



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



INOVASI KATALIS “MERAH-PUTIH”

**Sinergi Ilmu dan Industri
untuk Masa Depan Bangsa**

Profesor Melia Laniwati Gunawan

**Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Bandung**

**Aula Barat ITB
23 Agustus 2025**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

INOVASI KATALIS “MERAH-PUTIH”:
Sinergi Ilmu dan Industri untuk Masa Depan Bangsa

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

INOVASI KATALIS “MERAH-PUTIH”:
Sinergi Ilmu dan Industri untuk Masa Depan Bangsa

Prof. Melia Laniwati Gunawan

23 Agustus 2025
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:

Inovasi Katalis “Merah-Putih”:

Sinergi Ilmu dan Industri untuk Masa Depan Bangsa

Penulis : Prof. Melia Laniwati Gunawan

Reviewer : Prof. I Gusti Bagus Ngurah Makertihartha

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2025

ISBN : 978-623-297-762-4

e-ISBN : 978-623-297-763-1 (PDF)

ITB PRESS

© 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

Puji dan syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus atas anugerah, hikmat, dan penyertaan-Nya sehingga buku ini dapat diselesaikan. Buku ini merupakan rangkuman reflektif sekaligus ilmiah dari perjalanan panjang sebagian dari pengajaran, riset, dan pengabdian kepada masyarakat dalam bidang teknik reaksi kimia dan teknologi katalisis yang telah saya tekuni selama lebih dari tiga puluh lima tahun.

Dengan semangat untuk mengembangkan ilmu yang aplikatif dan berdampak bagi kemandirian industri nasional, buku ini disusun guna menjembatani konsep dasar teknik reaksi, kinetika, dan katalisis dengan aplikasinya di industri, khususnya melalui pengembangan *Katalis Merah Putih* sebagai karya anak bangsa. Buku ini memadukan pendekatan akademik dan rekayasa praktis dari laboratorium hingga skala industri, dan diharapkan dapat menjadi rujukan sekaligus inspirasi bagi mahasiswa, peneliti, praktisi, dan pemangku kebijakan.

Saya menyampaikan penghargaan dan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan buku ini: rekan-rekan sejawat (dosen dan tenaga kependidikan) Fakultas Teknologi Industri - ITB, rekan-rekan tim peneliti Pusat Rekayasa Katalisis - ITB, para asisten, mahasiswa, dan alumni Teknik Kimia - FTI - ITB, institusi mitra, dan keluarga saya yang terus memberi dukungan serta menjadi sumber kekuatan dan semangat.

Kiranya buku ringkas ini dapat menjadi bagian kecil dari upaya besar membangun ekosistem ilmu dan teknologi yang berakar pada potensi bangsa sendiri, dan berbuah bagi masa depan Indonesia.

Bandung, 23 Agustus 2025

Profesor Melia Laniwati Gunawan

SINOPSIS

Buku *Inovasi Katalis Merah-Putih: Sinergi ilmu dan Industri untuk Masa depan Bangsa* merupakan ikhtiar ilmiah untuk merekam, merefleksikan, sekaligus menyebarluaskan pengetahuan dan pengalaman dalam pengembangan teknologi katalis di Indonesia, dari tahap dasar hingga menuju penerapan skala industri. Buku ini ditulis berdasarkan perjalanan panjang sebagian dari pengajaran, riset, dan pengabdian di bidang teknik reaksi kimia dan katalisis, yang dijalani dengan semangat kontribusi nyata bagi kemandirian teknologi proses nasional.

Buku ini mengajak pembaca untuk memahami keterkaitan erat antara ilmu dasar teknik reaksi kimia, kinetika reaksi, dan teknologi katalisis dengan rekayasa proses industri yang aplikatif. Dimulai dari peran teknik reaksi kimia dan katalisis dari sejak tahap perancangan proses dan sistem pemroses untuk industri kimia, saat tahap konstruksi dan komisioning pabrik, saat operasi dan optimasi pabrik, serta saat tahap evaluasi dan pengembangan proses suatu industri kimia. Dilanjutkan dengan konsep-konsep fundamental mengenai reaksi kimia sebagai "**nyawa**", dan peran reaktor sebagai "**jantung**" bagi industri kimia dan model kinetika untuk desain dan simulasi reaktor. Pembahasan kemudian berkembang menuju peran katalis sebagai faktor kunci dalam efisiensi dan keberlanjutan proses di industri kimia, petrokimia, oleokimia, bahkan di industri penghasil energi dan bio-fuel. Istilah "katalis sebagai "**mak comblang** atau biro jodoh dalam proses kimia" menggambarkan betapa vital dan strategisnya posisi katalis dalam mempertemukan reaktan menuju produk dengan jalur yang lebih hemat energi, selektif, dan ekonomis.

Pembaca akan diajak memahami seluk-beluk karakterisasi, penggolongan, serta mekanisme kerja berbagai jenis katalis—baik homogen maupun heterogen-, katalis asam-basa, redoks, hingga katalis berbasis hayati seperti biokatalis dan katalis biomimetik. Di bagian khusus, dibahas pula pengalaman menentukan umur/sisa umur katalis dan mekanisme deaktivasi yang sering menjadi tantangan besar di industri, beserta pendekatan rekayasa untuk memperpanjang masa aktifnya.

Porsi utama buku ini menyoroti kiprah pengembangan *Katalis Merah Putih*, mulai dari metode sintesis dan seleksi/*screening* katalis skala kecil (di laboratorium), kemudian sintesis dalam skala lebih besar (skala pilot) menggunakan bahan, peralatan, dan kondisi yang lebih mendekati skala komersial, dan dilanjutkan dengan skala komersial di Industri. Pada buku ini, skema pengembangan tersebut diterapkan untuk katalis-katalis yang dibutuhkan dalam berbagai sektor strategis seperti pengolahan nafta dan diesel, produksi bahan bakar nabati (bio-fuel), serta konversi oleokimia. Dari pengalaman pengembangan dan data eksperimen tersebut berhasil dibuat perancangan konseptual untuk pembangunan pabrik katalis. Keberhasilan pendirian pabrik katalis nasional yang pertama juga diulas sebagai tonggak penting dalam membuktikan bahwa teknologi hasil karya anak bangsa layak dan mampu bersaing di tingkat industri.

Pesan penting yang ingin disampaikan dalam buku ini, bahwa pengembangan katalis tidak hanya soal penemuan material baru, tetapi juga memastikan keberhasilannya saat diterapkan di industri. Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis (TRKK) memainkan peran kunci dalam menjembatani ilmu dasar dan aplikasi nyata.

Dengan pendekatan yang sistematis dan bahasa yang tetap menjangkau lintas latar belakang, buku ini ditujukan sebagai sumber referensi dan inspirasi bagi mahasiswa, dosen, peneliti, praktisi industri, dan pengambil kebijakan yang peduli pada pengembangan teknologi proses berbasis katalis sebagai bagian dari strategi kemandirian bangsa.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	v
SINOPSIS	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
1 PENDAHULUAN.....	1
2 TEKNIK REAKSI KIMIA DAN KATALISIS: FONDASI REKAYASA PROSES INDUSTRI.....	3
2.1 Tahap Perancangan Pabrik	3
2.2 Tahap Konstruksi dan Komisioning.....	7
2.3 Tahap Operasi dan Optimasi.....	8
2.4 Tahap Evaluasi dan Pengembangan Proses.....	10
3 REAKSI DAN REAKTOR: "NYAWA DAN JANTUNG" INDUSTRI KIMIA	13
3.1 Reaksi Kimia sebagai "Nyawa" Transformasi Industri	13
3.2 Reaktor Kimia sebagai "Jantung" Sistem Produksi.....	15
4 KINETIKA REAKSI: PILAR REKAYASA PROSES KIMIA	23
4.1 Model Persamaan Kinetika Reaksi Kimia.....	23
4.2 Peran Model Kinetika dalam Desain dan Simulasi Reaktor.....	25
5 KATALIS: KUNCI DAN "MAK COMBLANG / BIRO JODOH" PROSES KIMIA	27
5.1 Fungsi dan Mekanisme Kerja Katalis	28
5.2 Penggolongan Katalis	31
5.3 Katalis Homogen-Heterogen.....	31
5.4 Katalis Asam-Basa	34
5.5 Katalis Oksidasi-Reduksi.....	35
5.6 Biokatalis.....	36
5.7 Katalis Bio-Mimetik.....	37
6 UMUR KATALIS INDUSTRI: PENDEKATAN KINETIKA DAN REKAYASA PROSES	39
6.1 Penyebab Deaktivasi Katalis	39
6.2 Strategi Mengurangi <i>Fouling</i> dan Regenerasi.....	40
6.3 Umur Katalis Skala Industri	41

6.4	Umur Katalis dalam Konversi Biomassa: Perspektif Industri	42
6.5	Contoh Pemodelan Deaktivasi dan Estimasi Umur Katalis	43
7	PENGEMBANGAN KATALIS MERAH-PUTIH: DARI LAB KE KOMERSIAL.....	49
7.1	Metode Sintesis Katalis Padat.....	51
7.2	Seleksi (<i>Screening</i>) Katalis	53
7.3	Pengembangan Katalis Merah Putih.....	55
7.4	Katalis Hidrotreating Nafta dan Diesel	57
7.5	Katalis-katalis Bio-fuel (Bahan Bakar Nabati)	59
7.6	Katalis-Katalis Oleokimia.....	62
7.7	Katalis Lainnya	62
7.8	Pabrik Katalis Merah-Putih Pertama	63
8	PENUTUP	65
9	UCAPAN TERIMA KASIH	67
	DAFTAR PUSTAKA	71
	CURRICULUM VITAE.....	73

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Blok diagram sederhana sintesis ammonia dengan bahan baku gas alam, kukus, dan udara.....	5
Gambar 2	Energi bebas Gibbs dehidrasi n-butanol menjadi dibutyl eter, 1-butena, cis-2-butena, trans-2-butena, dan isobutena. (sumber data: Yaws, 2003)	14
Gambar 3	Skema reaktor unggun tetap dan elemen diferensialnya yang diperbesar.	25
Gambar 4	Profil (a) konversi n-butanol berkatalis alumina dan (b) temperatur di sepanjang reaktor unggun tetap non-adiabatik pada berbagai temperatur umpan dengan temperatur dinding reaktor sama dengan temperature umpan.	26
Gambar 5	Ilustrasi perbedaan energi aktivasi, E_a untuk reaksi eksoterm dengan dan tanpa katalis	28
Gambar 6	Ilustrasi kerja katalis dalam mekanisme reaksi sintesis amonia, proses Haber	29
Gambar 7	Contoh beberapa katalis padat yang digunakan di reaktor Industri	33
Gambar 8	Kurva profil 2 (atas kiri) dan 3 dimensi (bawah kiri) Model pembentukan kokas sebagai fungsi temperatur reaksi dan waktu pemakaian (umur) katalis berbasis zeolite Y pada dehidrasi n-butanol serta data konversi reaksi saat pemakaian sampai 100 jam (atas kanan) (Gunawan, RSCE, 2024)	45
Gambar 9	Profil penurunan tekanan terhadap akumulasi kapasistas umpan reaktor hidrotreating dengan penurunan tekanan maksimum yang diijinkan 4,5 bar (Laporan, 2018)	46
Gambar 10	Grafik peningkatan temperatur umpan reaktor (RIT) sebagai fungsi dari kapasitas kumulatif spesifik katalis yang memiliki EOR 483 °C (Laporan, 2018).....	47
Gambar 11	Hasil simulasi penurunan luas permukaan aktif salah satu katalis reformasi dicocokkan dengan data (laporan, 2018)	48

Gambar 12	Contoh skema salah satu rangkaian alat <i>screening</i> aktivitas katalis di lab TRK – ITB	54
Gambar 13	Skema pengembangan KATALIS dari laboratorium sampai komersial.....	56
Gambar 14	Pabrik katalis pendidikan kapasitas 1-5 kg/batch di lab Pilot Teknik Kimia – FTI kampus ITB	57
Gambar 15	Strategi mengkonversi asam lemak dari minyak nabati menjadi bahan bakar biohidrokarbon ditinjau dari rumus kimianya (Sumber:. Soerawidjaja, 2023).	60
Gambar 16	(a) Skema konversi minyak nabati menjadi produk biohidrokarbon melalui jalur termokatalitik dan (b) konsep mekanisme pembentukan bensin biohidrokarbon dari asam oleat hasil hidrolisis minyak nabati, olein melalui proses perengkahan, dekarboksilasi, isomerisasi (Twaiq, 2010; Tatang H.Soerawidjaja, 2023).	61
Gambar 17	Katalis dan Adsorben “ Merah-Putih ” hasil pengembangan ITB bersama mitra yang siap dan telah dipakai oleh Industri Kimia di Indonesia	63
Gambar 18	Pabrik Katalis Merah-Putih Pertama, PT Katalis Sinergi Indonesia berlokasi di Cikampek, Jawa Barat, Indonesia.....	64

DAFTAR TABEL

Tabel 1	Perbandingan Energi aktivasi (E_a) reaksi transesterifikasi minyak kedelai dengan metanol menggunakan berbagai jenis katalis	30
Tabel 2	Perbandingan Energi aktivasi (E_a) reaksi transesterifikasi minyak sawit dengan metanol menggunakan berbagai jenis katalis	31
Tabel 3	Perbandingan zeolit yang diuji terhadap dehidrasi n-butanol	55

1 PENDAHULUAN

Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis (TRKK) merupakan salah satu pilar utama dalam disiplin Teknik Kimia, yang berperan sentral dalam merancang, mengembangkan, dan mengoptimalkan proses konversi kimia secara efisien dan berkelanjutan. Dalam sistem industri kimia, reaktor kimia berfungsi sebagai “jantung proses” karena di dalamnya berlangsung transformasi bahan baku menjadi produk bernilai melalui reaksi yang dikendalikan secara termodinamik dan kinetik.

Dalam industri kimia modern, katalis memegang peran kunci sebagai pendorong efisiensi dan keberlanjutan proses. Kemampuan katalis untuk mempercepat laju reaksi, meningkatkan selektivitas produk, dan mengurangi konsumsi energi menjadikannya esensial bagi berbagai sektor industri, mulai dari petrokimia, farmasi, oleokimia, hingga energi terbarukan. Namun demikian, pengembangan katalis yang efektif bukan sekadar penemuan material baru di laboratorium. Proses transisi dari konsep di skala laboratorium menuju implementasi skala industri memerlukan pemahaman yang mendalam dan pendekatan yang sistematis.

Peran Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis (TRKK) menjadi sangat penting, sebagai disiplin ilmu yang dapat menjembatani/ menghubungkan penemuan ilmiah dasar tentang material katalitik dengan penerapan praktis di industri. Melalui prinsip-prinsip TRKK, penelitian katalis tidak hanya fokus pada sintesis dan karakterisasi, tetapi juga pada optimalisasi kondisi reaksi, desain reaktor yang efisien, serta pemodelan kinetika dan perpindahan massa. Pemahaman ini krusial untuk memastikan bahwa katalis yang dikembangkan di laboratorium dapat beroperasi secara andal, ekonomis, dan berkelanjutan saat diproduksi dalam skala besar.

Lebih jauh lagi, keberhasilan suatu proses industri modern tidak hanya ditentukan oleh tingkat konversi kimia yang tinggi, tetapi juga oleh kesesuaian sistem terhadap tuntutan keekonomian, keselamatan operasional, dan keberlanjutan lingkungan. Oleh karena itu, penguasaan atas aspek-aspek fundamental seperti kinetika reaksi, termokimia, serta perpindahan massa dan panas, perlu dikembangkan secara terpadu bersama pemahaman terhadap karakteristik katalis. Sinergi inilah yang mencakup analisis mekanisme reaksi, penentuan laju kinetika, desain dan konfigurasi reaktor,

serta evaluasi stabilitas dan deaktivasi katalis akan menghasilkan sistem proses yang optimal, efisien, dan siap menjawab tantangan industri masa depan. Aspek-aspek ini menjadi landasan dalam pengembangan berbagai proses industri strategis, yang sering kali beroperasi dalam kondisi ekstrem dan kompleks.

Peran TRKK melampaui batas laboratorium akademik; ia mencakup seluruh siklus hidup pengembangan teknologi proses—dari tahap konseptual dan penelitian awal, hingga desain fasilitas produksi, komersialisasi teknologi, serta evaluasi performa proses secara berkelanjutan. Dalam konteks inilah TRKK menjadi jembatan yang kokoh antara ilmu dasar kimia dan praktik rekayasa industri, sekaligus fondasi dalam membangun sistem proses yang efisien secara energi, kompetitif secara ekonomi, dan selaras dengan prinsip keberlanjutan.

2 TEKNIK REAKSI KIMIA DAN KATALISIS: FONDASI REKAYASA PROSES INDUSTRI

Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis merupakan fondasi ilmiah dan rekayasa dalam pengembangan proses industri kimia yang efisien, adaptif, dan berkelanjutan. Kedua bidang ini menyediakan kerangka konseptual dan metodologis untuk memahami, merancang, serta mengendalikan proses transformasi kimia pada berbagai skala, dari laboratorium hingga produksi skala komersial.

Secara ilmiah, teknik reaksi kimia memungkinkan analisis dan kuantisasi mekanisme reaksi serta laju kinetika yang menjadi dasar dalam perancangan reaktor. Sementara itu, katalisis menjadi kunci dalam meningkatkan kecepatan reaksi, karena memberikan jalan/mekanisme reaksi lain yang energi aktivasinya lebih rendah, serta mengarahkan reaksi untuk produk yang diinginkan, yang semuanya sangat menentukan efisiensi proses. Tanpa katalis yang tepat, banyak reaksi akan berlangsung terlalu lambat atau tidak selektif untuk dapat dioperasikan di industri secara ekonomis.

Di tengah tekanan global terhadap efisiensi energi, dekarbonisasi industri, dan peningkatan nilai tambah sumber daya alam, TRKK memainkan peran strategis dalam menciptakan solusi teknologi yang inovatif dan kompetitif. Penguasaan terhadap kinetika reaksi, termodinamika, dan fenomena transport dalam sistem *multiphase* menjadi syarat utama untuk menghasilkan desain proses yang handal dan responsif terhadap tantangan industri masa kini.

Oleh karena itu, integrasi yang erat antara teknik reaksi kimia dan katalisis bukan hanya mendukung keberhasilan desain proses, tetapi juga menjadi elemen krusial dalam kemandirian teknologi nasional dan pencapaian industri kimia yang tangguh di tingkat global.

2.1 Tahap Perancangan Pabrik

Pada tahap perancangan pabrik kimia, peran Teknik Reaksi Kimia (TRK) menjadi sangat krusial dalam memastikan bahwa proses reaksi yang dirancang tidak hanya berjalan efisien secara teknis, tetapi juga ekonomis dan layak secara komersial. Salah satu aspek utama dalam tahap ini adalah

pemilihan jalur reaksi kimia yang paling selektif terhadap produk yang diinginkan, minim menghasilkan produk samping, serta memanfaatkan bahan baku secara optimal.

Setelah jalur reaksi ditentukan, langkah selanjutnya adalah melakukan penentuan model kinetika reaksi melalui studi eksperimental. Parameter laju reaksi diperoleh dari data ekperimental yang kemudian berfungsi sebagai dasar untuk menentukan desain dan pemodelan reaktor kimia. Pemilihan jenis reaktor, yang akan dioperasikan secara *batch*/partaian atau kontinu/sinambung. Reaktor tangki jenis *slurry batch* atau *carberrry reactor* dapat digunakan jika reaksinya katalitik dan dioperasikan secara *batch*. Sedangkan jika dioperasikan secara kontinu, di antaranya dapat dipilih reaktor tangki *slurry*, reaktor unggun tetap (*fixed-bed reactor*), reaktor unggun terfluidakan (*fluidized-bed reactor*), atau reaktor unggun bergerak (*moving-bed reactor*). Pemilihan reaktor sangat bergantung pada fasa campuran reaktan dan produk reaksi, karakteristik kinetika reaksi, data termodinamika, dan kebutuhan skala produksi.

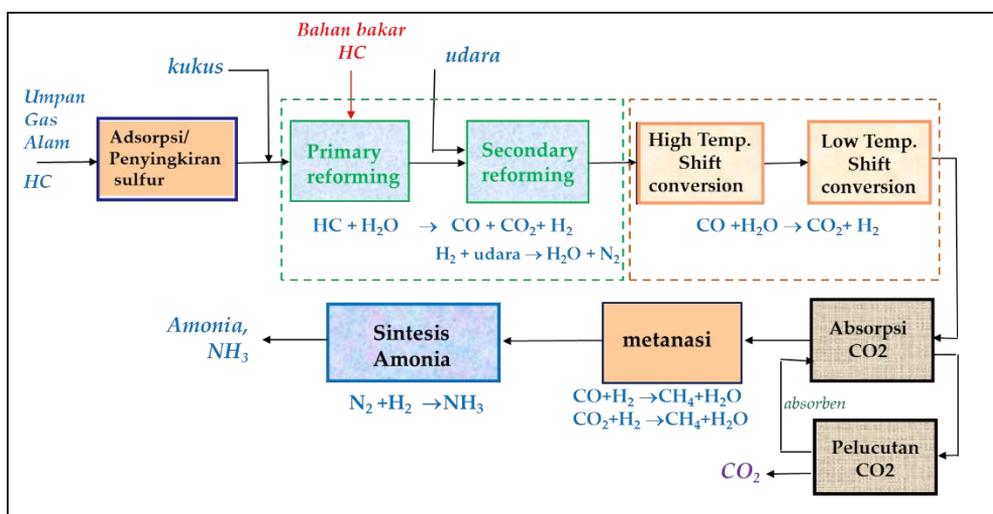
TRK juga berperan dalam simulasi proses, yang bertujuan untuk memprediksi performa reaktor pada berbagai kondisi operasi. Melalui simulasi ini, dapat dilakukan evaluasi terhadap efisiensi konversi, selektivitas, dan distribusi produk, serta diidentifikasi potensi permasalahan operasional. Sebagai contoh, reaktor *tubular* banyak digunakan untuk reaksi gas fasa cepat yang bersifat eksotermik, sementara reaktor *slurry* lebih sesuai untuk sistem yang melibatkan katalis padat tersuspensi dalam cairan.

Selain berperan dalam pemilihan tipe reaktor dan kondisi operasi yang optimal, Teknik Reaksi Kimia (TRK) juga memiliki kontribusi penting dalam penentuan konfigurasi sistem proses secara keseluruhan. Pemilihan sistem ini perlu mempertimbangkan secara cermat aspek perpindahan massa, perpindahan panas, serta efisiensi manajemen energi, sehingga sistem reaksi yang dibangun tidak hanya mampu mencapai konversi dan selektivitas reaksi yang tinggi, tetapi juga efisien dalam konsumsi energi dan sesuai dengan prinsip keberlanjutan proses.

Industri produksi amonia (NH_3) adalah salah satu contoh nyata dari penerapan prinsip-prinsip TRK. Proses ini menggunakan gas alam dan uap air (*steam*) sebagai sumber hidrogen (H_2), dan udara sebagai sumber nitrogen (N_2)—dua gas utama yang dibutuhkan dalam reaksi sintesis amonia.

Komponen utama dari gas alam adalah metana (CH₄), disertai hidrokarbon ringan lainnya seperti etana (C₂H₆), propana (C₃H₈), dan sejumlah kecil butana (C₄H₁₀). Di samping itu, gas alam juga mengandung pengotor seperti gas asam sulfida (H₂S), senyawa sulfur organik (misalnya merkaptan), serta jejak (*trace*) air (H₂O) dan garam mineral yang dapat memengaruhi kinerja proses secara keseluruhan.

Pemilihan sistem proses dalam pabrik amonia tidak semata-mata didasarkan pada reaksi kimia yang terjadi, tetapi juga mempertimbangkan kelangsungan antara reaksi endotermik (seperti reformasi uap metana) dan reaksi eksotermik (seperti sintesis amonia itu sendiri), serta keterpaduan antar-unit operasi agar efisiensi termal dan konversi kimia dapat dicapai secara bersamaan. Oleh karena itu, peran TRK sangat sentral dalam memastikan bahwa desain proses amonia mampu mengintegrasikan aspek kinetika, termodinamika, perpindahan panas, dan manajemen energi ke dalam satu sistem produksi yang teroptimasi.



Gambar 1 Blok diagram sederhana sintesis amonia dengan bahan baku gas alam, kukus, dan udara

Gambar 1 menyajikan diagram blok sederhana dari proses produksi amonia, yang menggambarkan alur utama konversi bahan baku menjadi produk akhir, serta keterkaitan antar-unit yang merepresentasikan interaksi reaksi kimia dengan sistem energi proses secara menyeluruh. Proses reformasi kukus (*steam reforming*) gas alam yang mengandung hidrokarbon ringan (C_nH_m, dengan dominansi CH₄, metana) merupakan tahap awal yang sangat penting dalam produksi gas sintesis (*syngas*), khususnya untuk

keperluan sintesis amonia dan hidrogen industri. Reaksi utama yang terjadi dalam tahap ini adalah reaksi antara hidrokarbon dengan uap air untuk menghasilkan hidrogen (H_2) dan karbon monoksida (CO). Reaksi ini bersifat endoterm, memerlukan energi panas yang besar, dan berlangsung secara optimal pada suhu tinggi antara 700 hingga 900 °C.

Secara umum, proses ini berlangsung dalam dua tahap reaktor yang disusun secara **seri**, yaitu:

1. **Primary Reformer**, yang berisi pipa-pipa reaktor dengan katalis berbasis nikel dan berada dalam tungku pembakaran (*furnace*). Di sini, sebagian besar reaksi reformasi berlangsung dengan pasokan energi panas eksternal dari pembakaran bahan bakar.
2. **Secondary Reformer**, yang menerima gas keluaran dari *primary reformer* dan dicampur dengan udara yang mengandung sekitar 21% volume oksigen (O_2) dan 79% volume nitrogen (N_2). Oksigen yang masuk akan langsung bereaksi dengan hidrogen yang tersedia di gas hasil reformasi sebelumnya, menghasilkan uap air (H_2O) dalam reaksi sangat eksoterm.

Reaksi oksidasi parsial ini berfungsi ganda: pertama, menghasilkan panas reaksi internal yang digunakan untuk menyelesaikan proses reformasi hidrokarbon yang belum sempurna dari tahap sebelumnya; dan kedua, menghilangkan kandungan oksigen dari udara secara tuntas.

