



Disusun Oleh :
Dr. Suherman, S.T., M.T.
Prof. Dr. Ir. Ilmi Abdullah, M.Sc.
Dr. Surya Dharma, S.T., M.T.

produksi BIODIESEL

(Pemilihan Teknologi Proses
dan Analisis Ekonomi)



PRODUKSI BIODIESEL

*(Pemilihan Teknologi Proses
dan Analisis Ekonomi)*

HAK CIPTA DILINDUNGI UNDANG-UNDANG

Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanis, termasuk memfotocopy, merekam dan dengan sistem penyimpanan lainnya tanpa izin tertulis dari penulis.

PRODUKSI BIODIESEL

*(Pemilihan Teknologi Proses
dan Analisis Ekonomi)*

Suherman
Ilmi Abdullah
Surya Dharma



Judul

**Produksi Biodiesel (Pemilihan Teknologi Proses dan Analisis
Ekonomi)**

Penulis

Suherman

Ilmi Abdullah

Surya Dharma

Layouter

Fimanda Arlita, M.Pd.

Cetakan Pertama; Desember 2023

(xiv + 246 hlm); 15 x 23 cm

ISBN : 978-623-408-539-6

E-ISBN : 978-623-408-540-2 (PDF)

Penerbit



Redaksi

Jalan Kapten Muktar Basri No 3 Medan, 20238

Telepon, 061-6626296, Fax. 061-6638296

Email; umsupress@umsu.ac.id

Website; <http://umsupress.umsu.ac.id/>

Anggota IKAPI Sumut, No: 38/Anggota Luar Biasa/SUT/2020

Anggota APPTI, Nomor: 005.053.1.09.2018

Anggota APPTIMA (Afiliasi Penerbit Perguruan Tinggi Muhammadiyah Aisyiyah)

Daftar Isi

Daftar Isi _____	v
Prakata _____	ix
Kata Pengantar Editor _____	xiii
 BAB I Pendahuluan _____	 1
A. Krisis Energi _____	1
B. Potensi Sumber Energi Di Indonesia _____	5
C. Kebijakan Penggunaan Biodiesel di Indonesia _____	7
D. Permintaan dan Konsumsi Biodiesel di Dunia _____	7
Daftar Pustaka _____	9
 BAB II Standar Biodiesel _____	 17
A. Nilai Yodium (Iodine Value/ IV) _____	17
B. Viskositas Kinematik (Kinematic Viscosity) _____	18
C. Titik Nyala (Flash Point) _____	19
D. Titik Awan dan Titik Tuang (The Cloud Point and Pour Point) _____	20
E. Angka Setana (Cetane Number) _____	21
F. Massa Jenis (Density) _____	22
G. Nilai Kalor (Calorific Value) _____	23
H. Stabilitas Oksidasi (Oxidation Stability) _____	24
I. Titik Penyumbatan Filter Dingin Cold Filter Plugging Point (CFPP) _____	24
J. Angka Asam _____	25
Daftar Pustaka _____	26
 BAB III Potensi Bahan Baku Generasi Kedua dan Ketiga_	 29
A. Potensi Minyak Jelanta (Waste Cooking Oil) _____	32
B. Minyak Kesambi (<i>Schleichera Oleosa Oil</i>) _____	34
C. Kemiri Sunan (<i>Reutealis Trisperma</i>) _____	36
D. Minyak Nyamplung (<i>Calopyllum Inopyllum</i>) _____	37
E. Minyak Jarak Pagar (<i>Jatropha Curcas</i>) _____	39

F. Minyak Mimba (Neem Seed) _____	40
G. Biji Kapok (<i>Ceiba Pentrandra</i>) _____	41
H. Lemak Hewan _____	43
I. Minyak Kepuh (<i>Sterculia Foetida</i>) _____	45
J. Mikro Alga _____	46
Daftar Pustaka _____	47
 BAB IV Teknologi Pembuatan Biodiesel _____	 59
A. Metode Double Jacket _____	59
B. Gelombang Mikro (<i>Microwave</i>) _____	60
C. Metode Ultrasonik _____	65
D. Metode Radiasi Infra merah (<i>Radiation Infrared</i>) ____	67
E. Metode Induksi Elektromagnetik _____	69
F. Metode Pelepasan Plasma (Plasma Discharge) ____	72
G. Transesterifikasi Superkritis _____	75
H. Mini Plant Produksi Biodiesel _____	78
Daftar Pustaka _____	79
 BAB V Produksi Biodiesel _____	 85
A. Proses Perlakuan Awal (Pre- Treatment) _____	86
B. Pengaruh Kandungan Air Terhadap Biaya Produksi i	87
C. Esterification/ Transesterification _____	88
D. Katalis Homogen Pada Proses Transesterification _	90
E. Katalis Heterogen _____	93
F. Pengaruh Rasio Molar Metanol Terhadap Minyak _	94
G. Pengaruh Kecepatan Agitasi _____	97
H. Pengaruh Konsentrasi Katalis _____	98
I. Pengaruh Waktu Reaksi _____	100
J. Pengaruh Suhu Reaksi _____	104
Daftar Pustaka _____	107
 BAB VI Performansi Mesin dengan Berbagai Jenis Biodiesel	121
A. Mesin Diesel _____	121
B. Efisiensi Volumetrik _____	124
C. Daya Poros (Brake Power/ BP) _____	124

D. Torsi Mesin _____	127
E. Efisiensi Termal (Brake Thermal Efficiency/BTE)____	128
F. Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (Brake-Specific Fuel Consumption/ BSFC) _____	131
G. Tekanan Efektif Rata-Rata (Mean Effective Pressure / MEP) _____	134
H. Suhu Gas Buang _____	135
Daftar Pustaka _____	138
 BAB VII Emisi Gas Buang _____	147
A. Emisi Biodiesel WCO dan Campurannya_____	147
B. Konsentrasi Particulate Matter (PM) _____	148
C. Emisi Unburned Hydrocarbon _____	149
D. Emisi Carbon Monoxide _____	152
E. Karbon Dioksida (CO ₂) _____	155
F. Emisi Nitrogen Oksida (NO _x) _____	157
G. Kepekatan Asap (<i>Smoke Opacity</i>) _____	162
H. Standar Emisi Gas Buang _____	165
Daftar Pustaka _____	167
 BAB VIII Laju Korosi Logam _____	173
A. Laju Korosi Pada berbagai Material _____	175
1. Laju Korosi Baja Ringan Yang Terpapar Biodiesel Campuran _____	176
2. Laju Korosi Pada Aluminium _____	181
3. Laju Korosi Pada Tembaga _____	182
4. Laju Korosi Pada Baja Tahan Karat _____	183
5. Laju Korosi Pada Besi Cor _____	188
B. Penambahan Anti Oksidan pada Laju Korosi _____	190
C. Nilai Asam Biodiesel Setelah Terpapar Logam _____	195
D. Viskositas Kinematik _____	197
E. Pengaruh Temperatur terhadap Laju Korosi _____	200
F. Bahan Penghambat Korosi _____	202
G. Korosi Pada Pabrik Biodiesel _____	205
Daftar Pustaka _____	207

BAB IX Karakteristik Keausan dan Gesekan Biodisel _____	213
A. Metode Empat Bola _____	215
B. Metode Pin on Disk _____	222
C. Metode Rig bolak-balik frekuensi tinggi (A High-frequency reciprocating rig/ HFRR) _____	223
D. Pengujian Keausan Secara Langsung _____	224
Daftar Pustaka _____	225
 BAB X Tekno Ekonomi _____	 229
A. Modal Investasi _____	233
1. Modal Investasi Tetap / <i>Fixed Capital Investment</i> (FCI) _____	234
2. Biaya Siklus Hidup _____	234
3. Faktor Nilai Saat Ini _____	235
4. Biaya Modal _____	235
B. Modal Kerja / <i>Working Capital</i> (WC) _____	236
C. Biaya Produksi Total (BPT) / <i>Total Cost</i> (TC) _____	236
1. Biaya Tetap (BT) / <i>Fixed Cost</i> (FC) _____	237
2. Biaya Variabel (BV) / <i>Variable Cost</i> (VC) _____	237
 Daftar Pustaka _____	 239
Glosarium _____	241
Indeks _____	243
Tentang Penulis _____	245

Prakata

Indonesia memiliki potensi sumber daya yang sangat melimpah, yang tentunya bisa dimanfaatkan sebagai energi baru dan terbarukan seperti energi surya, energi angin lepas pantai dan angin darat, panas bumi, energi air, arus/ panas laut dan energi biomassa. Biodiesel merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang merupakan bahan bakar nabati berbasis non minyak bumi. Diperkirakan, pada tahun 2030, penggunaan biofuel akan mencapai 4-7% dari total konsumsi energi di dunia

Meningkatnya emisi gas rumah kaca (GRK) telah menjadi isu penting dalam beberapa tahun terakhir dan berkontribusi signifikan terhadap perubahan iklim. Sebagai bahan bakar terbarukan, biodiesel telah terkenal secara luas karena karakteristiknya yang khas, termasuk angka setana yang lebih tinggi dibandingkan dengan fosil diesel, titik nyala tinggi, ketiadaan sulfur, Namun, umumnya terjadi sedikit peningkatan emisi NO_x dalam penggunaan bahan bakar teroksigenasi seperti biodiesel, karbon monoksida, poliaromatik, asap, yang mengarah pada pengurangan efek rumah kaca

Sekitar 95% dari biodiesel dunia produksi berasal dari minyak nabati. Minyak yang bisa dimakan (*edible*) dalam produksi biodiesel telah menyebabkan harga minyak nabati dan biodiesel meningkat hingga 1,5-2 kali lipat lebih tinggi dari bahan bakar solar. Mahalnya harga bahan baku, terutama minyak nabati merupakan masalah besar dalam komersialisasi biodiesel. Selain itu, teknologi produksi saat ini memaksa harga biodiesel menjadi lebih tinggi dari yang berbahan bakar solar. Pembuatan biodiesel dari minyak non pangan (*non-edible*) dan Minyak Goreng Bekas (*waste cooking oil*) merupakan langkah yang efektif dalam mengatasi masalah pembuangan minyak goreng bekas serta karena biaya produksi dari biodiesel yang disintesis dapat diturunkan.

Buku ini sengaja disusun penulis karena masih kurangnya referensi terkait buku dengan topik biodiesel dalam bahasa Indonesia yang sesuai digunakan untuk semua kalangan. Buku referensi ini sangat sesuai menjadi rujukan bagi Mahasiswa

Program Studi Teknik Mesin, Teknik Kimia, yang sedang menempuh pendidikan di perguruan tinggi. Pembahasan yang sedikit mendalam pada isi buku ini sangat sesuai digunakan sebagai referensi terutama para peneliti pemula di bidang energi dan kimia. Materi yang disusun bertahap sangat memungkinkan digunakan rekan-rekan dosen yang mengampu mata kuliah energi Baru dan terbarukan atau mata kuliah bahan bakar alternatif. Buku ini juga sangat bagus sebagai buku pegangan, yaitu sebagai referensi untuk dibaca oleh para praktisi di Industri pengolahan biodiesel.

Buku ini terdiri dari 10 Bab yang membahas tentang standard biodiesel dari berbagai Negara. Disisi lain, potensi Bahan bakar generasi kedua dan ketiga yang ada di Indonesia serta sifat fisiokimianya disajikan secara komprehensif. Dalam buku ini juga dibahas tentang teknologi pembuatan biodiesel sehingga penentu kebijakan bisa memilih teknologi yang paling tepat. Selain itu, dalam buku ini juga mereview tentang penerapan katalis homogen dan heterogen dalam produksi biodiesel dari berbagai jenis feedstock. Kinerja mesin diesel yang menggunakan bahan bakar biodiesel direview secara rinci yang disarikan dari hasil penelitian terbaru. Lebih lanjut, karakteristik emisi gas buang dari hasil pembakaran biodiesel dibahas secara khusus dalam satu bab tersendiri. Kompabilitas biodiesel dari berbagai jenis feedstock penting dipelajari untuk mengetahui karakteristik laju korosi dan keausan pada berbagai jenis material ini bisa ditemukan dalam buku ini sehingga bisa menjadi pertimbangan dalam penggunaan biodiesel. Tidak cukup hanya terkait masalah keteknikan, dalam buku ini juga dibahas mengenai aspek ekonomi dalam produksi biodiesel.

Akhir kata penulis mengucapkan rasa syukur ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan anugerah kesehatan, ilmu dan keuangan waktu sehingga menyelesaikan buku ini dengan baik. Selain itu penulis juga tidak lupa mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang turut membantu dalam menyelesaikan buku referensi ini. Penulis juga tak mengucapkan terimakasih kepada para peneliti atas

kesediaannya memberikan izin kepada penulis untuk mengambil gambar sebagai rujukan didalam buku ini.

Medan, Desember 2023

Hormat kami

Dr. Suherman

Prof. Dr. Ilmi Abdullah

Dr. Surya Dharma



Kata Pengantar Editor

Puji sykur ke hadirat Allah swt yang senantiasa memberikan nikmat dan hidayah-Nya. Salawat dan salam kepada junjungan nabi Muhammad saw. Semoga para pembaca dalam keadaan sehat dan keberkahan-Nya.

Buku Produksi Biodiesel (Pemilihan Teknologi Proses dan Analisis Ekonomi) secara keseluruhan terdiri atas 10 bab di antaranya; (1) Pendahuluan, (2) Standar Biodiesel, (3) Potensi Bahan Baku Generasi Kedua dan Ketiga, (4) Teknologi Pembuatan Biodiesel, (5) Produksi Biodiesel, (6) Performansi Mesin dengan Berbagai Jenis Biodiesel, (7) Emisi Gas Buang, (8) Laju Korosi Logam, (9) Karakteristik Keausan dan Gesekan Biodisel, (10), Tekno Ekonomi.

Melalui buku ini diharapkan para pembaca mampu melakukan identifikasi, memahami dan menganalisis penyajian informasi bagi kepentingan produksi biodiesel sehingga menghasilkan pemahaman yang baik.

Selamat membaca!

Medan, Desember 2023

Editor



BAB I

Pendahuluan

A. Krisis Energi

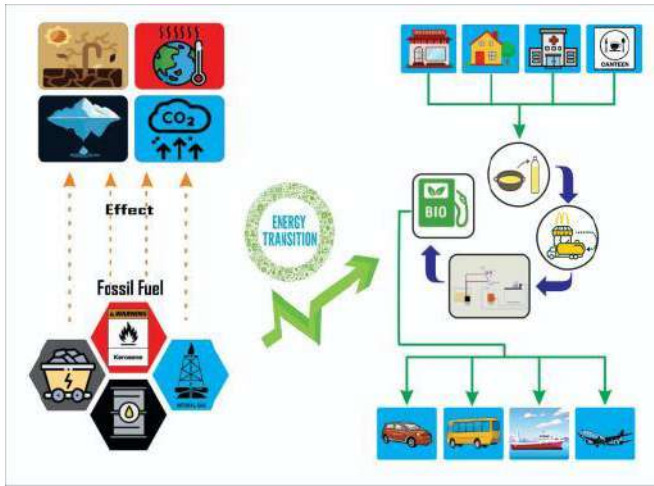
Meningkatnya populasi, kerusakan atmosfer akibat emisi, dan berkurangnya bahan bakar fosil dianggap sebagai tugas utama umat manusia di seluruh dunia. Pada tahun 2020, 557,10 exajoule (EJ) energi dikonsumsi secara global melalui berbagai sektor dengan pangsa minyak mentah sebesar 31,27 % diikuti oleh batu bara (27,19 %), gas alam (24,70 %), pembangkit listrik tenaga air (6,85 %), energi terbarukan (5,69 %), dan energi nuklir (4,30%). Akibatnya, sebagian besar konsumsi energi dihasilkan dari sumber energi tak terbarukan. Pada tahun 2020, sebanyak 32.018,2 juta ton CO₂ dilepaskan ke lingkungan, dimana Tiongkok, Amerika Serikat, dan India memiliki porsi maksimum masing-masing sebesar 30,66%, 13,81%, dan 7,13%. Tiongkok (9899,3 mt CO₂) memegang posisi pertama, diikuti oleh Amerika Serikat (4457,2 mt CO₂) dan India (2302,3 mt CO₂) pada tahun 2020. Namun, tingkat emisinya turun sebesar 11,6 % dan 7,1 % di AS. dan India masing-masing jika dibandingkan dengan tahun 2019. Sebaliknya, Tiongkok menunjukkan peningkatan emisi karbon sebesar 0,6 %. Dalam konteks ini, penggunaan sumber daya energi terbarukan menjadi hal yang tidak bisa dihindari di masa mendatang [1].

Pesatnya pertumbuhan penduduk, urbanisasi, ekonomi dan perkembangan industrialisasi menyebabkan peningkatan konsumsi energi di seluruh dunia [2]. Permintaan energi dunia saat ini sebagian besar dipenuhi oleh sumber daya energi yang tidak berkelanjutan dan tidak terbarukan seperti batubara, minyak, dan gas [2]. Hal ini jelas bahwa cadangan bahan bakar

fosil tidak akan bertahan selamanya [3]. Kira-kira, 25% dari konsumsi energi dunia disebabkan oleh sektor transportasi [4]. Penggunaan bahan bakar fosil yang ekstensif tidak hanya mengakibatkan menipisnya cadangannya dengan cepat tetapi juga menyebabkan meningkatnya polusi udara seperti hujan asam dan pemanasan global [5, 6] dan peningkatan intensitas kekeringan [7] sebagaimana ditunjukkan pada gambar (1.1). Meningkatnya permintaan energi telah mendorong negara-negara untuk mendiversifikasi portofolio energinya untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan meningkatkan keamanan energi [8].

Meningkatnya emisi gas rumah kaca (GRK) telah menjadi isu penting dalam beberapa tahun terakhir dan berkontribusi signifikan terhadap perubahan iklim. Perjanjian Paris tahun 2015 menetapkan target emisi nol bersih pada paruh kedua abad ini, dan lebih dari 80% negara di dunia telah menetapkan target pengurangan emisi karbon dalam beberapa tahun terakhir [9].

Pemerintah Indonesia bekerja sama dengan sejumlah institusi akademis mengidentifikasi pengganti energi tak terbarukan (energi fosil), yang sebagian besar dapat menopang seluruh aktivitas saat ini. Karena bertambahnya populasi manusia, biaya energi meningkat di dunia modern. Untuk menjaga stabilitas lingkungan, energi fosil akan diberi muatan negatif karena jumlahnya terbatas. Salah satu sumber daya berkelanjutan dan alternative adalah biodiesel. Namun karena proses pembuatannya menggunakan minyak nabati pangan seperti minyak sawit dan minyak kelapa, produksi biodiesel masih menghadapi beberapa tantangan [10].



Gambar 1.1 transisi energi dari energi fosil ke energi terbarukan

Penggunaan bauran energi baru dan terbarukan (EBT), ditargetkan pemerintah Indonesia akan tercapai pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2030. Pada 14 Sep 2022, Presiden RI mengeluarkan Peraturan Presiden Nomor 112 Tahun 2022, yang bertujuan untuk mempercepat pengembangan energi terbarukan guna penyediaan tenaga listrik. pada peraturan tersebut ditargetkan pengurangan emisi rumah kaca sebesar 35% dengan cara penghentian seluruh Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang menggunakan batu bara pada tahun 2050. Pemerintah akan memberikan bantuan dan dukungan fiskal terhadap energi yang bersumber dari panas bumi, sinar matahari, angin, energi yang bersumber dari perbedaan suhu lapisan laut dan bioenergy.

Para peneliti telah memusatkan perhatian mereka pada identifikasi alternatif bahan bakar fosil yang tepat. Beberapa sumber energi terbarukan, terutama tenaga surya, biofuel, angin, dan tenaga air (Gambar 1.2). Dari banyak sumber EBT, Biofuel telah dianggap sebagai pengganti yang potensial untuk mengurangi ketergantungan total umat manusia terhadap bahan bakar fosil [11].



Gambar 1.2 pemanfaatan energi baru dan terbarukan sebagai sumber energi

Biodiesel merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang merupakan bahan bakar nabati berbasis non minyak bumi [12]. Diperkirakan, pada tahun 2030, penggunaan biofuel akan mencapai 4-7% dari total konsumsi energi di dunia [13]. Sebagai bahan bakar terbarukan, biodiesel telah terkenal secara luas karena karakteristiknya yang khas, termasuk angka setana yang lebih tinggi dibandingkan dengan fosil diesel, titik nyala tinggi, ketiadaan sulfur [14, 15]. Namun, umumnya terjadi sedikit peningkatan emisi NO_x dalam penggunaan bahan bakar teroksigenasi seperti biodiesel [16], karbon monoksida, poliaromatik, asap, yang mengarah pada pengurangan efek rumah kaca [17, 18]. Biodiesel dapat dibuat dari beberapa sumber berbeda, seperti minyak nabati dan non-nabati, minyak sisa, dan lemak hewani [19, 20]. Penggunaan minyak nabati dan sumber yang tidak dapat dimakan sebagai bahan baku memiliki sedikit keterbatasan teknis dan finansial. Ketersediaan bahan baku yang terbatas untuk mengekstraksi biodiesel semakin menghambat pencapaian tujuan akhir [21].

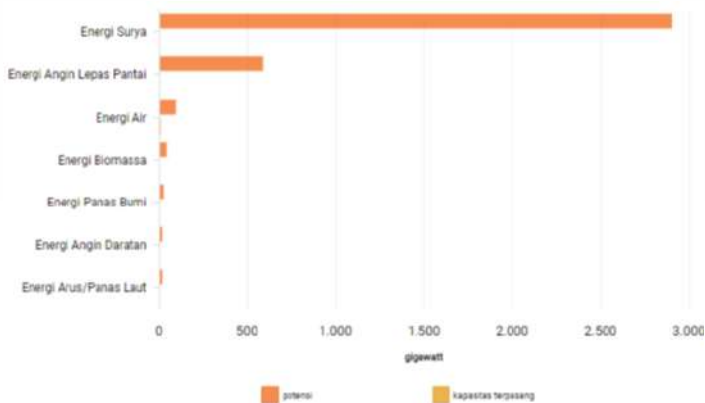
B. Potensi Sumber Energi Di Indonesia

Indonesia memiliki potensi sumber daya yang sangat melimpah, yang tentunya bisa dimanfaatkan sebagai energi baru dan terbarukan seperti energi surya, energi angin lepas pantai dan angin darat, panas bumi, energi air, arus/ panas laut dan energi biomassa. Menurut data hanya sebagian kecil yang baru dimanfaatkan sebagai sumber energi pengganti minyak dan batu bara. Gambar (1.3) menunjukkan rincian kapasitas terpasang potensi EBT di Indonesia. Berikut potensi EBT menurut data:

- Energi Surya memiliki potensi sebesar 2.898 GW, dan terpasang 0,2 GW
- Energi Angin Lepas Pantai (*offshore wind*) memiliki potensi 589 GW, terpasang 0 GW
- Energi Air: potensinya sebesar 94,6 GW, sedangkan yang terpasang 6,1 GW
- Energi Biomassa memiliki potensi cukup besar yaitu sebesar 43,3 GW sedangkan yang terpasang baru sekitar 1,9 GW
- Energi Panas Bumi di Indonesia memiliki potensi 29,5 GW, akan tetapi dari beberapa PLTM yang baru terpasang sekitar 2,1 GW
- Energi Angin Daratan (*onshore wind*) juga memiliki potensi yang lumayan besar yaitu 19,6 GW, sayangnya yang baru dimanfaatkan cukup kecil dengan kapasitas terpasang 0,2 GW
- Energi Arus/Panas Laut juga sangat berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber EBT, potensi kira-kira 17,9 GW, sayangnya belum ada yang memanfaatkan sebagai sumber energi dimana kapasitas terpasang 0 GW.

Selain beberapa potensi diatas, saat ini pemerintah sedang fokus mengembangkan biodiesel sebagai alternatif untuk menggantikan solar dari minyak bumi karena sifatnya yang

terbarukan, toksisitas yang berkurang, emisi gas buang minimum [20], pengurangan yang signifikan dalam jumlah hidrokarbon yang tidak terbakar, karbon dioksida, karbon monoksida, dan emisi partikel tersuspensi dari gas buang [22], mudah terurai secara hayati dan melepaskan lebih sedikit emisi gas rumah kaca [23], dan sifat fisik dan kimia yang lebih baik dibandingkan dengan diesel yang tersedia secara komersial [24]. Dengan campuran 2–30% bahan bakar solar berbasis fosil tidak memerlukan modifikasi apa pun di mesin mobil [25, 26].



Gambar 1.3 gambaran potensi energi baru dan terbarukan di Indonesia [27]

Sekitar 95% dari biodiesel dunia produksi berasal dari minyak nabati. Minyak yang bisa dimakan (*edible*) dalam produksi biodiesel telah menyebabkan harga minyak nabati dan biodiesel meningkat hingga 1,5-2 kali lipat lebih tinggi dari bahan bakar solar [28]. Mahalnya harga bahan baku, terutama minyak nabati merupakan masalah besar dalam komersialisasi biodiesel [29]. Selain itu, teknologi produksi saat ini memaksa harga biodiesel menjadi lebih tinggi dari yang berbahan bakar solar [30]. Pembuatan biodiesel dari Minyak Goreng Bekas (*waste cooking oil*) merupakan langkah yang efektif dalam mengatasi masalah pembuangan minyak goreng bekas serta karena biaya produksi dari biodiesel yang disintesis dapat diturunkan hingga 70% [31,

32]. Penggunaan minyak dengan harga yang murah seperti minyak goreng bekas akan sangat banyak mengurangi biaya produk akhir [32]. Sepuluh negara di dunia (Malaysia, Indonesia, Argentina, AS, Brasil, Belanda, Jerman, The Filipina, Belgia, Spanyol) menyumbang lebih dari 80% dari total potensi produksi biodiesel [33]. Meskipun mengurangi biaya produksi hingga 70%, penelitian secara konsisten menunjukkan bahwa penggunaan *waste cooking oil (WCO)* menghasilkan bahan bakar berkualitas rendah yang memerlukan pemurnian lebih lanjut [34].

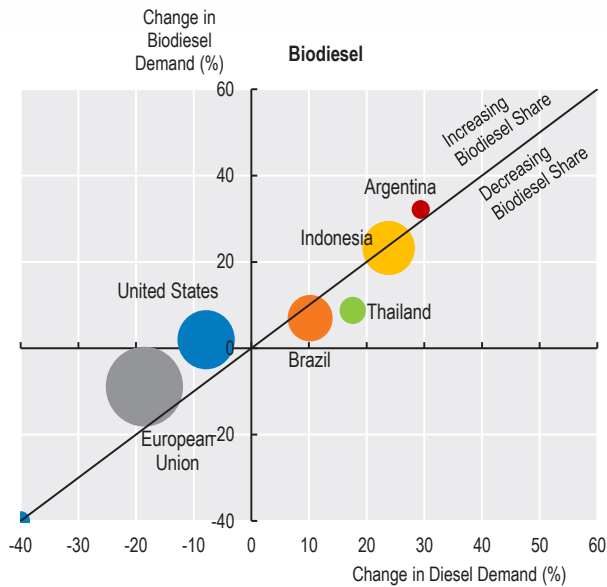
C. Kebijakan Penggunaan Biodiesel di Indonesia

Indonesia memimpin dunia dalam penggunaan biodiesel , dengan B35 (campuran 35 % biodiesel dan 65 % bahan bakar diesel) sebagai standar nasionalnya. Keberhasilan program biodiesel terutama dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti pasokan, permintaan, kerangka peraturan, pertimbangan ekonomi, dan dampak lingkungan [35]. Sejatinya penelitian terkait biodiesel sudah dimulai sejak tahun 1990an, bersama dengan Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi (LEMIGAS), Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS), Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), dan Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS). Lembaga Penelitian Perkebunan (LRPI), dan Institut Teknologi Bandung (ITB) dianggap sebagai lembaga awal yang melakukan penelitian biodiesel dari berbagai bahan baku seperti minyak sawit, minyak jelantah, minyak jarak pagar dan minyak nabati lainnya. Penelitian tersebut tidak hanya terfokus pada penelitian dasar saja, namun juga pada produksi skala pilot hingga uji coba pada mesin diesel [36].

