaan prinsip aliran bolak-balik sebagai prosedur operasi transien reaktor katalitik menjadi menarik dengan kombinasi sifat dinamis pada skala mikro (katalis) dan pada skala makro (reaktor). Hal ini dapat menghasilkan profil konsentrasi dan suhu yang lebih baik untuk proses katalitik.

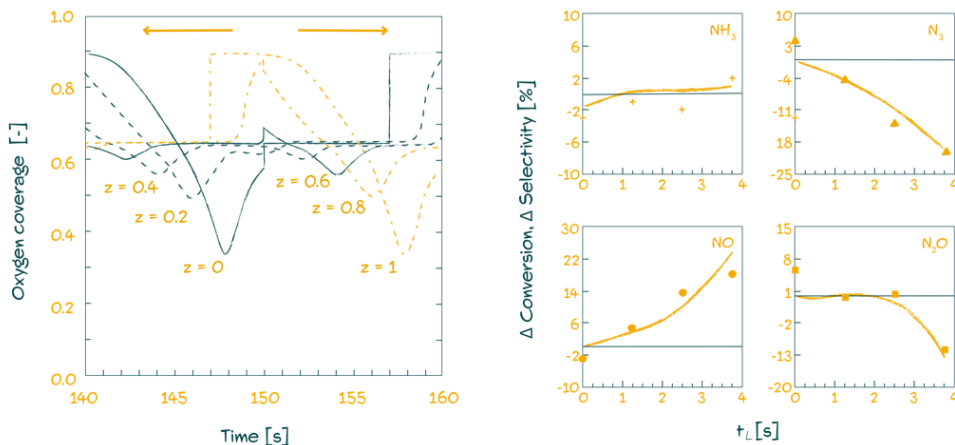
Reverse Flow Reactor (RFR) merupakan jenis reaktor unggun tetap yang arah alirannya dibolak-balik secara periodik pada setiap *switching time* tertentu. Pembalikan arah aliran ini menciptakan transformasi perambatan massa dan panas di sepanjang reaktor secara dinamis sehingga memungkinkan terjadinya dinamika konsentrasi lokal, laju reaksi lokal, dan kapasitas panas yang tepat untuk mencapai maksud proses, yaitu meningkatkan kinerja proses (konversi, selektivitas, penghematan energi). Profil konsentrasi

sepanjang unggun reaktor yang statis dalam reaktor aliran searah sebagaimana disajikan dalam Gambar 9 mengunci kinerja proses (misal konversi) pada nilai tertentu yang tetap, sedangkan dalam RFR, profil konsentrasi yang berubah secara dinamis sepanjang reaktor dari waktu ke waktu memungkinkan direkayasanya perbaikan kinerja proses jika *switching time* dapat dipilih dengan tepat. Metode ini membuka terobosan baru dengan mentransformasikan RFR biasa menjadi RFR yang terintegrasi dengan modulasi komposisi umpan atau RFR yang diintegrasikan dengan pengumpanan dari samping pada posisi aksial tertentu. Strategi ini pada dasarnya menggabung pola reaktor partaian (*batch*) dan reaktor kontinu dalam sebuah reaktor. Hakikat ini juga dapat diimplementasikan pada proses perambatan panas guna penghematan energi. Beberapa contoh implementasi RFR sebagai transformer metode operasi dan rancangan yang tradisional menjadi rancangan yang cerdas disajikan dalam pembahasan berikut.



Gambar 9. Konfigurasi: (a) reaktor aliran searah, (b) RFR RFR dengan Modulasi Komposisi

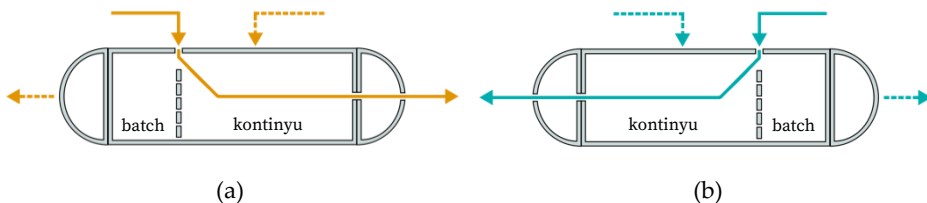
Oksidasi amoniak menggunakan oksigen dapat menghasilkan N_2 , N_2O , dan NO dengan komposisi yang bergantung pada temperatur reaksi dan jenis katalis. Terobosan baru dilakukan dengan menerapkan mode operasi RFR yang diintegrasikan dengan modulasi komposisi untuk memanipulasi konsentrasi oksigen teradsorpsi yang memengaruhi selektivitas produk yang diinginkan pada kondisi operasi tetap dan jenis katalis tetap. Dinamika reaksi lokal pada skala waktu yang tepat dapat diarahkan untuk menghasilkan produk dengan selektivitas yang lebih tinggi (Gambar 10). Untuk menentukan skala waktu yang tepat, kajian mekanisme reaksi memainkan peran yang penting untuk mempengaruhi arah distribusi produk. Hasil kajian ini membuka peluang di industri asam nitrat dalam mencapai selektivitas NO yang tinggi dengan energi yang lebih rendah dan usia katalis yang lebih lama.



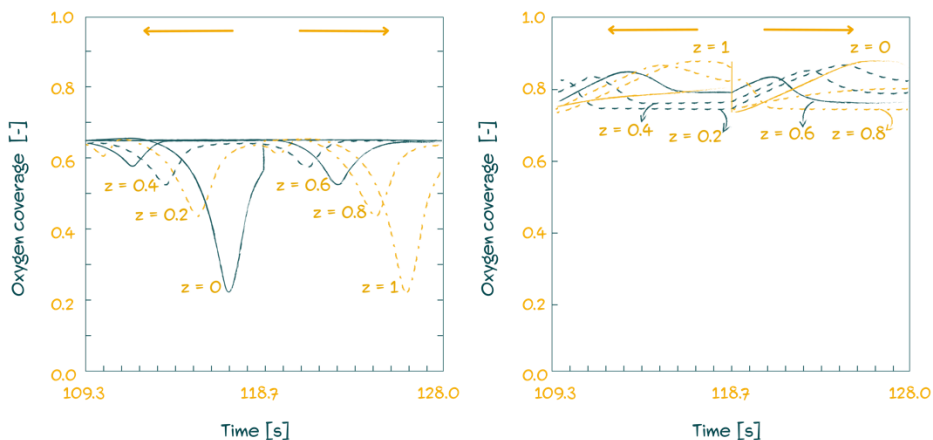
Gambar 10. Peningkatan konsentrasi oksigen teradsorpsi akibat mode RFR dengan modulasi komposisi.

RFR dengan Umpan Samping

Reaktor aliran bolak-balik dengan umpan samping dapat menggabungkan perilaku reaktor aliran kontinu dan reaktor partaian dalam sebuah piranti. Sebagaimana yang ditunjukkan dalam Gambar 11, pada saat arah aliran fluida ke kanan, bagian sisi kiri umpan berperilaku sebagai reaktor partaian (*batch*), sedangkan bagian sisi kanan umpan berperilaku sebagai reaktor kontinu. Lokasi titik pengumpanan dan skala waktu pembalikan arah aliran akan mempengaruhi reaksi lokal dan distribusi produk (Gambar 12).



Gambar 11. Konfigurasi RFR dengan aliran umpan samping: transformasi mode operasi gabungan antara sistem *batch* dan kontinu.

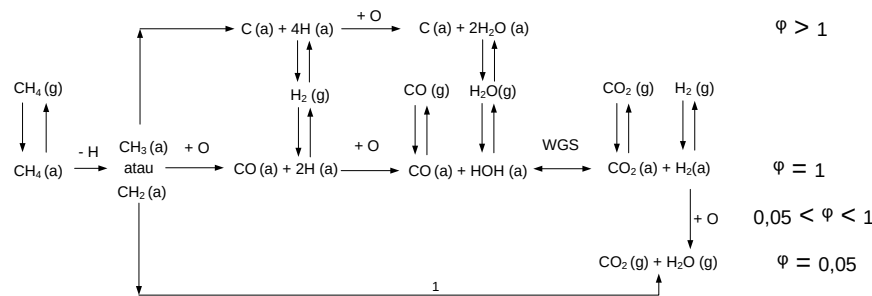


Gambar 12. Distribusi oksigen teradsorpsi konvensional (kiri) dan RFR umpan sampling (kanan).

