



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



BAHAN BAKAR NABATI UNTUK KEDAULATAN ENERGI NASIONAL

Profesor I Gusti Bagus Ngurah Makertihartha
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Bandung

Aula Barat ITB
16 September 2023

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**BAHAN BAKAR NABATI UNTUK
KEDAULATAN ENERGI NASIONAL**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

BAHAN BAKAR NABATI UNTUK KEDAULATAN ENERGI NASIONAL

Prof. I Gusti Bagus Ngurah Makertihartha

16 September 2023
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

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

Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:

Bahan Bakar Nabati untuk Kedaulatan Energi Nasional

Penulis : Prof. I Gusti Bagus Ngurah Makertihartha

Reviewer : Prof. Danu Ariono

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2023

ISBN : 978-623-297-323-7

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

Indonesia memiliki kekayaan sumber daya alam yang melimpah. Kekayaan itu wajib didayagunakan untuk kemaslahatan bangsa, sekaligus untuk menyelesaikan masalah-masalah bangsa. Salah satu masalah bangsa krusial yang harus diselesaikan adalah masalah terkait dengan energi dan pangan. Masalah energi dan pangan adalah masalah utama bangsa yang terkait langsung untuk kehidupan manusia.

Buku ini disusun dengan maksud untuk menjelaskan bahwa Indonesia memiliki kemampuan untuk menyelesaikan masalah energi di negeri ini. Salah satu solusi yang dapat dipilih adalah memanfaatkan kekayaan sumber daya minyak nabati sebagai bahan baku untuk memproduksi bahan bakar nabati yang pada gilirannya dapat memperkuat kedaulatan energi nasional. Hal itu yang menjadi latar belakang dan tujuan utama penulisan naskah orasi ilmiah yang berjudul “**Bahan Bakar Nabati untuk Kedaulatan Energi Nasional**” ini.

Puji syukur kepada Ida Sanghyang Widi Wasa, Tuhan Yang Maha Kuasa, yang memberi perkenan sehingga naskah orasi ilmiah ini dapat dituntaskan. Penghargaan dan terima kasih yang setinggi-tingginya saya sampaikan kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung yang memberi kesempatan kepada saya untuk menyampaikan orasi ilmiah pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar ITB. Orasi ilmiah ini merupakan salah satu tanggungjawab akademik atas jabatan Guru Besar dalam bidang ilmu Teknologi Proses Produksi Bahan Bakar Nabati di Institut Teknologi Bandung. Semoga naskah orasi ilmiah ini dapat memberikan gambaran komprehensif dan inspirasi inovatif yang bermanfaat bagi seluruh insan *merah-putih*, generasi emas Indonesia.

Bandung, 16 September 2023

Profesor I Gusti Bagus Ngurah Makertihartha

SINOPSIS

Pada tahun 2025 Indonesia berkomitmen untuk mensubstitusi 23% sumber energi fosil dengan sumber energi baru dan terbarukan. Usaha pencapaian target ini harus dilakukan dengan tindakan-tindakan progresif yang melibatkan seluruh pemangku kepentingan energi nasional yang terdiri atas pemerintah, industri milik negara maupun swasta, universitas, lembaga penelitian, serta seluruh komunitas energi nasional.

Indonesia adalah negara produsen minyak nabati terbesar di dunia, di antaranya minyak sawit, minyak kelapa, dan minyak nabati lain yang berasal dari berbagai sumber daya alam Indonesia. Minyak nabati merupakan sumber penting minyak dan lemak yang digunakan secara luas sebagai bahan baku pangan dan non-pangan. Salah satu penggunaan penting minyak nabati adalah sebagai bahan baku untuk bahan bakar nabati. Bahan bakar nabati adalah salah satu bahan bakar alternatif dari sumber energi terbarukan yang dapat digunakan sebagai substitusi bahan bakar fosil.

Institut Teknologi Bandung adalah salah satu institusi pendidikan yang saat ini menjadi pelaku sentral pengembangan teknologi produksi bahan bakar nabati di Indonesia. ITB menjadi tempat cikal bakal pengembangan teknologi perengkahan minyak nabati menjadi bensin sawit yang telah dimulai sejak tahun 1982 oleh Prof. Sudarno Harjosoeparto dan Prof. Subagjo. ITB juga menjadi salah satu institusi pelopor pengembangan teknologi produksi biodiesel dari sawit sejak tahun 1992-1993 yang dipelopori oleh Dr. Tatang H. Soerawidjaja, Dr. Tirto Prakoso, dan Dr. Iman K. Reksowardojo.

Saat ini, ITB menjadi institusi sentral bagi pengembangan teknologi produksi bahan bakar biohidrokarbon dari sawit. Laboratorium Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis ITB dan Pusat Rekayasa Katalisis ITB bekerja sama dengan berbagai mitra industrinya sejak awal tahun 2012 hingga sekarang telah dan tengah mengembangkan teknologi proses produksi bahan bakar biohidrokarbon dari sawit. ITB bersama PT Pertamina (Persero) berhasil mengembangkan katalis pengolahan hidro yang digunakan untuk mengkonversikan minyak sawit menjadi diesel biohidrokarbon dan mengonversikan minyak inti sawit menjadi avtur biohidrokarbon melalui proses hidrideoksigenasi. ITB bekerja sama dengan *Research and Technology*

Innovation (RTI) Pertamina dan didukung oleh Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS) berhasil memproduksi campuran diesel biohidrokarbon D12.5 dan D100 di RU 2 Dumai dan memproduksi avtur biohidrokarbon J2.4 di RU 4 Cilacap. Keberhasilan ini menjadi dasar bagi pengembangan teknologi produksi bahan bakar biohidrokarbon di Indonesia.

Sejak tahun 2017 hingga sekarang, ITB yang didukung oleh BPDPKS dan berbagai mitra industrinya berhasil mengembangkan katalis dan proses produksi bensin sawit dari minyak sawit melalui proses perengkahan. Proses produksi yang dikembangkan berdasarkan pada proses perengkahan minyak bumi yang dikembangkan oleh Houdry pada tahun 1926. ITB berhasil merancang dan membangun unit pilot skala 20 liter bensin sawit per hari. Kini ITB tengah mengembangkan dan menyempurnakan unit percontohan produksi bensin sawit skala 1000 liter per hari.

Seluruh usaha pemanfaatan sumber daya alam Indonesia berupa minyak nabati untuk digunakan sebagai bahan baku untuk bahan bakar nabati mendapatkan dukungan dari pemerintah Republik Indonesia. ITB menjadi salah satu institusi kunci dari 2 Proyek Strategis Nasional (PSN) yang berfokus pada pengembangan bahan bakar nabati, yaitu “*Bahan Bakar Hijau*” yang dikoordinasikan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral RI, dan “*Pembangunan Teknologi produksi IVO dan Bensin Sawit dengan Katalis Merah Putih yang Terintegrasi dengan Kebun Rakyat*” yang dikoordinasikan oleh Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN).

Mengembangkan dan memanfaatkan sumber daya alam berupa minyak nabati untuk dikonversi menjadi bahan bakar nabati berkorelasi langsung pada peningkatan ketahanan dan kedaulatan energi nasional.

DAFTAR ISI

PRAKATA	v
SINOPSIS	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
1. PENDAHULUAN	1
2. TEKNOLOGI PROSES PRODUKSI BAHAN BAKAR NABATI	7
3. INDONESIA PRODUSEN MINYAK NABATI TERBESAR DUNIA	13
4. PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PRODUKSI BAHAN BAKAR NABATI DI ITB	15
4.1. Proses Produksi Biodiesel.....	17
4.2. Proses Produksi Diesel dan Avtur Biohidrokarbon.....	19
4.3. Proses Produksi Bensin Sawit.....	36
5. PENUTUP	55
6. UCAPAN TERIMA KASIH	58
DAFTAR PUSTAKA	61
CURRICULUM VITAE	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Konsumsi energi dunia berdasarkan sumber energi (British Petroleum, 2022).	2
Gambar 2.	Kebutuhan bahan bakar minyak Indonesia dari tahun 2015 hingga tahun 2021 (Kementerian ESDM, 2022a)	3
Gambar 3	Grafik impor bahan bakar cair Indonesia (Ditjen Migas, Kementerian ESDM, 2022a).	3
Gambar 4	Proyeksi bauran energi primer (Tampubolon, dkk., 2020).	4
Gambar 5	Proyeksi komposisi energi terbarukan pada bauran energi nasional menurut skenario realistis (Tampubolon, dkk., 2020).	5
Gambar 6	Panorama teknologi produksi bahan bakar nabati (Soerawidjaja, 2023).	8
Gambar 7	Bagan pemanfaatan minyak dan lemak nabati untuk sektor energi.	8
Gambar 8	Bagan pemanfaatan minyak dan lemak nabati untuk sektor non-energi.	12
Gambar 9.	Katalis untuk produksi bahan bakar nabati yang dikembangkan di Lab TRK ITB dan PRK ITB	16
Gambar 10	Proses produksi bahan bakar nabati berbasis sawit yang dikembangkan di ITB.....	16
Gambar 11	Diagram alir proses pembuatan biodiesel (Prakoso dkk, 2008).	17
Gambar 12	Diagram proses unit produksi biodiesel sistem dua tangki (Prakoso, dkk, 2008).	18
Gambar 13	Proses reaksi dekarboksilasi minyak sawit dan minyak inti sawit untuk menghasilkan biohidrokarbon.	20
Gambar 14	Skema penelitian dan pengembangan katalis.	22
Gambar 15	Pabrik katalis pendidikan di Laboratorium Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis ITB.	24
Gambar 16	Reaktor pilot di Laboratorium Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis ITB.	24
Gambar 17	Diagram alir proses produksi diesel biohidrokarbon dengan skema <i>co-processing</i>	26
Gambar 18	Reaksi hidrokarboksilasi dan hidrokseenasi trigliserida....	28

Gambar 19	Diagram alir proses produksi diesel biohidrokarbon dengan skema <i>stand-alone</i> (mandiri).....	30
Gambar 20	Diagram alir proses pembuatan avtur biohidrokarbon dari minyak inti sawit atau minyak kelapa.....	31
Gambar 21	Kegiatan uji produksi avtur biohidrokarbon dengan reaktor pilot Pertamina di ITB (LPIK ITB, 2021).....	32
Gambar 22	Skema <i>co-processing</i> untuk produksi avtur biohidrokarbon di RU 4 Cilacap (LPIK ITB, 2021).	33
Gambar 23	Aktivitas uji komersial avtur biohidrokarbon di RU 4 Cilacap (LPIK ITB, 2021).....	33
Gambar 24	Kegiatan uji statik dan uji terbang Bandung-Jakarta dengan CN235 menggunakan avtur biohidrokarbon J2.4.	35
Gambar 25	Perengkahan minyak nabati menjadi bensin berangka oktan tinggi.	37
Gambar 26	Mekanisme reaksi perengkahan katalitik minyak sawit.	39
Gambar 27	Distribusi produk perengkahan minyak sawit dengan berbagai katalis berbasis zeolit (Makertihartha, dkk., 2020b).	41
Gambar 28	Profil TGA dan DSC proses regenerasi katalis bekas.....	42
Gambar 29	Diagram proses produksi bensin sawit.	44
Gambar 30	Unit reaktor pilot untuk mengkonversi minyak sawit menjadi bensin sawit berkapasitas 20 L bensin sawit/hari.....	45
Gambar 31	Perolehan fraksi bensin sawit (nafta) hasil perengkahan minyak sawit pada berbagai temperatur dan waktu tinggal (Makertihartha, 2020a).	47
Gambar 32	Perolehan <i>crude gasoline</i> dan perolehan bensin sawit sepanjang waktu reaksi pada temperatur 500 °C dan WHSV 2,5 jam ⁻¹	47
Gambar 33	Komposisi produk gas hasil perengkahan minyak sawit pada temperatur operasi 500 °C dan WHSV 2,5 jam ⁻¹	48
Gambar 34	Komposisi (a) produk cair dan (b) bensin sawit hasil perengkahan minyak sawit pada temperatur operasi 500 °C dan WHSV 2,5 jam ⁻¹	48
Gambar 35	Perbandingan komposisi komponen bensin sawit dengan komposisi komponen pembentuk pertamax turbo dan premium menurut jenis hidrokarbon (a) dan panjang rantai C hidrokarbon (b) (Makertihartha, 2019).	49
Gambar 36	Unit produksi IVO berkapasitas 6 ton/jam yang dibangun di Kabupaten Musi Banyuasin, Sumatra Selatan.	51

Gambar 37	Unit produksi percontohan bensin sawit berkapasitas 1000 L/hari.....	51
Gambar 38	Unjuk kerja unit produksi bensin sawit 1000 L/hari pada berbagai waktu reaksi; (a) fraksi volume bensin sawit dan diesel dalam fraksi cair, (b) <i>research octane number</i> produk bensin sawit.....	52
Gambar 39	Distribusi temperatur pada unggu katalis reaktor produksi bensin sawit skala 1000 L/hari.	53
Gambar 40	Konsep produksi bahan bakar nabati yang terintegrasi dengan kebun rakyat.....	56

DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Komposisi asam lemak dalam beberapa minyak dan lemak nabati Indonesia (Soerawidjaja, 2023)	14
Tabel 2	Spesifikasi produk Avtur biohidrokarbon J2.0 dan J2.4.	34

1. PENDAHULUAN

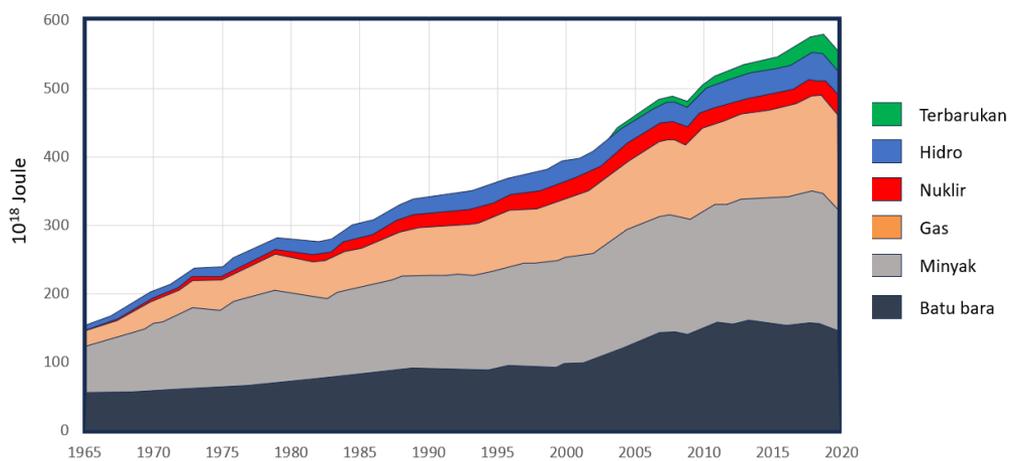
The stone age did not end because the world ran out of stones, and likewise, the oil age will not end because the world run out of oil (**Sheikh Ahmed Zaki Yamani**, mantan Menteri Perminyakan, Kerajaan Saudi Arabia, mantan Sekretaris Jendral OPEC).

Energi adalah kapasitas untuk melakukan kerja. Setiap objek, baik hidup maupun mati, memiliki kapasitas untuk melakukan kerja, atau dapat dibuat untuk memiliki kapasitas tersebut. Masyarakat modern muncul dan berkembang karena masyarakat memiliki kemampuan untuk mengubah energi dari satu bentuk ke bentuk lainnya dan menggunakannya untuk melakukan kerja.

Bahan bakar adalah setiap material yang dapat menyimpan energi. Dari sekian banyak bentuk energi komersial final, listrik, dan bahan bakar cair bermutu tinggi adalah dua sumber energi yang paling memengaruhi peradaban masyarakat modern saat ini. Dalam dua abad terakhir ini, bahan bakar cair bermutu tinggi adalah sumber energi yang paling dominan yang memiliki bentuk superior dan paling strategis, karena bahan bakar ini mudah disimpan dengan aman dalam periode yang lama, mudah dipindahkan dari satu tempat ke tempat lainnya, memiliki densitas energi yang tinggi, dan relatif mudah dipantik, tetapi tidak mudah meledak. Inilah yang menyebabkan bahan bakar minyak dari fosil menjadi sumber energi yang dominan dalam perkembangan ekonomi energi dunia. Bahan bakar fosil, minyak, dan batu bara, telah menjadi primadona dan sumber energi dunia yang utama selama 150 tahun terakhir. Peran bahan bakar cair bermutu tinggi ini masih akan terus berlangsung beberapa dekade ke depan karena hampir seluruh infrastruktur dunia yang membutuhkan energi masih membutuhkan bahan bakar cair.

Peningkatan kebutuhan energi seiring dengan perkembangan zaman merupakan isu yang tidak asing lagi pada abad ke-21. Peningkatan kebutuhan energi tergambar dalam data *energy share* yang dikeluarkan *British Petroleum* tahun 2022. Minyak bumi, batu bara dan gas alam hingga saat ini masih menjadi pilihan utama dalam pemenuhan kebutuhan energi (*British Petroleum*, 2022). Ketiga sumber daya ini adalah sumber daya yang tidak dapat diperbarui. Disisi lainnya, hingga tahun 2020 energi terbarukan baru mampu

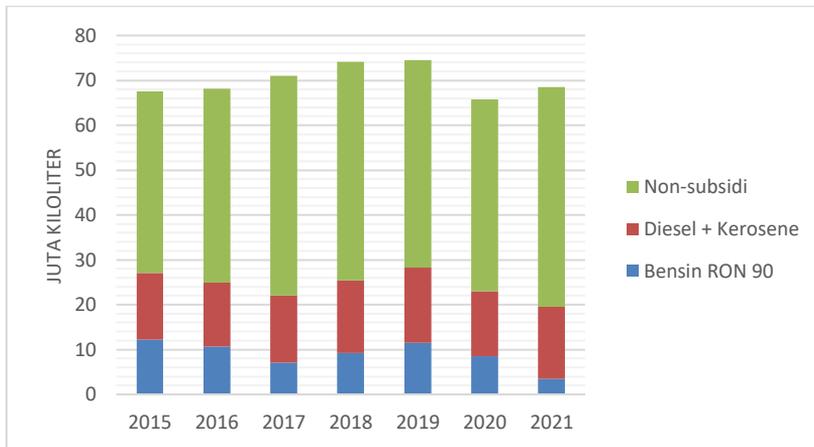
menyumbang 10% dari total energi dunia. Diperkirakan energi baru dan terbarukan akan mampu mencapai 50% total energi dunia pada tahun 2050. Minyak bumi sudah menjadi sumber energi utama dunia selama puluhan tahun terakhir, baik sebagai bahan bakar maupun non bahan bakar. Penggunaan minyak bumi dan turunannya masih mendominasi konsumsi energi dunia, dan diprediksi akan berlangsung hingga tiga puluh tahun ke depan. Gambar 1 memperlihatkan konsumsi energi dunia berdasarkan sumber energi (British Petroleum, 2022). Penurunan konsumsi energi dunia pada tahun 2019-2020 terkait dengan pandemi Covid19 yang melanda di seluruh dunia.



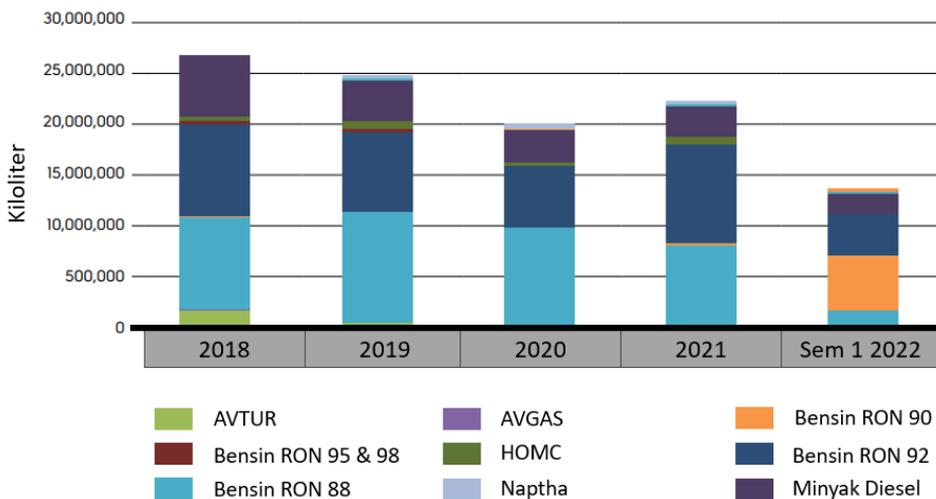
Gambar 1 Konsumsi energi dunia berdasarkan sumber energi (British Petroleum, 2022).

Pemenuhan kebutuhan energi di Indonesia sendiri masih didominasi oleh minyak bumi. Buku Statistik Minyak Bumi dan Gas Bumi Semester I 2022 menyatakan hampir 75% minyak bumi dimanfaatkan sebagai bahan bakar minyak. Namun, kebutuhan energi yang semakin meningkat tidak diimbangi dengan peningkatan produksi minyak bumi. Produksi minyak mentah dan kondensat serta cadangan minyak bumi di Indonesia terus menurun dalam enam tahun terakhir (Kementerian ESDM, 2022.a). Upaya impor terus dilakukan oleh pemerintah untuk bisa menutupi kebutuhan energi dalam negeri. Berdasarkan data dari Kementerian ESDM pada semester 1 2022, total impor bahan bakar mencapai 13.2 juta kiloliter. Dalam analisisnya, Adam Jezard mengatakan bahwa kebutuhan bahan bakar cair dunia masih terus meningkat menjadi 104 juta barrel/hari pada tahun 2030 dan 113 juta barel/hari pada 2040 (Jezard, 2017). Gambar 2 memperlihatkan kebutuhan

bahan bakar minyak Indonesia dari tahun 2015 hingga 2021. Sedangkan Gambar 3 memperlihatkan kebutuhan impor bahan bakar cair Indonesia.



Gambar 2. Kebutuhan bahan bakar minyak Indonesia dari tahun 2015 hingga tahun 2021 (Kementerian ESDM, 2022a)



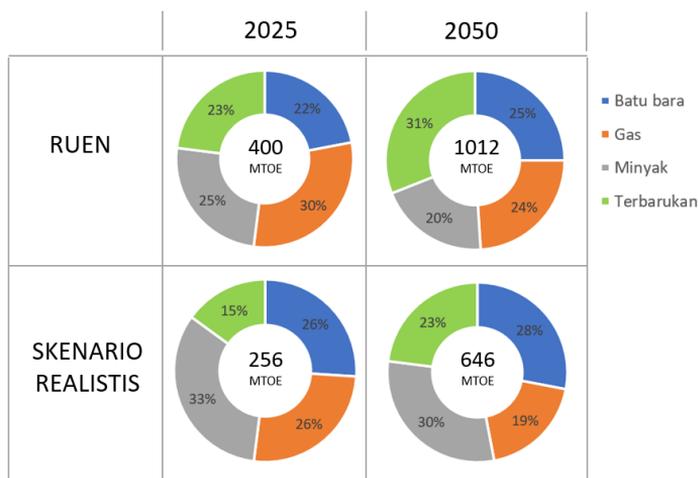
Gambar 3 Grafik impor bahan bakar cair Indonesia (Ditjen Migas, Kementerian ESDM, 2022a).

Kebutuhan bahan bakar minyak Indonesia didominasi oleh kebutuhan bahan bakar non-subsidi, yaitu bahan bakar bensin RON 92 dan 98. Impor minyak mentah dan bahan bakar minyak Indonesia selalu bertambah dari tahun ke tahun, kecuali ketika pada saat pandemi Covid-19 pada tahun 2019 hingga tahun 2020. Pada tahun 2021 impor minyak mentah dan bahan bakar minyak Indonesia kembali naik dengan pulihnya situasi perekonomian nasional pascapandemi Covid-19. Tampak dari gambar ini bahwa bensin (bensin RON 88, 90, 92, 95, dan 98) adalah komoditas utama yang diimpor oleh

Indonesia. Indonesia adalah negara pengimpor bensin terbesar kedua di dunia setelah Meksiko, yaitu sebesar 10 juta kL/tahun. Sehingga usaha-usaha untuk mensubstitusi bensin impor menjadi salah satu langkah krusial bagi penegakan kedaulatan energi nasional.

Sementara itu, pada *Climate Change Conference of the Parties (COP21)* tahun 2021 Indonesia berkomitmen untuk melakukan penurunan emisi. Indonesia dinilai dapat berkontribusi pada Net-Zero Emission Dunia dengan melakukan diversifikasi energi fosil dengan energi terbarukan sesuai dengan yang sudah ditetapkan, yakni 23% pada tahun 2025 mendatang. Sampai dengan tahun 2022 bauran energi primer Energi Baru Terbarukan (EBT) baru mencapai 11,2%. Indonesia harus melakukan usaha yang konkret dan progresif untuk mencapai target bauran 23% di tahun 2025 dan 31% di tahun 2050 (Tampubolon, dkk., 2020; RUEN, 2017). Gambar 4 memperlihatkan proyeksi bauran energi nasional untuk tahun 2025 dan 2050.

Dengan skema realistis, pada tahun 2025 Indonesia harus bersiap untuk menyubstitusi 26 MTOE (*mega tonnes of oil equivalent*) atau setara dengan 23 Giga Watt energi yang bersumber dari *power plant* dan 13 MTOE energi yang berasal dari sumber lain. Pada tahun 2023, Indonesia telah mengalokasikan substitusi bahan bakar diesel fosil sebesar 13,15 juta kiloliter, atau setara dengan 12 MTOE (Kementerian ESDM, 2022.b). Masih sangat besar ruang yang tersedia untuk mengejar target pemerintah ini jika skema RUEN diberlakukan. Proyeksi bauran energi nasional pada tahun 2025 dan tahun 2050 menurut skema realistik digambarkan pada Gambar 5.



Gambar 4 Proyeksi bauran energi primer (Tampubolon, dkk., 2020).



Gambar 5 Proyeksi komposisi energi terbarukan pada bauran energi nasional menurut skenario realistis (Tampubolon, dkk., 2020).

Salah satu usaha untuk itu adalah mengusahakan substitusi sebagian dari bahan bakar cair fosil dengan bahan bakar cair terbarukan. Dari sekian banyak sumber energi baru dan terbarukan (matahari, angin, *hydro power*, geothermal, oceanthermal, biomassa, nuklir, dll.), biomassa adalah satu-satunya sumber energi terbarukan yang dapat dikonversi menjadi bahan bakar cair bermutu tinggi. Indonesia memiliki peluang yang sangat besar untuk menjadi negara yang terkemuka dalam pengembangan teknologi proses produksi bahan bakar cair terbarukan mengingat fakta bahwa Indonesia adalah penghasil minyak nabati terbesar di dunia. Salah satu sumber daya Indonesia yang dianggap berpotensi sebagai bahan bakar nabati adalah minyak sawit. Pada tahun 2021, Indonesia memproduksi 45,12 juta ton minyak sawit mentah (CPO, *crude palmoil*) (Badan Pusat Statistik Indonesia, 2021). Namun, berdasarkan data dari Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia pada tahun 2021, konsumsi minyak sawit domestik hanya mencapai 18,42 juta ton, sehingga lebih dari 50% minyak sawit Indonesia diekspor dalam bentuk minyak sawit mentah. Pada tahun 2022, Indonesia memproduksi 51,3 juta ton minyak sawit per tahun, dan 4,41 juta ton minyak inti sawit (CPKO, *crude palm kernel oil*) per tahun. Saat ini Indonesia memiliki peluang yang sangat besar untuk memanfaatkan minyak sawit sebagai bahan baku bahan bakar nabati melalui berbagai upaya. Program pemerintah Indonesia yang

saat ini sudah digalakkan adalah program penggunaan biodiesel B35. Program-program lainnya yang sedang diusung dan didorong oleh berbagai pemangku kepentingan bahan bakar cair nabati adalah program Bioavtur, bensin sawit, dan berbagai program pengolahan CPO yang memanfaatkan unit pengolahan hidro (*hydrotreating*) dan unit perengkahan katalitik milik PT Pertamina (Persero), atau unit mandiri lainnya.