D. Permintaan dan Konsumsi Biodiesel di Dunia

Gambar (1.4) menggambarkan perkembangan permintaan biodiesel di wilayah-wilayah utama. Total penggunaan bahan

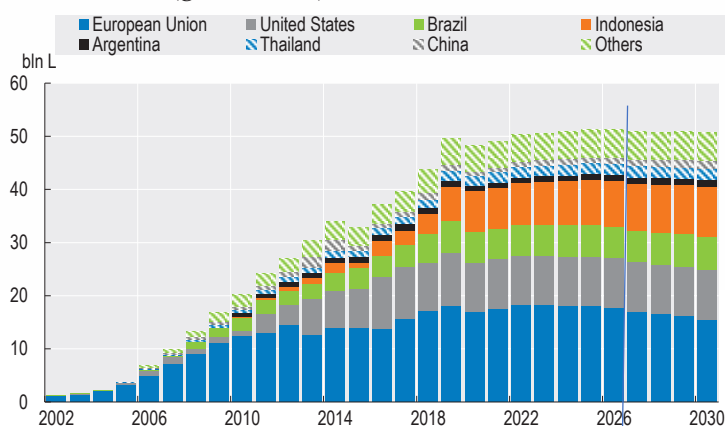
bakar menurun di Uni Eropa dan Amerika Serikat, yang menyiratkan bahwa konsumsi biofuel akan meningkat secara perlahan. Total penggunaan bahan bakar di Brazil diperkirakan akan terus meningkat selama periode proyeksi, sementara konsumsi biodiesel juga kemungkinan akan meningkat. Indonesia meluncurkan program B30 pada tahun 2020, yang seiring dengan meningkatnya permintaan bahan bakar fosil, mendorong penggunaan biodiesel. Persentase campuran biodiesel sebesar 10 % saat ini di Argentina diproyeksikan akan dipertahankan. Jumlah permintaan yang dinyatakan dalam volume digunakan untuk menghitung bagian. Ukuran setiap lingkaran sesuai dengan jumlah biofuel yang dikonsumsi pada tahun 2020 [37]



Gambar 1.4 Perkembangan permintaan biodiesel di beberapa Negara [38]

Di Indonesia penggunaan biodiesel sebagai bahan alternative dari tahun ketahun terus mengalami peningkatan dan hampir sama dengan beberapa Negara besar lainnya seperti

Amerika Serikat dan Brazil. Akan tetapi sedikit mengalami penurunan saat pandemic Covid 19 berlangsung (2020-2022) dan diprediksi akan mengalami peningkatan seiring pertumbuhan ekonomi dan peningkatan jumlah kendaraan setiap tahun. Diprediksi jumlah konsumsi biodiesel tahun 2030 mencapai 9.49 juta kL dna total diseluruh dunia kebutuhan akan biodiesel sebesar 50 bln L (gambar 1.5).



Gambar 1.5 konsumsi biodiesel di seluruh dunia [38]

Daftar Pustaka

- [1] M. Balajii and S. Niju, "Ultrasound-assisted biodiesel production from Ceiba pentandra oil using Musa spp Nendran banana peduncle derived heterogeneous catalyst," *Bioresource Technology Reports*, vol. 21, p. 101310, 2023.
- [2] Y. H. Tan, M. O. Abdullah, J. Kansedo, N. M. Mubarak, Y. San Chan, and C. Nolasco-Hipolito, "Biodiesel production from used cooking oil using green solid catalyst derived from calcined fusion waste chicken and fish bones," *Renewable energy*, vol. 139, pp. 696-706, 2019.
- [3] M. Aghbashlo, M. Tabatabaei, and S. Hosseinpour, "On the exergoeconomic and exergoenvironmental evaluation and optimization of biodiesel synthesis from waste cooking oil

- (WCO) using a low power, high frequency ultrasonic reactor," *Energy Conversion and Management*, vol. 164, pp. 385-398, 2018.
- [4] R. Aitbelale, I. Abala, F. E. M. h. Alaoui, A. Sahibed-dine, N. M. Rujas, and F. Aguilar, "Characterization and determination of thermodynamic properties of waste cooking oil biodiesel: Experimental, correlation and modeling density over a wide temperature range up to 393.15 and pressure up to 140 MPa," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 497, pp. 87-96, 2019.
- [5] M. T. Helmi, K. Hemmati, A. azar, P. A. and Safekordi, A. , "Phosphomolybdc acid/graphene oxide as novel green catalyst using for biodiesel production from waste cooking oil via electrolysis method: Optimization using with response surface methodology (RSM)," *Fuel*, vol. 287, p. 119528, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119528.
- [6] G. R. Katre, S. Zinjarde, S. Kumar, V. R; Kulkarni, B. D. and Kumar, A. R., "Optimization of the in situ transesterification step for biodiesel production using biomass of *Yarrowia lipolytica* NCIM 3589 grown on waste cooking oil," *Energy*, vol. 142, pp. 944-952, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.10.082.
- [7] M. K. Yesilyurt, "The evaluation of a direct injection diesel engine operating with waste cooking oil biodiesel in point of the environmental and enviroeconomic aspects," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff*, vol. 40, pp. 654-661, 2018, doi: 10.1080/15567036.2018.1454546.
- [8] B. H. H. C. Goh, C.T; Ge,Y; Ong, H.C; Ng, J.H; Tian, B; Ashokkumar,V; Lim, S; Seljak, T; Józsa, V, "Progress in utilisation of waste cooking oil for sustainable biodiesel and biojet fuel production," *Energy Conversion and Management*,

- vol. 223, p. 113296, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113296.
- [9] Y. Zhu and H. Fan, "Use of biodiesel in non-road mobile machineries for low-carbon construction: Policy review and lifecycle analysis," *Journal of Cleaner Production*, p. 138543, 2023.
- [10] H. W. Aparamarta *et al.*, "Optimization and kinetic study of biodiesel production from nyamplung oil with microwave-assisted extraction (MAE) technique," *Heliyon*, vol. 8, no. 8, 2022.
- [11] L. Wang, H. Wang, J. Fan, and Z. Han, "Synthesis, catalysts and enhancement technologies of biodiesel from oil feedstock-A review," *Science of The Total Environment*, p. 166982, 2023.
- [12] D. R. Souza, T. Vats, A. Chattree, and P. F. Siril, "RETRACTED: Graphene supported magnetically separable solid acid catalyst for the single step conversion of waste cooking oil to biodiesel," ed: Elsevier, 2018.
- [13] M. A. Mohadesi, B; Maleki, M. and Ansari, A. , "Production of biodiesel from waste cooking oil using a homogeneous catalyst: Study of semi-industrial pilot of microreactor," *Renew. Energy*, vol. 136, pp. 677-682, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.01.039.
- [14] Y. D. Cao, A; Salehi,A; Nemati, M; Ghasemi, A; Koohshekan, O, "The economic evaluation of establishing a plant for producing biodiesel from edible oil wastes in oil-rich countries: Case study Iran," *Energy*, vol. 213, p. 118760, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118760.
- [15] M. Guo, Jiang, W., Chen, C., Qu, S., Lu, J., Yi, W., Ding, J., "Process optimization of biodiesel production from waste cooking oil by esterification of free fatty acids using La³⁺/ZnO-TiO₂ photocatalyst," *Energy Conversion and*

- Management*, vol. 229, p. 113745, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113745.
- [16] A. A. Elshaib, Kamal, M. M. and Elahwany, A. A., "Performance of a diesel engine fueled by waste cooking oil biodiesel," *J. Energy Inst*, vol. 87, pp. 11-17, 2014, doi: 10.1016/j.joei.2014.02.001.
- [17] G. R. Katre, S; Zinjarde,S; Kumar,V.R; Kulkarni,B.D; Kumar,R.K, "Optimization of the in situ transesterification step for biodiesel production using biomass of *Yarrowia lipolytica* NCIM 3589 grown on waste cooking oil," *Energy*, vol. 142, pp. 944-952, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.082>.
- [18] N. N. Petchsoongsakul, K. Kiatkittipong, W. Wongsawaeng, D., and Assabumrungrat, S. , "Different water removal methods for facilitating biodiesel production from low-cost waste cooking oil containing high water content in hybridized reactive distillation," *Renew. Energy*, vol. 162, pp. 1906-1918, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.09.115.
- [19] S. Dharma *et al.*, "Corrosion behaviours of mild steel in biodiesel-diesel fuel blend," in *2018 International Conference on Applied Science and Technology (iCAST)*, 2018: IEEE, pp. 10-15.
- [20] J. Guo, S. Sun, and J. Liu, "Conversion of waste frying palm oil into biodiesel using free lipase A from *Candida antarctica* as a novel catalyst," *Fuel*, vol. 267, p. 117323, 2020.
- [21] A. K. T. Sodhi, S. and Kundu, K., "Biodiesel production using waste cooking oil: a waste to energy conversion strategy," *Clean Technol. Environ. Policy*, *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 19, pp. 1799-1807, 2017, doi: 10.1007/s10098-017-1357-6.

- [22] M. Mohadesi, B. Aghel, M. Maleki, and A. Ansari, "The use of KOH/Clinoptilolite catalyst in pilot of microreactor for biodiesel production from waste cooking oil," *Fuel*, vol. 263, p. 116659, 2020.
- [23] E. G. A. Al-Sakkari, O.M; El-Sheltawy, S.T; Abadir, M.F; Soliman, A; Rene,E.R.; Ismail, I, "Esterification of high FFA content waste cooking oil through different techniques including the utilization of cement kiln dust as a heterogeneous catalyst: A comparative study," *Fuel*, vol. 279, p. 118519, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.118519.
- [24] V. B. Thangarasu, B. and Ramanathan, A. , "Experimental investigation of tribo-corrosion and engine characteristics of Aegle Marmelos Correa biodiesel and its diesel blends on direct injection diesel engine," *Energy*, vol. 171, pp. 879–892, 2019, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.01.079.
- [25] A. A. Y. Jrai, J. A.; Al-Muhtaseb, A. H. and Hararah, M. A. , "Combustion characteristics and engine emissions of a diesel engine fueled with diesel and treated waste cooking oil blends," *Chem. Eng. J.*, vol. 117, pp. 129–136, 2011, doi: 10.1016/j.cej.2011.05.078.
- [26] S. E. R. Mahesh, A; Begum, K. M. M. S. and Narayanan, A. , "Biodiesel production from waste cooking oil using KBr impregnated CaO as catalyst," *Convers. Manag.*, vol. 91, pp. 442–450, 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2014.12.031.
- [27] I. R. E. A. IRENA, *Renewable power generation costs in 2020*. eBook Partnership, 2022.
- [28] L. F. Chuah, S. Yusup, A. R. Abd Aziz, A. Bokhari, J. J. Klemeš, and M. Z. Abdullah, "Intensification of biodiesel synthesis from waste cooking oil (Palm Olein) in a Hydrodynamic Cavitation Reactor: Effect of operating parameters on methyl ester conversion," *Chemical*

- Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 95, pp. 235-240, 2015.
- [29] A. R. a. R. Gupta, V. K., "Calcium diglyceroxide catalyzed biodiesel production from waste cooking oil in the presence of microwave: Optimization and kinetic studies," *Renew. Energy*, vol. 121, pp. 757-767, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.11.027.
- [30] D. K. Avinash Kumar Agarwal, Atul Dhar, "Improving oxidation stability of biodiesels derived from Karanja, Neem and Jatropha: Step forward in the direction of commercialization," *Journal of Cleaner Production*, vol. 107, pp. 646-652, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.055>.
- [31] S. C. Bargole, J. George, S. and Saharan, V. K. , "Process intensification of synthesis of biodiesel using a novel recirculating flow ultrasonication reactor," *Chem. Eng. Process. Process Intensif*, vol. 122, pp. 21-30, 2017, doi: 10.1016/j.cep.2017.09.010.
- [32] M. D. I. Putra, C. Udiantoro, Ristianingsih, Y. and Nata, I. F. , "A cleaner process for biodiesel production from waste cooking oil using waste materials as a heterogeneous catalyst and its kinetic study," *J. Clean. Prod*, vol. 195, pp. 1249-1258, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.010.
- [33] G. T. Pölczmann, O. Beck, Á. and Hancsók, J. , "Investigation of storage stability of diesel fuels containing biodiesel produced from waste cooking oil," *J. Clean. Prod*, vol. 111, pp. 85-92, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.08.035.
- [34] M. A. A. Farid, M. A. Hassan, Y. H. Taufiq-Yap, Y. Shirai, M. Y. Hasan, and M. R. Zakaria, "Waterless purification using oil palm biomass-derived bioadsorbent improved the quality of biodiesel from waste cooking oil," *Journal of cleaner production*, vol. 165, pp. 262-272, 2017.

- [35] S. S. Wirawan, M. D. Solikhah, H. Setiaprja, and A. Sugiyono, "Biodiesel implementation in Indonesia: Experiences and future perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 189, p. 113911, 2024.
- [36] K. Oktaviani, "Biodiesel, jejak panjang sebuah perjuangan," 2021.
- [37] R. M. Meraz, M. M. Rahman, T. Hassan, A. Al Rifat, and A. R. Adib, "A review on algae biodiesel as an automotive fuel," *Bioresource Technology Reports*, p. 101659, 2023.
- [38] OECD-FAO. "OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030." (accessed 2023).



BAB II

Standar Biodiesel

Dalam sepuluh tahun terakhir, pengendalian kualitas biodiesel menarik perhatian banyak peneliti. Permasalahan penting penelitian berkaitan dengan beberapa aspek. Pertama, penentuan komposisi kimia dan sifat fisik biodiesel merupakan bagian terpenting dalam analisis kualitas biodiesel. Perlu diketahui bahwa biodiesel merupakan produk dari proses transesterifikasi, proses reaksi mempunyai pengaruh yang besar terhadap produksi akhir, sehingga penting untuk memantau proses reaksi untuk mengenali, dan memperbaiki masalah pada tahap awal [1]. Biodiesel yang diproduksi oleh sebuah industri harus memiliki sifat fisiokimia yang memenuhi standard, beberapa standar yang sering digunakan sebagai acuan seperti Standard Nasional Indonesia (SNI), Standard ASTM (Amerika Serikat), EN standard (Eropa standard) dan lain-lain. Beberapa sifat fisiokimia biodiesel yang cukup penting seperti viskositas kinematic, densitas, flash point, fire point, nilai kalor, angka setana, angka iodine, cloud point, stabilitas oksidasi, dan lain-lain. Beberapa standard dari berbagai Negara yang sering menjadi acuan akan dijelaskan pada tabel (2.1). Beberapa sifat fisiokimia biodiesel dan standar pengujiannya akan dijelaskan secara mendalam pada bagian dibawah.

A. Nilai Yodium (Iodine Value/ IV)

Kondisi pengoperasian minyak solar mesin tidak pernah ideal di dunia nyata. Variabel lingkungan yang paling bervariasi terhadap viskositas minyak biodiesel adalah suhu. Persyaratan viskositas dapat menentukan parameter seperti beban, kecepatan, dan desain mesin, tetapi suhu dan IC mesin hampir tidak pernah bersifat eksotermik. Variasi suhu pengoperasian minyak biodiesel

mengharuskan adanya pengukuran viskositas pada suhu yang berbeda. Ukuran ini disebut VI dan menunjukkan stabilitas minyak biodiesel pada kisaran suhu antara 40 °C dan 100 °C. VI yang lebih tinggi menunjukkan stabilitas termal yang lebih besar dan kapasitas yang lebih baik untuk mempertahankan lapisan minyak antara bagian-bagian yang relatif bergerak. ASTM D2270-40 merupakan praktik pengujian standar untuk menghitung VI berdasarkan viskositas kinematik pada 40 °C dan 100 °C [2].

Nilai yodium (IV) adalah ukuran ketidak jenuhan total terlepas dari proporsi relatif mono-, di-, tri-, dan tak jenuh ganda dalam suatu campuran. Dinyatakan dengan g iod/100 g sampel. Berdasarkan definisi molar, setiap ikatan rangkap dari senyawa tak jenuh asam lemak (ester) dapat memberikan 253,8 g yodium. Parameter ini mempengaruhi beberapa sifat penting biodiesel, seperti stabilitas oksidasi dan titik penyumbatan filter dingin [3]. Komposisi asam lemak akan mempengaruhi nilai yodium sedangkan nilai yodium yang lebih tinggi menyebabkan kerusakan yang cepat dari minyak pelumas [4]. Nilai yodium dihitung menggunakan hubungan yang ditunjukkan pada Persamaan (2.1):

$$\text{Iodine value (IV)} = \frac{[(B-S) \times N \times 12,69]}{w} \quad (2.1)$$

Dimana, B adalah volume (mL) 0,1 N Na₂S₂O₃, 5H₂O untuk blanko, S adalah volume (ml) 0,1 N Na₂S₂O₃, 5H₂O untuk sampel (S), N adalah normalitas larutan Na₂S₂O₃ .5H₂O dan W adalah berat biodiesel.

B. Viskositas Kinematik (Kinematic Viscosity)

Viskositas kinematik didefinisikan sebagai resistensi cairan untuk mengalir. Ini mengacu pada ketebalan minyak dan ditentukan oleh pengukuran jumlah waktu yang dibutuhkan untuk minyak tertentu untuk lolos melalui lubang dengan ukuran tertentu [4]. Viskositas bahan bakar mesin adalah salah satu sifat

yang paling penting karena memainkan peran dominan dalam semprotan bahan bakar, campuran pembentukan dan proses pembakaran [5]. Viskositas kinematik diukur dengan menggunakan viskometer Redwood sesuai prosedur pengujian standar ASTM D445 dan EN ISO 3104, dan kisaran viskositas harus antara 1,9 dan 6 mm²/s [2].

Salah satu masalah utama yang terkait dengan biodiesel adalah bahwa viskositasnya biasanya lebih tinggi daripada bahan bakar diesel [3], karena bahan kimianya struktur dan massa molekul yang besar. Biodiesel bisa lebih kental di suhu rendah karena viskositas meningkat ketika suhu menurun. Secara umum, viskositas kinematik yang tinggi tidak diinginkan karena mengurangi langkah masuk, yang menunda pencampuran udara dengan bahan bakar di ruang bakar [6]. Untuk aplikasi mesin otomotif, bahan bakar dengan viskositas terlalu tinggi menghasilkan penetrasi semprotan yang lebih lama, sudut kerucut semprotan yang sempit dan karakteristik atomisasi yang buruk [7].

C. Titik Nyala (Flash Point)

Titik nyala adalah suhu di mana bahan bakar akan menyala ketika terkena percikan atau nyala api. Meskipun titik flash tidak memiliki dampak langsung pada karakteristik karakter pembakaran, peningkatan titik nyala memastikan penyimpanan dan pengangkutan bahan bakar yang aman [6]. Suhu minimum di mana bahan bakar mulai menguap dan terbakar, misalnya, dengan adanya nyala api terbuka. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengukur suhu di mana uap bahan bakar dan campuran udara mudah terbakar. Titik nyala bukanlah suatu konstanta dan oleh karena itu hanya dapat didefinisikan dalam uji standar. Titik api dapat dianggap sebagai suhu terendah di

mana nyala api bertahan ketika sumber penyalaan diterapkan pada uap bahan bakar [2].

Umumnya biodiesel memiliki titik nyala yang lebih tinggi dibandingkan solar yang biasanya berkisar antara 110°C sampai 180°C sedangkan titik nyala untuk bahan bakar solar konvensional hanya 55-66 °C [4]. Titik nyala biodiesel akan selalu jauh lebih tinggi dari bahan bakar solar terlepas dari apakah biodiesel berasal dari minyak nabati berkualitas tinggi atau dari bahan baku murah, mencerminkan sifat bahan bakar yang mudah menguap [5]. Standar umum untuk pengukuran titik nyala adalah ASTM D93 dan EN ISO 3697 [8].

D. Titik Awan dan Titik Tuang (The Cloud Point and Pour Point)

Titik awan dan titik tuang penting untuk penggunaan suhu rendah pada bahan bakar. Titik awan didefinisikan sebagai suhu di mana awan kristal lilin pertama kali muncul ketika bahan bakar didinginkan [4]. Kehadiran lilin padat mengentalkan minyak, yang menyumbat filter bahan bakar dan injektor di mesin pembakaran internal. Selanjutnya, lilin yang dipadatkan terakumulasi pada permukaan dingin dari bagian-bagian mesin, membentuk emulsi dengan air [6]. Titik tuang adalah suhu pada dimana jumlah lilin yang keluar dari larutan dan bahan bakar masih bisa mengalir [4]. Secara umum, biodiesel dengan kandungan asam lemak jenuh yang lebih tinggi akan memiliki titik tuang yang lebih tinggi. Salah satu masalah utama dalam penggunaan biodiesel adalah sifat fisika kimia yang buruk pada suhu rendah [7].

Titik awan ditentukan oleh ASTM D5773, dan titik tuang ditentukan oleh ASTM D5949 menggunakan perangkat pengujian CPP 5G. Bahan bakar pada titik keruhnya membentuk lilin yang dapat menghasilkan emulsi air dan mengentalkan minyak, sehingga menyebabkan tersumbatnya filter dan lubang pada

suhu pengoperasian yang lebih rendah. Jumlah parafin dalam minyak menentukan atribut ini. Akibatnya, kecenderungan minyak untuk menyumbat membran dan saluran sempit pada suhu rendah disebut sebagai tahap awan. Pada mesin, lilin yang mengeras mengentalkan oli dan menyumbat filter bahan bakar dan injektor. Titik tuang adalah suhu di mana minyak kehilangan karakteristik alirannya, yang ditentukan oleh kandungan parafin dalam minyak. Akibatnya, pada temperatur yang lebih rendah, aliran bahan bakar menjadi terbatas, sehingga transfer bahan bakar melalui mesin menjadi lebih sedikit [2].

E. Angka Setana (Cetane Number)

Angka setana (Cetane Number/ CN) adalah parameter penting untuk menunjukkan self-ignitability bahan bakar, adalah indikator berdimensi mengingat karakteristik pengapian bahan bakar dalam silinder yang mempengaruhi tingkat kebisingan, kinerja mesin dan emisi gas buang. Pembakaran dapat dicapai sebagai hasil dari angka setana yang lebih tinggi atau waktu tunda pengapian yang lebih sedikit [3]. Tingkatan dimana bahan bakar akan menyala sendiri pada kondisi operasi tertentu digambarkan dengan menggunakan skala yang disebut angka setana. Cetane ($C_{16}H_{36}$) dapat menyala sendiri dengan sangat mudah dan diberi peringkat cetane 100. Heptamethylnonane ($C_{16}H_{34}$) menunjukkan kecenderungan yang jauh lebih rendah untuk terbakar secara otomatis dan diberi peringkat 15. Karakteristik penyalaan otomatis dari kedua bahan bakar ini berfungsi sebagai batu ujian untuk skala ini. Bahan bakar diberi peringkat setana berdasarkan proporsi alfa-metilnaftalena dan setana yang menghasilkan tingkat penyalaan otomatis yang sama dengan bahan bakar tersebut [2].

Bilangan setana adalah nomor indeks solar yang menunjukkan kualitas penyalaan bahan bakar solar. Bilangan

cetane yang tinggi memudahkan penyalaan bahan bakar [9]. Cetane yang lebih rendah menyiratkan penundaan pengapian lebih lama. Penundaan pengapian yang lama tidak dapat diterima karena menyebabkan diesel knocking. Selain itu, angka setana rendah akan meningkatkan emisi gas buang dan partikulat (PM), karena pembakaran tidak sempurna [5]. Angka setana dapat diukur menurut metode pengujian ASTM D613/EN ISO 5165 [8]. Martin et. al [10] angka setana dihitung menggunakan hubungan yang ditunjukkan pada persamaan (2.2)

$$\text{Angka setana} = 46,3 + \left(\frac{5458}{SV} \right) - 0,225 \times IV \quad (2.2)$$

Dimana SV adalah bilangan penyabunan dan IV adalah bilangan iod.

F. Massa Jenis (Density)

Massa jenis adalah besaran yang sesuai dengan jumlah materi yang dimiliki suatu benda dengan volumenya. Massa jenis zat adalah rasio massa fluida terhadap volumenya. Massa jenis suatu zat tergantung pada suhu [9]. Densitas biodiesel diukur menggunakan ASTM metode uji standar D1298 dan EN ISO 3675 [5]. Menurut standar ini, uji densitas harus dilakukan pada 15 °C atau 20 °C sebagai referensi suhu. Bahan bakar biodiesel ditemukan memiliki densitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar diesel [8]. Didalam mesin diesel, injeksi bahan bakar dan bahan bakar pencampuran dengan udara biasanya dilakukan pada tekanan antara 15 dan 50 MPa dan suhu 300-350 °K. Jumlah bahan bakar disuntikkan ke dalam mesin diperkirakan berdasarkan volumenya, jadi densitas langsung mempengaruhi proses injeksi bahan bakar [3]. Seperti viskositas, densitas dan kompresibilitas sangat penting mempengaruhi sistem injeksi bahan bakar mesin. Waktu yang disemprotkan, pola semprotan injeksi dan jumlah bahan bakar injeksi secara langsung terpengaruh oleh parameter ini [5]. Biodiesel WCO

menunjukkan stabilitas tinggi serta sifat dingin yang sesuai. Ini berhubungan dengan profil FAME-nya. Nilai densitas agak lebih tinggi dari standar yang diperbolehkan [11]. Densitas biodiesel lebih tinggi dari solar dan peningkatan relatif tergantung pada komposisinya [7]. Secara umum, menurun derajat asam lemak tak jenuh meningkatkan densitas biodiesel [12]. Selain itu, lama waktu penggorengan, kandungan garam, dan suhu tinggi secara progresif menurunkan densitas, nilai kalor, viskositas, titik keruh, dan titik tuang WCO biodiesel [13].

G. Nilai Kalor (Calorific Value)

Calorie Value (CV) suatu bahan bakar dapat digambarkan sebagai jumlah energi panas yang dipancarkan per satuan berat bahan bakar ketika dibakar. CV sampel bahan bakar uji dievaluasi dengan menggunakan alat uji bom kalorimeter sesuai ASTM D240. Semakin tinggi CV bahan bakar, semakin baik output mesin, karena semakin banyak energi yang dibebaskan per unit bahan bakar yang dibakar. Jumlah panas yang dilepaskan oleh biodiesel semakin rendah seiring dengan semakin kecilnya perubahan suhu air. Kandungan energi ester yang terdapat pada biodiesel lebih rendah jika dibandingkan dengan bahan bakar solar. Biodiesel memiliki CV yang lebih rendah dibandingkan solar sehingga dapat ditingkatkan dengan mencampurkannya dengan solar [2].

Mirip dengan sifat lainnya, nilai kalor biodiesel harus mendekati bahan bakar solar [14]. Nilai kalor didefinisikan sebagai kuantitas daya pemanas yang dihasilkan selama pembakaran dalam kondisi tertentu. Hal ini adalah parameter bahan bakar yang sangat penting, yang mewakili jumlah energi tersedia yang dapat diubah menjadi energi mekanis selama proses pembakaran [15].

H. Stabilitas Oksidasi (Oxidation Stability)

Stabilitas oksidasi adalah kecenderungan bahan bakar bereaksi dengan oksigen pada suhu sekitar, dan ini mencerminkan kerentanan relative bahan bakar terdegradasi oleh oksidasi. Biodiesel memiliki stabilitas oksidasi yang lebih rendah dibandingkan dengan minyak bumi solar. Kandungan FAME dan adanya antioksidan alami bahan baku yang digunakan untuk produksi biodiesel adalah faktor yang mempengaruhi stabilitas oksidasi biodiesel. Auto-oksidasi FAME adalah reaksi berantai yang melibatkan tiga langkah dasar: inisiasi, propagasi dan terminasi. Oksidasi ditandai dengan mekanisme radikal bebas yang menghasilkan hidroperoksida, aldehida karboksilat rantai pendek, keton dan asam. Peroksida radikal ini menghasilkan radikal baru di dalam tubuh ester yang mengikat oksigen di udara, dan hidroperoksida tumbuh dengan cepat ke tahap propagasi. Pembentukan produk sampingan yang membusuk terjadi pada tingkat eksponensial selama fase auto-oksidasi [6].