RFR Otothermal untuk Oksidasi Polutan Udara Encer

Pencemaran udara akibat emisi gas buang dari Stasiun Pengisian Bahan Bakar Umum (SPBU), industri kimia seperti pabrik PTA (*Purified Terephthalic Acid*) yang melepaskan senyawa VOC (*Volatile Organic Compound*), tambang batubara yang melepaskan gas CH_4 , perlu mendapatkan perhatian dari aspek regulasi (pemerintah) dan teknologi karena emisi gas tersebut dapat mempengaruhi kualitas hidup manusia terkait masalah pemanasan global. Kenaikan laju emisi gas, khususnya metana dengan potensi pemanasan globalnya, jika tidak diolah, dapat menimbulkan dampak 16 negatif terhadap lingkungan. Pengolahan emisi gas metana secara katalitik merupakan salah satu alternatif yang layak untuk diterapkan. Namun, mengingat emisi gas metana bersifat encer, laju alir dan konsentrasi yang fluktuatif, dan bertemperatur lingkungan, pengolahan menggunakan reaktor unggun tetap satu arah yang beroperasi pada kondisi tunak kurang tepat. Untuk kandungan metana sekitar 0,5%-v, kenaikan temperatur 16 adiabatik 16 hanya mencapai 115 °C. Akibatnya, sejumlah energi masih diperlukan untuk memanaskan gas umpan. RFR merupakan salah satu solusi yang telah terbukti dengan baik untuk mengolah emisi gas buang secara otothermal dengan karakteristik seperti yang telah disebutkan. Pengaruh gangguan terhadap respon yang menyebabkan kondisi dinamik di dalam reaktor dapat dinyatakan melalui hubungan antara nisbah konsentrasi gas umpan CH_4/O_2 dan konversi metana. Berdasarkan penelitian oksidasi metana encer dalam reaktor unggun tetap ini didapatkan bahwa dalam satu siklus operasi dinamik terdapat tiga mekanisme

reaksi yang terlibat, yaitu reaksi oksidasi total metana menjadi CO_2 dan H_2O , reaksi oksidasi parsial metana menjadi CO_2 dan H_2 , dan reaksi oksidasi parsial metana menjadi CO dan H_2 . Peralihan mekanisme reaksi dalam satu siklus operasi dinamik didasarkan pada perubahan nisbah konsentrasi CH_4/O_2 akibat gangguan modulasi umpan yang diberikan (Gambar 13).



Gambar 13. Model mekanisme oksidasi CH_4 dalam sistem dinamik.

5.2 Teknologi Dynamic Catalytic Converter

Emisi gas buang, terutama nitrogen oksida (NO_x), karbon monoksida (CO), sulfur oksida (SO_x), *volatile organic compound* (VOC), dan hidrokarbon (HC), dapat memberi efek negatif pada manusia dan lingkungan sekitar. Konverter katalitik yang dirancang dengan mode dinamik dapat menjadi transformer guna mendapatkan kondisi optimum. Model konverter katalitik dapat dibangun berdasarkan pendekatan 1D untuk multireaksi pada kondisi non-isothermal dari *three-way catalytic converter* (TWC). Hasil studi menunjukkan efisiensi konversi mencapai titik optimum pada temperatur gas umpan ataupun katalis di atas titik *light-off*, yaitu 502 K. Selain itu, semakin tinggi temperatur katalis (terutama di atas *light-off*), semakin cepat *light-off time* tercapai. Adapun mode dinamik yang disarankan untuk peningkatan konversi rata-rata, yaitu pada kondisi operasi $T_{\text{fin}} \leq 500 \text{ K}$ dan *switching time* ≥ 50 detik, yang mampu meningkatkan konversi rata-rata mulai dari 4% hingga 55%. Berdasarkan hasil studi, mode operasi yang diusulkan adalah gabungan antara mode dinamik dan natural *start-up*. Pada waktu 0–300 detik, konverter katalitik dioperasikan dalam mode *natural start-up*, kemudian dilanjutkan dengan mode dinamik hingga 750 detik. Peningkatan konversi rata-rata keseluruhan dari mode yang diusulkan untuk CO , H_2 , HC , dan NO masing-masing sebesar 47,02%, 66,28%, 44,39%, dan 53,08%.

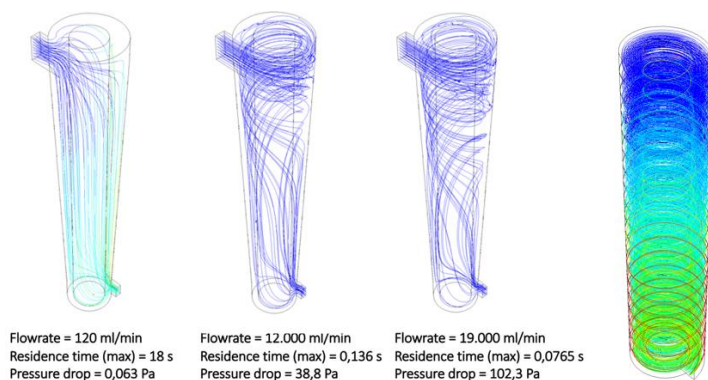
5.3 Teknologi Dense Membrane dan Membrane Reactor

Hidrogen merupakan salah satu bentuk energi alternatif yang ramah lingkungan, berdensitas energi tinggi, dan menjanjikan untuk masa depan. Pengembangan material maju telah menghasilkan bentuk logam paduan berbasis Pd (*dense*) yang mampu mempermeasikan H_2 secara selektif (100%) dan memisahkannya dari senyawa lain. Transformasi proses melalui intensifikasi proses dilakukan baik dalam hal material maju maupun metode operasi. Salah satu paduan Pd dan Ag, yaitu Pd77-Ag23 atau Pd75-Ag25 dan mode operasi dinamik berhasil memisahkan H_2 dengan stabilitas permeasi yang lebih baik dibandingkan mode konvensional. Meskipun demikian, efek kehadiran senyawa N_2 , CO, CO_2 , dan CH_4 dapat menjadi kendala bagi kinerja membran Pd. Penelitian ini telah dan sedang dikembangkan di grup intensifikasi proses TK ITB, khususnya terkait dengan integrasi reformasi gas alam menggunakan CO_2 , reaksi penggeseran gas air, dan pemisahan H_2 menggunakan membran reaktor Pd. Nitrogen merupakan salah satu senyawa yang dapat menyebabkan turunnya kinerja membran karena interaksi antara H_2 dan N_2 dapat menimbulkan senyawa NH_x yang berakibat pada tertutupnya lapisan aktif permeasi membran. Solusi yang mungkin dapat dilakukan untuk mengurangi atau bahkan mengatasi permasalahan ini adalah dengan menjalankan operasi dinamik pada sistem pemisahan, di mana laju alir umpan dibuat berfluktuasi. Keberhasilan penelitian ini membuka peluang untuk mengintegrasikan proses HTS-LTS-PSA menjadi reaktor membran.

Prosedur operasi dinamik diterapkan untuk mengkaji pengaruh perubahan laju alir gas umpan secara periodik terhadap proses deaktivasi membran akibat hadirnya senyawa nitrogen dalam gas umpan. Gas umpan merupakan campuran gas yang mengandung hidrogen yang komposisinya divariasikan secara periodik mengikuti *square wave* di mana laju alir gas umpan hidrogen, 1 – 2 kali lebih besar dari laju alir gas umpan nitrogen dan *switching time* (1 – 3 detik). Gas penyapu yang digunakan adalah gas helium murni. Percobaan dilakukan pada temperatur 350 °C. Hasil percobaan menunjukkan bahwa penerapan operasi dinamik pada membran berbasis Pd dapat mempengaruhi kinerja pemisahan H_2 . Operasi tak tunak dengan *switching time* 1 dan 5 menit menghasilkan persen penjumlahan H_2 masing-masing 26,69% dan 23,97% tanpa adanya waktu deaktivasi. Hasil ini lebih baik dibandingkan operasi tunak yang menghasilkan persen penjumlahan 21,91% dan waktu deaktivasi yang dimulai pada menit ke-540. Pada rentang operasi

percobaan, kinerja membran Pd memperlihatkan pemisahan H_2 yang lebih baik dibandingkan operasi tunak. Kehadiran gas-gas lain selain H_2 menarik perhatian khusus untuk dikaji akibat dampak interaksi senyawa-senyawa tersebut terhadap proses permeasi H_2 melalui dinding membran Pd. Beberapa jurnal telah membahas bagaimana senyawa-senyawa N_2 , CO , CO_2 , H_2O , dan hidrokarbon dapat menginhibisi permeasi H_2 .

Selain pengembangan material Pd, metode operasi dinamik, aspek aliran fluida di dalam modul membran juga sedang dikembangkan. Aliran fluida dibentuk secara tangensial paksa dapat meningkatkan waktu tinggal dalam orde 2–3 kali lebih lama di dalam modul membran untuk laju volumetrik yang sama sebagaimana yang disajikan dalam Gambar 14.