Konfigurasi ini memberikan keuntungan termal dan ekonomi yang signifikan. Dengan adanya **secondary reformer**, kebutuhan pembakaran bahan bakar eksternal untuk pemanasan dapat dikurangi secara signifikan. Selain itu, seluruh pasokan nitrogen dari udara dapat langsung digunakan sebagai reaktan dalam sintesis amonia tanpa perlu melalui proses distilasi kriogenik (*cryogenic separation*) yang mahal dan memerlukan pendinginan hingga mencapai titik cair oksigen (-183 °C). Oleh karena itu, sistem dua tahap reformasi ini bukan hanya efisien secara energi, tetapi juga mengeliminasi kebutuhan teknologi pemisahan udara yang kompleks, menjadikannya solusi yang efektif dan ekonomis dalam industri kimia modern.

Proses konversi karbon monoksida (CO) menjadi karbon dioksida (CO_2) melalui reaksi **water-gas shift** juga dirancang dalam dua tahap reaktor, yaitu:

- (1) **High Temperature Shift (HTS) Reactor**, dan
- (2) **Low Temperature Shift (LTS) Reactor**.

Pembagian ini dilakukan karena reaksi *water-gas shift* bersifat eksoterm, sehingga efisiensi konversi dapat ditingkatkan dengan mengendalikan suhu secara bertahap: reaksi awal pada suhu tinggi (untuk laju reaksi yang cepat), diikuti oleh tahapan suhu rendah (untuk meningkatkan konversi berdasarkan kesetimbangan reaksi). Dengan konfigurasi dua reaktor ini, konversi CO menjadi CO₂ dan H₂ dapat dicapai secara lebih efektif dan efisien, baik dari segi kinetika maupun termodinamika.

Contoh ini menunjukkan bahwa kontribusi Teknik Reaksi Kimia (TRK) dalam tahap perancangan proses industri tidak hanya terbatas pada aspek ilmiah dan teknis semata, melainkan juga berperan sebagai fondasi strategis yang mengarahkan keseluruhan sistem proses menuju implementasi yang andal, efisien, dan layak secara ekonomi. Peran ini mencerminkan kekuatan TRK dalam menjembatani prinsip dasar ilmu pengetahuan dengan kebutuhan nyata industri proses kimia

2.2 Tahap Konstruksi dan Komisioning

Pada tahap konstruksi dan komisioning pabrik kimia, keahlian dalam Teknik Reaksi Kimia (TRK) tetap memainkan peran penting dalam menjembatani antara desain konseptual dan implementasi fisik sistem reaksi kimia di lapangan. Salah satu kontribusi utama TRK dalam fase ini adalah melakukan validasi spesifikasi teknis reaktor, termasuk dimensi, sistem pencampuran, distribusi aliran, dan perangkat kontrol reaksi, guna memastikan bahwa unit reaktor terpasang sesuai dengan rancangan yang telah ditetapkan berdasarkan data kinetika dan termodinamika.

Selain pada tahap desain konseptual, Teknik Reaksi Kimia (TRK) juga memainkan peran krusial dalam fase konstruksi dan komisioning reaktor kimia. Salah satu tahapan penting dalam fase ini adalah uji performa awal atau *pre-startup commissioning*, yang bertujuan untuk mengevaluasi kesesuaian antara hasil aktual operasional dengan prediksi model kinetika serta parameter-parameter dari desain proses. Evaluasi ini menjadi langkah strategis untuk mendeteksi potensi deviasi performa sejak dini, seperti penyimpangan konversi, fluktuasi suhu, atau ketidakstabilan tekanan, yang seluruhnya dapat berdampak pada kestabilan operasi jangka panjang.

Lebih jauh lagi, TRK berkontribusi secara signifikan dalam perancangan prosedur *start-up* yang aman dan efisien, dengan mempertimbangkan berbagai aspek seperti dinamika transien reaktor, stabilitas termal, serta interaksi antara reaksi eksoterm dan sistem pendingin. Dalam kondisi *start-up*, ketidakseimbangan energi atau respons lambat dari sistem kontrol dapat menyebabkan ketidakstabilan termal, yang pada skala industri berpotensi menimbulkan risiko keselamatan atau kegagalan operasional. Oleh karena itu, pemodelan kinetika reaksi yang akurat menjadi landasan untuk merancang skenario *start-up* dan *shutdown* secara terstruktur dan responsif.

Selain aspek operasional, TRK juga berperan dalam pemilihan material konstruksi reaktor yang sesuai dengan kondisi operasi ekstrem, seperti temperatur dan tekanan tinggi, serta kompatibilitas kimia terhadap reaktan, produk, maupun katalis. Pemilihan ini tidak hanya penting untuk memastikan integritas struktural reaktor, tetapi juga untuk menjaga umur teknis sistem serta mencegah terjadinya korosi, *fouling*, atau interaksi merugikan lainnya.

Dengan demikian, keterlibatan TRK dalam fase konstruksi dan komisioning bertujuan untuk menjamin bahwa sistem reaksi yang dibangun tidak hanya memenuhi spesifikasi desain di atas kertas saja, tetapi juga siap untuk beroperasi secara stabil, aman, dan optimal dalam lingkungan produksi skala industri yang dinamis. Peran ini menegaskan bahwa TRK bukan semata disiplin teoritis, melainkan suatu pendekatan integratif yang menjadi penggerak utama dalam merealisasikan proses kimia menjadi sistem rekayasa yang nyata dan berfungsi efektif.

2.3 Tahap Operasi dan Optimasi

Teknik Reaksi Kimia (TRK) tetap memainkan peran yang sangat penting dalam fase operasi dan optimasi pabrik kimia, dengan tujuan utama memastikan bahwa proses reaksi berlangsung sesuai dengan target performa desain, sekaligus adaptif terhadap dinamika operasional yang terjadi di lapangan. Pada tahap ini, fokus utama diarahkan pada pemantauan performa reaktor secara berkelanjutan, termasuk pengawasan terhadap aktivitas katalis yang berpotensi menurun akibat fenomena *fouling*, *sintering*, atau *poisoning*, kontaminasi oleh senyawa pengotor.

Melalui pemahaman terhadap perubahan performa reaktor seiring waktu, insinyur proses dapat melakukan evaluasi atas efisiensi konversi, selektivitas terhadap produk utama, serta penurunan kualitas produk atau *throughput*, yang semuanya merupakan indikator penting dari degradasi aktivitas katalitik. Di sisi lain, TRK juga menyediakan kerangka analisis terhadap penyimpangan kondisi aktual terhadap desain, baik yang muncul sebagai perbedaan parameter operasi (seperti suhu, tekanan, atau waktu tinggal) maupun deviasi performa akibat variabilitas bahan baku, fluktuasi beban produksi, atau gangguan proses lainnya.

Hasil analisis ini menjadi landasan untuk optimasi parameter operasi, melalui penyesuaian suhu reaksi, tekanan sistem, rasio molar reaktan, atau strategi pengaturan laju alir dan distribusi panas dalam reaktor. Optimasi tersebut ditujukan untuk meningkatkan konversi, selektivitas, dan perolehan produk (*yield*), tanpa mengorbankan kestabilan operasional atau umur pakai katalis dan reaktor.

Lebih jauh, manajemen umur katalis menjadi aspek strategis dalam operasi jangka panjang. Dalam hal ini, TRK berperan dalam perencanaan regenerasi, reaktivasi, atau penggantian katalis berdasarkan data historis performa dan model degradasi katalis yang telah dikalibrasi. Pendekatan ini memungkinkan pengambilan keputusan yang tepat dalam menentukan waktu optimal untuk pemeliharaan, sehingga menghindari *downtime* yang tidak perlu dan menjaga kontinuitas produksi.

Di era industri berbasis digital, kontribusi TRK semakin diperluas melalui pengolahan data proses secara *real-time* dan integrasi dengan sistem kontrol lanjutan. Penggunaan model prediktif, baik yang berbasis *first principles* maupun pendekatan *machine learning*, memungkinkan munculnya paradigma baru dalam pengambilan keputusan berbasis data (*data-driven decision making*). Pendekatan ini menjadikan TRK sebagai landasan strategis dalam menerapkan proses adaptif dan otonom di industri kimia modern.

Dengan demikian, peran TRK dalam fase operasi dan optimasi tidak hanya terbatas pada menjaga stabilitas dan keamanan proses, tetapi juga berkontribusi langsung dalam meningkatkan kinerja berkelanjutan, menjawab kebutuhan efisiensi energi, produktivitas tinggi, serta daya saing proses industri di tengah tantangan teknologi dan pasar yang terus berkembang.

2.4 Tahap Evaluasi dan Pengembangan Proses

Pada tahap evaluasi dan pengembangan proses, Teknik Reaksi Kimia (TRK) menyediakan landasan ilmiah dan metodologis yang sangat penting dalam melakukan penilaian menyeluruh terhadap performa reaktor dan katalis yang telah beroperasi dalam skala industri. Evaluasi ini mencakup analisis efisiensi aktual dari sistem reaksi, yang meliputi perbandingan antara nilai konversi, selektivitas, dan *yield* yang dicapai secara operasional dengan parameter-parameter yang dirancang sebelumnya. Hasil evaluasi ini memberikan gambaran seberapa jauh sistem proses mampu memenuhi atau mendekati target performansi yang dirumuskan pada tahap desain.

Apabila ditemukan adanya penyimpangan performa atau hambatan kapasitas, TRK menjadi instrumen utama dalam perencanaan *debottlenecking* dan *revamping process*. Strategi ini dapat dilakukan melalui modifikasi desain reaktor, peningkatan efisiensi sirkulasi panas dan massa, maupun penggantian jenis katalis dengan formulasi yang lebih aktif, selektif, atau tahan terhadap kondisi operasi. Selain itu, analisis kegagalan reaktor, baik yang disebabkan oleh degradasi katalis, maldistribusi aliran, atau kendala perpindahan panas, dapat dilakukan secara sistematis melalui pendekatan simulasi numerik, pemodelan kinetika, serta analisis akar penyebab (*root-cause analysis*) berbasis data operasi historis dan model reaksi yang tervalidasi.

Lebih dari itu, TRK juga berperan sentral dalam pengembangan proses baru, terutama dalam mengeksplorasi jalur reaksi alternatif yang lebih efisien dan selektif, serta dalam pemanfaatan katalis baru yang lebih stabil, ramah lingkungan, atau berbasis sumber daya terbarukan. Dalam konteks inovasi teknologi proses, TRK memungkinkan integrasi pendekatan mutakhir seperti:

- Reaksi berkelanjutan (*continuous-flow reactors*),
- Intensifikasi proses melalui penggunaan reaktor multifungsi atau mikroreaktor, serta
- Adopsi biokatalis dan teknologi hijau, yang mendukung prinsip-prinsip proses kimia berkelanjutan (*sustainable chemical processing*).

Dengan demikian, peran TRK dalam tahap ini tidak hanya bersifat evaluatif, tetapi juga prospektif. Ia berfungsi sebagai penggerak inovasi dan transformasi teknologi proses, mendorong pergeseran menuju sistem produksi yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan dalam jangka panjang.

Dalam era industri yang terus berkembang dan dituntut untuk bertransformasi menuju dekarbonisasi dan efisiensi sumber daya, kontribusi TRK menjadi semakin esensial sebagai pilar rekayasa proses yang berbasis pada ilmu, data, dan visi keberlanjutan.

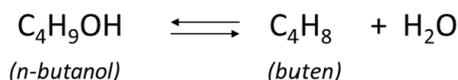
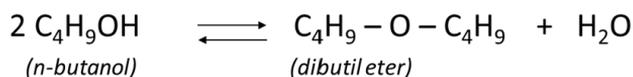
3 REAKSI DAN REAKTOR: "NYAWA DAN JANTUNG" INDUSTRI KIMIA

Industri kimia modern merupakan pilar penting dalam mendukung berbagai sektor strategis seperti energi, petrokimia, farmasi, agroindustri, dan bahan fungsional. Pada inti dari seluruh proses ini terdapat dua komponen fundamental: reaksi kimia sebagai jiwa (nyawa) dari transformasi molekul yang berasal dari bahan baku menjadi produk yang bernilai tambah dan reaktor kimia sebagai jantung tempat terjadinya konversi tersebut dalam skala industri. Perpaduan antara pemahaman ilmiah terhadap reaksi kimia dan rekayasa reaktor yang efisien menjadi elemen kunci dalam merancang proses industri yang produktif, efisien, dan berkelanjutan (Fogler, 2016; Levenspiel, 1999).

3.1 Reaksi Kimia sebagai "Nyawa" Transformasi Industri

Reaksi kimia merupakan inti dari perubahan bahan mentah menjadi produk bernilai ekonomi tinggi. Setiap tahapan proses dalam industri—baik produksi amonia, perengkahan minyak bumi, polimerisasi, oksidasi parsial, hingga sintesis obat-obatan—melibatkan jalur reaksi tertentu dengan kondisi operasi yang dirancang secara presisi. Oleh karena itu, reaksi kimia berperan sebagai jiwa atau nyawa proses, karena tanpanya, tidak ada konversi molekuler yang bernilai tambah dapat dicapai.

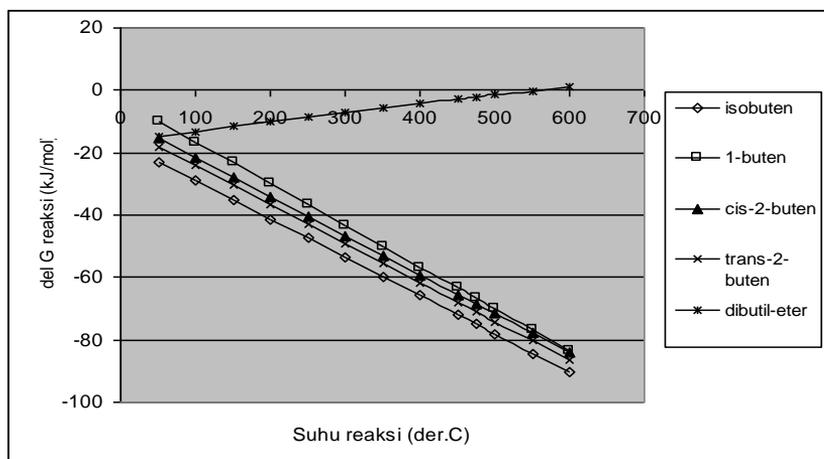
Sistem Reaksi kimia dapat dikelompokkan menjadi: (1) reaksi sederhana, umumnya terjadi pada reaksi zat-zat anorganik dan (2) reaksi kompleks, banyak terjadi pada reaksi zat-zat organik. Reaksi kompleks dapat berupa reaksi seri, paralel, atau seri-paralel, sehingga produk dari sistem reaksi dapat lebih dari satu, sehingga dikenal besaran selektivitas. Sebagai contoh, reaksi kompleks seri-paralel terjadi pada dehidrasi n-butanol ($n\text{-C}_4\text{H}_9\text{OH}$) yang dapat menghasilkan dibutil-eter ($\text{C}_4\text{H}_9\text{-O-C}_4\text{H}_9$) dan atau butena (C_4H_8).



Butena memiliki 4 isomer, yaitu 1-butena, cis-2-butena, trans-2-butena, dan isobutena (isobutilen), dan dalam sistem reaksi ini saling berisomerisasi, sehingga jumlah reaksi dehidrasi n-butanol menjadi senyawa-senyawa buten seperti ditampilkan berikut ini.

- (1) $C_4H_9OH \leftrightarrow$ isobutena + H_2O
- (2) $C_4H_9OH \leftrightarrow$ 1-butena + H_2O
- (3) $C_4H_9OH \leftrightarrow$ cis-2-butena + H_2O
- (4) $C_4H_9OH \leftrightarrow$ trans-2-butena + H_2O
- (5) 1-butena \leftrightarrow isobuten
- (6) 1-butena \leftrightarrow cis-2-butena
- (7) 1-butena \leftrightarrow trans-2-butena
- (8) cis-2-butena \leftrightarrow trans-2-butena
- (9) cis-2-butena \leftrightarrow isobutena
- (10) trans-2-butena \leftrightarrow isobutena

Berdasarkan data termodinamika, nilai energi bebas Gibbs (delta G reaksi = ΔG_r) untuk semua reaksi dehidrasi n-butanol menjadi dibutil eter dan senyawa-senyawa butena pada berbagai temperatur disajikan pada Gambar 2. Untuk mendapatkan produk berupa senyawa-senyawa buten, reaksi sebaiknya diselenggarakan pada suhu lebih tinggi dari 350 °C.



Gambar 2 Energi bebas Gibbs dehidrasi n-butanol menjadi dibutil eter, 1-butena, cis-2-butena, trans-2-butena, dan isobutena. (sumber data: Yaws, 2003)

Untuk mengikuti jalannya suatu sistem reaksi kimia dapat dilakukan dengan mengamati nilai konversi reaksi dan selektivitas produk yang diinginkan dari waktu ke waktu. Isobutena dengan selektivitas sangat tinggi. Berdasarkan data termodinamika di atas, sulit untuk mendapatkan produk

isobutena dengan selektivitas yang sangat tinggi. Selektivitas maksimum untuk isobutena hanya 49,9 %. Strategis lain yang dapat dipilih untuk mencapai tujuan tersebut adalah dengan memilih katalis yang selektif terhadap isobutena. Kecepatan atau laju pengkonversian bahan yang direaksikan dinyatakan dengan besaran kecepatan atau laju reaksi. Kehadiran katalis dapat mempercepat reaksi dan mengarahkan ke produk yang diinginkan.

Pemahaman terhadap kinetika reaksi, mekanisme reaksi, dan termokimia menjadi esensial untuk menentukan jalur reaksi yang optimal. Hal ini mencakup analisis laju reaksi, selektivitas produk, dan sensitivitas terhadap parameter operasi. Di sinilah ilmu Teknik Reaksi Kimia (TRK) menyediakan dasar kuantitatif dalam mendesain dan mengevaluasi jalannya reaksi secara sistematis (Rawlings & Ekerdt, 2002).

3.2 Reaktor Kimia sebagai "Jantung" Sistem Produksi

Sementara reaksi kimia adalah "jiwa" dari transformasi molekul, reaktor kimia adalah "jantung" dari industri proses, tempat semua reaksi berlangsung dalam lingkungan yang terkontrol dan dioptimalkan. Reaktor harus dirancang untuk menjamin laju reaksi maksimum, perpindahan panas dan massa yang efisien, serta keamanan operasional yang tinggi. Keberhasilan desain reaktor sangat ditentukan oleh pemahaman terhadap mekanisme reaksi dan kinetika kimia. Perancangan yang tepat mampu meningkatkan konversi, selektivitas, dan efisiensi energi, sekaligus meminimalkan pembentukan produk samping yang tidak diinginkan.

Jenis-jenis reaktor seperti pipa/tubular atau tangki (*Continuous Stirred Tank Reactor*), reaktor *fixed-bed*, dan *fluidized-bed* memiliki keunggulan masing-masing dan dipilih berdasarkan sistem dan sifat reaksi yang terjadi mulai dari reaksi homogen atau heterogen dan reaksi endotermik atau eksotermik. Reaktor di industri dapat dioperasikan dalam kondisi: (1) isothermal, suhu diusahakan sama dari mulai titik *inlet* sampai *outlet*, atau di seluruh titik posisi reaktor, atau (2) adiabatik, yang mana panas karena reaksi dibiarkan untuk memanaskan atau mendinginkan campuran reaksi dan bahan konstruksi reaktor, atau (3) non-isothermal dan non adiabatik. Kondisi non-isothermal non adiabatik terjadi karena pada sistem reaktor dilengkapi

dengan media pemanas atau media pendingin untuk menukarkan kalor reaksinya, namun perpindahan panas tidak dapat seragam di setiap posisi.

Desain reaktor juga memperhitungkan aspek keselamatan, efisiensi energi, dan kemampuan *scale-up* lebih lanjut, pengembangan teknologi reaktor berbasis intensifikasi proses, seperti reaktor mikro, reaktor membran, reaktor berbasis katalis biologi (bioreaktor), reaktor modular, dan reaktor dengan loop sirkulasi, menunjukkan evolusi ke arah efisiensi, fleksibel, dan keberlanjutan (Hessel *et al.*, 2005).

Reaktor tidak hanya menjadi tempat konversi, tetapi juga pusat kontrol dinamika proses, menentukan *residence time*, pengendalian suhu dan tekanan, serta integrasi dengan unit pemisahan. Oleh karena itu, reaktor berfungsi seperti jantung, memompa bahan melalui jalur konversi kimia dan menjaga stabilitas sistem secara keseluruhan (Levenspiel, 1999).

Pemilihan jenis reaktor yang tepat sangat menentukan efisiensi konversi, selektivitas, keselamatan proses, dan keekonomian. Pemahaman menyeluruh tentang karakteristik tiap jenis reaktor sangat penting dalam tahap desain proses industri kimia yang aman, efisien, dan berkelanjutan. Jenis reaktor diklasifikasikan berdasarkan pola aliran, fase reaktan, dan sifat operasionalnya. Berikut ini adalah penjelasan jenis-jenis reaktor kimia utama beserta contoh aplikasi di industri:

Reaktor Pipa

Reaktor pipa/tubular merupakan salah satu jenis reaktor kontinu yang banyak digunakan dalam industri proses kimia, terutama untuk reaksi-reaksi fasa gas atau cair yang berlangsung dengan cepat. Dalam perancangan, sering kali aliran di dalam reaktor pipa ini dianggap ideal, sehingga reaktor diasumsikan sebagai reaktor aliran sumbat (RAS, *Plug flow Reactor* / PFR). Dalam konfigurasi PFR, reaktan dialirkan secara kontinu melalui reaktor tubular dengan asumsi aliran seperti sumbat (*plug*) bergeser, yaitu tanpa terjadi pencampuran ke arah aksial, sehingga setiap elemen fluida memiliki waktu tinggal yang sama. Konsekuensinya, profil konsentrasi dan suhu berubah secara kontinu di sepanjang reaktor seiring dengan berlangsungnya reaksi.

Reaktor pipa sangat sesuai untuk reaksi orde tinggi, karena konversi meningkat secara progresif di sepanjang reaktor. Karakteristik ini

memungkinkan efisiensi reaksi yang tinggi serta pengendalian suhu yang lebih baik dalam kasus reaksi eksotermik atau endotermik.

Beberapa contoh industri yang menggunakan reaktor jenis pipa/tubular adalah:

- Proses nitrasi toluena menjadi dinitrotoluena, yang digunakan sebagai prekursor dalam sintesis bahan peledak dan plastik.
- Produksi asam nitrat melalui oksidasi amonia secara bertahap dalam kondisi suhu dan tekanan tinggi.
- Reaksi pembentukan etilen oksida dari etilena, yang merupakan salah satu langkah penting dalam pembuatan surfaktan dan antibeku.

Reaktor ini memiliki keunggulan dalam hal memberikan konversi lebih tinggi untuk volume reaktor yang sama dibandingkan jenis reaktor lainnya, terutama bila reaksi berlangsung cepat dan selektivitas terhadap produk utama menjadi prioritas.

Reaktor Tangki Berpengaduk Kontinu

Reaktor kontinu berupa tangki berpengaduk kontinu, atau *Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR)*, merupakan salah satu jenis reaktor kimia yang paling umum digunakan dalam industri proses, khususnya untuk reaksi cair-cair atau gas-cair yang memerlukan pencampuran intensif. Dalam konfigurasi CSTR, reaktan dimasukkan secara kontinu ke dalam tangki berpengaduk, dan campuran produk serta reaktan yang belum bereaksi dikeluarkan secara kontinu dengan laju yang sama, sehingga volume reaktor tetap konstan.

Pengadukan yang kuat memungkinkan tercapainya kondisi tunak (*steady-state*) dengan konsentrasi dan suhu yang seragam di seluruh posisi dan volume reaktor. CSTR sangat ideal digunakan untuk reaksi-reaksi yang membutuhkan pencampuran sempurna atau yang berlangsung secara lambat, sehingga memungkinkan waktu tinggal reaktan yang cukup lama untuk mencapai konversi yang diinginkan.

Contoh beberapa reaktor industri yang menggunakan jenis CSTR:

- Netralisasi asam-basa dalam pengolahan limbah cair industri, di mana kontrol pH yang konstan sangat penting dan tercapai melalui pencampuran seragam.

- Produksi sabun melalui saponifikasi antara lemak atau minyak dengan alkali, proses yang memerlukan kontrol suhu dan viskositas secara kontinu.
- Reaksi fermentasi alkohol dalam skala besar, seperti pada industri bioetanol, yang memerlukan kondisi isothermal dan pencampuran kontinu untuk menjaga populasi mikroorganisme dan substrat tetap homogen.

CSTR juga memungkinkan integrasi mudah dalam sistem reaktor berjenjang (*reactor trains* / reaktor seri) untuk mencapai konversi lebih tinggi atau kontrol selektivitas yang lebih baik. Dalam perancangan CSTR, parameter penting yang diperhitungkan mencakup waktu tinggal, laju reaksi, panas reaksi, serta efisiensi pengadukan.

Reaktor *Batch* dan Semi-*Batch*

Reaktor *batch* merupakan salah satu bentuk reaktor kimia yang paling sederhana dan fleksibel dalam operasionalnya. Dalam sistem *batch*, seluruh reaktan dimasukkan ke dalam reaktor pada awal proses, dan reaksi berlangsung dalam kondisi tertutup tanpa aliran masuk atau keluar selama waktu reaksi. Produk reaksi kemudian diambil setelah waktu reaksi yang ditentukan tercapai. Sistem ini sangat umum digunakan pada skala laboratorium maupun produksi industri kecil hingga menengah, terutama ketika volume produksi terbatas, atau ketika fleksibilitas dalam formulasi dan waktu reaksi diperlukan.

Karakteristik utama dari reaktor *batch* adalah kemampuannya untuk memproses berbagai jenis reaksi kimia tanpa perlu pengaturan aliran kontinu, serta kemudahan dalam melakukan pengontrolan suhu, tekanan, dan pencampuran. Reaktor *batch* banyak digunakan dalam:

- Sintesis bahan aktif obat (*Active Pharmaceutical Ingredients*, API) dalam industri farmasi, yang menuntut kontrol kualitas dan kebersihan proses sangat tinggi.
- Polimerisasi intermiten, di mana parameter reaksi seperti viskositas dan laju reaksi berubah signifikan selama proses.
- Reaksi esterifikasi untuk menghasilkan ester aromatik atau bahan aditif dengan waktu reaksi yang relatif panjang.

Sementara itu, reaktor *semi-batch* merupakan modifikasi dari sistem *batch*, di mana salah satu atau lebih reaktan ditambahkan secara terus-menerus (kontinu) selama berlangsungnya reaksi. Konfigurasi ini berguna untuk mengendalikan laju reaksi eksotermik atau menghindari terbentuknya produk samping yang tidak diinginkan. Reaktor *semi-batch* memberikan fleksibilitas tambahan dalam hal pengendalian kinetika reaksi, perpindahan panas, dan keamanan proses, serta sering digunakan dalam produksi bahan kimia spesialti atau proses yang sensitif terhadap kondisi stoikiometri.