Selain faktor ketersediaan bahan baku yang melimpah di Indonesia, pemanfaatan minyak sawit di bidang energi juga didorong oleh struktur kimia minyak sawit yang terdiri atas asam lemak dengan jumlah rantai C_{12} - C_{20} . Struktur dan jumlah rantai asam lemak tersebut sangat mirip dengan bensin, kerosene, avtur, dan diesel, sehingga memungkinkan untuk dikonversi melalui reaksi hidrogenasi dan perengkahan (Chew dan Bhatia, 2008 dan Melero dkk., 2010). Atas dasar inilah banyak peneliti merasa perlu untuk melakukan eksplorasi pengembangan teknologi produksi bahan bakar nabati terutama bahan bakar bensin dari minyak sawit yang diberi nama “Bensin Sawit” atau BENSAs. Pengembangan teknologi yang diusulkan diharapkan mampu mencakup semua aspek yang dibutuhkan seperti pengembangan katalis, teknologi proses, proses perbesaran skala dan juga analisa keekonomian produksi bensin sawit.

Indonesia ditengarai akan memiliki peran sentral dalam pengembangan bahan bakar nabati dan bio-ekonomi di dunia. Peran itu harus telah dimulai dan didorong oleh seluruh pemangku kepentingan karena Indonesia memiliki sumber daya nabati yang sangat besar.

Pada berbagai kesempatan, Sheikh Ahmed Zaki Yamani, mantan Menteri Perminyakan, Kerajaan Saudi Arabia, mantan Sekretaris Jendral OPEC, mengatakan bahwa jaman batu berakhir bukan karena habisnya ketersediaan batu di dunia. Demikian pula jaman minyak fosil berakhir bukan karena habisnya ketersediaan sumber daya minyak fosil. Beralihnya manusia dari era minyak fosil ke era bahan bakar baru dan terbarukan adalah sebuah keniscayaan, yang didorong oleh kebutuhan manusia akan kehidupan yang lebih baik dan berkualitas. Usaha-usaha pengembangan teknologi produksi bahan bakar nabati yang menggunakan minyak nabati Indonesia akan memperkuat ketahanan energi nasional, yang pada gilirannya menciptakan kedaulatan energi nasional.

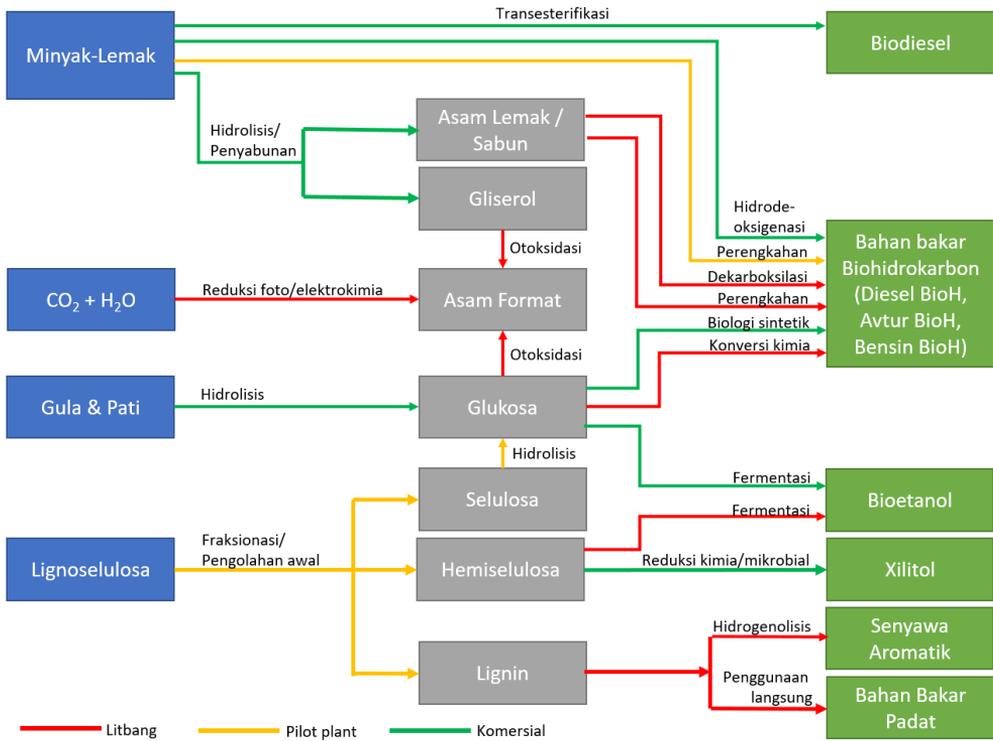
2. TEKNOLOGI PROSES PRODUKSI BAHAN BAKAR NABATI

Bahan bakar nabati, juga dikenal sebagai biofuel, adalah jenis bahan bakar yang diproduksi dari sumber-sumber biomassa, minyak dan lemak nabati/hewani. Bahan bakar nabati dapat digunakan sebagai alternatif atau pengganti bahan bakar fosil tradisional, seperti bensin, kerosin, diesel, dan gas alam. Sumber biomassa yang digunakan untuk menghasilkan bahan bakar nabati meliputi tanaman energi, limbah pertanian, limbah makanan, minyak dan lemak nabati, serta biomassa lignoselulosa seperti serat kayu dan jerami. Bahan baku untuk produksi bahan bakar nabati yang paling mudah dan ketersediaannya sangat melimpah di Indonesia adalah minyak dan lemak nabati.

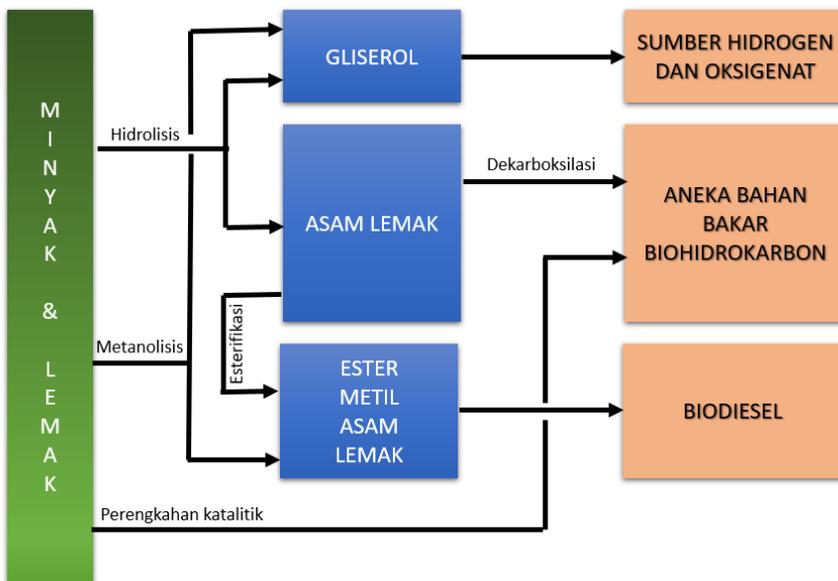
Minyak dan lemak nabati adalah minyak dan lemak yang diperoleh dari bahan-bahan nabati seperti biji-bijian, kacang-kacangan, buah-buahan, atau tumbuhan lainnya melalui proses ekstraksi dengan cara mekanis atau kimia. Minyak nabati digunakan dalam berbagai komoditas produk seperti bahan bakar, makanan, kosmetik, dan industri farmasi. Sebagai bahan baku non-pangan, minyak dan lemak nabati adalah sumber daya yang bisa dikonversi menjadi produk yang dapat digunakan sebagai bahan sumber energi atau sebagai bahan oleokimia non-energi.

Secara umum, panorama pengelolaan sumber daya alam untuk diolah menjadi bahan bakar diperlihatkan pada Gambar 6.

Dalam bagan ini diperlihatkan bahwa bahan baku untuk produksi bahan bakar nabati dapat bersumber dari sumber daya alam berupa minyak dan lemak nabati, CO₂ dan H₂O, gula dan pati serta lignoselulosa. Khusus untuk pengolahan minyak dan lemak nabati sebagai bahan baku produksi bahan bakar nabati, bagan di atas dapat disederhanakan menjadi bagan seperti yang diperlihatkan pada Gambar 7.



Gambar 6 Panorama teknologi produksi bahan bakar nabati (Soerawidjaja, 2023).



Gambar 7 Bagan pemanfaatan minyak dan lemak nabati untuk sektor energi.

Bahan bakar nabati yang dapat dihasilkan dari minyak dan lemak nabati dapat berupa bahan sumber hidrogen, ester atau oksigenat lainnya, dan bahan bakar biohidrokarbon. Berbagai bahan bakar nabati ini diproses melalui berbagai proses. Fraksi bahan bakar nabati yang dihasilkan sebagai produk sangat bergantung pada kandungan bahan baku asam lemak dalam minyak dan lemak nabati.

Melalui proses hidrolisis, minyak dan lemak nabati dapat diubah menjadi asam lemak dan gliserol. Proses ini dapat terjadi secara alami dengan bantuan katalis enzim atau katalis asam. Asam lemak dapat dikonversi menjadi bahan bakar biohidrokarbon melalui proses dekarboksilasi atau deoksigenasi. Reaksi ini biasanya disertai dengan hidrogen melalui reaksi hidro-dekarboksilasi atau hidro-deoksigenasi. Katalis yang sering digunakan untuk mengkatalisa reaksi ini adalah Ni-Mo/Al₂O₃ atau Co-Mo/Al₂O₃. Reaksi diselenggarakan pada temperatur 375 °C dan tekanan 40 bar.

Bahan bakar biohidrokarbon dapat pula diperoleh melalui proses perengkahan minyak dan lemak nabati. Proses perengkahan ini menggunakan katalis berbasis zeolit, biasanya ZSM-5, dan dilangsungkan pada temperatur di atas 500 °C dan tekanan atmosferik. Bila minyak nabati yang digunakan adalah minyak sawit, maka bahan bakar nabati yang dihasilkan adalah bahan bakar fraksi bensin.

Asam lemak dapat direaksikan dengan metanol menjadi ester-metil-asam-lemak (FAME, *fatty acid methyl ester*) melalui proses esterifikasi. FAME adalah bahan bakar jenis oksigenat, atau yang sering disebut sebagai biodiesel. Biodiesel/FAME dapat pula langsung diperoleh dengan mereaksikan minyak/lemak nabati dengan metanol melalui reaksi transesterifikasi. Reaksi ini dilaksanakan pada temperatur di rentang 70 °C hingga 80 °C, tekanan atmosferik dengan katalis natrium metoksida. Proses produksi biodiesel adalah proses yang telah sangat matang dan telah komersial. Indonesia adalah salah satu negara penghasil biodiesel terbesar di dunia. Alokasi produksi biodiesel Indonesia pada tahun 2023 sekitar 13,15 juta kL per tahun (Kementerian ESDM, 2023).

Beberapa perusahaan produsen FAME/biodiesel terkemuka di dunia adalah:

1. Wilmar International Ltd.: Wilmar International adalah salah satu perusahaan agribisnis terbesar di dunia yang memiliki unit produksi FAME dari minyak nabati. Mereka memproduksi biodiesel menggunakan minyak kelapa sawit dan minyak nabati lainnya sebagai bahan baku.
2. PT Musim Mas: Musim Mas adalah salah satu produsen minyak kelapa sawit terkemuka di Indonesia dan juga terlibat dalam produksi FAME sebagai bahan bakar biodiesel. Mereka memiliki fasilitas produksi di Indonesia dan berkontribusi pada industri biodiesel di Indonesia.
3. Archer Daniels Midland Company (ADM): ADM adalah perusahaan Amerika Serikat terkemuka yang memproduksi FAME sebagai bahan bakar biodiesel. Mereka menggunakan minyak nabati, seperti minyak kedelai, untuk menghasilkan FAME melalui proses transesterifikasi.
4. Cargill, Inc.: Cargill adalah perusahaan agribisnis internasional yang juga memiliki divisi biodiesel. Mereka memproduksi FAME dari minyak nabati, seperti minyak kedelai, minyak canola, dan minyak nabati lainnya.
5. Neste Corporation: Neste Corporation adalah produsen energi terbarukan terkemuka yang berfokus pada produksi dan penjualan bahan bakar diesel terbarukan. Mereka menghasilkan FAME dari minyak nabati dan limbah lemak melalui proses transesterifikasi.
6. Louis Dreyfus Company: Louis Dreyfus Company adalah salah satu perusahaan komoditas terkemuka yang terlibat dalam produksi biodiesel. Mereka memproduksi FAME dari minyak nabati, termasuk minyak kedelai dan minyak nabati lainnya.
7. IOI Corporation Berhad: IOI Corporation adalah produsen minyak kelapa sawit terkemuka dan juga terlibat dalam produksi FAME sebagai bahan bakar biodiesel. Mereka menggunakan minyak kelapa sawit sebagai bahan baku untuk menghasilkan FAME.

Melalui proses reduksi fotokimia atau elektrokimia, CO_2 dan H_2O dapat dikonversi menjadi asam format yang lazim digunakan sebagai bahan pembawa hidrogen. Dengan proses *hidrogen transfer*, proses reduksi dan pengolahan hidro (*hydrotreating*) dapat dilangsungkan dalam fasa cair (Tomar, 2020; Romero, 2020) dengan memanfaatkan asam format sebagai bahan pembawa hidrogen.

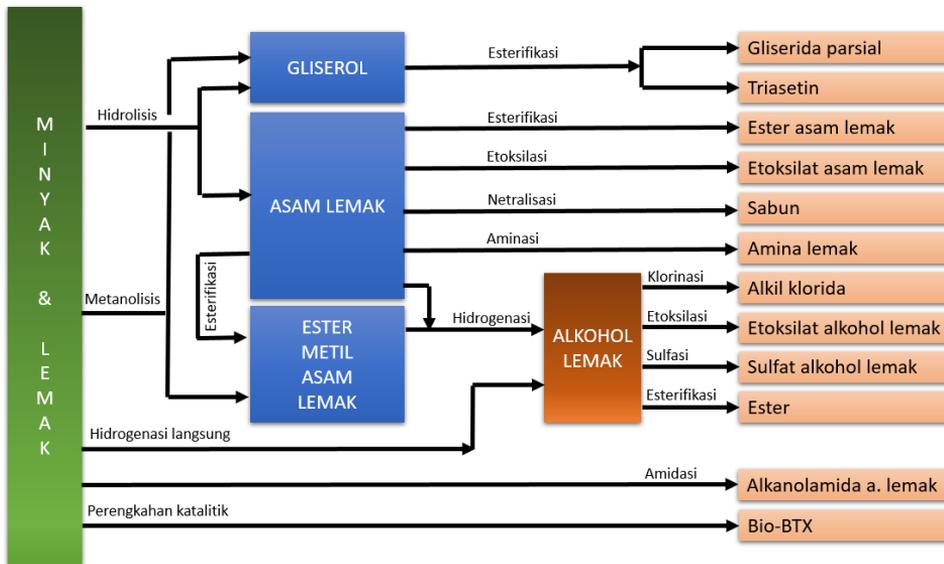
Proses hidrolisis gula menjadi glukosa melibatkan pemecahan ikatan-ikatan gula kompleks menjadi unit-unit glukosa yang lebih sederhana. Glukosa adalah bentuk gula yang paling sederhana dan dapat dengan mudah

diolah lebih lanjut menjadi bahan bakar biohidrokarbon melalui proses biologi sintetik. Proses biologi sintetik untuk mengubah glukosa menjadi hidrokarbon melibatkan penggunaan mikroorganisme yang telah dimodifikasi genetik untuk menghasilkan enzim-enzim yang mampu mengubah glukosa menjadi hidrokarbon. Proses ini bertujuan untuk menciptakan jalur metabolik baru dalam mikroorganisme agar mereka dapat menghasilkan hidrokarbon yang biasanya tidak diproduksi secara alami (Majidian dkk., 2018; Clomburg dan Gonzales, 2010). Glukosa dapat pula diolah menjadi bioetanol melalui proses fermentasi. Pemanfaatan glukosa sebagai bahan baku proses produksi etanol lebih disukai, meskipun mikroorganisme yang ada secara alami atau yang telah direkayasa dapat memfermentasi gula campuran (glukosa, xilosa, dan galaktosa) dalam hidrolisat secara berurutan. Berbagai pendekatan rekayasa metabolik telah dicoba untuk mengembangkan mikroorganisme yang mampu memfermentasi gula campuran secara bersamaan. Acher Daniels Midland Company merupakan salah satu produsen etanol terbesar di dunia melalui proses fermentasi glukosa. Perusahaan-perusahaan terkemuka lainnya adalah POET LLC, Valero Energy Corporation, Green Plain Inc., dan Tereos. Seluruh perusahaan ini berlokasi di Amerika Serikat.

Lignoselulosa adalah sumber daya alam yang sangat melimpah di Indonesia dan paling sukar untuk diproses menjadi bahan bakar nabati. Proses konversi lignoselulosa menjadi bahan bakar nabati cair masih dalam tahap pengembangan dan belum secara luas dikomersialkan. Lignoselulosa adalah komponen utama dalam biomassa lignoselulosa, termasuk serat kayu, jerami, dan limbah tanaman lainnya.

Proses konversi lignoselulosa menjadi bahan bakar nabati cair melibatkan beberapa tahap. Tahap pertama adalah tahap yang paling penting, yaitu *pretreatment* (pra-pemrosesan) mengubah lignoselulosa menjadi komponen-komponennya, yaitu selulosa, hemiselulosa dan lignin. Kemudian hidrolisis enzimatik, fermentasi mikroba, dan pemisahan produk. Teknologi ini masih dalam pengembangan dan menghadapi beberapa tantangan teknis, ekonomi, dan skalabilitas yang perlu diatasi sebelum dapat diproses secara komersial. Meskipun masih ada kerumitan dalam konversi lignoselulosa menjadi bahan bakar nabati cair, penelitian dan pengembangan dalam bidang ini terus berlanjut. Banyak universitas, lembaga penelitian, dan perusahaan rekayasa di seluruh dunia terlibat dalam upaya untuk mengembangkan teknologi yang

lebih efisien dan ekonomis dalam mengubah lignoselulosa menjadi bahan bakar nabati cair, seperti bioetanol atau bahan bakar hidrokarbon.



Gambar 8 Bagan pemanfaatan minyak dan lemak nabati untuk sektor non-energi.

Minyak dan lemak nabati juga merupakan sumber daya alam yang sangat potensial untuk diubah menjadi berbagai bahan oleokimia melalui berbagai proses yang ditampilkan pada Gambar 8. Pohon industri pemanfaatan minyak dan lemak nabati untuk sektor non-pangan dilakukan melalui berbagai proses untuk menghasilkan berbagai produk antara yang pada gilirannya nanti dapat digunakan sebagai bahan baku untuk produk jadi lainnya.

3. INDONESIA PRODUSEN MINYAK NABATI TERBESAR DUNIA

Indonesia adalah negara penghasil minyak nabati terbesar di dunia, yang didominasi oleh produksi minyak kelapa sawit. Pada tahun 2022, Indonesia memproduksi 51,3 juta CPO per tahun, dan 4,41 juta ton CPKO per tahun. Fakta ini menempatkan Indonesia sebagai penghasil minyak sawit terbesar di dunia. Selain itu, Indonesia juga merupakan rumah bagi tumbuhan penghasil minyak dan lemak nabati lainnya yang memiliki potensi yang sangat besar untuk diolah lebih lanjut menjadi bahan bakar terbarukan dan komponen oleokimia. Sumber minyak dan lemak nabati yang sangat potensial itu di antaranya adalah kelapa, biji pala, mabai, nyamplung, jarak pagar, biji kapas, biji kapok, kedelai, biji karet, kemiri, kemiri sunan, malapari, dan lain-lain. Tabel 1 memperlihatkan kandungan asam lemak pada beberapa minyak nabati yang dapat ditemukan di Indonesia.

Saat ini, hanya sawit dan kelapa yang memiliki sistem produksi yang paling sistematis dan memiliki organisasi pengelola yang sangat baik sehingga saat ini hanya minyak dan lemak nabati dari sawit dan kelapa saja yang dapat diperkirakan produktivitas. Produktivitas minyak nabati lainnya tidak bisa diperkirakan jumlahnya karena belum diproduksi secara sistematis. Namun karena sumber-sumber minyak nabati yang ada; baik minyak nabati untuk pangan maupun minyak nabati non-pangan; tersebar di seluruh Indonesia, maka Indonesia memiliki tantangan besar untuk memperkirakan produksi total seluruh minyak nabati Indonesia. Jika dilihat dari sebaran habitat sumber-sumber minyak dan lemak nabati yang diperlihatkan pada Tabel 1, Indonesia memiliki peluang yang sangat besar untuk menjadi negara terkemuka di dunia dalam memproduksi minyak dan lemak nabati. Minyak dan lemak nabati ini bukan saja merupakan bahan baku utama untuk memproduksi bahan bakar nabati, tetapi juga bahan baku untuk oleokimia. Memanfaatkan sumber daya minyak nabati ini akan memberikan sumbangan yang sangat signifikan terhadap ketahanan dan kedaulatan energi nasional.

Tabel 1. Komposisi asam lemak dalam beberapa minyak dan lemak nabati Indonesia (Soerawidjaja, 2023)

Asam Lemak	Kelapa	PKO	PO	Mabai	Nyam- plung	Jarak Pagar	Biji Kapas	Biji Kapok	Biji Karet	Kemiri	Kemiri Suman
Kaproat, C6:0	0 - 1	trace									
Kaprilat, C8:0	5 - 10	3 - 6									
Kaprat, C10:0	5 - 10	3 - 5									
Laurat, C12:0	43 - 53	40 - 52	trace								
Miristat, C14:0	15 - 21	14 - 18	0 - 2	0 - 2		0 - 0,5	0,7 - 3	0 - 0,25			
Palmitat, C16:0	7 - 11	6 - 10	30 - 48	3 - 8	15 - 19	12 - 17	18 - 45	20 - 24	7 - 11	5,5	9,7
Stearat, C18:0	2 - 4	1 - 4	3 - 6	2 - 9	6 - 12	5 - 7	1 - 8	2 - 5	8 - 12	6,7	8,5
Oleat, C18:1	6 - 8	9 - 16	38 - 44	44 - 72	48 - 53	37 - 63	9 - 32	21 - 22	17 - 30	10,5	11,6
Linoleat, C18:2		1 - 3	9 - 12	9 - 18	15 - 24	19 - 40	31 - 52	33 - 58	33 - 39	48,5	19,4
Linolenat, C18:3	1 - 3			0 - 5				0 - 0,5	21 - 26	28,5	
Arahidat, C20:0	trace	0 - 0,3	0 - 1	2 - 5		0 - 0,3	0 - 2	0 - 1	0 - 1,3		
Gadoleat, C20:1				0 - 12							
Behenat, C22:0		trace		4 - 5				0 - 0,5			
Sterkulat								10 - 15			
Eleostearat											50,7

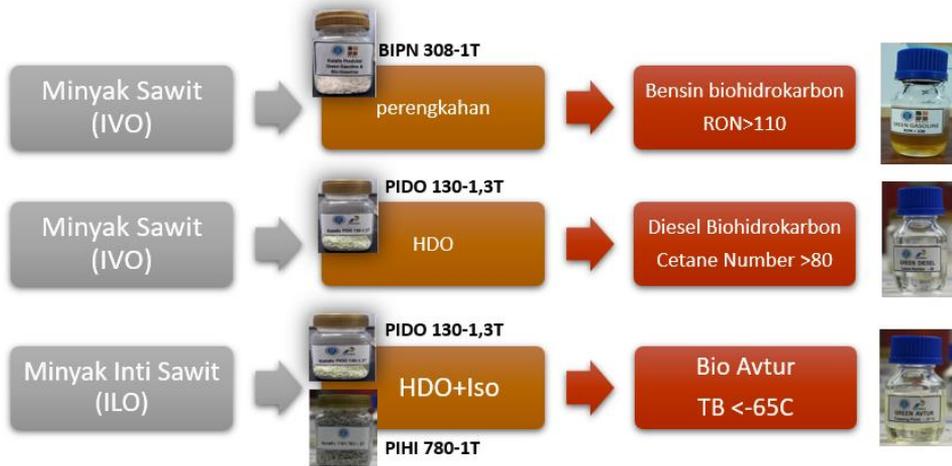
4. PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PRODUKSI BAHAN BAKAR NABATI DI ITB

Bagian ini akan menjelaskan pengembangan katalis dan teknologi proses produksi *bahan bakar nabati cair* yang telah dan sedang dilakukan di Institut Teknologi Bandung. Seluruh proses yang dikembangkan adalah proses untuk mengolah minyak sawit dan minyak inti sawit menjadi bahan bakar nabati cair, karena di Indonesia saat ini hanya minyak sawit dan minyak inti sawit yang diproduksi secara sistematis dan melembaga secara masif. Sebagian dari proses yang dikembangkan telah komersial, sebagian lagi baru sampai tahap *pilot plant* dan penelitian dan pengembangan.

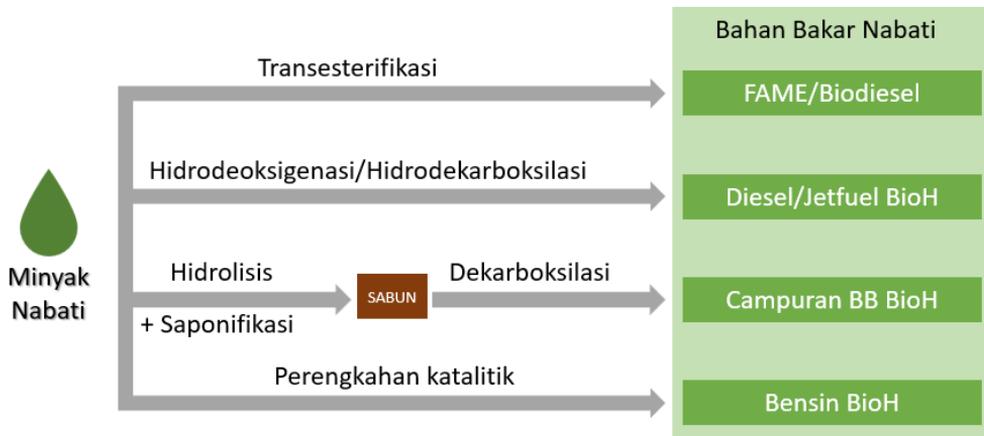
Terdapat dua aspek pengembangan penting yang dilakukan dalam mengembangkan teknologi konversi bahan bakar nabati. Pertama adalah pengembangan teknologi produksi katalis, dan kedua, pengembangan teknologi proses konversi minyak dan lemak nabati menjadi bahan bakar cair nabati.