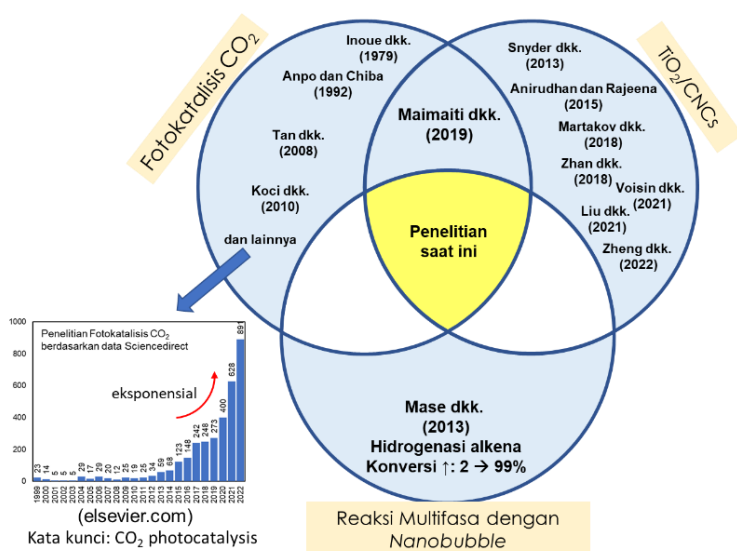


Gambar 14. Rancangan aliran fluida di dalam modul membran: pengaruh laju alir/aliran tangensial terhadap waktu tinggal.

5.4 Teknologi *Nanobubble- Nanocatalyst- Nanosupport(Nano³)*

Konversi CO_2 secara fotokatalitik merupakan solusi strategis untuk mengurangi CO_2 , karena dapat menghasilkan berbagai *solar fuel* (metana, metanol, asam format, dan formaldehida) sebagai alternatif bahan bakar fosil. Penelitian mengenai fotokatalisis CO_2 pertama kali dilakukan oleh Inoue, dkk. (1979) dengan berbagai fotokatalis dan dalam 3 tahun terakhir meningkat drastis secara eksponensial. Masalah yang sering dijumpai pada penelitian fotokatalisis CO_2 adalah *bandgap* TiO_2 yang besar, aglomerasi, hambatan perpindahan massa, dan lainnya yang menyebabkan konversi CO_2 sangat kecil. Peningkatan konversi CO_2 dapat dilakukan baik melalui pendekatan aspek material maupun aspek proses. Peningkatan konversi melalui aspek material dapat ditempuh dengan penambahan doping untuk menurunkan *bandgap* dan pendispersian TiO_2 pada permukaan CNCs agar luas permukaan

fotokatalis semakin besar. Adapun peningkatan konversi melalui aspek proses di antaranya dapat ditempuh dengan menggunakan *nanobubble reactor* untuk meningkatkan luas permukaan antar fasa antara gas dengan cairan. Penelitian ini difokuskan pada peningkatan kinerja fotokatalisis CO₂ baik pada aspek material maupun aspek prosesnya. Secara skematik, posisi penelitian ini diilustrasikan pada Gambar 15. Fotokatalis TiO₂ disintesis dari prekursor titanium tetra isopropoxide (TTIP) dengan doping nitrogen menggunakan triethylamine (TEA). Produk fotokatalis dianalisis dengan Transmission Electron Microscope (TEM), X-Ray Diffraction (XRD), dan Fourier-Transform Infra Red (FTIR), Diffuse Reflectance UV-Vis (DR UV-Vis), dan Thermogravimetric Analysis (TGA). Hasil karakterisasi XRD, TEM, FTIR, dan TGA membuktikan keberadaan TiO₂ di permukaan CNCs.



Gambar 15. Peta penelitian nano³ untuk mencapai kinerja tinggi.

Hasil karakterisasi DR UV-Vis menunjukkan bahwa produk TiO₂/CNCs dan N-TiO₂/CNCs memiliki *bandgap* berturut-turut sebesar 3,2 eV dan 3,1 eV. Uji aktivitas TiO₂/CNCs dan N-TiO₂/CNCs dilakukan dengan sistem reaksi multifasa dengan gas CO₂ yang dibuat menjadi *nanobubble* dengan ukuran ~300 nm menggunakan metode *hydrodynamic cavitation*. Kedua fotokatalis menunjukkan adanya aktivitas fotokatalisis di bawah penyinaran cahaya UV-C. Sementara itu, hanya fotokatalis N-TiO₂/CNCs yang memiliki aktivitas di bawah penyinaran cahaya tampak dengan produk metanol sebesar 1,47 mmol/g katalis. Optimasi ukuran *nanobubble* sedang dilakukan untuk

mencapai ukuran *bubble* yang lebih kecil. Secara visual, kehadiran *nanobubble* CO₂ dalam H₂O menunjukkan stabilitas yang bagus selama lebih dari 5 hari (beberapa literatur menyebutkan lebih dari 30 hari).

5.5 Material Maju

Nanocatalytic Process

Menurut data dari Kementerian ESDM tahun 2018, potensi cadangan gas alam di Laut Natuna mencapai 46 trillion standard cubic feet (TSCF), dengan kandungan CO₂ sebesar 71 %-mol dan CH₄ sebesar 28 %-mol. Salah satu proses yang menjanjikan untuk mengolah gas alam di Laut Natuna yang memiliki kadar CO₂ yang tinggi adalah *dry reforming of methane* (DRM). DRM merupakan teknologi yang mengubah CH₄ menggunakan CO₂ menjadi *synthetic gas* (*syngas*) dengan rasio H₂/CO sebesar 1 dan dapat diolah lebih lanjut menjadi senyawa yang bernilai jual lebih tinggi, seperti metanol, ammonia, asam asetat, dll. Namun, salah satu tantangan untuk melakukan komersialisasi proses DRM adalah menemukan katalis yang tidak mudah terdeaktivasi akibat pembentukan karbon. Katalis yang mempunyai aktivitas tinggi dan ekonomis adalah nikel, namun dapat mengalami deaktivasi akibat deposisi karbon yang terjadi pada suhu 500 – 700 °C dan penyinteran (*sintering*) pada suhu 700 – 800 °C. Hingga saat ini, belum ada katalis komersial yang dapat diterapkan untuk proses DRM karena sangat mudah terdeaktivasi.

Katalis Ni/MCM-41 merupakan katalis yang berpotensi untuk menyelenggarakan reaksi DRM. Salah satu aspek yang dapat dimodifikasi untuk meningkatkan aktivitas dan stabilitas katalis tersebut adalah dengan menambahkan promotor. Penelitian ini dilakukan untuk meninjau pengaruh penambahan beberapa jenis promotor basa terhadap aktivitas dan stabilitas katalis Ni/MCM-41. Di dalam penelitian ini, katalis yang disintesis meliputi Ni/MCM-41, Ni-Mg/MCM-41, Ni-Ca/MCM-41, Ni-Na/MCM-41, dan Ni-K/MCM-41 dengan hasil uji aktivitas yaitu konversi CH₄ sebesar 62%, 72%, 69%, 36%, dan 46%. Adapun konversi CO₂ yang dihasilkan adalah sebesar 52%, 54%, 55%, 35%, dan 44%. Seluruh katalis yang disintesis menunjukkan stabilitas yang baik selama 4 jam. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa katalis dengan promotor Mg dan Ca menghasilkan konversi reaktan yang lebih tinggi dibandingkan katalis Ni/MCM-41 tanpa promotor. Katalis berbasis MCM-41 juga menghasilkan pembentukan karbon lebih sedikit dibandingkan katalis

komersial untuk metanasi dan *steam reforming* yang mengandung nikel dan alumina (Al_2O_3).

Penggunaan material yang tahan terhadap temperatur tinggi seperti zirkonia dan material yang mempunyai sifat *oxygen storage capacity* (OSC) yang baik seperti serium dapat mengurangi terjadinya deaktivasi katalis DRM. Salah satu katalis yang mempunyai material tersebut adalah katalis 10%Ni/CeZrO₂. Performa katalis 10%Ni/CeZrO₂ pada suhu 700 °C, tekanan atmosferik, dan WHSV 60.000 mL g⁻¹ jam⁻¹ selama 240 menit menunjukkan hasil yang jauh lebih baik dibandingkan katalis *steam reforming* komersial yang mempunyai pusat aktif nikel dengan penyangga alumina. Nilai konversi CH₄ dan CO₂ per massa pusat aktif katalis 10%Ni/CeZrO₂ mencapai 2 kali lipat lebih tinggi dibandingkan katalis *steam reforming* komersial. Selain itu, jumlah karbon yang terbentuk pada katalis *steam reforming* komersial mencapai > 340 kali lipat lebih banyak dibandingkan dengan katalis 10%Ni/CeZrO₂ yang mempunyai nilai deposisi karbon < 0,01 gC/g_{cat} sehingga deposisi karbon pada katalis 10%Ni/CeZrO₂ dapat diabaikan. Berdasarkan hasil penelitian yang sudah dilakukan ini, katalis 10%Ni/CeZrO₂ berpotensi untuk digunakan sebagai katalis DRM.