Reaktor Unggun Tetap (*Fixed-Bed Reactor*)

Reaktor *fixed-bed* merupakan jenis reaktor heterogen yang secara luas digunakan dalam industri kimia untuk reaksi-reaksi katalitik skala besar. Dalam konfigurasi ini, katalis padat disusun secara permanen di dalam suatu kolom atau tabung reaktor, membentuk suatu "bed" tetap, sementara fluida reaktan (baik dalam fase gas maupun cair) dialirkan secara kontinu melewati bed katalis tersebut. Reaksi berlangsung ketika reaktan berinteraksi dengan permukaan aktif katalis selama kontak di sepanjang jalur aliran fluida.

Karakteristik utama reaktor *fixed-bed* adalah strukturnya yang sederhana, kestabilan operasional, serta kemampuannya untuk menangani reaksi eksotermik dengan konversi tinggi, terutama dalam sistem gas-gas. Efisiensi perpindahan panas dan massa menjadi faktor penting dalam desain dan pengoperasian reaktor ini, khususnya dalam mengendalikan gradien suhu yang tajam akibat reaksi eksotermik.

Beberapa aplikasi industri yang menonjol dari yang menggunakan reaktor *fixed-bed* meliputi:

- Sintesis amonia (NH_3) dari nitrogen dan hidrogen menggunakan katalis besi (Fe) dalam proses Haber-Bosch, yang memerlukan tekanan tinggi dan pengendalian suhu yang ketat.
- *Reforming* katalitik dalam produksi bensin beroktan tinggi, di mana senyawa hidrokarbon diubah menjadi senyawa aromatik dengan bantuan katalis logam mulia seperti $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$.
- Hidrogenasi lemak dalam industri makanan, di mana minyak nabati tidak jenuh diubah menjadi lemak jenuh menggunakan gas hidrogen dan katalis nikel untuk menghasilkan produk seperti margarin.

Desain reaktor *fixed-bed* membutuhkan perhatian khusus pada distribusi aliran fluida, tekanan diferensial sepanjang bed/unggun, serta manajemen panas reaksi untuk mencegah *hotspot* yang dapat menurunkan aktivitas dan umur katalis.

Reaktor Unggun Terfluidisasikan (*Fluidized-Bed Reactor*)

Reaktor *fluidized-bed* merupakan sistem reaktor yang dirancang sedemikian rupa sehingga partikel padat, umumnya berupa katalis, dibuat melayang-layang atau terfluidisasi oleh aliran fluida ke arah atas. Kondisi fluidisasi ini menciptakan lingkungan yang menyerupai fluida, di mana partikel padat bergerak bebas dan terjadi pencampuran yang sangat intensif antar-reaktan dan katalis. Hasilnya adalah efisiensi perpindahan massa dan panas yang sangat tinggi, serta distribusi suhu yang seragam di dalam reaktor, yang sangat menguntungkan terutama untuk reaksi-reaksi eksotermik.

Karakteristik utama dari reaktor *fluidized-bed* meliputi kemampuannya menangani sistem multifasa, khususnya sistem tiga fasa (gas-cair-padat), serta fleksibilitas operasional yang tinggi. Sistem ini sangat sesuai untuk reaksi yang membutuhkan pengendalian suhu yang ketat dan penggantian katalis secara kontinu. Katalis dalam bentuk partikel halus yang aktif dapat disirkulasi atau diganti dengan lebih mudah dibandingkan sistem *fixed-bed*, sehingga umur operasi reaktor dapat diperpanjang secara ekonomis.

Beberapa aplikasi penting dari reaktor *fluidized-bed* di industri kimia dan energi antara lain:

- *Cracking* katalitik untuk produksi olefin seperti etilena dan propilena dari fraksi berat minyak bumi, yang merupakan bagian dari proses *fluid catalytic cracking (FCC)*.
- Gasifikasi batubara atau biomassa, di mana material padat dikonversi menjadi gas sintesis (*syngas*) yang dapat digunakan untuk produksi bahan bakar cair atau bahan kimia.
- Oksidasi partikel logam, misalnya pada produksi logam oksida untuk bahan keramik atau katalis.

Dikarenakan karakteristik dinamikanya yang kompleks, desain dan pengoperasian reaktor *fluidized-bed* membutuhkan pemahaman mendalam

terhadap mekanisme fluidisasi, stabilitas sistem, pengaruh distribusi ukuran partikel, serta degradasi katalis akibat abrasi dan *sintering*.

Reaktor Unggun Bergerak (*Moving-Bed Reactor*)

Reaktor *moving-bed* merupakan jenis reaktor untuk reaksi heterogen di mana fase padat, yang umumnya berupa partikel katalis, bergerak secara perlahan ke arah bawah akibat gravitasi, sementara fluida reaktan mengalir secara berlawanan arah (*counter-current*) atau searah (*co-current*) atau aliran menyilang (*cross-flow*) dari arah radial melalui bed katalis tersebut. Gerakan kontinu katalis ini memungkinkan adanya penggantian atau regenerasi katalis secara berkesinambungan tanpa perlu menghentikan operasi reaktor, sehingga efisiensi proses dapat dipertahankan dalam jangka panjang.

Karakteristik utama dari reaktor *moving-bed* adalah kemampuannya untuk mengelola sistem reaksi yang memerlukan katalis aktif secara konstan dan pengaturan suhu yang stabil. Karena katalis secara periodik dikeluarkan dan diregenerasi di luar sistem reaksi utama, proses ini sangat cocok untuk reaksi-reaksi yang disertai dengan deaktivasi katalis, seperti akibat kokas atau senyawa pengotor. Selain itu, sistem ini memungkinkan pengendalian suhu yang lebih baik dibandingkan dengan reaktor *fixed-bed*, karena laju perpindahan massa dan panas dapat diatur melalui laju alir katalis.

Aplikasi industri dari reaktor *moving-bed* sangat signifikan, terutama dalam industri petrokimia dan pengolahan bahan bakar. Contoh proses adalah:

- Reaksi *hydrocracking*, yaitu proses pemecahan fraksi berat minyak bumi menjadi bahan bakar ringan (seperti diesel dan nafta) dengan menggunakan hidrogen dan katalis padat.
- *Reforming* katalitik regeneratif, yaitu konversi fraksi nafta hasil fraksinasi minyak bumi menjadi senyawa alkana bercabang (misal iso alkana), siklo alkana, dan aromatik serta produk samping berupa gas hidrogen. Tujuan dari proses ini umumnya untuk mendapatkan fraksi nafta dengan bilangan oktan yang tinggi. Produk sering kali disebut reformat. Regenerasi katalis secara periodik diperlukan untuk mempertahankan aktivitas dan selektivitas reaksi.

Pemodelan reaktor *moving-bed* memerlukan pendekatan khusus yang mempertimbangkan perpindahan massa dan panas, waktu tinggal katalis,

serta dinamika regenerasi. Oleh karena itu, desain dan optimasi sistem ini sangat bergantung pada pemahaman mendalam tentang kinetika reaksi, karakteristik katalis serta material dan partikel katalis, serta rekayasa termal dan fluida.

4 KINETIKA REAKSI: PILAR REKAYASA PROSES KIMIA

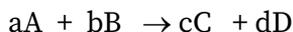
Ilmu kinetika reaksi kimia menempati posisi yang sangat strategis dalam tubuh pengetahuan teknik kimia. Kinetika reaksi tidak hanya menjawab pertanyaan *seberapa cepat* suatu reaksi berlangsung, tetapi juga menyingkap tabir bagaimana transformasi kimia itu terjadi dari tingkat molekuler hingga berdampak pada skala industri. Dalam konteks teknik kimia, kinetika reaksi menjadi fondasi bagi pemahaman dan pengendalian berbagai proses reaksi yang berlangsung dalam reaktor kimia. Ia menjembatani antara prinsip dasar kimia dengan praktik rekayasa, antara laboratorium dengan pabrik, serta antara skala mikroskopik dengan skala makroskopik.

Kinetika reaksi kimia adalah cabang ilmu yang mempelajari laju reaksi serta faktor-faktor yang memengaruhi perubahan konsentrasi reaktan dan produk terhadap waktu. Kekuatan utama kinetika terletak pada kemampuannya menghubungkan mekanisme reaksi, yaitu tahapan elementer yang terjadi pada skala atomik atau molekuler dengan fenomena makroskopik seperti konversi reaktan, selektivitas terhadap produk, dan perolehan hasil (*yield*) reaksi. Kinetika berperan sebagai alat analisis untuk memformulasikan model matematis yang dapat mensimulasikan dan memprediksi perilaku sistem reaktor secara menyeluruh. Kinetika reaksi merupakan "bahasa dinamis" yang mengkuantifikasi jalannya reaksi berdasarkan parameter termodinamika dan kondisi operasional proses dan membuka kemungkinan bagi para insinyur untuk merancang sistem reaksi yang efisien, selektif, dan terukur.

4.1 Model Persamaan Kinetika Reaksi Kimia

Dalam ilmu teknik reaksi kimia, **model persamaan kinetika reaksi kimia** merupakan representasi matematis dari kecepatan suatu reaksi kimia sebagai fungsi dari konsentrasi reaktan, produk, dan variabel termodinamika seperti suhu dan tekanan. Model ini tidak hanya memuat informasi mengenai seberapa cepat suatu reaksi berlangsung, tetapi juga mengandung *jejak mekanisme reaksi* di dalamnya. Oleh karena itu, model kinetika menjadi elemen krusial dalam desain reaktor, kontrol proses, dan optimasi sistem produksi kimia di berbagai skala.

Secara umum, suatu reaksi kimia dapat ditulis dalam bentuk persamaan stoikiometri berikut:



Untuk reaksi tersebut, laju reaksi, r didefinisikan sebagai perubahan konsentrasi reaktan atau produk per satuan waktu dan satuan volume atau tempat berlangsungnya reaksi. Model persamaan kinetika dapat dinyatakan dalam model Hukum Pangkat (*Power Law*):

$$-r_A = k C_A^\alpha C_B^\beta \quad (1)$$

yang mana k adalah konstanta laju reaksi, dan α dan β adalah orde reaksi terhadap A dan B, yang dapat ditentukan melalui eksperimen. Nilai k umumnya bergantung pada suhu absolut, T dan mengikuti persamaan Arrhenius:

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R.T}\right) \quad (2)$$

k_0 adalah konstanta Arrhenius/faktor tumbukan. E_a adalah energi aktivasi, energi minimum yang diperlukan agar reaksi terjadi. R adalah konstanta gas universal.

Model kinetika dapat dikembangkan melalui tiga pendekatan utama:

- **Empiris:** Dibangun dari data eksperimental tanpa mengacu langsung pada mekanisme reaksi. Contoh: model *Power-Law* yang digunakan secara luas dalam industri.
- **Semi-empiris:** Menggabungkan bentuk dasar hukum laju dengan koreksi empiris berdasarkan fenomena adsorpsi, difusi, atau inhibisi.
- **Mekanistik (fundamental):** Disusun berdasarkan *mekanisme elementer* reaksi, menggunakan prinsip keseimbangan permukaan dan laju tahapan elementer. Pendekatan ini melibatkan model Langmuir-Hinshelwood (L-H) atau Eley-Rideal (E-R) untuk sistem reaksi berkatalis padat dan model Michaelis-Menten untuk reaksi enzimatik.

Sebagai contoh, untuk reaksi katalitik heterogen dengan reaktan dan produk teradsorpsi pada permukaan katalis dan pengendali reaksi di permukaan katalis, model Langmuir-Hinshelwood dapat dinyatakan sebagai:

$$r = \frac{k_r K_A C_A K_B C_B}{(1 + K_A C_A + K_B C_B + K_C C_C + K_D C_D)^2} \quad (3)$$

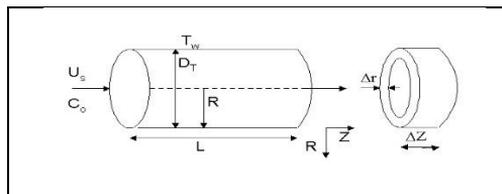
K_i = Konstanta kesetimbangan adsorpsi senyawa i .

4.2 Peran Model Kinetika dalam Desain dan Simulasi Reaktor

Model persamaan kinetika yang dikembangkan secara tepat akan menentukan arah seluruh proses teknik reaksi kimia. Ia menjadi fondasi untuk: (1) simulasi dan desain reaktor, (2) optimasi kondisi operasi agar dicapai konversi dan selektivitas maksimum, (3) analisis sensitivitas dan estimasi parameter, serta (4) deteksi penurunan aktivitas katalis dalam sistem reaksi katalitik.

Dalam konteks desain reaktor, jika sistem reaksi cepat, maka aspek termodinamika reaksi lebih berperan, tetapi sebaliknya untuk sistem reaksi yang lambat maka aspek kinetika reaksi lebih dominan. Dalam menyelenggarakan reaksi, reaktor dapat dioperasikan secara isothermal, adiabatik, atau non-isothermal dan non-adiabatik.

Sebagai contoh, Gambar 4 menunjukkan profil konversi dan temperatur di sepanjang reaktor tubular unggun tetap hasil simulasi menggunakan model pseudohomogen 2 dimensi untuk reaksi dehidrasi n-butanol (A) menggunakan katalis padat alumina aktif berbentuk bola yang dioperasikan secara non-adiabatik, non-isothermal. Persamaan kinetika reaksi ini mengikuti model L-H dengan n-butanol dan senyawa buten teradsorp pada pusat aktif katalis.



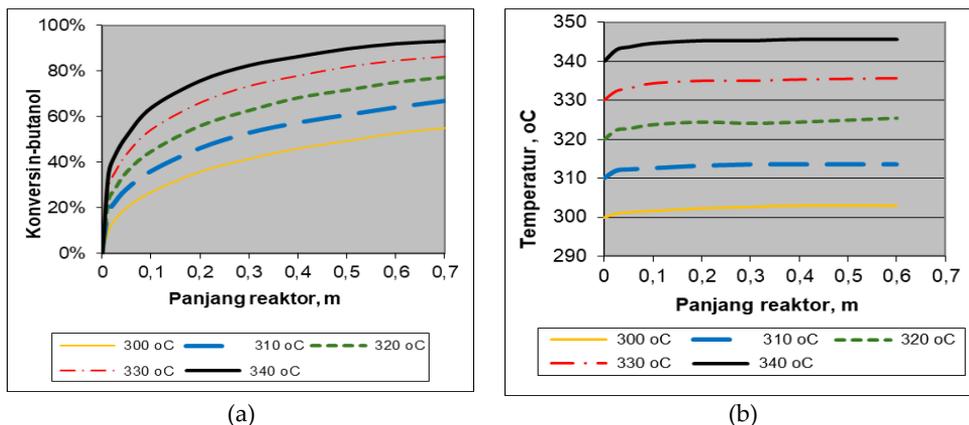
Gambar 3 Skema reaktor unggun tetap dan elemen diferensialnya yang diperbesar

Dengan neraca massa komponen A pada keadaan tunak

$$\begin{bmatrix} \text{laju molar A} \\ \text{masuk} \\ \text{secara aksial} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{laju molar A} \\ \text{keluar} \\ \text{secara aksial} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{laju molar A} \\ \text{masuk} \\ \text{secara radial} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{laju molar A} \\ \text{keluar} \\ \text{secara radial} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{laju molar A} \\ \text{terkonsumsi} \\ \text{oleh reaksi} \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

dan neraca energi pada keadaan tunak

$$\begin{bmatrix} \text{laju panas} \\ \text{masuk} \\ \text{sec a ra aksial} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{laju panas} \\ \text{keluar} \\ \text{sec a ra aksial} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{laju panas} \\ \text{masuk} \\ \text{sec a ra radial} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{laju panas} \\ \text{keluar} \\ \text{sec a ra radial} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{laju panas} \\ \text{terbentuk} \\ \text{oleh reaksi} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{laju panas} \\ \text{ke media} \\ \text{pendingin} \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$



Gambar 4 Profil (a) konversi n-butanol berkatalis alumina dan (b) temperatur di sepanjang reaktor unggun tetap non-adiabatik pada berbagai temperatur umpan dengan temperatur dinding reaktor sama dengan temperature umpan

Lebih dari itu, integrasi antara model kinetika dan data eksperimen membuka peluang penggunaan metode numerik dan pendekatan untuk menyempurnakan pemodelan laju reaksi dalam sistem kompleks multikomponen.

Dengan demikian, model persamaan kinetika reaksi kimia bukan sekadar ekspresi matematis, melainkan cermin dari realitas fisikokimia sistem yang sedang dikaji. Ia merupakan alat pikir, alat ukur, dan alat rekayasa yang membawa kita dari pemahaman terhadap transformasi molekul menuju kontrol atas skala industri. Dalam teknik kimia modern, penguasaan atas model kinetika menjadi syarat mutlak untuk merancang proses yang efisien, selektif, dan berkelanjutan.

5 KATALIS: KUNCI DAN "MAK COMBLANG / BIRO JODOH" PROSES KIMIA

Pengkonversian bahan baku menjadi produk dapat dilakukan melalui tahap-tahap proses kimia, fisika, maupun fisiko-kimia. Tahapan proses kimia melibatkan reaksi kimia.

Reaksi kimia adalah penyusunan ulang ikatan antar-atom dalam molekul reaktan, sehingga terbentuk molekul lain yang berbeda yang memiliki sifat yang berbeda pula. Penyelenggaraan reaksi dalam skala besar, skala komersial, atau skala industrial harus ekonomis, efisien, lancar, dan ramah lingkungan. Akan lebih baik jika konversi mencapai nilai maksimum (konversi kesetimbangan). Untuk itu reaksi harus dapat dikendalikan agar memberikan kinerja yang baik, yaitu memiliki laju reaksi yang cepat, kondisi operasi lunak (temperatur dan tekanan rendah), serta konversi reaktan dan selektivitas terhadap produk yang diinginkan tinggi. Konversi maksimum dibatasi oleh sifat termodinamika reaksi, tetapi kecepatan reaksi dapat ditingkatkan, agar konversi maksimum (konversi kesetimbangan) dapat dicapai dalam waktu yang lebih cepat/singkat.

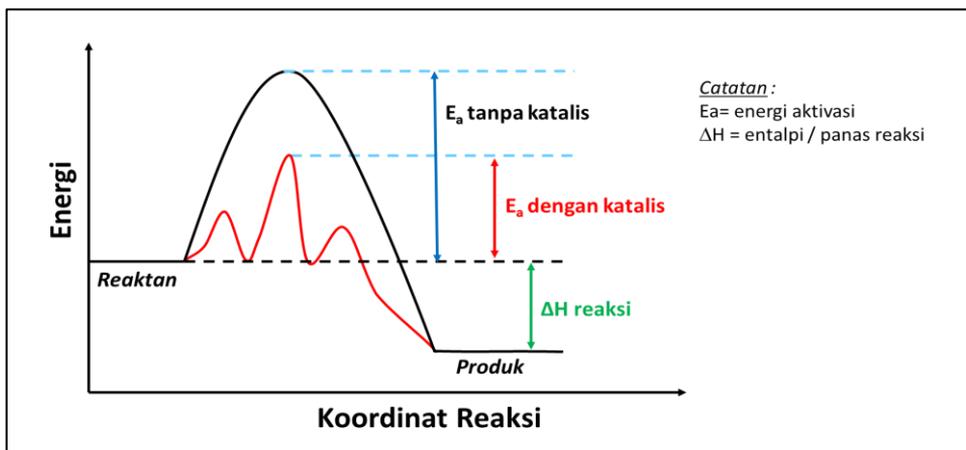
Syarat berlangsungnya suatu reaksi adalah adanya kontak/tumbukan antarmolekul reaktan dengan energi yang cukup, yaitu lebih besar dari energi aktivasi (E_a), serta memiliki orientasi tumbukan yang tepat. Untuk meningkatkan tumbukan dapat dilakukan dengan meningkatkan temperatur reaksi atau meningkatkan konsentrasi reaktan atau tekanan reaktor. Pemilihan temperatur dibatasi oleh sifat termodinamika reaksi dan kemampuan bahan konstruksi reaktor. Cara lain untuk meningkatkan laju reaksi adalah menghadirkan katalis dalam sistem reaksi tersebut.

Sembilan puluh persen proses konversi di Industri kimia melibatkan katalis. Jadi **KATALIS** adalah "**kunci**" keberhasilan industri kimia. Katalis adalah zat/materi yang dapat mempercepat suatu sistem reaksi serta mengarahkan ke produk yang diinginkan, tanpa materi tersebut terkonsumsi. Laju reaksi kimia menjadi besaran penting dalam proses konversi kimia, karena berkaitan dengan keekonomian suatu sistem proses produksi bahan kimia di industri. Peran katalis sangat penting dalam reaksi-reaksi industri, karena akan meningkatkan efisiensi pengkonversian bahan baku menjadi produk. Kerja katalis seperti "**Mak comblang**" dalam mencari dan

menjodohkan pasangan. Katalis berinteraksi untuk membantu "menjodohkan" reaktan-reaktan sehingga menjadi mudah bereaksi, namun setelah "perjodohan" berhasil, katalis akan meninggalkannya dan melanjutkan kegiatan profesinya "menjodohkan" molekul-molekul senyawa reaktan-reaktan lainnya. *Turn-over frequency*, jumlah rata-rata molekul reaktan yang dikonversi oleh satu pusat aktif per satuan waktu sekitar 100.000 per detik.

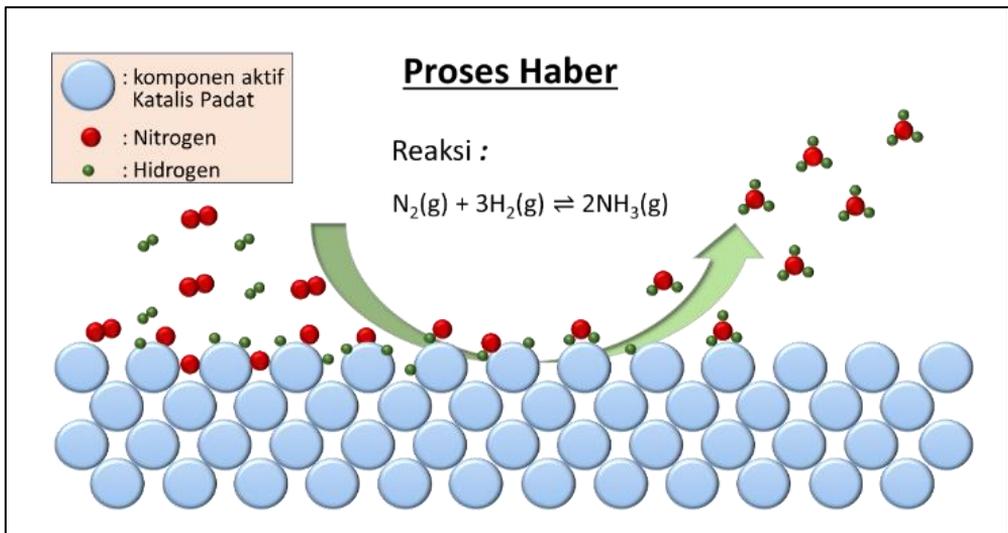
5.1 Fungsi dan Mekanisme Kerja Katalis

Mekanisme reaksi adalah tahapan-tahapan reaksi yang dijalani oleh reaktan (-reaktan) sampai dia menjadi produk(-produk). Kehadiran katalis memberikan jalan alternatif atau mekanisme lain yang energi aktivasinya lebih rendah, sehingga secara keseluruhan laju reaksi akan tinggi, walaupun dalam kondisi reaksi yang lebih lunak (yaitu temperatur dan tekanan proses reaksi lebih rendah) dibanding reaksi tanpa katalis, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5.



Gambar 5 Ilustrasi perbedaan energi aktivasi, E_a untuk reaksi eksoterm dengan dan tanpa katalis

Katalis mempunyai kemampuan berinteraksi dengan (paling sedikit) satu reaktan membentuk senyawa antara yang lebih aktif, sehingga tercipta tahapan reaksi lain yang lebih mudah untuk dijalani. Dalam proses ini, molekul reaktan berinteraksi dengan situs (bagian) aktif pada permukaan katalis, sehingga mengalami transformasi kimia, lalu melepaskan produk akhir. Gambar 6 memperlihatkan ilustrasi mekanisme reaksi jika menggunakan katalis padat.



Gambar 6 Ilustrasi kerja katalis dalam mekanisme reaksi sintesis amonia, proses Haber

Singkatnya, mekanisme reaksi berkatalis terdiri atas interaksi bagian aktif dari katalis dengan reaktan (-reaktan), aktivasi ikatan sehingga membentuk transisi intermediat yang aktif, reaksi, dan diakhiri dengan pelepasan produk. Untuk reaksi berkatalis padat, interaksi reaktan dengan sisi aktif katalis disebut juga adsorpsi. Selanjutnya reaksi antara reaktan yang telah teradsorpsi tersebut dipermukaan aktif katalis, dan diakhir dengan desorpsi (pelepasan) produk dari sisi aktif katalis.

Jadi kerja katalis dalam mempercepat reaksi adalah melokalisasi reaksi dengan cara:

1. meningkatkan konsentrasi,
2. meningkatkan ketepatan orientasi reaksi, serta
3. memberikan rute/jalan tahapan reaksi lain yang memerlukan energi lebih rendah, sehingga dapat dikatakan menurunkan energi aktivasi.

Katalis bekerja secara spesifik terhadap reaksi tertentu dengan efektif, artinya dapat mengkatalisis sejumlah besar reaktan. Sebagai contoh, katalis Ziegler-Natta generasi keempat hanya memerlukan 1 kg untuk mengonversi 50 ton monomer.

Sebagai contoh, reaksi pembentukan gas amonia (NH_3) dari gas nitrogen (N_2) dan gas hidrogen (H_2). Sebelum membentuk amonia, molekul N_2 dan molekul H_2 masing-masing harus berdisosiasi menjadi atom-atom N dan H. Sementara N_2 dan H_2 adalah molekul-molekul diatomik dengan ikatan kovalen

yang stabil, sehingga sulit dan membutuhkan energi yang tinggi untuk disosiasi. Menurut hasil penelitian, energi aktivasi untuk melangsungkan reaksi pembentukan amonia ini adalah 942 kJ/mol jika tanpa katalis. Sedangkan jika digunakan katalis berbasis besi, energi aktivasi turun menjadi 13 kJ/mol.