Katalis adalah bahan yang dapat mempercepat dan mengarahkan reaksi kimia. Laboratorium Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis FTI ITB (Lab TRKK ITB) dan Pusat Rekayasa Katalisis ITB (PRK ITB) merupakan institusi terkemuka di Indonesia yang telah bekerja sama dengan berbagai institusi penelitian dan industri nasional dalam pengembangan katalis. Bekerja sama dengan RTI (Riset, Teknologi dan Inovasi) Pertamina dan Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS), Lab TRKK ITB dan PRK ITB telah mengembangkan berbagai jenis katalis untuk produksi bahan bakar nabati dari minyak sawit dan minyak inti sawit.

Teknologi proses konversi minyak nabati menjadi bahan bakar nabati yang dikembangkan di Lab TRKK ITB dan PRK ITB dapat dirangkum dalam Gambar 9. Sedangkan proses-proses produksi bahan bakar nabati yang telah dan sedang dikembangkan di ITB diperlihatkan pada Gambar 10.



Gambar 9. Katalis untuk produksi bahan bakar nabati yang dikembangkan di Lab TRK ITB dan PRK ITB



Gambar 10 Proses produksi bahan bakar nabati berbasis sawit yang dikembangkan di ITB

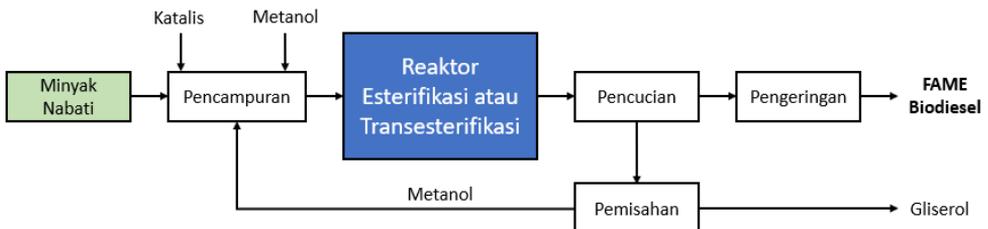
Saat ini, teknologi proses konversi minyak dan lemak nabati menjadi bahan bakar nabati yang dikembangkan di ITB pada dasarnya terbagi menjadi 4 bagian. Pertama, pengembangan proses produksi biodiesel melalui proses transesterifikasi minyak sawit. Kedua, proses produksi diesel biohidrokarbon dan avtur biohidrokarbon (bioavtur) melalui proses hidrideoksigenasi dan hidridekarboksilasi minyak sawit dan minyak inti sawit. Ketiga, proses produksi campuran bahan bakar biohidrokarbon melalui proses hidrolisis, saponifikasi dan dekarboksilasi minyak dan lemak nabati. Keempat, proses perengkahan minyak sawit untuk menghasilkan bensin sawit. Penelitian dan pengembangan katalis dan proses produksi dijelaskan secara ringkas pada rangkaian subbab berikut.

4.1. Proses Produksi Biodiesel

Biodiesel merupakan salah satu alternatif pengganti bahan bakar fosil yang dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan. Biodiesel termasuk dalam bahan bakar jenis oksigenat, karena pada dasarnya biodiesel adalah ester yang molekulnya mengandung oksigen. Biodiesel dapat dihasilkan dari berbagai jenis minyak nabati seperti minyak kelapa sawit, minyak jagung, minyak kedelai, dan lain-lain. Salah satu metode produksi biodiesel yang paling umum digunakan adalah proses transesterifikasi.

Proses transesterifikasi merupakan reaksi kimia antara minyak nabati dengan alkohol (biasanya metanol) yang dilakukan dengan bantuan katalis. Hasil dari proses transesterifikasi ini adalah ester metil (biodiesel) dan gliserol. Biodiesel yang dihasilkan dari proses transesterifikasi dapat digunakan sebagai bahan bakar diesel tanpa modifikasi pada mesin diesel.

Karena minyak sawit sebagian besar mengandung asam palmitat, asam stearat, asam oleat dan asam linoleat (80%-95%), maka minyak sawit sangat cocok untuk digunakan sebagai bahan baku biodiesel.

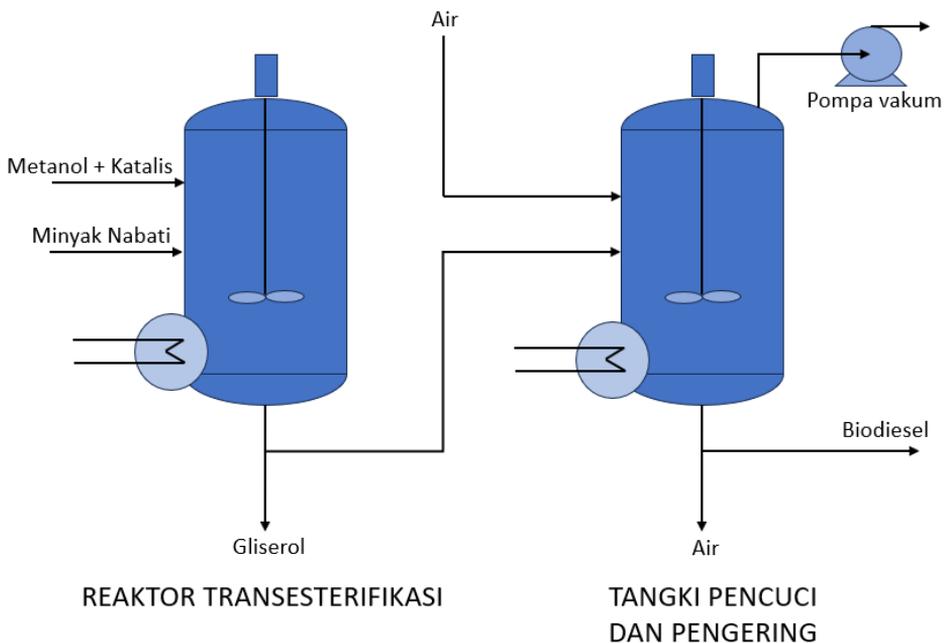


Gambar 11 Diagram alir proses pembuatan biodiesel (Prakoso dkk, 2008).

Gambar 11 adalah diagram alir pembuatan biodiesel dari minyak nabati. Campuran reaktan yang terdiri dari minyak nabati, misalnya minyak sawit, dan alkohol (metanol) dalam perbandingan tipikal 1:3 dan katalis (biasanya natrium hidroksida atau kalium hidroksida) dalam jumlah 0,5-1% dari berat minyak sawit direaksikan dalam sebuah reaktor sintesis biodiesel. Reaktor yang dikembangkan dapat berupa reaktor tangki partaian, atau reaktor kontinu. Reaktor kemudian dipanaskan pada suhu sekitar 60-70 °C selama 1-2 jam. Dalam proses ini, minyak sawit bereaksi dengan alkohol untuk menghasilkan ester metil (biodiesel) dan glycerol. Biodiesel yang dihasilkan dari proses transesterifikasi masih mengandung beberapa zat pengotor, seperti air, asam lemak bebas, dan natrium hidroksida. Oleh karena itu,

biodiesel harus diolah lebih lanjut untuk menghilangkan pengotor tersebut. Biodiesel yang sudah bersih dan murni dapat disimpan dalam tangki penyimpanan atau dikemas dalam botol atau drum untuk penjualan.

Implementasi biodiesel di Indonesia diawali oleh usaha Dr. Tatang H. Soerawidjaja, Dr. Tirto Prakoso dan Dr. Iman K. Reksowardojo yang melakukan berbagai riset dan pengembangan di bidang produksi biodiesel melalui proses transesterifikasi minyak sawit dengan metanol. Mereka berhasil merancang sebuah pabrik biodiesel mini yang merupakan sistem dua reaktor tangki pada temperatur berbeda, untuk mereduksi kandungan gliserol terikat pada produk dan berhasil meminimalkan biaya investasi pembangunan pabrik biodiesel untuk rakyat (Prakoso dkk., 2008). Gambar 12 memperlihatkan diagram proses produksi biodiesel dengan sistem dua tangki. Tangki pertama digunakan sebagai reaktor partaian untuk proses transesterifikasi minyak nabati dan metanol menjadi ester asam lemak, sedangkan tangki kedua digunakan sebagai pencuci dan pengering produk biodiesel.



Gambar 12 Diagram proses unit produksi biodiesel sistem dua tangki (Prakoso, dkk, 2008).

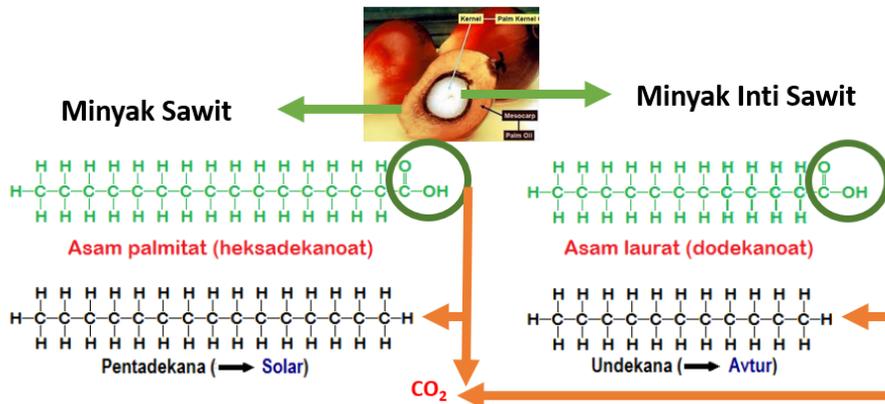
Penelitian bagaimana implementasi substitusi sebagian diesel fosil dengan biodiesel pada motor bakar juga dilakukan dan menjadi usaha awal bagi penggunaan biodiesel secara luas di Indonesia. Saat ini, Indonesia telah mengimplementasikan penggunaan bahan bakar biodiesel B35 (yang merupakan campuran 35%-volume biodiesel dan 65%-volume diesel fosil).

Dalam skenario realisasi, pangsa energi terbarukan dalam bauran energi primer diproyeksikan menjadi 15% (atau setara dengan 39 MTOE) pada tahun 2025, yang sebagian besar berasal dari pembangkit listrik (sekitar 2/3 bagian). Bagian lainnya (sekitar 1/3) termasuk biodiesel yang terhitung sekitar 10 MTOE atau setara menjadi 11 juta kiloliter dalam volume. Pada tahun 2050, pangsa energi terbarukan untuk pembangkit listrik masih menjadi bagian mayoritas yang harus disubstitusi, meskipun peningkatan biodiesel menjadi 29 MTOE atau setara dengan 32 juta kiloliter (Tampubolon, dkk., 2020). Untuk mengejar komitmen yang telah ditetapkan, pemerintah mengusahakan untuk mengimplementasikan B35 (bahan bakar campuran 35% biodiesel dan 65% diesel fosil) pada tahun 2023, yang menjadikan Indonesia sebagai negara terdepan di dunia dalam implementasi bahan bakar nabati. Dengan bertambahnya porsi biodiesel dalam bahan bakar nabati Indonesia, maka kebutuhan minyak sawit yang dialokasikan untuk biodiesel dan metanol semakin meningkat. Salah satu komoditas penting dalam proses produksi biodiesel adalah katalis natrium metoksida. Lab TRKK ITB dan PRK ITB saat ini tengah mengembangkan katalis natrium-metoksida untuk mengkatalisa reaksi transesterifikasi menjadi biodiesel.

4.2. Proses Produksi Diesel dan Avtur Biohidrokarbon

Minyak sawit dan minyak inti sawit pada dasarnya adalah hidrokarbon yang terkontaminasi oleh oksigen atau CO_2 , seperti yang diperlihatkan pada Gambar 13. Asam palmitat adalah asam lemak yang terkandung dalam minyak sawit yang komposisinya dapat mencapai 48%. Jika O_2 atau CO_2 dalam molekul asam lemak dapat disingkirkan, maka akan dihasilkan hidrokarbon atau biohidrokarbon. Jika CO_2 yang terkandung dalam molekul asam palmitat disingkirkan, maka akan diproduksi biohidrokarbon pentadekana. Pentadekana adalah hidrokarbon yang merupakan fraksi penting dalam bahan bakar diesel. Asam lemak utama yang terdapat pada minyak inti sawit adalah asam laurat yang juga mengandung oksigen pada molekulnya. Jika CO_2

pada molekul asam laurat disingkirkan, maka akan diperoleh undekana, yang merupakan komponen utama dalam bahan bakar avtur. Pentadekana dan undekana adalah hidrokarbon yang molekulnya sudah mirip dengan molekul hidrokarbon bahan bakar fosil, sehingga bahan bakar biohidrokarbon ini juga disebut sebagai bahan bakar bertipe *drop-in*, karena bisa langsung digunakan dalam *internal combustion engine* tanpa dicampur dengan bahan bakar fosil.



Gambar 13 Proses reaksi dekarboksilasi minyak sawit dan minyak inti sawit untuk menghasilkan biohidrokarbon.

Proses penyingkiran CO₂ atau O₂ dari molekul hidrokarbon dapat dilakukan melalui proses katalitik dengan menggunakan hidrogen, pada temperatur 375-400 °C dan tekanan sekitar 40 bar. Proses penyingkiran CO₂ dan O₂ berbantuan katalis dan hidrogen ini berturut-turut disebut hidredekarboksilasi (HDCO) dan hidredeoksigenasi (HDO). Bahan yang sering digunakan sebagai katalis reaksi HDCO dan HDO adalah katalis berbasis Nikel dan Molibdenum (Ni-Mo) dan katalis berbasis Kobalt dan Molibdenum (Co-Mo). Katalis Ni-Mo pertama kali dikembangkan oleh Houdry dan Pines, dua orang insinyur kimia yang bekerja di perusahaan milik Houdry pada awal abad ke-20. Pada tahun 1926, Houdry dan Pines mengembangkan katalis Ni-Mo untuk digunakan dalam proses hydrotreating. Proses *hydrotreating* adalah proses yang digunakan dalam industri minyak dan gas untuk menghilangkan zat-zat yang tidak diinginkan, seperti senyawa sulfur organik, nitrogen organik, dan oksigen organik dari produk minyak mentah atau produk minyak lainnya. Katalis Ni-Mo yang mereka kembangkan terbukti sangat efektif dalam mengurangi kandungan zat-zat tersebut (Ocelli dan Ferrari, 2010).

Penemuan katalis Ni-Mo oleh Houdry dan Pines memberikan kontribusi besar terhadap industri minyak dan gas, karena memungkinkan produksi bahan bakar yang lebih bersih dan berkualitas tinggi dengan mengurangi kandungan zat-zat pencemar. Katalis Ni-Mo masih digunakan secara luas dalam proses *hydrotreating* hingga saat ini.

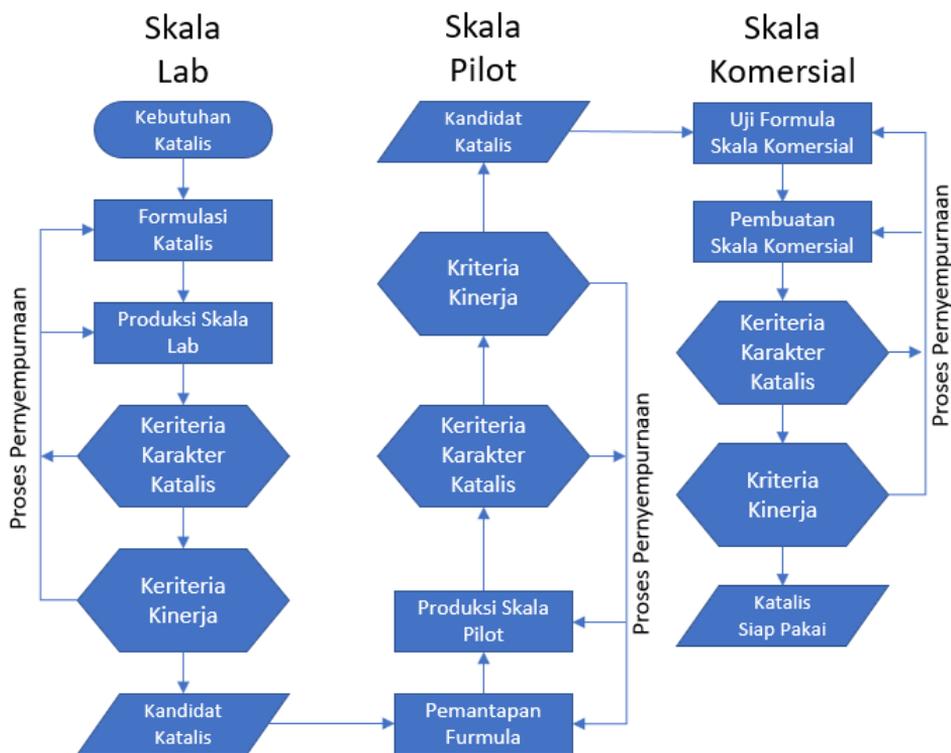
Pengembangan katalis

Bekerja sama dengan *Research, Technology, and Innovation* PT Pertamina (Persero), Lab TRKK dan PRK ITB mengembangkan katalis HDO dan HDCO minyak sawit dan minyak inti sawit. Katalis yang dikembangkan adalah katalis berbasis Ni dan Mo yang memang adalah katalis tipikal untuk reaksi-reaksi pengolahan hidro.

Sebenarnya kerja sama penelitian pengembangan katalis pengolahan hidro ini telah berlangsung sejak 2005, ketika Lab TRKK ITB ditantang oleh Ir. Suroso, Direktur Pengolahan PT Pertamina saat itu, untuk mengembangkan katalis untuk proses pengolahan hidro nafta di kilang minyak milik PT Pertamina (Persero). Kerja sama penelitian ini berlangsung hingga PT Pertamina dan Lab TRKK ITB berhasil melakukan uji coba komersial katalisnya di reaktor pengolahan hidro nafta di kilang RU 2 Dumai Pertamina pada tahun 2011. Sejak saat itu hingga kini, katalis PITN (singkatan dari *Pertamina ITB Treating Naphtha*) hasil pengembangan bersama Pertamina – ITB digunakan dalam setiap reaktor pengolahan hidro di seluruh kilang milik Pertamina.

Katalis PITN ini ternyata juga dapat digunakan untuk mengonversi minyak sawit dan minyak inti sawit menjadi biohidrokarbon. Berdasarkan hal itulah kemudian RTI Pertamina bersama dengan Lab TRKK ITB melakukan kerja sama penelitian guna melakukan pengembangan lanjut katalis PITN agar dapat secara efektif mengkatalisa reaksi hidredeoksigenasi minyak sawit dan minyak inti sawit menghasilkan biohidrokarbon. Minyak sawit akan terkonversi menjadi diesel biohidrokarbon, dan minyak inti sawit akan terkonversi menjadi bahan baku avtur biohidrokarbon. Katalis ini diberi nama PIDO (*Pertamina ITB Deoksigenasi*). Perancangan dan pengembangan katalis ini berlangsung sejak tahun 2012 bekerja sama dengan RTI Pertamina, dan telah menghasilkan seorang doktor, beberapa orang master dan sarjana teknik kimia.

Proses pelaksanaan penelitian dan pengembangan katalis serta uji aktivitas katalis dari skala laboratorium hingga uji coba skala komersial mengikuti skema penelitian yang digambarkan pada Gambar 14.



Gambar 14 Skema penelitian dan pengembangan katalis.

Pengembangan dan perancangan katalis selalu dimulai dari penelitian eksploratif sintesis katalis yang dapat menghasilkan katalis yang aktif dalam mengkatalisa reaksi tertentu dalam skala laboratorium. Data kebutuhan katalis dapat berasal dari pihak industri pengguna, atau melalui analisis deduktif maupun induktif. Kemudian konsep katalis yang akan dikembangkan disusun melalui studi paten dan pustaka. Matriks karakteristik katalis yang akan dikembangkan kemudian disusun dan dipelajari dengan saksama. Pada tahap ini, biasanya analisis keekonomian katalis juga bisa dilakukan dan rencana pengembangan katalis kemudian dapat disusun dengan lengkap.

Langkah penting berikutnya adalah proses penelitian eksploratif skala laboratorium berupa proses formulasi katalis dan pembuatan katalis. Pada

skala laboratorium ini biasanya katalis diproduksi pada skala 10-15 gram katalis untuk setiap variannya, yang ditujukan untuk proses karakterisasi dan uji aktivitas. Proses karakterisasi katalis dan uji aktivitas katalis dilakukan di LabTRKK ITB dan PRK ITB dengan menggunakan seluruh infrastruktur yang dimilikinya. Jika karakteristik katalis yang diproduksi pada skala laboratorium atau kinerja katalis yang diuji tidak sesuai dengan target yang diinginkan, maka proses formulasi katalis harus dilakukan kembali sampai formula yang menghasilkan katalis yang berkarakteristik dan berkinerja sesuai dengan target perancangan dapat dihasilkan. Katalis yang memiliki karakteristik dan kinerja yang telah sesuai dengan target pengembangan adalah kandidat katalis yang akan dikembangkan lebih lanjut. Tahap akhir proses formulasi ini adalah tahap pemantapan formula yang bertujuan untuk menghasilkan formula pembuatan katalis yang reproduksibel.

Katalis terbaik kemudian digunakan pada tahap berikutnya, yaitu pada skala pilot. Laboratorium TRKK ITB memiliki unit produksi katalis untuk pendidikan yang berkapasitas 5 kg/batch. Pada skala ini katalis terbaik yang diperoleh dari tahap berikutnya dicoba untuk diproduksi pada skala yang lebih besar. Uji aktivitasnya pun dilakukan pada skala pilot. Gambar 15 memperlihatkan Pabrik Katalis Pendidikan yang dibangun di Lab TRKK ITB atas biaya Kementerian Riset dan Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia (Kemenristek Dikti RI) pada tahun 2017.

Katalis purwarupa ini kemudian harus diuji pada skala produksi yang lebih besar. Unit produksi katalis skala pilot yang dimiliki oleh Laboratorium Teknik Reaksi Kimia dan Katalis adalah unit produksi katalis berskala 5 kg per batch. Uji aktivitas katalis yang diproduksi dalam skala pilot ini juga menggunakan unit uji skala pilot. Gambar 16 adalah unit reaktor pilot (*multipurposed pilot reactor*) yang ada di Lab TRKK ITB, sebuah unit reaktor skala pilot milik PT Pertamina (Persero) yang diletakkan di ITB. Pada skala ini, parameter sintesis dan perancangan katalis masih harus ditata ulang dan proses optimasi untuk mendapatkan formula katalis terbaik masih harus dilakukan, namun biasanya formula katalis terbaik tidak akan terlalu berbeda dengan formula katalis terbaik yang dihasilkan pada tahap sebelumnya.



Gambar 15 Pabrik katalis pendidikan di Laboratorium Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis ITB.



Gambar 16 Reaktor pilot di Laboratorium Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis ITB.

Katalis hasil pengembangan skala pilot ini kemudian digunakan untuk uji coba di unit skala besar. Di sinilah peran penting industri yang bersedia untuk bekerja sama dalam melakukan uji coba skala industrial dengan menggunakan unit produksi skala besar yang mereka miliki. Tanpa peran serta industri dalam kegiatan pengembangan ini, uji coba skala industrial ini sangat tak mungkin dilakukan, karena bukan saja membutuhkan biaya yang sangat amat besar, namun juga memiliki potensi kerugian yang sangat besar

jika uji skala industrial ini gagal. Itulah sebabnya, keberhasilan uji coba skala besar ini membutuhkan mitra industri, tokoh rekayasa dan pemimpin industri yang berwawasan untuk menciptakan kemandirian teknologi nasional, berani dan berdeda *merah putih*. Lab TRKK ITB dan PRK ITB sangat beruntung memiliki mitra dari PT Pertamina (Persero) yang memiliki kriteria-kriteria tersebut dan membantu kami dalam melakukan uji coba katalis pada skala industrial, serta PT Clariant Kujang Catalyst yang membantu kami dalam memproduksi katalis dalam skala besar. Pada tahap ini, jika diperlukan, prosedur dan parameter operasi produksi katalis dan proses konversi minyak sawit menjadi bahan bakar nabati masih dapat dioptimasi untuk mendapatkan kondisi terbaik.

Kekayaan intelektual yang dihasilkan dari pelaksanaan penelitian pengembangan ini terkait dengan penyangga katalis, proses impregnasi katalis serta proses produksi diesel dan avtur biohidrokarbon.

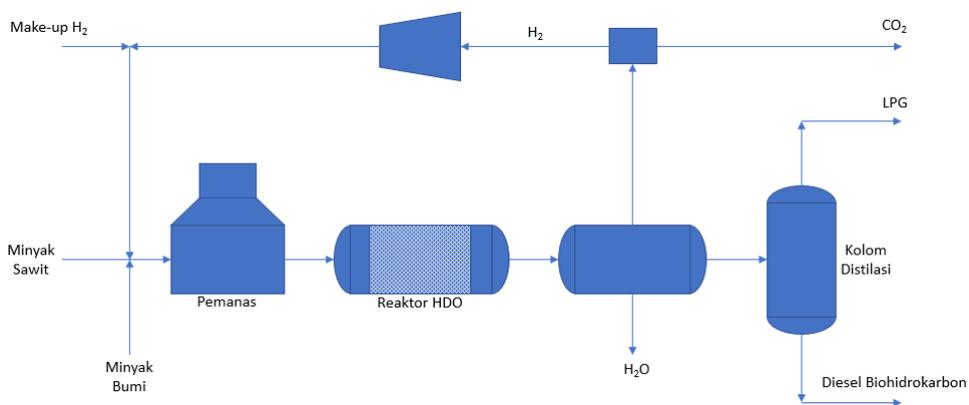
Uji coba produksi diesel biohidrokarbon skala komersial

Untuk mempersiapkan Indonesia dalam rangka menjaga komitmen bangsa untuk substitusi 23% bahan bakar fosil dengan bahan bakar terbarukan pada tahun 2025, dan 5% di antaranya dengan bahan bakar nabati, maka Indonesia harus mampu menyediakan infrastruktur yang dapat digunakan sebagai basis produksi bahan bakar nabati yang dibutuhkan. Usaha yang paling cepat dan mudah adalah menggunakan infrastruktur yang telah dimiliki oleh industri energi nasional untuk memproduksi bahan bakar nabati. PT Pertamina (Persero) dan ITB telah melakukan kerja sama untuk mengembangkan katalis konversi minyak sawit menjadi bahan bakar biohidrokarbon (diesel dan avtur biohidrokarbon) sejak 2012 hingga sekarang. Kerja sama penelitian ini terkait pengembangan katalis hidrodoksigenasi minyak nabati berbasis Ni dan Mo. Pengembangan yang dilakukan dimulai dari kegiatan formulasi dan sintesis katalis, mulai dari skala laboratorium hingga skala pilot. Uji aktivitas katalis juga dilakukan melalui kegiatan uji skala laboratorium di Lab TRKK ITB dan Laboratorium RTI Pertamina.