Lipase/Cellulose Nanocrystals

Hidrolisis minyak nabati dapat dilangsungkan pada kondisi operasi yang lebih ringan dan hemat energi menggunakan metode enzimatik (lipase). Keuntungan penggunaan lipase sebagai biokatalis dalam hidrolisis minyak nabati adalah kemurnian produk yang dihasilkan, kemampuan untuk membedakan yang lebih unggul dari katalis anorganik yang mencakup fitur-fitur seperti stereospesifisitas, selektivitas, dan spesifisitas substrat. Namun, penggunaan lipase memiliki kelemahan dalam hal biaya yang tinggi dan tidak dapat digunakan secara berulang. Untuk mengatasi kelemahan tersebut, lipase perlu diimobilisasi pada matriks penyangga sehingga dapat digunakan secara berulang dan menurunkan biaya operasi. Penelitian di bidang ini bertujuan untuk mengembangkan penyangga berstruktur nano berbasis material selulosa (CNCs) untuk imobilisasi lipase dan aplikasinya dalam hidrolisis minyak sawit menjadi asam lemak sebagai prekursor *green diesel*.

Biokatalis lipase yang diimobilisasi pada penyangga berstruktur nano berbasis material selulosa (CNCs) telah berhasil dikembangkan. CNCs sebagai penyangga telah berhasil disintesis dari bagas tebu, jerami padi, dan TKKS

menggunakan metode oksidasi yang dimediasi TEMPO. Hasil penelitian menunjukkan jenis biomassa dapat mempengaruhi perbedaan karakteristik yang meliputi kristalinitas, ukuran, dan kandungan gugus karboksilat pada permukaan CNCs. Hasil uji aktivitas menunjukkan bahwa kandungan gugus karboksil dan ukuran CNCs dapat mempengaruhi aktivitas lipase amobil. CNCs telah berhasil mengimobilisasi lipase sebagaimana dibuktikan oleh adanya puncak amida yang berasal dari pembentukan ikatan antara CNCs dengan lipase dan penebalan pada permukaan morfologi CNC setelah imobilisasi. Selain itu, stabilitas lipase amobil lebih tinggi (40 °C) dibandingkan lipase bebas (35 °C).

Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dan kebermanfaatan dalam pengembangan penyangga berstruktur nano berbasis material selulosa untuk imobilisasi lipase. Penggunaan lipase amobil dalam hidrolisis diharapkan dapat menjadi salah satu strategi yang dapat mengatasi permasalahan dari metode konvensional dalam hal penggunaan energi yang tinggi. Selanjutnya, hasil penelitian dapat memberikan peluang penggunaan lipase amobil untuk reaksi hidrolisis dalam skala industri, serta kemungkinan penerapan enzim berbiaya rendah untuk hidrolisis minyak sawit untuk produksi asam lemak bebas dengan produk samping gliserol yang bernilai tinggi.

6. PENUTUP

Intensifikasi proses (i-proses) menyajikan sebuah himpunan teknologi-teknologi proses yang sangat inovatif dan kreatif dalam hal pengembangan peralatan proses, metode proses, dan material maju. Keberanian di dalam melakukan terobosan tersebut telah mentransformasi paradigma berpikir dalam melakukan perancangan dan pengembangan proses. Hal ini telah banyak dibuktikan bahwa i-proses mampu membawa perbaikan yang sangat substansial dan bahkan tidak dapat diraih melalui pendekatan konvensional dalam aspek proses, efisiensi, biaya operasi dan modal, kualitas proses, limbah, keselamatan, waktu mencapai pasar, dll.. Sebagai muara dari terobosan pengembangan proses melalui i-proses ini, teknologi baru yang kompetitif telah bermunculan dan teknologi konvensional dapat menjadi

“padam”. Fenomena serupa dapat diamati dalam produk-produk elektronika: sebagai contoh “flash drive USB” yang dulunya berdimensi panjang hingga 5 cm dan kapasitas 128 MB, saat ini telah tergusur oleh “micro SD” yang berdimensi jauh lebih kecil namun dengan kapasitas ribuan hingga jutaan kali lebih besar. Teknologi *microreactor* telah merepresentasikan kehadiran teknologi baru dalam bidang proses yang memiliki dimensi beberapa ribu kali lebih kecil dibandingkan teknologi reaktor konvensional walaupun untuk mencapai kapasitas produksi yang sama. Berbagai manfaat intensifikasi proses telah dibahas dan diberikan contoh-contoh khusus dalam implementasi di bidang proses, seperti operasi reaktor dinamik (*reverse flow reactor*, *catalytic converter*, *dynamic membrane operation*), integrasi proses (*membrane reactor* berbasis Pd), miniaturisasi reaktor (*microreactor*), *Nanobubble-Nanocatalyst-Nanosupport* (Nano^3), *nanocatalytic process* dan proses enzimatis.

Teknologi yang dikembangkan melalui paradigma baru ini mempunyai potensi yang luas untuk diterapkan di Indonesia. Pengolahan emisi gas CH_4 yang bocor dari tambang batubara, sistem perpipaan gas alam (stasiun kompresor, jalur pipa), emisi uap bensin di SPBU, emisi VOC di pabrik kimia, dll. dapat dilakukan menggunakan *reverse flow reactor* (RFR) yang tidak hanya mengubah senyawa-senyawa yang berbahaya menjadi kurang berbahaya, namun juga dapat menghasilkan energi untuk berbagai keperluan (*heat trap effect*). RFR juga dapat diterapkan untuk memanipulasi selektivitas melalui pengembangan metode operasi dinamik. *Dynamic catalytic converter* digunakan untuk mengolah emisi gas buang pabrik dan kendaraan bermotor. Pengembangan material maju (Ni berpenyangga MCC-41, Ni berpenyangga serium dan zirkonium) dan integrasi proses dapat diterapkan untuk mengolah gas alam Natuna yang kaya akan kandungan CO_2 . Pengembangan teknologi fotokatalitik berbasis pada Nano^3 membuka peluang untuk mengubah emisi CO_2 menjadi metanol. Proses enzimatis dengan penyangga CNCs juga membuka terobosan baru dalam menghidrolisis minyak nabati menjadi asam lemak sebagai prekursor *green diesel* sehingga dapat mengurangi konsumsi energi yang tinggi.

Terakhir, sebagai bagian dari insan akademik, konsep i-proses dapat dikembangkan untuk mewujudkan konversi kelulusan mahasiswa yang tinggi dengan tingkat selektivitas menuju magister dan doktor yang lebih baik melalui integrasi proses (transformasi) pendidikan yang kita kenal dengan

Program Penyatuan Sarjana Magister atau Program Penyatuan Magister Doktor. Harapannya, kualitas tingkat pendidikan masyarakat Indonesia dapat ditingkatkan secara berarti.

7. UCAPAN TERIMA KASIH

Buku Orasi Ilmiah Guru Besar ini tidak mungkin dapat disusun dengan baik tanpa rida dari Allah Swt. dan dukungan, bantuan, dan arahan dari banyak pihak. Karena itu, pada kesempatan ini, izinkan saya mengungkapkan ucapan terima kasih secara tulus kepada mereka.