Katalis yang berbeda dapat menawarkan mekanisme reaksi yang berbeda dan kecepatan reaksi yang berbeda pula. Energi aktivasi reaksi berkatalis enzim umumnya lebih rendah, namun tergantung pada kondisi reaksi dan pengotor yang hadir. Sebagai contoh, reaksi transesterifikasi minyak nabati (misal: minyak kedelai) dengan metanol menggunakan beberapa jenis katalis, (termasuk katalis enzim jenis lipase) seperti ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Perbandingan Energi aktivasi (Ea) reaksi transesterifikasi minyak kedelai dengan metanol menggunakan berbagai jenis katalis

No.	Jenis katalis	Katalis	Ea (kJ/mol)	Referensi
1.	Basa homogen	NaOH	38,09	Freedman <i>et al.</i> (1984)
		NaOH	14,7	Vicente <i>et al.</i> (2004)
2.	Basa heterogen	CaO	41,4	Kouzu <i>et al.</i> (2008)
		KF/Al ₂ O ₃	38,7	Xie <i>et al.</i> (2006)
		Ca-hidroksiapatit	78,1	Boey <i>et al.</i> (2011)
3.	Asam homogen	H ₂ SO ₄	65,0	Noureddini dan Zhu (1997)
		H ₂ SO ₄	104,6	Canakci dan Van Gerpen (2001)
		<i>p</i> -toluensulfonic acid (PTSA)	70,8	Leung dan Guo (2006)
4.	Enzim biokatalis	<i>Candida antarctica</i> (Novozyme 435)	16,3	Bisen <i>et al.</i> (2010)
		<i>Rhizomucor miehei</i> (Lipozyme RM IM)	19,6	Wang <i>et al.</i> (2007)

Reaksi transesterifikasi digunakan dalam pembuatan biodiesel yang merupakan senyawa kimia, FAME (*fatty acid methyl ester*). Indonesia adalah produsen minyak sawit terbesar di dunia. Hasil penelitian produksi biodiesel untuk penggunaan berbagai katalis disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 Perbandingan Energi aktivasi (Ea) reaksi transesterifikasi minyak sawit dengan metanol menggunakan berbagai jenis katalis

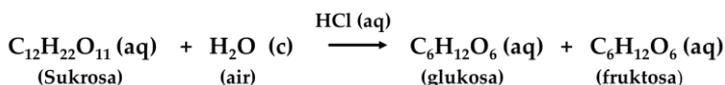
No.	Jenis katalis	Katalis	Ea (kJ/mol)	Referensi
1.	Basa homogen	NaOH	32,6	Rashid dan Anwar (2008)
		NaOH	31,5	Darnoko dan Cheryan (2000)
		KOH	28,3	Rashid dan Anwar (2008)
2.	Basa heterogen	CaO	44,5	Boey <i>et al.</i> (2011)
		MgO	62,2	Boey <i>et al.</i> (2011)
		ZnO	50,3	Boey <i>et al.</i> (2011)
		CaO/SiO ₂	38,2	Kouzu <i>et al.</i> (2008)
3.	Asam homogen	H ₂ SO ₄	98,0	Darnoko dan Cheryan (2000)
		HCl	102,5	Gui <i>et al.</i> (2008)
4.	Asam-heterogen	ZrO ₂ /sulfated	110,5	Sun <i>et al.</i> (2010)
		H ₃ PW ₁₂ O ₄₀ (heteropoly acid)	88,1	Melero <i>et al.</i> (2009)
5.	Enzim biokatalis	– Lipase - immobilized	22,0	Tan <i>et al.</i> (2010)
		Lipase – (<i>Candida antarctica</i>)	18,9	Kaleda <i>et al.</i> (1999)

5.2 Penggolongan Katalis

Penggolongan katalis berdasarkan fasa campuran reaksi, dikenal (1) katalis homogen, jika fasa katalis sama dengan fasa campuran reaksi, (2) katalis heterogen, jika fasa katalis berbeda dengan fasa campuran reaksi, serta (3) katalis hetero-homogen, jika fasa aktif katalis sama dengan campuran reaksi, tetapi katalis tersebut yang asalnya sama dengan campuran reaksi tetapi dilekatkan pada penyangga/*support* yang fasanya berbeda dengan campuran reaksi. Fasa penyangga biasanya padat.

5.3 Katalis Homogen-Heterogen

Reaksi hidrolisis larutan sukrosa (C₁₂H₂₂O₁₁) dalam air menggunakan larutan HCl (asam klorida) menghasilkan glukosa (C₆H₁₂O₆) dan fruktosa (C₆H₁₂O₆), yang juga terlarut dalam air. Fungsi HCl dalam kasus ini adalah katalis homogen, karena secara kasat mata tidak dapat dibedakan antara molekul sukrosa, glukosa, fruktosa, air, dan katalis HCl dalam system campuran reaksi ini.

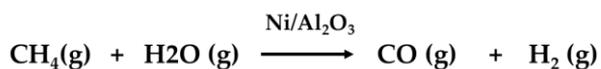


Katalis homogen memainkan peran penting dalam berbagai reaksi kimia industri maupun laboratorium, terutama karena kemampuannya memberikan selektivitas tinggi, aktivitas reaksi yang presisi, serta kemudahan dalam studi mekanistik akibat keterlarutan penuh katalis dalam fasa reaksi. Berbeda dengan katalis heterogen yang bekerja pada antarmuka dua fasa, katalis homogen bereaksi secara langsung dalam fasa yang sama dengan reaktan, biasanya dalam bentuk larutan, sehingga memungkinkan pencampuran sempurna pada tingkat molekuler.

Salah satu contoh aplikasi katalis homogen yang paling menonjol adalah pada reaksi hidroformilasi (*hydroformylation*), yaitu reaksi penambahan karbon monoksida (CO) dan hidrogen (H₂) ke alkena untuk menghasilkan aldehida. Reaksi ini menggunakan kompleks logam rhodium (Rh) atau kobalt (Co) homogen, seperti HRh(CO)(PPh₃)₃, dan banyak digunakan dalam industri untuk memproduksi alkohol rantai panjang, pelarut, serta prekursor plastik (Cornil & herrmann, 2003; Nozaki, 2001)). Keunggulan dari sistem ini adalah selektivitas yang tinggi terhadap produk linear, serta kondisi reaksi yang relatif moderat.

Contoh lain yang sangat penting secara industri adalah reaksi karbonilasi metanol untuk memproduksi asam asetat, yang dikomersialisasikan melalui proses Monsanto. Reaksi ini melibatkan katalis homogen berbasis rhodium iodida, seperti kompleks [Rh(CO)₂I₂]⁻. Teknologi ini memungkinkan konversi metanol dan karbon monoksida secara efisien dan selektif dalam medium cair, serta telah menggantikan banyak proses konvensional yang kurang efisien (Haynes, 2002).

Reaksi reformasi kukus gas metana (CH₄) dengan bantuan katalis Nikel yang disangga oleh alumina (Ni/Al₂O₃) yang menghasilkan gas CO (karbon monoksida) dan gas H₂ (hidrogen) adalah salah satu contoh reaksi berkatalis heterogen. Dalam kasus ini fasa campuran reaksi (metana, kukus, karbon monoksida, dan hidrogen) adalah gas, sedangkan fasa katalis, Ni/Al₂O₃ adalah padat.



Katalis berfasa padat/heterogen umumnya terdiri atas 3 komponen utama, yaitu:

1. Komponen aktif: pemeran utama dalam mempercepat dan mengarahkan reaksi,
2. Penyangga/support: berfungsi menyediakan tempat yang luas untuk menempelkan komponen aktif, dan
3. Promotor yang berfungsi meningkatkan efektivitas atau stabilitas katalis, baik secara tekstural maupun struktural.

Namun demikian, beberapa katalis padat tanpa penyangga. Komponen aktif, biasanya berupa logam atau oksida logam. Beberapa bahan penyangga yang umum dipilih antara lain alumina (Al_2O_3), silika (SiO_2), dan karbon aktif, karena memiliki kestabilan termal yang tinggi, bersifat inert dan memiliki luas permukaan yang tinggi. Zeolit (alumino silika) selain dapat dijadikan katalis asam, kadang digunakan sebagai penyangga juga, jika reaksi yang akan dikatalisis memerlukan 2 jenis pusat aktif.

Proses kimia skala industrial lebih menyukai katalis heterogen, karena katalis mudah dipisahkan dari campuran reaksi. Dengan demikian sifat katalis yang mana dapat bekerja untuk jumlah reaktan yang banyak dapat dimaksimalkan. Dalam kasus katalis padat, kerja komponen/fasa aktif katalis ibarat "**Mak Comblang**" yang bekerja di "**kantor biro jodoh**".

Kelebihan katalis homogen adalah memberikan aktivitas dan selektivitas yang lebih tinggi, karena dalam berinteraksi antara katalis dengan reaktan tidak dihambat oleh proses difusi. Namun demikian, katalis sulit dipisahkan dari campuran reaksi khususnya produk. Gambar 7 menampilkan beberapa katalis padat.



Gambar 7 Contoh beberapa katalis padat yang digunakan di reaktor Industri

Dalam hal proses interaksi antara katalis dengan reaktan dan produk, katalis dibedakan menjadi (1) katalis asam-basa, (2) katalis oksidasi-reduksi, dan (3) Bio-katalis (katalis enzimatis).

5.4 Katalis Asam-Basa

Dehidrasi dan esterifikasi adalah contoh reaksi yang tidak mengubah bilangan oksidasi komponen-komponen penyusun senyawa (-senyawa) reaktan dan produknya. Untuk mempercepat reaksi jenis ini dapat digunakan katalis asam atau basa. Katalis asam adalah katalis yang dalam mempercepat reaksi kimia menyediakan proton (H^+), (prinsip asam Bronsted) atau menerima pasangan elektron dari senyawa lain (prinsip asam Lewis). Katalis ini dapat berupa larutan yang bersifat asam yang berfasa sama dengan campuran reaksi (katalis homogen) atau memiliki fasa berbeda, biasanya berfasa padat yang bersifat asam (katalis heterogen).

Mekanisme kerja katalis asam adalah dengan mengaktifkan gugus karbonil atau gugus lain dari senyawa organik dengan memberikan sifat asamnya, sehingga gugus tersebut terprotonasi yang pada akhirnya menjadi lebih elektrofilik dan menjadi lebih reaktif terhadap serangan gugus yang nukleofilik. Katalis basa bertindak sebaliknya dari katalis asam. Katalis basa akan memberikan pasangan elektronnya kepada senyawa elektrofilik, yang akhirnya menjadi reaktif dan menyerang senyawa yg nukleofilik, misal gugus karbonil pada senyawa organik.

Proses reaksi transesterifikasi minyak sawit dapat dikatalisis oleh asam maupun basa. Katalis basa memiliki keunggulan dalam kecepatan reaksi, tampak dari nilai energi aktivasi yang lebih rendah. Basa mengaktifkan metanol menjadi alkoksida, yang kemudian menyerang gugus karbonil dari trigliserida. Katalis basa kurang cocok untuk bahan baku minyak dengan kadar FFA (*Free fatty acid*) tinggi, karena akan terjadi reaksi samping berupa pembentukan sabun (saponifikasi) yang akan menurunkan hasil ester. Untuk bahan baku berupa minyak jelantah atau minyak limbah, lebih baik menggunakan katalis asam, namun perlu kondisi reaksi, tepatnya temperatur harus tinggi dan waktu reaksi lebih lama.

Katalis asam basa lebih ramah lingkungan dan mendukung prinsip proses berkelanjutan. Contoh katalis asam homogen adalah larutan asam klorida,

asam sulfat, dan beberapa larutan asam lainnya. Contoh katalis basa homogen adalah larutan natrium hidroksida, larutan natrium metoksida, larutan kalium karbonat, dan larutan-larutan basa lainnya. Contoh katalis asam heterogen adalah alumina, silika, silika alumina, zeolit dan lain-lain. Sedangkan contoh katalis basa heterogen adalah CaO/silika, MgO/alumina, dan lain-lain.

Zeolit adalah polimer anorganik dengan unsur utama penyusunnya aluminium (Al), silikon (Si), dan oksigen (O). Sampai saat ini telah dikenal ribuan jenis zeolit

5.5 Katalis Oksidasi-Reduksi

Reaksi reduksi-oksidasi (redoks) memainkan peran sentral dalam berbagai proses kimia, baik dalam skala laboratorium maupun skala industri. Reaksi ini melibatkan perpindahan elektron dalam senyawa reaktan-reaktannya, sehingga menyebabkan perubahan bilangan oksidasi. Untuk mempercepat reaksi redoks dibutuhkan katalis yang dapat membantu menyediakan elektron atau siap menerima elektron dari reaktan (-reaktan). Katalis redoks mempercepat reaksi oksidasi atau reduksi dengan menyediakan permukaan aktif atau situs aktif yang mampu berpartisipasi dalam transfer elektron. Umumnya, logam transisi seperti **Pt, Pd, Fe, Cu, Mn, Co**, dan **Ce** serta oksida kompleksnya (**MnO₂, Co₃O₄, CeO₂**) dapat digunakan sebagai katalis karena kemampuannya untuk mengalami perubahan valensi.

Sebagai contoh, pada oksidasi CO menjadi CO₂, katalis seperti **Pt/Al₂O₃** atau **CeO₂-ZrO₂** bertindak sebagai pusat redoks yang menerima dan melepaskan oksigen secara bergantian. Contoh lainnya adalah konversi gas karbon monoksida dan hidrogen menjadi metanol yang dikatalisis oleh CuO-ZnO yang disangga oleh Al₂O₃.

Karena sebagian besar logam mudah teroksidasi, maka katalis dibuat dalam bentuk logam oksida. Saat akan digunakan, katalis diaktifkan dengan cara direduksi secara ek-situ atau in-situ dalam reaktor untuk konversi kimia. Agen pereduksi dapat berupa gas hidrogen, gas sintesis (campuran gas CO dan H₂) atau gas CO. Ada juga pengaktifan katalis dengan cara diubah menjadi senyawa logam sulfida, misal: NiS/ γ -Al₂O₃.

5.6 Biokatalis

Biokatalis adalah agen biologis, umumnya berupa enzim atau sel mikroorganisme hidup, yang digunakan untuk mempercepat reaksi kimia secara spesifik dan efisien. Biokatalisis telah menjadi bagian penting dalam rekayasa kimia hijau, terutama karena kemampuannya untuk bekerja pada kondisi reaksi yang ringan, selektivitas tinggi serta kompatibilitasnya dengan substrat alami dan sintetis.

Aplikasi biokatalis terus berkembang, mencakup bidang industri makanan, farmasi, bahan kimia khusus, serta produksi bioenergi, seperti biodiesel berbasis enzim lipase. Enzim sebagai biokatalis bekerja melalui mekanisme pengikatan spesifik pada situs aktif, membentuk kompleks enzim-substrat sementara, yang kemudian mengalami konversi menjadi produk. Biokatalis bekerja paling efektif dalam rentang pH dan suhu yang moderat, serta sensitif terhadap pelarut dan kondisi lingkungan lainnya. Inovasi rekayasa protein dan teknologi immobilisasi telah meningkatkan kestabilan dan efisiensi biokatalis dalam kondisi industri.

Biokatalis menawarkan solusi kimia yang ramah lingkungan, selektif, dan efisien untuk berbagai reaksi sintetik. Penggunaannya telah meluas dari laboratorium ke industri skala besar, terutama dalam produksi farmasi, makanan, bahan kimia khusus, dan bioenergi. Dukungan teknologi baru memungkinkan pengembangan biokatalis yang lebih tahan lama dan fleksibel, menjadikannya komponen penting dalam transisi menuju kimia berkelanjutan.

Contoh biokatalis berupa enzim adalah enzim *glucose isomerase* untuk mengkonversi glukosa menjadi fruktosa, enzim lipase untuk sintesis biodiesel, enzim amilase untuk menghidrolisis tepung menjadi glukosa, dan lain-lain. Lipase digunakan untuk katalisis transesterifikasi trigliserida menjadi metil ester (biodiesel), menggantikan katalis basa yang bersifat korosif. Kelebihannya, enzim dapat bekerja baik dengan substrat asam lemak bebas tinggi dan tanpa pembentukan sabun. Fasa enzim umumnya adalah cair. Untuk pemanfaatan dalam skala industri disukai enzim imobilisasi, yaitu enzim yang difiksasi pada material pendukung/penyangga (yang sering kali disebut juga *carrier*) untuk meningkatkan stabilitas operasional, memudahkan pemisahan, dan memungkinkan penggunaan ulang.

5.7 Katalis Bio-Mimetik

Katalis bio-mimetik (*bio-mimetic catalysts*) adalah katalis buatan yang dirancang untuk meniru fungsi dan mekanisme kerja dari enzim alami. Pendekatan ini lahir dari inspirasi terhadap efisiensi tinggi, selektivitas luar biasa, dan kondisi operasi yang ringan pada reaksi biokimia, namun dengan tujuan untuk menciptakan sistem katalis yang lebih stabil dan dapat diterapkan dalam lingkungan industri.

Katalis bio-mimetik menduduki posisi antara biokatalis (seperti enzim atau mikroorganisme hidup) dan katalis senyawa anorganik (seperti logam transisi dan oksida logam pada permukaan padat). Biokatalis memiliki keunggulan dalam hal spesifisitas substrat dan efisiensi pada kondisi lunak (pH netral, suhu rendah). Namun sering kali tidak stabil pada kondisi di luar biologis, sehingga sulit untuk direkayasa ulang, dan harganya mahal. Katalis anorganik bersifat lebih stabil, tahan suhu tinggi, dan cocok untuk aplikasi industri berskala besar. Katalis anorganik cenderung kurang selektif dan harus bekerja pada kondisi yang lebih keras.

Katalis bio-mimetik berupaya menggabungkan keunggulan biokatalis dan katalis anorganik dalam struktur dan mekanisme enzimatik, namun dalam bentuk sintetik yang lebih stabil dan dapat direkayasa dengan presisi molekuler. Dalam banyak kasus, pusat aktif katalis bio-mimetik menyerupai logam dalam situs enzim, seperti hem dan Fe-S cluster pada enzim oksidase dan hidrogenase.

Katalis bio-mimetik biasanya berbasis kompleks logam transisi (Fe, Mn, Ni, Cu) yang dikoordinasikan dengan ligan organik menyerupai kantong aktif enzim. Contoh umum:

- Kompleks Fe-porfirin meniru enzim peroksidase
- Kompleks Bi-Fe meniru enzim hidrogenase
- Kompleks Mn-salen untuk epoksidasi

Reaksi lainnya yang sering ditiru adalah:

- Oksidasi selektif (seperti epoksidasi olefin).
- Pembelahan air (*water-splitting*) dan evolusi oksigen/hidrogen.
- Reaksi redoks berbasis *proton-coupled electron transfer* (PCET).

Dalam dua dekade terakhir, riset bio-mimetik mengalami kemajuan pesat. Beberapa tonggak penting meliputi:

- Katalis tiruan hidrogenasi berbasis Fe–Fe dan Ni–Fe untuk reaksi pembentukan H₂ dalam sel bahan bakar (*fuel cells*).
- Katalis oksidasi berbasis Mn dan Fe yang meniru enzim peroksidase untuk aplikasi dalam pemurnian air dan oksidasi alkohol.
- Penggunaan MOFs bio-mimetik sebagai nanoreaktor multifungsi yang mampu menyimulasikan berbagai aktivitas enzim sekaligus dalam satu platform.

Institusi riset seperti Max Planck Institute, Caltech, dan MIT telah banyak mempublikasikan kemajuan dalam katalis bio-mimetik untuk konversi energi, kimia hijau, dan sintesis molekul kompleks. Selain itu, penggunaan pendekatan *computational chemistry* dan *artificial intelligence (AI)* dapat mempercepat perancangan struktur bio-mimetik yang optimal secara teoritis sebelum disintesis.

Meskipun menjanjikan, tantangan besar masih perlu dihadapi. Tantangan utama mencakup kesulitan sintesis, keterbatasan stabilitas jangka panjang, dan biaya ligan kompleks. Namun, dengan kemajuan dalam bidang kimia supramolekular dan rekayasa nanomaterial, bio-mimetik akan menjadi katalis masa depan yang menjembatani efisiensi biologis dan kekuatan teknik anorganik dan diprediksi akan memainkan peran penting dalam industri farmasi, energi terbarukan, dan lingkungan.

Pemilihan katalis tidak hanya mempertimbangkan aktivitas, tetapi juga stabilitas termal, regenerabilitas, dan kompatibilitas dengan kondisi operasi

6 UMUR KATALIS INDUSTRI: PENDEKATAN KINETIKA DAN REKAYASA PROSES

Katalis merupakan komponen kunci dalam reaksi kimia industri karena dapat meningkatkan laju reaksi tanpa terkonsumsi. Namun, dalam praktik industri, katalis dapat mengalami penurunan aktivitas secara bertahap akibat proses deaktivasi. Oleh karena itu, penentuan umur katalis (*catalyst lifetime* atau *catalyst cycle time*) menjadi aspek penting dalam perancangan, pengoperasian, dan optimasi unit proses kimia berbasis katalitik, khususnya reaktor kimia.

Umur katalis berbeda-beda mulai dari yang hanya beberapa detik (contoh: katalis berbasis zeolit untuk perengkahan residu minyak bumi hanya berumur 2-3 detik) sampai yang dapat berumur lebih dari 15 tahun (contoh: katalis berbasis besi (Fe) untuk sintesis amonia dari gas nitrogen dan gas hidrogen). Ada katalis yang sekali pakai selama umurnya dan setelah itu harus diganti (contoh: katalis hidrotreating), namun ada pula yang bisa diperpanjang umurnya dengan cara di regenerasi (contoh: katalis Pt/zeolit untuk isomerisasi etil-benzen menjadi ksilen, dapat 1 atau 2 kali regenerasi untuk memperpanjang umurnya dan katalis perengkahan residu minyak bumi diregenerasi untuk menyingkirkan kokas yang terdeposit pada permukaan katalis).

6.1 Penyebab Deaktivasi Katalis

Penurunan aktivitas katalis dapat terjadi melalui beberapa mekanisme utama yang memengaruhi efisiensi dan kinerja katalis. Pertama, **fouling** terjadi akibat penumpukan senyawa karbon atau kokas atau logam berat pada permukaan katalis, yang dapat menghambat akses reaktan ke situs-situs aktif pada permukaan katalis. Kedua, **sintering** merupakan proses agregasi partikel aktif katalis yang disebabkan oleh suhu tinggi sehingga luas permukaan aktif katalis yang tersedia untuk reaksi berkurang. Ketiga, **poisoning** terjadi ketika katalis terkontaminasi oleh senyawa beracun seperti sulfur (S), timbal (Pb), atau fosfor (P), dan lain-lain yang menginaktivasi situs-situs aktif. Keempat, *loss of active sites* dapat terjadi melalui *leaching* atau migrasi atom aktif, sehingga yang mengakibatkan jumlah situs-situs aktif katalis untuk proses katalisis jadi berkurang.

Deaktivasi katalis yang disebabkan oleh *fouling* dapat bersifat sementara, artinya katalis dapat diaktifkan kembali dengan cara regenerasi dan ada pula yang bersifat permanen, tidak dapat diaktifkan kembali. Sebagai contoh *fouling* yang disebabkan oleh penumpukan karbon atau kokas yang terjadi pada katalis perengkahan minyak nabati dapat diregenerasi dengan prinsip membakar atau mereaksikan karbon/kokas menggunakan oksigen dari udara pada suhu tinggi (500 – 700 °C) menjadi gas karbon monoksida (CO) atau karbon dioksida (CO₂) yang akan meninggalkan situs aktif katalis. Cara lainnya adalah dengan mengalirkan oksigen dan kukus, juga pada suhu tinggi sehingga terjadi proses gasifikasi terhadap karbon/kokas. Deaktivasi akibat penumpukan produk logam Nikel (Ni) dan Vanadium (V) di permukaan situs aktif katalis pada proses *atmospheric residue hydrodemetallization* (ARHDM) residu minyak bumi adalah jenis *fouling* yang permanen. Pada proses ARHDM, Senyawa-senyawa organometalik bereaksi dengan gas hidrogen membentuk senyawa hidrokarbon dan meninggalkan logam elemental pada situs aktif katalis.

6.2 Strategi Mengurangi *Fouling* dan Regenerasi

Fouling adalah jenis deaktivasi yang paling sering terjadi. Beberapa strategi efektif untuk mengurangi *fouling* pada katalis adalah melalui:

1. **Pretreatment** terhadap **umpan** untuk menghilangkan senyawa yang berpotensi menyebabkan *fouling*, seperti senyawa karbon dan logam berat.
2. **Optimasi kondisi operasi**, yaitu suhu, tekanan, dan laju alir yang optimal dan terjaga untuk meminimalkan penumpukan senyawa pada permukaan katalis.
3. **Penambahan zat aditif**, seperti inhibitor yang dapat menghambat penumpukan senyawa tertentu.
4. **Desain katalis yang lebih tahan** terhadap *fouling*, misal menggunakan material yang lebih inert atau memiliki struktur permukaan yang mengurangi penumpukan material.
5. **Regenerasi katalis secara berkala** untuk menghilangkan *fouling* yang sudah terjadi dan mengembalikan aktivitas katalis.

Dengan strategi-strategi tersebut, *fouling* dapat dikurangi secara signifikan, sehingga umur dan efisiensi katalis dapat diperpanjang.

Beberapa metode regenerasi katalis yang umum digunakan di antaranya:

1. Pembakaran kokas: metode ini melibatkan pembakaran endapan karbon pada permukaan katalis dengan menggunakan udara atau uap air untuk mengoksidasi endapan karbon menjadi karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO₂).
2. *Leaching*: Proses ini menggunakan pelarut kimia untuk menghilangkan kontaminan dari katalis. Pelarut asam sering digunakan untuk melarutkan pengotor logam berat, namun perlu diperhatikan ketahanan bahan konstruksi reaktor terhadap asam, jika proses ini dilakukan secara in-situ.
3. Sonikasi: Metode ini menggunakan gelombang ultrasonik untuk membersihkan katalis dari pengotor. Sonikasi dapat dilakukan dengan pelarut seperti air demin untuk menghilangkan pengotor seperti sulfur (S) dan besi (Fe). Proses ini hanya bisa dilakukan jika ukuran reaktor kecil.
4. Hidrotermal: Proses ini melibatkan penggunaan kukus tekanan dan suhu tinggi untuk menghilangkan pengotor dari katalis. Hidrotermal sering digunakan setelah sonikasi untuk meningkatkan efektivitas pembersihan.

6.3 Umur Katalis Skala Industri

Umur katalis dalam aplikasi industri merupakan parameter kunci yang sangat menentukan efisiensi proses, kontinuitas produksi, dan keekonomian operasional di berbagai sektor industri kimia, petrokimia, dan energi. Umur katalis didefinisikan sebagai periode operasi yang dimulai sejak katalis segar (*fresh catalyst*) dimasukkan ke dalam sistem reaktor hingga aktivitasnya menurun ketingkat yang tidak lagi memenuhi batas performa teknis atau ekonomi yang telah ditetapkan. Penurunan aktivitas ini mengindikasikan bahwa konversi atau selektivitas reaksi tidak lagi memadai untuk mempertahankan *output* produk dan efisiensi energi secara optimal.