Katalis yang akan diproduksi dalam skala besar, diuji terlebih dahulu di unit reaktor pilot di Lab TRKK ITB dan RTI Pertamina. Reaktor pilot yang digunakan adalah sebuah reaktor serba guna (*multi purposed pilot reactor*). ITB memiliki aksesibilitas yang sangat bagus terhadap reaktor pilot seperti yang

ditampilkan pada Gambar 16. Reaktor ini adalah reaktor milik Pertamina yang ditaruh di ITB untuk kegiatan uji aktivitas berbagai katalis. Dari pengalaman beberapa kali uji, telah dapat disimpulkan bahwa katalis yang diuji pada reaktor pilot ini akan memiliki kinerja yang setara pada skala komersial. Sehingga hasil uji aktivitas katalis pada reaktor pilot ini merupakan parameter penting yang digunakan sebagai dasar bagi produksi katalis pada skala besar dan uji produksi pada skala komersial.

Pada tahun 2015, bekerja sama dengan RTI PT Pertamina (Persero), Lab TRKK ITB melakukan uji coba produksi diesel biohidrokarbon di unit NHDT RU 2 Dumai. Sejumlah RBDPO (*refined, bleached, deodorized palmoil*) dicampur dengan fraksi diesel yang akan mengalami pengolahan hidro diumpankan ke unit DHDT RU 2 Dumai. Reaksi diselenggarakan pada temperatur 375 °C dan tekanan 20-30 bar. Uji coba produksi diesel biohidrokarbon ini disebut sebagai proses produksi dengan skema *co-processing*, karena minyak sawit diumpankan bersama-sama dengan bahan baku diesel fosil dan diolah bersama-sama di unit komersial milik Pertamina yang telah ada. Gambar proses produksi diesel biohidrokarbon dengan skema *co-processing* ini digambarkan pada Gambar 17.



Gambar 17 Diagram alir proses produksi diesel biohidrokarbon dengan skema *co-processing*.

Minyak sawit diumpankan ke dalam unit pengolahan hidro (*hydrotreating*) bersama-sama dengan komponen minyak bumi yang akan diolah. Pada uji coba yang telah dilakukan di RU 2 Dumai, minyak sawit yang diumpankan berupa RBDPO (*refined, bleached, deodorized palm oil*). Karena proses hidrodoksigenasi ini memerlukan gas hidrogen, gas hidrogen daur ulang dan gas hidrogen *make-up* juga diumpankan bersama-sama. Umpan dipanaskan

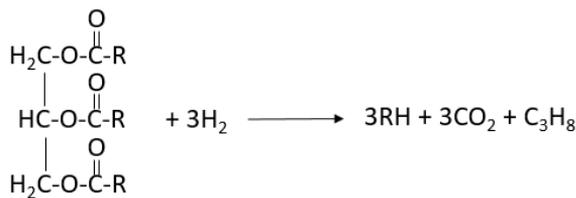
terlebih dahulu hingga temperatur sekitar 300 °C sebelum diumpankan ke dalam reaktor pengolahan hidro. Reaksi pengolahan hidro yang terjadi dalam reaktor berkisar pada temperatur 375 °C dan tekanan 20-30 bar. Karena reaksi hidredeoksigenasi atau hidredekarboksilasi adalah reaksi eksotermal, maka temperatur reaktor naik seiring dengan berjalannya reaksi. Hasil reaksi adalah produk yang terdiri dari campuran fraksi diesel biohidrokarbon, diesel fosil, fraksi LPG, air, dan campuran gas CO, CO₂, dan sisa H₂. Campuran produk ini dipisahkan dalam sebuah unit pemisah tiga fasa untuk memisahkan campuran gas, campuran hidrokarbon dan air. Campuran hidrokarbon kemudian dipisahkan lebih lanjut pada kolom distilasi. Campuran gas yang banyak mengandung gas H₂ didaur ulang untuk memanfaatkan kembali gas H₂. Untuk menghindari penumpukan gas CO dan CO₂ di dalam sistem, maka sebagian gas harus dibuang.

Pada uji pertama ini berhasil diperoleh produk campuran diesel fosil dan diesel biohidrokarbon yang diinginkan. Dari uji coba komersial pertama ini banyak sekali pelajaran yang diperoleh. Terdapat beberapa hal yang harus mengalami pengembangan lanjut agar proses produksi diesel biohidrokarbon pada unit komersial di kilang RU 2 Dumai dapat dilakukan dengan lebih baik.

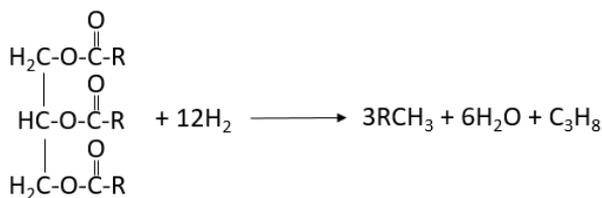
Katalis yang dikembangkan pada awal pengembangan katalis produksi diesel biohidrokarbon adalah katalis dengan moda hidredekarboksilasi (HDCO). Katalis hidredekarboksilasi adalah katalis campuran Co-Mo dan Ni-Mo. Hal ini disebabkan karena ditengarai bahwa reaksi HDCO membutuhkan lebih sedikit hidrogen dibandingkan dengan reaksi HDO seperti yang digambarkan pada Gambar 18. Reaksi HDCO dan HDO ini adalah reaksi yang sangat eksotermal yang dapat membebaskan panas yang besar saat berlangsungnya reaksi kimia. Dengan demikian konsep pengambilan panas yang ditimbulkan selama reaksi kimia berlangsung menjadi sangat penting dalam pengoperasian unit proses ini.

Katalis yang memiliki nisbah Co terhadap Ni yang tinggi dapat mengkatalisa reaksi HDCO minyak nabati (trigeliserida) lebih baik. Gas CO₂ yang terbentuk melalui reaksi ini akan terkonversi menjadi CO dengan hadirnya gas H₂ dalam sistem reaksi kimia melalui reaksi *reverse water gas shift*. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada Gambar 17, gas CO dan CO₂ bersama gas lainnya pada keluaran reaktor kemudian dipisahkan pada unit pemisahan, kemudian didaur ulang, dicampur dengan umpan dan

dimasukkan kembali ke dalam reaktor sebagai umpan. Hal ini mengakibatkan akumulasi CO dan CO₂ pada sistem reaksi kimia. Hadirnya CO di sistem reaksi kimia akan menurunkan aktivitas katalis berbasis Ni-Mo (Vlasova, dkk, 2020).



Reaksi Hidrodekarboksilasi Triglisierida



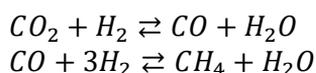
Reaksi Hidrodeoksigenasi Triglisierida

Gambar 18 Reaksi hidrodekarboksilasi dan hidrodeoksigenasi triglisierida.

Karbon monoksida (CO) dapat menurunkan aktivitas katalis Ni-Mo pada reaksi hidrotreating karena adanya reaksi kompetitif antara CO dengan spesies reaktif yang terlibat dalam proses hidrogenasi pada katalis tersebut. Reaksi pengolahan hidro melibatkan penambahan hidrogen (H₂) ke dalam molekul-molekul yang terdapat dalam minyak bumi atau minyak nabati. Katalis Ni-Mo digunakan dalam proses ini untuk meningkatkan laju reaksi hidrogenasi dan mengurangi kandungan senyawa-senyawa sulfur, nitrogen, dan oksigen dalam minyak bumi atau minyak nabati. Namun, ketika CO hadir dalam reaksi pengolahan hidro, ia bersaing dengan hidrogen untuk berinteraksi dengan katalis Ni-Mo. CO memiliki afinitas yang tinggi terhadap permukaan katalis dan dapat teradsorpsi pada situs aktif katalis, menghambat akses hidrogen ke situs-situs reaktif. Proses adsorpsi CO pada katalis ini menghasilkan karbonil-nikel (Ni(CO)₄) yang tidak aktif. Selain itu, CO juga dapat mereduksi oksida-oksida aktif yang terbentuk pada permukaan katalis. Oksida-oksida ini bertindak sebagai spesies reaktif yang terlibat dalam proses hidrogenasi, dan reduksi oleh CO dapat mengubahnya menjadi bentuk yang tidak aktif secara katalitik.

Akibatnya, adanya CO dalam reaksi pengolahan hidro menyebabkan penurunan aktivitas katalis Ni-Mo. Untuk mempertahankan aktivitas katalitik yang optimal, umumnya dilakukan penghilangan karbon monoksida dari umpan reaksi melalui penggunaan unit pemurnian gas atau dengan menambahkan agen pengoksidasi seperti udara untuk mengkonversi CO menjadi CO₂, yang lebih tidak berbahaya dan tidak merusak katalis.

Pada uji coba di RU 2 Dumai, untuk menjaga aras komposisi CO dan CO₂ agar selalu berada pada kondisi yang diinginkan, sebagian gas daur ulang harus dibuang. Secara keseluruhan, hal ini menurunkan efisiensi proses produksi. Adanya gas CO₂ dan H₂ pada sistem reaksi kimia mengakibatkan terjadinya reaksi-reaksi samping *reverse water gas shift* dan reaksi metanasi:



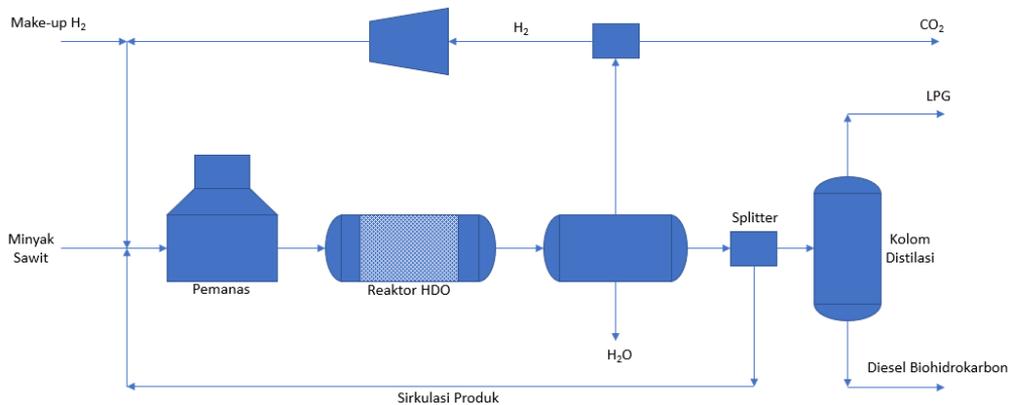
Reaksi-reaksi ini mengkonsumsi hidrogen yang sangat diperlukan dalam reaksi hidrodekarboksilasi untuk memproduksi diesel biohidrokarbon.

Masalah ini kemudian menjadi umpan balik bagi pengembangan katalis berikutnya. Katalis HDCO yang telah dikembangkan kemudian dimodifikasi dengan mengubah kandungan metal pada katalis yang semula lebih banyak mengandung logam Ni yang mempromosikan reaksi HDCO menjadi katalis yang lebih kaya logam Mo yang mempromosikan reaksi HDO.

Katalis generasi kedua ini kemudian diuji-coba lagi di RU 2 Dumai pada tahun 2018-2019. Kali ini kegiatan uji coba komersial melibatkan BPDPKS (Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit) sebagai salah satu institusi pendukung pendanaan uji coba. Kali ini uji coba berhasil mengolah RBDPO dengan moda *co-processing* menghasilkan campuran diesel fosil dan diesel biohidrokarbon dengan kandungan biohidrokarbon sebesar 12,5% (disebut sebagai diesel D12.5).

Keberhasilan ini kemudian mendorong Pertamina dan ITB melakukan uji coba berikutnya, yaitu mengolah 100% RBDPO pada unit komersial. Pada tahun 2020 unit komersial DHDT milik Pertamina di RU 2 Dumai digunakan untuk mengolah RBDPO dengan skema proses *stand-alone* (mandiri) yang mengolah 100% RBDPO dan menghasilkan 100% diesel biohidrokarbon (D100). Gambar 19 memamerkan skema proses mandiri untuk memproduksi

diesel biohidrokarbon dari minyak sawit dengan memanfaatkan unit produksi yang dimiliki oleh kilang RU 2 Dumai.



Gambar 19 Diagram alir proses produksi diesel biohidrokarbon dengan skema *stand-alone* (mandiri).

Perbedaan paling mendasar dari skema mandiri ini dan skema *co-processing* adalah sebagian produk biohidrokarbon didaur ulang dan dicampur dengan bahan baku minyak sawit. Daur ulang biohidrokarbon ini memiliki dua maksud penting, yaitu:

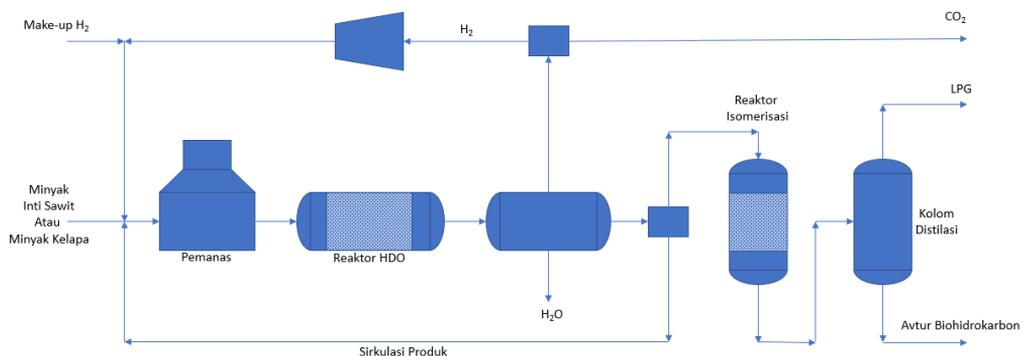
1. untuk mengencerkan bahan baku segar sehingga kalor yang dihasilkan selama reaksi berlangsung tidak terlalu besar, dan kalor tersebut dapat diserap oleh produk yang didaur ulang,
2. untuk meningkatkan kelarutan gas hidrogen pada media reaksi, karena hidrogen lebih mudah larut dalam hidrokarbon, sehingga efektivitas reaksi HDO dapat ditingkatkan.

Saat ini, Pertamina telah mampu dan memiliki kapabilitas yang sangat baik dalam mengolah minyak nabati di unit proses milik Pertamina. Pada dasarnya, kini Pertamina telah siap untuk menyerap dan mengolah minyak sawit dalam jumlah berapapun untuk diproses menjadi bahan bakar diesel biohidrokarbon, baik dengan skema *co-processing* maupun dengan skema mandiri. Saat ini Pertamina tengah membangun *bio-refinery* yang mampu mengolah minyak sawit menjadi bahan bakar biohidrokarbon secara mandiri di Plaju dengan kapasitas 20 MBPD (juta barel per hari). Kilang ini diharapkan siap untuk beroperasi pada tahun 2026. ITB bekerja sama dengan Pertamina, PT Rekayasa Industri, PT Pupuk Sriwidjaja, Lemigas, dan dikoordinasikan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral RI tengah membangun pabrik percontohan untuk memproduksi bahan bakar biohidrokarbon (diesel dan

avtur) berkapasitas 300 L/hari. Pabrik ini direncanakan berlokasi di Kilang RU 4 Cilacap.

Uji coba produksi avtur biohidrokarbon skala komersial

Katalis pengolahan hidro berbasis Ni dan Mo yang telah dikembangkan berdasarkan kerja sama penelitian Pertamina – ITB juga dapat digunakan untuk mengolah trigeliserida laurin atau asam laurat menjadi kerosin, bahan baku avtur. Sumber utama laurin adalah minyak inti sawit dan minyak kelapa. Minyak inti sawit dan minyak kelapa mengandung 50% laurin dan 20% miristin yang dapat dikonversi menjadi bio-kerosin parafinik (minyak tanah) yang merupakan bahan baku avtur. Titik beku kerosin parafinik berkisar pada $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, sehingga kerosin tidak bisa digunakan sebagai bahan bakar pesawat terbang yang biasanya terbang di wilayah stratosfer, yang bertemperatur sekitar $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ sampai $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Untuk menurunkan titik beku kerosin parafinik, maka kerosin parafinik harus diubah menjadi kerosin bercabang (iso-kerosin) melalui proses isomerisasi. Proses isomerisasi yang menghasilkan hidrokarbon bercabang ini berhasil menurunkan titik didihnya hingga $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ sehingga dapat digunakan sebagai bahan bakar pesawat terbang. Secara umum proses pembuatan avtur biohidrokarbon diperlihatkan pada diagram alir proses di Gambar 20.



Gambar 20 Diagram alir proses pembuatan avtur biohidrokarbon dari minyak inti sawit atau minyak kelapa.

Uji produksi avtur biohidrokarbon di RU 4 Cilacap menggunakan bahan baku minyak inti sawit (RBDPKO, *refined, bleached, deodorized palm kernel oil*). Pengembangan katalis dan proses produksi avtur biohidrokarbon dilakukan dengan skema yang serupa dengan pengembangan proses produksi diesel biohidrokarbon. Pengembangan ini dimulai dari pengembangan skala

laboratorium, kemudian ditingkatkan menjadi pengembangan skala pilot yang akhirnya uji coba skala komersial dilakukan di RU 4 Cilacap dengan menggunakan unit DHDT di kilang ini. Kegiatan produksi avtur biohidrokarbon dimulai dari proses evaluasi mendalam karena unit isomerisasi tidak tersedia di kilang RU 4 Cilacap, sehingga campuran optimum avtur fosil dan avtur parafinik biohidrokarbon yang menghasilkan titik beku di bawah $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ perlu ditetapkan.

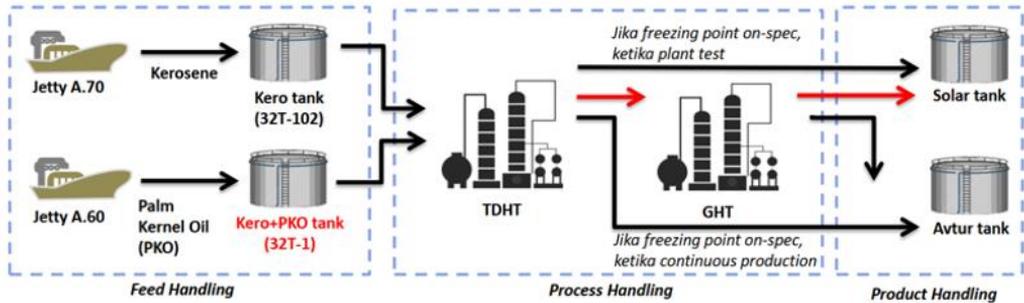
Tim ITB melaksanakan pengujian Katalis PK-230 TD (PITD) menggunakan reaktor pilot Pertamina di ITB sebagai bagian dari dukungan uji coba *co-processing* avtur biohidrokarbon di RU 4 Cilacap. Kegiatan ini menjadi bagian dari kegiatan Pabrik Katalis Pendidikan yang telah dibangun di ITB pada tahun 2017-2018. Kegiatan ini dilaksanakan pada periode 26 Desember 2019 – 16 Maret 2020. Pengujian ini didukung oleh teknisi, peneliti, mahasiswa (S2 – 6 orang, S1-6 orang). Hasil pengujian ini digunakan sebagai basis usulan untuk pengujian *co-processing* avtur biohidrokarbon di Kilang Pertamina RU-4 Cilacap. Dengan memperhatikan kondisi unit proses yang telah dimiliki oleh Pertamina, pengujian *co-processing* J3.0 dengan kerosene menggunakan katalis PITD dapat memberikan bioavtur J3.0 sesuai spesifikasi Jet A-1 (terutama batasan titik beku $-47\text{ }^{\circ}\text{C}$). Gambar 21 memperlihatkan kegiatan uji coba produksi avtur biohidrokarbon dengan menggunakan reaktor pilot yang ada di ITB.



Gambar 21 Kegiatan uji produksi avtur biohidrokarbon dengan reaktor pilot Pertamina di ITB (LPIK ITB, 2021)

Kegiatan uji komersial dengan menggunakan katalis merah-putih di Unit TDHT Kilang RU 4 Cilacap dilakukan dengan skema konsep seperti yang diilustrasikan pada Gambar 22. Uji coba *co-processing* ini diarahkan untuk mengolah minyak inti sawit hingga campuran avtur biohidrokarbon mengandung 2-3% vol minyak inti sawit. Penyediaan katalis (sekitar 20 ton

katalis PK-230-TD (PITD) dan PK-230-HBD (PIDO)), modifikasi unit TDHT di RU IV Cilacap dan bahan mentah pengujian (minyak inti sawit 8000 ton) dilaksanakan oleh PT Pertamina (Persero). Kerosin dari tangki umpan 32T-102 dicampur dengan minyak inti sawit yang berasal dari 32T-1 diolah pada unit pengolahan hidro untuk bahan bakar diesel TDHT.



Gambar 22 Skema *co-processing* untuk produksi avtur biohidrokarbon di RU 4 Cilacap (LPIK ITB, 2021).

Uji produksi avtur biohidrokarbon di RU 4 Cilacap dilaksanakan pada bulan Desember 2020 hingga Mei 2021 dengan rincian aktivitas seperti yang diringkaskan pada Gambar 23.



Gambar 23 Aktivitas uji komersial avtur biohidrokarbon di RU 4 Cilacap (LPIK ITB, 2021)

Spesifikasi avtur biohidrokarbon yang dihasilkan dari uji coba komersial (J2.0 dan J2.4) diperlihatkan pada Tabel 2.

Beberapa catatan dalam kegiatan uji bioavtur yang baru terbatas menghasilkan produk J-2.4 sebagai berikut: Unit TDHT RU IV Cilacap saat ini masih belum memiliki unit isomerisasi sehingga RBDPKO yang diproses masih memiliki titik beku (*freezing point*) di atas 0 °C sehingga membatasi

jumlah porsi nabati yang dapat dicampurkan pada kerosene/avtur. Mengingat masih bersifat uji coba, injeksi RBDPKO masih memanfaatkan metode manual tanpa *control valve* sehingga sulit dicapai porsi injeksi yang stabil. J-2.4 adalah batas maksimum yang didapat dengan metode saat ini. RBDPKO saat ini masih diproduksi dalam skema *block mode* dengan RBDPO sehingga terdapat potensi kontaminasi RBDPO yang meningkatkan titik beku produk.

Tabel 2 Spesifikasi produk Avtur biohidrokarbon J2.0 dan J2.4.

Parameter	Satuan	J-2	J-2.4	Jet A-1
Keasaman total	mgKOH/g	0,001	0,004	0,015
Densitas @15	Kg/m ³	779,5	788,4	775-840
Aromatik	%vol	18,2	17,6	Max 25
Sulfur total	%berat	<0,01	<0,01	Max 0,3
Merkaptan	ppm	0,0015	<30	Max 30
Distilasi	°C			
IBP		155	148	Max 205
10%		172	163	
50%		196	185	
90%		228	216	
FBP		258	245	Max 300
Titik beku	°C	-50	-50	Max -47
Titik penguapan	°C	44	42	Max 38
Color Saybolt		+27	+26	TBR
Partikulat	mg/L	0,55	0,1	Max 0,1
Titik pengasapan	mm	22	25	Min 18
Naftalen	%vol	1,2	0,23	Max 3
Getah	mg/100ml	2	2	Max 7

Uji statik dan uji terbang avtur biohidrokarbon

Produksi avtur J2.4 terlaksana pada tahun 2021 sesuai dengan rencana yang diringkaskan pada Gambar 23. Uji statis di *Garuda Maintenance Facility*. Pengujian statik ini adalah kegiatan menguji beberapa parameter prestasi satu mesin *turbofan* yang dipasang pada fasilitas observasi tertentu (*engine test cell*). Jenis mesin *turbofan* yang akan diuji adalah dari tipe GE CFM56 yang banyak dipakai pada varian pesawat udara Boeing B737. Fasilitas *test cell* dilengkapi dengan dua tangki bahan bakar yang selanjutnya dihubungkan dengan jaringan pipa untuk mensuplai bahan bakar pada mesin yang sedang diuji.

Pengujian akan dilaksanakan untuk produk avtur biohidrokarbon yang diproduksi di RU 4 Cilacap. Uji dirancang membandingkan kinerja jet A1 (100% fosil) dengan avtur J2.4 menggunakan mesin CFM 56.

Hasil pengujian dilaporkan bahwa tidak ditemukan perbedaan saat mengoperasikan mesin CFM56-3 pada saat penggunaan Jet A1 dan Bioavtur J2.4 (Nilai SFC, Thrust, Fuel Flow dan Nilai Exhaust Gas Temperature). Hasil pengujian parameter di *test cell* berkisar antara 0,1%-0,6%.

Hasil analisis bahan bakar Bioavtur J2.4 telah memenuhi spesifikasi standar (ASTM D1655) dan hasil uji statik, Tim Uji Terbang ITB menindaklanjuti kegiatan ini dengan melaksanakan uji terbang dengan pesawat CN-235-220 bekerja sama dengan PT Dirgantara Indonesia. Uji terbang ini dilaksanakan pada periode Agustus–September 2021. Pada pengujian ini bioavtur J2.4 akan diisikan pada tangki di sayap sebelah kanan, sedang tangki pada sayap sebelah kiri akan diisi dengan avtur Jet A1.

Uji terbang dengan menggunakan pesawat CN235 menggunakan bahan bakar avtur biohidrokarbon J2.4. Uji terbang ini didukung oleh BDPKS, PT Pertamina (Persero), rekan sejawat dari Laboratorium Motor Bakar FTMD ITB (Dr. Iman K. Reksowardojo, Dr. Rais Zain, Dr. Firman Hartono, Ir. Sulisyto Atmadi M.Sc., Ir. Fadzar Vira Caryanto, MM.) dan PT Dirgantara Indonesia. Gambar 24 memperlihatkan kegiatan pada saat uji terbang pesawat CN235 dengan menggunakan bahan bakar avtur J2.4.



Gambar 24 Kegiatan uji statik dan uji terbang Bandung-Jakarta dengan CN235 menggunakan avtur biohidrokarbon J2.4.