1. Pimpinan ITB, Pimpinan dan seluruh Anggota Forum Guru Besar ITB, atas kesempatan yang diberikan kepada saya untuk menyampaikan orasi ilmiah di hadapan para hadirin sekalian pada forum yang terhormat ini.
2. Prof. Saswinadi Sasmoho, mentor, yang “menitahkan” saya untuk berdiri di mimbar Orasi Ilmiah Guru Besar ini untuk membawa dan menyampaikan ilmu intensifikasi proses.
3. Prof. Herri Susanto selaku guru, pembimbing, mentor, orang tua, yang telah membimbing, membantu, dan menjadi promotor untuk menjadi dosen di Teknik Kimia ITB.
4. Dosen-Dosen senior di lingkungan Teknik Kimia ITB: Prof. V.S. Praptowidodo, Dr. Tatang H. Soerawidjaja, Dr. Irwan Noezar, Ir. G. Handi Argasetya, M.T., Dr. Ukan Sukandar, Drs. Achmad Ali S.
5. Para profesor lain di Komunitas Teknik Kimia (Prof. Subagjo, Prof. Mubiar Purwasasmita (alm), Prof. Danu Ariono, Prof. Lienda Aliwarga, Prof. Tjandra Setiadi, Prof. Yazid Bindar, Prof. I Gede Wenten, Prof. Johnner Sitompul, Prof. IGBN Makertihartha, Prof. Tjokorde Walmiki Samadhi) dan semua kolega di Komunitas Teknik Kimia ITB yang telah bersama-sama memajukan pendidikan Teknik Kimia, Teknik Pangan, dan Teknik Bioenergi dan Kemurgi ITB.
6. Prof. I Gede Wenten selaku Ketua KK dan semua anggota KK Perancangan dan Pengembangan Proses Teknik Kimia yang senantiasa memberikan semangat dan dukungan dalam proses pengajuan jabatan Guru Besar ini.
7. Tim Pembimbing mahasiswa S3 (Prof. Tjandra Setiadi, Prof. Subagjo, Prof. Yazid Bindar, Prof. Dwiwahju Sasongko, Dr. Ferry Iskandar, Dr. Hary Devianto, Dr. Arie Wibowo, Dr. Elvi Restiawaty, Dr. Hafis Pratama R.G.,

Dr. Haryo P. Winoto, Dr. Wibawa Hendra S.), S2, dan S1, Tim Penelitian, Tim Pengabdian kepada Masyarakat.

8. Dekan dan Wakil Dekan FTI ITB yang telah memberikan dukungan dan bantuan dalam proses pengajuan jabatan Guru Besar ini hingga tuntas.
9. Prof. Akhmaloka, Prof. Irawati, Prof. Kadarsah Suryadi, Prof. N. Nishiyama, Prof. S. Uemiya, Dr. M. Miyamoto, Prof. A. Stankiewicz, Prof. J.C. Schouten, Dr. J.H.B.J. Hoebink (alm), Prof. M. van Sint Annaland, yang telah memberikan dukungan dan kerjasama.
10. Para mahasiswa bimbingan S3 (Hendro Risdianto, M. Effendy, Aang Nuryaman, Pasymi, Intan C. Sophiana, Neng Tresna Umi C., Haroki Madani, Gita N. Sajida, Yulia Tri R., Ghusrina Prihandini), S2, dan S1.
11. Kedua orang tua dan mertua, serta saudara yang telah mendidik dan memberikan doa yang tiada henti.
12. Akhir kata, terima kasih yang sangat khusus saya sampaikan kepada istri tercinta, Elvi, tidak hanya atas dorongan dan dukungan tanpa pamrih dalam setiap keadaan, tetapi juga atas cinta dan pengorbanan yang telah diberikan, yang tanpanya pencapaian jabatan Guru Besar ini tidak akan mungkin dapat dicapai. Kesabaran dan pengertian yang diberikan telah sangat membantu saya selama bertahun-tahun sejak pernikahan kami. Terima kasih telah memberi kesempatan saya menjadi diri saya sendiri. Kehadiran buah cinta kita, Elgi dan Yovi, telah melengkapi dan memberi makna dalam kehidupan kita. Dalam perjalanannya, kita memiliki pengalaman yang luar biasa untuk benar-benar dirasakan sebagai sebuah keluarga. Itu sangat berarti bagi saya. Terima kasih semuanya!

DAFTAR PUSTAKA

- Bapenas, 2019. "Indonesia 2045: Berdaulat, Maju, Adil, dan Makmur". Dokumen Visi Indonesia.
- Budhi, Y.W., 2005. "Reverse Flow Reactor Operation for Control of Catalyst Surface Coverage". Disertasi, Chemical Engineering and Chemistry Department, Technische Universiteit Eindhoven, Belanda.
- Budhi, Y.W., Jaree, A., Hoebink, J.H.B.J., Schouten, J.C., 2004. "Simulation of reverse flow operation for manipulation of catalyst surface coverage in the selective oxidation of ammonia". *Chemical Engineering Science* 59(19), 5365–5377.
- Budhi, Y.W., Hoebink, J.H.B.J., Schouten, J.C., 2004. "Reverse flow operation with reactor side feeding: analysis, modeling, and simulation". *Industrial and Engineering Chemistry Research* 43(22), 6955–6963.
- Budhi, Y.W., Suganda, W., Irawan, H.K., Restiawaty, E., Miyamoto, M., Uemiyama, S., Nishiyama, N., van Sint Annaland, M., 2020. "Hydrogen Separation from Mixed Gas (H_2 , N_2) Using Pd/Al_2O_3 Membrane under Forced Unsteady State Operations". *International Journal of Hydrogen Energy* 45(16), 9821–9835.
- Ferreira, R.Q., Costa, C.A., Masetti, S., 1999. "Reverse-flow reactor for a selective oxidation process". *Chemical Engineering Science* 54(20), 4615–4627.
- Inoue, T., Fujishima, A., Konishi, S., dan Honda, K., 1979. "Photoelectrocatalytic reduction of carbon dioxide in aqueous suspensions of semiconductor powders". *Nature* 277, 637–638.
- Kim, H. J., Park, S., Kim, S. H., Kim, J. H., Yu, H., Kim, H. J., Yang, Y.-H., Kan, E., Kim, Y. H., and Lee, S. H., 2015. "Biocompatible cellulose nanocrystals as supports to immobilize lipase". *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic* 122, 170–178.

- Matros, Y., Sh., Bunimovich, G.A., 1996. "Reverse Flow Operation in Fixed Bed Catalytic Reactors". *Catalysis Reviews - Science and Engineering* 38(1), 1–68.
- Stankiewicz, A., Moulijn, J.A., 2004. "Re-Engineering the Chemical Processing Plant: Process Intensification". 1st CRC Press.
- Usman, M., Daud, W.M.A.W. dan Abbas, H.F., 2015. "Dry reforming of methane: Influence of process parameters - a review". *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 45, 710–744.

CURRICULUM VITAE



Nama : Yogi Wibisono Budhi
Tempat/tgl lahir : Tulungagung, 10 Februari 1971
Kel. Keahlian : Perancangan dan Pengembangan
Proses Teknik Kimia
Alamat Kantor : Jalan Ganesha 10 Bandung
Nama Istri : Dr. Elvi Restiawaty, S.T.,P.D.Eng.
Nama Anak : 1. Tareqh A.S. Elgi Wibisono, S.T.
2. Athmar A.R. Yovi Wibisono

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- Doktor (Dr.), bidang Teknik Reaktor Kimia, Technische Universiteit Eindhoven (TU/e), the Netherlands, 2005.
- Magister Teknik (M.T.), Program Studi Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung (ITB), 1997.
- Sarjana Teknik (S.T.), Program Studi Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung (ITB), 1995.

II. RIWAYAT KERJA di ITB

- Staf Pengajar Program Studi Teknik Kimia FTI–ITB, sejak 1999.
- Koordinator Laboratorium Instruksional Teknik Kimia, 2005-2010.
- Pjs. Koordinator Penelitian FTI – ITB, 2011.
- Anggota Komisi Penelitian LPPM ITB, 2011.
- Anggota Board of Reviewer LPPM ITB, 2011–sekarang.
- Tim Manajemen Limbah ITB, 2011–2012.
- Kepala Laboratorium Produksi, 2011–2018.
- Koordinator Keselamatan Kerja Teknik Kimia ITB, 2011–2014.
- Koordinator Penelitian Sarjana Teknik Kimia ITB, 2012–2015.
- Liaison Officer Gedung Center of Advance Sciences ITB, 2012.
- Wakil Kepala UPT K3L ITB, 2014–2015.
- Komisi Disiplin Pegawai ITB, 2014–2020.
- Tim Penyiapan Kampus ITB Cirebon, 2015–2020.
- Kepala UPT K3L ITB, 2015–2020.

- Panitia SBMPTN Bandung, 2015–2020.
- Utusan ITB, Counter Terrorism Financing Summit, Bali, 2016.
- Utusan ITB, Asian Productivity Organization, Vietnam, 2017.
- Wakil Dekan Bidang Akademik FTI – ITB, 2020–sekarang.

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

- CPNS, III/a, 1 Maret 1999.
- PNS, Penata Muda Tk.I, III/a, 1 April 2000.
- Penata, III/c, 1 Oktober 2012.
- Penata Tk.I, III/d, 1 April 2015.
- Pembina, IV/a, 1 Oktober 2019.
- Pembina Tk.I, IV/b, 1 Oktober 2021.

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

- Asisten Ahli Madya, 1 Juli 2000.
- Asisten Ahli, 1 Januari 2001.
- Lektor Kepala (loncat jabatan), 1 Juni 2012.
- Profesor/Guru Besar, 1 Desember 2021.