I. Titik Penyumbatan Filter Dingin Cold Filter Plugging Point (CFPP)

Suhu harus menjadi faktor penting yang perlu diperhatikan dalam penanganan dan penyimpanan biodiesel dan campurannya. Pada suhu rendah, pengendapan pada biodiesel dapat terjadi, yang dapat menghambat aliran bahan bakar dan meningkatkan potensi penyumbatan filter. Sifat aliran dingin pada biodiesel dan campurannya dapat diukur dengan menganalisis karakteristik titik awan, titik tuang, dan titik penyumbatan filter dingin (Cold Filter Plugging Point/ FPP) [16].

Kemampuan bahan bakar untuk melewati filtrasi tanpa penyumbatan disebut cold filter plugging point (CFPP). Pengujian CFPP mengikuti standar ASTM 6371 dengan suhu maksimum 19 oC. Pengujian ini sangat penting untuk menilai

kemampuan biodiesel saat beroperasi di iklim dingin tanpa menyumbat filter bahan bakar.

J. Angka Asam

Bilangan asam dapat digambarkan sebagai ukuran konsentrasi asam dalam larutan air. Dalam hal biodiesel, ini berfungsi sebagai parameter pengukuran degradasi minyak. Semakin besar angka asamnya maka semakin tinggi pula penurunan kualitas minyak tersebut. Peningkatan bilangan asam dapat dipengaruhi oleh kontaminasi asam, oksidasi, dan penipisan cadangan basa [2]. Kandungan FFA dinyatakan g/100 g sebagai asam oleat dan dihitung seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 2.3. Nilai asam dihitung menggunakan hubungan yang ditunjukkan pada Persamaan (2.3).

$$FFA = v \times N \times \frac{28,2}{w} \quad (2.3)$$

$$\text{angka asam} = FFA (\%) \times 1,989 \quad (2.4)$$

Sifat fisiokimia biodiesel yang dihasilkan dari minyak non pangan dan minyak goreng sisa akan disajikan lebih mendalam pada sub bab 3 pada buku ini. Sifat fisiokimia biodiesel ini berbeda-beda tergantung beberapa factor seperti jenis feedstock dan proses sintesisnya seperti jenis katalis yang digunakan, jumlah katalis dan rasio molar (methanol vs minyak) dan beberapa factor lainnya. Berikut standard sifat fisokimia untuk biodiesel di beberapa Negara sebagaimana dijelaskan pada tabel (2.1)

Tabel 2.1 Standard biodiesel dengan perbedaan Negara

Specification	Satuan	Europe	Germany	USA
		EN 14214-2003	EN V 51606	ASTM D 6751-12
Density (15 °C)	g/m ³	0.86-0.90	0.875-0.90	1.9-6.0
Viscosity 40 °C	mm ² /s	3.5-5.0	3.5-5.0	1.9-6.0
Distillation	%@ °C	-	-	90% ≤360 °C
Flashpoint (Fp)	°C	≥120	≥110	≥130
CFPP	°C	Country specific	Summer 0, spr/aut -10, winter -20	-
Cloud point	°C	-	-	* report
Sulfur	Mg/Kg	≤10	≤10	≤15
CCR 100%	%mass	-	≤0.05	≤0.05
Carbon residu (10%diat. residu)	%mass	≤0.3	≤0.3	≤0.05
Sulphated ash	%mass	≤0.02	≤0.03	≤0.02
Water	mg/Kg	≤500	≤300	≤500
Total contamination	mg/Kg	≤24	≤20	-
Cu corrosion max	3 h/50 °C	No 1	No 1	-
Oxidation stability	Hrs. 110 °C	≥6	-	≥3
Cetane number	-	≤51	≥49	≥47
Acid value	mgKOH/g	≤0.5	≤0.5	≤0.5
Methanol	%mass	≤0.20	≤0.3	≤0.2 or Fp ≥ 130 °C
Ester content	%mass	≥96.5	-	-
Monoglycerida	%mass	≤0.8	≤0.8	≤0.4
Diglyceride	%mass	≤0.2	≤0.4	-
Triglyceride	%mass	≤0.2	≤0.4	-
Free glycerol	%mass	≤0.02	≤0.02	≤0.02
Total glycerol	%mass	≤0.25	≤0.25	≤0.24
Iodine value	-	≤120	≤115	-
Linolenic acid ME	%mass	≤12	-	-

Daftar Pustaka

- [1] W.-B. Zhang, "Review on analysis of biodiesel with infrared spectroscopy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 8, pp. 6048-6058, 2012.
- [2] H. A. Tasneem, K. Ravikumar, and H. Ramakrishna, "Performance and wear debris characteristics of karanja biodiesel and biolubricant as a substitute in a compression ignition engine," *Fuel*, vol. 319, p. 123870, 2022.
- [3] B. R. Sajjadi, A. A. A. and Arandiyan, H. , "A comprehensive review on properties of edible and non-edible vegetable oil-based biodiesel: Composition, specifications and prediction models," *Renew. Sustain. Energy Rev*, vol. 63, pp. 62–92, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.05.035.
- [4] A. Silitonga, H. Masjuki, T. Mahlia, H. Ong, W. Chong, and M. Boosroh, "Overview properties of biodiesel diesel blends from edible and non-edible feedstock," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22, pp. 346-360, 2013.
- [5] W. N. M. M. Wan Ghazali, R. Masjuki, H. H. and Najafi, G. , "Effects of biodiesel from different feedstocks on engine performance and emissions: A review," *Renew. Sustain.*

- Energy Rev*, vol. 51, pp. 585–602, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.06.031.
- [6] S. Dharma, H. C. Ong, H. Masjuki, A. Sebayang, and A. Silitonga, "An overview of engine durability and compatibility using biodiesel–bioethanol–diesel blends in compression-ignition engines," *Energy Conversion and Management*, vol. 128, pp. 66–81, 2016.
 - [7] S. B. Mishra, K. R. and Krishnasamy, A. , "A composition based approach to predict density, viscosity and surface tension of biodiesel fuels," *Fuel*, vol. 285, p. 119056, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119056.
 - [8] C. W. M. N. Noor, M. M. and Mamat, R. , "Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev*, vol. 94, pp. 127–142, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.05.031.
 - [9] R. K. Koul, N. and Singh, R. C. , "A review on the production and physicochemical properties of renewable diesel and its comparison with biodiesel," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 0, pp. 1–21,, 2019, doi: 10.1080/15567036.2019.1646355.
 - [10] J. F. G. Á. Martín, J.F.A. Barrera, M.D.C.L. Domínguez, I.M. and -Mateos, P. Á., "Cetane number prediction of waste cooking oil-derived biodiesel prior to transesterification reaction using near infrared spectroscopy," *Fuel*, vol. 240, pp. 10–15, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2018.11.142.
 - [11] T. X. B. Nguyenthi, J. P. and Bessières, D. , "Density measurements of waste cooking oil biodiesel and diesel blends over extended pressure and temperature ranges," *Energies*, vol. 11, 2018, doi: 10.3390/en11051212.
 - [12] S. O. Dharma, H. C. Masjuki, H. H. Sebayang, A. H. and Silitonga, A. S. , "An overview of engine durability and compatibility using biodiesel–bioethanol–diesel blends in compression-ignition engines," *Energy Convers. Manag*, vol. 128, pp. 66–81, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.08.072.
 - [13] T. H. Doğan, "The testing of the effects of cooking conditions on the quality of biodiesel produced from waste cooking

- oils," *Renewable Energy*, vol. 94, pp. 466-473, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.088>.
- [14] F. Moazeni, Y.-C. Chen, and G. Zhang, "Enzymatic transesterification for biodiesel production from used cooking oil, a review," *Journal of cleaner production*, vol. 216, pp. 117-128, 2019.
- [15] Y. Sharma and B. Singh, "An ideal feedstock, kusum (*Schleichera triguga*) for preparation of biodiesel: Optimization of parameters," *Fuel*, vol. 89, no. 7, pp. 1470-1474, 2010.
- [16] S. S. Wirawan, M. D. Solikhah, H. Setiaprja, and A. Sugiyono, "Biodiesel implementation in Indonesia: Experiences and future perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 189, p. 113911, 2024.

BAB III

Potensi Bahan Baku Generasi Kedua dan Ketiga

Semua bahan baku yang bersumber dari tanaman pangan yang dapat dimakan disebut sebagai bahan baku biodiesel generasi pertama, misalnya jagung, kedelai, minyak sawit, minyak mustard, dan lain-lain. Keunggulan utama bahan baku generasi pertama adalah ketersediaan hasil panen dan proses konversi yang relatif sederhana. Namun kelemahan utama penggunaan bahan baku tersebut adalah berkurangnya pasokan pangan sehingga berpotensi meningkatkan harga pangan. Kekurangan ini memaksa pengguna untuk beralih ke bahan baku alternatif lain untuk produksi biodiesel [1].

Indonesia banyak memiliki kekayaan hayati yang berlimpah yang berpotensi di sintesis menjadi biodiesel. Selain dari minyak nabati non pangan telah dimanfaatkan sebagai sumber bahan baku biodiesel. Berikut daftar minyak non pangan yang bisa dijadikan biodiesel sebagaimana pada tabel (3.1).

Tabel 3.1 potensi minyak nabati non pangan sebagai bahan baku biodiesel

Nama Indonesia	Nama latin	Sumber minyak	Kons % berat kering
Jarak kaliki	<i>Ricinus communis</i>	Biji	45-50
Jarak pagar	<i>Jatropha curcas</i>	Biji	40-60
Kapok/ randu	<i>Ceiba pentandra</i>	Biji	24-40
Karet	<i>Hevea brasiliensis</i>	Biji	40-50

Kemiri	<i>Aleuriteis moluccana</i>	Inti biji	57-69
Kusambi	<i>Sleichera trijuga</i>	Biji	55-70
Nimba	<i>Azadirachta indica</i>	Biji	40-50
Gatep pait	<i>Samadera indica</i>	Biji	35
Kepoh	<i>Sterculia foetida</i>	Inti biji	45-55
Nyemplung	<i>Callopylum inophyllum</i>	Inti biji	40-73
Randu alas/agung	<i>Bombax malabaricum</i>	Biji	18-26
Tengkawang tungkul	<i>Shorea stenoptera</i>	Inti biji	45-70
Tengkawan terindak	<i>Siptera borneensis</i>	Biji	45-70
Bintaro	<i>Cerberamanghas/o dollam</i>	Biji	43-64
Cerakin/kroton	<i>Croton tiglium</i>	Inti biji	50-60

Keterbatasan bahan baku generasi pertama memerlukan eksplorasi minyak generasi kedua yang ramah lingkungan dan berbiaya rendah untuk membantu mengurangi kesenjangan pangan. Keunggulan utama biodiesel generasi kedua adalah tidak bergantung pada tanaman yang dapat dimakan dan tidak memerlukan lahan pertanian [2]. Kerugian dari bahan bakar generasi kedua termasuk rendahnya hasil tanaman yang tidak dapat dimakan dan kebutuhan untuk meningkatkan jumlah alkohol sebagai reaksi. Untuk mengatasi masalah yang melekat pada minyak non-makanan ini, para peneliti mempertimbangkan

alternatif baru yang layak secara ekonomi dan lebih terjangkau. Penggunaan minyak non-makanan yang berkelanjutan secara ekonomi adalah untuk meningkatkan efisiensi produksi biodiesel dan kemungkinan produksi komersial pada skala industri [1].

Biodiesel generasi ketiga dihasilkan dari limbah minyak dan biomassa alga. Keuntungan utama dari bahan baku generasi ketiga adalah pertumbuhan dan produktivitas yang lebih tinggi, tidak memerlukan lahan pertanian, kandungan minyak yang lebih tinggi, dan dampak yang lebih kecil terhadap pasokan pangan. Minyak ikan, lemak hewani, mikroalga, dan minyak jelantah merupakan sumber utama bahan baku biodiesel generasi ketiga [3]. Kerugian utama termasuk tingginya biaya investasi awal dan keterbatasan penggunaan pada skala industri. Misalnya, biomassa alga sebagai bahan baku biodiesel melibatkan proses pemanenan, pengeringan, dan ekstraksi, yang akibatnya meningkatkan biaya produksi [4]. Pada minyak bekas atau minyak goreng bekas, variasi sumber bahan baku dan kegunaan yang berbeda mengubah komposisi kimia bahan baku dan membatasi produksi dalam skala besar karena adanya pengotor dan komposisi minyak bekas yang bervariasi. Selain itu, berbagai lemak hewani juga digunakan sebagai bahan baku yang dapat diandalkan untuk produksi biodiesel [5]. Lumpur flotasi udara terlarut dari pengolahan daging, laguna bardawil, dan limbah minyak ampas kopi adalah beberapa bahan baku generasi ketiga baru yang digunakan untuk produksi biodiesel dalam beberapa tahun terakhir [1].

Biodiesel generasi keempat didasarkan pada penangkapan dan pemanfaatan CO₂ dan energi matahari untuk menghasilkan biomassa yang kemudian diubah menjadi bahan bakar melalui proses yang sama seperti biofuel generasi kedua, sehingga menampilkan karbon netral [6]. Perkembangan biologi

sintetik telah mendorong konversi langsung energi matahari dan CO₂ sebagai teknologi ideal untuk menghasilkan bahan bakar terbarukan dan bersih, misalnya biodiesel surya fotobiologis [7], namun penelitian di bidang ini masih dalam tahap awal.

Pada bagian selanjutnya, akan ditinjau dan dibahas lebih mendalam berbagai potensi bahan baku generasi kedua dan ketiga serta sifat fisiokimia setelah disintesis menjadi biodiesel.

A. Potensi Minyak Jelanta (Waste Cooking Oil)

Minyak Goreng Bekas sangat mudah diperoleh dari rumah tangga, restoran, hotel, dan perusahaan pengolahan makanan setelah menggoreng dan proses persiapan makanan lainnya (gambar 3.1) [8]. Minyak goreng bekas (WCO) dapat digunakan dalam pembuatan produk di berbagai segmen industri, seperti produksi sabun, cat minyak, dan biodiesel [9]. Dalam beberapa tahun terakhir, produksi biodiesel menggunakan minyak goreng bekas banyak dibuat di beberapa negara karena biayanya yang rendah dan lebih murah [10]. Produksi biodiesel di seluruh dunia diperkirakan mencapai nilai 39,3 miliar liter pada tahun 2027 dibandingkan dengan 9% meningkat dari nilai tahun 2017 [11].

Jumlah WCO yang dihasilkan di Amerika Serikat, sedangkan di Inggris diperkirakan mencapai 65.000 hingga 80.000 ton per tahun saat masuk dari China angka ini mencapai 1.000.000 hingga 2.500.000 per tahun dari komersial dan industri pengolahan makanan [12]. Perkiraan WCO yang dikumpulkan oleh berbagai negara adalah sebagai berikut: Kanada menghasilkan 120.000–135.000 ton per tahun. Di Afrika selatan diperkirakan 200.000 ton per tahun. Jepang dan Malaysia masing-masing memproduksi 6.000, dan 60.000 ton per tahun [13]. Menurut Data Kementerian Perdagangan, ekspor goreng sisa Indonesia pada 2019 mencapai 37,31 juta dollar Amerika Serikat. Belanda menjadi tujuan ekspor goreng sisa terbesar, yaitu 34,03

persen, dari seluruh ekspor goreng sisa. Angka ini setara 13,46 juta dollar AS dengan jumlah 24.449 ton [14]. Minyak Goreng Bekas (WCO) dihasilkan secara global sebesar 29 juta ton per tahun. Faktanya, diperkirakan India saja menghasilkan 9,2 juta ton WCO setiap tahun yang dibuang melalui pembuangan langsung ke darat atau ke selokan air yang menyebabkan pencemaran lingkungan [15, 16].



Gambar 3.1 Minyak Goreng Bekas

Bahan bakar nabati adalah pilihan yang sangat menarik untuk mengatasi krisis energi karena bahan baku limbah tersedia secara gratis untuk produksi bahan bakar nabati (biodiesel, bioetanol, biogas, dll) dengan teknologi konversi kimia dan biologi yang berbeda [17]. Namun demikian, penggunaan Minyak Goreng Bekas (gambar 2.1) sebagai bahan baku agak menantang karena pada dasarnya mengandung asam lemak bebas (FFA) dan konsentrasi air yang tinggi sehingga tidak cocok untuk transesterifikasi katalis basa homogen seperti yang digunakan dalam proses produksi biodiesel konvensional [16, 18]. Selain itu, ini mengarah pada pembentukan sabun dan menyebabkan masalah pemisahan [16, 19].

Sebagian besar minyak goreng bekas adalah dikumpulkan dari sisa pengorengan yang dapat menghasilkan minyak WCO.

Minyak Goreng Bekas berpotensi tinggi dapat dikumpulkan dari mess asrama sebagai and restoran maupun hotel [20]. Oleh karena itu, beberapa Negara menempatkan polusi pajak untuk membuang minyak ini ke lingkungan. Misalnya, ada peraturan nomor 2872 tentang Pengendalian Limbah Minyak Nabati yang diterbitkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Perencanaan Kota Turki yang mengatur tentang penanganan limbah WCO [21]. Penggunaan limbah minyak sayur dari industri restoran Meksiko sebagai bahan baku produksi 4,78 juta liter liter energi biodiesel setara dengan 4,45 juta liter solar [22]. Di Cina, pemerintah melakukan banyak upaya dalam mengembangkan biodiesel, sekitar 4,5 juta ton Minyak Goreng Bekas dihasilkan dan digunakan dalam memproduksi biodiesel setiap tahun [23].

B. Minyak Kesambi (*Schleichera Oleosa Oil*)

Scheleichera oleosa termasuk dalam famili *Sapindaceae* dan juga dikenal sebagai buah kusum (gambar 3.2). *Scheleichera oleosa* banyak ditemukan di wilayah sub-Himalaya, di seluruh India tengah dan Selatan, Burma, Ceylon, Jawa dan Timor. minyak yang diperoleh dari bijinya disebut minyak kusum atau Minyak Makasar, yang termasuk dalam kategori pangan non tanaman dan digunakan untuk menyembuhkan gatal, jerawat dan luka bakar [24]. Bunganya berwarna hijau kekuningan, tersusun dalam paku seperti racemes aksila sepanjang 7,5-12,5 cm. Buah-buahan adalah berry, bulat atau bulat telur, dan berkulit keras. Bijinya adalah coklat, elips tidak beraturan, sedikit terkompresi, berminyak. Kandungan minyak biji sekitar 59-72% dengan warna hijau kekuningan [25].

Yadav et.al [26] telah meneliti kinerja dan karakteristik emisi campuran biodiesel 10-50% dari Minyak *Schleichera Oleosa*. Hasilnya menunjukkan bahwa *Brake Thermal Efficiency (BTE)* diesel lebih tinggi dan *BSFC* lebih rendah pada semua beban, sedangkan

emisi CO ditemukan lebih rendah dari solar sementara ada sedikit peningkatan CO₂ dan NO_x. Karakteristik pembakaran dan kinerja bersama dengan emisi gas buang campuran biodiesel diesel-*schleichera oleosa* dengan menambahkan nanopartikel alumina dan nanotube karbon. Kinerja menunjukkan peningkatan BTE sebesar 2–13% dan penurunan emisi gas buang hingga 5–60% untuk bahan bakar uji terdispersi nanopartikel [27]. Biodiesel memiliki kandungan sulfur dan senyawa aromatik yang lebih rendah, titik nyala tinggi, viskositas rendah, ramah lingkungan, berbagai bahan baku, proses sederhana, dan lain-lain. Telah digunakan di mobil, kapal, pesawat terbang dan kendaraan lain, karena ikatan yang menguntungkan ini [28]. Adapun sifat fisiokimia biodiesel kesambi seperti disajikan pada Tabel (3.2)



Gambar 3.2 a) pohon dan b) buah kesambi [25]

Tabel 3.2. Sifat biodiesel minyak kesambi

Properties	unit	Biodiesel		Diesel	KOME	SOME [4]	[19]	[20]	[7]	[25]	[22]
		ASTM D6751	Standard test method								
Kinematic viscosity at 40 °C	mm ² /s	1.9-6.0	D445	3.985	4.472	4.27	5-5.7	5.6	4.269	4.71	3.1
Density at 40 °C	kg/m ³	880	D4052	823	879	856.2	870-890	844	860.54	875.6	869
Acid value	mgKOH/g	0.5 (max)	D664	-	0.308	-	0.2-0.5	0.5	-	-	0.7
Calorific value	MJ/kg	-	D140	46.200	39.889	41.821	39.2-39.9	16.60	43.1	-	42.87
Oxidation stability at 110 °C	h	3 (min)	EN 14112	-	9.03	7.23	-	7.9	-	3.2	-
Flash Point	°C	100-170	D93	68.5	154	136.5	138-158	101	139	173	115
Pour Point	°C	-15-16	D2500	6	9	-3	-	-	-10.8	4	-
Cloud point	°C	-3-12	D2500	17	24	-1	-	-4.2	-2.5	5	-
Copper strip corrosion	-	3 (max)	D130	1a	1a	1a	-	1a	-	1a	-
Sulfur residue (w/w)%	(w/w)%	-	-	0.0760	0.0093	7.89	-	-	-	3.2	-
Carbon residue (w/w)%	(w/w)%	-	-	0.0062	0.0034	-	-	-	-	0	-

C. Kemiri Sunan (*Reutealis Trisperma*)

Reutealis trisperma (umumnya dikenal sebagai Tung Filipina) merupakan tanaman milik keluarga *Euphorbiaceae*. Pohon ini berasal dari Filipina, namun juga tersebar luas di seluruh wilayah Selatan. Asia Timur. Hasil tahunan minyak biji *Reutealis trisperma* adalah 400 kg/ha; sedangkan hasil minyak kernelnya adalah ~45-50% dengan warna kuning kemerahan. Minyak *Reutealis trisperma* dianggap beracun pada manusia dan hewan karena tingginya jumlah asam alfa-eleostearik, yang merupakan racun alami dalam minyak. Oleh karena itu, minyak *Reutealis trisperma* memiliki viskositas dan kepadatan kinematik yang lebih tinggi karena adanya asam lemak ini. Apalagi tingginya kadar rantai asam lemak tak jenuh di *Reutealis* minyak *trisperma* menghasilkan stabilitas oksidasi yang lebih rendah [29]. Banyak peneliti telah melakukan sintesis minyak ini menjadi biodiesel. Adapun sifat fisiokimia dari biodiesel kemiri sunan disajikan pada Tabel (3.3)



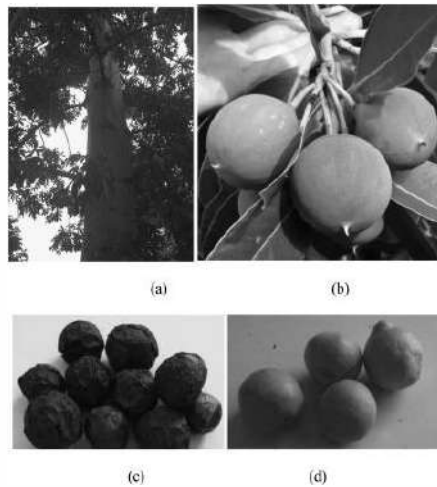
Gambar 3. 3 kemiri sunan

Tabel 3.2. sifat fisiokimia biodiesel kemiri sunan

Properties	unit	Biodiesel		Diesel	[29]	[30]	[31]	[32]	[33]	[34]
		ASTM D6751	Standard test method							
Kinematic viscosity at 40 °C	mm ² /s	1,9-6,0	D445	2.986	4.17	9.2	6.48	5.41	7.069	4.0
Density at 40 °C	kg/m ³	880	D4052	823	889	900	892	865	875	885.7
Acid value	mgKOH/g	0,5 (maks)	D664	-	0.05	0.55	0.41	0.76	0.491	0.390
Calorific value	MJ/kg	-	D240	46.200	39.542	-	40.098	-	-	41.140
Oxidation stability at 110 °C	h	3 (min)	EN 14112	-	6.22	-	-	-	-	10.2
Flash Point	°C	100-170	D93	68.5	168.5	-	206	-	-	140
Pour Point	°C	-15-16	D2500	6	-	-	-2	-	-	-
Cloud point	°C	-3-12	D2500	17	1.6	-	-1	-	-	-
Copper strip corrosion	--	3 (max)	D130	1a	-	-	1b	-	-	-
setana	(w/w)%	-	-	0.0760	-	54.5	-	59.08	-	-
Carbon residue	(w/w)%	-	-	0.00002	-	0.24	-	-	-	-

D. Minyak Nyamplung (*Calopyllum Inopyllum*)

C.inophyllum (atau dikenal sebagai *polanga* atau *honne*) adalah pohon hias hijau sepanjang tahun yang termasuk dalam famili Clusiaceae. Tanaman ini berasal dari India, Australia, Afrika Timur dan Asia Tenggara. Pohon *C. inophyllum* berbuah dua kali setahun dan pohon yang sehat menghasilkan sekitar 8000 buah yang tidak dapat dimakan, dimana setiap buah mengandung inti yang terbungkus dalam kulit yang keras. Buah dapat dipanen langsung dari pohonnya ketika sudah matang atau setelah jatuh dari pohon. *C. inophyllum* dapat ditanam dengan kepadatan 400 pohon per ha. Hasil minyak rata-rata untuk *C. I nophyllum* adalah 11,7 kg per pohon, atau 4680 kg/ha. *C. inophyllum* adalah pohon kuat yang dapat tumbuh di tanah masam dan tahan terhadap tanah yang mengandung garam dan kondisi kekeringan. Bijinya beracun dan mengandung sekitar 60%–65% minyak mentah *C. inophyllum* (CCIO) yang dapat diekstraksi dengan ekspresi dingin. CCIO berwarna hijau tua, dengan bau aromatic [35].



Gambar 3.4 Foto: (a) Pohon *Calophyllum inophyllum*, (b) Buah *Calophyllum inophyllum*, (c) Biji *Calophyllum inophyllum* dan (d) Biji *Calophyllum inophyllum* [35].

C.inophyllum terdiri dari 71% kandungan asam lemak tak jenuh, yang pada dasarnya terdiri dari asam oleat dan linoleat. *C.inophyllum* memiliki kandungan asam lemak tak jenuh yang lebih tinggi, sedangkan asam oleat dan linoleat merupakan 70,8% dari total kandungan asam lemak, dan sisanya 29,2% adalah asam palmitat, yang merupakan kandungan asam lemak jenuh. Foto pohon, buah, biji dan biji *C. inophyllum* ditunjukkan pada gambar 3.4 Sifat fisiokimia biodiesel minyak nyamplung sebagaimana disajikan pada tabel 3.4

Tabel 3.4. sifat fisiokimia biodiesel minyak nyamplung

Properties	unit	Biodiesel		Diesel	[35]	[36]	[37]	[38]	[39]
		ASTM D6751	Standard test method						
Kinematic viscosity at 40 °C	mm ² /s	1,9-6,0	D445	2,986	5,21	5,4	5,4	4,78	4
Density at 40 °C	kg/m ³	880	D4052	823	881,4	870	877,6	873	877,6
Acid value	mgKOH/g	0,5 (maks)	D664	-	0,410	0,39	0,39	-	0,34
Calorific value	MJ/kg	-	D240	46,200	40,785	37,9	38	38,33	41,442
Oxidation stability at 110 °C	h	3 (min)	EN 14112	-	15,17	-	-	8,47	14,27
Flash Point	°C	100-170	D93	68,5	126,5	170	170	140	140
Pour Point	°C	-15-16	D2500	6	2	-	13	4,3	4,3
Cloud point	°C	-3-12	D2500	17	4	-	12	13,2	2
Copper strip corrosion	-	3 (max)	D130	1a	1b	-	-	-	-
Cetane number	(w/w)%	-	-	0,0760	-	59,5	59,5	55,8	57
Carbon residue	(w/w)%	-	-	0,00002	-	-	-	-	-

E. Minyak Jarak Pagar (*Jatropha Curcas*)

Jatropha curcas L. termasuk dalam famili *Euphorbiaceae*. Tanaman ini adalah tanaman yang tahan kekeringan bertahan hidup di lahan pertanian yang terbengkalai dan tidak ditanami (gambar 3.5). Tanaman ini berasal dari Meksiko, Amerika Tengah, Brasil, Argentina dan Paraguay. *Jatropha curcas* beradaptasi dengan baik pada kondisi semi-kering, dataran rendah kesuburan dan mampu tumbuh pada tanah marginal. Kandungan minyak dalam biji masing-masing sekitar 55–60%. [40]. *Minyak jarak pagar* dikenal memiliki sifat dingin dan stabilitas oksidasi yang baik, serta viskositas dan keasaman yang rendah. Selain itu, nilai kalor bruto minyak *jarak pagar* relatif tinggi (39 MJ/kg), yang merupakan rata-rata nilai kalor bruto sebagian besar minyak nabati [41].