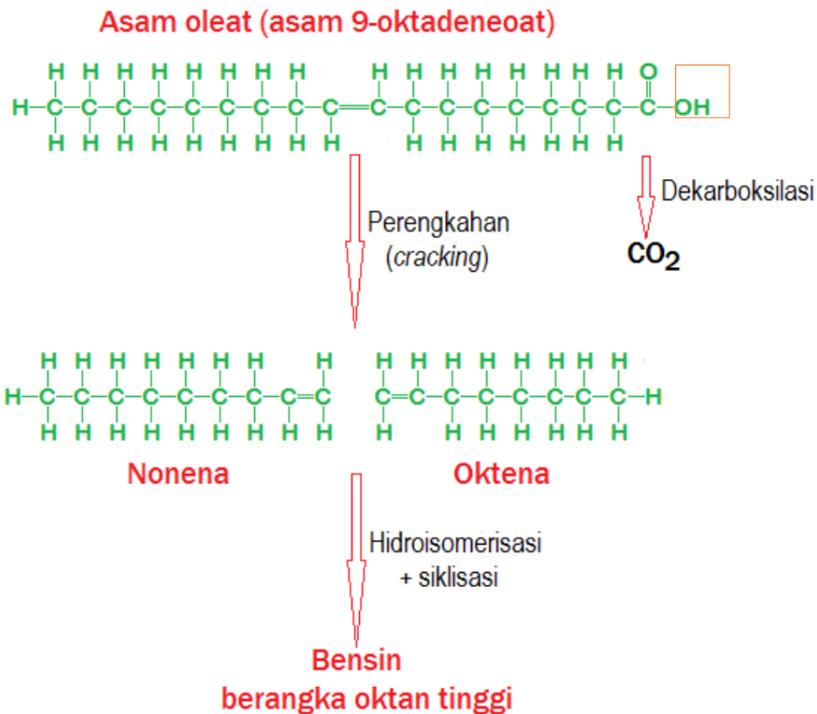
Keberhasilan tersebut merupakan tahap awal dalam upaya meningkatkan kontribusi avtur biohidrokarbon pada subsektor transportasi udara dalam rangka meningkatkan ketahanan dan kemandirian energi nasional. Kegiatan ini tercantum dalam Proyek Strategis Nasional (PSN) Industri Katalis Hilir dan Bahan Bakar Biohidrokarbon yang dikoordinasikan oleh Kementerian ESDM. Peraturan Menteri ESDM Nomor 12 Tahun 2015 mensyaratkan pencampuran BBN dengan avtur sebesar 3% pada tahun 2020, dan 5% pada tahun 2025. Fakta ini memperlihatkan bahwa Indonesia tengah berjalan pada arah yang benar dalam mengimplementasikan bahan bakar nabati sebagai substitusi bahan bakar fosil, dan Indonesia masih mengharapkan dukungan semua seluruh pemangku kepentingan dalam tahapan selanjutnya, termasuk dalam penyusunan peta jalan usaha komersialisasi produksi bahan bakar nabati. Di masa yang akan datang, akan dilakukan uji produksi avtur biohidrokarbon dengan konsentrasi biohidrokarbon yang lebih tinggi setelah unit isomerisasi di RU 4 Cilacap selesai dibangun.

Pada saat yang sama, sebuah unit proses percontohan untuk memproduksi diesel dan avtur biohidrokarbon berkapasitas 300 L/hari sedang dibangun di Cilacap. Unit percontohan ini adalah unit produksi bahan bakar nabati dengan proses HDO dan menggunakan katalis yang dirancang dan dikembangkan secara mandiri oleh ITB dan Pertamina. Proyek pembangunan unit percontohan produksi bahan bakar nabati ini adalah kerja sama antara ITB dengan PT Pertamina, PT Rekayasa Industri, PT Pupuk Sriwidjaja, dan Lemigas - Kementerian ESDM RI. Unit ini akan dibangun di kawasan kilang RU 4 Cilacap.

4.3. Proses Produksi Bensin Sawit

Perengkahan minyak nabati menjadi bensin sawit

Bensin sawit diproduksi melalui proses perengkahan minyak sawit pada temperatur 500-550 °C dan tekanan atmosferik. Gambar 25 menunjukkan reaksi perengkahan minyak sawit yang banyak mengandung asam oleat menghasilkan bensin berangka oktan tinggi. Reaksi perengkahan ini dikatalisa oleh katalis berbasis zeolit. Katalis zeolit yang dikembangkan adalah zeolit ZSM-5 (Makertihartha, dkk., 2020a; Makertihartha, dkk., 2020b).



Gambar 25 Perengkahan minyak nabati menjadi bensin berangka oktan tinggi.

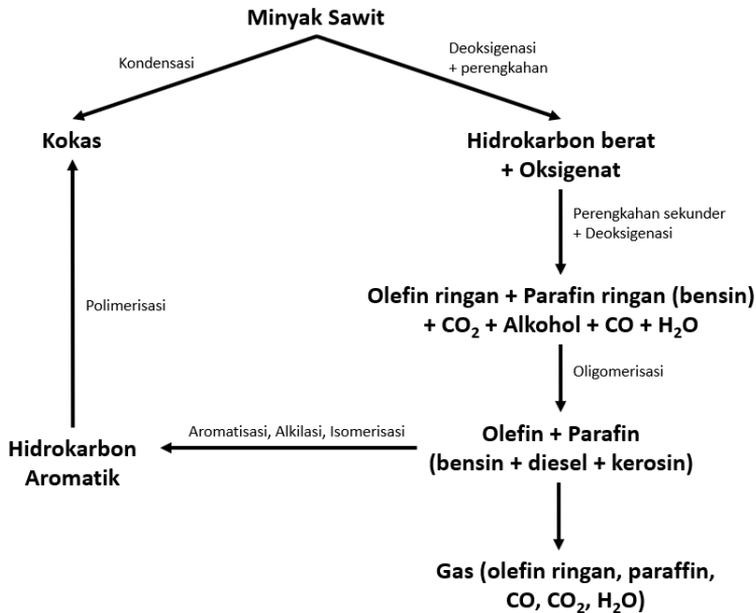
Proses perengkahan katalitik pada awalnya merupakan proses perengkahan untuk minyak fosil menjadi hidrokarbon lebih ringan dengan keberadaan katalis yang dapat meningkatkan perolehan produk cair (Corma dkk, 2007). Produk yang dihasilkan dari proses perengkahan katalitik meliputi gas, produk cair organik (OLP), air, dan kokas, produk cair terdiri dari hidrokarbon fraksi bensin (rentang titik didih 60-120 °C), kerosin (rentang titik didih 120-180°C), dan diesel (rentang titik didih 180-200 °C). Perolehan fraksi berat dan gas ringan pada proses perengkahan katalitik lebih kecil dibandingkan perolehan perengkahan termal. Reaksi dijalankan pada temperatur yang lebih rendah dibandingkan perengkahan termal. Dengan adanya katalis, selektivitas pembentukan produk tertentu dapat diatur dengan mudah, misalnya melalui perubahan kondisi operasi, dan modifikasi katalis (Hassan dkk., 2020; Sadrameli, 2016, Makertihartha, dkk, 2020a; Makertihartha, dkk., 2020b).

Proses perengkahan katalitik untuk minyak nabati dimulai pada tahun 1970-an sebagai alternatif pengganti minyak bumi dalam produksi bahan bakar. Penelitian di ITB sendiri dimulai pada tahun 1982 oleh Prof. Subagjo

dan Prof. Sudarno Harjosuparto yang meneliti perengkahan katalitik dari stearin yang merupakan produk samping produksi minyak sawit. Penelitian tentang perengkahan katalitik minyak nabati kemudian semakin meningkat pada tahun 1990-an, terutama karena peningkatan kebutuhan bahan bakar nabati yang ramah lingkungan.

Pada awal perkembangan penelitian, proses perengkahan minyak nabati dinilai sulit untuk dilakukan pada temperatur rendah, sedangkan pada temperatur tinggi produk reaksi perengkahan minyak nabati didominasi oleh produk gas (Zhao dkk., 2017). Beberapa tahun terakhir, perengkahan katalitik minyak kelapa sawit telah beberapa kali dipelajari untuk memproduksi hidrokarbon dari minyak sawit yang utamanya biogasolin (bensin) dan bio-diesel dengan katalis zeolit. Produk yang dihasilkan dari perengkahan katalitik minyak sawit adalah produk cair organik (OLP), gas, kokas, dan air.

Mekanisme perengkahan katalitik minyak nabati telah diteliti oleh Katikaneni dkk. (1995) untuk umpan minyak kanola dan Makertihartha dkk. (2020a) untuk minyak sawit. Tahap pertama adalah proses dekomposisi termal melalui reaksi deoksigenasi dan perengkahan. trigliserida menjadi hidrokarbon berat dan hidrokarbon oksigenat berat, seperti asam lemak, keton, aldehyd, dan ester. Perengkahan primer ini terjadi dalam bagian eksternal dari katalis. Perengkahan sekunder dari produk hidrokarbon berat dan oksigenat menghasilkan hidrokarbon dengan rantai lebih pendek seperti parafin, olefin, CO, CO₂, H₂O, dan alkohol. Gas CO₂ dan CO terbentuk dari reaksi pemutusan ikatan C-O dan C-C pada senyawa oksigenat berat melalui dekarboksilasi dan dekarbonilasi. Olefin ringan mengalami oligomerisasi menjadi olefin dan parafin dengan rantai yang lebih panjang. Produk ini dapat dipisahkan menjadi fraksi bensin, kerosin, dan diesel. Senyawa parafin yang terbentuk dapat mengalami isomerisasi menjadi isoparafin. Aromatisasi, alkilasi, dan isomerisasi olefin dapat berlangsung melalui transfer hidrogen membentuk senyawa aromatik. Senyawa isoparafin dan aromatik dapat meningkatkan bilangan oktan bensin. Akan tetapi, senyawa aromatik dapat membentuk *coke* melalui proses polimerisasi (Katikaneni dkk., 1995, Makertihartha dkk., 2020b). Secara ringkas mekanisme ringkas reaksi perengkahan minyak sawit diperlihatkan pada Gambar 26.



Gambar 26 Mekanisme reaksi perengkahan katalitik minyak sawit.

Penjelasan lebih komprehensif diusulkan Zhang, 2022 dengan penelitian studi mekanisme reaksi perengkahan katalitik senyawa model metil ester asam oleat (OAME) pada katalis Zn-HZSM-5. Langkah pertama adalah perengkahan protolitik dari OAME pada sisi asam bronsted katalis Zn-HZSM-5 membentuk asam oleat dan gas metana. Asam oleat berantai panjang kemudian mengalami reaksi deoksigenasi dan perengkahan pada permukaan luar katalis karena adanya batasan ukuran pori. Proses deoksigenasi termasuk reaksi dekarbonilasi dan dekarboksilasi menghasilkan CO dan CO₂.

Proses reaksi perengkahan katalitik sendiri diyakini terjadi pada sisi asam bronsted mengikuti mekanisme ion karbonium menghasilkan ion karbonium pada rantai hidrokarbon. Posisi karbokation dapat bergeser sepanjang rantai karbon, melalui reaksi pemotongan-β dan penataan ulang akan menghasilkan propena dan ion karbonium yang lebih kecil. Selain itu mekanisme perengkahan juga dapat terjadi akibat penggunaan temperatur yang tinggi (perengkahan termal) yang diikuti pembentukan radikal bebas. Adanya gugus tak jenuh dapat menggeser reaksi pemotongan pada posisi α, β, menjadi pemotongan pada ikatan ganda C-C yang menghasilkan produk ethilene, diene, dan senyawa radikal rantai pendek. Senyawa alkana diperoleh sebagai hasil terminasi dari senyawa radikal rantai pendek dan hidrogen transfer dari alkana ringan.

Reaksi deoksigenasi dan perengkahan pada bagian luar katalis menghasilkan senyawa hidrokarbon rantai pendek yang dapat berpindah ke dalam pori katalis. Senyawa alkena ringan akan dihasilkan dari reaksi dehidrogenasi senyawa alkana ringan. Senyawa alkena kemudian mengalami reaksi oligomerisasi, perengkahan, isomerisasi dan reaksi transfer hidrogen. Selain reaksi diels alder, reaksi siklisasi dan dehidrogenasi akan terjadi pada sisi asam lewis dari katalis yang menghasilkan senyawa diena, diena siklik dan senyawa aromatik cincin tunggal (MAH). Interkonversi berbagai senyawa MAH berlangsung melalui reaksi hidrodealkilasi dan meningkatkan selektivitas produk aromatik ringan seperti Benzena, Toluena, dan Xylena. Namun tidak dapat dihindari beberapa MAH dikoneversi menjadi senyawa poliaromatik (PAH) melalui pertumbuhan cincin, oligomerisasi, dan polimerisasi. Senyawa PAH akan bertindak sebagai prekursor dalam pembentukan kokas pada permukaan katalis.

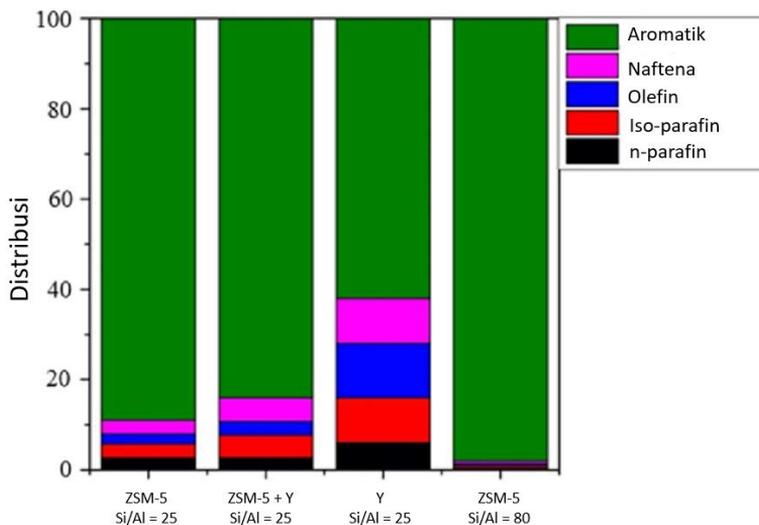
Katalis perengkahan minyak sawit

Perengkahan katalitik minyak nabati dikatalisa oleh katalis asam. Katalis heterogen yang sering digunakan untuk mengkatalisa reaksi perengkahan adalah zeolit (Sadrameli, 2016; Makertihartha, 2020a). Zeolit yang banyak digunakan untuk reaksi perengkahan adalah Zeolit Y untuk merengkah *Vacuum Gas Oil*, zeolit ZSM-5 (Zeolit Socony Mobil-5) untuk merengkah minyak nabati menjadi hidrokarbon. Untuk memproduksi bensin nabati dari minyak sawit, Lab TRKK ITB dan PRK ITB mengembangkan ZSM-5. ZSM-5 adalah zeolit yang memiliki tipe kerangka MFI yang pada dasarnya berupa zeolit aluminosilikat. ZSM-5 termasuk dalam keluarga zeolit pentasil. Rumus kimia ZSM-5 adalah $\text{Na}_n\text{Al}_n\text{Si}_{96-n}\text{O}_{192-n}16\text{H}_2\text{O}$ ($0 < n < 27$). ZSM-5 dipatenkan oleh Mobil Oil Company pada tahun 1975 dan banyak digunakan dalam industri perminyakan sebagai katalis heterogen untuk reaksi isomerisasi hidrokarbon. Katalis yang dikembangkan ini juga dapat digunakan untuk merengkah minyak sawit menjadi campuran senyawa aromatik yang kaya akan kandungan *Benzena, Tuluena, dan Xilena* (BTX) (Makertihartha, 2020b).

Kegiatan pengembangan katalis perengkahan untuk memproduksi bensin sawit di Lab TRKK ITB telah dimulai sejak tahun 1982 oleh Prof. Subagjo dan Prof. Sudarno Harjosoeparto. Pada saat itu katalis yang dikembangkan adalah katalis untuk merengkah stearin yang merupakan produk samping dari proses produksi minyak goreng dari sawit. Saat itu, pengembangan katalis dan proses produksi bahan bakar nabati dari stearin ini tidak berlanjut karena tidak ada

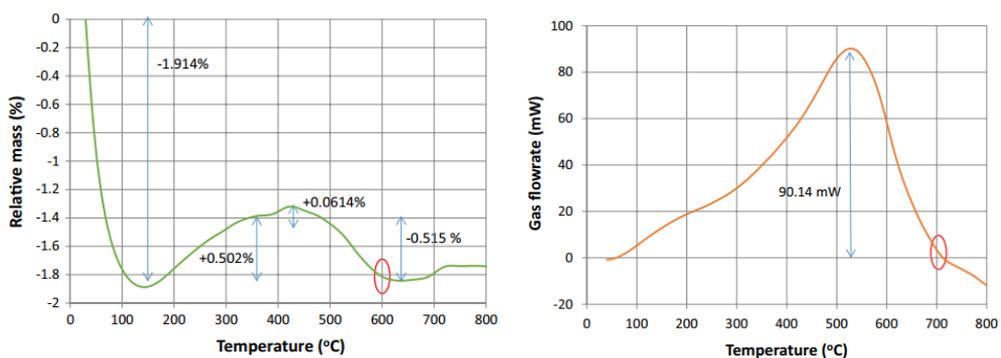
industri yang tertarik untuk mengembangkannya. Faktor utama yang menyebabkan hal ini terjadi karena pada saat itu harga bahan bakar fosil masih sangat murah, sehingga industri energi lebih menyukai mengembangkan teknologi produksi bahan bakar fosil.

Pada tahun 2018, BPDPKS memberikan dana bantuan untuk mengembangkan katalis dan proses produksi bensin sawit dari minyak sawit melalui proses perengkahan. Katalis yang dikembangkan adalah katalis ZSM-5. Katalis generasi I mampu untuk mengkonversi minyak sawit menjadi bensin sawit dengan derajat konversi 100% dan perolehan fraksi bensin sebesar 45%. Penelitian ini kemudian dilanjutkan pada tahun 2019-2020 yang menghasilkan katalis generasi II. Gambar 27 memperlihatkan distribusi produk perengkahan minyak sawit menggunakan berbagai katalis yang dikembangkan di Lab TRKK ITB. Distribusi produk sangat bergantung pada berbagai sifat fisika dan kimia katalis zeolit, yaitu keasaman katalis, diameter pori katalis dan distribusinya. Dapat dilihat bahwa katalis ZSM-5 dengan nisbah Si/Al = 80 dapat menghasilkan produk dengan kandungan senyawa aromatik sangat besar. Katalis ini mampu mengkatalisa reaksi perengkahan minyak sawit dengan derajat konversi hingga 100% dan perolehan fraksi bensin dapat mencapai 50%. Kandungan aromatik pada produk perengkahan dapat diatur hingga 98% pada temperatur 500 °C dan tekanan 1 atm.



Gambar 27 Distribusi produk perengkahan minyak sawit dengan berbagai katalis berbasis zeolit (Makertihartha, dkk., 2020b).

Selama proses perengkahan katalitik minyak sawit berlangsung, proses deaktivasi katalis adalah sesuatu yang tidak dapat dihindarkan. Reaksi samping yang terjadi selama reaksi perengkahan menghasilkan senyawa hidrokarbon yang disebut dengan kokas. Kokas dibentuk akibat dari proses polimerisasi senyawa aromatik. Kokas dapat terdeposisi pada bagian eksternal katalis dan menurunkan derajat perengkahan yang terjadi, sedangkan kokas yang menempel pada bagian internal katalis akan mengganggu aktivitas dan selektivitas produk hasil reaksi perengkahan (Zhao, 2017). Deaktivasi juga dapat terjadi akibat adanya kerusakan struktural dari katalis zeolit atau ada pelepasan logam dari katalis (Zhang, 2022).



Gambar 28 Profil TGA dan DSC proses regenerasi katalis bekas.

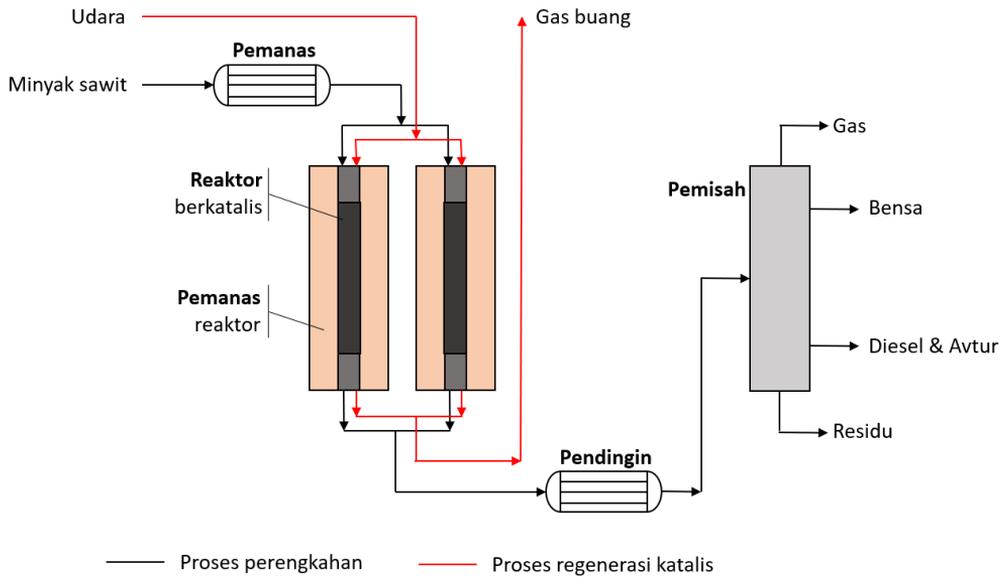
Katalis yang sudah terdeaktivasi akibat deposisi kokas pada permukaan katalis dapat diregenerasi dengan membakar kokas oleh udara pada temperatur tinggi. Beberapa penelitian melaporkan regenerasi katalis zeolit yang terdeaktivasi oleh kokas dilakukan pada temperatur tinggi, 500-600 °C. Makertihartha 2020, menjelaskan proses regenerasi katalis melalui analisis *thermal gravimetry analysis* (TGA) katalis bekas. Pada proses regenerasi air yang terikat pada katalis akan dilepas pada temperatur 120 °C. Pada temperatur rendah, senyawa organik yang menempel pada permukaan katalis dapat bereaksi membentuk senyawa oksigenat yang kemudian teroksidasi pada temperatur 440-600 °C. Ditinjau dari besarnya kalor yang dihasilkan melalui analisis *Differential Scanning Calorimetry* (DSC), panas yang dihasilkan dari proses regenerasi berakhir pada temperatur 700 °C. Berdasarkan data ini temperatur regenerasi katalis yang paling optimal adalah pada temperatur 600-700 °C.

Proses regenerasi dengan menggunakan udara pada reaktor unggul tetap dianggap merupakan metode terbaik dalam proses regenerasi. Katalis tidak perlu dibongkar terlebih dahulu. Proses regenerasi yang repetitif dapat menurunkan aktivitas perengkahan dan selektivitas produk. Zhao (2017), melaporkan adanya penurunan aktivitas perengkahan katalitik pada katalis HZSM-5 setelah 5 siklus. Penurunan aktivitas ini dicurigai berasal dari penurunan sisi asam dari katalis. Siklus reaksi-regenerasi lebih dari tiga kali menurunkan aktivitas katalis disebabkan penurunan jumlah sisi asam dan juga tekstur dari katalis zeolit. Pada pengembangan berikutnya, katalis perengkahan yang memiliki kestabilan yang jauh lebih baik dapat dikembangkan.

Proses regenerasi oksidatif dapat dilakukan menggunakan gas O₂ atau gas N₂O. Proses regeneratif oksidatif akan melepaskan panas yang sangat besar mengingat reaksi yang terjadi adalah reaksi pembakaran yang bersifat sangat eksotermis. Proses regenerasi pada temperatur tinggi dapat mengurangi umur pakai katalis akibat dari proses dealuminasi, bahkan aglomerasi pada logam promotor yang digunakan. Proses regenerasi yang sangat eksotermis ini menjadikan proses produksi bensin sawit dan pengembangan unit reaktor unggul tetap ini merupakan proses yang penuh dengan masalah rekayasa yang harus diselesaikan. Panas yang dihasilkan selama reaksi regenerasi harus bisa dilepas atau dipertukarkan dengan media pendingin agar tidak meningkatkan temperatur katalis secara signifikan.

Pengembangan proses produksi bensin sawit

Diagram proses produksi bensin sawit diperlihatkan pada Gambar 29. Proses ini mengadopsi proses yang dirancang dan dikembangkan Eugene J. Houdry dan dipublikasikan pada tahun 1940 di *Journal of the American Chemical Society* berjudul “*The Catalytic Cracking of Hydrocarbon*” (Hook, 1996). Sistem reaksi Houdry terdiri atas 3 buah reaktor yang disusun secara paralel. Pada satu waktu tertentu, reaktor pertama bertugas sebagai unit reaksi perengkahan, reaktor 2 melakukan pembilasan (*flushing*) dan reaktor 3 melakukan proses regenerasi katalis. Tugas masing-masing reaktor ini akan dilakukan secara bergantian, sehingga produksi hasil perengkahan akan berjalan secara berkesinambungan. Unit pilot yang dibangun adalah sistem reaksi Houdry yang termodifikasi, yang hanya terdiri dari 2 buah reaktor saja.



Gambar 29 Diagram proses produksi bensin sawit.

Industrial vegetable oil (IVO), minyak sawit yang telah dihilangkan getah (*gum*) dan kandungan logam beratnya, dipanaskan dalam pemanas umpan hingga temperatur 350 °C sebelum diumpan ke dalam reaktor berkatalis. Reaktor dipanaskan dalam sebuah pemanas elektrik atau sistem pemanas garam cair hingga temperatur 550 °C. Terdapat dua buah reaktor yang disusun secara paralel dan beroperasi bergantian. Ketika reaktor pertama beroperasi memproduksi bensin sawit, reaktor kedua melakukan regenerasi katalis dan bersiap siaga. Selama beroperasi, katalis perengkahan mengalami deaktivasi akibat dari deposisi kokas pada permukaan katalis. Setelah katalis pada reaktor pertama tidak efektif lagi untuk memproduksi bensin sawit karena keaktifannya sudah terlalu rendah, operasi reaktor pertama dihentikan agar katalis pada reaktor pertama dapat diregenerasi. Proses regenerasi dilakukan dengan menghembuskan udara pada temperatur 600 °C. Ketika katalis pada reaktor pertama diregenerasi, reaktor kedua dioperasikan untuk memproduksi bensin sawit. Operasi pada reaktor kedua akan dihentikan ketika aktivitas katalis pada reaktor kedua sudah rendah sehingga katalis reaktor kedua harus diregenerasi, dan reaktor pertama kembali beroperasi. Begitu seterusnya, operasi reaktor pertama dan kedua dilakukan secara bergantian.



Gambar 30 Unit reaktor pilot untuk mengkonversi minyak sawit menjadi bensin sawit berkapasitas 20 L bensin sawit/hari.

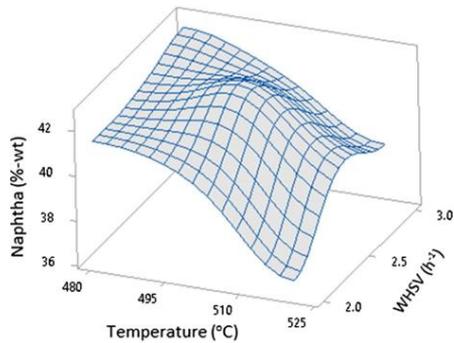
Aspek pengembangan proses juga berlangsung sejalan dengan pengembangan katalis. Unit produksi berskala laboratorium yang terdiri atas reaktor berkapasitas 20-40 mL/jam, pada tahun 2019 dikembangkan menjadi sebuah unit pilot berkapasitas 20 L bensin sawit per hari. Unit pilot produksi bensin sawit dirancang berdasarkan kondisi operasi dan kinerja unit skala laboratorium. Proses perbesaran skala ini tidak sederhana karena kelakuan hidrodinamika unit laboratorium sangat berbeda dengan unit dengan skala besar. Ketika perbesaran skala dilakukan, maka signifikansi perpindahan massa antar partikel dan intra partikel harus dipertimbangkan (Froment, dkk., 2010). Aspek perpindahan massa ini dapat menyebabkan ketidakseragaman dalam distribusi laju alir dan temperatur di dalam reaktor. Sejak dibangun, unit produksi ini telah digunakan untuk memproduksi bensin sawit untuk mendapatkan kondisi operasi yang optimum untuk menghasilkan bensin sawit dengan perolehan maksimum. Penelitian Makertihartha (2020a) menjelaskan reaksi perengkahan minyak sawit adalah reaksi yang bersifat sangat endotermis, sehingga proses ini harus diselenggarakan pada

temperatur tinggi. Penjelasan lebih lanjut oleh Sadeghbeigi, menjelaskan bahwa pembentukan ion karbonium pada mekanisme reaksi perengkahan katalitik terjadi pada temperatur 425 °C – 650 °C. Pembentukan ion karbonium selama proses perengkahan menandai peningkatan aktivitas perengkahan. Makertihartha (2020a) melaporkan temperatur optimal untuk reaksi perengkahan katalitik minyak sawit dengan katalis HZSM-5 adalah pada temperatur 500 °C. Perolehan fraksi bensin dilaporkan menurun dari 43,8% menjadi 38,4% pada temperatur 480 °C dan 520 °C. Peningkatan temperatur reaksi perengkahan katalitik minyak sawit pada temperatur yang lebih tinggi juga dilaporkan akan meningkatkan kandungan senyawa aromatik dalam OLP (Tamunaidu dan Bhatia, 2007).