V. KEGIATAN PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT

Penelitian (2017–2022)

- **Yogi Wibisono Budhi** (ITB), Elvi Restiawaty (ITB), Hary Devianto (ITB), Haryo Pandu Winoto (ITB), Hafis Pratama R.G. (ITB), N. Nishiyama (Osaka University), S. Uemiya (Gifu University), M. Miyaoto (Gifu University); Nanomaterial Synthesis and Its Application for Converting Natural Gas to H₂ as Clean Energy in the Future, Rispro Kerja Sama Internasional/LPDP, 2021–2024.
- **Yogi Wibisono Budhi** (ITB), M. Miyamoto (Gifu University); Pengembangan Membran Pd-Ag untuk Pemisahan Gas Hidrogen sebagai Sumber Energi Bersih, Riset ITB, 2022.
- **Yogi Wibisono Budhi** (ITB), Rino R. Mukti (ITB), Veinardi Suendo (ITB); Designing Nano-Porous Materials and Exsolved Nano-Catalysts for H₂O Splitting and CO₂ Reuse, MIT-Indonesia Research Alliance, 2020–2021.
- **Yogi Wibisono Budhi** (ITB), Veinardi Sueondo (ITB), H. Susanto (Undip), A. Kusumaatmaja (UGM); Pengembangan nanokatalis Pd

Berpenyangga Zeolit untuk Produksi Hidrogen melalui *Dry Reforming of Methane* Gas Alam Natuna, Konsorsium Riset Unggulan Perguruan Tinggi, Kemristekdikti, 2019–2021.

- **Yogi Wibisono Budhi** (ITB), Arie Wibowo (ITB); Pengembangan nanoselulosa sebagai matriks bahan aktif untuk pembuatan alcohol-free hand sanitizer, Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi, Kemristekdikti, 2021.
- **Yogi Wibisono Budhi** (ITB); Sintesis TiO_2 Berpenyangga CNC untuk Mengkonversikan CO_2 Menjadi Solar Fuels, World Class Research, Kemristekdikti (top down), 2021.
- **Yogi Wibisono Budhi** (ITB); Catalytic Oxidation of Benzene over Commercial Catalyst in a Pilot Scale Reverse Flow Reactor: Modeling, Simulation, Experiment, PPMI FTI ITB, 2021.
- **Yogi Wibisono Budhi** (ITB), Arie Wibowo (ITB); Produksi Green Diesel Menggunakan Enzim Lipase Terimobilisasi pada Matriks Cellulose Nanocrystals, Riset ITB, 2020.
- **Yogi Wibisono Budhi** (ITB); Synthesis and Characterization of Immobilized Lipase onto Cellulose Nanocrystals for Biodiesel Production, The Asahi Glass Foundation, 2019/2020.
- **Yogi Wibisono Budhi** (ITB), Hary Devianto (ITB); Pengembangan Nanokatalis $\text{Pd/CeO}_2\text{-ZrO}_2$ untuk Dry Reforming of Methane (DRM) Menggunakan Reaktor Dinamis, Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi, Kemristekdikti, 2019–2020.
- **Yogi Wibisono Budhi** (ITB); Pengembangan Katalis $\text{CuO-MnO}_2\text{-NiO/Ce(1-x)Zr(x)O}_2$ untuk Oksidasi Benzena Menggunakan Reaktor Dinamik, Pendidikan Magister Doktor untuk Sarjana Unggul (PMDSU), Kemristekdikti, 2017–2019.
- **Yogi Wibisono Budhi** (ITB); Pengembangan Katalis Pt/CNCs untuk Mengolah Emisi Gas Buang, Pendidikan Magister Doktor untuk Sarjana Unggul (PMDSU), Kemristekdikti, 2017–2019.
- **Yogi Wibisono Budhi** (ITB), Arie Wibowo (ITB); Pengembangan Cellulose Nanocrystals (CNCs) untuk Aplikasi Reaksi Katalitik, P3MI ITB, 2019.
- **Yogi Wibisono Budhi** (ITB), Arie Wibowo (ITB); Cellulose Nanocrystals Termodifikasi sebagai Matriks Penyangga Imobilisasi Enzim Lipase untuk Produksi Biodiesel, Riset ITB, 2019.

- **Yogi Wibisono Budhi** (ITB), Elvi Restiawaty (ITB), N. Nishiyama (Osaka University); Integrated Hydrogen Production and Permeation through a Palladium Based Membrane, Penelitian Kerjasama Luar Negeri, Kemristekdikti, 2016–2018.
- **Yogi Wibisono Budhi** (ITB), Ferry Iskandar (ITB), Hary Devianto (ITB); Aplikasi Katalis Platina Berstruktur Mikro untuk Mengolah Emisi Gas Buang di Pabrik PTA Menggunakan Reaktor Ototermal, Penelitian Unggulan Strategis Nas., Kemristekdikti, 2016–2018.
- **Yogi Wibisono Budhi** (ITB), Arie Wibowo (ITB); Sintesis Cellulose Nanocrystals (CNCs) dari Limbah Serat Jeans, Riset ITB, 2018.
- **Yogi Wibisono Budhi** (ITB), Hermawan Judawisastra (ITB), Ferry Iskandar (ITB), Veinardi Suendo (ITB); Pembuatan Biomaterial Maju Cellulose Nano Crystallines (CNC) dari Tandan Kelapa Sawit sebagai Material Penyangga Katalis Pt/Rh/Ce untuk Konverter Katalitik, Penelitian Badan Pengelola Dana Penelitian Kelapa Sawit (BPDPKS), 2017.

Pengabdian kepada Masyarakat (2022)

- **Yogi Wibisono Budhi** (Project Leader); Evaluasi & Optimasi Biaya Produksi Pabrik Amoniak dan Urea, FTI ITB – Pupuk Indonesia, 2022–2023.
- **Yogi Wibisono Budhi** (Project Leader); Jasa Pendampingan Desain, Konstruksi, dan Perizinan RTCP, FTI ITB – RTI Pertamina, 2022–2023.
- **Yogi Wibisono Budhi** (Project Leader); Kajian Ahli Keteknisan Industri oiler PT Pertamina dalam Pembuatan dan Pemasangan Pipa Bawah Laut Berbasis Risiko, FTI ITB – Otto Hasibuan & Associates, 2022.
- **Yogi Wibisono Budhi** (Project Leader); Flow Distribution with Computational Fluid Dynamics (CFD) Method on Reactor Effluent Air Cooler (REAC) Ea-3-02 Unit 003B (Hydrocracker Unit) at RU V Balikpapan, PT LAPI ITB, 2022 (stage 1).
- **Yogi Wibisono Budhi** (Project Leader); Flow Distribution with Computational Fluid Dynamics (CFD) Method on Reactor Effluent Air Cooler (REAC) Ea-3-02 Unit 003B (Hydrocracker Unit) at RU V Balikpapan, PT LAPI ITB, 2022 (stage 2).

- **Yogi Wibisono Budhi** (Project Leader); Feasibility Study: Pemanfaatan Kolom Naphtha Splitter sebagai Unit Produksi Solvent di RU V Balikpapan, PT LAPI ITB, 2022.
- **Yogi Wibisono Budhi** (Project Leader); Pengadaan Jasa Tenaga Konsultan Kajian dan Penyusunan Sistem Tata Kerja (STK) HSSE (Holding) PT Pertamina (Persero), FTI ITB – PT Pertamina, 2022.
- **Yogi Wibisono Budhi** (Project Leader); Kajian Kebutuhan Penambahan Proteksi Bahaya Petir pada Fasilitas Stasiun Pengumpul dan Tanki Timbun PHR – WK Rokan, FTI ITB – Pertamina Hulu Rokan, 2022.
- **Yogi Wibisono Budhi** (Project Leader); Studi Pemodelan Dinamik Kebocoran Gas Dan Penyusunan Dokumen Bahaya Besar, LAPI ITB PT Kilang Pertamina Indonesia, 2022.

VI. PUBLIKASI

Buku

- Bindar, Y., **Budhi, Y.W.**, Hernowo, P., Wahyu, S., Saquib, S., Setiadi, T., 2022. "Sustainable technologies for biochar production". Book Chapter: Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Biochar Towards Sustainable Environment (eds. H.H. Ngo, W. Guo, A. Pandey, S. Varjani, D.C.W. Tsang), Elsevier, 10000 AE Amsterdam, Netherlands.
- Budhi, Y.W., 2008. "Technology Report of Reverse Flow Reactor" in European Roadmap for Process Intensification (eds. J. Moulijn and A. Stankiewicz).