Gambar 3.5 pohon jarak pagar

Indonesia mempunyai lahan marjinal yang luas sehingga berpotensi untuk ditanami banyak tanaman biodiesel, termasuk *J. curcas* Linn. Jarak pagar dapat merangsang pertumbuhan pada lahan marginal atau lahan kering. Dengan demikian tanaman ini cocok untuk memperbaiki kawasan kritis dimana Indonesia memiliki sekitar 78 juta hektar lahan marginal dan terdegradasi. Perkembangan *J. curcas* Linn. sebagai sumber biodiesel di Indonesia masih menghadapi berbagai kendala, terutama disebabkan oleh terbatasnya ketersediaan benih jarak pagar. Oleh

karena itu, pengembangan jarak pagar di Indonesia perlu didukung oleh areal tanam yang luas dan varietas yang mempunyai produktivitas tinggi. Selain itu, ketersediaan bahan baku biodiesel juga dapat terjamin. Salah satu strategi yang dapat diterapkan untuk mendapatkan tanaman jarak pagar dengan produktivitas tinggi adalah melalui teknologi pemuliaan. [42]. Adapun sifat fisiokimia biodiesel jarak pagar seperti disajikan pada tabel (3.5)

Tabel 3.5. sifat fisiokimia biodiesel minyak biji jarak

Properties	unit	Biodiesel		Diesel	[41]	[43]	[40]	[44]	[45]
		ASTM D6751	Standard test method						
Kinematic viscosity at 40 °C	mm ² /s	1,9-6,0	D445	2.986	4.57	2.35-2.47	5.42	2.9	4.1
Density at 40 °C	kg/m ³	880	D4052	823	876.52	860-880	884	862.9	870
Acid value	mgKOH/g	0,5 (maks)	D664	-	0.52	0.61		0.28	0.38
Calorific value	MJ/kg	-	D240	46.200	39.46	41.63	39.89	39.58	39.9
Oxidation stability at 110 °C	h	3 (min)	EN 14112		14		14.08	-	3.75
Flash Point	°C	100-170	D93	68.5	125.5		171	176.5	180
Pour Point	°C	-15-16	D2500	6	3	-6	3	-5	-
Cloud point	°C	-3-12	D2500	17	2		-1	6	-
Copper strip corrosion	--	3 (max)	D130	1a	1a		-	-	-
Cetane number	(w/w)%	-	-	0,0760	56	59-60	-	-	-
Carbon residue	(w/w)%	-	-	0.00002	-	-	-	0.056	-

F. Minyak Mimba (Neem Seed)

Mimba yang termasuk dalam famili Meliaceae, nama ilmiahnya 'Azadirachta indica' merupakan tanaman pohon yang umum ditemukan di daerah tropis dan subtropis di dunia termasuk India, Indonesia. Umur pohon Mimba hampir 200 tahun dan mulai berbuah 3 sampai 5 tahun atau maksimal 10 tahun. Pohon mimba besar, tingginya mencapai 12 hingga 18 meter dengan ketebalan hingga 1,8 hingga 2,4 meter. Jumlah seluruh kandungan minyak biji mimba bervariasi dari 40% sampai 50% yaitu, 7 sampai 8 kg kebutuhan biji menghasilkan satu liter minyak mimba (gambar 3.6). Minyak nimba umumnya berwarna coklat muda sampai gelap, pahit dan memiliki bau yang kuat yang dikatakan menggabungkan bau kacang dan bawang putih. Mimba terutama terdiri dari trigliserida dan

sejumlah besar senyawa triterpenoid [46]. Ini mengandung empat asam lemak jenuh yang signifikan, dua di antaranya adalah asam palmitat dan dua adalah asam stearat. Selain itu juga mengandung asam lemak tak jenuh ganda seperti asam oleat dan asam linoleate [47]. Sifat kimia biodiesel biji mimba seperti ditunjukkan pada tabel (3.6)



Gambar 3.6 pohon dan buah mimba

Tabel 3.6. sifat fisiokimia biodiesel minyak biji mimba

Properties	unit	Biodiesel		Diesel	[48]	[49]	[50]	[51]	[52]
		ASTM D6751	Standard test method						
Kinematic viscosity at 40 °C	mm ² /s	1,9-6.0	D445	2.986	5.83	5.3	4.59	5.27	3.2
Density at 40 °C	kg/m ³	880	D4052	823	896	865	881.2	882	820
Acid value	mgKOH/g	0,5 (maks)	D664	-	0.3	0.09	-	-	-
Calorific value	MJ/kg	-	D240	46.200	-	38.34	41.21	39.44	39.20
Oxidation stability at 110 °C	°h	3 (min)	EN 14112		-		15.21	4.05	-
Flash Point	°C	100-170	D93	68.5	155	152	183.5	161	120
Fire point	°C	-	D93	81	-	172	-	-	128
Pour Point	°C	-15-16	D2500	6	-5	3.1	3	-	2
Cloud point	°C	-3-12	D2500	17	5	6.7	9	-	9
Copper strip corrosion	--	3 (max)	D130	1a	-	-	-	-	-
Cetane number	(w/w)%	-	-	0,0760	-	52	58	-	-
Carbon residue	(w/w)%	-	-	0,00002	-	-	-	-	0.105

G. Biji Kapok (*Ceiba Pentrandra*)

Tanaman kapok (*Ceiba pentandra*) banyak di jumpai diwilayah tropis masuk dalam golongan ordo Malvales. Beberapa sumber menyebutkan pohon ini berasal dari Amerika tengah dan karibia. Di wilayah jawa pohon ini dikenal dengan nama Kapuk. Pengembangan biodiesel kapuk, yang dihasilkan dari minyak kapuk yang diekstrak dari biji kapuk, sebagai sumber bahan

bakar potensial patut mendapat perhatian belakangan ini (gambar 3.7).

Minyak kapuk (*Ceiba pentandra*), bahan baku non-edible dianggap sebagai sumber yang lebih baik karena ketersediaannya yang melimpah dan rendemen minyak yang tinggi dibandingkan bahan baku non-edible lainnya. Buah dan biji yang dibudidayakan menghasilkan sekitar 1.280 kg/ha/tahun minyak, jumlah yang lebih tinggi untuk produksi biodiesel. Pohon ini banyak ditemukan di Asia bagian selatan seperti India, Indonesia, Amerika Tengah, Meksiko, Amerika Selatan, dan Afrika Tengah. Sebuah pohon dapat menghasilkan sekitar 500 hingga 4000 buah, setiap buah memiliki 200 biji. Minyak kapuk diperoleh dari biji pohon kapuk yang memiliki kandungan hingga 25–28% (b/b) dari setiap buahnya [53]. Minyak kapuk mengandung 17,15% asam lemak jenuh dan 76,32% asam lemak tak jenuh. Kemudian, dari tahun 1964 hingga 1974, berbagai penelitian mengungkapkan adanya lebih banyak asam lemak tak jenuh dibandingkan asam lemak jenuh, dengan proporsi asam lemak siklo-propenoid yang bervariasi [54]. Sifat fisiokimia biodiesel biji kapuk sebagaimana disajikan pada tabel (3.7)



Gambar 3.7 pohon dan buah kapok

Tabel 3.7. sifat fisiokimia biodiesel minyak biji kapok

Properties	unit	Biodiesel		Diesel	[55]	[53]	[54]	[56]	[57]	[58]
		ASTM D6751	Standard test method							
Kinematic viscosity at 40 °C	mm ² /s	1,9-6,0	D445	2,986	5,4	4,8	5,4	4,3	5,4	4,69
Density at 40 °C	kg/m ³	880	D4052	823	857	885	875	880	875	883,6
Acid value	mgKOH/g	0,5 (maks)	D664	-	-	1,2	-	0,19	-	0,18
Calorific value	MJ/kg	-	D240	46,200	39,94	38,44	36,292	-	36,292	40,276
Oxidation stability at 110 °C	h	3 (min)	EN 14112	-	-	-	-	-	-	9,82
Flash Point	°C	100-170	D93	68,5	121	152	156	154	156	158,5
Fire point	°C	-	D93	81	-	-	-	-	-	-
Pour Point	°C	-15-16	D2500	6	-10	-	-8	0	-8	-2
Cloud point	°C	-3-12	D2500	17	-	-3	-	-	-	-3
Copper corrosion	strip	3 (max)	D130	1a	-	-	-	-	-	1a
Cetane number	(w/w)%	-	-	-	52	57,2	54	57	54	-
Carbon residue	(w/w)%	-	-	0,00002	-	-	-	-	-	-

H. Lemak Hewan

Lemak hewan merupakan produk sampingan dari proses penyembelihan sapi, bersama dengan kulit, darah, tulang, dan jeroan. Penggunaan lemak hewani dapat menghindari pembuangan yang tidak semestinya, tanpa pengolahan, ke badan air (gambar 3.8). Lemak daging sapi merupakan bahan baku bernilai rendah yang, jika dikonversi menjadi biodiesel, akan menawarkan berbagai keuntungan energi, lingkungan, dan ekonomi. Sejak tahun 2005 hingga 2007 (dua tahun setelah dimulainya PNPB), pengolahan lemak menjadi biodiesel meningkat hampir enam kali lipat. Pada tahun 2010, produksi biodiesel merupakan tujuan utama lemak, mewakili sekitar 72% dari total lemak yang dikonsumsi di negara ini. Selain digunakan untuk produksi biofuel, minyak ini juga digunakan dalam industri kosmetik, farmasi, makanan hewan, dan kimia [59].

Lemak hewani lebih cocok untuk produksi biodiesel dibandingkan minyak nabati karena angka setananya yang tinggi, kapasitas oksidasi yang baik, tidak adanya sulfur, mudah terurai secara hayati, dan kecenderungan pelumasan yang tinggi. Biodiesel yang dibuat dari lemak hewani lebih mendekati karakteristik bahan bakar diesel dan menjamin produksi berkelanjutan karena pasokan lemak yang berkelanjutan dari industri pengolahan daging [60]. Lemak kambing merupakan salah satu bahan sisa rumah potong hewan

yang banyak dimanfaatkan dalam industri sabun; itu juga dapat digunakan sebagai bahan baku untuk produksi biodiesel [61].



Gambar 3.8 lemak hewan sebagai sumber biodiesel

Lemak hewani dengan komposisi metil ester mempunyai kandungan oksigen yang kaya, angka setana yang tinggi dan nilai kalor yang sebanding dengan bahan bakar solar, sehingga dipilih sebagai alternatif terbaik dalam pemanfaatan biodiesel. Penggunaan lemak sapi untuk memproduksi biodiesel akan memberikan keuntungan ekonomi serta pengurangan permasalahan lingkungan yang disebabkan oleh emisi berbahaya dan pembuangan limbah [62]. Sifat fisiokimia biodiesel dari limbah lemak hewan disajikan pada tabel (3.8)

Tabel 3.8. sifat fisiokimia biodiesel minyak lemak hewan

Properties	unit	Biodiesel		Diesel	[63]	[64]	[60]	[65]	[66]
		ASTM D6751	Standard test method						
Kinematic viscosity at 40 °C	mm ² /s	1.9-6.0	D445	2.986	4.93	5.4	4.53	-	5.02
Density at 40 °C	kg/m ³	880	D4052	823	870	928	-	874	864
Acid value	mgKOH/g	0.5 (maks)	D664	-	-	-	0.26	0.12	-
Calorific value	MJ/kg	-	D240	46.200	41.7	-	41.3	-	42.36
Oxidation stability at 110 °C	h	3 (min)	EN 14112	-	3	-	-	9.79	-
Flash Point	°C	100-170	D93	68.5	153.6	154	178	139	158
Fire point	°C	-	D93	81	185	-	-	-	-
Pour Point	°C	-15-16	D2500	6	-3.64	5	6	-	3
Cloud point	°C	-3-12	D2500	17	2.4	11	2	-	15
Copper strip corrosion	--	3 (max)	D130	1a	-	-	-	-	1a
Cetane number	(w/w)%	-	-	-	53	56	67	-	-
Carbon residue	(w/w)%	-	-	0,00002	-	-	-	-	-

I. Minyak Kepuh (*Sterculia Foetida*)

Sterculia foetida merupakan anggota famili Sterculiaceae yang beradaptasi dengan baik di wilayah tropis dan subtropis di dunia dengan masa hidup sekitar 100 tahun (gambar 3.9). Tanaman ini juga dikenal dengan nama Bottletree, Java Olive, Bastard Poon Tree, Jangli Badam, Hazel Sterculia, dan Wild Almond tree dan ditanam dimana-mana sebagai pohon hias dan banyak ditemukan di berbagai belahan dunia termasuk Bangladesh, Australia, India, Ethiopia, India, Thailand, Malaysia, Uganda, Somalia, Oman, Sri Lanka, dan Pakistan. Dapat tumbuh hingga tinggi 40 m dan lebar 3 m. Buahnya panjangnya 10 m, berkayu merah tua, dan hampir halus. Cangkang dan lapisan daging buah tipis berukuran 1–2 mm mengelilingi biji soliter yang besar. Umumnya buah ini mempunyai 10–15 biji, menghasilkan sekitar 260–360 kg biji per tahun. Komponen utama biji-bijian ini adalah lipid dan protein yang berjumlah 51,78 dan 21,61 persen. *Sterculia foetida* Buah muda dan matang, serta bijinya, terlihat pada Gambar 3.9. Molekula Bio Kemix Limited, Hyderabad, India, menyediakan pelet metanol (99,5 persen), *n*-heksana (99 persen), dan KOH (85 persen) yang dibutuhkan dalam sintesis biodiesel [67]. Biji buah kepuh sangat potensial dijadikan biodiesel, adapun sifat fisiokimia biodiesel dari buah kepuh disajikan pada tabel 3.9



Gambar 3.9 pohon dan buah kepuh

Tabel 3.9. sifat fisiokimia biodiesel minyak kepuh

Properties	unit	Biodiesel		Diesel	[67]	[68]	[69]	[70]	[71]
		ASTM D6751	Standard test method						
Kinematic viscosity at 40 °C	mm ² /s	1,9-6,0	D445	2,986	.5	5,92	5,39	3,96	4,2
Density at 40 °C	kg/m ³	880	D4052	823	875	876,9	890	879	873
Acid value	mgKOH/g	0,5 (maks)	D664	-		0,38	0,01	0,14	-
Calorific value	MJ/kg	-	D240	46,200		40,49	42,3	40,427	40,2
Oxidation stability at 110 °C	°h	3 (min)	EN 14112			4,42	-	3,44	-
Flash Point	°C	100-170	D93	68,5	130	156,5	209	160,5	160
Fire point	°C	-	D93	81		-	-		172
Pour Point	°C	-15-16	D2500	6		2,8	-	-3	-4
Cloud point	°C	-3-12	D2500	17		-	-	-3	3
Copper strip corrosion	--	3 (max)	D130	1a		-	1a	-	-
Cetane number	(w/w)%	-	-		52	-	-	57,9	57
Carbon residue	(w/w)%	-	-	0,00002		-	0,51	-	-

J. Mikro Alga

Mikroalga, mikroorganisme uniseluler, dapat menghasilkan berbagai bahan bakar hayati terbarukan seperti biodiesel melalui transesterifikasi, bio-minyak melalui konversi termokimia, hidrogen melalui pencernaan anaerobik, solar hijau melalui pencairan hidrotermal katalitik langsung, bahan bakar gas melalui gasifikasi, dan bioetanol melalui fermentasi. Penyerapan karbon dan penggunaan biodiesel mikroalga yang bersih merupakan aspek menarik lainnya dalam penggunaan mikroalga untuk memproduksi biodiesel. Laju fotosintesis pada mikroalga tinggi, yaitu $6,9 \times 10^4 \text{ sel/mL/jam}$, dan budidaya membantu mengurangi karbon dioksida (CO_2) di lingkungan dengan laju yang lebih cepat dibandingkan tanaman berbasis tanah lainnya. Untuk setiap 100 GT biomassa yang dihasilkan, mikroalga mengumpulkan 183 GT CO_2 . Mikroalga berpotensi menjadi sumber biofuel dengan hasil tinggi tanpa mempengaruhi pasokan pangan, hutan, atau lahan pertanian. Sumber biofuel yang layak ini mengatasi tantangan yang dihadapi bahan baku generasi sebelumnya, seperti ketersediaan, kelayakan ekonomi, dampak terhadap rantai makanan, dan adaptasi terhadap kondisi iklim. Kandungan lipid

mikroalga rata-rata berkisar hingga 70%, namun pada kondisi tertentu yang ditingkatkan, spesies tertentu dapat memberikan hingga 90% berat keringnya [72]. Adapun tahapan budidaya hingga produksi biodiesel algae seperti ditunjukkan pada gambar 3.10.



Gambar 3. 10 Diagram alir dari budidaya alga hingga penggunaan [72]

Daftar Pustaka

- [1] M. A. Bashir, S. Wu, J. Zhu, A. Krosuri, M. U. Khan, and R. J. N. Aka, "Recent development of advanced processing technologies for biodiesel production: A critical review," *Fuel Processing Technology*, vol. 227, p. 107120, 2022.
- [2] M. Bhuiya, M. Rasul, M. Khan, N. Ashwath, A. Azad, and M. Hazrat, "Second generation biodiesel: potential alternative to-edible oil-derived biodiesel," *Energy Procedia*, vol. 61, pp. 1969-1972, 2014.
- [3] A. Alaswad, M. Dassisti, T. Prescott, and A. G. Olabi, "Technologies and developments of third generation biofuel production," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 1446-1460, 2015.
- [4] S. Behera, R. Singh, R. Arora, N. K. Sharma, M. Shukla, and S. Kumar, "Scope of algae as third generation biofuels," *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, vol. 2, p. 90, 2015.

- [5] A. Talebian-Kiakalaieh, N. A. S. Amin, and H. Mazaheri, "A review on novel processes of biodiesel production from waste cooking oil," *Applied Energy*, vol. 104, pp. 683-710, 2013.
- [6] B. Abdullah *et al.*, "Fourth generation biofuel: A review on risks and mitigation strategies," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 107, pp. 37-50, 2019.
- [7] Z. Moravvej, M. A. Makarem, and M. R. Rahimpour, "The fourth generation of biofuel," in *Second and third generation of feedstocks*: Elsevier, 2019, pp. 557-597.
- [8] C. C. Chen, A. Kusadokoro, M. Nie, H. and Xu, W. , "Sustainability and challenges in biodiesel production from waste cooking oil: An advanced bibliometric analysis," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 4022-4034,, 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.06.084.
- [9] A. D. S. W. César, D. E. Saraiva, G. L. E. D. O. and Guabiroba, R. C. S. , "The potential of waste cooking oil as supply for the Brazilian biodiesel chain," *Renew. Sustain. Energy Rev*, vol. 72, pp. 246-253, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.240.
- [10] A. A. Pugazhendhi, A. Mathimani, T. and Atabani, A. E. , "Optimization, kinetic and thermodynamic studies on sustainable biodiesel production from waste cooking oil: An Indian perspective," *Fuel*, vol. 273, p. 117725, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117725.
- [11] H. M. I. Khan, T. Yasin, S. Irfan, M. Kazmi, M. Fayaz, H. Mujtaba, M.A. Ali, C.H. Kalam, M.A. Soudagar, M.E.M. Ullah, N., "Production and utilization aspects of waste cooking oil based biodiesel in Pakistan," *Alexandria Eng. J.*, vol. 60, pp. 5831-5849, 2021, doi: 10.1016/j.aej.2021.04.043.
- [12] J. O. Gardy, A. Céspedes, O. Hassanpour, A. Lai, X. Lee, A.F. Wilson, K. Rehan, M., "A magnetically separable SO₄/Fe-

- Al-TiO₂ solid acid catalyst for biodiesel production from waste cooking oil," *Appl. Catal. B Environ*, vol. 234, pp. 268–278, 2018, doi: 10.1016/j.apcatb.2018.04.046.
- [13] S. A. Ali, S. Hunagund, S. S. Hussain, and A. H. Bagwan, "The effect of nanoparticles dispersed in waste cooking oil (WCO) biodiesel on thermal performance characteristics of VCR engine," *Materials Today: Proceedings*, vol. 43, pp. 888–891, 2021.
- [14] M. Tumanggor. "Jelantah Mengalir sampai ke Eropa." Aprobi. (accessed).
- [15] M. A. A. Farid, M. A. Hassan, Y. H. Taufiq-Yap, Y. Shirai, M. Y. Hasan, and M. R. Zakaria, "Waterless purification using oil palm biomass-derived bioadsorbent improved the quality of biodiesel from waste cooking oil," *Journal of cleaner production*, vol. 165, pp. 262–272, 2017.
- [16] N. S. H. R. Mansir, T.I. and Yap, Y. H. T., "Effective biodiesel synthesis from waste cooking oil and biomass residue solid green catalyst," *Chem. Eng. J.*, vol. 347, pp. 137–144, 2018, doi: 10.1016/j.cej.2018.04.034.
- [17] S. Sahar, S. Iqbal, J. Ullah, I. Bhatti, H.N. Nouren, S. Rehman, H.U. Nisar, J. Iqbal, M, "Biodiesel production from waste cooking oil: An efficient technique to convert waste into biodiesel," *Sustain. Cities Soc*, vol. 41, pp. 220–226, 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.05.037.
- [18] J. S. Patchimpet, B. K. Sangkharak, K. and Klomklao, S. , "Optimization of process variables for the production of biodiesel by transesterification of used cooking oil using lipase from Nile tilapia viscera," *Renew. Energy*, vol. 153, pp. 861–869, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.02.039.
- [19] Z. B. Ullah, M. A. Man, Z. Khan, A. S. Muhammad, N. and Sarwono, A. , "Preparation and kinetics study of biodiesel production from waste cooking oil using new

- functionalized ionic liquids as catalysts," *Renew. Energy*, vol. 114, pp. 755–765, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.07.085.
- [20] D. K. Avinash Kumar Agarwal, Atul Dhar, "Improving oxidation stability of biodiesels derived from Karanja, Neem and Jatropa: Step forward in the direction of commercialization," *Journal of Cleaner Production*, vol. 107, pp. 646–652, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.055>.
- [21] Ö. Can, "Combustion characteristics, performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with a waste cooking oil biodiesel mixture," *Energy Convers. Manag.*, vol. 87, pp. 676–686, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.07.066.
- [22] A. M. M. Vázquez, G. and Sosa, J. F., "Economic Analysis of Biodiesel Production from Waste Vegetable Oil in Mexicali, Baja California," *Energy Sci. Technol.*, vol. 1, pp. 87–93, 2011, doi: 10.3968/i93.
- [23] Y. Z. Xue, W. Ma, P. Zhao, Z. Xu, G. Yang, C. Chen, H. Lin, H. Han, S, "Ternary blends of biodiesel with petro-diesel and diesel from direct coal liquefaction for improving the cold flow properties of waste cooking oil biodiesel," *Fuel*, vol. 177, pp. 46–52, 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2016.02.087.
- [24] R. Sudradjat, E. Pawoko, D. Hendra, and D. Setiawan, "Pembuatan biodiesel dari biji kesambi (*Schleichera oleosa* L.)," *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, vol. 28, no. 4, pp. 358–379, 2010.
- [25] A. Silitonga *et al.*, "*Schleichera oleosa* L oil as feedstock for biodiesel production," *Fuel*, vol. 156, pp. 63–70, 2015.
- [26] A. K. Yadav, M. E. Khan, A. Pal, and U. Ghosh, "Performance and emission characteristics of a stationary diesel engine fuelled by *Schleichera Oleosa* Oil Methyl Ester (SOME) produced through hydrodynamic cavitation

- process," *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 27, no. 1, pp. 89-93, 2018.
- [27] M. Tomar and N. Kumar, "Effect of multi-walled carbon nanotubes and alumina nano-additives in a light duty diesel engine fuelled with *schleichera oleosa* biodiesel blends," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 42, p. 100833, 2020.
- [28] Y. Y. Liu, X. Adamu, A. and Zhu, Z. , "Economic evaluation and production process simulation of biodiesel production from waste cooking oil," " *Curr. Res. Green Sustain. Chem*, vol. 4, p. 100091, 2021, doi: 10.1016/j.crgsc.2021.100091.
- [29] A. Silitonga *et al.*, "A comparative study of biodiesel production methods for *Reutealis trisperma* biodiesel," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 39, no. 20, pp. 2006-2014, 2017.
- [30] H. Holilah, T. Utami, and D. Prasetyoko, "Sintesis dan Karakterisasi Biodiesel dari Minyak Kemiri Sunan (*Reutealis trisperma*) dengan Variasi Konsentrasi Katalis NaOH," *Jurnal MIPA Unnes*, vol. 36, no. 1, p. 114283, 2013.
- [31] T. M. I. Riayatsyah *et al.*, "Biodiesel production from *Reutealis trisperma* oil using conventional and ultrasonication through esterification and transesterification," *Sustainability*, vol. 13, no. 6, p. 3350, 2021.
- [32] F. Mayasari and R. Dalimi, "Dynamic model of *reutealis trisperma* production as biodiesel feedstock in Indonesia," in *2017 China International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*, 2017: IEEE, pp. 855-860.
- [33] S. Supriyadi, P. Purwanto, D. D. Anggoro, and H. Hermawan, "The effects of sodium hydroxide (naoh) concentration and reaction temperature on the properties of

- biodiesel from Philippine Tung (Reutealis Trisperma) Seeds," *Automotive Experiences*, vol. 5, no. 1, pp. 57-67, 2022.
- [34] A. Silitonga *et al.*, "Intensification of Reutealis trisperma biodiesel production using infrared radiation: Simulation, optimisation and validation," *Renewable Energy*, vol. 133, pp. 520-527, 2019.
- [35] A. Silitonga, H. Masjuki, H. C. Ong, F. Kusumo, T. Mahlia, and A. Bahar, "Pilot-scale production and the physicochemical properties of palm and Calophyllum inophyllum biodiesels and their blends," *Journal of Cleaner Production*, vol. 126, pp. 654-666, 2016.
- [36] B. Ashok, K. Nanthagopal, and D. S. Vignesh, "Calophyllum inophyllum methyl ester biodiesel blend as an alternate fuel for diesel engine applications," *Alexandria engineering journal*, vol. 57, no. 3, pp. 1239-1247, 2018.
- [37] K. Nanthagopal, B. Ashok, R. S. Garnepudi, K. R. Tarun, and B. Dhinesh, "Investigation on diethyl ether as an additive with Calophyllum Inophyllum biodiesel for CI engine application," *Energy Conversion and Management*, vol. 179, pp. 104-113, 2019.
- [38] P. M. Shameer and K. Ramesh, "FTIR assessment and investigation of synthetic antioxidant on the fuel stability of Calophyllum inophyllum biodiesel," *Fuel*, vol. 209, pp. 411-416, 2017.
- [39] M. Jain, U. Chandrakant, V. Orsat, and V. Raghavan, "A review on assessment of biodiesel production methodologies from Calophyllum inophyllum seed oil," *Industrial crops and products*, vol. 114, pp. 28-44, 2018.
- [40] A. Silitonga, H. C. Ong, T. Mahlia, H. Masjuki, and W. Chong, "Biodiesel conversion from high FFA crude jatropha curcas, calophyllum inophyllum and ceiba pentandra oil," *Energy procedia*, vol. 61, pp. 480-483, 2014.