Produk bensin sawit adalah bensin yang memiliki angka oktan riset (RON, *research octane number*) sekitar 107 hingga 115, bergantung pada kondisi operasi yang akan menghasilkan kandungan komponen pembentuk bensin sawit yang tertentu. Tingginya angka oktan riset ini akibat dari tingginya kandungan komponen aromatik (BTX, bensena, toluena dan xilena) pada produk bensin sawit. Menurut standar mutu bahan bakar minyak jenis bensin (gasoline) RON 98 yang dipasarkan di dalam negeri, kandungan senyawa aromatik dalam bahan bakar jenis bensin adalah 40% volume dan kandungan bensena adalah 5% volume (SK Dirjen Minyak dan Gas Bumi, 2018). Hal ini masih membuka peluang yang sangat besar bagi pengembangan proses produksi bensin sawit atau skema bisnis bensin sawit. Peluang itu adalah:

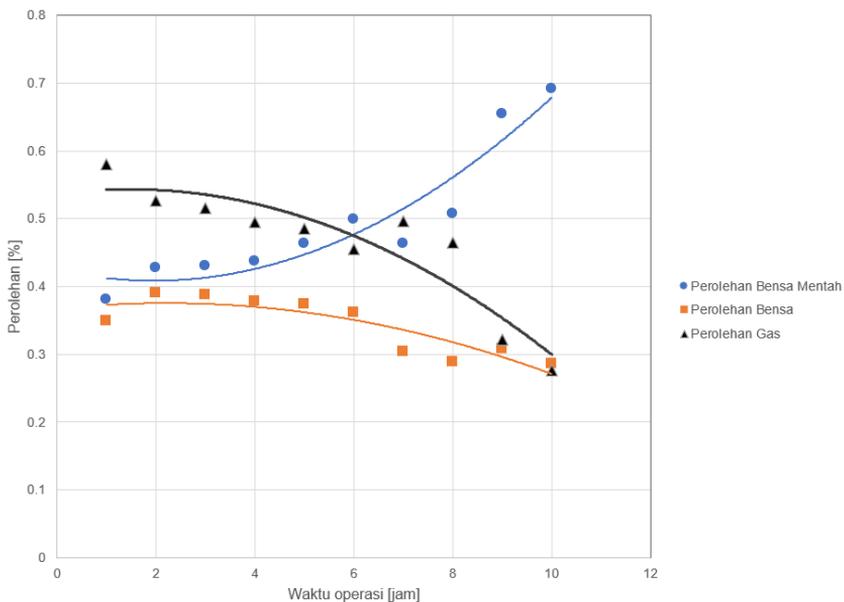
1. Memodifikasi kondisi operasi dan/atau katalis yang mampu memproduksi bensin sawit yang mengandung senyawa aromatik dan bensena sesuai dengan standar mutu nasional bahan bakar minyak jenis bensin.
2. Merencanakan skema bisnis yang mampu memproduksi campuran bahan bakar fosil dan bahan bakar nabati, misalnya memproduksi bahan bakar campuran nafta fosil bermutu rendah dan bensin sawit sehingga campuran bahan bakar tersebut sesuai dengan standar mutu bahan bakar minyak jenis bensin.

Gambar 31 memperlihatkan kondisi operasi optimum yang menghasilkan fraksi bensin sawit terbesar.



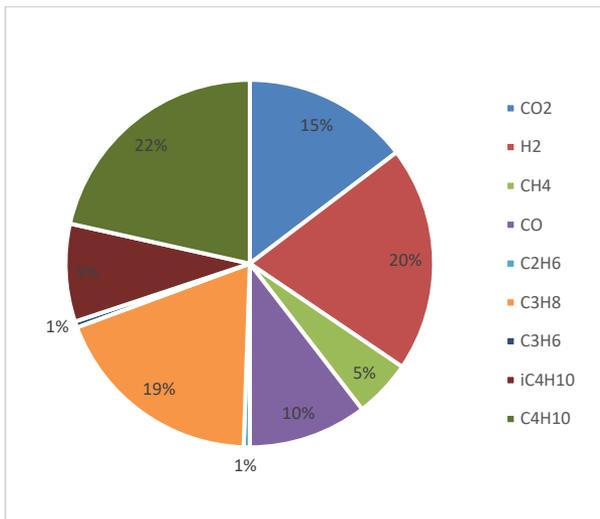
Gambar 31 Perolehan fraksi bensin sawit (nafta) hasil perengkahan minyak sawit pada berbagai temperatur dan waktu tinggal (Makertihartha, 2020a).

Unit operasi produksi bensin sawit ini dapat beroperasi hingga 10 jam untuk menghasilkan bensin sawit. Dengan bejalannya waktu operasi, katalis terdeaktivasi karena kokas akibat dari reaksi polimerisasi aromatik terdeposisi pada permukaan katalis. Ketika katalis terdeaktivasi dengan berjalannya waktu, fraksi bensin sawit semakin berkurang, tetapi fraksi hidrokarbon yang lebih berat semakin bertambah. Gambar 32 menggambarkan tipikal proses produksi bensin sawit selama waktu reaksi yang memperlihatkan bagaimana fraksi hidrokarbon berubah sesuai dengan waktu operasi. Reaksi diselenggarakan pada temperatur 500 °C dan kecepatan ruang (WHSV, *Weighted Hourly Space Velocity*) 2,5 jam⁻¹.

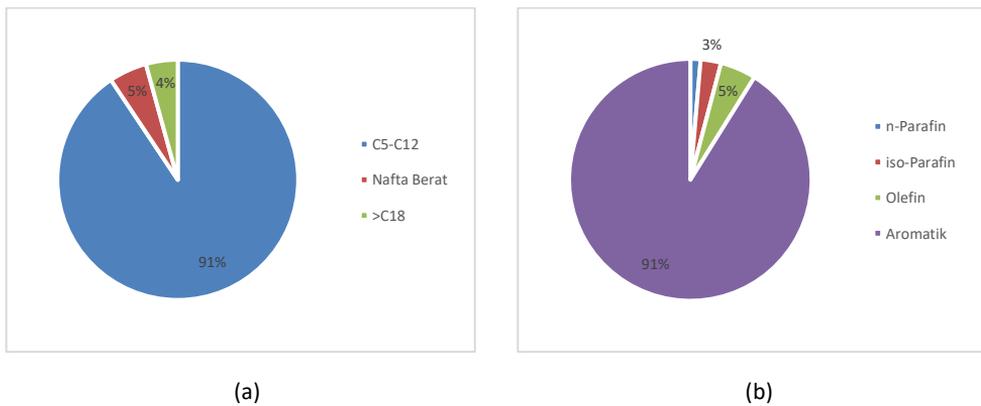


Gambar 32 Perolehan *crude gasoline* dan perolehan bensin sawit sepanjang waktu reaksi pada temperatur 500 °C dan WHSV 2,5 jam⁻¹.

Gambar 33 dan Gambar 34 berturut-turut adalah komposisi produk gas dan komposisi bensin sawit hasil perengkahan minyak sawit pada kondisi operasi ini.



Gambar 33 Komposisi produk gas hasil perengkahan minyak sawit pada temperatur operasi 500 °C dan WHSV 2,5 jam⁻¹.

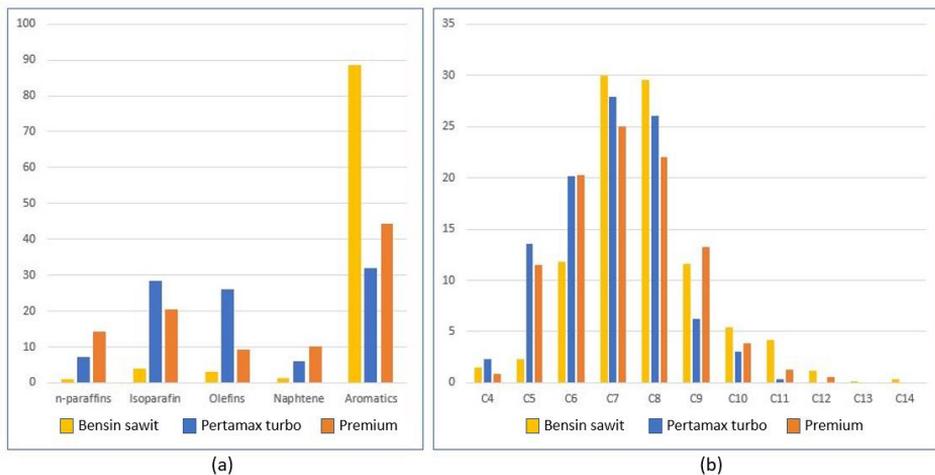


Gambar 34 Komposisi (a) produk cair dan (b) bensin sawit hasil perengkahan minyak sawit pada temperatur operasi 500 °C dan WHSV 2,5 jam⁻¹.

Naiknya perolehan bensin sawit mentah (*crude gasoline*) yang diiringi dengan turunnya perolehan gas menunjukkan keaktifan katalis semakin berkurang. Bensin sawit yang terinkorporasi dalam bensin sawit mentah juga menurun menunjukkan fraksi berat produk cair semakin meningkat. Fraksi berat produk cair ini terdiri dari fraksi diesel dan kerosin/avtur. Menurunnya produk gas menunjukkan kemampuan merengkah dari katalis menurun

akibat tertutupnya situs aktif katalis oleh deposisi kokas pada permukaan katalis.

Perbandingan distribusi komponen bensin sawit dengan produk bahan bakar gasoline yang dijual di pasaran dalam negeri diperlihatkan pada Gambar 35. Terlihat jelas bahwa kandungan komponen aromatik pada bensin sawit masih jauh lebih besar dibandingkan dengan kandungan aromatik pertamax turbo dan premium.



Gambar 35 Perbandingan komposisi komponen bensin sawit dengan komposisi komponen pembentuk pertamax turbo dan premium menurut jenis hidrokarbon (a) dan panjang rantai C hidrokarbon (b) (Makertihartha, 2019).

Kandungan senyawa aromatik bensin sawit berkisar 90%-95%, bergantung pada kondisi operasi perengkahan. Kandungan ini di atas ambang batas senyawa aromatik yang disyaratkan. Salah satu cara untuk menurunkan kandungan aromatik secara signifikan adalah dengan melakukan perekayasa katalis perengkahan yang digunakan. Berikut beberapa pendekatan yang mungkin dilakukan (Makertihartha, 2020a):

1. Modifikasi Kerangka Zeolit: Struktur kerangka zeolit dapat dimodifikasi untuk mengubah keasaman dan selektivitasnya. Meningkatkan rasio Si/Al zeolit dengan menghilangkan atom aluminium dapat membantu mengurangi keasaman secara keseluruhan, yang pada gilirannya dapat meminimalkan pembentukan aromatik.
2. Modifikasi Logam Sisipan: Menambahkan logam pada permukaan zeolit dapat meningkatkan kinerja dan selektivitasnya. Promotor seperti logam mulia (misalnya, platinum, paladium) atau logam non-mulia (misalnya,

nikel, kobalt) dapat ditambahkan ke katalis zeolit untuk memodifikasi sifat katalitiknya. Logam-logam ini dapat mengubah reaksi perengkahan dan memihak pada pembentukan produk yang diinginkan selain senyawa aromatik.

3. Modifikasi Ukuran Pori: Mengubah ukuran pori zeolit dapat memengaruhi distribusi produk. Dengan memodifikasi struktur pori zeolit, difusi, dan aksesibilitas molekul reaktan dapat dikendalikan, mengarah pada jalur perengkahan yang berbeda. Struktur pori yang lebih sempit dapat mengurangi pembentukan aromatik dan mendorong produksi hidrokarbon yang lebih ringan.

Efektivitas modifikasi ini dapat bervariasi tergantung pada komposisi umpan, kondisi proses, dan distribusi produk yang diinginkan. Oleh karena itu, eksperimen dan optimisasi yang cermat biasanya diperlukan untuk menentukan strategi modifikasi katalis yang paling efektif dalam mengurangi perolehan aromatik dalam proses perengkahan minyak nabati.

Pada tahun 2020 hingga sekarang, proses pengembangan ini diikuti dengan proses pengembangan unit ke skala yang lebih besar, yaitu skala percontohan dengan kapasitas 1000 L bensin sawit/hari. Proses perbesaran skala ini mencakup dua aspek pengembangan; (1) pengembangan unit pengolahan minyak sawit mentah (CPO) menjadi IVO yang siap untuk diumpangkan ke dalam unit proses produksi bensin sawit, dan (2) pengembangan unit proses produksi bensin sawit percontohan berkapasitas 1000 L/hari.

Proses produksi IVO merupakan proses penghilangan pengotor-pengotor minor yang terkandung dalam CPO, yaitu getah (gum/fosfolipid) dan mineral-mineral. Getah/gum dihilangkan dengan mendemulsifikasi melalui reaksi dengan air/asam encer untuk memperbesar ukuran molekul. Selanjutnya, molekul getah yang sudah diikat kemudian dijerap dengan media adsorben padat agar terpisah dari fasa minyak. Pada saat proses penjerapan, mineral yang terkandung dalam minyak juga akan ikut terserap sehingga akan ikut tersingkirkan. Adsorben yang bersifat padatan makro dapat dipisahkan dari minyak melalui proses filtrasi di akhir tahap produksi IVO.

Gambar 36 memperlihatkan pabrik yang mengolah CPO menjadi IVO yang dibangun di Kabupaten Musi Banyuasin. Unit ini memproduksi IVO dengan kapasitas 6 ton IVO/jam.



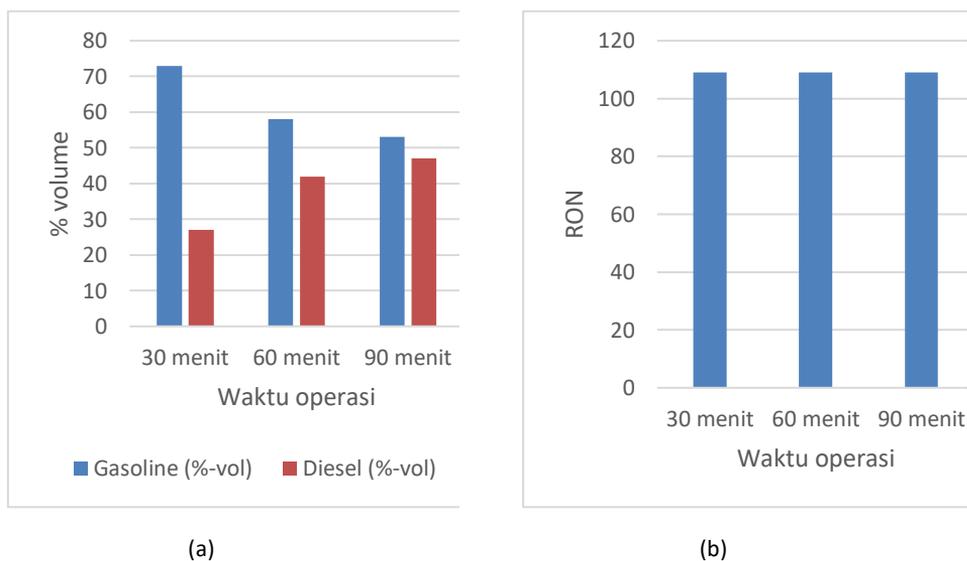
Gambar 36 Unit produksi IVO berkapasitas 6 ton/jam yang dibangun di Kabupaten Musi Banyuasin, Sumatra Selatan.

Didukung dan dibiayai oleh BPDPKS, dan bekerja sama dengan unit rekayasa PT Pura Barutama, ITB merancang dan membangun unit produksi bensin sawit berkapasitas 1000 L/hari. Proses perancangan dan pembangunan unit bensin sawit ini dilakukan berbasis pada data operasi dan kinerja reaktor skala pilot. Secara keseluruhan, proses masih mengacu pada proses Houdry yang menjadi dasar pengembangan awal. Skema diagram alir proses tidak berubah dari diagram yang diperlihatkan pada Gambar 29. Unit percontohan produksi bensin sawit berkapasitas 1000 L/hari diperlihatkan pada Gambar 37. Unit ini terdiri dari 3 buah *container* yang berfungsi sebagai sub-unit utilitas, sub-unit proses, dan sub-unit lab dan ruang kendali.



Gambar 37 Unit produksi percontohan bensin sawit berkapasitas 1000 L/hari.

Reaktor konversi minyak sawit menjadi bensin sawit adalah sebuah reaktor berunggun tetap yang diisi dengan katalis ZSM-5. Reaksi diselenggarakan pada temperatur 500 °C dan tekanan atmosferik. Minyak sawit dipanaskan terlebih dahulu sebelum diumpungkan ke dalam reaktor. Reaksi perengkahan katalitik di dalam reaktor akan menghasilkan berbagai produk dengan perolehan bensin sawit 45% pada menit pertama operasi. Hasil samping berupa gas yang terdiri atas H₂, CO, CO₂, CH₄, C₂H₆, C₃H₈, fraksi berat yang terdiri atas fraksi diesel dan kerosin. Proses ini juga menghasilkan kokas hasil polimerisasi senyawa aromatik yang terdeposisi pada permukaan katalis. Deposisi kokas pada permukaan katalis ini menyebabkan katalis terdeaktivasi, sehingga katalis harus diregenerasi dengan membakar kokas pada permukaan katalis menggunakan udara pada temperatur 700 °C. Gambar 38 memperlihatkan perolehan produk dan angka oktan (RON, *research octane number*) dari produk bensin sawit yang diperoleh. Produk bensin sawit yang diproduksi memiliki RON 107. Tingginya harga RON disebabkan kandungan senyawa aromatik yang tinggi, yaitu sekitar 90-95%. Kandungan aromatik yang tinggi akan menentukan skema bisnis bensin sawit kelak saat komersialisasi.

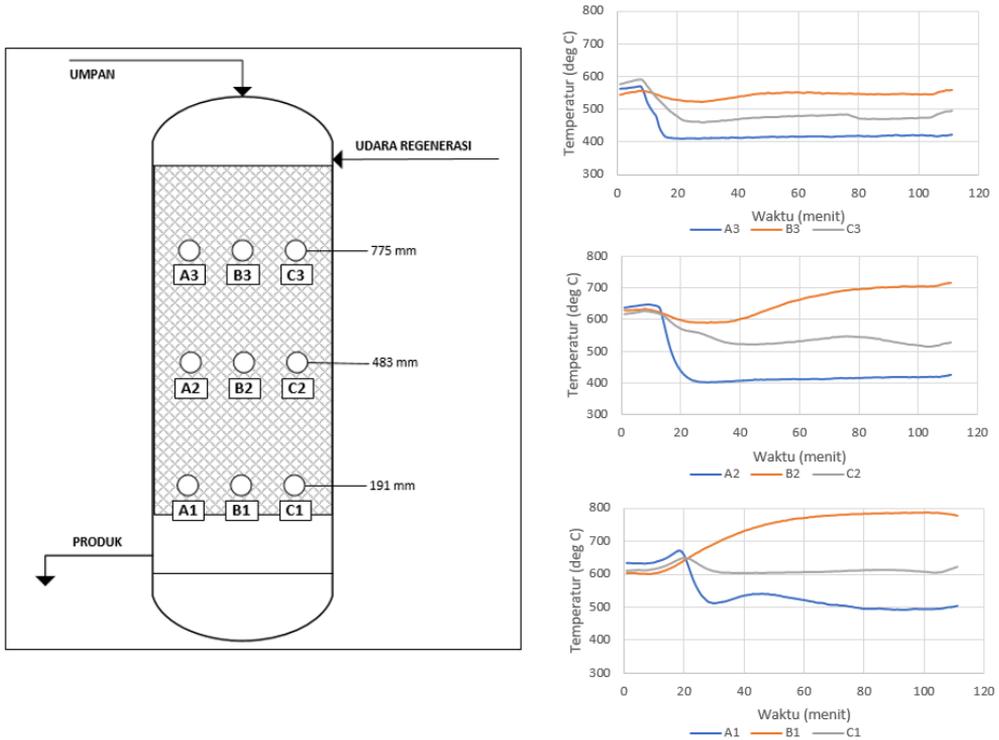


Gambar 38 Unjuk kerja unit produksi bensin sawit 1000 L/hari pada berbagai waktu reaksi; (a) fraksi volume bensin sawit dan diesel dalam fraksi cair, (b) *research octane number* produk bensin sawit.

Kestabilan operasi uji produksi bensin sawit skala 1000 L/hari diperlihatkan pada Gambar 38 tampak telah memberikan peluang untuk

dikembangkan lebih lanjut, namun masih banyak aspek yang harus diperbaiki dan dioptimalkan. Aktivitas katalis yang jika dioperasikan pada skala pilot 20 L/hari dapat bertahan tetap tinggi hingga 4-6 jam operasi, di skala percontohan 1000 L/hari ini selektifitas terhadap bensin sawit jatuh dari 72% pada waktu operasi ke 30 menit menjadi 52% pada menit ke 90. Namun bisa dilihat bahwa harga RON fraksi bensin tetap pada 107.

Gambar 39 memperlihatkan bagaimana temperatur unggun katalis pada reaktor tidak terdistribusi secara merata ke arah radial reaktor. Hal ini mengindikasikan bahwa sebenarnya aliran media reaksi di dalam reaktor tidak terdistribusi dengan baik.



Gambar 39 Distribusi temperatur pada unggu katalis reaktor produksi bensin sawit skala 1000 L/hari.

Distribusi aliran yang tidak merata mengakibatkan distribusi aktivitas katalis di dalam reaktor yang juga tidak merata. Hal ini mengakibatkan adanya bagian katalis yang terekspos sangat masif oleh reaktan, dan ada bagian katalis yang sama sekali tidak berkontak dengan reaktan. Fenomena ini akan menyebabkan proses deaktivasi katalis sangat cepat karena bagian yang berkontak dengan reaktan dalam jumlah besar akan dengan cepat

terdeaktivasi. Jika bagian katalis ini tidak aktif, seluruh reaktor tidak dapat digunakan kembali karena kualitas produk sudah tidak sesuai dengan target operasi. Usaha-usaha untuk memperbaiki ini tengah diusahakan dalam Proyek Strategis Nasional yang akan berakhir pada tahun 2024.

Di samping itu, masih banyak peluang yang bisa dikembangkan dalam aspek manajemen panas di dalam sistem reaksi kimia ini. Manajemen panas pada sistem reaksi kimia ini terdiri dari dua aspek manajemen panas, (1) manajemen panas pada saat reaksi perengkahan minyak sawit, dan (2) manajemen panas pada saat regenerasi katalis. Reaksi perengkahan minyak sawit adalah reaksi yang sangat endotermis, sedangkan proses regenerasi katalis adalah reaksi yang sangat eksotermis. Panas reaksi yang dibutuhkan sebenarnya bukan hanya berasal dari proses perengkahan saja, tetapi juga dari proses siklisasi dan aromatisasi hirdokarbon. Panas yang dibutuhkan selama reaksi perengkahan harus secepat mungkin disuplai oleh sistem perpindahan panas dari sistem reaksi kimia. Sebaliknya panas yang dihasilkan selama proses pembakaran kokas pada saat regenerasi harus secepat mungkin dipindahkan ke lingkungan melalui sistem perpindahan panas.

Kegiatan penelitian lanjut dan pengembangan dalam rangka menyempurnakan unit produksi bensa skala 1000 L/hari saat ini tengah berlangsung di ITB dan di berbagai mitra industri. Kegiatan ini berfokus pada modifikasi dan optimalisasi reaktor produksi bensa, perancangan dan penyempurnaan sistem manajemen panas dan pengendalian proses, diversifikasi bahan baku dan produk, serta studi tekno ekonominya. Perbesaran skala produksi juga akan menjadi fokus kegiatan setelah kegiatan penyempurnaan dan optimalisasi ini berakhir. Dari berbagai studi dan FGD yang telah dilakukan, skala keekonomian unit produksi bensa adalah 5000-8000 L bensa/hari. Hasil pengembangan ini akan menjadi salah satu faktor penting dalam pemenuhan kebutuhan bahan bakar cair nasional dan peningkatan kedaulatan energi nasional.

5. PENUTUP

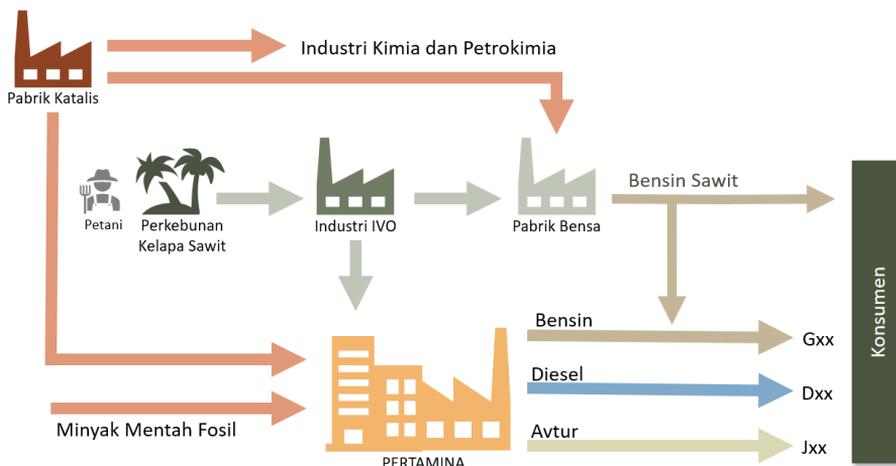
Pada tahun 2021, Indonesia mengimpor minyak mentah sebesar 15 juta kL/tahun, bahan bakar minyak sebesar 22 juta kL/tahun dan mengimpor bahan bakar bensin sebesar 10 juta kL/tahun yang membuat Indonesia sebagai negara pengimpor bensin terbesar kedua di dunia setelah Meksiko. Hal ini tentu membuat kedaulatan energi nasional tidak berada dalam posisi yang menguntungkan. Ketergantungan Indonesia pada pasokan minyak dunia menjadi sangat besar, yang bukan saja menguras anggaran belanja nasional, tetapi juga memberikan persoalan pelik pada perekonomian bangsa yang sangat bergantung pada pasokan energi nasional.