Jurnal Internasional

- Nisa, K.S., Suendo, V., Sophiana, I.C., Susanto, H., Kusumaatmaja, A., Nishiyama, N., **Budhi, Y.W.**, 2022. "Effect of base promoter on activity of MCM-41-supported nickel catalyst for hydrogen production via dry reforming of methane". International Journal of Hydrogen Energy 47(55), 23201–23212. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.081>
- Sophiana, I.C., Iskandar, F., Devianto, H., Nishiyama, N., **Budhi, Y.W.**, 2022. "Coke-resistant Ni/CeZrO₂ Catalysts for Dry Reforming of Methane to Produce Hydrogen-rich Syngas". Nanomaterials 12(9), 1556. <https://doi.org/10.3390/nano12091556>

- Restiawaty, E., Dewi, A., Wibisono, T.A.S.E., **Budhi, Y.W.**, 2022. "Lignocellulosic bioethanol production using *Neurospora intermedia* in consolidated bioprocessing (CBP) system". *Biofuels*. <https://doi.org/10.1080/17597269.2022.2137948>.
- Restiawaty, E., Culsum, N.T.U., Nishiyama, N., **Budhi, Y.W.**, 2022. "Preparation, Characterization, and Surface Modification of Cellulose Nanocrystal from Lignocellulosic Biomass for Immobilized Lipase". *Fibers* 10(4), art. no. 33. <https://doi.org/10.3390/fib10040033>.
- Madani, H., Wibowo, A., Judawisastra, H., Nishiyama, N., **Budhi, Y.W.**, 2022. "One-step extraction of cellulose nanocrystals from high lignin biomass through ammonium persulfate oxidation method". *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology* 13(1), art. no. 015007. <https://doi.org/10.1088/2043-6262/ac549a>.
- Hernowo, P., Rasrendra, C.B., **Budhi, Y.W.**, Rizkiana, J., Irawan, A., Marno, S., Meliana, Y., Muraza, O., Bindar, Y., 2022. "Volatile State Mathematical Models for Predicting Components in Biomass Pyrolysis Products". *Journal of Engineering and Technological Sciences* 54 (1), art. no. 220108. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.1.8>.
- Wibowo, A., Santoso, R., Judawisastra, H., **Budhi, Y.W.**, 2022. "Preparation of Platina Nanoparticles with the Presence of Cellulose Nano Crystals". *Journal of Physics: Conference Series* 2243(1), 012104. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2243/1/012104>.
- Restiawaty, E., Maulana, A., Umi Culsum, N.T., Aslan, C., Suendo, V., Nishiyama, N., **Budhi, Y.W.**, 2021. "The removal of 3-monochloropropane-1,2-diol ester and glycidyl ester from refined-bleached and deodorized palm oil using activated carbon". *RSC Advances* 11(27), pp. 16500-16509. <https://doi.org/10.1039/D1RA00704A>.
- Culsum, N.T.U., Melinda, C., Leman, I., Wibowo, A., **Budhi, Y.W.**, 2021. "Isolation and characterization of cellulose nanocrystals (CNCs) from industrial denim waste using ammonium persulfate". *Materials Today Communications* 26, art. no. 101817. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101817>.

- Sophiana, I.C., Topandi, A., Culsum, N.T.U., **Budhi, Y.W.**, 2021. “Design and Simulation of a Reverse Flow Reactor for Catalytic Oxidation of Lean Benzene Emissions”. *Journal of Physics: Conference Series* 1772 (1), art. no. 012018.
- Restiawaty, E., Dewi, A., **Budhi, Y.W.**, 2021. “Utilization of vetiver grass containing metals as lignocellulosic raw materials for bioethanol production”. *Biofuels* 12 (8), pp. 971–976. <https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1564481>.
- **Budhi, Y.W.**, 2020. “Reverse Flow Reactor with Side Feeding as a Novel Strategy to Create Dynamic Oxygen Coverage and Heat Propagations in Lean Ammonia Oxidation”. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 155, 108064. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108064>.
- Pasymi, **Budhi, Y.W.**, Bindar, Y., 2020. “Experimental and numerical investigations of fluid flow behaviors in a biomass cyclone burner”. *ASEAN J. of Chemical Engineering* 20(1), 88–98.
- Pasymi, **Budhi, Y.W.**, Bindar, Y., 2020. “Intrinsic Parameters of Dry Chopped Miscanthus for Cold Particle Dynamic Modeling” *Technology Journal* 82(5), 91–100. <https://doi.org/10.11113/jt.v82.13534>.
- Restiawaty, E., Gani, K.P., Dewi, A., Arina, L.A., Kurniawati, K.I., **Budhi, Y.W.**, Akhmaloka, 2020. “Bioethanol production from sugarcane bagasse using neurospora intermedia in an airlift bioreactor”. *International Journal of Renewable Energy Development* 9(2), pp. 247–253. <https://doi.org/10.14710/ijred.9.2.247-253>.
- Sophiana, I.C., Topandi, A., Iskandar, F., Devianto, H., Nishiyama, N., **Budhi, Y.W.**, 2020. “Catalytic Oxidation of Benzene at Low Temperature over Novel Combination of Metal Oxide Based Catalysts: CuO, MnO₂, NiO with Ce_{0.75}Zr_{0.25}O₂ as Support”. *Material Today Chemistry* 17, 100305. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2020.100305>.
- **Budhi, Y.W.**, Suganda, W., Irawan, H.K., Restiawaty, E., Miyamoto, M., Uemiya, S., Nishiyama, N., van Sint Annaland, M., 2020. “Hydrogen Separation from Mixed Gas (H₂, N₂) Using Pd/Al₂O₃

Membrane under Forced Unsteady State Operations”. International Journal of Hydrogen Energy 45(16), 9821–9835. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.235>.

- Restiawaty, E., Arina, L.A., **Budhi, Y.W.**, 2018. “Development of bioethanol production from sugarcane bagasse using neurospora intermedia on solid state culture”. Asian Journal of Microbiology, Biotechnology and Environmental Sciences 20, pp. S98–S103. <https://doi.org/10.14710/ijred.9.2.247-253>.
- Pasymi, **Budhi, Y.W.**, Irawan, A., Bindar, Y., 2018. “Three-dimensional cyclonic turbulent flow structures at various geometries, inlet-outlet orientations and operating conditions”. Journal of Mechanical Engineering and Sciences 12(4), 4300–4328. <https://doi.org/10.15282/jmes.12.4.2018.23.0369>
- Pasymi, **Budhi, Y.W.**, Bindar, Y., 2018. “Axial Inlet Geometry Effects on the Flow Structures in a Cyclone Burner Related to the Combustion Performance of Biomass Particles”. Journal of Engineering and Technological Sciences 50(5), 684-6971, 2018. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2018.50.5.7>
- Kurniawan, T., **Budhi, Y.W.**, Bindar, Y., 2018. “Reverse Flow Reactor for Catalytic Oxidation of Lean Methane”. World Chemical Engineering Journal 2(1), 21–26.
- Maharsi, R., Septianto, R.D., Rohman, F., Iskandar, F., Devianto, H., **Budhi, Y.W.**, 2017. “Effect of temperature and precursor concentration on the morphology of Cu/ γ -Al₂O₃ prepared via urea combustion method”. Materials Research Express 4(4), 044002. DOI 10.1088/2053-1591/aa685f
- Pasymi, **Budhi, Y.W.**, Bindar, Y., 2017. “The effect of inlet aspect ratio (RIA) to the three-dimensional mixing characteristics in tangential burner”. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences 12(18) 2017.
- **Budhi, Y.W.**, Rionaldo, H., Padama, A.A.B., Kasai, H., Noezar, I., 2015. “Forced unsteady state operation for hydrogen separation through Pd–Ag membrane after start-up”. International Journal of Hydrogen Energy 40(32), 10081–10089. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.05.182>