- [41] S. Dharma *et al.*, "Experimental study and prediction of the performance and exhaust emissions of mixed *Jatropha curcas*-*Ceiba pentandra* biodiesel blends in diesel engine using artificial neural networks," *Journal of cleaner production*, vol. 164, pp. 618-633, 2017.
- [42] A. Zainudin, A. Winaya, and Y. Rahmadesi, "Biodiesel generated from *Jatropha* (*Jatropha curcas* Linn.) seeds selected based on various genotypes crossbred," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 345-350, 2020.
- [43] M. Y. Koh and T. I. M. Ghazi, "A review of biodiesel production from *Jatropha curcas* L. oil," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 15, no. 5, pp. 2240-2251, 2011.
- [44] A. Silitonga, H. Masjuki, T. Mahlia, H. Ong, A. Atabani, and W. Chong, "A global comparative review of biodiesel production from *jatropha curcas* using different homogeneous acid and alkaline catalysts: Study of physical and chemical properties," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 514-533, 2013.
- [45] N. Acharya, P. Nanda, S. Panda, and S. Acharya, "A comparative study of stability characteristics of mahua and *jatropha* biodiesel and their blends," *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, vol. 31, no. 2, pp. 184-190, 2019.
- [46] S. Noreen *et al.*, "Eco-benign approach to produce biodiesel from neem oil using heterogeneous nano-catalysts and process optimization," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 22, p. 101430, 2021.
- [47] B. Nurulita, "Produksi Dan Uji Karakteristik Biodiesel Dari Campuran Limbah Minyak Goreng Sisa Dan Minyak Biji Mimba," S1, Mechanical engineering, University Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan, 2022.

- [48] T. A. Mallah and A. R. Sahito, "Optimization of castor and neem biodiesel blends and development of empirical models to predicts its characteristics," *Fuel*, vol. 262, p. 116341, 2020.
- [49] S. Dash *et al.*, "Experimental investigation on synthesis of biodiesel from non-edible Neem seed oil: Production optimization and evaluation of fuel properties," *Materials Today: Proceedings*, vol. 47, pp. 2463-2466, 2021.
- [50] B. A. Oni and D. Oluwatosin, "Emission characteristics and performance of neem seed (*Azadirachta indica*) and Camelina (*Camelina sativa*) based biodiesel in diesel engine," *Renewable Energy*, vol. 149, pp. 725-734, 2020.
- [51] A. K. Agarwal, D. Khurana, and A. Dhar, "Improving oxidation stability of biodiesels derived from Karanja, Neem and Jatropha: step forward in the direction of commercialisation," *Journal of Cleaner Production*, vol. 107, pp. 646-652, 2015.
- [52] A. Karmakar, S. Karmakar, and S. Mukherjee, "Biodiesel production from neem towards feedstock diversification: Indian perspective," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1, pp. 1050-1060, 2012.
- [53] S. Pooja, B. Anbarasan, V. Ponnusami, and A. Arumugam, "Efficient production and optimization of biodiesel from kapok (*Ceiba pentandra*) oil by lipase transesterification process: Addressing positive environmental impact," *Renewable Energy*, vol. 165, pp. 619-631, 2021.
- [54] S. Vedharaj, R. Vallinayagam, W. Yang, S. Chou, K. Chua, and P. Lee, "Experimental investigation of kapok (*Ceiba pentandra*) oil biodiesel as an alternate fuel for diesel engine," *Energy Conversion and Management*, vol. 75, pp. 773-779, 2013.

- [55] C. Nandakumar, V. Raman, C. Saravanan, M. Vikneswaran, S. P. R. Yadav, and M. Thirunavukkarasu, "Effect of nozzle hole geometry on the operation of kapok biodiesel in a diesel engine," *Fuel*, vol. 276, p. 118114, 2020.
- [56] L. K. Ong, C. Effendi, A. Kurniawan, C. X. Lin, X. S. Zhao, and S. Ismadji, "Optimization of catalyst-free production of biodiesel from Ceiba pentandra (kapok) oil with high free fatty acid contents," *Energy*, vol. 57, pp. 615-623, 2013.
- [57] S. Vedharaj, R. Vallinayagam, W. Yang, C. Saravanan, and P. Lee, "Optimization of combustion bowl geometry for the operation of kapok biodiesel–Diesel blends in a stationary diesel engine," *Fuel*, vol. 139, pp. 561-567, 2015.
- [58] A. S. Silitonga *et al.*, "Biodiesel synthesis from Ceiba pentandra oil by microwave irradiation-assisted transesterification: ELM modeling and optimization," *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 1278-1291, 2020.
- [59] V. P. P. Esteves, E. M. M. Esteves, D. J. Bungenstab, G. L. D. Feijó, O. d. Q. F. Araújo, and C. d. R. V. Morgado, "Assessment of greenhouse gases (GHG) emissions from the tallow biodiesel production chain including land use change (LUC)," *Journal of cleaner production*, vol. 151, pp. 578-591, 2017.
- [60] T. Suresh, N. Sivarajasekar, and K. Balasubramani, "Enhanced ultrasonic assisted biodiesel production from meat industry waste (pig tallow) using green copper oxide nanocatalyst: Comparison of response surface and neural network modelling," *Renewable Energy*, vol. 164, pp. 897-907, 2021.
- [61] R. a. S. Chakraborty, H. , "Intensification of biodiesel production from waste goat tallow using infrared radiation: Process evaluation through response surface methodology

- and artificial neural network," *Appl. Energy*, vol. 114, pp. 827-836, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.04.025.
- [62] R. Gautam and S. Kumar, "Performance and combustion analysis of diesel and tallow biodiesel in CI engine," *Energy reports*, vol. 6, pp. 2785-2793, 2020.
- [63] A. Shabbir *et al.*, "Lewatit-immobilized lipase from *Bacillus pumilus* as a new catalyst for biodiesel production from tallow: Response surface optimization, fuel properties and exhaust emissions," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 160, pp. 286-296, 2022.
- [64] B. E. Olubunmi, A. F. Alade, S. O. Ebhodaghe, and O. T. Oladapo, "Optimization and kinetic study of biodiesel production from beef tallow using calcium oxide as a heterogeneous and recyclable catalyst," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 14, p. 100221, 2022.
- [65] P. Radha, K. Prabhu, A. Jayakumar, S. AbilashKarthik, and K. Ramani, "Biochemical and kinetic evaluation of lipase and biosurfactant assisted ex novo synthesis of microbial oil for biodiesel production by *Yarrowia lipolytica* utilizing chicken tallow," *Process Biochemistry*, vol. 95, pp. 17-29, 2020.
- [66] R. G. Pereira *et al.*, "Sustainability and mitigation of greenhouse gases using ethyl beef tallow biodiesel in energy generation," *Journal of Cleaner Production*, vol. 29, pp. 269-276, 2012.
- [67] G. Pullagura, J. Bikkavolu, S. Vadapalli, V. Prasad, and K. R. R. Chebattina, "The effect of graphene nanoplatelets on physico-chemical properties of *Sterculia foetida* biodiesel-diesel fuel blends," *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- [68] A. Sebayang *et al.*, "Modelling and prediction approach for engine performance and exhaust emission based on artificial intelligence of *sterculia foetida* biodiesel," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 8333-8345, 2022.

- [69] M. Mangas *et al.*, "Characterization of biodiesel and bio-oil from *Sterculia striata* (chicha) oil," *Industrial Crops and Products*, vol. 36, no. 1, pp. 349-354, 2012.
- [70] A. Silitonga, H. Ong, H. Masjuki, T. Mahlia, W. Chong, and T. F. Yusaf, "Production of biodiesel from *Sterculia foetida* and its process optimization," *Fuel*, vol. 111, pp. 478-484, 2013.
- [71] G. Pullagura *et al.*, "Enhancing performance characteristics of biodiesel-alcohol/diesel blends with hydrogen and graphene nanoplatelets in a diesel engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023.
- [72] R. M. Meraz, M. M. Rahman, T. Hassan, A. Al Rifat, and A. R. Adib, "A review on algae biodiesel as an automotive fuel," *Bioresource Technology Reports*, p. 101659, 2023.



BAB IV

Teknologi Pembuatan Biodiesel

Umumnya produksi biodiesel melalui proses transesterifikasi konvensional menghasilkan waktu pemrosesan yang lama, suhu operasi yang tinggi, proses pemisahan yang kompleks, dan kompleksitas akibat pembentukan gliserol dan saponifikasi. Oleh karena itu, penggunaan beberapa teknologi lain untuk mengintensifkan proses transesterifikasi telah dipertimbangkan, seperti radiasi gelombang mikro dan gelombang ultrasonik, Hidrodinamik, Osilasi, dan lain-lain [1].

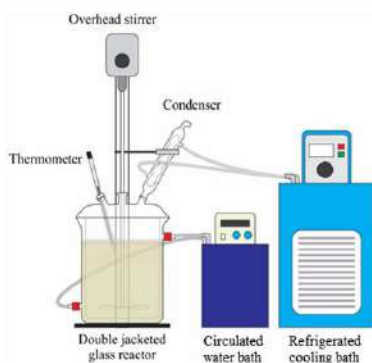
Saat ini para peneliti terus mengembangkan teknologi pengolahan biodiesel baik terkait teknik pemanas maupun teknik pengaduk dalam proses sintesis biodiesel. Proses pembuatan biodiesel secara umum dapat kita bagi menjadi beberapa jenis tergantung pada proses pemanas dan pengaduknya:

1. Metode Jaket ganda (*double jacket*)
2. Metode gelombang mikro (*microwave*)
3. Metode ultrasonik (*ultrasonic*)
4. Metode infra merah (*infrared*)
5. Metode elektromagnetik induksi
6. Metode Pelepasan Plasma (*Plasma discharge*)
7. Metode transesterifikasi superkritis (*Supercritical transesterification*)

A. Metode Double Jacket

Proses esterifikasi/transesterifikasi pada minyak mentah (*crude oil*) yang akan dijadikan biodiesel dilakukan dengan menggunakan reaktor *double jacket* seperti terlihat pada (gambar 4.1) dibawah. Glas reaktor ini dilengkapi mantel pemanas *doubl* yang terdiri dari pengatur elektrik dimana air dipanas yang disirkulasi dengan memompakan dari pemanas air yang bisa

diatur. Alat ini juga dilengkapi dengan pengatur waktu yang bisa diatur sedemikian rupa sesuai waktu proses yang kita inginkan. Pada alat ini dilengkapi dengan kondensor untuk menurunkan temperatur sehingga methanol yang menguap akan terkondensasi dan kembali masuk kedalam reaktor. Pada reaktor ini dilengkapi dengan pengaduk mekanis (*overhead stirred*) yang bisa diatur hingga kecepatan 1500 rpm untuk membantu proses sintesis biodiesel. Alat ini dilengkapi dengan thermometer untuk mengukur suhu minyak dalam reaktor.



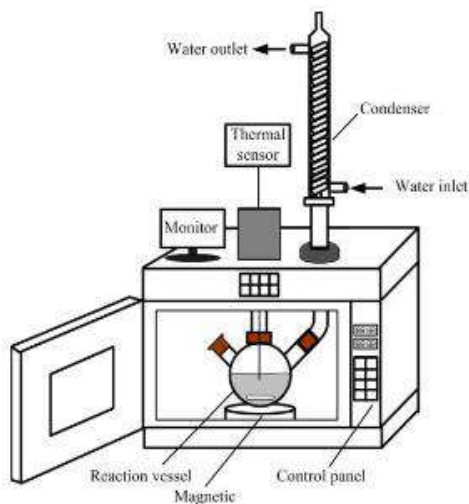
Gambar 4.1 skema peralatan metode double jacket pada proses esterifikasi [179]

B. Gelombang Mikro (*Microwave*)

Sejak awal produksi biodiesel, sebagian besar metode dan reaktor baru dirancang berdasarkan perpindahan panas konvensional, yang secara termodinamika mentransfer energi pada permukaan material. Masalah utama pada proses reaksi termodinamika adalah besarnya jumlah energi masukan yang dibutuhkan untuk memulai reaksi kimia [2].

Saat ini, teknik produksi biodiesel telah bergeser dari metode pengadukan mekanis konveksi ke teknik intensifikasi proses untuk proses katalitik seperti kavitas *ultrasound*, teknologi gelombang mikro dan teknologi hybrid (kombinasi keduanya). Gelombang mikro, mewakili radiasi *non-pengion*, mempengaruhi

gerakan molekul seperti migrasi ion atau rotasi dipol tanpa mengubah struktur molekul. Di bawah medan listrik yang sama, ion bermuatan beresilasi melalui larutan yang menghasilkan konversi energi kinetik menjadi energi panas. Karena iradiasi gelombang mikro tingkat molekul cepat, pemanasan cepat diamati dalam campuran minyak nabati, metanol, dan katalis yang mengandung komponen polar dan ionic. Tidak seperti pemanasan konvensional untuk produksi biodiesel, perpindahan panas terutama terjadi melalui konveksi dan radiasi dari permukaan pemanas ke campuran reaksi. Hal ini tidak hanya menyebabkan pemanasan yang tidak seragam tetapi juga membutuhkan waktu pemanasan yang lama.



Gambar 4.2 Metode Pemanas Microwave

Hasil produksi biodiesel lebih tinggi dengan menggunakan metode pemanasan gelombang mikro dibandingkan dengan metode konvensional, di mana reaktan dipanaskan oleh energi panas melalui konveksi, konduksi, dan radiasi dari permukaan reaktor. Frekuensi dan panjang gelombang gelombang mikro masing-masing berada pada kisaran 300MHz~300GHz dan

1mm~1m. Bahan memantulkan, menyerap, atau mengirimkan gelombang iradiasi mikro. Pemanasan dengan gelombang mikro bergantung pada kemampuan zat padat dan cairan untuk menyerap energi elektromagnetik dan mengubahnya menjadi panas (mekanisme pemanasan dielektrik). Proses iradiasi gelombang mikro membantu meningkatkan efisiensi perpindahan panas, yang menghasilkan reaksi kimia yang lebih singkat. Efisiensi perpindahan panas tergantung pada sifat dielektrik bahan yang digunakan (gambar 4.2).

Dibandingkan dengan metode pemanasan konvensional, iradiasi gelombang mikro dengan jelas menggambarkan peran pencampuran cepat fase heterogen dan pemanasan campuran reaksi dan dengan demikian peningkatan laju reaksi transesterifikasi. penggunaan gelombang mikro dapat menurunkan kebutuhan metil asetat dan juga secara substansial menurunkan waktu reaksi esterifikasi dan transesterifikasi, meningkatkan hasil biodiesel, proses yang lebih ekonomis, dan waktu pemurnian pemisahan yang lebih pendek, peningkatan reaksi dengan efek termal, dan penguapan metanol karena interaksi gelombang mikro yang kuat dari material. Mikroreaktor digunakan untuk mengurangi waktu tahan hingga sekitar 1 menit. Berdasarkan hasil optimasi, dimungkinkan untuk mencapai kemurnian biodiesel hingga 99% dalam kondisi optimal.

Proses transesterifikasi basa menggunakan radiasi gelombang mikro untuk menghasilkan biodiesel dari campuran minyak jelantah (WCO) dan minyak *Calophyllum inophyllum* menghasilkan produksi biodiesel sebesar 97,40 % [3]. Selain itu, penggunaan metode ini dalam proses transesterifikasi secara signifikan mengurangi waktu reaksi menjadi 15,9 menit. Selain itu laju reaksi, energi aktivasi dan keunggulan teknologi gelombang mikro dibandingkan metode konvensional dalam hal

pengurangan kebutuhan DMC, konversi diperoleh hanya dalam waktu empat jam menggunakan iradiasi gelombang mikro. Metode intensifikasi proses seperti penerapan *ultrasound*, gelombang mikro, dan cairan superkritis berhasil mempromosikan kinetika reaksi enzimatis. Di antara semuanya, teknologi gelombang mikro telah menawarkan hasil yang menjanjikan dalam mempercepat laju reaksi serta meningkatkan hasil produksi.

Reaktor gelombang mikro aliran kontinu adalah teknik sintetik yang dihasilkan dari kombinasi teknik pengaktifan gelombang mikro dan aliran kontinu. Reaktor ini beroperasi dengan melewati reagen melalui sel aliran yang dimasukkan ke dalam rongga microwave. Dibandingkan dengan teknik pemanasan konvensional, Microwave dapat mempercepat dan menyelesaikan reaksi kimia dalam waktu yang sangat singkat dan menghasilkan produk dengan kemurnian tinggi dengan masukan energi yang lebih sedikit dan memberikan efek lingkungan yang lebih hijau, nyaman, aman dan bersih untuk reaksi kimia. Proses intensifikasi Microwave didasarkan pada pemanasan lokal yang intens oleh interaksi radiasi Microwave dengan molekul polar tanpa mengubah strukturnya.

Dalam sistem reaksi gelombang mikro, energi ditransfer secara langsung dengan membentuk getaran dan rotasi molekul supercharged, sehingga memungkinkan energi aktivasi yang cukup untuk memulai reaksi kimia. Karena gelombang mikro menyediakan energi langsung pada tingkat molekuler, prosesnya jauh lebih efektif dibandingkan dengan reaksi pemanasan termal. Namun kemampuan transfer energi juga bergantung pada faktor disipasi reaktan. Sangat penting untuk mengidentifikasi faktor spesifik bahan reaktan untuk menyerap gelombang elektromagnetik dan menyediakan energi kinetik yang cukup untuk mengaktifkan reaksi kimia [4].

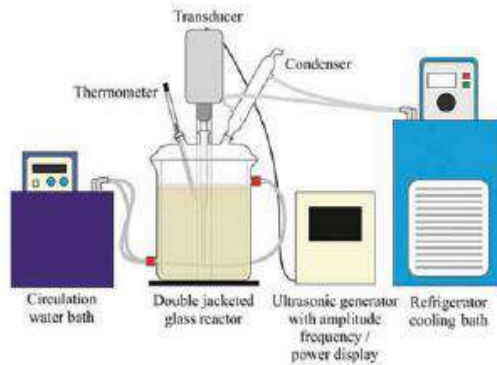
Saat ini banyak peneliti yang menggunakan gelombang mikro dalam proses produksi. Iweka dkk. [5] melakukan produksi biodiesel berbantuan gelombang mikro dari minyak biji semangka menggunakan katalis heterogen dari lumpur sarang semut kwale. Rendemen biodiesel tertinggi sebesar 93,41 wt% diperoleh pada kondisi percobaan durasi 4 menit, daya gelombang mikro 350 W, katalis 4 wt%, dan rasio MeOH/minyak 8:1. Lebih lanjut, produksi biodiesel minyak *Ricinus communis* dan minyak goreng bekas biji kapas menggunakan 'ultrasound + microwave telah dilakukan oleh Kodgire dkk [6]. Ditemukan parameter optimum pada rasio metanol:minyak: 9,7:1; CaO wt%: 2.8 wt%, waktu reaksi: 12.3 menit, dan proporsi campuran *Ricinus communis* dan minyak goreng bekas biji kapas 59:41 dengan rendemen biodiesel tertinggi sebesar $92.11 \pm 0.06\%$. Dengan menggunakan bantuan gelombang mikro, biodiesel dari minyak jelantah diperoleh sebesar 90,0% pada temperatur 80 °C selama 30 menit dengan katalis bifungsional SrO-ZnO/MOF [7].

Produksi biodiesel melalui transesterifikasi minyak jarak pagar dengan katalis asam satu langkah dalam pemanasan gelombang mikro juga telah diteliti oleh Athar dkk [8]. Hasil maksimum biodiesel yang dihasilkan di ruang desain yang dipilih dengan pemanasan gelombang mikro ditemukan sebesar 61,10% di bawah rasio metanol terhadap minyak 11:7 M, konsentrasi katalis 2% berat, dan waktu reaksi 90 menit, yang jauh lebih tinggi daripada rendemen biodiesel dengan metode pemanasan konvensional (3,8%) untuk waktu reaksi yang sama.

Rokni dkk [9] melakukan proses transesterifikasi dengan bantuan gelombang mikro untuk produksi biodiesel dari minyak camelina. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rendemen biodiesel tertinggi sebesar 95,31% diperoleh pada waktu reaksi 5,85 menit, konsentrasi katalis 1,26% berat, dan rasio molar 6,91.

C. Metode Ultrasonik

Biodiesel diproduksi secara komersial dengan proses transesterifikasi dengan katalis alkali kebanyakan menggunakan reaktor yang diaduk secara mekanis. Di antara berbagai metode yang dikembangkan untuk mengatasi masalah ini seperti gelombang mikro, inframerah, dan iradiasi ultrasonik untuk mempercepat reaksi transesterifikasi.



Gambar 4.3 Metode Ultrasound [10]

Kavitasi pada minyak dapat dicapai terutama dengan menggunakan kavitasi akustik (dengan melewati Ultrasonik dengan frekuensi >16 kHz) dan kavitasi hidrodinamik dengan variasi dalam pembatasan aliran seperti orifice dan venturi. Kavitasi akustik membantu proses emulsifikasi dari dua fase yang tidak bercampur yang menghasilkan area superfisial yang besar untuk reaksi dalam durasi yang singkat dan juga memberikan produksi yang lebih tinggi. Reaktor kavitasi membantu meningkatkan laju pencampuran fase yang menghilangkan resistansi perpindahan massa yang menghasilkan esterifikasi yang lebih baik (gambar 4.3).

Ultrasonografi dianggap sebagai sistem reaksi alternatif untuk meningkatkan sintesis biodiesel menggunakan energi yang mengintensifkan perpindahan massa dan panas dalam reaksi.

Rendemen biodiesel yang diperoleh dari teknik ultrasound lebih tinggi dibandingkan dengan teknik infra merah pada waktu reaksi 60 menit. Teknik canggih saat ini adalah sonikasi, yang menggunakan iradiator frekuensi ultrasonik rendah untuk membuat gelembung kavitasi dalam campuran reaksi, mendorong reaksi lebih cepat dengan meningkatkan interaksi antara reaktan dalam skala yang dipadatkan. Gelembung kavitasi yang dihasilkan sangat tinggi suhu dan tekanan internal, yang membantu mempercepat reaksi. Teknik ini secara drastis mengurangi waktu konversi, sehingga mendukung produksi massal biodiesel.

Tujuan dari radiasi kimia ultrasonik adalah untuk meningkatkan aktivasi permukaan katalis dengan menghomogenisasi reaktan dan katalis untuk menyediakan lebih banyak saluran mikro untuk mengemulsi dengan reaktan, sehingga meningkatkan laju reaksi. Menggunakan asisten ultrasonik dalam transesterifikasi homogen, proses yang paling banyak digunakan untuk memproduksi biodiesel, tidak mempengaruhi kesetimbangan termodinamika reaksi tetapi meningkatkan perpindahan massa, sehingga mempercepat laju reaksi, untuk mencapai reaksi kimia yang sama dalam waktu minimal [11].

Proses reaksi ini bergantung pada aliran dan energi akustik yang disediakan oleh radiasi sonokimia akibat lewatnya gelombang suara. Mekanisme reaksi gelombang suara melibatkan gelombang sinusoidal yang memberikan tekanan positif dan negatif untuk menghasilkan gelembung kavitasi dan melepaskan energi [12]. Dalam produksi biofuel, radiasi ultrasonik mempunyai dampak luas pada proses reaksi kimia untuk meningkatkan laju reaksi. Untuk memanfaatkan proses radiasi ultrasonik secara lebih efektif, sangat penting untuk memahami intensitas energi dan pembentukan gelembung

kavitasi untuk membangun sistem optimal yang menyediakan distribusi energi ultrasonik dan efek kavitasi yang seragam. Pada radiasi ultrasonik, energi listrik ditransfer menjadi energi mekanik melalui transduser piezoelektrik, yang kemudian ditransfer ke dalam transformasi kimia [13].

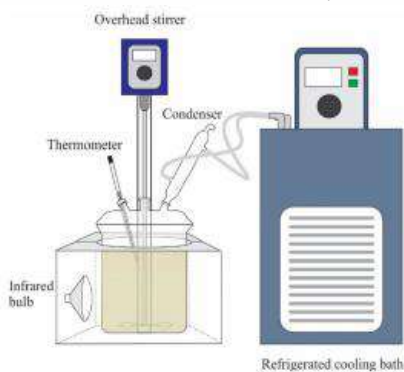
Peningkatan produksi biodiesel menggunakan minyak jelantah dan kalsium digliseroksida sebagai katalis heterogen dengan adanya USG telah dilakukan oleh Gupta dkk [14]. Pada rasio molar metanol terhadap minyak 9:1, pemuatan katalis 1% (b/b) minyak jelantah, suhu 60 °C, daya ultrasonik intensitas rendah 120 W dan siklus kerja 50%, rendemen biodiesel maksimum diperoleh sebesar 93,5%.

Baru-baru ini produksi biodiesel dengan bantuan USG dari biji selada lapangan (*Thlaspi arvense* L.) telah dilakukan oleh Liu dkk [15]. rasio metanol terhadap minyak 9,50:1 g/g, amplitudo sonikasi 90%, pada suhu 60 °C, konsentrasi katalis natrium metoksida 1,36% berat, dan waktu sonikasi 2,50 jam, dengan rendemen biodiesel maksimal sebesar 95,91% merupakan parameter optimum. Dalam studi lainnya, ekstraksi minyak dari biji *Carica candamarcensis* dengan teknik ultrasound juga dilakukan Sebayang dkk [16]. Penggunaan teknik ultrasound juga digunakan dalam produksi biodiesel dari minyak *Ceiba pentandra* menggunakan katalis heterogen turunan batang pisang *Musa spp Nendran*. Hampir >90 % konversi biodiesel dicapai dalam 30 menit, katalis 2% berat, dan rasio molar metanol terhadap minyak 10:1 [17].

D. Metode Radiasi Infra merah (*Radiation Infrared*)

Teknik inframerah lebih efisien untuk produksi biodiesel karena meningkatkan perpindahan massa antara reaktan tak bercampur, meningkatkan reaksi kimia, dan mengurangi waktu reaksi dan konsumsi energi. Hasil biodiesel yang tinggi (kandungan FAME 97,13%) diperoleh dari WMO melalui

esterifikasi-transester secara simultan reaksi jika hanya dalam 0,5 jam menggunakan radiasi inframerah jauh (FIR).



Gambar 4.4 Diagram skematik reaktor inframerah untuk trans/esterifikasi [18]

Proses ester/transesterifikasi pada minyak yang akan dijadikan minyak biodiesel dilakukan dengan menggunakan radiasi inframerah seperti terlihat pada (gambar 4.4) dibawah. Reaktor terhubung ke kondensor dan pengaduk di atas kepala yang dilengkapi dengan indikator kecepatan digital dan pengatur (1200 rpm). Suhu sistem reaksi dikendalikan oleh sirkulasi air melalui dinding luar bejana reaktor. Pengadukan mekanis digunakan untuk memastikan pencampuran yang tepat dari campuran reaksi dalam reaktor. Diagram skema dari pengaturan eksperimental yang digunakan untuk sintesis ditunjukkan pada Gambar 4.4.