Kebergantungan perekonomian bangsa terhadap pasokan energi dari luar dapat dikurangi dengan mengalihkan sebagian pasokan energi tersebut ke sumber daya alam yang dimiliki bangsa. Salah satu sumber daya alam yang kita miliki dan ketersediaannya dalam jumlah yang melimpah adalah minyak dan lemak nabati. Minyak nabati yang tersedia dalam jumlah melimpah di Indonesia adalah minyak sawit.

Berdasarkan Peraturan Presiden Republik Indonesia No. 109/2020 tentang Percepatan Pelaksanaan Proyek Strategis Nasional (PSN), Institut Teknologi Bandung terlibat dalam dua proyek strategis nasional yang berkaitan dengan pengembangan teknologi produksi bahan bakar nabati. Pertama, ITB terlibat dalam PSN195 yang dikoordinasikan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia bertajuk “Bahan Bakar Hijau” yang bertujuan untuk membangun Pabrik Katalis Merah Putih, membangun *bio-refinery* di RU 3 Plaju dan RU 4 Cilacap. PSN kedua adalah PSN199 yang bertajuk “Pembangunan Teknologi produksi IVO dan Bensin Sawit dengan Katalis Merah Putih yang Terintegrasi dengan Kebun Rakyat”. PSN199 ini dikoordinasikan oleh BRIN (Badan Riset dan Inovasi Nasional) dan bertujuan untuk membangun unit produksi IVO (*Industrial Vegetable Oil*) dan unit produksi bensin sawit.

PSN195 dan PSN199 ini nantinya diharapkan dapat bersinergi untuk menciptakan sebuah skema pemenuhan kebutuhan energi melalui pemanfaatan teknologi produksi energi terbarukan, bahan bakar nabati. Gambar 40 memperlihatkan skema pemanfaatan minyak nabati; dalam hal ini

minyak sawit; sebagai bahan baku untuk memproduksi berbagai bahan bakar nabati untuk rakyat.



Gambar 40 Konsep produksi bahan bakar nabati yang terintegrasi dengan kebun rakyat.

Petani sawit, dalam hal ini petani sawit swadaya, memproduksi tanda buah segar dari kebun rakyat untuk diolah dalam sebuah unit pengolahan bahan baku yang mengolah tandan buah segar kelapa sawit menjadi IVO. Pabrik IVO dapat mengolah 60 ton TBS/jam tandan buah segar untuk memproduksi 12 ton IVO/jam. IVO yang diproduksi harus diolah lebih lanjut untuk memisahkan fraksi olein yang berjumlah sekitar 55% dengan fraksi stearin yang sebesar 45%. Fraksi olein dapat diolah menjadi minyak makan, sedangkan fraksi stearin dapat dijadikan sebagai bahan baku untuk bahan bakar nabati. Fraksi stearin kemudian dapat diolah lebih lanjut pada sebuah unit produksi bensin sawit yang tersebar di sentra-sentra perkebunan kelapa sawit. Sebuah unit produksi bensin sawit dapat mengolah 8-10 ton/hari stearin dan palmitin untuk menghasilkan 5 ton bensin sawit per hari.

Pabrik IVO ini juga diharapkan dapat bersinergi dengan kilang minyak atau *bio-refinery* milik Pertamina sebagai pemasok bahan baku yang diolah dengan skema *co-processing* maupun dalam unit mandiri yang akan dibangun di RU 3 Palju dan RU 4 Cilacap.

Di masa yang akan datang, bahan baku dari seluruh proses produksi bahan bakar nabati tidak hanya berasal dari kelapa sawit, tetapi dari berbagai sumber minyak dan lemak nabati Indonesia. Selain sebagai produsen minyak kelapa sawit terbesar di dunia, Indonesia dikenal juga sebagai produsen minyak kelapa yang sangat melimpah serta minyak-minyak nabati lainnya.

Posisi Indonesia sebagai sentra produksi bahan bakar nabati (dan oleokimia) dunia yang sangat potensial tidak bisa dipungkiri, karena 3 hal berikut:

1. Indonesia adalah rumah bagi beraneka ragam tumbuhan penghasil minyak dan lemak nabati,
2. harga minyak nabati di Indonesia masih relatif murah,
3. laju fotosintesis di Indonesia adalah yang tertinggi di dunia.

Mengusahakan, mengembangkan, dan mengimplementasikan teknologi pengolahan minyak dan lemak nabati untuk menjadi bahan bakar nabati di Indonesia memiliki banyak keuntungan yang sangat signifikan, di antaranya adalah:

1. Indonesia dapat memanfaatkan dan mengusahakan peningkatan nilai tambah dari keberlimpahan sumber daya alam berupa minyak dan lemak nabati yang pada gilirannya dapat digunakan untuk penguatan ketahanan dan kedaulatan energi nasional,
2. Indonesia dapat menjadikan kegiatan produksi dan penggunaan bahan bakar nabati dengan memanfaatkan minyak dan lemak nabati sebagai substitusi impor minyak mentah dan bahan bakar fosil yang bermuara pada pengurangan defisit anggaran belanja negara yang sebagian besar akibat dari impor minyak mentah dan bahan bakar fosil,
3. Kegiatan ini menciptakan dan membuka kesempatan kerja baru di sektor energi baru dan terbarukan yang dapat menyerap banyak sekali tenaga kerja, dan
4. Pengembangan dan pemanfaatan teknologi anak bangsa ini memberikan kepercayaan pada para peneliti dan perekayasa bangsa sendiri untuk berani mengembangkan teknologi sendiri, dan memanfaatkannya bagi kemaslahatan bangsa.

Institut Teknologi Bandung sebagai pusat kepakaran dan pusat unggulan dalam bidang ilmu pengetahuan dan kerekayasaan, khususnya dalam bidang energi baru dan terbarukan, dapat menjadi agen perkembangan teknologi di bidang bahan bakar nabati. Bahan bakar nabati dan pengembangan proses produksi bahan bakar nabati yang memanfaatkan sumber daya alam bangsa, secara langsung memberikan dampak pada penguatan kedaulatan energi nasional. Proses pengembangan yang telah dimulai dan sedang dilakukan ini pada gilirannya akan menjadi salah satu riak kecil dari gelombang besar perubahan global yang menuju kepada BioEkonomi yang berkelanjutan.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Di atas segalanya, saya mengucapkan terima kasih dan syukur kepada Ida Sang Hyang Widi Wasa, Tuhan Yang Maha Kuasa, yang telah memberikan kesempatan kepada saya untuk mengemban tugas sebagai Guru Besar di Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung.

Terima kasih saya yang tak ternilai kepada kedua orang tua saya, ayahanda I Gusti Ngurah Makertia (alm) dan ibunda Rumnasih Basari (alm) yang telah memberikan saya ilmu dan dasar-dasar cara memandang kehidupan ini. Terima kasih saya yang tak berhingga kepada istri saya, Patricia Wendy Salguero Lazo de La Vega; adik-adik saya, I Gusti Made Ngurah Kuswandhana, Ni Nyoman Dewi Seriani; ananda I Gusti Ayu Desya Wandastri, I Gusti Bagus Ngurah Wiwekananda Makertiyasa, I Gusti Ayu Chandi Permana Acintya Dewi; dan cucunda kebanggaan saya, I Gusti Bagus Ngurah Jenaka Wiradana Makertiyasa, yang selalu menjadi inspirasi saya, dan telah menjadi bagian tak terpisahkan dari kehidupan saya.

Dalam kesempatan ini saya sampaikan ucapan terima kasih saya yang tak terhingga kepada:

1. Pimpinan Institut Teknologi Bandung, pimpinan dan anggota Forum Guru Besar ITB, yang telah memberikan kesempatan kepada saya untuk menyampaikan orasi ilmiah pada forum yang sangat terhormat ini.
2. Dekanat Fakultas Teknologi Industri ITB yang telah mengawal proses pengusulan guru besar saya sejak dari awal di ITB hingga akhir.
3. Prof. Sudarno Harjosuparto (alm), guru dan peletak dasar Laboratorium Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis ITB.
4. Prof. Saswinadi Sasmojo, guru dan pembimbing saya, yang menginspirasi saya untuk menjadi bagian dari staf akademik Teknik Kimia FTI ITB.
5. Dr. Tatang Hernas Sorawidjaja, guru, mentor dan pembimbing saya, yang menjadi aktor utama ketika mendorong saya menjadi staf akademik di Program Studi Teknik Kimia, FTI ITB. Beliau juga adalah inspirator saya dalam mendalami teknologi proses produksi bahan bakar nabati. Bagi saya, beliau adalah Bapak Bahan Bakar Nabati Nasional.
6. Prof. Subagjo, guru, mentor, sahabat dan rekan saya yang menjadi aktor utama dalam membentuk karakter keilmuan saya di Laboratorium Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis ITB dan Pusat Rekayasa Katalisis ITB.

7. Prof. I Gede Wenten, yang secara luar biasa telah memberikan dukungan, motivasi dan bantuan tak ternilai dalam proses pengusulan keguru-besaran saya.
8. Prof. Danu Ariono yang telah dengan sabar dan teliti *me-review* naskah orasi ilmiah ini.
9. Rekan-rekan Guru Besar di Komunitas Teknik Kimia FTI ITB, Prof. Mubiar Purwasasmita (alm), Prof. Subagjo, Prof. Dwiwahju Sasongko, Prof. Herri Susanto, Prof. Danu Ariono, Prof. Lienda Handoyo, Prof. Tjandra Setiadi, Prof. Yazid Bindar, Prof. Johnner Sitompul, Prof. Yogi Wibisono Budhi, Prof. Tjokorde Walmiki Samadhi, yang telah memberikan dukungannya selama ini.
10. Prof. Gilbert F. Froment, Prof. Govind P. Menon, yang telah memberi warna pada karakter keilmuan saya selama saya menuntut ilmu di Universiteit Gent, Belgia.
11. Prof. H. J. Heeres, Prof. Ismunandar dan Prof. Widodo C. Putro yang telah memberikan rekomendasi untuk pengusulan Guru Besar saya.
12. Dr. Melia Laniwati Gunawan, Dr. C. B. Rasrendra, Dr. Grandprix T. M. Kadja, Dr. Rino R. Mukti, Dr. Jenny Rizkiana, Fadhli S.Si., M.T., Dr. Haryo Pandu Winoto, rekan sejawat saya di Laboratroyum Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis ITB dan Pusat Rekayasa Katalisis ITB, yang telah bersama-sama membangun kepakaran dalam bidang teknik reaksi kimia dan katalisis di ITB.
13. Seluruh teman sejawat dan anggota Kelompok Keahlian Teknologi Reaksi Kimia dan Katalisis, FTI ITB, dan Laboratorium Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis ITB yang telah memberi semangat dan menciptakan suasana kerja yang sangat menyenangkan. Inspirasi kolektif yang diberikan sungguh menciptakan semangat kepada setiap insan yang bekerja di sana.
14. RUGent Clans: Prof. Marc-Olivier Coppens, Prof. Lie Yong-Wang, Prof. Park Tae-Yun, Prof. Wu Feng, Prof. Santokh Singh, Ir. Ricardo Luis Piccoli, MSc., Dr. Elizabeth Pitoult, para sahabat saya yang selalu memberi dukungan moral kapan pun saya kehendaki.
15. Dr. Oki Muraza, Senior Vice President RTI, PT Pertamina (Persero), yang telah membantu dan mendukung saya serta merawat kerja sama penelitian antara Pertamina dan ITB selama ini.
16. Ir. Ricky Hikmawan Wargakusuma, M.H., dan seluruh staf BKK PII yang telah memberikan dukungan kepada saya.

17. Seluruh rekan-rekan sejawat staf akademik Program Studi Sarjana Teknik Kimia, Program Studi Sarjana Teknik Bioenergi dan Kemurgi, Program Sarjana Studi Teknik Pangan, Program Studi Magister dan Doktor Teknik Kimia, FTI ITB atas kebersamaannya selama ini yang menciptakan suasana bahagia dan riang gembira di komunitas kita.
18. Seluruh staf tenaga kependidikan Program Studi Sarjana Teknik Kimia, Program Studi Sarjana Teknik Bioenergi dan Kemurgi, Program Sarjana Studi Teknik Pangan, Program Studi Magister dan Doktor Teknik Kimia, FTI ITB atas bantuan dan dukungannya selama ini.
19. PT Pertamina (Persero) yang sejak tahun 2000 hingga sekarang telah bersama-sama melakukan pengembangan teknologi katalisis dan teknik reaksi kimia.
20. BPDPKS, yang sejak tahun 2017 hingga sekarang telah selalu mendukung dan mengawal proses pengembangan teknologi produksi bahan bakar nabati dari sawit di ITB.
21. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral RI, Kementerian Ristek dan Pendidikan Tinggi RI yang kemudian menjadi BRIN, Kementerian Perindustrian RI, Pemerintah Daerah Kabupaten Musi Banyuasin, PT Kemurgi Indonesia, PT Pura Barutama, PT Rekayasa Industri, PT BSS, PT Aintopindo Nuansa Kimia, PT Rekacipta Inovasi ITB, PT Pertamina Lubricant, PT Pupuk Kujang, PT Katalis Sinergi Indonesia, dll., yang selama ini selalu mendukung kami di ITB dalam membangun teknologi katalisis dan teknologi proses produksi bahan bakar nabati nasional.
22. Anggota Laboratorium Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis ITB, mahasiswa dan alumni S3 Lab TRKK: Maria, Budiyanto, Zaki, Rizki, Wawan, Noerma, Yano, serta seluruh mahasiswa dan alumni S1, dan S2 Lab TRKK. Tanpa kalian semua, Laboratorium kita akan sepi.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pusat Statistik, 2021, “*Statistik Kelapa Sawit Indonesia 2021*”, Badan Pusat Statistik, ISSN: 1978-9947.
- British Petroleum, 2022, “*BP Energy Outlook*”, British Petroleum.
- Chew, T. L. dan S. Bhatia, 2008, “Catalytic processes towards the production of biofuels in palm oil and oil palm biomass-based biorefinery”, *Bioresource Technology*, 99, 17, 7911.
- Clomburg, J. M., dan R. Gonzales, 2010, “Biofuel production in *Escherichia coli*: The Role of Metabolic Engineering and Synthetic Biology”, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 86, 419.
- Corma, A., G. W. Huber, L. Sauvanaud, P. O. Connor, 2007, “Processing biomass-derived oxygenates in the refinery: Catalytic cracking (FCC) reaction pathway and role of catalyst”, *Journal of Catalysis*, 247, 2, 307.
- Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, SK Nomor 177.K/10/DJM.T/2018, “*Standar dan Mutu (Spesifikasi) Bahan Bakar Minyak Jenis Bensin (Gasoline) RON 98 yang Dipasarkan di Dalam Negeri*”, 2018.
- Froment, G. F., K. B. Bischoff, J. De Wilde, 2010, “*Chemical Reactor Analysis and Design*”, edisi 3, Wiley.
- Hassan, S. N., S. Nurdin, Z. Yaakob, M. S. Mahmud, 2020, Biogasoline synthesis via fluid catalytic cracking of waste cooking oil using treated eggshell”, *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, 736 022069.
- Hook, M., 1996, “*The Houdry Process for the Catalytic Conversion of Crude Petroleum to High-Octane Gasoline*”, American Chemical Society.
- Jezard, A., 2017, “*Fossil fuels will still dominate energy in 20 years despite green power rising*”, World Economic Forum Annual Meeting, World Economic Forum, Oct 16.
- Katikaneni, S. P. R., J. D. Adjaye, N. N. Bakhshi, 1995, “Catalytic conversion of canola oil to fuels and chemical over various cracking catalyst”, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 73, 4, 484.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2022.a, “*Statistik Minyak dan Gas Bumi Semester I 2022*”, Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi.

- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2022.b, “Penetapan alokasi biodiesel tahun 2023 sebesar 13,15 juta kiloliter”, Siaran Pers No 528.Pers.04/SJI/2022.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2023, “Penetapan Alokasi Biodiesel Tahun 2023 Sebesar 13,15 Juta Kiloliter”, Siaran Pers No 530.Pers/04/SJI/2023.
- Lembaga Pengembangan Inovasi dan Kewirausahaan, Institut Teknologi Bandung (LPIK ITB), 2021, “Laporan Akhir: Inovasi Lanjut Katalis dan Teknologi Merah Putih Operasi Co-Processing Produksi Bahan Bakar Nabati dari minyak Sawit”, Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit.
- Majidan, P., M. Tabtabei, M. Zeinolabedini, M. P. Naghshbandi, Y. Chisti, 1918, “Metabolic Engineering of Microorganisms for Biofuel Production”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, part 3, 3863.
- Makertihartha, I G.B.N., 2019, “Pengembangan Proses Perengkahan Minyak Sawit untuk Produksi Bahan Bakar Nabati: Rancang Bangun Unit Pilot Produksi Green Gasoline”, Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit, Grant Research Sawit Tahun 2018.
- Makertihartha, I G.B.N., R.B. Fitradi, A.R. Ramadhani, M. Laniwati, O. Muraza, Subagjo, 2020.a, "Biogasoline Production from Palm Oil: Optimization of Catalytic Cracking Parameters", *Arabian Journal for Science and Engineering*, Volume 45, Issue 2, Nomor 04354-4, 26.
- Makertihartha, I G.B.N., G.T.M. Kadja, M. L. Gunawan, R. R. Mukti, Subagjo, 2020.b, "Exceptional Aromatic Distribution in the Conversion of Palm-Oil to Biohydrocarbon Using Zeolite-Based Catalyst", *Journal of Engineering, Technology and Sciences*, Vol. 52, No. 4.
- Melero, J. A., M. Milagros Clavero, G. Calleja, A. Garcia, R. Miravalles, T. Galindo, 2010, “Production of Biofuels via the Catalytic Cracking of Mixture of Crude Vegetable Oils and Nonedible Animal Fats with Vacuum Gas Oil”, *Energy and Fuels*, 24, 707.
- Ocelli, M. L. dan G. M. Ferrari, 2010, “*Advances in Hydrotreating Catalysts*”, CRC Press
- Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, Nomor 12/2015, *Perubahan Ketiga atas Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 32 Tahun 2008 Tentang Penyediaan, Pemanfaatan, dan Tata Niaga Bahan Bakar Nabati (Biofuel) sebagai Bahan Bakar Lain.*
- Peraturan Presiden Republik Indonesia, Nomor 22/2017, *Rencana Umum Energi Nasional.*
- Prakoso, T., I. K. Reksowardojo, T. H. Soerawidjaja, December 2008, “Small Scale Biodiesel Production Plant by Utilizing Two Tanks System”, *Proceedings of the*

International Workshop on Automotive Technology, Engine and Alternative Fuels, Ho Chi Minh City, Vietnam.

- Romero, A. H., 2020, "Reduction of Nitroarenes via Catalytic Transfer Hydrogenation Using Formic Acid as Hydrogen Sources. A Comprehensive Review", *Chemistry Select*, 5, 13054.
- RUEN, 2017, Peraturan Presiden Republik Indonesia No 22.
- Sadrameli, S. M., 2017, "Thermal/catalytic cracking of liquid hydrocarbons for the production of olefins: A state-of-the-art review II: Catalytic review", *Fuel*, 173, 285.
- Soerawidjaja, T. H., 2023, "Panorama teknologi produksi bahan bakar nabati", Program Studi Teknik Kimia, FTI, Institut Teknologi Bandung.
- Tampubolon, A. P., F. Tumiwa, J. Giwangkara, M. Pujantoro, S. Abdurrahman, 2020, "National Energy General Plan (RUEN): Existing Plan, Current Policies Implication, and Energy Transition Scenario", IESR.
- Tamunaidu, P, S. Bhatia, 2007, "Catalytic cracking of palm oil for the production of biofuels: Optimization studies", *Bioresource Technology*, 98, 18, 3593.
- Tomar, P., Y. Nozoe, N. Ozawa, S. Nishimura, K. Ebitani, 2020, "Formic Acid as Hydrogen Source for the Additive-Free Reduction of Aromatic Carbonyl and Nitrile Compounds at Reusable Supported Pd Catalysts", *Catalysts*, 10(8), 875.
- Vlasova, E. N., G. A. Bukhtiyarova, I. V. Deliy, P. V. Aleksandrov, A. A. Porsin, M. A. Panafidin, E. Y. Gerasimov, V. I. Bukhtiyarov, 2020, "The effect of rapeseed oil and carbon monoxide on SRGO hydrotreating over sulfide CoMo/Al₂O₃ and NiMo/Al₂O₃ catalysts", *Catalysis Today*, 357, 526.
- Zhang, J., Z. Wu, Y. Wu, X. Liu, X. Li, Y. Zhang, H. Xia, F. Wang, 2022, "Catalytic Cracking of Fatty Acid Methyl Esters for the Production of Green Aromatics Using Zn-Modified HZSM-5 Catalysts", *Energy Fuels*, 36, 13, 6922.
- Zhao, X., L. Wei, S. Cheng, J. Julson, 2017, "Review of Heterogeneous Catalyst for Catalytically Upgrading Vegetable oils into Hydrocarbon Biofuels", *Catalysts*, 7(3), 83.

CURRICULUM VITAE



Nama : I Gusti Bagus Ngurah Makertihartha
Tempat/tgl lahir : Kupang, 15 Januari 1964
Kel. Keahlian : Teknologi Reaksi Kimia dan Katalisis
Alamat Kantor : Jalan Ganesha 10 Bandung 40132
Nama Istri : Patricia Wendy Salguero lazo de La Vega

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

1. Sarjana Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung, 1987
2. Doktor Bidang Teknik Kimia, Universiteit Gent, Belgia, 1998
3. Program Studi Program Profesional Insinyur, ITB, 2019

II. RIWAYAT KERJA di ITB

1. Staf Pengajar Fakultas Teknologi Industri ITB, 1988-Sekarang
2. Konservator Jurusan Teknik Kimia, FTI, ITB, 1999-2001
3. Kepala Sarana Komputasi Teknik Kimia, FTI, ITB, 1999-2002
4. Direktur Eksekutif *QUE Project* Program Studi Teknik Kimia, FTI ITB, *World Bank*, 2001-2002
5. Koordinator Pendidikan Pascasarjana Teknik Kimia, FTI, ITB, 2005-2007
6. Ketua Program Studi Sarjana Teknik Kimia, FTI, ITB, 2007-2011
7. Kepala Laboratorium Tekanan Tinggi, FTI, ITB, 2008 – sekarang
8. Anggota Tim Gugus Kendali Mutu, FTI, ITB, 2013-2015
9. Anggota Tim Evaluasi Kurikulum 2008 dan Perancangan Kurikulum 2013, Program Studi Magister dan Doktor Teknik Kimia, FTI ITB, 2013
10. Anggota Tim Pembentukan Program Studi Sarjana Teknik Pangan dan Teknik Bioenergi FTI, ITB, 2013
11. Anggota Tim Pengarah Pemutakhiran Metoda Pembelajaran FTI, ITB, 2013
12. Anggota Tim Implementasi Program Studi Teknik Pangan dan Teknik Bioenergi FTI, ITB, 2014
13. Ketua Tim Penyusun Laboratorium dan Tim Penyusun Kurikulum ITERA (Institut Teknologi Sumatera), 2012-2017
14. Ketua Program Studi Magister/Doktor Teknik Kimia, FTI, ITB, 2014-2020

15. Ketua Sub KPPS Program Studi Magister dan Doktor Teknik Kimia, FTI, ITB, 2014-2020
16. Koordinator Kerjasama Pendidikan Program Studi Magister Teknik Kimia Jalur Rekayasa Proses FTI, ITB, 2018
17. Anggota Komisi Inovasi ITB, 2019
18. Anggota TPAK FTI ITB, 2019-2022
19. Koordinator Tim Pendampingan Pelaksanaan Pendidikan Teknik Kimi Universitas Pattimura, Ambon, 2019 - sekarang
20. Ketua Kelompok Keahlian Teknologi Reaksi Kimia dan Katalisis, FTI ITB, 2022 – sekarang
21. Anggota TPAK ITB, 2023 - sekarang
22. Koordinator PSPPI Subprogram Teknik Kimia, 2023 – sekarang
23. Delegasi ITB dan Delegasi Nasional, Technology Expo, Hannover-Messe, Germany, 2023

III. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

1. Asisten Ahli Madya, 1 Februari 1991
2. Asisten Ahli, 1 Oktober 1998
3. Lektor, 1 Desember 2001
4. Lektor Kepala 1 Desember 2012
5. Guru Besar, 1 November 2022

IV. KEGIATAN PENELITIAN

1. URGE (*University Research for Graduate Education*) Project, batch IV, Comprehensive Numerical and Experimental Studies of Flow, heat and Chemical Species Distribution during Conversion in Catalytic packed bed Chemical Reactor, Peneliti Utama, 1999-2001
2. Hibah Bersaing, DIKTI, “Pemodelan Reaktor Oksidasi Metanol menjadi Formaldehida pada Reaktor Unggun Tetap Berkatalis Fe/Mo/O”, sebagai Peneliti Utama, 2000
3. Hibah Bersaing, DIKTI, “Oksidasi Etanol menjadi Asetaldehida”, sebagai Peneliti Utama, 2006
4. Riset ITB, “Pengembangan Proses Reformasi Kukus Metanol untuk Memproduksi Hidrogen”, Peneliti Utama, 2008-2009
5. PT Pertamina (Persero), “Pengembangan Katalis *Naphtha Hydrotreating*”, anggota peneliti, 2004-2016

6. PT Pertamina (Persero), “Pengembangan Katalis Perengkahan R/FCC”, sebagai Peneliti Utama, 2016-2020
7. Kemenristek/DIKTI, Dirjen Penguatan Inovasi, “Pembangunan Pabrik Katalis untuk Pendidikan”, sebagai anggota peneliti, 2017
8. Kemenristek/DIKTI, Dirjen Penguatan Inovasi, “Pembangunan Pabrik Katalis untuk Pendidikan Tahap 2”, sebagai anggota peneliti, 2018
9. Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS), “Pengembangan Proses , Perengkahan Minyak Sawit menjadi Bensin Nabati”, sebagai Peneliti Utama, 2017
10. Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS), “Perancangan dan Pembangunan Unit Pilot Produksi Bensin Nabati skala 20L/jam”, sebagai Peneliti Utama, 2018
11. Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS), “Pengembangan Proses Produksi BioBTX dari Minyak Sawit”, sebagai Peneiti Utama, 2019
12. Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS), “Pengembangan Proses Prduksi Bensin nabati Skala Percontohan 1000L/hari dan Uji Koprocessing bahan Bakar Nabati”, anggota peneliti, 2019
13. Prioritas Riset Nasional, LPDP/Kemenristek-BRIN, “Pengembangan Teknologi Produksi Bahan Bakar Nabati”, sebagai Peneliti Utama, 2020-2024
14. Proyek Strategis Nasional, Kemenristek/BRIN, “Pengembangan Pabrik Industrial Vegetable Oil dan Bensin Nabati Menggunakan Katalis Merah Putih yang Terintegrasi dengan Kebun Sawit Rakyat”, anggota peneliti, 2020-2024
15. Proyek Strategis Nasional, KemenESDM, “Pembangunan Pabrik Katalis Merah Putih dan Hilirisasi Industri Produksi Bahan Bakar Biohidrokarbon”, anggota peneliti, 2020-2024
16. Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS), “Pengembangan Lanjut Proses Produksi Bensin Sawit dan minyak makan Merah”, 2022-2024