Dalam konteks industri, umur katalis umumnya dinyatakan dalam dua cara:

1. Waktu operasi kumulatif (jam atau hari operasi), dikenal juga dengan istilah TOS (*time on stream*) biasanya diterapkan untuk proses kontinu seperti reformasi katalitik atau perengkahan hidrokarbon, atau hidrotreating.

2. *Throughput* kumulatif, atau ekuivalen dengan kapasitas akumulasi spesifik katalis misalnya dalam satuan ton produk per ton katalis, yang lebih relevan pada proses *batch* (partaian) atau *semi-batch*.

Umur katalis, selain ditentukan oleh sifat komponen penyusun katalis, juga dipengaruhi kondisi operasi dan jenis umpan yang ditangani katalis. Kondisi operasi meliputi temperatur, tekanan, laju alir fluida, dan waktu kontak yang optimal. Umpan fluida yang banyak mengandung komponen-komponen yang dapat meracuni katalis dapat memperpendek umur katalis. Oleh sebab itu, kondisi operasi dan jenis umpan harus dikelola dengan baik untuk mencegah deaktivasi sehingga dapat memperpanjang umur katalis dan memastikan kinerja katalis yang optimal selama operasi.

Pemantauan umur katalis secara tepat memungkinkan perencanaan *shutdown* proses yang optimal, menghindari gangguan produksi mendadak akibat penurunan aktivitas katalis yang tidak terdeteksi, serta meminimalkan biaya penggantian katalis. Misalnya, dalam unit FCC (*Fluid Catalytic Cracking*), umur katalis menjadi pertimbangan utama dalam siklus regenerasi dan pemisahan katalis *spent* dari sistem sirkulasi. Dalam industri amonia atau metanol, umur katalis yang panjang akan secara langsung menurunkan frekuensi penggantian dan biaya operasional tahunan.

Pendekatan industri dalam pemilihan katalis, tidak hanya dilihat dari umur katalis yang memiliki stabilitas termal dan kimia yang tinggi, tetapi juga penerapan sistem regenerasinya, *in-situ* atau *eks-situ*, serta pemantauan *online* terhadap performa katalis melalui parameter proses (konversi, selektivitas, tekanan, dan suhu reaksi). Investasi dalam pengembangan katalis dengan umur lebih panjang memiliki dampak signifikan terhadap total biaya produksi (*Total Cost of Ownership*, TCO) sehingga menjadikan umur katalis sebagai salah satu pertimbangan strategis dalam desain proses dan pemilihan teknologi industri.

6.4 Umur Katalis dalam Konversi Biomassa: Perspektif Industri

Dalam industri berbasis biomassa, umur katalis memainkan peran strategis dalam menentukan keberlanjutan, efisiensi, dan kelayakan ekonomi proses konversi bahan baku hayati menjadi bahan bakar dan bahan kimia bernilai tambah. Berbeda dengan proses petrokimia konvensional yang menggunakan

umpan relatif bersih dan homogen, konversi biomassa menghadirkan tantangan tersendiri terhadap stabilitas katalis. Biomassa mengandung senyawa-senyawa pengotor yang lebih bervariasi, seperti senyawa nitrogen, sulfur, klorin, logam alkali, serta senyawa aromatik kompleks yang dapat menyebabkan deaktivasi katalis lebih cepat. Oleh karena itu, umur katalis dalam industri biomassa sering kali lebih pendek dibandingkan proses berbasis bahan bakar fosil.

Dalam berbagai platform teknologi konversi biomassa seperti: pirolisis katalitik, reformasi kukus minyak nabati/ bio-oil, hidroleoksisenasi (HDO), dan gasifikasi dengan konversi katalitik gas sintesis (*syngas*), umur katalis memengaruhi frekuensi regenerasi atau penggantian katalis dan, pada akhirnya, biaya produksi. Misalnya, pada proses HDO minyak nabati, katalis berbasis logam transisi seperti Ni-Mo atau Co-Mo yang didispersikan pada penyangga alumina atau zeolit sering mengalami deaktivasi akibat *fouling* berat dan sulfurisasi balik. Dalam hal ini, umur katalis diukur dalam jumlah jam operasi stabil atau jumlah liter bio-oil yang diproses per kilogram katalis.

Pengembangan katalis yang stabil untuk konversi biomassa diarahkan pada desain struktur mesopori untuk mencegah *fouling*, penggunaan logam aktif yang tahan terhadap senyawa pengotor, serta rekayasa penyangga untuk meningkatkan ketahanan termal dan regenerabilitas. Selain itu, integrasi sistem regenerasi in-situ (seperti oksidasi ringan untuk membakar kokas) menjadi bagian dari solusi desain proses industri berbasis biomassa yang berkelanjutan.

Dengan demikian, umur katalis bukan sekadar parameter teknis, melainkan menjadi indikator utama kelayakan teknologi konversi biomassa secara komersial, serta menjadi dasar dalam analisis biaya siklus hidup (*life-cycle cost*) suatu proses hijau.

6.5 Contoh Pemodelan Deaktivasi dan Estimasi Umur Katalis

Aktivitas katalis ($a(t)$) biasanya didefinisikan sebagai ratio antara laju reaksi aktual (r_t) terhadap laju reaksi awal (r_0), saat katalis baru (*fresh*) belum ada bagian yang terdeaktivasi.

$$a(t) = \frac{\text{laju reaksi saat waktu } t}{\text{laju reaksi saat awal } t_0} = \frac{r_t}{r_0} \quad (6)$$

Penurunan aktivitas katalis dipengaruhi oleh: (1) waktu pemakaian (umur) katalis, TOS, (2) temperatur (T), (3) pembentukan kokas (material yang terdeposit pada permukaan katalis), C_c , (4) konsentrasi komponen tertentu (mungkin reaktan atau produk) yang hadir dalam campuran reaksi (C_x), dan (5) aktivitas residu, yaitu aktivitas katalis yang dapat dipulihkan karena regenerasi atau yang tetap bertahan setelah adanya deaktivasi parsial (y) (Shakor, RSC Adv, 2023).

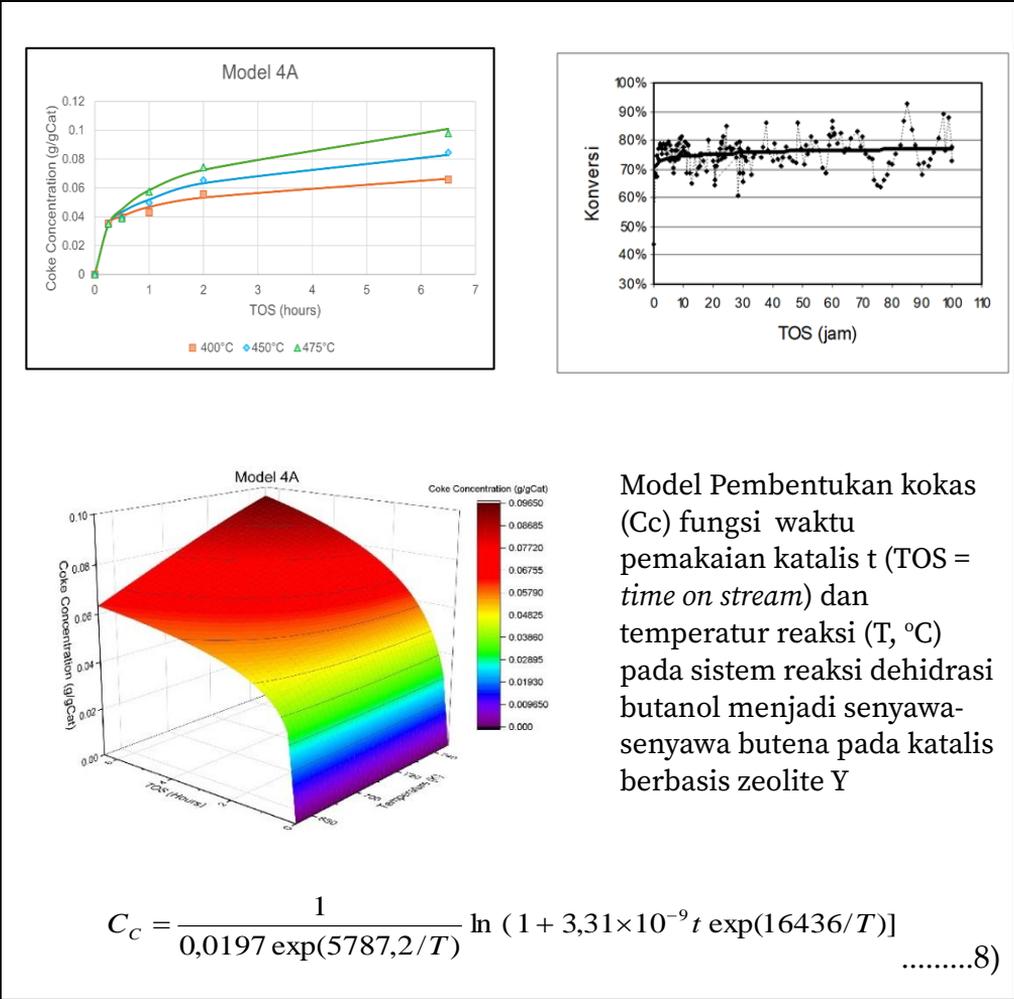
$$a(t) = f [t, T, C_c, C_x, y] \quad (7)$$

Penentuan umur katalis skala percobaan dilaboratorium atau skala pilot plant dapat dilakukan pada kondisi isothermal. Konversi dan atau perolehan produk reaksi dipantau/diukur setiap waktu. Kemudian data dicocokkan dengan model yang dibangun.

Memperkirakan umur katalis dapat dilakukan ekstrapolasi waktu saat aktivitas menurun sampai batas kritis. Berikut contoh kasus skala laboratorium, yaitu dehidrasi n-butanol menjadi senyawa-senyawa butena.

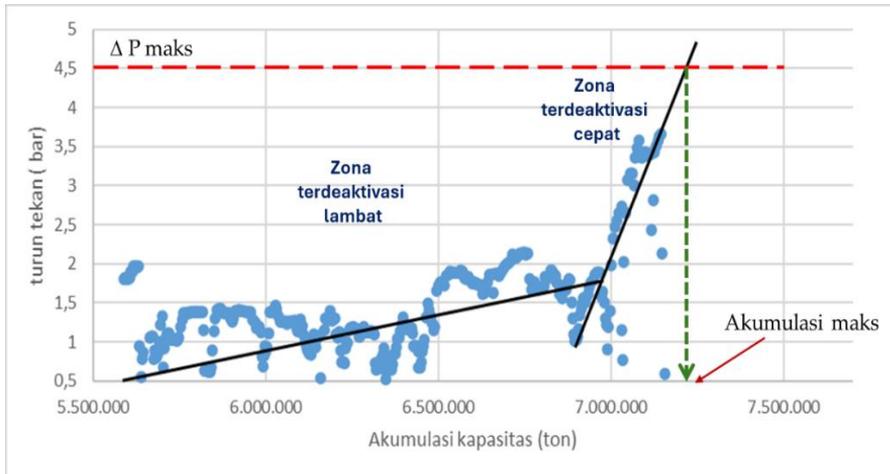
Dalam operasi nyata di skala komersial, Industri, umur katalis dipantau berdasarkan monitoring konversi umpan dan (/atau) selektivitas atau perolehan produk, juga besaran kondisi proses (tekanan, temperatur, dan laju alir umpan) setiap saat (atau secara *online*). Data terpantau yang dikombinasikan dengan data historis operasi ini dapat digunakan untuk menilai dan memprediksi umur katalis, kapan saat katalis harus diregenerasi atau diganti.

Fouling pada katalis, tidak serta merta katalis mati karena terdeaktivasi. Dalam penggunaan, katalis umumnya terdeaktivasi dalam 2 tahap. Di awal penggunaan, katalis terdeaktivasi lambat sampai umur tertentu, kemudian terdeaktivasi dengan cepat. Namun ada pula katalis lain yang berperilaku sebaliknya. Cara mengamati proses deaktivasi katalis yang sedang dipakai (berada) di dalam reaktor industri beserta pemodelannya berbeda-beda.



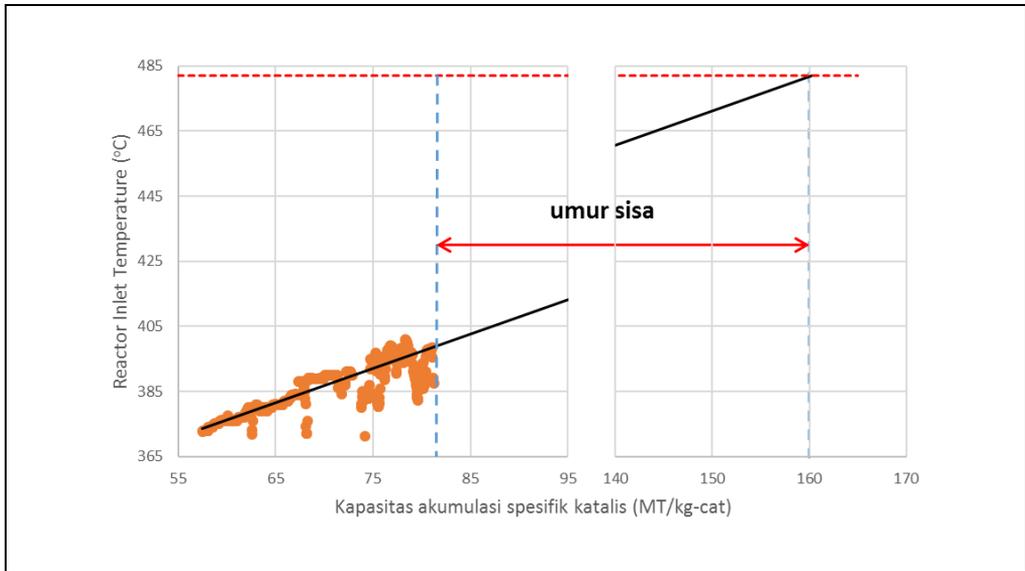
Gambar 8 Kurva profil 2 (atas kiri) dan 3 dimensi (bawah kiri) Model pembentukan kokas sebagai fungsi temperatur reaksi dan waktu pemakaian (umur) katalis berbasis zeolite Y pada dehidrasi n-butanol serta data konversi reaksi saat pemakaian sampai 100 jam (atas kanan) (Gunawan, RSCE, 2024)

Sebagai contoh katalis *hydrotreating* (*naphta hydrotreating, diesel hydrotreating*) yang ditempatkan di dalam reaktor sebagai unggun tetap, biasanya aktivitas katalis diikuti dengan mengamati dan mencatat kondisi proses, yaitu tekanan atau *pressure drop* dan temperatur dalam reaktor, selain konversi reaksi yang dihasilkan. Gambar 9. menunjukkan profil *pressure drop* reaktor terhadap TOS yang diwakili (sebanding) dengan pada akumulasi kapasitas.



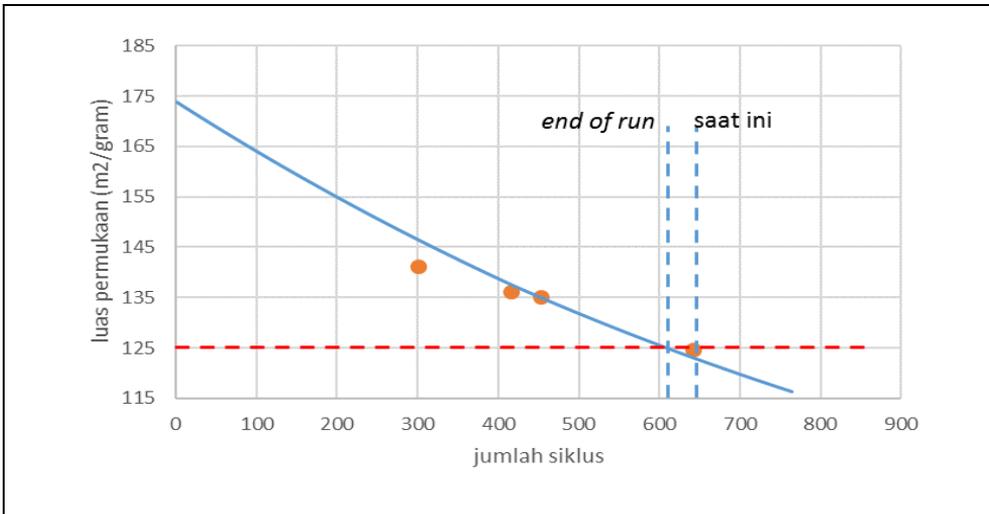
Gambar 9 Profil penurunan tekanan terhadap akumulasi kapasitas umpan reaktor hidrotreating dengan penurunan tekanan maksimum yang diijinkan 4,5 bar (Laporan, 2018)

Cara lain mengikuti proses deaktivasi katalis dengan mencatat suhu inlet reaktor. Untuk meningkatkan suhu reaktor atau umpan reaktor dibatasi oleh unit pendukung dan temperatur maksimum desain. Oleh sebab itu ada yang dinamakan temperatur *End-of-Run* (EOR). Sebagai contoh yang terjadi pada reaktor industri yang menyelenggarakan reaksi trans alkilasi, yaitu perpindahan atau pertukaran gugus alkil di antara senyawa aromatik. Reaksi samping pada kasus ini adalah perengkahan yang menghasilkan kokas, yang berakibat kepada penurunan keaktifan katalis. Untuk mengimbangnya dilakukan peningkatan suhu umpan yang memasuki reaktor (RIT = *reactor inlet temperature*) sampai suhu maksimum EOR, agar dicapai konversi seperti yang diinginkan untuk setiap saat. Umur katalis berakhir saat EOR tercapai. Gambar 10 menunjukkan contoh profil RIT sebagai fungsi dari kapasitas akumulasi spesifikasi katalis.



Gambar 10 Grafik peningkatan temperatur umpan reaktor (RIT) sebagai fungsi dari kapasitas kumulatif spesifik katalis yang memiliki EOR 483 °C (Laporan, 2018)

Untuk katalis yang digunakan di dalam reaktor terfluidakan atau reaktor unggun bergerak, yang mana katalis mengalir, biasanya ada titik bukaan pada reaktor atau sistem perpipaan untuk penggantian katalis secara kontinu, sehingga bisa mendapatkan sampel katalis yang sedang digunakan. Penentuan umur katalis dapat dilakukan dengan mengukur luas permukaan aktif/spesifik katalis. Penurunan luas permukaan katalis dapat disebabkan oleh berbagai penyebab deaktivasi. Katalis perlu diganti saat luas permukaan aktif mencapai nilai tertentu. Gambar 11 menunjukkan salah satu contoh penentuan umur katalis reformasi pada reaktor unggun bergerak. Dari Gambar tampak bahwa umur katalis sudah habis, sehingga katalis dalam reaktor tersebut sudah saatnya diganti. Pemahaman mendalam terhadap model deaktivasi sangat penting untuk desain reaktor, pengendalian proses, dan optimasi penggunaan katalis dalam industri kimia.



Gambar 11 Hasil simulasi penurunan luas permukaan aktif salah satu katalis reformasi dicocokkan dengan data (laporan, 2018)

Pemantauan variabel dan parameter proses di industri dengan cermat dan lengkap sangat membantu dalam upaya mengevaluasi kinerja katalis yang mana hasilnya dapat dipergunakan untuk memperkirakan sisa umur katalis yang sedang dipakai di dalam reaktor. Dengan demikian perencanaan regenerasi dan atau penggantian katalis menjadi lebih baik lagi.

7 PENGEMBANGAN KATALIS MERAH-PUTIH: DARI LAB KE KOMERSIAL

Katalis memegang peranan vital dalam industri kimia, karena berperan langsung dalam mengonversi bahan baku menjadi produk. Tanpa katalis, sebagian besar reaksi kimia tidak akan berlangsung secara ekonomis, bahkan bisa terhenti sama sekali. Diperkirakan lebih dari 90% proses konversi di industri kimia global melibatkan katalis, menjadikannya kunci keberhasilan dan keberlanjutan produksi.

Meskipun demikian, industri nasional masih sangat bergantung pada katalis impor. Hanya sekitar 40% katalis yang tersedia secara komersial di pasar terbuka, dan jumlah ini cenderung menurun karena banyak industri besar mengembangkan dan menggunakan katalis secara tertutup. Ketergantungan pada produk impor bukan hanya berdampak pada efisiensi biaya dan logistik, tetapi juga menghambat fleksibilitas industri dalam menyesuaikan katalis terhadap kondisi proses lokal dan karakteristik bahan baku domestik.

Penguasaan teknologi katalisis merupakan faktor strategis dalam memperkuat daya saing dan kemandirian industri kimia suatu negara. Bagi Indonesia, kemampuan untuk mensintesis dan merekayasa katalis secara mandiri sangat penting, terutama untuk sektor-sektor utama seperti petrokimia, pengolahan migas, oleokimia, serta industri kimia dasar dan hilir.

Pengembangan katalis dalam negeri memberikan berbagai keuntungan jangka panjang: mulai dari pengurangan ketergantungan impor, penguasaan teknologi inti proses, hingga kemampuan adaptasi formulasi katalis sesuai kebutuhan spesifik industri nasional. Inisiatif ini juga sejalan dengan arah kebijakan nasional dalam memperkuat industri strategis dan penguasaan teknologi hulu sebagai fondasi kemandirian teknologi proses di masa depan. Indonesia memiliki beberapa sumber daya alam untuk bahan baku dan prekursor sintesis katalis. Sebagai contoh; nikel, tembaga, alumina, dan lain-lain. Pemanfaat sumber daya domestik dapat menekan biaya produksi.

Salah satu jenis katalis yang sangat luas penggunaannya di industri adalah katalis padat, yang banyak diaplikasikan dalam proses seperti hidrogenasi, reformasi, dehidrogenasi, perengkahan (*cracking*), dan konversi biomassa.

Teknologi sintesis katalis padat melibatkan beberapa tahapan utama, antara lain:

1. Pemilihan dan persiapan prekursor logam aktif (misalnya: nikel, kobalt, tembaga, molibdenum, dan lain-lain),
2. Pemilihan material penyangga (*support*) seperti alumina, silika, zeolit, atau karbon aktif,
3. Metode sintesis seperti impregnasi, ko-presipitasi, sol-gel, atau ion exchange untuk menempelkan logam aktif ke permukaan penyangga,
4. Proses pengeringan, kalsinasi, dan terkadang reduksi atau aktivasi untuk menghasilkan situs aktif katalitik yang siap digunakan.

Teknologi ini menawarkan beberapa kemudahan, terutama dalam hal skalabilitas proses, stabilitas termal, dan kemudahan pemisahan fasa dalam sistem reaksi. Katalis padat juga lebih mudah untuk digunakan ulang (regenerasi) dan lebih sesuai dengan sistem reaktor heterogen berskala industri, seperti *fixed-bed* atau *fluidized-bed reactors*.

Namun demikian, terdapat sejumlah tantangan teknis dalam sintesis katalis padat, seperti:

- Menjaga distribusi logam aktif yang seragam di permukaan penyangga,
- Menghindari *sintering* atau aglomerasi partikel selama kalsinasi,
- Meningkatkan interaksi logam–penyangga agar tetap stabil selama operasi jangka panjang,
- Serta pengendalian karakteristik pori dan luas permukaan untuk mendukung difusi reaktan.

Selain tantangan teknis, pengembangan katalis di Indonesia juga menghadapi berbagai kendala non-teknis, seperti keterbatasan akses terhadap prekursor murni, kurangnya infrastruktur karakterisasi yang memadai, serta minimnya sumber daya manusia yang kompeten di bidang teknik reaksi kimia, teknik katalisis, kimia material, dan rekayasa proses.

Namun, dengan dukungan kebijakan riset nasional, kolaborasi antara perguruan tinggi, lembaga litbang, dan industri, serta investasi dalam fasilitas sintesis dan karakterisasi katalis, Indonesia memiliki peluang besar untuk membangun ekosistem katalis nasional yang kuat. Dalam jangka panjang, hal ini dapat mendorong kemandirian dalam pemenuhan kebutuhan domestik, bahkan membuka potensi ekspor.

Seiring dengan itu, perhatian juga diarahkan pada pengembangan katalis berbasis biomassa dan mineral lokal sebagai upaya mengurangi ketergantungan pada bahan impor sekaligus meningkatkan keberlanjutan proses. Upaya daur ulang dan regenerasi katalis bekas juga menjadi aspek penting dalam menekan limbah dan biaya produksi.

Di sisi lain, kemajuan dalam digitalisasi dan kecerdasan buatan membuka peluang baru dalam perancangan katalis yang lebih efisien dan presisi. Oleh karena itu, pengembangan katalis inovatif yang efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan menjadi prioritas utama dalam riset global, guna mendukung keberlanjutan industri kimia sekaligus menjawab tantangan ekonomi dan lingkungan masa depan.

7.1 Metode Sintesis Katalis Padat

Sintesis katalis padat merupakan tahap krusial dalam pengembangan sistem proses katalitik yang efisien dan stabil untuk berbagai aplikasi industri kimia. Keberhasilan suatu katalis tidak hanya ditentukan oleh komposisi kimia logam aktif, tetapi juga oleh metode sintesis yang digunakan, yang akan sangat memengaruhi distribusi logam aktif, struktur pori, luas permukaan spesifik, interaksi logam–penyangga, serta daya tahan terhadap deaktivasi. Sejumlah metode sintesis telah dikembangkan dan digunakan secara luas, baik di laboratorium maupun industri, dengan karakteristik masing-masing.

Impregnasi (Wet Impregnation atau Incipient Wetness)

Metode impregnasi adalah salah satu teknik paling umum dalam sintesis katalis heterogen berbasis padatan. Pada metode ini, larutan prekursor logam (misalnya garam nikel, kobalt, atau molibdenum) diimpregnasikan ke dalam penyangga padat seperti alumina, silika, atau zeolit. Setelah impregnasi, material dikeringkan dan dikalsinasi untuk membentuk fase logam oksida atau logam aktif. Metode ini mudah diterapkan, ekonomis, dan cocok untuk skala besar, namun sering kali menghasilkan distribusi logam yang tidak merata, terutama jika kapasitas pori penyangga tidak sesuai dengan volume larutan.

Ko-presipitasi (*Co-precipitation*)

Dalam metode ko-presipitasi, logam aktif dan penyangga dikopresipitasi secara simultan dari larutan prekursor menggunakan agen pengendap (seperti: larutan Na_2CO_3 , NaOH , atau NH_4OH) hingga terbentuk padatan campuran (*precipitate*), yang kemudian disaring, dikeringkan, dan dikalsinasi. Metode ini memungkinkan pembentukan material campuran logam yang homogen pada skala atomik, serta membentuk interaksi kuat antara logam dan penyangga, yang penting untuk stabilitas katalis. Namun, teknik ini memerlukan kontrol yang ketat terhadap pH, suhu, dan laju penambahan reagen, serta menghasilkan limbah cair yang perlu ditangani.