Banyak peneliti telah menggunakan radiasi inframerah dalam proses sintesis biodiesel baik dari minyak nabati, WCO maupun lemak hewan. Kusumo dkk [10] membandingkan 2 teknik yaitu teknik radiasi dan ultrasound untuk mendapatkan rendemen yang paling optimal pada minyak kepuh (*Sterculia foetida oil*). Hasil menunjukkan teknik ultrasonik lebih unggul dibanding dengan teknik radiasi inframerah yang masing-masing menghasilkan rendemen sebesar (99.41%) dan (98.55%). Teknik

infrared juga telah digunakan pada sintesis biodiesel dari minyak *Reutealis trisperma* [18] yang menghasilkan rendemen sebesar 97,78%. Minyak dedak padi juga telah disintesis menjadi biodiesel dengan radiasi infrared yang menghasilkan rendemen 98,16% [19]. Chakraborty [20] melakukan Intensifikasi produksi biodiesel dari limbah lemak kambing menggunakan radiasi infra merah.

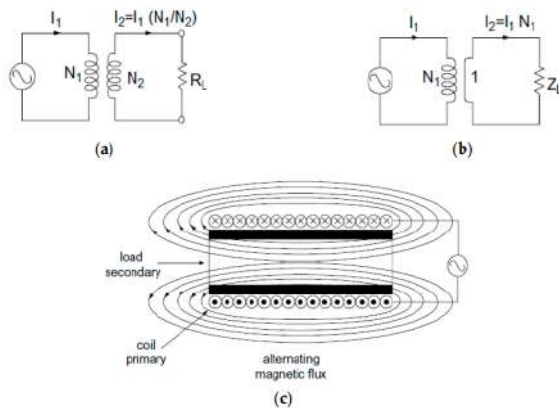
Sebayang dkk [19] produksi biodiesel dari minyak dedak padi dengan radiasi ultrasonografi dan infra merah. ditemukan kondisi optimum (1) rasio metanol terhadap minyak: 60%, (2) konsentrasi katalis: 1% berat, (3) waktu: 7,76 menit, sehingga menghasilkan hasil metil ester sebesar 98,16%. Penggunaan radiasi inframerah juga dimanfaatkan sebagai produksi biodiesel *Reutealis trisperma* oleh Silitonga dkk [18]. Parameter optimum ditemukan pada rasio molar 8:1, dengan jumlah katalis 1,2% berat, pada suhu 64 °C dan waktu proses 68 menit yang menghasilkan rendemen 98,39%. Dalam studi lain, produksi biodiesel dengan reaktor inframerah dari limbah minyak mustard yang dikatalisis oleh Amberlyst 15 telah dilakukan oleh Pradhan dkk. [21]. Hasil biodiesel yang tinggi (kandungan FAME 97,13%) diperoleh hanya dalam 0,5 jam pada rasio molar metanol 8:1 dengan konsentrasi katalis 6% berat, pada kecepatan 800 rpm).

E. Metode Induksi Elektromagnetik

Umumnya biodiesel diproses dengan sistem termal atau pemanas. Pengolahan biodiesel dengan sistem pemanas konvensional adalah metode yang paling banyak digunakan. Proses pembuatan biodiesel konvensional menggunakan pemanasan daya tinggi dan pengadukan magnetik. Kurniati et.al membandingkan tiga jenis proses pemanasan (metode konvensional, Mikrowave, infrared dan Induksi Elektromagnetik) dalam proses pembuatan biodiesel dari nyamplung (*Calophyllum Inophyllum*). Metode induksi

elektromagnetik menawarkan cara yang cepat dan mudah untuk memproduksi biodiesel dengan meningkatkan laju reaksi dan meningkatkan proses pemisahan dibandingkan dengan metode lainnya. Metode ini berpotensi meningkatkan produksi biodiesel secara signifikan untuk mengurangi waktu dan biaya produksi.

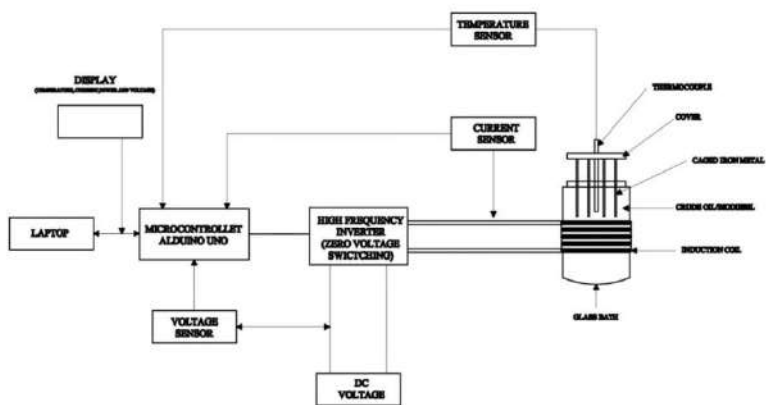
Pemanasan induksi adalah proses pemanasan benda yang dilakukan secara elektrik (biasanya logam) dengan induksi elektromagnetik, di mana arus eddy diproduksi di logam dan resistansi menyebabkan pemanasan logam.



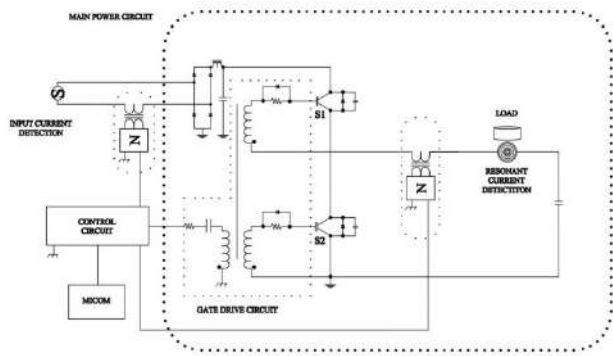
Gambar 4.5 Induksi dasar: (a) rangkaian ekivalen transformator; (b) trafo sekunder sirkuit hubung singkat ; (c) konsep pemanasan induksi.

Teori dasar induksi elektromagnetik, bagaimanapun, mirip dengan Transformator (Trafo). Trafo bekerja karena fenomena induksi elektromagnetik, ketika ada arus mengalir dalam rangkaian tertutup, maka akan menghasilkan berbagai medan elektromagnetik. Seperti halnya transformator, medan elektromagnetik (dalam kumparan primer) yang mempengaruhi kumparan sekunder dan kumparan sekunder menghasilkan radiasi induksi dan arus AC mengalir (jika kumparan sekunder adalah rangkaian tertutup). Pemanas induksi (IH) terdiri dari tiga elemen utama induksi elektromagnetik, efek kulit, dan

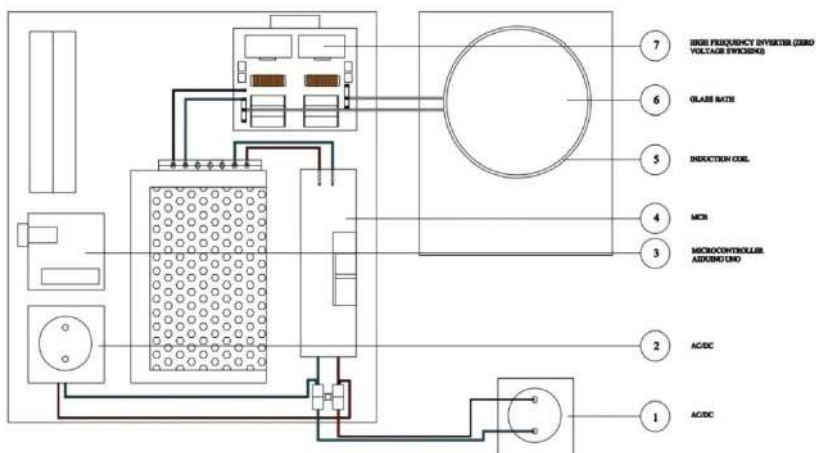
perpindahan panas. Gambar (4.7) menampilkan prinsip dasar pemanasan induksi, mengandung kumparan dan arus pemanas induktif dan menggambarkan induksi elektromagnetik dan efek permukaan.



Gambar 4.6 Proses Pembuatan Biodiesel Dengan Elektromagnetik [22]



Gambar 4.7 Wiring Diagram Proses Pemanasan Minyak Mentah [22]

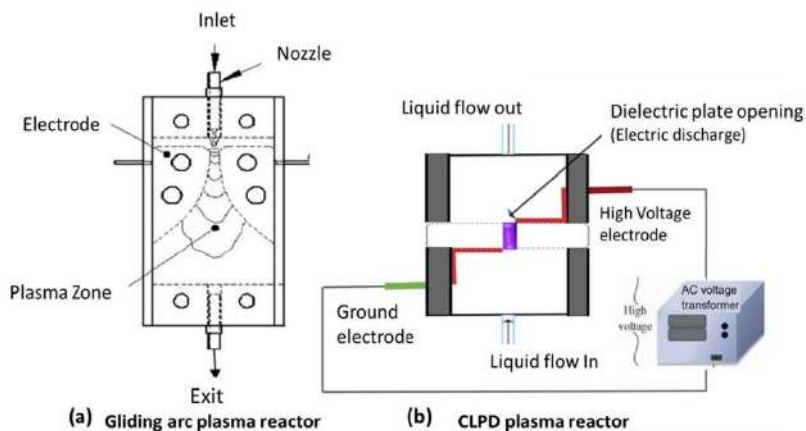


Gambar 4.8 Alur Proses Elektromagnetik [22]

F. Metode Pelepasan Plasma (Plasma Discharge)

Proses transesterifikasi konvensional mahal, memakan waktu, dan tidak efisien. Banyak peneliti telah melakukan banyak penelitian tentang metode intensifikasi baru untuk meningkatkan hasil produksi biodiesel. Banyak peneliti menganggap medan listrik kuat sebagai proses dekomposisi molekul tingkat lanjut dalam beberapa tahun terakhir. Pada bagian ini memberikan gambaran tentang berbagai reaktor plasma termal dan non-termal yang dilaporkan dalam proses transesterifikasi [1]. Dalam sintesis biodiesel, plasma merupakan salah satu teknologi terkini yang beroperasi tanpa atau dengan adanya katalis. Dalam metode ini, elektron energik bertindak sebagai elektrokatalis. Elektron yang energik bertabrakan dengan molekul dan atom membentuk elektron sekunder, foton, ion, dan radikal. Catu daya bertegangan tinggi memasok elektron energik; tumbukan antara elektron bebas dan atom reaktan memutus ikatan molekul [23]. Teknologi ini memiliki keunggulan dibandingkan metode sebelumnya, misalnya suhu reaksi rendah akibat aktivasi molekul reaktan oleh elektron berenergi tinggi; prosesnya tidak terpengaruh oleh

pengotor, selama proses berlangsung, senyawa sulfur dalam reaktan diubah menjadi fasa padat, sehingga dapat dihilangkan [24], tidak terbentuk gliserin dan saponifikasi karena waktu reaksi lebih singkat, mudah pemisahan dan meningkatkan efisiensi produksi [25].



Gambar 4.9 Berbagai Jenis Reaktor Produksi Biodiesel Berbasis Plasma [2]

Berbagai jenis proses plasma telah digunakan dalam perengkahan minyak di industri bahan bakar; namun, konversi kimia minyak dengan bantuan katalitik atau katalis belum dipelajari secara rinci. Dalam sebagian besar penelitian, plasma terutama digunakan sebagai katalis untuk mencapai reaksi spesifik dari katalisis hidrokarbon rantai panjang [26]. Dengan dikembangkannya reaktor plasma non-termal yang efisien dan teknologi, perengkahan katalitik minyak juga semakin menarik perhatian. Para peneliti telah mengusulkan berbagai jenis reaktor untuk perengkahan plasma tingkat lanjut, termasuk reaktor plasma non-katalitik dan reaktor plasma katalitik hybrid (gambar 4.9). Dalam reaktor plasma non-katalitik, tidak ada katalis eksternal heterogen atau homogen yang digunakan untuk katalisis minyak dan hidrokarbon. Proses perengkahan terutama dicapai melalui elektron berenergi tinggi dan spesies ionisasi

yang dihasilkan oleh elektron dalam larutan. Reaktor busur lurus dan busur lurus berputar telah berhasil diuji perengkahan minyak dalam reaktor plasma non-katalitik [27].

Plasma non-termal menginduksi reaksi melalui tiga pemain utama, elektron, ion, dan radikal. Karena produksi zat-zat ini bergantung pada medan listrik yang diterapkan, keseluruhan reaksi sebagian besar bergantung pada medan listrik yang dihasilkan dengan mengendalikan tegangan, tekanan gas, dan masukan daya. Namun, dalam reaktor hibrid, plasma diisi dengan katalis untuk mencapai reaksi kimia yang diperlukan dengan biaya rendah dan konsumsi energi rendah. Kehadiran katalis berkontribusi menurunkan energi yang dibutuhkan untuk mencapai aktivitas reaksi kimia, yang membantu mencapai reaksi kimia tinggi dengan energi masukan rendah dengan efek sinergis plasma dan katalis. Dalam sistem hibrid, reaksi dimulai dengan reaksi permukaan, dan energi aktivasi dapat dikontrol oleh katalis masukan, yang membantu mendistribusikan elektron untuk meningkatkan proses eksitasi plasma guna menghasilkan spesies yang lebih reaktif yang bertahan dalam mode aktif untuk waktu yang lebih lama dengan aktivitas katalis. Interaksi antara elektron ini dan spesies reaktif yang dihasilkan serta katalis membentuk fenomena reaksi yang sangat kompleks, sehingga sangat sulit untuk memahami atau mengembangkan jalur reaksi dalam reaksi kimia tersebut. Meskipun demikian, efek sistem hibrid dan analisis produk sampingan konduktif untuk lebih memahami reaksi plasma hibrid yang dibantu katalis [28].

Katalis mempunyai peranan yang sangat penting dalam reaktor plasma hibrid untuk mencapai efisiensi reaksi yang tinggi. Katalis membantu menjaga reaksi ke arah depan dengan mengendalikan mekanisme reaksi ketika spesies yang sangat aktif menghasilkan ikatan kimia yang cukup dan melepaskan energi yang diperlukan untuk aktivasi reaksi [29]. Katalis

membantu meningkatkan selektivitas reaksi dan mengurangi waktu yang dibutuhkan, yang merupakan faktor penting dalam mencapai kinerja tinggi reaktor plasma [30].

G. Transesterifikasi Superkritis

Transesterifikasi *superkritis* (*Supercritical transesterification/ SCT*) adalah teknik alternatif yang menjanjikan dibandingkan proses konvensional untuk menghasilkan biodiesel. SCT menawarkan proses bebas katalis dengan waktu reaksi lebih cepat, memungkinkan transesterifikasi trigliserida langsung dan esterifikasi FFA dengan produk akhir dengan kemurnian lebih tinggi. Selain itu, reaksi bebas katalis ini memberikan peningkatan kelarutan fasa dan keterbatasan perpindahan massa yang rendah [31].

Dalam proses SCT, bahan baku dan alkohol dimasukkan ke dalam reaktor di mana bahan tersebut diberi suhu dan tekanan melebihi titik kritis alkohol (misalnya, metanol: $T_c = 240\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $P_c = 1140\text{ psi}$). Dalam kondisi ini, sifat termofisika alkohol berubah seperti difusivitas, densitas, viskositas, dan polaritas. Pada suhu dan tekanan tinggi, fluida (alkohol) memasuki daerah superkritis, di mana fluida tersebut mempunyai sifat seperti gas dan cair serta menunjukkan fluida yang tidak dapat terkondensasi dengan kepadatan antara gas dan wujud cair. Selain itu, fluida mengalami penurunan viskositas dan peningkatan difusivitas massa, sehingga memungkinkan karakteristik perpindahan massa yang lebih besar. Konstanta dielektrik menurun dalam keadaan ini, mengurangi polaritas pelarut dan mengubahnya menjadi pelarut non-polar, yang lebih baik dilarutkan dalam alkohol dalam kondisi superkritis untuk membentuk fase homogen. Parameter utama yang mempengaruhi transesterifikasi superkritis adalah suhu, tekanan, rasio molar pelarut terhadap minyak, dan waktu reaksi [2].

Produksi biodiesel superkritis pertama kali dilaporkan oleh Lee dan Saka [32] dan mereka menyimpulkan bahwa dekomposisi termal FAME mungkin terjadi karena suhu yang digunakan tinggi, sehingga menghasilkan biodiesel berkualitas rendah. Dalam penelitian selanjutnya yang dilaporkan oleh Kusdiana dan Saka [33], diusulkan mekanisme reaksi antara trigliserida dan metanol dalam kondisi superkritis. Pada suhu dan tekanan tinggi pada proses superkritis, metanol dapat menjadi monomer bebas karena berkurangnya ikatan hidrogen. Molekul metanol kemudian secara langsung menyerang atom karbonil trigliserida, menghasilkan transfer metoksida, yang menghasilkan biodiesel (metil ester) dan digliserida. Demikian pula, digliserida ditransesterifikasi menjadi biodiesel dan monogliserida, yang selanjutnya diubah menjadi biodiesel dan gliserol. Yin dkk. [34] melaporkan produksi biodiesel dari minyak kedelai menggunakan metanol superkritis dalam bejana bertekanan tinggi 250 cm³. Tingkat konversi adalah 95% dalam 10 menit pada suhu tinggi 350 °C, sedangkan pada 260 °C, hanya ada 30% konversi setelah 60 menit. Han dkk. [35] mendeteksi konversi ester lengkap pada suhu reaksi yang diturunkan sebesar 280 °C menggunakan CO₂ sebagai pelarut bersama pada rasio 0,1 M. Santana dkk. [36] mencapai produksi biodiesel berkelanjutan dari minyak nabati menggunakan etanol superkritis dengan CO₂ sebagai pelarut. Mereka menggunakan minyak berbahan dasar bunga matahari dalam etanolisis superkritis dalam mode kontinu, reaktor titanium unggun tetap, dan hasilnya adalah 80% dalam waktu reaksi 4 menit pada 200 °C dan 200 bar dengan rasio molar etanol terhadap minyak sebesar 25.

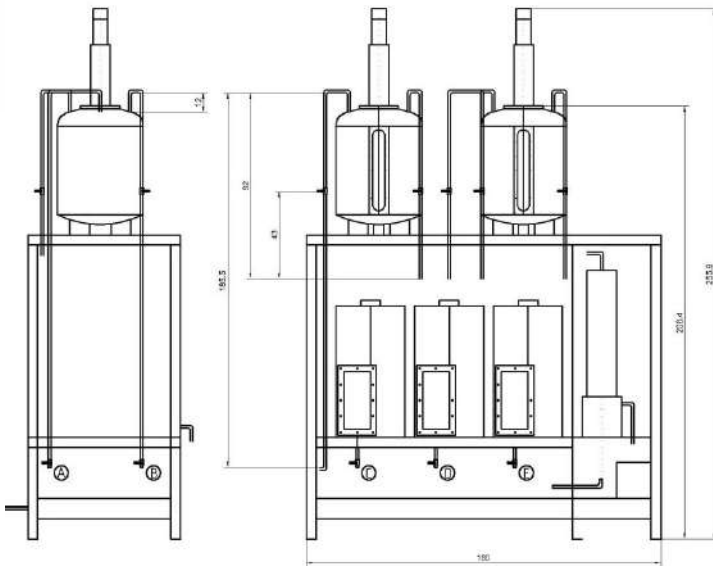
Dalam penelitian lain yang dilaporkan oleh Demirbas [37], transesterifikasi minyak jelantah dengan metanol superkritis dalam reaktor autoklaf 100 mL mencapai hasil 99% dalam waktu

30 menit pada suhu 266 °C dan rasio molar metanol terhadap minyak (M:O) dari 41:1. Tsai dkk. [38] melaporkan bahwa minyak jelantah menunjukkan efisiensi yang lebih baik dibandingkan minyak goreng olahan dalam transesterifikasi metanol superkritis. Hasil biodiesel adalah 65% dalam 4 menit pada 300 °C dan 100 bar. Sebuah studi terbaru oleh Aboelazayem dkk. [39] menyelidiki dan mengoptimalkan produksi biodiesel dengan metanol superkritis tanpa katalis menggunakan metodologi permukaan respons. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rendemen biodiesel optimum adalah 91% pada waktu 14,8 menit pada suhu 253,5 °C dan 198,5 bar pada rasio molar 37:1 M:O. Data kinetik digunakan untuk mensimulasikan reaktor di Aspen HYSYS menunjukkan kesalahan relatif 0,2% dari hasil eksperimen. Selain itu, lemak hewani dan mikroalga juga digunakan sebagai bahan baku berkelanjutan untuk transesterifikasi superkritis.

Meskipun SCT memiliki banyak keuntungan dalam produksi biodiesel, seperti tidak adanya perlakuan awal, penyabunan, dan penghilangan katalis, keterbatasan utamanya terletak pada tingginya biaya pengoperasian karena diperlukan suhu dan tekanan ekstrem [40]. Meskipun demikian, banyak simulasi, penilaian lingkungan, dan studi ekonomi menunjukkan bahwa teknologi superkritis memiliki investasi modal, manfaat teknis, dan efisiensi produksi biodiesel yang tinggi dengan waktu reaksi yang lebih cepat dibandingkan teknologi konvensional lainnya [41]. Mengingat tingkat produksi biodiesel dan biaya bahan baku lainnya yang lebih tinggi, teknologi ini mungkin hemat biaya pada tingkat komersial. Selain itu, efisiensi pengoperasian dapat lebih ditingkatkan dengan mengikuti langkah-langkah penghematan energi seperti penggunaan teknologi pemulihan panas mandiri.

H. Mini Plant Produksi Biodiesel

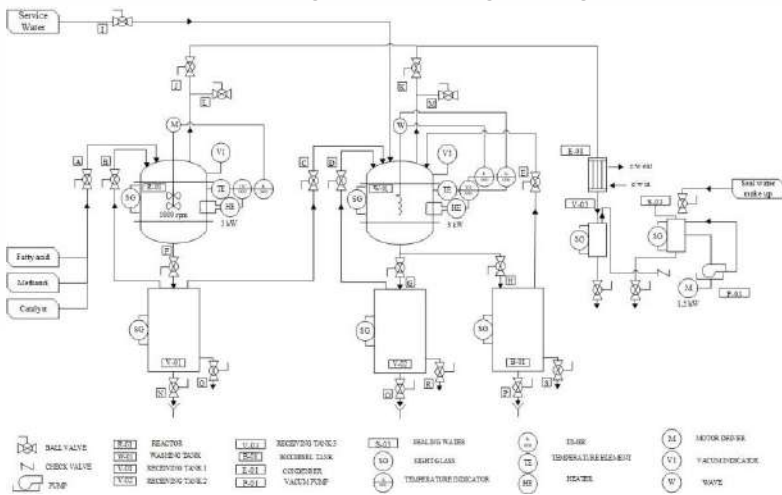
Diagram skematik dan foto *pilot plant* yang digunakan untuk produksi biodiesel ditunjukkan pada Gambar (4.10), Gambar (4.11), masing-masing. Pabrik percontohan terdiri dari dua reaktor baja tahan karat, masing-masing berkapasitas 50 L, dan tiga tangki baja tahan karat. Setiap reaktor berjaket mempunyai kegunaannya masing-masing, dimana satu digunakan untuk pencampuran dan satu lagi digunakan untuk pencucian. Setiap tangki stainless steel yang terletak di bagian bawah *pilot plant* juga memiliki fungsi pengendapan, filtrasi atau pemurnian tersendiri.



Gambar 4.10 *Setup Pilot Plant Proses Ester/Transesterifikasi Biodiesel* [42]

Proses produksi biodiesel dijelaskan secara singkat sebagai berikut. Pertama, campuran yang mengandung minyak mentah, metanol dan katalis basa diaduk dalam reaktor pertama yang dipanaskan terlebih dahulu pada suhu 65°C selama 3 jam. Setelah itu, campuran dipindahkan ke reaktor kedua untuk mencuci metil ester. Langkah ini penting untuk menghilangkan sisa metanol,

katalis, air dan pengotor lainnya dari metil ester. Temperatur diatur pada 28 °C dan jumlah air dijaga tetap untuk 50 vol% minyak. Metil ester kemudian dipindahkan ke tangki reaksi utama dan dipanaskan dalam kondisi vakum selama 30 menit untuk menghilangkan sisa air dan kelebihan metanol. Terakhir, metil ester dibiarkan mengendap di tangki pengendapan.



Gambar 4.11 Skema Peralatan Proses Ester/Transesifikasi Biodiesel [42]

Daftar Pustaka

[1] M. Asghari, B. H. Samani, and R. Ebrahimi, "Review on non-thermal plasma technology for biodiesel production: Mechanisms, reactors configuration, hybrid reactors," *Energy Conversion and Management*, vol. 258, p. 115514, 2022.

[2] M. A. Bashir, S. Wu, J. Zhu, A. Krosuri, M. U. Khan, and R. J. N. Aka, "Recent development of advanced processing technologies for biodiesel production: A critical review," *Fuel Processing Technology*, vol. 227, p. 107120, 2022.

[3] J. Milano *et al.*, "Optimization of biodiesel production by microwave irradiation-assisted transesterification for waste cooking oil-*Calophyllum inophyllum* oil via response

- surface methodology," *Energy conversion and management*, vol. 158, pp. 400-415, 2018.
- [4] J. Asomaning, S. Haupt, M. Chae, and D. C. Bressler, "Recent developments in microwave-assisted thermal conversion of biomass for fuels and chemicals," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92, pp. 642-657, 2018.
 - [5] S. C. Iweka, O. A. Falowo, A. A. Amosun, and E. Betiku, "Optimization of microwave-assisted biodiesel production from watermelon seeds oil using thermally modified kwale anthill mud as base catalyst," *Heliyon*, vol. 9, no. 7, 2023.
 - [6] P. Kodgire, A. Sharma, and S. S. Kachhwaha, "Optimization and kinetics of biodiesel production of *Ricinus communis* oil and used cottonseed cooking oil employing synchronised 'ultrasound+ microwave' and heterogeneous CaO catalyst," *Renewable Energy*, vol. 212, pp. 320-332, 2023.
 - [7] J. Yang *et al.*, "Microwave-assisted one-step production of biodiesel from waste cooking oil by magnetic bifunctional SrO-ZnO/MOF catalyst," *Journal of Cleaner Production*, vol. 395, p. 136182, 2023.
 - [8] M. Athar *et al.*, "Biodiesel production by single-step acid-catalysed transesterification of *Jatropha* oil under microwave heating with modelling and optimisation using response surface methodology," *Fuel*, vol. 322, p. 124205, 2022.
 - [9] K. Rokni, M. Mostafaei, M. D. Soufi, and D. Kahrizi, "Microwave-assisted intensification of transesterification reaction for biodiesel production from camelina oil: Optimization by Box-Behnken Design," *Bioresource Technology Reports*, vol. 17, p. 100928, 2022.
 - [10] F. S. Kusumo, A. S. Ong, H. C. Masjuki, H. H. and Mahlia, T. M. I. , "A comparative study of ultrasound and infrared transesterification of *Sterculia foetida* oil for biodiesel

- production," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff*, vol. 39, pp. 1339–1346, 2017, doi: 10.1080/15567036.2017.1328003.
- [11] B. Salamatinia, A. Z. Abdullah, and S. Bhatia, "Quality evaluation of biodiesel produced through ultrasound-assisted heterogeneous catalytic system," *Fuel Processing Technology*, vol. 97, pp. 1-8, 2012.
 - [12] B. Sajjadi, A. A. Aziz, and S. Ibrahim, "Mechanistic analysis of cavitation assisted transesterification on biodiesel characteristics," *Ultrasonics sonochemistry*, vol. 22, pp. 463-473, 2015.
 - [13] J. Luo, Z. Fang, and R. L. Smith Jr, "Ultrasound-enhanced conversion of biomass to biofuels," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 41, pp. 56-93, 2014.
 - [14] A. R. Gupta, S. V. Yadav, and V. K. Rathod, "Enhancement in biodiesel production using waste cooking oil and calcium diglyceroxide as a heterogeneous catalyst in presence of ultrasound," *Fuel*, vol. 158, pp. 800-806, 2015.
 - [15] J. Liu, Z. Zhang, S. Tang, Z. Yu, Y. Zhang, and B. Zheng, "Ultrasound-assisted production of biodiesel from field pennycress (*Thlaspi arvense* L.) seeds: Process optimization and quality evaluation," *Industrial Crops and Products*, vol. 203, p. 117224, 2023.
 - [16] A. H. Sebayang *et al.*, "Optimization of ultrasound-assisted oil extraction from *Carica candamarcensis*; A potential Oleaginous tropical seed oil for biodiesel production," *Renewable Energy*, vol. 211, pp. 434-444, 2023.
 - [17] M. Balajii and S. Niju, "Ultrasound-assisted biodiesel production from *Ceiba pentandra* oil using *Musa* spp Nendran banana peduncle derived heterogeneous catalyst," *Bioresource Technology Reports*, vol. 21, p. 101310, 2023.