V. PUBLIKASI

JURNAL INTERNASIONAL

1. Rasrendra, C.B., **Makertihartha, I.G.B.N.**, Adisasmito, S., Heeres, H.J. Green chemicals from D-glucose: Systematic studies on catalytic effects of inorganic salts on the chemo-selectivity and yield in aqueous solutions, *Topics in Catalysis*, 53 (15-18), 2010
2. C.B. Rasrendra, **IGBN Makertihartha**, S. Adisasmito, H.J. Heeres, “Green Chemical from d-Glucose: Systematic Studies on Catalytic Effects of Inorganic Salts on the Chemo-selectivity and Yield in Aqueous Solutions”, *Topic in Catalysis*, 53, 2010
3. C.B. Rasrendra, B.A. Fachri, **I.G.B.N. Makertihartha**, S. Adisasmito, H.J. Heeres, “Catalytic Conversion of Dihydroxyacetone to Lactic Acid Using Metal Salts in Water”, *ChemSusChem*, 4, 2011
4. C.B. Rasrendra, J.N.M. Soetedjo, **IGBN Makertihartha**, S. Adisasmito, H.J. Heeres, “The Catalytic Conversion of d-Glucose to 5-Hydroxymethylfurfural in dmso Using Metal Salts”, *Topic in Catalysis*, 55, 2012
5. Rasrendra, C.B., Soetedjo, J.N.M., **Makertihartha, I.G.B.N.**, Adisasmito, S., Heeres, H.J. The catalytic conversion of D-glucose to 5-hydroxymethylfurfural in DMSO using metal salts, *Topics in Catalysis*, 55 (7-10), pp. 543-549, 2012
6. Robert Manurung , Louis Daniel , Hendrik H. van de Bovenkamp , Teddy Buntara , Siti Maemunah , Gerard Kraai , **I. G. B. N. Makertihartha** , Antonius A. Broekhuis and Hero J. Heeres, “Chemical modifications of Sterculia foetida L. oil to branched ester derivatives”, *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 2012
7. Dahlan, I Nyoman Marsih, **IGBN Makertihartha**, Piyasan Praserthdam, Joongjai Panpranot, Ismunandar, “Gamma-Alumina Nanotubes Prepared by Hydrothermal Method as Support of Iron, Cobalt and Nickel for Fischer-Tropsch Catalyst”, *Chemistry and Material Research*, Vol 2, No 3, 2012
8. Rasrendra, C.B., Windt, M., Wang, Y., Adisasmito, S., **Makertihartha, I.G.B.N.**, Van Eck, E.R.H., Meier, D., Heeres, H.J. Experimental studies on the pyrolysis of humins from the acid-catalysed dehydration of C6-sugars (2013) *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 104, pp. 299-307. 2013

9. Al Fatony, Z., Resha, A.H., Persada, G.P., **Makertihartha, I.G.B.N.**, Gunawan, M.L., Subagjo, "Effects of Cu on the modified Co-based catalyst activity for fischer-tropsch synthesis", *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, Volume 18, Issue 1, 2018,
10. **Makertihartha, I.G.B.N.**, Dharmawijaya, P.T., Zunita, M., Wenten, I.G. , "Hydrogen Selective Layer for Dehydrogenation Membrane Reactor", *Advanced Science Letters* Volume 23, Number 6, June 2017
11. **Makertihartha, I.G.B.N.**, Rizki, Z., Zunita, M., Dharmawijaya, P.T., "Graphene Based Nanofiltration for Mercury Removal from Aqueous Solutions", *Advanced Science Letters* Volume 23, Issue 6, 2017
12. **Makertihartha I.G.B.N.**, P. T. Dharmawijaya, Recent Advances on Bioethanol Dehydration using Zeolite Membrane, *Journal of Physics*, IOP Conf Series, DOI: 10.1088/1742-6596/877/1/012074, 2017
13. Joko Waluyo, **I.G.B.N. Makertihartha**, Herri Susanto, Modification of natural zeolite as a catalyst for steam reforming of toluene, *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, 17, 1, 37-45, 2017
14. Virgana, S, Harry Hans, J., Iyan Wanadi, G., Melia Laniwati, G., Subagjo, **Makertihartha, I.G.B.N.**, "Effect of molybdenum addition in nickel-based catalyst on hydrogenation reaction of 2-ethyl-2-hexenal hydrogenation to 2-ethyl-hexanol", *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, Volume 7, Issue 4, 2018
15. Maryani K. Wardani, Grandprix T. M. Kadja , Adroit T. N. Fajar, Subagjo, **I. G. B. N. Makertihartha**, Melia L. Gunawan, Veinardi Suendo and Rino R. Mukti. , "Highly crystalline mesoporous SSZ-13 zeolite obtained via controlled post-synthetic treatment", *RSC Advances*, Volume 9, Issue 1, 2019
16. Adamu Idris, UmerKhalil, Ismail Abdul Aziz, **I.G.B.N.Makertihartha**, Subagjo, Melia Laniwati, Abdul-Rahman Al-Betar, Rino R.Mukti, Oki Muraza, , "Fabrication zone of OSDA-free and seed-free mordenite crystals", *Powder Technology*, Volume 342, 15 January 2019
17. **I.G.B.N. Makertihartha**, Khoiruddin, K., Nabu, E.B.P., Aryanti, P.T.P., Wenten, I.G. , "SIMULTANEOUS METHYL ESTER PRODUCTION AND CAROTENE RECOVERY FROM CRUDE PALM OIL USING MEMBRANE REACTOR", *Jurnal Teknologi*, Volume 81, Issue 2, March 2019
18. **I Gusti B.N. Makertihartha** , Grandprix T.M. Kadja, Melia L. Gunawan, Rino R. Mukti & Subagjo, "Exceptional Aromatic Distribution in the

- Conversion of Palm-Oil to Biohydrocarbon Using Zeolite-Based Catalyst", *J. Eng. Technol. Sci.*, Vol. 52, No. 4, 2020, 584-597, 2020
19. **I.G.B.N. Makertihartha**, R.B. Fitradi, A.R. Ramadhani, M. Laniwati, O. Muraza, Subagjo, "Biogasoline Production from Palm Oil: Optimization of Catalytic Cracking Parameters", *Arabian Journal for Science and Engineering*, Volume 45, Issue 2, Nomor 04354-4, 26 Februari 2020,
 20. **I.G.B.N. Makertihartha** (Corresponding Author), Grandprix T.M. Kadja, Melia L. Gunawan, Rino R. Mukti & Subagjo, "*Exceptional Aromatic Distribution in the Conversion of Palm-Oil to Biohydrocarbon Using Zeolite-Based Catalyst*", *J. Eng. Technol. Sci.*, Vol. 52, No. 4, 2020
 21. **I.G.B.N. Makertihartha**, Kevin S. Kencana, Theodorus R. Dwiputra, K. Khoiruddin, Rino R. Mukti, I.G. Wenten, "Silica Supported SAPO-34 membranes for CO₂/N₂ separation", *Journal of Microporous and Mesoporous Materials*, Volume 298, 15 May 2020
 22. Noerma J. Azhari, D. Erika, St. Mardiani, Th. Ilmi, M. L. Gunawan, **IGBN Makertihartha**, G. T. M. Kadja, "Methanol Synthesis from CO₂: a mechanistic overview", *Results in Engineering*, 16, 2022
 23. **IGBN Makertihartha**, Noerma J. Azhari, Grandprix T. M. Kadja, "A Review on Zeolite Application for Aromatic Production from Non-Petroleum Carbon-Cased Resources", *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 55, 2, 2023

JURNAL NASIONAL

1. Yazid Bindar, **IGBN Makertihartha**, M. Dani Supardan, Luqman Buchori, "Utilizing Shear Factor Model and Adding Viscosity Term in Improving a Two Dimensional Model of Fluid Flow in Non Uniform Porous Media", *ITB Journal of Engineering Science*, 39, 2, 109-127, 2007
2. Yazid Bindar, **IGBN Makertihartha**, M. Dani Supardan, Luqman Buchori, "Utilizing Shear-Factor and Adding Viscosity Term in Improving a Two-Dimensional Model of Fluid Flow in Non Uniform Porous Media", *ITB Journal of Engineering Science*, Vol 39, No 2, 2007
3. **IGBN Makertihartha**, Subagjo, Melia Laniwati Gunawan, "Synthesis and Activity Test of Cu/ZnO/Al₂O₃ for the Methanol Steam Reforming", *ITB Journal of Engineering Science*, 41, 1, 37-49, 2009
4. L. Buchori, Y. Bindar, D. Sasongko, and **IGBN Makertihartha**, "2-d mathematical and numerical modeling of fluid flow inside and outside

- packing in catalytic packed bed reactor," *Reaktor*, vol. 5, no. 1, pp. 1-7, Jun. 2017.
5. L. Buchori, M. Supardan, Y. Bindar, D. Sasongko, and **I. Makertihartha**, "The Effect Of Reynolds Number At Fluid Flow In Porous Media," *Reaktor*, vol. 6, no. 2, pp. 48-55, Jun. 2017
 6. Wibisono Yamin , **I.G.B. Ngurah Makertihartha**, and Jenny Rizkiana, "Evaluation on Energy Efficiency Improvement in Geothermal Power Plant with The Application of Load-based Gas Removal System and Cooling Water Pump Control System", *Jurnal Rekayasa Proses*, Vol 14, No 1, 2020
 7. Melia Laniwati Gunawan, **IGBN Makertihartha**, Subagio, "Kinetika Reaksi Hidrogenasi Ester Lemak Menjadi Alkohol Lemak Dengan Katalis Tembaga- Mangan, The Kinetics Study of Fatty Acid Methyl Ester to Fatty Alcohol on Copper-Manganese Catalyst", *Indonesian Journal of Chemical Research*, Vol. 8, Issue 1, pp. 21-27, 31 Mei 2020

SEMINAR INTERNASIONAL

1. Bindar, Y., L. Buchori, D. Sasongko, **I G.B.N. Makertihartha**, and M.D. Supardan, "*Two-Dimensional Mathematical And Numerical Modelings of Fluid Flow in Porous Media*", Regional Symposium on Chemical Engineering , Singapore, December 2000
2. Bindar, Y., M.D. Supardan, D. Sasongko, **I G.B.N. Makertihartha**, and L. Buchori, "*Two-Dimensional Numerical Modeling of Fluid Flow in Porous Media Using Shear Factor Models*", Regional Symposium on Chemical Engineering , Singapore, December 2000
3. **IGBN Makertihartha**, "*Steady State Two Dimensional Simulation of Packed Bed Reactor for Methanol Oxidation to Formaldehyde*", Regional Symposium on Chemical Engineering , Singapore, December 2000
4. **Makertihartha, IGBN.**, A. Hadianto, D. Sasongko, Y. Bindar, "*Complex Kinetics of Methanol Oxidation to Formaldehyde*", Regional Symposium on Chemical Engineering , Bandung, October 2001
5. Suherman, **IGBN. Makertihartha**, D. Sasongko, Y. Bindar, "*Two Dimensional Simulation of Methanol Oxidation using 2D-PVPH Model*", Regional Symposium on Chemical Engineering , Bandung, October 2001
6. Davis Johanes, **IGBN Makertihartha**, "*2D Simulation of Fixed Bed Reactor on Ethanol Oxidation to Acetaldehyde*", Regional Symposium on Chemical Engineering, Manila, December 2003

7. Komariah, L. N., **IGBN Makertihartha**, “Complex Kinetics of Ethanol Oxidation over Ag Catalyst”, Regional Symposium on Chemical Engineering, Manila, December 2003
8. Davis Johanes, **IGBN Makertihartha**, Melia Laniwati, “2D Simulation of Fixed Bed Reactor on Ethanol Oxidation to Acetaldehyde”, Seminar Nasional Teknik Kimia, Yogyakarta, Oktober 2003
9. Nabila, N. Kamilia, **IGBN Makertihartha**, C.B. Rasrendra and J.P. Sitompul, Catalytic Glucose Conversion to Lactic Acid in Water using PbO/ γ -Al₂O₃ Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia, 12-13 Oktober 2015, Yogyakarta
10. T.J.L. Sitohang, **IGBN Makertihartha**, H.J. Heeres, “Hydrogenation of Red Palm Oil Model Compounds using Ru-TPPTS and Rh-TPPTS Water-soluble Homogeneous Catalyst in Biphasic Systems”, Regional Symposium on Chemical Engineering, Hanoi, Vietnam, December 2005
11. C.B. Rasrendra, H.J. Heeres, S. Adisasmito, **IGBN Makertihartha**, “Levulinic Acid Production from Elephant Grass (*Miscanthus x Giganteus*)”, 4th Asia Pacific Congress on Catalysis (APCAT 4), Singapore, 2006
12. C.B. Rasrendra, H.J. Heeres, S. Adisasmito, **IGBN Makertihartha**, “Levulinic Acid Production from Elephant Grass (*Miscanthus x Giganteus*)”, ERA Chemistry Workshop, Krakow, Poland, 2008
13. Subagjo, **IGBN Makertihartha**, Diyar, “Preparation and Activity Test of Cu-Zn Based LTSC Catalyst”, Regional Symposium on Chemical Engineering, Bangkok, Thailand, 1-3 December 2004
14. Davis Johanes, **IGBN Makertihartha**, Melia Laniwati, “Simulation of Fixed Bed Reactor on Ethanol Oxidation to Acetaldehyde”, Regional Symposium on Chemical Engineering, Bangkok, Thailand, 1-3 December 2004
15. Subagjo, **IGBN Makertihartha**, Diyar, “Preparation and Activity Test of Cu-Zn Based LTSC Catalyst”, Seminar Teknik Kimia Soehadi Reksowardojo, Bandung, Oktober 2004
16. Zuhroni Ali Fikri, Chairil Anshari, Zaky Al Fatony, **IGBN Makertihartha**, Melia Laniwati Gunawan dan Subagjo, Simulasi dan Perancangan Slurry Bubble Column Reactor untuk Reaksi Fischer Tropsch, Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia, 12-13 Oktober 2015, Yogyakarta.
17. Nabila, N. Kamilia, **IGBN Makertihartha**, C.B. Rasrendra and J.P. Sitompul, Catalytic Glucose Conversion to Lactic Acid in Water using

PbO/ γ -Al₂O₃ Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia, 12-13 Oktober 2015, Yogyakarta

18. **Makertihartha I.G.B.N.**, M. Zunita, Z.Rizki and P. T. Dharmawijaya, Recent advance on Zeolite modification for direct alcohol fuel cells (DAFCs), EIC, 2016
19. **IGBN Makertihartha**, M. Zunita, Z.Rizki and P. T. Dharmawijaya, Solvent extraction of gold using ionic liquid based process, IPMC, DOI: 10.1063/1.4974419, 2016
20. **Makertihartha I.G.B.N.**, M. Zunita, Z.Rizki and P. T. Dharmawijaya, Dyes removal from textile wastewater using graphene based nanofiltration, ISFACHE IAP, 2016
21. **I. G. B.N. Makertihartha**, M. Zunita, P. T. Dharmawijaya, I. G. Wenten, Supported ionic liquid membrane in membrane reactor, ICESNANO AIP, 2016
22. **IGBN Makertihartha**, M. Zunita, P. T. Dharmawijaya, I. G. Wenten, Post combustion CO₂ capture using zeolite membrane, EIC AIP, 2016
23. **IGBN Makertihartha**, P. T. Dharmawijaya, I. G. Wenten, Current progress on zeolite membrane reactor for CO₂ hydrogenation, ICESNANO AIP, 2016
24. **Makertihartha I.G.B.N.**, M. Zunita, P. T. Dharmawijaya, I. G. Wenten, Direct synthesis of hydrogen peroxide using in-situ selective layer, ISFACHE AIP, 2016
25. **IGBN Makertihartha**, M. Zunita, Z.Rizki and P. T. Dharmawijaya, Simulation of Water Gas Shift Zeolite Membrane Reactor, *Material Science and Engineering*, IOP Series, 214, 2017
26. Zaky Al Fathoni, **IGBN Makertihartha**, Melia Laniwati, Subagjo, "Effect of Cu on the activity of Co based catalyst for Fischer-Tropsch synthesis", Regional Symposium on Chemical Engineering, UNDIP, Semarang 2017
27. Affandri, **IGBN Makertihartha**, "Hydrodeoxygenation of Crude Palm Kernel Oil", International Seminar on Chemical Engineering, Bandung, 2017
28. **Makertihartha, I.G.B.N .**, Zunita, M., Rizki, Z., Dharmawijaya, P.T. , "Advances of zeolite based membrane for hydrogen production via water gas shift reaction", *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 877, Issue 1, 10 August 2017
29. Melia Laniwati Gunawan, Subagjo, **IGBN Makertihartha**, dan Zaky Al Fatoni, Hidrogenasi Ester Lemak menjadi Alkohol Lemak menggunakan

Katalis Berbasis Cu (Tembaga) pada Reaktor Batch, Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia, 12-13 Oktober 2015, Yogyakarta.

30. Zaky Al Fathoni, **IGBN Makertihartha**, Melia Laniwati, Subagjo, "Activity test of Co based catalyst for Fischer-Tropsch synthesis", ISIChem, Padang 2018

SEMINAR NASIONAL

1. **IGBN Makertihartha**, "*Two Dimensional Simulation on the Packed Bed Reactor for the Methanol Oxidation to Formaldehyde Reaction System*", presented in the "Fundamental and Application of Chemical Engineering 1999 Seminar, Campus of ITS, Surabaya, 24-25 November 1999
2. Yazid Bindar, **IGBN Makertihartha**, "*Study of Temperature, Concentration and Flow Distribution on the Packed Bed Reactor*", presented in the "Fundamental and Application of Chemical Engineering 1999 Seminar, Campus of ITS, Surabaya, 24-25 November 1999
3. **IGBN Makertihartha**, Arie Andrianus C.T., Jenny Susanto Puteri, "*Two Dimensional Simulation of the Methanol Oxidation to Formaldehyde on the Non-Homogeneous Flow Packed Bed Reactor*", National Chemical Engineering Conference, UNDIP Semarang, July 2000
4. M.Dani Supardan, Yazid Bindar, **IGBN Makertihartha**, Dwiwahju Sasongko and Luqman Buchori, "*Two-Dimensional Numerical Modelling of Fluid Flow Field in Porous Media using Shear Factor Models*", National Chemical Engineering Conference, UNDIP Semarang, July 2000
5. Luqman Buchori, Yazid Bindar, **IGBN Makertihartha**, Dwiwahju Sasongko and M.Dani Supardan,, "*Two-Dimensional Mathematical and Numerical Modelling of Fluid Flow Field in Porous Media at Forschheimer Regime*", National Chemical Engineering Conference, UNDIP Semarang, July 2000
6. Melia Laniwati Gunawan, Subagjo, **IGBN Makertihartha**, dan Zaky Al Fatoni, Hidrogenasi Ester Lemak menjadi Alkohol Lemak menggunakan Katalis Berbasis Cu (Tembaga) pada Reaktor Batch, Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia, 12-13 Oktober 2015, Yogyakarta.
7. Nabila, N. Kamilia, **IGBN Makertihartha**, C.B. Rasrendra and J.P. Sitompul, Catalytic Glucose Conversion to Lactic Acid in Water using PbO/ γ -Al₂O₃ Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia, 12-13 Oktober 2015, Yogyakarta

8. Zuhroni Ali Fikri, Chairil Anshari, Zaky Al Fatony, **IGBN Makertihartha**, Melia Laniwati Gunawan dan Subagjo, Simulasi dan Perancangan Slurry Bubble Column Reactor untuk Reaksi Fischer Tropsch, Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia, 12-13 Oktober 2015, Yogyakarta.
9. Nabila, N. Kamilia, **IGBN Makertihartha**, C.B. Rasrendra and J.P. Sitompul, Catalytic Glucose Conversion to Lactic Acid in Water using PbO/ γ -Al₂O₃ Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia, 12-13 Oktober 2015, Yogyakarta

PEMBICARA UNDANGAN/PEMBICARA KUNCI

1. **IGBN Makertihartha**, Akreditasi ABET Program Studi Teknik Kimia ITB, Lokakarya Akreditasi ASIIN, Hotel Novotel Bandung, November 2013
2. **IGBN Makertihartha**, Fasilitator dalam Pelatihan Motivasi Kegiatan Pengembangan Karakter Mahasiswa ITB 2013, September 2013
3. **IGBN Makertihartha**, “Development of Indonesia Biofuel Technology”, Indonesian Palm Oil Conference and 2020 Price Outlook, Bali, Oktober 2019
4. **IGBN Makertihartha**, “National Catalyst Production Plant”, Workshop Kajian Penetrasi Pasar B100 dan E100 untuk Sektor kendaraan Bermotor, Kementerian Perindustrian, Republik Indonesia, Republic of Indonesia, Oktober 2019
5. **IGBN Makertihartha**, “Biohydrocarbon Fuel”, Sawitpreneur, PASPI, November 2019
6. **IGBN Makertihartha**, “Status and Overview: National Catalyst Production Plant”, Alih Teknologi Katalis Merah Putih, Kementerian Riset dan Teknologi/BRIN, Republik Indonesia, 2019
7. **IGBN Makertihartha**, “Green Refinery Development: Biofuel Catalyst Production Plant”, Rakor Persiapan Pembangunan Green Refinery, Kemenko Perekonomian, Republik Indonesia, Agustus 2019
8. **IGBN Makertihartha**, “Biofuel Technology Development Plan”, Indonesianisme, IA ITB, Agustus 2019
9. **IGBN Makertihartha**, “Membangun Kemandirian Minyak Nabati Nasional dalam Konteks Pengembangan Biofuel dari Minyak Sawit”, Kementerian Luar Negeri, Republik Indonesia, Mei 2019
10. **IGBN Makertihartha**, “Development of Catalyst and Process Technology for Biofuel”, Coordination Meeting, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Republik Indonesia, Juni 2019

11. **IGBN Makertihartha**, “Development of Catalyst Technology for Indonesian Biofuel Industries”, Bincang Energi: Efisiensi Energi Melalui Pemanfaatan Sumber Daya Energi Baru dan Terbaru, Kemenko Kemaritiman, Republik Indonesia, Mei 2019
12. **IGBN Makertihartha**, “Development of Catalyst and Process Technology for Biohydrocarbon Fuel in Indonesia”, Rapat Koordinasi Peluang Bisnis Teknologi Produksi Gasoline Nabati Berbahan Baku Minyak Sawit dengan Katalis Merah Putih, Kementerian Perindustrian RI, Mei 2019
13. **IGBN Makertihartha**, “Business Opportunities and Technology Development of Biohydrocarbon Diesel D100”, Medan International Conference on Energy and Sustainability, The 5th ITB Centennial International Conference on Energy (ITB ICO5-P100), 27-28 Oktober 2020
14. **IGBN Makertihartha**, “Development of Palmoil Based Biofuel Technology”, WEBINAR Indonesia-Brazil, Development of Brazilian Bioethanol-Based Biofuel, 9 September 2020
15. **IGBN Makertihartha**, “Biofuel Technology for Indonesia”, Indonesia Expo, Hannover-Messe, Germany, April/June 2020
16. **IGBN Makertihartha**, “Development of Biohydrocarbon Fuel Technology”, Rapat Koordinasi Kementerian Riset dan Teknologi/BRIN, Republik Indonesia, Januari 2020
17. **IGBN Makertihartha**, “Development of Palm Oil Gasoline Production Technology”, International Palm Oil Conference, Medan, October 2022
18. **IGBN Makertihartha**, “Pengembangan Teknologi Bahan Bakar berbasis Sawit”, PERISAI (Pekan Riset Sawit Indonesia), Perkebunan Expo (BUNEX) Jakarta, Desember 2022
19. **IGBN Makertihartha**, “Pengembangan Teknologi Bahan Bakar berbasis Sawit”, PERISAI (Pekan Riset Sawit Indonesia), Medan, Oktober 2022
20. **IGBN Makertihartha**, “*Development of Palm oil Based Biofuel Production Technology in Indonesia*”, International Oil Palm Conference, Bali, March 2023
21. **IGBN Makertihartha**, “*Development of Palm oil Gasoline Production Technology*”, Feeding & Energizing The World, International Expo, Hannover Messe, 2023
22. **IGBN Makertihartha**, “*Development of Palm Oil Gasoline Production Technology*”, EBTKE ConEx 2023, Kementerian ESDM, Bumi Serpong Damai, Juli 2023

VI. PATEN

1. Subagio, **IGBN Makertiharta**, Melia Laniwati Gunawan, Maria Ulfa, Evita Emaniatin, Rachmad Sutontro, Zarah Duniani, "Katalis Pengolahan- Hidro (Hydrotreating Yang Aktif Pada Penjenuhan Olefin dan Penyingkiran Nitrogen dalam Umpan Hidrokarbon dan Proses Pembuatannya", Paten tingkat nasional, 2019
2. Grandprix T.M. Kadja, Rino R Mukti, Subagio, **IGBN Makertiharta**, Melia Laniwati Gunawan, " Metode Sintesis Zeolit ZSM-5 Berpori Hierarkis Bebas Agen Pencetak Pada Suhu Rendah", Paten tingkat nasional, 2019
3. Zarrah Duniani, Evita Emaniatin, Rachmad Sutontro, Septhian Marno, Slamet Pamuji, Rizki Ekananda, Subagio, **IGBN Makertiharta**, Melia Laniwati Gunawan, "Proses Pembuatan Penyangga Katalis Pengolahan Hidro untuk Umpan Minyak Fosil, Minyak Nabati, dan Campur", Paten tingkat nasional, 2019
4. Melia Laniwati Gunawan, Subagio, Fadhli, C. B. Rasrendra, Grandprix Thomryes Marth Kadja, **IGBN Makertiharta**, "Metoda Sintesis Katalis Tembaga-Mangan (CuMn) dan Pengaturan Proses Hidrogenasi Ester Lemak menjadi Alkohol Lemak", Paten Nasional, 2023

VII. PENGHARGAAN

1. Satya Lencana Karya Satya 10 Tahun, Pemerintah Republik Indonesia, 1999
2. Satya Lencana Karya Satya 20 Tahun, Pemerintah Republik Indonesia, 2009
3. Penghargaan 25 Tahun ITB, Rektor ITB, 2014
4. Penghargaan Manajemen Waktu Penelitian Terbaik pada Pekan Riset Sawit Indonesia, BPD PKS, 2018
5. Satya Lencana Karya Satya 30 Tahun, Pemerintah Republik Indonesia, 2019
6. Penghargaan Bidang Karya Inovasi ITB, Rektor ITB, 2020

VIII. SERTIFIKASI

1. *Applied Approach*, 1991
2. Sertifikasi Dosen, Departemen Pendidikan Nasional, 2005
3. Sertifikasi Insinyur Profesional, Persatuan Insinyur Indonesia, 2015
4. Sertifikasi Asesor BAN PT, 2015
5. Sertifikasi Evaluator IABEE, 2019



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

Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung

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

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

ISBN 978-623-297-323-7



9 786232 973237