Sol-Gel

Metode sol-gel melibatkan konversi prekursor anorganik menjadi sol (larutan koloid) yang kemudian mengalami gelasi menjadi gel tiga dimensi, diikuti oleh pengeringan dan kalsinasi. Teknik ini memungkinkan pembentukan struktur pori terkontrol dan distribusi logam homogen, serta memungkinkan sintesis katalis dengan ukuran partikel skala-nano.

Sol-gel sangat cocok untuk pembuatan katalis berbasis oksida campuran, seperti silika-alumina, titania-zirkonia, atau mesoporous materials. Namun, proses ini relatif kompleks dan memerlukan waktu lama, serta sensitif terhadap kelembaban dan kondisi lingkungan.

Ion Exchange

Metode *ion exchange* banyak digunakan dalam sintesis katalis berbasis zeolit atau resin penukar ion, di mana ion logam (seperti Cu^{2+} , Co^{2+} , atau Fe^{3+}) menggantikan ion asli dalam struktur kisi padat. Proses ini memungkinkan penempatan logam aktif yang terkontrol dalam kerangka material mikropori.

Katalis yang disintesis dengan metode ini biasanya menunjukkan dispersi logam tinggi, namun kapasitas pertukaran ion terbatas dan sangat bergantung pada struktur kristal penyangga.

Combustion Synthesis

Metode sintesis pembakaran (*combustion synthesis*) melibatkan reaksi eksoterm antara prekursor logam dan bahan bakar organik (misalnya urea atau glisin), yang menghasilkan suhu tinggi dan mempercepat pembentukan fase aktif. Teknik ini cepat, murah, dan menghasilkan material dengan luas permukaan tinggi, namun kadang menghasilkan fase non-homogen dan membutuhkan pengendalian atmosfer reaksi.

Spray Drying dan Flame Spray Pyrolysis

Dalam metode *spray drying*, larutan prekursor disemprotkan menjadi tetesan halus dan dikeringkan dengan udara panas untuk menghasilkan partikel padat. Sementara itu, *flame spray pyrolysis* menggunakan nyala api untuk mengubah larutan menjadi partikel nano dalam waktu sangat singkat. Kedua metode ini banyak digunakan untuk produksi katalis industri berskala besar dan menghasilkan morfologi partikel yang terkendali, namun memerlukan peralatan khusus dan protokol keselamatan yang ketat.

Pemilihan metode sintesis katalis padat harus mempertimbangkan sifat akhir yang diinginkan, jenis reaksi, karakteristik penyangga, serta skala produksi. Masing-masing metode memiliki keunggulan dan keterbatasan, baik dari sisi teknis maupun ekonomi. Di samping itu, keberhasilan sintesis katalis sangat bergantung pada langkah-langkah pasca-sintesis, seperti pengeringan, kalsinasi, aktivasi (reduksi), serta karakterisasi untuk memastikan bahwa situs aktif terbentuk dan dapat diakses oleh reaktan.

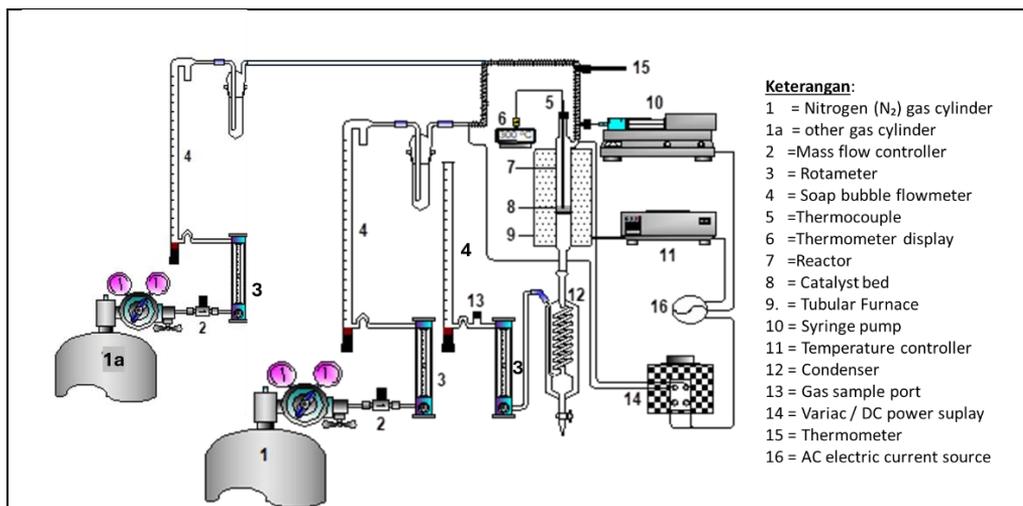
Dengan penguasaan berbagai metode ini, pengembangan katalis padat dalam negeri dapat diarahkan untuk memenuhi kebutuhan industri nasional yang semakin kompleks dan menuntut efisiensi tinggi serta keberlanjutan proses.

7.2 Seleksi (Screening) Katalis

Langkah awal pengembangan katalis biasanya dimulai dengan seleksi/*screening* katalis terlebih dahulu. Seperti yang terjadi pada pencarian katalis terbaik untuk dehidrasi n-butanol menjadi senyawa butena, lebih disukai isobutena karena lebih banyak manfaatnya.

Konversi *n*-Butanol (*n*-C₄H₉OH) menjadi Isobutilen (C₄H₈) melalui reaksi dehidrasi merupakan sistem reaksi kompleks dengan melibatkan 10 reaksi seperti yang telah ditampilkan sebelumnya. Berdasarkan analisis dari aspek sifat termodinamika, untuk mengarahkan reaksi membentuk produk senyawa butena (butilena) dapat dipilih suhu reaksi lebih tinggi dari 400 °C. Untuk membantu kecepatan reaksi diperlukan katalis padat yang bersifat asam, karena reaksi membutuhkan proton. Zeolit dapat menjadi pilihan yang baik. Telah disintesis berbagai macam katalis berbasis zeolit (Zeolit A, Analsim C, ZSM-5, Zeolit Y, Zeolit X, dan MCM-22) serta seleksi berbagai katalis zeolit hasil sintesis, zeolit dari bahan alam, dan zeolit komersial untuk mendapatkan katalis terbaik (yaitu yang menghasilkan konversi dan selektivitas terbaik. Struktur, ukuran pori, dan tipe pori zeolit yang digunakan disajikan pada Tabel 3. Zeolit alam yang di uji aktivitasnya berasal dari Malang Selatan (jenis zeolit utama mordenit) dan dari Bayah, Sukabumi (jenis zeolit utama klinoptilolit).

Dari hasil seleksi katalis zeolit tersebut, dapat disimpulkan bahwa analsim dan zeolit A adalah katalis terbaik untuk mendehidrasi *n*-butanol menjadi 1-butena dengan konversi hampir 100 % dan selektivitas sekitar 95 %. Zeolit-Y terbaik untuk mendapatkan produk isobutena/isobutilen cukup tinggi karena memiliki diameter pori besar, walaupun belum dapat menyeleksi dengan target selektivitas maksimum.



Gambar 12 Contoh skema salah satu rangkaian alat *screening* aktivitas katalis di lab TRK – ITB

Tabel 3 Perbandingan zeolit yang diuji terhadap dehidrasi n-butanol

Zeolit	Kode Struktur (IZA)	Ukuran Pori (Å)	Tipe Pori	Arah Kanal	Keterangan Utama
Zeolit sintetis					
Analcime	ANA	2,6–3,0	Very small pore	3D	Zeolit alami, tidak cocok untuk molekul organik
Zeolit A	LTA	3,0 – 5,0	Small pore	3D	Untuk seleksi molekul kecil
ZSM-5	MFI	5,4–5,6 (lurus) 5,1–5,5 (zig-zag)	Medium pore (10 MR)	3D	Selektif untuk molekul kecil–sedang, sangat stabil
MCM-22	MWW	5,5 (in-plane) 7,2 (cavity)	Medium pore	2D + supercage	Zeolit multi-layer dengan situs asam internal
Zeolit Y	FAU	7,4–7,6	Large pore (12MR)	3D	Digunakan dalam FCC dan cracking hidrokarbon
Zeolit X	FAU	7,4–7,6	Large pore (12-MR)	3D	Mirip Zeolit Y, tapi lebih terbuka dan reaktif
Zeolit Alam dengan komponen utama:					
Mordenit	MOR	6,5–7,0 (utama) 2,6 (minor)	Large pore (1D)	1D	Saluran linear besar, tetapi difusi terbatas
Klinoptilolit	HEU	3,1 × 7,6	Medium-small pore	3D	Zeolit alam, unggul dalam pertukaran ion & lingkungan

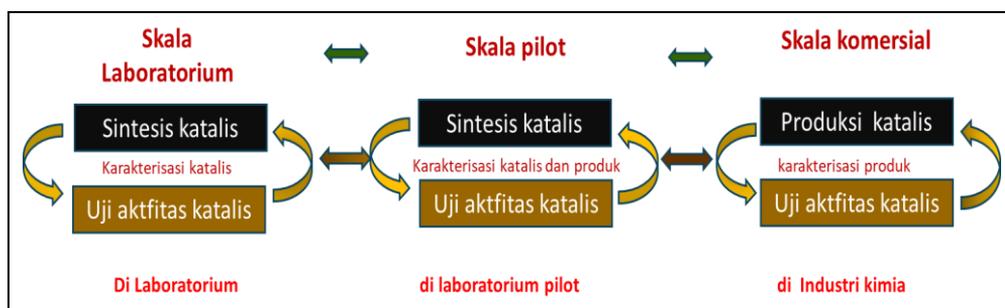
Karena terjadi reaksi samping sehingga terbentuk kokas, maka jumlah kokas yang terbentuk bergantung dari waktu /lama pemakaian katalis (TOS = *Time on stream*), temperatur reaksi, dan waktu ruang, atau *space velocity* proses. Contoh pemodelan pembentukan kokas yang terjadi pada proses konversi n-butanol menjadi isobutena pada katalis padat alumina dapat dilihat pada Gambar 8.

7.3 Pengembangan Katalis Merah Putih

Katalis Merah-Putih adalah nama yang diberikan khusus untuk katalis-katalis yang diawali dengan penelitian dari skala kecil di laboratorium, di Indonesia sekitar 3–20 gram sekali buat (3 - 20 gram per *batch*), kemudian dikembangkan ke skala pilot (1–50 kg per batch), dan sampai berhasil diproduksi di pabrik katalis (lebih besar dari 200 kg per batch) di Indonesia dengan lisensi sendiri dan dipakai oleh Industri. Katalis Merah-Putih merupakan inovasi anak

bangsa dalam menjawab tantangan industri untuk mampu menyediakan katalis bagi industri dalam negeri.

Laboratorium Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis, program studi Teknik Kimia - Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung (ITB) dan juga Pusat Rekayasa Katalisis (PRK) – ITB telah memulai penelitian dan pengembangan katalis sudah sejak lama (sekitar 40 tahun-an). Sampai saat ini telah dikembangkan lebih dari tujuh katalis. Penelitian dan pengembangan katalis masih terus berlanjut. Skema pengembangan dapat digambarkan seperti tersaji pada Gambar 13.



Gambar 13 Skema pengembangan KATALIS dari laboratorium sampai komersial

Pengembangan katalis untuk aplikasi industri merupakan proses bertahap yang mencakup kegiatan sintesis, karakterisasi, dan uji performa katalis secara sistematis pada berbagai skala. Tahapan ini dimulai dari skala laboratorium, dilanjutkan ke skala pilot, dan pada akhirnya diimplementasikan dalam skala komersial di industri kimia.

Pada tahap skala laboratorium, katalis disintesis dalam jumlah kecil menggunakan metode yang memungkinkan kontrol presisi terhadap komposisi, struktur, dan morfologi material aktif. Sintesis ini diikuti dengan karakterisasi katalis menggunakan teknik spektroskopi, mikroskopi, dan adsorpsi fisis atau kimia untuk mengetahui sifat fisis-kimia seperti luas permukaan, ukuran pori, dan tingkat dispersi logam. Katalis yang telah dikembangkan kemudian diuji aktivitasnya di reaktor kecil (misalnya reaktor batch atau *fixed-bed reactor* berkapasitas 20–100 mL) untuk mengevaluasi selektivitas dan konversi terhadap target.



Gambar 14 Pabrik katalis pendidikan kapasitas 1-5 kg/batch di lab Pilot Teknik Kimia – FTI kampus ITB

Jika hasil laboratorium menunjukkan performa yang menjanjikan, maka katalis tersebut diuji lebih lanjut pada skala pilot. Dalam tahap ini, sintesis dilakukan dalam skala menengah, dan pengujian dilakukan dalam reaktor pilot yang memiliki volume lebih besar (misalnya: 200 mL – 1000 L), dengan kondisi operasi yang lebih mendekati sistem industri sebenarnya. Evaluasi performa pada skala ini bertujuan untuk menilai kestabilan katalis, regenerabilitas, dan efisiensi proses secara keseluruhan.

Setelah melalui validasi teknis dan ekonomis, katalis dapat diproduksi dan digunakan secara luas dalam reaktor skala industri (komersial), seperti reaktor dengan kapasitas 6 m³ hingga 24 m³ atau lebih, tergantung pada proses yang diterapkan. Dalam tahap ini, karakterisasi produk juga dilakukan untuk menjamin bahwa spesifikasi produk akhir memenuhi standar industri.

Dengan demikian, proses pengembangan katalis menuntut pendekatan multidisipliner yang melibatkan ilmu material, teknik kimia, serta rekayasa proses, untuk menjamin bahwa katalis yang dikembangkan tidak hanya aktif dan selektif, tetapi juga stabil, ekonomis, dan layak diterapkan pada skala besar.

7.4 Katalis Hidrotreating Nafta dan Diesel

Minyak bumi mentah merupakan campuran kompleks hidrokarbon yang tidak dapat langsung digunakan tanpa melalui proses pemurnian dan konversi di kilang minyak. Proses pengolahan ini dikenal sebagai pengilangan minyak bumi, yang bertujuan untuk menghasilkan berbagai macam produk bahan bakar seperti bensin (*gasoline*), diesel, kerosin, LPG, serta produk non-bahan bakar seperti pelumas dan aspal (Speight, 2014).

Langkah pertama dalam pengolahan minyak bumi adalah distilasi atmosferik, di mana minyak mentah dipisahkan secara fisik berdasarkan titik didihnya menjadi fraksi-fraksi seperti gas ringan, nafta, kerosin, *gas oil*, dan residu. Fraksi-fraksi ini kemudian diproses lebih lanjut melalui unit-unit konversi dan pemurnian, sehingga bisa menjadi produk yang memenuhi syarat produk yang dapat dipasarkan dan digunakan oleh konsumen. Nafta memiliki nilai oktan yang masih rendah yaitu sekitar 70, sementara produk bensin/gasolin yang diminta pasar/konsumen adalah memiliki nilai oktan 90 – 98.

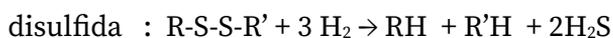
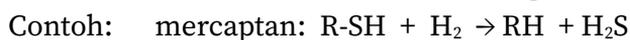
Untuk mengonversi nafta menjadi produk bernilai oktan tinggi diperlukan proses reformasi dengan katalis berbasis Pt (Platina) yang tak tahan terhadap sulfur. Oleh sebab itu sebelum memasuki reformer nafta diolah di dalam unit proses hidrotreating untuk menyingkirkan sulfur, nitrogen, dan oksigen dari senyawa-senyawa organik sulfur, organik nitrogen dan senyawa oksigenat melalui reaksi hidrogenasi. Proses NHT (*Naphta Hydrotreating*) dilakukan dalam reaktor unggun tetap yang dioperasikan pada tekanan tinggi (30–80 bar) dan temperatur menengah (290–380 °C), dengan aliran gas hidrogen secara *co-current*. Dalam sistem ini, umpan naphtha dicampur dengan gas hidrogen dan dialirkan ke dalam reaktor yang berisi katalis berbasis logam transisi. Untuk proses ini telah berhasil dikembangkan katalis Ni-Mo/ γ -alumina yang diberi nama **PITN (Pertamina - ITB Treating Nafta)**, hasil kerja sama penelitian dan pengembangan antara Pertamina dan ITB, dengan keaktifan setara dengan katalis komersial impor, yaitu kadar sulfur turun drastis. Sehingga aman digunakan dalam proses *reforming/reformasi*, selain itu, juga menurunkan kandungan olefin dan aromatik ringan yang dapat menurunkan stabilitas produk serta meningkatkan kecenderungan pembentukan gum. **PITN merupakan Katalis Merah-Putih pertama (2011)**, yang diproduksi dan dipakai di kilang Pertamina dengan nama pasar/komersial PK-100.

Efektivitas NHT bergantung pada karakteristik umpan, rasio hidrogen terhadap hidrokarbon, waktu tinggal, dan aktivitas katalis. Seiring berkembangnya regulasi lingkungan seperti Euro V dan VI, proses NHT terus dikembangkan untuk mencapai efisiensi penghilangan sulfur yang lebih tinggi, termasuk melalui teknologi *ultra-low sulfur naphtha production*.

Setelah itu berhasil dikembangkan katalis untuk memproses fraksi Diesel, **PITD (Pertamina-ITB Treating Diesel)** (2014), yang dapat menurunkan kadar sulfur dengan baik, sehingga solar/diesel yang dihasilkan memenuhi standar pasar. Kedua katalis tersebut (PITN dan PITD) telah diproduksi dan dipakai di reaktor-reaktor di Kilang Pertamina hingga mencapai lebih dari 200 ton (2018). Hidrotreating untuk fraksi minyak bumi, residu lebih sulit, karena residu lebih banyak mengandung senyawa organometalik, dengan logam yang banyak dijumpai besi (Fe), Nikel (Ni), dan Vanadium (V).

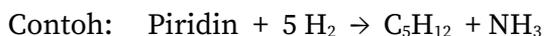
Reaksi yang terjadi pada proses hidrotreating adalah:

(1) Hidrodesulfurisasi (HDS): (Sulfur disingkirkan menjadi gas H₂S)



(*R = alkil, C_nH_{2n}; n = jumlah atom C yang berikatan*)

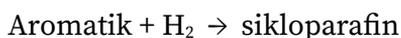
(2) Hidrodenitrogenasi (HDN): (Nitrogen disingkirkan menjadi gas NH₃)



(3) Hidrodeoksigenasi (HDO): (oksigen disingkirkan menjadi air/H₂O)



(4) Hidrogenasi: penjenuhan senyawa berikatan rangkap jadi ikatan tunggal



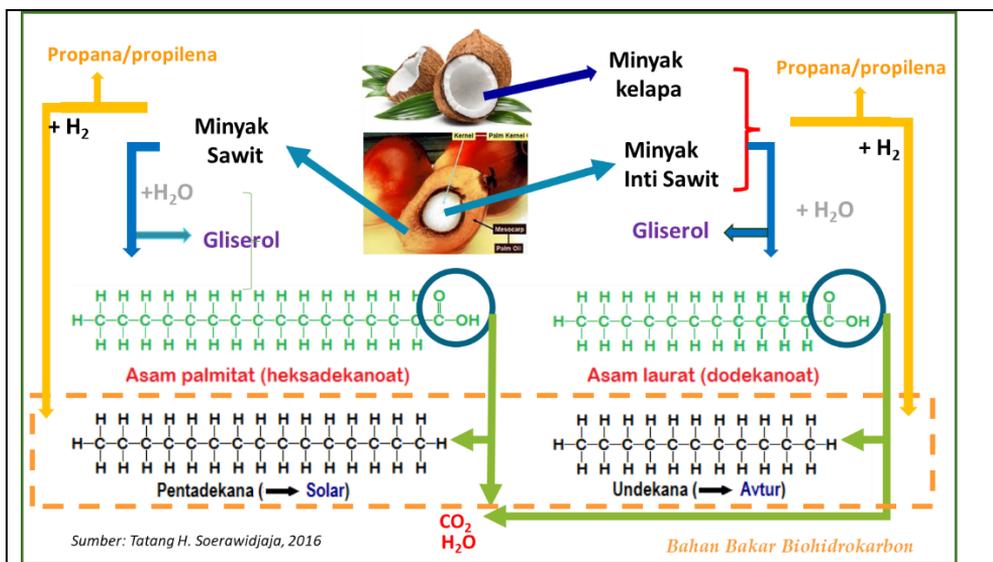
(5) Hidrodemetalisasi (HDM)

7.5 Katalis-katalis Bio-fuel (Bahan Bakar Nabati)

Indonesia kaya akan tanaman penghasil minyak nabati, di antaranya kelapa, sawit, pongam, jarak pagar, kepok, kapok, kemiri sunan, dan lain-lain. Minyak adalah senyawa trigliserida, yang jika dihidrolisis akan menghasilkan asam lemak dan gliserol. Asam lemak adalah pasangan homolog dari alkana/parafin, yaitu memiliki jumlah atom C sama, tetapi asam lemak memiliki gugus karboksilat (-COOH). Jika asam lemak direaksikan dengan gas hidrogen, maka gugus fungsi akan putus menghasilkan senyawa hidrokarbon dan produk samping gas CO₂ (proses hidrokarboksilasi) dan atau air, H₂O (proses hidrodeoksigenasi). Dengan **katalis yang tepat**, minyak sawit bisa

terhidrogenasi langsung menghasilkan senyawa hidrokarbon dan produk samping propana/propilen, CO₂, dan atau air. Jika yang diolah minyak sawit (30-48% palmitin dan 38-44% olein), akan dihasilkan senyawa parafin dengan kandung utama C₁₅H₃₂, C₁₆H₃₄, C₁₇H₃₆, dan C₁₈H₃₈, sama dengan fraksi solar/diesel dari minyak bumi. Jika yang diolah minyak inti sawit (40-52% laurin, 14-18% miristin), atau minyak kelapa (43-53% laurin, 15-21% miristin) akan menghasilkan senyawa hidrokarbon C₁₁H₂₄ – C₁₄H₃₀, sama dengan fraksi kerosin/avtur dari minyak bumi.

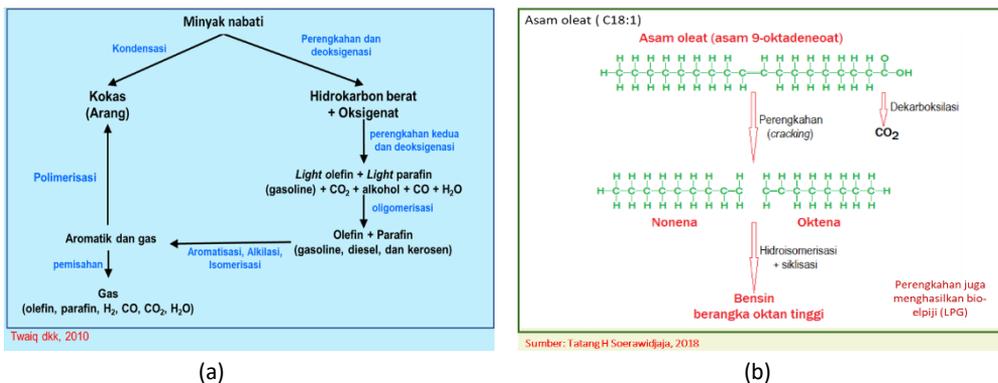
RTI (*Research and Technology Innovation*) PT Pertamina bekerja sama dengan Lab Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis (Pusat Rekayasa Katalisis) ITB telah berhasil mengembangkan katalis yang tepat untuk proses hidrodekarboksilasi dan diuji performanya di reaktor komersial di Kilang Minyak bumi (Refinery Unit, RU II) Pertamina, Dumai pada tahun **2014**. Katalis dinamakan **PIDO (Pertamina -ITB hidrodeoksigenasi) G1**. Produk samping dari reaksi sebagian besar CO₂, karena lebih mengakomodasi proses hidrodekarboksilasi. Pada tahun 2019 – 2020 telah diuji performa **PIDO** generasi 2 (**G2**) di reaktor yang sama, yaitu di RU II Pertamina Dumai. Katalis ini mengarahkan reaksi via hidrodeoksigenasi dan memberikan kinerja yang sangat bagus, baik menggunakan mode **co-processing (2019)** maupun mode **stand alone (2020)**.



Gambar 15 Strategi mengkonversi asam lemak dari minyak nabati menjadi bahan bakar biohidrokarbon ditinjau dari rumus kimianya (Sumber: Soerawidjaja, 2023)

Uji performa selanjutnya di Refinery Unit /RU IV, Pertamina, Cilacap untuk mengolah minyak inti sawit pada awal tahun **2021** untuk mode **co-processing 2,4%** minyak inti sawit dan 97,6% minyak fosil. Produk dikenal dengan nama J2.4 (Jet fuel dengan 2,4% bioavtur) dan telah dipakai pada uji terbang menggunakan pesawat CN-235 milik TNI Angkatan Udara, produksi PT Dirgantara Indonesia pada tahun 2021.

Minyak nabati dapat dijadikan sumber senyawa-senyawa biohidrokarbon melalui jalur reaksi perengkahan, deoksigenasi, polimerisasi, isomerisasi dan lain-lain seperti disajikan pada Gambar 16. Untuk tujuan ini perlu katalis yang aktif dan selektif untuk menuju/mengarahkan reaksi konversi ke produk tertentu dengan kondisi operasi yang tepat.

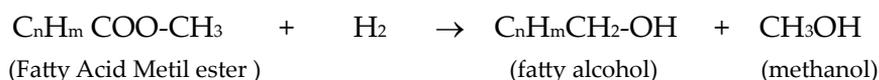


Gambar 16 (a) Skema konversi minyak nabati menjadi produk biohidrokarbon melalui jalur termokatalitik dan (b) konsep mekanisme pembentukan bensin biohidrokarbon dari asam oleat hasil hidrolisis minyak nabati, olein melalui proses perengkahan, dekarboksilasi, isomerisasi (Twaiq, 2010; Tatang H.Soerawidjaja, 2023)

Melalui kerja sama pendanaan penelitian dari BPDP (Badan Pengelola Dana Perkebunan) Kelapa Sawit tahun 2017- 2025, Pusat Rekayasa Katalisis – ITB telah berhasil mengembangkan katalis yang selektif terhadap fraksi bahan bakar nabati, bensin/biogasolin melalui jalur reaksi seperti disajikan pada Gambar 16 (a). Proses di atas belum tersedia teknologi konversinya, maka peluang yang ada disambut dengan baik untuk mengembangkan dan mendapatkan Teknologi Proses Merah-Putih konversi Minyak Nabati menjadi bio-gasolin/bensin. Katalis Merah-Putih yang berhasil dikembangkan sampai saat ini diberi kode nama **BIPN** (BPDP-ITB Perengkahan Nabati).