- [18] A. Silitonga *et al.*, "Intensification of Reutealis trisperma biodiesel production using infrared radiation: Simulation, optimisation and validation," *Renewable Energy*, vol. 133, pp. 520-527, 2019.
- [19] A. Sebayang *et al.*, "Optimization of biodiesel production from rice bran oil by ultrasound and infrared radiation using ANN-GWO," *Fuel*, vol. 346, p. 128404, 2023.
- [20] R. a. S. Chakraborty, H. , "Intensification of biodiesel production from waste goat tallow using infrared radiation: Process evaluation through response surface methodology and artificial neural network," *Appl. Energy*, vol. 114, pp. 827-836, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.04.025.
- [21] P. Pradhan, S. Chakraborty, and R. Chakraborty, "Optimization of infrared radiated fast and energy-efficient biodiesel production from waste mustard oil catalyzed by Amberlyst 15: Engine performance and emission quality assessments," *Fuel*, vol. 173, pp. 60-68, 2016.
- [22] S. Kurniati, S. Soeparman, S. S. Yuwono, L. Hakim, and S. Syam, "A novel process for production of calophyllum inophyllum biodiesel with electromagnetic induction," *Energies*, vol. 12, no. 3, p. 383, 2019.
- [23] I. Istadi, A. D. Yudhistira, D. D. Anggoro, and L. Buchori, "Electro-catalysis system for biodiesel synthesis from palm oil over dielectric-barrier discharge plasma reactor," *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, vol. 9, no. 2, p. 111, 2014.
- [24] A. Jahanmiri, M. Rahimpour, M. M. Shirazi, N. Hooshmand, and H. Taghvaei, "Naphtha cracking through a pulsed DBD plasma reactor: Effect of applied voltage, pulse repetition frequency and electrode material," *Chemical Engineering Journal*, vol. 191, pp. 416-425, 2012.

- [25] L. Buchori, I. Istadi, and P. Purwanto, "Advanced chemical reactor technologies for biodiesel production from vegetable oils-a review," *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, vol. 11, no. 3, pp. 406-430, 2016.
- [26] C. M. Du, J. H. Yan, and B. Cheron, "Decomposition of toluene in a gliding arc discharge plasma reactor," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 16, no. 4, p. 791, 2007.
- [27] F. Zhu *et al.*, "Destruction of toluene by rotating gliding arc discharge," *Fuel*, vol. 176, pp. 78-85, 2016.
- [28] E. C. Neyts, K. Ostrikov, M. K. Sunkara, and A. Bogaerts, "Plasma catalysis: synergistic effects at the nanoscale," *Chemical reviews*, vol. 115, no. 24, pp. 13408-13446, 2015.
- [29] I. Istadi *et al.*, "Effects of ion exchange process on catalyst activity and plasma-assisted reactor toward cracking of palm oil into biofuels," *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, vol. 14, no. 2, pp. 459-467, 2019.
- [30] R. Aerts, W. Somers, and A. Bogaerts, "Carbon dioxide splitting in a dielectric barrier discharge plasma: a combined experimental and computational study," *ChemSusChem*, vol. 8, no. 4, pp. 702-716, 2015.
- [31] O. Farobie and Y. Matsumura, "State of the art of biodiesel production under supercritical conditions," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 63, pp. 173-203, 2017.
- [32] J.-S. Lee and S. Saka, "Biodiesel production by heterogeneous catalysts and supercritical technologies," *Bioresource technology*, vol. 101, no. 19, pp. 7191-7200, 2010.
- [33] D. Kusdiana and S. Saka, "Effects of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment," *Bioresource technology*, vol. 91, no. 3, pp. 289-295, 2004.
- [34] J.-Z. Yin, M. Xiao, and J.-B. Song, "Biodiesel from soybean oil in supercritical methanol with co-solvent," *Energy conversion and management*, vol. 49, no. 5, pp. 908-912, 2008.

- [35] W. Cao, H. Han, and J. Zhang, "Preparation of biodiesel from soybean oil using supercritical methanol and co-solvent," *Fuel*, vol. 84, no. 4, pp. 347-351, 2005.
- [36] A. Santana, J. Maçaira, and M. A. Larrayoz, "Continuous production of biodiesel from vegetable oil using supercritical ethanol/carbon dioxide mixtures," *Fuel processing technology*, vol. 96, pp. 214-219, 2012.
- [37] A. Demirbas, "Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification," *Energy conversion and management*, vol. 50, no. 4, pp. 923-927, 2009.
- [38] Y.-T. Tsai, H.-m. Lin, and M.-J. Lee, "Biodiesel production with continuous supercritical process: non-catalytic transesterification and esterification with or without carbon dioxide," *Bioresource technology*, vol. 145, pp. 362-369, 2013.
- [39] O. Aboelazayem, M. Gadalla, and B. Saha, "Biodiesel production from waste cooking oil via supercritical methanol: Optimisation and reactor simulation," *Renewable Energy*, vol. 124, pp. 144-154, 2018.
- [40] P. Andreo-Martínez, V. M. Ortiz-Martínez, N. García-Martínez, A. P. de los Ríos, F. J. Hernández-Fernández, and J. Quesada-Medina, "Production of biodiesel under supercritical conditions: State of the art and bibliometric analysis," *Applied Energy*, vol. 264, p. 114753, 2020.
- [41] F. J. G. Ortiz, "Techno-economic assessment of supercritical processes for biofuel production," *The Journal of Supercritical Fluids*, vol. 160, p. 104788, 2020.
- [42] A. Silitonga, H. Masjuki, H. C. Ong, F. Kusumo, T. Mahlia, and A. Bahar, "Pilot-scale production and the physicochemical properties of palm and Calophyllum inophyllum biodiesels and their blends," *Journal of Cleaner Production*, vol. 126, pp. 654-666, 2016.

BAB V

Produksi Biodiesel

Ada berbagai proses untuk menghasilkan biodiesel, antara lain proses mikroemulsi, pirolisis, dan transesterifikasi. Semua proses ini mempunyai kelebihan dan kekurangan. Misalnya, biodiesel yang disintesis melalui prosedur mikroemulsi memiliki angka setana (CN) yang tepat. Selain itu, mikroemulsi merupakan metode yang sederhana dan ramah lingkungan sehingga menghasilkan lebih sedikit polutan. Namun cara ini dilakukan pada suhu tinggi dan membutuhkan peralatan yang mahal serta biodiesel memiliki kemurnian yang rendah. Selain itu, biodiesel yang dihasilkan dengan metode pirolisis (perengkahan termal) mempunyai beberapa kelemahan seperti volatilitas yang rendah, viskositas yang tinggi, dan CN yang rendah. Di antara semua metode, metode transesterifikasi merupakan metode yang efektif dan dapat diandalkan untuk menghasilkan biodiesel, karena metode ini memerlukan tekanan rendah, suhu rendah, dan waktu proses lebih sedikit. Selain itu, efisiensi biodiesel dalam proses transesterifikasi tinggi dan prosesnya sederhana. Reaksi trans-esterifikasi terjadi antara minyak dan alkohol menggunakan katalis yang sesuai untuk menghasilkan biodiesel [1].

Proses transesterifikasi umumnya digunakan untuk produksi biodiesel. Katalis heterogen mempunyai keuntungan dalam proses ini karena mudah dipisahkan dari produk sehingga dapat digunakan kembali. [2]. Saat ini, produksi bahan bakar skala besar sebagian besar menggunakan katalis homogen, terutama NaOH, KOH, NaOCH₃, dan KOCH₃. Katalis ini memberikan, dalam kondisi pengoperasian ringan, laju reaksi dan produktivitas yang tinggi. Namun, katalis ini bersifat korosif, berbahaya bagi lingkungan, memerlukan konsumsi air dan energi

yang tinggi dalam tahap pencucian dan pemurnian produk mengingat sulitnya memisahkan dan memulihkannya dan, terkait dengan katalis alkali, rentan terhadap saponifikasi dengan adanya air [3]. Pada bab ini akan dibahas secara detail proses transesterifikasi dalam sintesis minyak non pangan menjadi biodiesel dengan menggunakan katalis homogeny dan heterogen dari berbagai jenis. Pada bagian ini juga akan dibahas pengaruh rasio molar, kecepatan alkali, konsentrasi katalis, waktu serta suhu pada proses transesterifikasi terhadap rendemen biodiesel.

A. Proses Perlakuan Awal (Pre- Treatment)

Proses perlakuan awal selalu dilakukan sebelum proses esterifikasi untuk tujuan mengurangi kadar air, menghilangkan kotoran dan kadar asam. Proses perlakuan awal ini dilakukan dengan memanaskan minyak (*crude oil*) hingga temperatur diatas 100 °C dan divakum agar kandungan air didalam minyak dikurangi seminimal mungkin. Proses penyaringan juga dilakukan untuk menghilangkan partikel-partikel kecil yang terikut didalam minyak. Lebih lanjut, proses degumming dilakukan pada minyak nabati untuk menghilangkan getah dan menurunkan kadar asam yang terlalu tinggi.

Pada minyak goreng sisa, proses penggorengan makanan, minyak goreng terus menerus atau berulang kali dipanaskan antara 160 °C hingga 200 °C. Minyak mengalami kerusakan yang disebabkan perubahan signifikan dalam sifat kimia dan fisik minyak. Degradasi utama Reaksi yang terjadi pada kondisi operasi standar adalah (i) hidrolisis, (ii) oksidasi, dan (iii) polimerisasi. Kualitas dari WCO biasanya ditentukan oleh nilai asam [4]. Minyak Goreng Bekas bernilai asam tinggi (27 mg KOH/g minyak) pertama kali diesterifikasi dengan metanol menggunakan asam sulfat sebagai katalis dalam dua tahap untuk menghasilkan nilai asam ke nilai yang diinginkan. Minyak

Goreng Bekas juga dipanaskan hingga 110 °C selama 1 jam untuk menghilangkan jejak air [5]. Petchsoongsakul et.al [6] melaporkan air yang ada dalam WCO dapat menghidrolisis trigliserida, menghasilkan kandungan FFA yang tinggi yang dapat bereaksi dengan katalis alkali membentuk sabun (saponifikasi).

B. Pengaruh Kandungan Air Terhadap Biaya Produksi

Biaya produksi biodiesel cukup tinggi jika bahan bakunya berasal dari sumber pangan (seperti lemak hewani dan minyak nabati) [7]. Kadar asam lemak Bebas dalam Minyak Goreng Bekas biasanya >2 % berat dan diperlukan perlakuan awal untuk menghilangkan asam lemak dan air. Kebutuhan untuk proses *pretreatment* membuat proses menjadi kompleks dan meningkat biaya proses produksi biodiesel [8]. Umumnya, sejumlah air dalam sistem memiliki pengaruh yang signifikan terhadap reaksi enzimatik) [9] . pada bahan baku biodiesel dari minyak goreng bekas, asam lemak bebas dan terpolimerisasi trigliserida terbentuk dalam minyak sayur selama penggorengan dapat berpengaruh negatif baik reaksi transesterifikasi dan sifat fisik biodiesel [10]. Peningkatan kadar garam dan air, waktu pemasakan dan suhu menyebabkan penurunan mutu sifat fisik seperti viskositas kinematik, densitas, Cloud Point, Pour Point dan nilai kalor, serta kandungan total polar material dan sifat aliran dingin sampel biodiesel B100 dari limbah Minyak Goreng Bekas bunga matahari, jagung dan minyak kanola [10].

Petchsoongsakul et.al [6] membandingkan tiga metode alternatif untuk menangani kadar air dalam bahan baku WCO menggunakan hibridisasi esterifikasi dan transesterifikasi sebelumnya dalam kolom distilasi reaktif tunggal (RD hibridisasi). Mereka menyimpulkan bahwa menggunakan dua penukar panas yang dikombinasikan dengan RD hibridisasi adalah metode sederhana untuk menghilangkan air dari WCO.

Namun, ini membutuhkan energi dan biaya produksi biodiesel sebesar 1,63 USD/kg biodiesel.

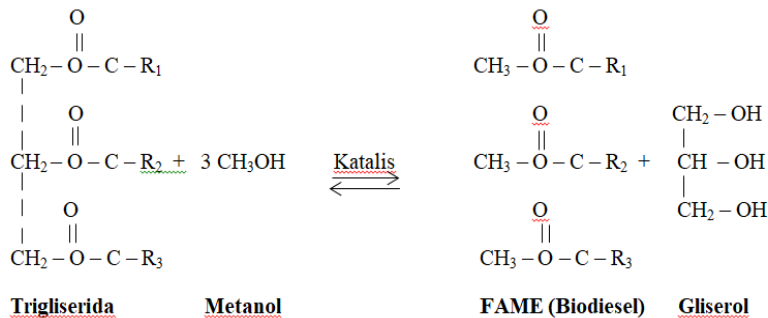
Dibandingkan dengan penggunaan enzim (Novozym 435 yang tidak dapat bergerak, \$ 2.273 / kg), enzim cair (lipase bebas *Candida antarctica* lipase-B, \$ 140 / kg) lebih murah dan memiliki daya larut yang lebih baik dengan reaktan cair, yang dapat mengurangi batasan perpindahan massa. dan mengatasi adsorpsi gliserol pada enzim yang diimobilisasi [9]. Secara keseluruhan biaya produksi biodiesel berbasis WCO di Pakistan adalah 0,66 USD L⁻¹ [11]. Biaya yang dibutuhkan untuk memproduksi biodiesel WCO dan yield. Diperoleh biaya yang paling murah dengan angka yield yang paling optimum yaitu dengan katalis NaOH dibanding dengan katalis CaO [12].

Jumlah kandungan air pada proses konversi trigliserida dari WCO menjadi biodiesel, untuk mendapatkan yield biodiesel maksimum kandungan air adalah 5% [13], produksi akan menurun seiring meningkatnya kandungan air pada minyak WCO [14]. Total kebutuhan energi dari proses yang dilakukan adalah sebesar 378,7 kW h per ton biodiesel, sekitar 71% lebih rendah dari proses produksi biodiesel konvensional [8].

C. Esterification/ Transesterification

Produksi biodiesel bisa dilakukan melalui proses transesterifikasi (juga disebut alkoholisis). Katalis yang digunakan sangat menentukan laju reaksi dan hasil. Jumlah alkohol yang berlebihan digunakan karena reaksinya cenderung *reversible* [15]. Beberapa metode seperti transesterifikasi dengan katalis basa, transesterifikasi katalis asam, katalis enzim, superkritis super transesterifikasi dan pirolisis, telah digunakan untuk memproduksi biodiesel dari limbah minyak nabati [16]. Produksi biodiesel skala industri biasanya menggunakan katalis alkali (katalis homogen dan heterogen) pada proses

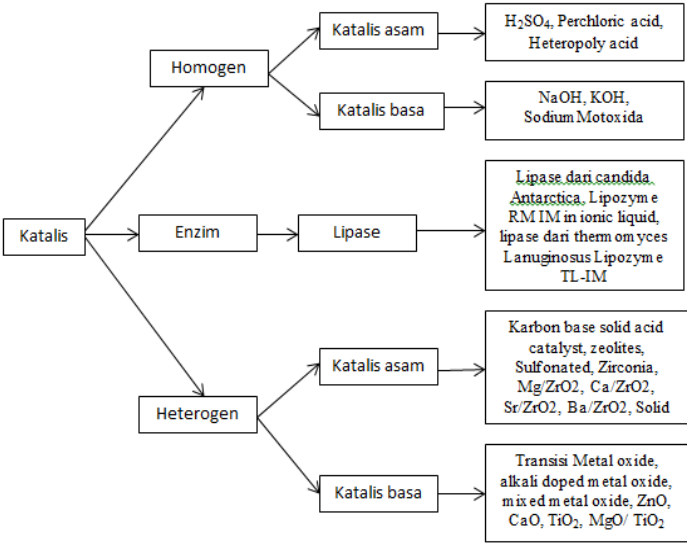
transesterifikasi. Proses ini menawarkan keuntungan seperti suhu reaksi yang lebih rendah, waktu reaksi yang singkat, dan konversi yang lebih tinggi [6]. Hasil biodiesel sangat bergantung pada jumlah asam lemak tak jenuh yang ada dalam minyak sedangkan sifat-sifatnya seperti titik awan, bilangan cetane dan lain-lain, dipengaruhi oleh jumlah asam lemak jenuh yang ada dalam minyak. Titik nyala biodiesel juga bergantung pada panjang rantai karbon dalam asam lemak [17]. Shiao et.al [18] menurunkan kadar asam lemak bebas pada Minyak Goreng Bekas dengan cara mencampur minyak bernilai tinggi dan rendah pada rasio sebesar 4:6 menggunakan homogenizer kecepatan tinggi. Secara khusus, konversi dengan homogenizer 10 kali lebih tinggi dibandingkan dengan pemanasan konvensional pada waktu reaksi yang sama. Skema reaksi transesterifikasi menggunakan methanol seperti ditunjukkan gambar (5.1).



Gambar 5.1 Skema Reaksi Transesterifikasi Menggunakan Metanol

Selama produksi biodiesel, katalis yang berbeda, seperti katalis asam, katalis alkali dan enzim sering digunakan. Untuk WCO, kandungan air (0,05–7%) dan FFA (0,5–15%) lebih tinggi dibandingkan dengan minyak nabati olahan, seperti minyak sawit rafinasi (masing-masing <0,05% dan <0,1%), yang secara signifikan mempengaruhi aktivitas katalis tersebut [9]. Metanol adalah alkohol yang paling sering digunakan karena biaya

rendah dan keunggulan fisik dan kimia. Secara stoikiometri, untuk menyelesaikan transesterifikasi, rasio 3:1 :1 alkohol menjadi trigliserida diperlukan. Dalam prakteknya, rasio perlu lebih tinggi untuk mendorong kesetimbangan ke hasil ester maksimum [19]. Esterifikasi dengan putaran tinggi dan pencampuran dengan *homogenizer* lebih efisien daripada penggunaan pengadukan konvensional. Dalam proses industrialisasi, tidak hanya menghemat waktu dan tenaga tetapi juga murah [18]. Adapun beberapa jenis katalis homogen, heterogen dan enzim yang digunakan dalam proses pembuatan biodiesel seperti ditunjukkan pada gambar (5.2).



Gambar 5.2 Jenis-Jenis Katalis Dalam Pembuatan Biodiesel

D. Katalis Homogen Pada Proses Transesterification

Biodiesel dapat diperoleh melalui berbagai proses, transesterifikasi menjadi metode yang paling banyak digunakan karena kesederhanaan teknis dan efisiensinya [20]. Abubakar et.al

[21] berpendapat bahwa produksi biodiesel dari limbah minyak nabati adalah tergantung pada waktu transesterifikasi, suhu, berat katalis, dan rasio molar minyak dengan metanol. Biodiesel dapat diproduksi di bawah suhu yang lebih rendah dengan katalis basa, sedangkan reaksi transesterifikasi dengan katalis asam membutuhkan suhu yang lebih tinggi dan waktu reaksi yang lebih lama [18].

Metode transesterifikasi dengan katalis basa homogen paling banyak digunakan karena konversinya yang tinggi [18], tingkat efisiensi yang lebih tinggi, waktu reaksi yang lebih singkat, dan proses pemisahan yang lebih mudah dibanding katalis heterogen [22, 23]. Katalis basa umumnya yang paling sering digunakan adalah kalium hidroksida (KOH) dan natrium hidroksida (NaOH). Metanol dan etanol adalah alkohol yang paling banyak digunakan, dengan rasio molar alkohol terhadap minyak sekitar 6 dan 9 untuk metanol dan etanol [16, 22].

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengidentifikasi yang terbaik katalis homogen untuk produksi biodiesel dari WCO). Menurut Abubakar et al [21] kondisi optimal untuk proses produksi dengan rendemen optimum 90% biodiesel adalah waktu produksi 60 menit, suhu 30°C, berat katalis NaOH 0,5%, dan rasio alkohol terhadap minyak. dari 6:1. Hsiao dkk [18]. menyebutkan konversi biodiesel menggunakan CH_3ONa sebagai katalis lebih tinggi dibandingkan dengan katalis NaOH. Lebih lanjut Dhingra, et.al [24] melaporkan bahwa kondisi reaksi optimum yang ditemukan adalah (rasio etanol terhadap minyak bunga matahari, 0,99 (% berat terhadap minyak) konsentrasi katalis, 57,31°C suhu reaksi, 77,12 menit reaksi waktu, dan 494,94 rpm kecepatan pencampuran untuk mencapai hasil biodiesel 96,33% berat.

Penggunaan katalis basa homogen meningkat untuk produksi biodiesel pada skala industri [25]. Mohadesi et al. [23]

meneliti transesterifikasi minyak goreng bekas (WCO) dengan metanol dengan kalium hidroksida sebagai katalis. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa rasio molar metanol terhadap minyak sebesar 9,4:1, konsentrasi katalis 1,16 wt %, waktu reaksi (30-120 s), dan suhu reaksi 62,4 °C dicapai pada kondisi optimum. Tingkat kemurnian biodiesel atau asam lemak metil ester % (FAMES %) tertinggi yaitu 98,26%.

Hassan dan Smit [26] melaporkan proses transesterifikasi membutuhkan waktu yang jauh lebih sedikit dibandingkan dengan proses esterifikasi. Konversi mencapai 97,4% pada suhu 60 °C, rasio metanol/minyak 0,3 v/v, dan 1,0 %wt. pemuatan katalis KOH setelah 60 menit. Lebih lanjut, Outili et.al [16] menyatakan bahwa kondisi optimal untuk transesterifikasi adalah 45 °C, 2% berat KOH dan molar methanol to oil ratio 4,73. Pada kondisi optimal tersebut, konversi total, energi yang dibutuhkan sebesar 2,69 kJ untuk mencapai suhu operasional dan keseimbangan kimia hijau 77,36% diperoleh.

Proses katalis asam adalah yang paling ekonomis dibanding lainnya. Namun, satu kelemahan dari pilihan katalis asam adalah rasio konversi yang rendah dan laju reaksi yang lambat. Untuk mencapai laju konversi yang relatif tinggi, dibutuhkan rasio molar yang tinggi (misalnya 50:1) dan suhu dan tekanan yang lebih tinggi [8]. Alkali, asam, atau enzim dapat menjadi katalisator untuk reaksi transesterifikasi. Metode yang paling efektif untuk produksi biodiesel adalah transesterifikasi enzimatik. Tetapi katalis memiliki kelemahan berikut yaitu biaya tinggi, dan laju reaksi yang sangat lambat [25].

Gardy et.al. [27] berpendapat bahwa WCO mengandung asam lemak bebas (FFA) dan air dalam jumlah tinggi yang menjadikannya bahan baku yang tidak cocok untuk transesterifikasi katalis basa homogen. Namun, ada beberapa kelemahan yang juga terkait dengan penggunaan katalis

homogen seperti tidak dapat digunakan kembali [28], sebagian larut dalam biodiesel dan larut dalam gliserol sehingga menghasilkan air limbah berlebih selama proses pemurnian dan menyebabkan hilangnya biodiesel selama tahap pemurnian produk [28]. Bahkan, penggunaan katalis homogen dicirikan oleh proses yang tidak praktis dan biaya produk yang tinggi [9], dan teknik ini tidak direkomendasikan secara ekonomis [29].

E. Katalis Heterogen

Produksi biodiesel menghadapi tantangan lingkungan dan ekonomi karena penggunaan katalis homogen, seperti NaOH, KOH, NaOCH₃, dan KOCH₃. Meskipun penggunaan katalis homogeny sangat efektif, katalis ini beracun dan hampir mustahil untuk didaur ulang/digunakan kembali. Katalis heterogen, sebaliknya, dapat digunakan kembali dan mudah dipisahkan dari produk akhir, sehingga menghasilkan produksi yang lebih berkelanjutan dan hemat biaya. Namun, katalis heterogen, kehilangan aktivitas melalui siklus reaksi dan mengkontaminasi biodiesel [3]. Di antara katalis heterogen yang digunakan dalam sintesis biodiesel, kalsium oksida (CaO) menonjol. Bahkan dalam kondisi pengoperasian ringan, katalis ini menunjukkan aktivitas transesterifikasi yang tinggi. Selain itu juga bersifat ramah lingkungan dan dapat disintesis dari bahan baku sisa yaitu cangkang telur [30].

Rahman dkk. [31] memanfaatkan limbah cangkang telur ayam terhadap sintesis katalis heterogen untuk produksi biodiesel dari WCO. Limbah kulit telur dikalsinasi pada temperatur 900 °C selama 4 jam untuk mendapatkan CaO. Penggunaan CaO sebesar 4% menghasilkan rendemen biodiesel maksimum sebesar 93,27%. Lebih lanjut, produksi biodiesel berkelanjutan dari minyak biji karet (RSO) menggunakan cangkang telur terkalsinasi sebagai katalis heterogen telah diteliti

oleh Sai dkk [32]. Konversi RSO menjadi biodiesel sebesar 97,84 % diamati pada kondisi proses optimum dengan rasio 9:1 M (mol/mol), waktu tinggal 4 (jam) dan konsentrasi katalis 5 (% berat).

Valorisasi minyak jelantah kadar asam lemak rendah menjadi biodiesel melalui transesterifikasi menggunakan katalis basa heterogen berbasis kalsium menggunakan Serbuk limbah marmer dilakukan oleh Bargole dkk [33]. Rendemen 95,45% optimum diperoleh dengan menggunakan konsentrasi katalis 6,8%, molar minyak terhadap alkohol 1:15,9 dan temperatur 64,8 °C. Transesterifikasi minyak kedelai menggunakan limbah tulang sapi sebagai katalis telah dilakukan Smith dkk. [2]. optimum metil ester (97%) diperoleh dengan melakukan transesterifikasi pada suhu 65 °C selama 3 jam dengan muatan katalis 8% berat dan rasio metanol terhadap minyak 6:1, menggunakan tulang yang dikalsinasi pada suhu 750 °C. Kalsinasi tulang sapi komersial pada suhu 650 °C ke atas menghasilkan konversi komponen kalsium karbonat menjadi kalsium oksida, dengan komponen utamanya adalah kristal hidroksiapatite. Kalsium oksida diyakini bertanggung jawab atas aktivitas katalitik material. Penggunaan kembali, biaya rendah, dan pemuatan katalis yang rendah (4% berat) dapat menjadikan tulang sapi sebagai alternatif yang menarik untuk katalis.

Ampas tebu juga telah dimanfaatkan sebagai katalis untuk sintesis biodiesel dari limbah minyak sawit oleh Hidayat dkk [34]. jumlah katalis, rasio massa metanol, dan suhu tertinggi masing-masing sebesar 86,1% dicapai pada suhu reaksi 65 °C metanol 4:1, dan jumlah katalis 5 wt. %.