- Chantaramolee, B., Padama, A.A.B., Kasai, H., **Budhi, Y.W.**, 2015. "First principles study of N and H atoms adsorption and NH formation on Pd (111) and Pd₃Ag (111) surfaces". Journal of membrane science 474, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.09.048>
- **Budhi, Y.W.**, Effendy, M., Bindar, Y., Subagjo, 2014. "Dynamic Behavior of Reverse Flow Reactor for Lean Methane Combustion". Journal of Engineering and Technological Sciences 46(3), 299–317. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2014.46.3.5>
- Subagjo, **Budhi, Y.W.**, Effendy, M., Bindar, Y., 2014. "Homogeneity of Continuum Model of an Unsteady State Fixed Bed Reactor for Lean CH₄ Oxidation". Journal of Engineering and Technological Sciences 46(2), 195–210. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2014.46.2.6>
- Padama, A.A.B., Kasai, H., **Budhi, Y.W.**, 2013. "Hydrogen absorption and hydrogen-induced reverse segregation in palladium–silver surface". International Journal of Hydrogen Energy 38(34), 14715–14724. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.08.138>
- Wonoputri, V., Effendy, M., Budhi, Y.W., Bindar, Y., 2013. "Determination of Kinetic Parameters for Methane Oxidation over Pt/g-Al₂O₃ in a Fixed Bed Reactor". Journal of Engineering and Technological Sciences 45B(2) (2013), 1–14. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2013.45.2.7>
- Padama, A.A.B., Kasai, H., **Budhi, Y.W.**, 2013. "Hydrogen absorption and hydrogen-induced reverse segregation in palladium–silver surface". International Journal of Hydrogen Energy 38(34), 14715–14724. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.08.138>
- Padama, A.A.B., Kasai, H., **Budhi, Y.W.**, Arboleda Jr., N.B., 2012. "Ab initio investigation of hydrogen atom adsorption and absorption on Pd (110) surface". Journal of the Physical Society of Japan 81(11) 114705. DOI: 10.1143/JPSJ.81.114705
- Nuryaman, A., Gunawan, A.Y., Sidarto, K.A., **Budhi, Y.W.**, 2012. "Singular Perturbation Problem for Steady State Conversion of Methane Oxidation in a Reverse Flow Reactor". Journal of Mathematical and Fundamental Sciences 44(3), 275–284. <https://doi.org/10.5614/itbj.sci.2012.44.3.7>

- **Budhi, Y.W.**, Noezar, I., Aldiansyah, F., Kemala, P.V., Padama, A.A.B., Kasai, H., 2011. "Forced unsteady state operation to improve H₂ permeability through Pd-Ag membrane during start-up". *International Journal of Hydrogen Energy* 36(23), 15372–15381. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.08.110>
- Padama, A.A.B., Ozawa, N., **Budhi, Y.W.**, Kasai, H., 2011. "Density Functional Theory Investigation on the Dissociation and Adsorption Processes of N₂ on Pd(111) and Pd₃Ag(111) Surfaces". *Japanese Journal of Applied Physics* 50(4). <http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.50.045701>
- **Budhi, Y.W.**, Jaree, A., Hoebink, J.H.B.J., Schouten, J.C., 2004. "Simulation of reverse flow operation for manipulation of catalyst surface coverage in the selective oxidation of ammonia". *Chemical Engineering Science* 59(19), 5365–5377. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.04.040>
- **Budhi, Y.W.**, Hoebink, J.H.B.J., Schouten, J.C., 2004. "Reverse flow operation with reactor side feeding: analysis, modeling, and simulation". *Industrial and Engineering Chemistry Research* 43(22), 6955–6963. <https://doi.org/10.1021/ie049702d>

Seminar Internasional (2018–2022)

- Badeges, H., Sophiana, I.C., **Budhi, Y.W.**, 2021. "Thermodynamics and Kinetics Study of Methane Dry Reforming Process for Synthesis Gas Production". 7th International Conference on Environment.
- Rismayasari, D., **Budhi, Y.W.**, Rizkiana, J., Cahyono, T., Khairunnisa, 2020. "Evaluation of Hydrocarbon Gas Dispersion and Explosion in a Gas Processing Plant". 26th Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE 2019). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 778, 012150.
- **Budhi, Y.W.**, Putri, A.K., Nashira, A., 2019. "Forced unsteady state operation of a catalytic converter during cold start-up for oxidizing CO over Pt/ γ -Al₂O₃ catalyst", Asia Pacific Conference on Chemical Engineering, Sapporo, Japan.
- Sophiana, I.C., Adhi, T.P., **Budhi, Y.W.**, 2019. "Simulation of Dry Reforming of Methane to Form Synthesis Gas as Feed Stock for Acetic

Acid Production”. Asia Pacific Conference on Chemical Engineering, Sapporo, Japan.

- **Budhi, Y.W.**, Putri, D.D., Husna, A., Irawan, H.K., Miyamoto, M., Uemiya, S., 2018. “Dynamic operation of water gas shift reaction over $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{CuO}$ catalyst in $\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3$ membrane reactor”. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 105(1), art. no. 012020.
- Wibowo, A., Madani, H., Judawisastra, H., Restiawaty, E., Lazarus, C., **Budhi, Y.W.**, 2018. “An eco-friendly preparation of cellulose nano crystals from oil palm empty fruit bunches”. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 105(1), art. no. 012059.
- **Budhi, Y.W.**, Fakhrudin, M., Culsum, N.T.U., Suendo, V., Iskandar, F., 2018. “Preparation of cellulose nanocrystals from empty fruit bunch of palm oil by using phosphotungstic acid”. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 105(1), art. no. 012063.
- Rahardi, R.A., Maharsi, R., Iskandar, F., Devianto, H., **Budhi, Y.W.**, 2018. “Catalytic oxidation of benzene using nano- $\text{CuO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ and commercial catalysts”. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 105(1), art. no. 012039.
- Pasyimi, **Budhi, Y.W.**, Bindar, Y., 2018. “Effects of tangential inlet shape and orientation angle on the fluid dynamics characteristics in a biomass burner”. Journal of Physics: Conference Series 1090(1), 012007.
- Madani, H., Wibowo, A., **Budhi, Y.W.**, 2018. “Effect of Extractives Content in Oil Palm Empty Fruit Bunch (OPEFB) to Preparation of Cellulose Nanocrystals (CNCs) through Ammonium Persulfate (APS) Oxidation Method”. 3rd MRS-id Meeting, Denpasar Bali.
- **Budhi, Y.W.**, Firlina, M., Irriyanto, M.Z., Restiawaty, E., Miyamoto, M., Nishiyama, N., Uemiya, S., 2018. “Hydrogen Permeation through $\text{Pd}_{82}\text{-Ag}_{18}/\text{Al}_2\text{O}_3$ Membrane during Start-up Period in the Presence of N_2 and CO ”. 3rd MRS-id Meeting, Denpasar Bali.
- Sophiana, I.C., Iskandar, F., Deviyanto, H., **Budhi, Y.W.**, 2018. “Combination Effect of Metal Oxide Based Catalysts: Copper Oxide, Mangan Oxide, and Nickel Oxide with $\text{Ce}_{0.75}\text{Zr}_{0.25}\text{O}_2$ as Support for Catalytic Oxidation of Benzene”. 3rd MRS-id Meeting, Denpasar Bali.

- Culsum, N.T.U., Wibowo, A., Mukti, R.R., **Budhi, Y.W.**, 2018. "Synthesis and Charaterization of Cellulose Nanocrystals (CNCs) from Denim Industrial Waste", 3rd MRS-id Meeting, Denpasar Bali.
- Afikah, A., Wijaya, V., **Budhi, Y.W.**, Wibowo, A., 2018. "Synthesis of Cellulose Nanocrystals from Office Waste Papers Using Ammonium Persulfate", 3rd MRS-id Meeting, Denpasar Bali.
- Nuravifah, U., Putri, S.E., **Budhi, Y.W.**, 2018. "Simulation of Effective Ni-based Catalyst Design Using Microkinetic Models of CO_x Methanation on Dynamic Fixed-Bed Reactor". 3rd MRS-id Meeting, Denpasar Bali.

VII. PENGHARGAAN

- Satyalancana Karya Satya 10 thn, Pemerintah Republik Indonesia
- Satyalancana Karya Satya 20 thn, Pemerintah Republik Indonesia
- World Class Professor 2022, Kompetensi, Dit. Sumberdaya, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi.
- World Class Professor 2019, Kompetensi, Dit. Sumberdaya, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi.
- Penyajian terbaik hibah penelitian Kemristekdikti, 2016.
- Best paper: Yogi Wibisono Budhi, Hary Devianto, Lydia Ignacia, Hans Andreas Mikhael. Process Intensification of Hydrogen Production from Ethanol using Microreactor. The 3rd International Conference in Electrical Vehicular Technology (ICEVT) 2015, Solo, Indonesia.
- Best paper: Phelia, M. Effendy, Yogi Wibisono Budhi, Yazid Bindar, Subagjo. Oksidasi Katalitik Emisi Metana pada Reaktor Aliran Bolak-Balik. Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia 2012.

VIII. SERTIFIKASI

- Sertifikasi Dosen, 2012. Kementerian Pendidikan Nasional.
- Applied Approach, 1999.
- Teaching Improvement Workshop, 1999.
- Badan Kejuruan Kimia-Persatuan Insinyur Indonesia
- Sertifikasi Reviewer Penelitian Nasional Kemristekdikti, 2017. BNSP
- Sertifikasi Insinyur Profesional, 2018. BKK-PII.
- PS Program Profesi Insinyur, 2020, ITB.



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532

🌐 fgb.itb.ac.id [FgbItb](#) [FGB_ITB](#)
📱 [@fgbitb_1920](#) [Forum Guru Besar ITB](#)

ISBN 978-623-297-275-9