7.6 Katalis-Katalis Oleokimia

Industri oleokimia, merupakan industri berbasis bahan nabati, sehingga sangat cocok buat Indonesia. Telah dikembangkan 2 jenis katalis berbasis tembaga yang diperlukan oleh industri ini, khususnya yang membantu mengonversikan ester lemak menjadi alkohol lemak melalui reaksi hidrogenasi. Di dalam industri oleokimia proses konversi ini dapat diselenggarakan dalam kondisi tekanan tinggi (tekanan 200–300 bar dan temperature 180–250 °C), fasa cair dan tekanan rendah (tekanan 40–60 bar dan temperature 180–250 °C), fasa gas. Pengembangan katalis ini mengikuti pola/skema seperti yang ditampilkan pada Gambar 13. Reaksi katalitik oleokimia yang terjadi adalah:



Katalis yang dikembangkan diberi nama/kode **HIK@T - 100** (untuk tekanan tinggi) dan **HIK@T-200** (untuk tekanan rendah) dan sudah dapat diproduksi oleh PT Katalis Sinergi Indonesia dan dikomersialkan dengan nama **ME-KAT-100** dan **ME-KAT-200**.

7.7 Katalis Lainnya

Berdasarkan akumulasi pengalaman empiris dan capaian riset yang berkelanjutan, kegiatan penelitian dan pengembangan katalis menunjukkan kecenderungan peningkatan efisiensi seiring waktu. Penguasaan terhadap teknik sintesis, karakterisasi, serta pemodelan hubungan antara struktur dan aktivitas katalitik (*structure–activity relationship*) memungkinkan para peneliti untuk merancang katalis dengan pendekatan yang lebih sistematis dan terarah (Bartholomew & Farrauto, 2011). Dengan bertambahnya pemahaman fundamental mengenai mekanisme reaksi permukaan dan interaksi aktif situs, proses penemuan katalis berkinerja tinggi dapat diselesaikan dalam waktu yang lebih singkat dibandingkan sebelumnya.

Selain itu, adanya integrasi teknologi analitik dan peralatan laboratorium berpresisi tinggi telah mempercepat proses seleksi (*screening*) awal dan validasi performa katalis, baik pada skala laboratorium maupun semi-pilot. Pengalaman kolektif yang diperoleh dari berbagai proyek penelitian juga berkontribusi terhadap akselerasi transisi katalis dari tahap konseptual ke

skala komersial, memperpendek waktu pengembangan teknologi dan meningkatkan peluang keberhasilan adopsi industri. Dengan demikian, kematangan kapasitas riset dalam bidang katalisis telah menjadi faktor kunci dalam mempercepat inovasi dan hilirisasi teknologi katalitik.



Gambar 17 Katalis dan Adsorben “Merah-Putih” hasil pengembangan ITB bersama mitra yang siap dan telah dipakai oleh Industri Kimia di Indonesia

7.8 Pabrik Katalis Merah-Putih Pertama

Untuk mendukung sebagai bagian dari upaya strategis untuk mewujudkan kemandirian industri nasional dalam teknologi proses dan katalisis, Indonesia telah mendirikan **pabrik katalis nasional pertama** melalui pembentukan entitas usaha bersama (*Joint Venture Company* – **JVC**) bernama **PT Katalis Sinergi Indonesia (PT KSI)**. Perusahaan ini resmi berdiri pada tanggal 30 Desember 2020, sebagai hasil sinergi tiga pihak: PT Pertamina Lubricants (38%), PT Pupuk Kujang (37%), dan PT Rekacipta Inovasi ITB (25%), dengan dukungan penuh sebagai **PSN (Projek Strategis Nasional)** di bawah pengawasan **Kementerian ESDM** (Energi dan Sumber Daya Mineral) dari kebijakan pemerintah sebagaimana tertuang dalam Peraturan Presiden No. 109 Tahun 2020, yang selaras dengan Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2020–2024.

Pabrik katalis pertama di Indonesia ini merupakan hasil rancangan anak bangsa, bukan lisensi teknologi dari luar, dikonstruksi dan dibangun di tanah air. PT KSI berlokasi di kawasan industri PT Pupuk Kujang, Cikampek, Jawa Barat, dan memiliki kapasitas produksi katalis sebesar 600-800 ton per tahun.

Kehadiran pabrik ini menandai tonggak penting dalam sejarah pengembangan katalis dalam negeri, karena sebelumnya hampir seluruh kebutuhan katalis industri pengolahan minyak dan petrokimia dipenuhi melalui impor. Dengan demikian formula dan prosedur sintesis katalis hasil penelitian dan pengembangan para peneliti dan akademisi dapat diproduksi di pabrik Katalis Nasional ini, asalkan siap dipakai di industri kimia, petrokimia, oleokimia, atau industri energi.

Pada tahap awal operasional, PT KSI yang selesai dibangun pada November 2023 telah berhasil melakukan pengiriman perdana katalis ke Kilang RU V Balikpapan sebesar 11 ton pada November 2023, dan pengiriman lanjutan ke PT Pupuk Kaltim sebesar 14 ton pada Mei 2024. Keberhasilan ini menunjukkan bahwa teknologi katalis nasional tidak hanya telah mampu menjawab tantangan kualitas dan performa, tetapi juga telah siap untuk melayani kebutuhan industri skala besar.



Gambar 18 Pabrik Katalis Merah-Putih Pertama, PT Katalis Sinergi Indonesia berlokasi di Cikampek, Jawa Barat, Indonesia

Melalui penguatan kolaborasi riset antara akademisi, BUMN, dan industri, PT KSI menjadi simbol nyata transformasi pengetahuan menjadi inovasi industri. Pabrik ini tidak hanya berfungsi sebagai pusat produksi, tetapi juga sebagai simpul strategis dalam ekosistem hilirisasi riset nasional di bidang katalisis.

8 PENUTUP

Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis merupakan bidang strategis yang menjadi tulang punggung berbagai proses industri, mulai dari petrokimia hingga energi terbarukan. katalis impor. Di Indonesia, pertumbuhan industri kimia selama ini sebagian besar bergantung pada adopsi lisensi teknologi dari luar negeri, termasuk dalam produksi biofuel berbasis sumber daya alam seperti kelapa sawit. Salah satu contohnya adalah industri biodiesel nasional yang masih sangat bergantung pada katalis impor, baik dari sisi bahan baku maupun proses sintesisnya.

Kemandirian dalam teknologi proses kimia tidak mungkin dicapai tanpa penguasaan teknologi katalisis yang sesuai dengan karakteristik sumber daya lokal. Oleh karena itu, investasi dalam riset, pengembangan, dan hilirisasi katalis dalam negeri menjadi langkah strategis untuk mengubah Indonesia dari sekadar negara kaya sumber daya menjadi bangsa yang unggul dalam pemanfaatannya—secara berkelanjutan dan bernilai tambah tinggi. Penerapan katalis berbasis material lokal, dengan proses sintesis yang efisien dan rendah energi, merupakan kontribusi nyata ilmu teknik kimia dalam mendukung pembangunan rendah karbon dan industri berwawasan lingkungan.

Sinergi antara kebijakan yang mendukung riset dan hilirisasi dengan pengembangan teknologi yang menjawab tantangan keekonomian dan keberlanjutan akan mengubah transisi menuju industri energi hijau dari sekadar wacana menjadi agenda ilmiah dan kebijakan yang sistematis dan strategis. Momentum ini harus dimanfaatkan sebagai pijakan untuk membangun ekosistem inovasi yang berpihak pada kekuatan lokal dan pengetahuan nasional.

Perjalanan Katalis Merah-Putih menjadi bukti konkret bahwa sinergi antara ilmu pengetahuan, pengalaman industri, dan semangat kebangsaan dapat melahirkan solusi teknologi yang berdampak nyata. Katalis hasil karya anak bangsa, yang dikembangkan di laboratorium dalam negeri, telah terbukti mampu menggantikan produk impor dan memperkuat transformasi industri nasional menuju kemandirian dan keberlanjutan.

Inisiatif ini bukan sekadar capaian teknis, tetapi juga representasi dari keberanian membangun ekosistem inovasi yang berakar pada kekuatan lokal

dan keunggulan ilmiah. Tantangan ke depan tentu tidak ringan, namun komitmen terhadap riset berkelanjutan, kolaborasi lintas sektor, serta kebijakan yang berpihak pada inovasi akan menjadi kunci menjadikan *Katalis Merah-Putih* sebagai fondasi teknologi proses industri nasional.

Dengan semangat keilmuan dan nasionalisme, katalis buatan dalam negeri tidak hanya menjadi simbol kemandirian, tetapi juga motor penggerak pertumbuhan industri berbasis inovasi. Kehadiran PT Katalis Sinergi Indonesia merupakan contoh nyata keberhasilan hilirisasi teknologi yang menggabungkan kekuatan akademisi, industri, dan pemerintah dalam kerangka triple helix (ABG). Inisiatif ini sejalan dengan visi besar Asta Cita yang menempatkan kemandirian energi dan ketahanan pangan sebagai pilar utama pembangunan nasional berbasis inovasi.

Kini saatnya Indonesia berdaulat dalam teknologi katalis dan katalisis. Inilah waktunya mengukuhkan peran ilmu pengetahuan sebagai penggerak kemandirian dan kemajuan industri bangsa. Dengan semangat kolektif, mari kita lanjutkan perjalanan ini—membangun masa depan industri Indonesia yang berdiri di atas fondasi ilmu dan inovasi anak negeri.

9 UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji dan syukur saya panjatkan kepada **Tuhan Yesus Kristus**, Sang Sumber Hikmat dan Kasih Karunia, yang telah memimpin dan menyertai setiap langkah hidup, akademik, dan profesi saya hingga mencapai titik ini. Pencapaian ini bukan semata hasil kerja keras, tetapi anugerah Tuhan yang menopang saya dalam setiap tantangan dan kesempatan yang Ia percayakan, termasuk amanah sebagai Guru Besar di Program Studi Teknik Kimia, FTI-ITB.

Saya mempersembahkan terima kasih yang mendalam kepada papa Djunaedi Gunawan (alm.) dan mama Tini Haryani (almh.), yang telah membentuk saya dengan kasih, keteladanan, dan nilai-nilai hidup yang menjadi fondasi perjalanan ini.

Kepada suami saya tercinta, Dr. Totoh (Hermanto) Buchori, S.H., M.H., M.M., M.BA., terima kasih atas cinta, dukungan, dan kesabaranmu yang tak ternilai. Engkaulah teman seperjalanan yang setia, yang selalu menopang saya dalam segala situasi Untuk anak-anak tercinta, Tineke Tresnaputri Hermanto (Ike) dan Terryana Tresnaputri Hermanto (Erin), serta menantu yang saya kasih Randy Ferdian Rusandi, terima kasih atas sukacita dan semangat yang selalu kalian bawa. Doa saya selalu menyertai kalian, agar tetap berjalan dalam kasih, pengharapan, dan keberanian dari Tuhan.

Ucapan terima kasih yang hangat saya sampaikan kepada adik-adik saya tercinta: Ir. Suhendar Gunawan, M.M.; Melia Linawati Gunawan, S.E; Ir. Suherman Gunawan, M.M.; dan Judi Gunawan, S.T. Terima kasih atas doa, dukungan, dan kebersamaan kalian yang begitu berarti. Saya juga bersyukur atas kehadiran adik ipar, kakak ipar, para keponakan, sepupu, om dan tante, yang senantiasa memberi kehangatan dalam keluarga besar.

Secara khusus, saya mengenang dengan kasih Bude saya, Ibu Kinarti (alm.), serta Paman dan Tante (Iin Solihin dan istri), yang telah menjadi sosok penting dalam mendampingi dan mendukung kami sejak kecil, hingga kami dapat menyelesaikan pendidikan dengan baik.—sebuah warisan cinta yang tak ternilai.

Dengan kerendahan hati, saya ingin menyampaikan ungkapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Pimpinan Institut Teknologi Bandung, Senat Akademik ITB, pimpinan dan anggota Forum Guru besar ITB yang telah memberikan kesempatan kepada saya untuk menyampaikan orasi ilmiah pada forum yang sangat terhormat ini.
2. Dekan FTI, Prof. Tirto Prakoso, Wakil dekan akademik, Iwan Prasetyo, dan secara khusus Wakil Dekan bidang sumber daya Prof. Ari Widnyanti yang telah mendukung, membantu, dan mengawal proses pengusulan guru besar saya dari awal di ITB sampai akhir.
3. Prof. Brian Yulianto dan Prof. Yogi Wibisono Budhi, Dekan dan wakil dekan bidang akademik FTI periode 2020-2025 yang memberi perhatian dan dukungan penuh dalam kenaikan jabatan saya ini.
4. Ketua dan anggota tim TPAK serta Ketua Senat dan anggota Senat FTI – ITB.
5. Para Profesor dari berbagai institusi yang telah memberikan rekomendasi kepada saya, Prof. IGBN Makertihartha dan Prof. Yazid Bindar (TK-FTI-ITB), Prof. Deddy Kurniadi (TF-FTI-ITB), Prof. Kadarsah Suryadi (TI-FTI-ITB), Prof. Husaini Ardy (FTMD-ITB), Prof. Taufan Marhaendrayana (FTTM-ITB), Prof. Setijo Bismo (FT-UI), Prof. Udin Hasanudin (Universitas Lampung), Prof. Sibujung Kawi (Nasional University of Singapore).
6. Prof. Subagjo, senior, guru, mentor, dan pembimbing saya baik saat studi S-1, S-2, dan S-3, juga yang mengajarkan banyak hal untuk menjadi guru/dosen dan peneliti yang baik dan mengajak saya terjun ke dunia perkatalisan, proses kimia di industri, dan menjadi peneliti serta pengembang Katalis Merah-Putih sejak tahun 2000-an.
7. Prof. Sudarno Harjosuparto (alm), Dr. Tatang Hernas Soerawidjaja, Dr. Irwan Noezar, para guru dan pembimbing saya baik saat studi S-1, S-2, dan S-3 serta sejak saat sebagai calon dosen muda sampai saat ini dalam meniti karier sebagai dosen dan peneliti.
8. Prof. Danu Ariono, Prof. Dwiwahyu Sasongko, Prof. Sanggono Adisasmito, guru, mentor, dan rekan sejawat, yang telah memberikan kepercayaan kepada saya dan mengajak saya berani memasuki dunia pengembangan institusi melalui manajemen akademik di Jurusan/Departemen Teknik Kimia dan Fakultas Teknologi Industri – ITB.
9. Prof. I Gede Wenten, rekan sejawat yang telah memberikan perhatian, dorongan, dan dukungan besar hingga saya mencapai jabatan saat ini.

10. Dr.V.S. Praptowidodo (wali akademik), Prof. Liliasari, Prof. Nuryani Yogipranata, dan Prof. Eddi Suwono para guru dan wali kelas saat menempuh pendidikan S1 dan SMA yang sangat menginspirasi.
11. Para Guru besar di komunitas Teknik Kimia, Prof. Saswinadi Sasmojo, Prof. Herri Susanto, Prof. Tjandra Setiadi, Prof. Lienda Handoyo, Prof. T. Walmiki Samadhi, Prof. Ronny Purwadi, Prof. Made Ari Penia Kresnowati, Prof. Johnner Sitompul, yang selalu bersedia menjadi tempat saya bertanya, berdiskusi, dan belajar.
12. Rekan-rekan dari Pusat Rekayasa Katalisis ITB: Dr. C.B. Rasrendra, Dr. Jenny Rizkiana, Dr. Grandprix T.M. Kadja, dan Prof. IGBN Makertihartha Prof. Subagjo yang telah menjadi teman/rekan/sahabat dalam suka dan duka. juga anggota tim lainnya Dr. Haryo P Winoto, Fadhli, M.T., dan Dr. Aghietyas. yang telah sama-sama bekerja keras dalam mengembangkan kepakaran dalam bidang teknologi katalis dan katalisis di ITB.
13. Rekan-rekan sejawat KK Rekayasa Katalisis dan Sistem Pemroses – FTI-ITB.
14. Rekan-rekan sejawat, dosen komunitas Teknik Kimia – FTI – ITB yang selalu memberi kebersamaan yang menyenangkan dan membahagiakan, terutama saat persiapan perform untuk ChE night, dan “ngeduren”.
15. Prof. Mindriany Syafila, Prof. Pingkan Adityawati, dan Prof. Dea Indriani yang senantiasa memberi semangat dan bantuan saat saya menghadapi kesulitan dalam proses pengajuan Guru Besar.
16. Bapak Ady Nugroho Putro, Kasubag kepegawaian FTI beserta para tenaga kependidikan kantor FTI, Para tenaga Kependidikan Prodi Teknik Kimia, Prodi Teknik Pangan, dan Prodi Teknik Bioenergi dan Kemurgi – FTI-ITB.
17. Rekan-rekan dan sahabat-sahabat Tim Peneliti Propelan Merah Putih: Prof. Husaini Ardy, Dr. Mardiyati, Dr. Steven, Prof.Tata Dirgantara, Dr. Panji Prawisudha, Dr C. B. Rasrendra, Dr. Haryo P.W., Dr. Anita Kusumawardani, Dr. Lenny., Dr. Parnoto, Dr. Didin Wahyudin, Dr. Dicky,dan para asisten yang selalu bersemangat dalam menciptakan suasana kerja sama yang menyenangkan walau tidak mudah.
18. Para Asisten peneliti, teknisi, dan mahasiswa serta alumni lab Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis -FTI – ITB.
19. Rekan-rekan Alumni TK-79, Laskar ITB-79, Ketua dan anggota Alumni Teknik Kimia – ITB, Pengurus Yayasan Alumni TK-ITB, Alumni PSM-ITB, PSD-ITB, Ex-anggota BANDOS Band – ITB di bawah pimpinan Prof. Ofyar Tamim (alm), Ex-instruktur training motivasi TPB – ITB, dan keluarga

- besar Oikumene-ITB, yang telah memberikan pertemanan dan persaudaraan yang membuat kehidupan saya menjadi lebih “berwarna”.
20. Teman-teman Alumni SMAK Bina Bakti Bandung angkatan 79, dan alumni SMP Swadaya Bandung angkatan 75 yang selalu memberikan kegembiraan dengan cerita nostalgia saat sekolah dulu.
 21. Hamba Tuhan, Majelis Jemaat, pengurus serta anggota Paduan Suara GKIm. Hosanna – Bandung, yang telah mengajak dan menerima saya terlibat dalam pelayanan.
 22. Ir. Elvianto beserta Board of director (BOD) dan teman2 PT Katalis Sinergi Indonesia (KSI), Pak Dirwan, Pak Harris, Pak Sigit, Pak Guntur, dan para *engineer* serta staf produksi dan QC atas kerja sama yang menyenangkan.
 23. Badan Pengelola Dana Perkebunan (BPDP) Kelapa sawit, yang telah mempercayai dan memberi dukungan pendanaan penelitian sejak tahun 2017.
 24. Kementerian ESDM, serta Dirjen Energi Baru dan Terbarukan (EBTKE), Pimpinan dan staf dari PT Ecogreen Oleochemicals, PT Pertamina Persero, PT Kilang Pertamina Internasional, PT Aimotoindo Nuansa Kimia, PT Zekindo, PT Barutama Engineering, PT Pupuk Kalimantan Timur, PT Rekayasa Industri, PT Kemurgi Indonesia. PT Pupuk Kujang Cikampek, PT Pertamina Lubricant, PT Rekacipta Inovasi ITB, PT PINDAD yang selama ini selalu mendukung tim katalis ITB dalam penelitian dan pengembangan Katalis dan Teknologi Proses Merah-Putih
 25. Semua pihak yang telah mendukung perjalanan karier akademik saya, dan penyusunan buku ini, yang tak dapat saya sebutkan satu persatu. Tuhan memberkati.

Kiranya apa yang saya kerjakan ini menjadi bagian kecil dari karya Tuhan yang besar. Segala hormat dan kemuliaan hanya bagi-Nya. Dengan penuh syukur, saya mempersembahkan karya ini untuk Tuhan, Bangsa, dan almamater, Institut Teknologi Bandung.

DAFTAR PUSTAKA

- Baerlocher, C., McCusker, L.B., Olson, D.H. (2007). *Atlas of Zeolite Framework Types* (6th ed.). Elsevier
- Bartholomew, C. H., & Farrauto, R. J. (2011). *Fundamentals of Industrial Catalytic Processes* (2nd ed.). Wiley.
- Corma, A. (1997). From microporous to mesoporous molecular sieve materials and their use in catalysis. *Chemical Reviews*, 97(6), 2373–2419.
- Cornils, B., & Herrmann, W. A. (2003). *Applied Homogeneous Catalysis with Organometallic Compounds* (2nd ed.). Wiley-VCH.
- Costas, M., Mehn, M. P., Jensen, M. P., & Que, L. (2004). Dioxygen activation at mononuclear nonheme iron active sites: Enzymes, models, and intermediates. *Chemical Reviews*, 104(2), 939–986. <https://doi.org/10.1021/cr020628n>
- Fogler, H. S. (2016). *Elements of Chemical Reaction Engineering* (5th ed.). Pearson Education.
- Froment, G.F., and Bischoff, K.B., “*Chemical Reactor Analysis and Design*”, (1990)., ed. 2 nd ed.), Wiley Series in Chemical engineering,
- Fukuzumi, S., Lee, Yong-Min, Nam, Wonwoo, (2024) “Functional Molecular Models of Photosynthesis”, *i-Science* 27 (9), 110694, Open Access article, <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.110694>
- Haynes, A., et al. (2002). Mechanisms of the Monsanto Acetic Acid Process. *Chemical Reviews*, 102(3), 935–994.
- Hessel., V. and Lowe, H. (2005), review: Organic Synthesis with Microstructured Reactors”, *Chemical engineering Technology*, Vol 28, issue 3, Special Issue: Microreactor Process Design (part 1), Wiley, <https://doi.org/10.1002/ceat.200407167>
- Himiyama, T., and Okamoto, Y., (2020) “Artificial Metalloenzymes: From Selective Chemical Transformations to Biochemical Applications”, *Molecules*, 25 (13), 2989, <https://doi.org/10.3390/molecules25132989>
- Jones, S.S.J., (1996), “*Elements of Chemical Process Engineering*”, John Wiley & Sons Ltd., ISBN 0-471-96154-X, England.
- Le Page, J.F., et al, (1987) “*Applied Heterogeneous Catalysis, Design. Manufacture use of Solid Catalysts*”, Editions Technip, Paris, France.
- Levenspiel, O. (1999). *Chemical Reaction Engineering* (3rd ed.). Wiley.

- Makertihartha, IGBN., (2023), “Bahan Bakar Nabati untuk kedaulatan Energi Nasional”, *Buku Orasi Ilmiah Guru Besar -ITB*, ISBN 978-623-297-323-7, Penerbit ITB Press.
- Melia L. Gunawan, (2002), “Konversi n-Butanol menjadi Isobutilen”, *Disertasi*, Sekolah Pasca Sarjana – Institut Teknologi Bandung.
- Melia Laniwati Gunawan, Arry Susana Dewi, Fransisca Geronica, (2004), “Uji Kinerja Katalis Zeolit-Y Komersial Hasil Regenerasi Terhadap Reaksi Dehidrasi N-Butanol”, *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*, Volume 3, Nomor 1, hal 1-8,, ISSN 1693-9433.
- Melia L. Gunawan, Subagjo., IGBN Makertihartha, J. Rizkiana, “Penilaian Katalis (*Catalyst Appraisal*) PT XXX, *Laporan*, 2017, Laboratorium Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis – ITB.
- Melia Laniwati Gunawan, Subagjo, IGBN Makertihartha, Azizah Nabilah, Hanief Aulia, and Tatang H. Soerawidjaja, (2024) ” Modelling of Coke Deposition on Cracking Catalyst Base on La-Y Zeolite In N-Butanol Dehydration”, *RSCE-2024*, November 2024, Bali
- Nozaki, K. (2001). Rhodium-Catalyzed Hydroformylation of Olefins. *Chemical Reviews*, 101(5), 1479–1496.
- Rawlings, J.B., and Ekerdt, J.G. (2002), “*Chemical Reactor Analysis and Design Fundamentals*”, (2 nd ed), Nob.Hill Publishing. LLC.
- Schmidt, L.D., (1998), “*The Engineering of Chemical Reactions*”, Oxford University Press.
- Soerawidjaja, T.H., (2023), “ *Panorama teknologi produksi bahan bakar nabati*”, Program studi Teknik Kimia, FTI, Institut Teknologi Bandung.
- Speight, J. G. (2014). *The Chemistry and Technology of Petroleum*. (5th ed), CRC Press.
- Twigg, M.V., (1989), “*Catalyst Handbook*”, 2 nd ed., Wolfe Publishing Ltd., ISBN 0 7234 0857 2. England.
- Yaws, C.L., (2003), “*Yaws’ Handbook of Thermodynamic and Physical of Chemical Compounds*”, e-ISBN 978-1-59124-444-8, Publisher Knovel

CURRICULUM VITAE



Nama : Melia Laniwati Gunawan
Tempat/tgl lahir : Bandung / 06 November 1960
Kel. Keahlian : Rekayasa Katalisis dan Sistem Pemroses
Alamat Kantor : Gedung Labtek X, kampus ITB Jalan Ganesa No 10 – Bandung
Nama Suami : Totoh (Hermanto) Buchori
Nama Anak : 1. Tineke Tresnaputri Hermanto
2. Terryrna Tresnaputri Hermanto

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

1. Sarjana Teknologi Kimia, Institut Teknologi Bandung, 1984
2. Magister Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung, 1989
3. Doktor Ilmu Pengetahuan Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung, 2002
4. Insinyur, Program Studi Program Profesional Insinyur ITB, 2019

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

1. Staf Pengajar Fakultas Teknologi Industri – ITB (1986 – sekarang)
2. Kepala Laboratorium Instrumen Analisis Prodi Teknik Kimia - Fakultas Teknologi Industri – ITB (1991-2012)
3. Sekretaris Departemen Teknik Kimia - Fakultas Teknologi Industri - ITB (2004-2005)
4. Wakil Dekan Bidang Sumber Daya Fakultas Teknologi Industri – ITB (2008-2010)
5. Ketua program Studi Teknik Pangan - Fakultas Teknologi Industri - ITB (2016-2017)
6. Anggota Senat Fakultas Teknologi Industri - ITB (2019-sekarang)
7. Wakil Kepala Pusat Rekayasa Katalisis ITB (2021-2022)
8. Kepala Laboratorium Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis - Program Studi Teknik Kimia - Fakultas Teknologi Industri - ITB (2022-sekarang)
9. Kepala Pusat Rekayasa Katalisis ITB (2023 - sekarang)

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

1. Calon Pegawai Negeri Sipil, Golongan III/a (TMT:1 Maret 1987)

2. Pegawai Negeri Sipil Penata Muda, Golongan III/a (TMT: 1 Agustus 1988)
3. Penata Muda Tk I, Golongan III/b (TMT: 1 April 1992)
4. Penata, Golongan III/c (TMT: 1 Oktober 1995)
5. Penata Tk I, Golongan III/d (TMT: 1 Oktober 1999)
6. Pembina, Golongan IV/a (TMT: 1 Oktober 2006)
7. Pembina Tk I, Golongan IV/b (TMT: 1 Oktober 2008)
8. Pembina Utama Muda, Golongan IV/c (TMT: 1 Juni 2025)

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

1. Asisten Ahli Madya (TMT: 1 Juli 1989)
2. Asisten Ahli (TMT: 1 Februari 1992)
3. Lektor Muda (TMT: 1 Mei 1995)
4. Lektor Madya (TMT: 1 Agustus 1999)
5. Lektor (penyesuaian/Inpassing) (TMT: 1 Januari 2001)
6. Lektor Kepala (TMT: 1 April 2006)
7. Guru Besar (TMT: 1 Desember 2024)

V. KEGIATAN PENELITIAN

1. Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS), “Pengembangan Proses Perengkahan Katalitik Minyak Sawit untuk Produksi Bahan Bakar Nabati: Perancangan dan sintesis katalis serta proses perengkahan minyak sawit menjadi green gasoline”, sebagai Anggota Peneliti, 2017-2018
2. Kemenristek/DIKTI, Dirjen Penguatan Inovasi, “Penguatan Inovasi, Pengembangan, dan Produksi Katalis Merah-Putih”, sebagai Anggota Peneliti, 2017-2018
3. Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS), “Pengembangan Proses Perengkahan Katalitik Minyak Sawit untuk Produksi Bahan Bakar Nabati: Rancang bangun Unit pilot produksi green gasoline”, sebagai Anggota Peneliti, 2018-2019
4. PPMI-FTI-ITB, “Hidrogenasi Aldehyd tak jenuh menjadi alkohol pada katalis Berbasis Nikel”, sebagai Ketua Peneliti, 2019
5. PPMI – FTI-ITB, “Proses Sintesis Katalis Berbasis Tembaga untuk reaksi hidrogenasi”, sebagai Peneliti Utama, 2020
6. Proyek Strategis Nasional, Kemenristek/BRIN, “Pengembangan Teknologi Bahan Bakar Nabati dari Minyak Sawit dan Minyak Inti Sawit”, sebagai Anggota Peneliti, 2020-2021

7. Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS), “Inovasi lanjut Katalis dan Teknologi Merah Putih” untuk Operasi Co-Processing Produksi Bahan Bakar Nabati dari Minyak Sawit, sebagai Anggota Peneliti, 2020-2021
8. Riset Unggulan Pusat/Pusat Penelitian (RU3P), “Memperkokoh R&D dan Sinergi Pengembangan Katalis “merah-putih” untuk PT Katalis Sinergi Indonesia”, sebagai Ketua Peneliti, 2022
9. Matching Fund, PT Pertamina (Persero), “Pemantapan Formula dan Uji Coba Produksi Skala Pilot Katalis Sintesis Metanol dari Gas Sintesa”, sebagai Anggota Peneliti, 2022
10. LPDP-RISPRO, “Pengembangan Teknologi Produksi Propelan Merah-putih”, sebagai Anggota Peneliti, 2022-2024
11. Penelitian, Pengabdian Masyarakat, dan Inovasi (PPMI), “Cu/ZnO/ZSM-5 sebagai katalis Efisien pada Teknologi Konversi CO₂ mejadi metanol-multilayer Lanjutan”, sebagai Ketua Peneliti, 2023
12. Riset Unggulan Pusat/Pusat Penelitian (RU3P), “Penguatan, Pengembangan, dan Inovasi Katalis-katalis Basis Hidrogenasi sebagai Dukungan Sinergi Pusat Rekayasa Katalisis ITB dengan PT Katalis Sinergi Indonesia”, sebagai Ketua Peneliti, 2023
13. Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS), “Inovasi Lanjut Katalis & Teknologi Bensin Sawit dan Pengembangan Teknologi Produksi Percontohan Mix Industrial Vegetable Oil (MIVO) dan Minyak Makan dari Kelapa Sawit”, sebagai Anggota Peneliti, 2023-2024
14. Program Riset Unggulan Pusat dan Pusat Penelitian (RU3P), “Penguatan Pengembangan dan Inovasi Katalis-Katalis Basis Hidrogenasi sebagai Dukungan Sinergi Pusat Rekayasa Katalisis ITB dengan PT Katalis Sinergi Indonesia (lanjutan)”, sebagai ketua Peneliti, 2024.
15. Kerja sama Penelitian ITB dengan PT Pupuk Kalimantan Timur, ”Inovasi & Hilirisasi Adsorben H₂S Berbasis ZnO”, sebagai anggota peneliti, 2023-2025.
16. Badan Pengelola Dana Perkebunan (BPDP), “ Pengembangan Produksi Alkali Metoksida (Alkali Metilat) Sebagai Katalis untuk Sintesis Biodiesel”, Sebagai ketua peneliti, 2025.

VI. PUBLIKASI

JURNAL INTERNASIONAL

1. Makertihartha, I. G. B. N., Subagjo, **Gunawan, M. L.**, "Synthesis and Activity Test of Cu/ZnO/Al₂O₃ for the Methanol Steam Reforming as a Fuel Cell's", *ITB Journal of Engineering Science and Technological Sciences*, Volume 41, Number 1, pp. 37-49, **2009**, (Q4) DOI: <http://10.5614%2Fitbj.eng.sci.2009.41.1.3>, URL: <https://journals.itb.ac.id/index.php/jets/article/view/86>;
2. Rahayu, E.R., Samadhi, T.W., Subagjo., **Gunawan, M. L.**, "Development of Hydrocracking catalyst support from Kaolin of Indonesian Origin", *Advanced Materials Research*, Volume 896, pp. 532-536, **2014**, (Q4), <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.896.532>
3. Subagjo, S., Rahayu, E.S., Samadhi, T.W., **Gunawan, M. L.**, "Synthesis of NaY Zeolite using mixed Calcined Kaolins", *Journal of Engineering and Technological Sciences*, Volume 47 Issue 6, pp. 633-639, **2015**, (Q4), DOI: 10.5614/j.eng.technol.sci.2015.47.6.4, <https://journals.itb.ac.id/index.php/jets/article/view/2084>
4. Al Fatony, Z., Resha, A.H., Persada, G.P., Makertihartha, IGBN., **Gunawan, M. L.**, Subagjo, "Effect of Cu on The Modified Co-based Catalyst Activity for Fischer Tropsch Synthesis", *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, Volume 18, Number 1, pp. 60-67, **2018**, DOI: <https://doi.org/10.22146/ajche.49548>, (Q3), URL: <https://jurnal.ugm.ac.id/AJChE/article/view/49548/25545>
5. Stephanie Virgana, Harry Hans J., Iyan Wanadi G., **Melia Laniwati G.**, Subagjo, IGBN Makertihartha, "Effect of Molybdenum addition in nickel-based catalyst on hydrogenation reaction of 2-ethyl-2hexenal hydrogenation to 2-ethyl-hexanol", *International Journal of Engineering & Technology*, Volume 7, Number 4, **2018**, (Q4), DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.15319>, URL: <https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/15319>;
6. Ardy, A., Rizkiana, J., **Gunawan, M. L.**, Susanto, H., "Effect of Pressure and Syngas Composition on Direct Synthesis of Dimethyl Ether using Dual Bed Catalyst", *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, Volume 19, Number 1, **2019**, DOI: <https://doi.org/10.22146/ajche.50873>, (Q3), URL: <https://jurnal.ugm.ac.id/AJChE/article/view/50873/25927>

7. Maryani K. Wardani, Grandprix T. M. Kadja, Adroit T. N. Fajar, Subagjo, I. G. B. N. Makertihartha, **Melia L. Gunawan**, Veinardi Suendo, Rino R., "High crystalline mesoporous SSZ-13 zeolite obtained via controlled post-synthetic treatment", *RSC Advances*, 9, **2019**, p 77-86, (Q2), DOI: 10.1039/c8ra08979e, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/RA/c8ra08979e>
8. Idris, A., Khali, U., Aziz, I.A., Makertihartha, IGBN., Subagjo, **Gunawan, M. L.**, Al-Betar, A., Mukti, R.R., Muraza, O., "Fabrication Zone Of OSDA-Free and Seed-Free Mordenite Crystals", *Powder Technology*, Volume 342, pp. 992-997, **2019**, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.09.041>, (Q1), URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591018307691>
9. Makertihartha, I Gusti B.N., Kadja, Grandprix T.M., Gunawan, Melia L. **Gunawan**, Mukti, Rino R., Subagjo, "Exceptional Aromatic Distribution in the Conversion of Palm-Oil to Biohydrocarbon Using Zeolite-Based Catalyst", *Journal of Engineering and Technological Sciences*, Volume 52, Number 4, **2020**, DOI: <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2020.52.4.9> (Q3), URL: <https://journals.itb.ac.id/index.php/jets/index>;
10. Ulfah, M., Suherman, H., **Gunawan, M.L.**, Makertihartha, I.G.B.N., Subagjo, S., "Methanol dehydration to dimethyl ether over modified γ -Al₂O₃ with acid, base and zeolite (NaA and NaX)", *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, Volume 20, Issue 2, pp. 109-119, **2020**, (Q4), DOI: 10.22146/ajche.51354, URL: <https://journal.ugm.ac.id/AJChE/article/view/51354>;
11. Makertihartha, I G. B.N., Fitradi, R.B., Ramadhani, A.R., **Gunawan, M. L.**, Muraza, O., Subagjo, "Biogasoline Production from Palm oil: Optimization of Catalytic Cracking Parameters", *Arabian Journal for Science and Engineering*, Volume 45, **2020**, (Q2), <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04354-4>
12. Lestari, D., Zakaria, A., R., Setiawan, D., R., Shelly, S., **Gunawan, M. L.**, Harimawan, A., Insanu, M., Mudhakhir, D., "Hydrogenated Palm Fatty Acid Distillate as Raw Materials for Magnesium Stearate Alternatives", *Journal of Engineering and Technological Sciences*, Volume 53, Number 3, **2021**, (Q3), <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2021.53.3.3>
13. Grandprix T.M. Kadja, Moh. Mualliful Ilmi, Noerma J. Azhari, Munawar Khalil, Adroid T.N. Fajar, Subagjo, I.G.B.N. Makertihartha, **Melia L.**

- Gunawan**, Carolus B. Rasrendra, I.G. Wenten, “Recent advances on the nanoporous catalysts for the generation of renewable fuels”, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 17, pp. 3277-3336, **2022**, (Q1), <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.033>
14. Noerma J. Azhari, Denanti Erika, St Mardiana, Thalabul Ilmi, **Melia L. Gunawan**, IGBN Makertihartha, Grandprix T.M.Kadja “Methanol synthesis from CO₂: A mechanistic overview”, *Results in Engineering*, Volume 16, (2022), 16, 100711, 1-19, (Q1) ElsevierJournal homepage: www.sciencedirect.com/journal/results-in-engineering, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100711>
 15. Aisyah Ardy, Dwi Hantoko, Jenny Rizkiana, **Melia Laniwati Gunawan**, Mi Yan, Herri Susanto, “Effect of Phosphorus Impregnation on g--Al₂O₃ for methanol Dehydration to Demethyl Ether”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Published Online 31 March **2023**, Springer, (Q1), (<https://doi.org/10.1007/s13369-023-07800-1>)
 16. **Melia L. Gunawan**, Tria H. Novita, Faisal Aprialdi, Deaul Aulia, Arxhel S.F. Nanda, Carolus B. Rasrendra, Zaqiyah Addarajah, Didin Mujahidin, Grandprix T.M. Kadja, “Palm-oil transformation into green and clean biofuels: Recent advances in the zeolite-based catalytic technologies” *Bioresource Technology Reports*, Elsevier, Volume 23, September **2023**, 101546, (Q1) <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101546>
 17. **Gunawan, M.L.**, Makertihartha, I.G.B.N., Kurniawan, I.W., Japranata, H., Culsum, N.T.U., Sagita, F., Kadja, G.T., "Hydrogenation of 2-Ethyl-2-Hexenal to Alcohol over Nickel-based Catalysts: Effects of Nickel content and promoter", *Results in Chemistry*, 6, (**2023**) 101077, Elsevier, Online, 22 August 2023, (Q3) journal homepage: www.sciencedirect.com/journal/results-in-chemistry, <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.101077>
 18. **Melia L. Gunawan**, Althafa Muntaqin, Made A. Saraswati, Nadya Nurdini, Subagio, Grandprix T.M. Kadja, Carolus B. Rasrendra, "Supreme Efficacy: The ultrahigh performance of ZnO adsorbent for ambient-temperature H₂S removal in integrated H₂S–N₂ gas", *Case studies in Chemical and Environment Engineering*, Volume 9, **2024**, 100615, (Q1) <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100615>
 19. **Melia L. Gunawan**, Carolus B. Rasrendra, Zaqiyah Addarajah, Muhammad F. Suherman, Sayoga Perkasa, Grandprix T.M. Kadja, "Kinetic Study of Hydrogenation of Fatty Acid Methyl Ester into Fatty

Alcohol over Rhenium–Niobia and Rhenium–Alumina Catalysts.", *Arabian Journal for Science and Engineering*,, **2024 (Q1)**, Vol 49, issue 2, <https://doi.org/10.1007/s13369-024-08725-z>

20. **Melia Laniwati Gunawan**, Carolus Borrromeus Rasrendra, Chandra Lutfi Widikrama, Rizky Gilang Kurniawan, Lita Marina Nisa, IGBN Makertihartha, Subagio, "Investigation of the effect of silica and phosphorus content on the performance of active matrix as component of cracking catalyst", *Journal of Engineering and Technological Sciences*, Vol 56, No.2, **2024**, page 205-218, **(Q2)**, <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2024.56.2.3>
21. Farhansyah Yusuf Putra Hudaya, Rezky Oktaviandy Anggaswara, **Melia Laniwati Gunawan**, Grandprix Thomryes, IGBN Makertihartha, "Investigation on the Hydrothermal Condition in Synthesis of Active Matrix from Metakaolin: Physicochemical Properties and Intrinsic Cracking Activities", *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 19 (3), 455-469, 2024, **(Q3)**, <https://doi.org/10.9767/bcrec.20181>
22. Noerma J. Azhari, Indri R. Safira, **Melia L. Gunawan**, Carolus B. Rasrendra, IGBN. Makertihartha, Grandprix T.M. Kadja, "Nano calcite-templated hierarchical ZSM-5 synthesized via solvent-free route for selective production of rich-aromatic, high-octane green gasoline", *Fuel*, 381, Part B, 1 Feb., (2025), 133345, **(Q1)**, (Received 4 April 2024; Received in revised form 14 September 2024; Accepted 30 September 2024, Available online 11 October 2024), homepage: www.elsevier.com/locate/fuel, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133345>
23. Noerma J. Azhari, Bahaul F. Al-Haq, A. C. S Axel, Muhammad A. Rifialdy, **Melia L. Gunawan**, I G.B.N. Makertihartha, Grandprix T. M. Kadja, "Ethylene-to-aromatics over metal-free hierarchical MFI zeolite: Boosting the BTX yield", *Results in Engineering*, 25, (2025), 104027, **(Q1)** online 16 January 2025, <https://www.sciencedirect.com/journal/results-in-engineering>; <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104027>

JURNAL NASIONAL

1. **Melia Laniwati Gunawan**, Arry Susana Dewi, Fransisca Geronica, "Uji Kinerja Katalis Zeolit-Y Komersial Hasil Regenerasi Terhadap Reaksi Dehidrasi N-Butanol", *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*, Volume 3, Nomor 1, hal 1-8, **2004**, ISSN 1693-9433.

2. **Gunawan, M.L.**, Susanto, H., “Dehidrasi n-Butanol menjadi Senyawa Buten pada Katalis Molecular Sieve 13 X dalam Reaktor Unggun Tetap“, *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*, Volume 6, Nomor 6, Halaman 642-648, **2007**, DOI: 10.5614/jtki,
3. URL: <https://www.aptekim.id/jtki/index.php/JTKI/article/view/87>
4. **Gunawan, M. L.**, Makertihartha, I. G. B. N., Subagio, S., Malau, L.A., Florence, A., “Kinetika Reaksi Hidrogenasi Ester Lemak Menjadi Alkohol Lemak Dengan Katalis Tembaga-Mangan”, *Indonesian Journal of Chemical Research*, Volume 8, Nomor 1, **2020**, *Sinta 3*, DOI: 10.1088/1757-899X/823/1/012010, URL: <https://ojs3.unpatti.ac.id/index.php/ijcr/article/view/1464>

SEMINAR INTERNASIONAL

1. Ardy, A., Rizkiana, J., **Gunawan, M. L.**, Susanto, H., “Synthesis of Dimethyl ether using a fixed bed of dual catalyst for methanol synthesis and its dehydration”, *MATEC Web of Conferences*, Volume 268, pp. 5, 2019, The 25th Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE 2018), Makati, Philippines, 21-22 November **2018**, DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926807003>, URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2019/17/matec-conf_rsce18_07003/matecconf_rsce18_07003.html
2. Ardy, A., Pohan, R.D.A., Rizkiana, J., **Gunawan, M. L.**, Susanto, H., “Dehydration of methanol to dimethyl ether (DME): Performance of three types of catalyst at atmospheric pressure”, *AIP Conference Proceedings*, Volume 2085, Issue 1, **2019**, The 11 th Regional Conference on Chemical Engineering (RCChE 2018), Yogyakarta, Indonesia, 7-8 November 2018, DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5095042>, URL: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5095042>;
3. Fatony, Z. A., Febriani, Y., Makertihartha, I.G.B.N., **Gunawan, M. L.**, Subagio, S., “Acidity effects of K promoted Co-based catalyst with NH₄ OH addition of the impregnation solution for Fischer-Tropsch synthesis”, *MATEC Web of Conferences*, Volume 268, **2019**, The 25th Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE 2018), DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926807001>, URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2019/17/matec-conf_rsce18_07001/matecconf_rsce18_07001.html

4. Virgana, S., Subagjo, **Gunawan, M. L.**, "A Kinetic Study 2-Ethyl-2-Hexenal Hydrogenation to 2-Ethyl-Hexanol over Nickel based Catalyst", *IOP Conf.Series: Materials Science and Engineering*, Volume 543, Issue 1, **2019**, Article number 012009,
DOI: <https://doi.org/110.1088/1757-899X/543/1/012009>,
URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/543/1/012009>
5. Ulfah, M., Octavia, S., Suherman, H., **Gunawan, M.L.**, Makertihartha, I.G.B.N., Subagjo, "Synthesis and Characterization of modifield g- Alumina – NaA and g-Alumina – NaX zeolite composites as methanol dehydration catalysts in synthesis Dymethyl Ether (DME)", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 823, 2020, International Seminar on Chemical Engineering Soehadi Reksowardojo (STKSR), Kupang, Indonesia, 7-9 October **2019**,
DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926807001>,
URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2019/17/matec-conf_rsce18_07001/mateconf_rsce18_07001.html
6. Ardy, A., Rizkiana, J., **Gunawan, M.L.**, Susanto, H. "Characterization and Catalytic Activity of γ -Al₂O₃-ITB on Methanol Dehydration", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 778, Issue 130, April 2020, Article number 01205426th Regional Symposium on Chemical Engineering, RSCE 2019, Kuala Lumpur, 30 October 2019 - 1 November **2019**, Code 159475,
DOI: 10.1088/1757-899X/778/1/012054,
URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/778/1/012054#sidr-main>;
7. Santoso, M.Y., Asyraf, N., **Gunawan, M. L.**, Rizkiana, J., "Methanol dehydration into dimethyl ether (DME) simulation in fixed bed reactor", *AIP Conference Proceedings*, Volume 2667, Issue 1, International Symposium of Indonesian Chemical Engineering **2021**: Enhancing Innovations and Applications of Chemical Engineering for Accelerating Sustainable Development Goals, ISIChem, Semarang, 6-7 October 2021,
DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0116541>, URL: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/5.0116541>
8. Azizah Nabilah, Tirto Prakoso, **Melia Laniwati**, Jenny Rizkiana, "Equilibrium state of sodium methoxide product for biodiesel catalyst", *AIP Conference Proceedings*, 3295, 040007 (2025), International Seminar on

SEMINAR NASIONAL

1. **Gunawan, M. L.**, Makertihartha, I.G.B.N., Subagjo., Agustina, D., Gunawan, T., “Sintesis dan Uji Aktivitas Katalis Low Temperature Shift Conversion (LTSC) Berbasis Cu/Zn”, *Seminar Nasional Fundamental & Aplikasi Teknik Kimia*. **2007**, ISSN: 14105667, Publisher: Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember-Surabaya;
<https://www.researchgate.net/publication/378067610>
2. **Gunawan, M. L.**, Makertihatha, IGBN., Nauli, A, M., dan Tjokrobudyanto, H. “Sintesis dan Uji Stabilitas Zeolit USY”, *Prosiding Seminar Nasional Zeolit VII*, **2011**, ISBN: 9786029995602, Publisher: Ikatan Zeolit Indonesia – Jawa Timur,
URL: <https://izindo.files.wordpress.com/2013/02/prosiding-surabaya.pdf>;
3. **Gunawan, M. L.**, Subagjo., Mardian, D., Abirawa, A., "Dekomposisi tar hasil Gasifikasi Biomassa melalui Proses Steam Reforming”, Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia IV, **2012**, ISBN: 978979983002, Publisher: Asosiasi Asosiasi Pendidikan Tinggi Teknik Kimia Indonesia;
<https://www.researchgate.net/publication/378068141>
4. **Gunawan, M. L.**, Subagjo, Makertihartha, I.G.B.N., Al Fatoni, Zaky, "Hidrogenasi Ester Lemak menjadi Alkohol Lemak menggunakan Katalis Berbasis Cu (Tembaga) pada Reaktor Batch”, *Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia V*. **2015**, Jogjakarta, Asosiasi Pendidikan Tinggi Teknik Kimia Indonesia (APTEKINDO);
<https://www.researchgate.net/publication/378067513>
5. Makertihartha, I.G.B.N., Subagjo., **Gunawan, M. L.**, Stefanus,A., Hermawan, D., dan Budiyanto., "Desain dan Simulasi Reaktor FCC Untuk Produksi Bahan Bakar Hijau: Simulasi CFD dan Perancangan Reaktor FCC”, *Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia V*. **2015**, Publisher: Departement Teknik Kimia, UGM Jogjakarta, Asosiasi Pendidikan Tinggi Teknik Kimia Indonesia (APTEKINDO);
<https://www.researchgate.net/publication/378067866>
6. Fikri, Z.A., Anshari, C., Al Fatony,Z., Makertihartha,IGBN,
Gunawan,M.L., “ Simulasi dan Perancangan Slurry Bubble Column

Reactor untuk Reaksi Fischer-Tropsch”, *Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia V. 2015*, Publisher: Departement Teknik Kimia, UGM Jogjakarta, Asosiasi Pendidikan Tinggi Teknik Kimia Indonesia (APTEKINDO), <https://www.researchgate.net/publication/378067876>

7. **Gunawan, M.L.**, "Katalis dan Katalisis dalam Industri Pangan”, Seminar Nasional: “Peran Katalis dalam Industri Farmasi dan Pangan serta Penerapannya dalam Pembelajaran Kimia di Sekolah”, **2017**, Bandung, Jurusan dan himpunan mahasiswa Kimia – Universitas Pendidikan Indonesia (*tidak ada prosiding-nya*).
<https://www.researchgate.net/publication/378068125>
<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.28502.42562>

VII. PATEN

1. Paten Indonesia, Nomor: **IDP000037345** (tanggal pemberian 27 November 2014, masa berlaku 20 tahun) (jumlah inventor 7 orang) - **Granted**
2. Paten Indonesia, Nomor: **IDP000059899** (tanggal pemberian: 20 Juni 2019, masa berlaku 20 tahun) (jumlah inventor: 9 orang) - **Granted,**
3. Paten Indonesia, Nomor: **IDP000062827** (tanggal pemberian: 25 September 2019, masa berlaku 20 tahun) (jumlah inventor: 9 orang) - **Granted,**
4. Paten Indonesia Nomor: **IDP000091116** (tanggal pemberian 14 Desember 2023). Masa berlaku 20 tahun (jumlah inventor: 4 orang) - **Granted,**
5. Paten Indonesia, Nomor Permohonan: **IDP000091880** (tanggal Pemberian 26 Januari 2024), (jumlah inventor: 4 orang) - **Granted**
6. Paten Indonesia, Nomor: **IDP000093612** (tanggal 14 Desember 2021) (jumlah inventor: 12 Orang) - **Granted**
7. Paten Indonesia, Nomor Pendaftaran/Permohonan: **P00202112048** (tanggal 23 Desember 2021) (jumlah inventor: 11 Orang) – **Terdaftar**
8. Paten Indonesia, Nomor Pendaftaran/Permohonan: **P00202305027** (2023) (jumlah inventor: 4 Orang) – **Terdaftar**
9. Paten Indonesia, Nomor Pendaftaran/Permohonan: **P00202502573** (tanggal 19 maret 2025) (jumlah inventor: 13 Orang) – **Terdaftar**

VIII. PENGHARGAAN

1. Satya Lancana Karya Satya X tahun, Presiden RI, **2001**
2. Satya Lancana Karya Satya XX tahun, Presiden RI, **2010**
3. Pengabdian 25 tahun, Institut Teknologi Bandung, **2012**

4. Satya Lancana Karya Satya XXX tahun, Presiden RI, **2018**
5. Anggota Tim Pada Penelitian Katalis Merah Putih bagi Sawit Indonesia dengan Ketua Tim Prof.Dr.Ir. Subagjo, Dewan Minyak sawit Indonesia (DMSI), **2020**
6. Dosen Berprestasi di Bidang Karya Inovasi, Institut Teknologi Bandung, **2022**
7. WIPO Medal for Inventors, World Intellectual Property Organization, **2022**
8. Pengabdian 35 tahun, Institut Teknologi Bandung, **2022**

IX SERTIFIKASI

1. Dosen tersertifikasi Nasional bidang Teknik Kimia, DIKTI, Kementerian Pendidikan Nasional Indonesia, **2010**
2. Asesor sertifikasi Dosen, bidang Teknik Kimia, Kementerian Pendidikan Nasional Indonesia, **2011**
3. Insinyur Profesional Madya (IPM), bidang Kimia, Badan Kejuruan Kimia-Persatuan Insinyur Indonesia, **2016**
4. Insinyur Profesional Madya (IPM), dari Badan Kejuruan Kimia – Persatuan Insinyur Indonesia, **2021**



📍 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