F. Pengaruh Rasio Molar Metanol Terhadap Minyak

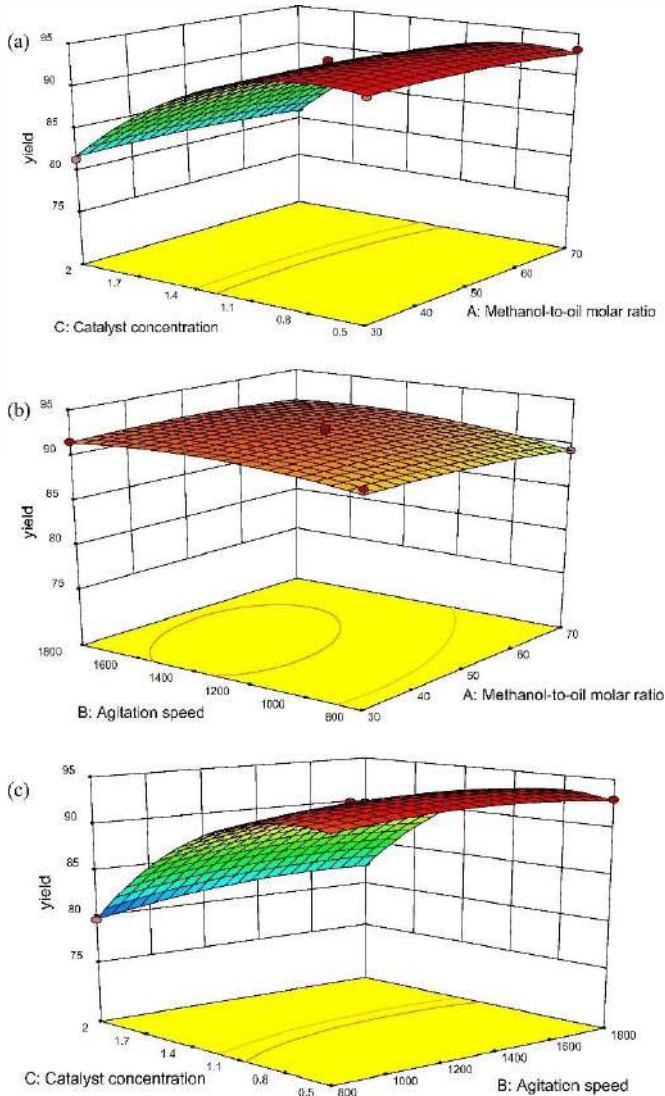
Dharma dkk. [35] menyebutkan, peningkatan rasio molar metanol terhadap minyak memiliki pengaruh yang tidak

signifikan terhadap hasil biodiesel *Jatropha curcas*–*Ceiba pentandra* (J50C50). Peningkatan jumlah metanol akan meningkatkan waktu yang dibutuhkan untuk mengekstrak kelebihan metanol dari biodiesel setelah proses transesterifikasi, hal ini disebabkan oleh fakta bahwa metanol memiliki satu gugus hidroksil polar, yang berfungsi sebagai pengemulsi dan dengan demikian, meningkatkan emulsi (Gambar 5.3). Penambahan rasio metanol terhadap minyak menurunkan persentase rendemen metil ester, perilaku ini menunjukkan bahwa pemisahan gliserin dan metil ester menjadi lebih sulit karena terbentuknya emulsi. Fakta ini menunjukkan bahwa jumlah alkohol yang berlebihan pada proses transesterifikasi akan menyebabkan peningkatan produk, sedangkan di sisi lain kelebihan metanol akan membantu meningkatkan kelarutan gliserol sehingga menghasilkan rendemen yang lebih rendah [35].

Menentukan rasio metanol/minyak yang sesuai memang penting untuk menentukan kuantitas metil ester yang dihasilkan. Jika rasio metanol/minyak tidak mencukupi untuk transesterifikasi, hal ini akan mengurangi hasil metil ester karena gliserida tidak diubah menjadi metil ester asam lemak. Kehadiran metanol meningkatkan kelarutan dan kompatibilitas katalis KOH dalam campuran reaksi, yang mendukung reaksi transesterifikasi ke depan dan meningkatkan hasil metil ester. Oleh karena itu, jika rasio metanol/minyak sangat tinggi, hal ini akan mengurangi jumlah metil ester yang dihasilkan secara signifikan, yang mungkin disebabkan oleh tingginya kelarutan gliserol, yang mempersulit proses pemisahan dan pemurnian [35].

Oleh karena itu, rasio metanol/minyak yang digunakan selama proses transesterifikasi sangat penting untuk mencapai hasil metil ester yang tinggi. Metanol dalam jumlah berlebihan tidak diperlukan dan merupakan pemborosan karena hal ini akan mengurangi hasil metil ester, menghambat perolehan gliserol,

dan meningkatkan biaya produksi biodiesel, terutama bila reaktor gelombang mikro digunakan untuk produksi biodiesel [35].



Gambar 5.3 Plot permukaan tiga dimensi yang menunjukkan efek gabungan dari: (a) rasio molar metanol terhadap minyak dan konsentrasi katalis, (b) kecepatan agitasi dan rasio molar metanol terhadap minyak, dan (c) konsentrasi katalis dan kecepatan agitasi pada hasil biodiesel J50C50 [35].

G. Pengaruh Kecepatan Agitasi

Gambar 5.3 (b) menunjukkan plot permukaan tiga dimensi dari efek gabungan kecepatan pengadukan terhadap hasil biodiesel J50C50, dimana kecepatan pengadukan divariasikan pada 800, 1300 dan 1800 rpm. Terlihat pada Gambar 5.3 (b) bahwa kecepatan pengadukan berpengaruh terhadap rendemen biodiesel, dimana rendemen biodiesel J50C50 sedikit meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan pengadukan.

Kecepatan pengadukan (atau dikenal sebagai intensitas pencampuran) diketahui merupakan faktor penting karena mempengaruhi homogenitas campuran minyak setelah katalis ditambahkan ke dalam minyak untuk proses transesterifikasi. Meningkatkan kecepatan pengadukan dan intensitas pencampuran, memfasilitasi permulaan reaksi dan meningkatkan area kontak antara minyak, metanol dan larutan KOH. Jika tidak ada pencampuran, reaksi hanya terjadi pada antarmuka kedua lapisan, dan hal ini akan memperlambat laju reaksi selama proses transesterifikasi secara signifikan. Sejumlah peneliti juga menemukan bahwa peningkatan kecepatan agitasi selama proses transesterifikasi mendorong homogenisasi reaktan, yang menghasilkan hasil biodiesel yang tinggi.

Selain itu, kecepatan pengadukan merupakan parameter penting dalam proses transesterifikasi karena tanpa adanya pencampuran maka reaksi transesterifikasi akan terhambat sehingga memperpanjang waktu reaksi. Oleh karena itu, kecepatan pengadukan memainkan peran penting untuk mempercepat laju reaksi dengan mendorong reaksi antara trigliserida dan alkohol dengan adanya katalis. Kecepatan pengadukan memastikan pencampuran reaktan secara menyeluruh, memastikan distribusi suhu yang seragam dari

campuran reaksi, dan mendorong tumbukan partikel yang bergerak melalui medium (yaitu difusi massa) [35].

H. Pengaruh Konsentrasi Katalis

Gambar 5.3 (c) menunjukkan plot permukaan tiga dimensi dari efek gabungan konsentrasi katalis dan kecepatan agitasi terhadap hasil biodiesel J50C50, dimana konsentrasi katalis divariasikan pada 0,50, 1,25 dan 2,00% berat. Terlihat jelas dari Gambar 5.3 (c) bahwa untuk kecepatan agitasi tetap, peningkatan konsentrasi katalis akan menurunkan hasil biodiesel J50C50. Hasil biodiesel menurun dengan peningkatan konsentrasi katalis hingga 2,00 % berat. Rendemen biodiesel berada dalam kisaran 79,59–82,51 untuk konsentrasi katalis 2,00 % berat. Sebaliknya, hasil biodiesel meningkat seiring dengan penurunan konsentrasi katalis, dimana nilainya berada dalam kisaran 92,01–93,30 % berat. Yang lebih penting lagi, rendemen biodiesel tertinggi dengan nilai 93,30% untuk parameter operasi berikut: rasio metanol terhadap minyak: 30%, konsentrasi katalis: 0,5% dan kecepatan agitasi: 1300 rpm. Hal ini menunjukkan bahwa parameter operasi tersebut merupakan parameter operasi optimum untuk proses transesterifikasi campuran minyak J50C50 [35].

Secara umum penurunan rendemen biodiesel dengan meningkatnya konsentrasi katalis KOH disebabkan oleh terbentuknya sabun dengan jumlah katalis yang berlebihan. Proses transesterifikasi dengan katalis alkali sangat sensitif terhadap air, dimana keberadaan air dapat menyebabkan saponifikasi ester dalam kondisi basa. Selain itu, jumlah katalis yang berlebihan dapat menyebabkan terbentuknya emulsi, sehingga meningkatkan viskositas biodiesel dan menginduksi pembentukan gel. Sebagaimana diketahui bahwa KOH merupakan katalis yang paling tepat digunakan pada proses

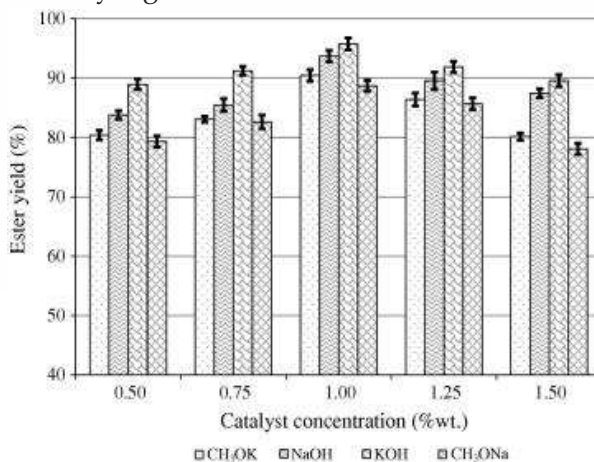
transesterifikasi, penggunaan katalis dibatasi pada minyak nabati olahan dengan kadar FFA kurang dari 0,5 wt.% atau bilangan asam kurang dari 1 mg KOH/g [35].

Penting untuk menentukan jumlah katalis KOH yang tepat untuk reaksi transesterifikasi karena konsentrasi katalis KOH yang tinggi akan menghasilkan sejumlah besar ion bebas dalam campuran reaksi, yang menyebabkan tumbukan ion secara besar-besaran dan mengurangi energi aktivasi yang dibutuhkan oleh minyak untuk bereaksi. meningkatkan laju reaksi. Sebaliknya, ketika campuran reaksi mencapai keadaan setimbang, jumlah katalis KOH yang berlebihan tidak menghasilkan hasil metil ester sebesar 100% karena reaksi transesterifikasi dibalik. Reaksi menjadi endotermik selama proses pendinginan berdasarkan Prinsip Le Chatelier [35].

Selain jumlah katalis, jenis katalis juga sangat mempengaruhi rendemen biodisel yang dihasilkan pada minyak yang sama. Silitonga dkk mengamati pengaruh konsentrasi katalis yang berbeda pada sintesis biodiesel kesambi/ kusum (*S. oleosa*). Pengamatan ini dilakukan pada proses transesterifikasi dengan perbandingan molar 8:1, pada suhu 55 °C dan waktu 90 menit pada putaran 1000 rpm. Hasil ester yang lebih besar dari 90% dicapai dengan 1,00 % berat seluruh katalis (KOH, NaOH, CH_3OK dan CH_3ONa). Gambar (5.4) menampilkan hubungan antara perbedaan jumlah dan jenis katalis dengan konsentrasi katalis terhadap rendemen ester. Terlihat bahwa katalis KOH dan NaOH memberikan rendemen ester yang lebih tinggi dibandingkan katalis CH_3OK dan CH_3ONa untuk minyak asam lemak bebas dan rantai tak jenuh yang lebih tinggi.

Proses pretreatment dan esterifikasi dilakukan untuk mengurangi terbentuknya sabun natrium dan meningkatkan rendemen ester, karena terdapat sedikit pembentukan pengemulsi pada pencucian fasa metil ester atas dengan

menggunakan katalis CH_3ONa dan CH_3OK . Biodiesel ester yang dihasilkan tertinggi dihasilkan dengan menggunakan katalis KOH (95%), disusul dengan penggunaan katalis NaOH (93%), CH_3OK (90%) dan CH_3ONa (88%). Hasil penelitian mengetahui hubungan kontribusi katalis dalam produksi rendemen ester sehingga $\text{KOH} > \text{NaOH} > \text{CH}_3\text{OK} > \text{CH}_3\text{ONa}$ menghasilkan rendemen ester yang lebih baik.

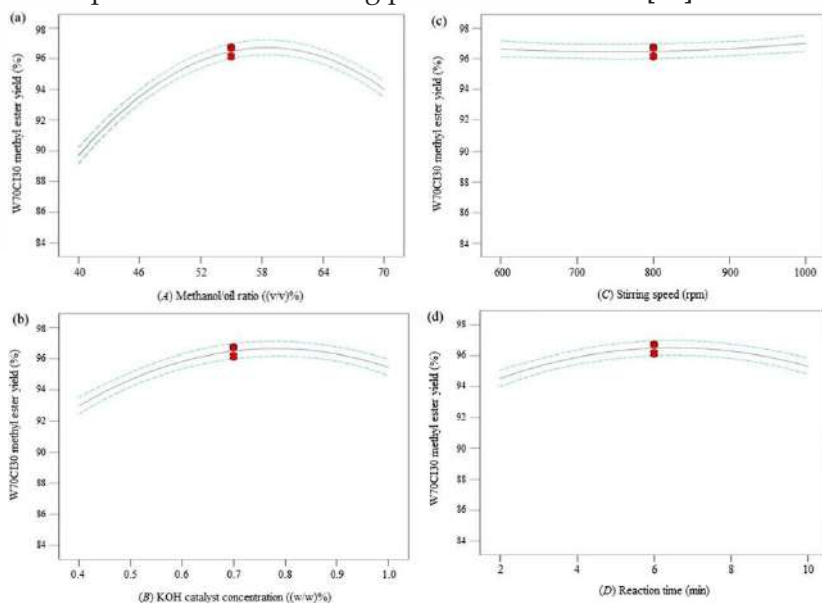


Gambar 5.4 Pengaruh jumlah dan jenis katalis terhadap hasil ester pada perbandingan molar 8:1, 55 °C, 90 menit dan 1000 rpm.

I. Pengaruh Waktu Reaksi

Pada proses sintesis minyak nabati menjadi biodiesel, waktu reaksi sangat mempengaruhi rendemen biodiesel yang diperoleh. Dharma dkk, [35] menyebutkan, waktu reaksi merupakan parameter penting yang perlu dioptimalkan karena memainkan peran penting dalam mempengaruhi hasil metil ester. Diharapkan waktu reaksi akan berkurang setengahnya bila suhu campuran reaksi dinaikkan sebesar 10 °C. Inilah sebabnya mengapa hasil metil ester W70CI30 sangat dipengaruhi oleh waktu penahanan reaktor gelombang mikro. Gambar 5.5 (d) menunjukkan hasil metil ester W70CI30 ketika waktu reaksi divariasikan dari 2 hingga 10 menit. Perlu dicatat bahwa rasio

metanol/minyak, konsentrasi katalis KOH, dan kecepatan pengadukan dijaga tetap pada masing-masing 55 (v/v)%, 0,7 (b/b)%, dan 800 rpm. Ditemukan bahwa hasil metil ester meningkat sebesar 2% bila waktu reaksi diperpanjang hingga 6 menit. Namun, hasil metil ester menurun sebesar 1% bila waktu reaksi diperpanjang hingga 10 menit. Hal ini menunjukkan bahwa reaksi transesterifikasi telah selesai dan campuran reaksi mencapai keadaan setimbang pada waktu 6 menit [35].

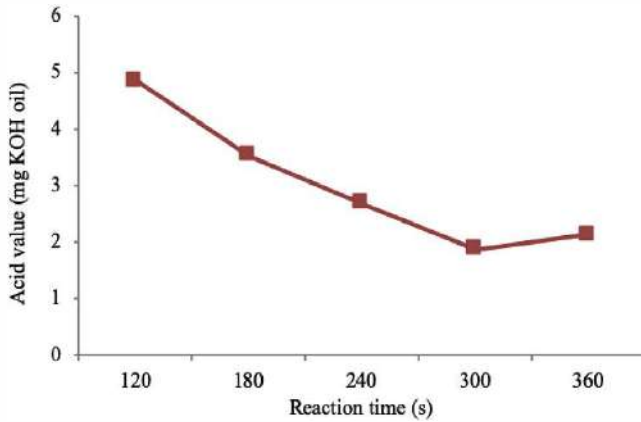


Gambar 5.5 Pengaruh (a) perbandingan metanol/minyak, (b) konsentrasi katalis KOH, (c) kecepatan pengadukan, dan (d) waktu reaksi terhadap rendemen metil ester W70C130 [35].

Secara umum, waktu reaksi sangat mempengaruhi jumlah metil ester yang dihasilkan dan waktu yang cukup diperlukan untuk memastikan difusi sempurna antara katalis metanol, minyak, dan KOH, serta meningkatkan laju reaksi. Secara umum, peningkatan waktu reaksi akan meningkatkan hasil metil ester dengan meningkatkan difusivitas campuran reaksi, yang memfasilitasi setiap langkah dalam proses transesterifikasi

(konversi trigliserida menjadi digliserida, digliserida menjadi monogliserida, dan terakhir, monogliserida menjadi metil ester). Meskipun pengujian pengaruh masing-masing parameter proses memberikan beberapa wawasan tentang bagaimana parameter ini mempengaruhi hasil metil ester campuran minyak WCO dan callopylum inopylum (W70CI30), hal ini tidak memberikan pandangan menyeluruh mengenai interaksi antara parameter-parameter ini dan pengaruhnya terhadap hasil metil ester W70CI30 [35].

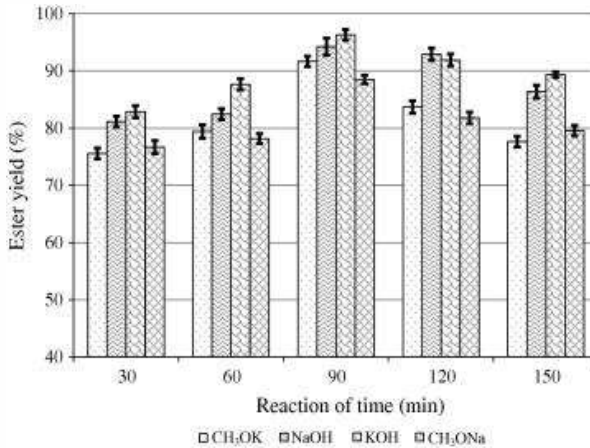
Selain berpengaruh terhadap rendemen biodiesel yang dihasilkan, waktu proses juga berpengaruh terhadap nilai asam biodiesel yang dihasilkan. Silitonga dkk. [36] mengamati pengaruh waktu proses terhadap nilai asam pada biodiesel kapok (*ceiba pentrandra* (gambar 5.6). Terlihat bilangan asam paling rendah (1,878 mg KOH/g) pada waktu reaksi 300 detik. Kehadiran katalis H_2SO_4 pada waktu reaksi yang lebih lama (300–360 detik) mengakibatkan reaksi kesetimbangan menjadi lambat akibat reaksi samping yang tidak diinginkan, yang dibuktikan dengan sedikit peningkatan nilai asam. Lebih lanjut, iradiasi gelombang mikro mampu mengubah 37% -78% asam lemak bebas (FFA) sedangkan dalam penelitian ini, 69–88% FFA dikonversi. Selain itu iradiasi gelombang mikro berpotensi menurunkan FFA dalam minyak esterifikasi hingga mencapai bilangan asam yang diinginkan (1,878 mg KOH/g).



Gambar 5.6 Pengaruh waktu reaksi terhadap nilai asam minyak Ceiba pentandra yang teresterifikasi.

Pada awalnya reaksi berjalan lambat karena adanya pencampuran dan dispersi alkohol ke dalam minyak. Setelah beberapa saat, reaksi berlangsung lebih cepat. Biasanya, hasil mencapai maksimum pada waktu reaksi kurang dari 90 menit dan relatif konstan dengan peningkatan lebih lanjut dalam waktu reaksi. Selain itu, waktu reaksi yang berlebih akan menyebabkan penurunan rendemen ester akibat reaksi balik transesterifikasi yang mengakibatkan hilangnya ester serta menyebabkan lebih banyak asam lemak membentuk sabun [37].

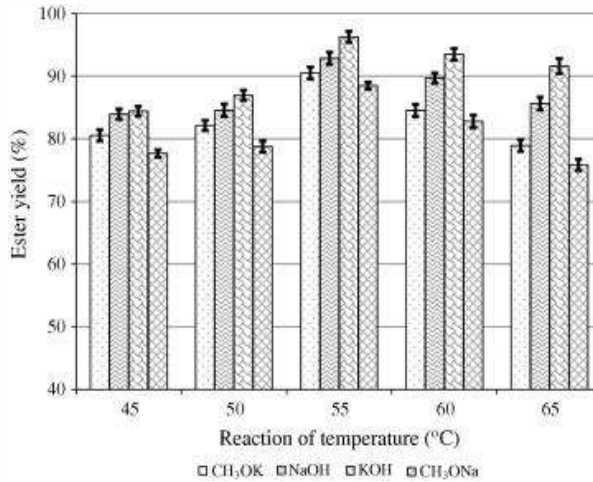
Silitonga dkk. [37] membandingkan waktu proses transesterifikasi yang dilakukan pada berbagai periode waktu 30 hingga 120 menit. Produk hasil ester dari waktu reaksi dan jenis katalis diilustrasikan pada gambar (5.7). Waktu reaksi mencapai hasil metil ester keadaan stabil pada 90 menit. Katalis terbaik yang diperoleh adalah dengan KOH yang menghasilkan rendemen ester dari CSSO sebesar 96%, disusul dengan katalis NaOH (94%), CH_3OK (91%) dan CH_3ONa (88%).



Gambar 5.7 Pengaruh waktu dan jenis katalis terhadap rendemen ester pada perbandingan molar 8:1, konsentrasi katalis 1 % berat, 55 °C dan 1000 rpm [37].

J. Pengaruh Suhu Reaksi

Suhu reaksi dapat mempengaruhi proses dan hasil biodiesel. Temperatur reaksi yang lebih tinggi dapat menurunkan viskositas minyak dan menghasilkan laju reaksi yang lebih cepat dengan waktu reaksi yang lebih singkat. Ketika suhu reaksi meningkat melebihi tingkat optimal, hasil produk biodiesel menurun karena suhu reaksi yang lebih tinggi mempercepat reaksi saponifikasi trigliserida. Suhu reaksi harus lebih kecil dari titik didih alkohol untuk memastikan bahwa alkohol tidak bocor melalui penguapan. Suhu optimal berkisar antara 50 hingga 60 °C tergantung pada oli yang digunakan.



Gambar 5.8 Pengaruh suhu dan jenis katalis terhadap hasil ester pada perbandingan molar 8:1, konsentrasi katalis 1 % berat, 90 menit dan 1000 rpm.

Suhu yang lebih tinggi dan waktu yang lebih lama akan membakar alkohol dan akan mengurangi hasil metil ester. Pengaruh suhu reaksi dan jenis katalis terhadap hasil ester ditunjukkan pada gambar (5.8). Silitonga dkk. [37] menemukan rendemen ester maksimum (96%) diperoleh pada suhu 55 °C dengan katalis KOH, tertinggi dibandingkan katalis lain: NaOH (92%), CH₃OK (90%) dan CH₃ONa (88%). Temperatur yang lebih rendah akan menurunkan rendemen ester pada reaksi transesterifikasi. Selain itu, suhu reaksi yang lebih besar dari 60 °C dalam katalis alkali akan menghasilkan pembentukan sabun dan gliserida sebelum alkoholisis selesai.

Adapun penggunaan katalis homogen dan heterogen dalam produksi biodiesel dari berbagai jenis minyak seperti disajikan pada tabel 5.1.

Tabel 5. 1 Katalis Homogen Dan Heterogen Dalam Pembuatan Biodiesel

feedstock	Catalyst	Process	Preparation method		Methods	Reaction condition				yield	Ref
			Temp calcination (°C)	Time (h)		Temperature (°C)	Time (h)	Catalyst loading	Methanol to oil molar ratio		
WCO	KOH	-	-	-	Conventional	60		1%	5:1	93.8%	[38]
WCO	KOH	-	-	-	Conventional	40	2	1%	12:1	93%	[39]
WCO	CH ₃ ONa	-	-	-	Homogenizer	65	0.13	0.75%	9:1	97.1%	[18]
WCO	KOH				ultrasonic	60	2	1%	6:1	96.5%	[40]
WCO	KOH				microwave	80	0.17	0.5%	6:1	93.8%	[41]
WCO	KOH	-	-	-	conventional	45	3.5	0.5%	4:1	97%	[42]
WCO	KOH	-	-	-	conventional	57.50	3	0.25%	8.5:1	98%	[43]
WCO	KOH	-	-	-	microwave	60	1	1%	3:1	97.4%	[26]
WCO	KOH	-	-	-	conventional	60	2	1%	70%	93%	[44]
WCO	CM-903H	Hydrothermal	190	24	conventional	110	4	10%	9.35:1	89.6%	[45]
WCO	NaOH	-			microwave	65	2	1%	7:1	97.8%	[46]
WCO	NaOH	-	-	-	microwave	65	0.03	0.8%	12:1	98.2	[47]
WCO	NaOH	-	-	-	conventional	30	1	0.5%	6:1	90	[21]
WCO	NaOH	-	-	-	conventional	80	3	1.5%	30:1	92%	[48]
WCO	NaOH	-	-		Conventional	65	0.133	1%	9:1	98%	[10]
WCO	NaOCH ₃	-	-		Conventional	45	1.5	0.75	6:1	89	[49]
WCO	ostrich bones	Calcination	900	4	Conventional	60	4	5%	15:1	90.56	[50]
WCO	MgO-ZrO ₂	Calcination	650	4	Conventional	80	4	4%	12:1	92.3%	[51]
WCO	Mussel shell	Calcination	900	5	Conventional	80	3	4%	10:1	97%	[52]
WCO	chicken and fish bones	Calcination	1000	4	Conventional	65	1.54	1.98%	10:1	89.9%	[53]
WCO	Eggshell	Calcination	1000	4	Conventional	60	1	5%	20:1	45.52%	[54]
WCO	Egg shell (CaCO ₃)	Calcination	900	5	Conventional	80	3	3%	15:1	92.1%	[55]
WCO	ostrich-eggshell (CaO)	Calcination	1000	4	Conventional	65	2	1.5%	12:1	96%	[56]
WCO	CaO/SiO ₂		900	2	Conventional	60	1.5	10%		91%	[57]
WCO	CaO/MgO	Calcination	800	3	Conventional	90	2	6%	15:1	96.47%	[58]
WCO	KOH/Clinoptilolite	Calcination	400	5	microreactor	65	0.21	8.1	2.25:1	97.45	[22]
WCO	CaO	-	-	-	High-speed homogenizer	50	0.5	1%	10:1	88%	[5]
WCO	H ₃ PMo ₁₂ O ₄₀ , HPMo	impregnation	300	3	electrolysis	60	15	0.05%	6:1	90%	[59]
WCO	Rice straw	Calcination	500	2	Magnetic stir	65	1.5	3.5%	15:1	97.3%	[60]
WCO	Coconut chaf	Impregnation	900	4	Magnetic stir	65	2.5	1.5%	12:1	91.05%	[9]
WCO	coal fly ash	Hydrothermal	800	1.5	Microwave	86.20	0.1	3.99%	9.67:1	94.91%	[7]
WCO	KOH/cornacobs	Activation	600	2	Conventional	45	1	1%	18:1	97.8%	[61]
WCO	Kbr and CaO	Impregnation calcination	900	4	conventional	65	2	3%	12:1	80%	[19]

WCO	Fe-MMTK10	calcination	500	5	conventional	134.07	6	4.68%	11.77±1	95.26%	[62]
WCO	MTC	Sol gel, calcination	500	5	conventional	65	1	0.2%	3:1	80%	[63]
WCO	La ³⁺ /ZnO-TiO ₂	Sol-gel	400	2	conventional	35	3	4%	12:1	95.14	[64]
WCO	Amberlyx 15	-	-	-	FIR	110	2	6%	8:1	97.13	[65]
WCO	Zn/ CaO	Impregnation	900	3	Conventional	65	4	3%	20:1	95.74	[66]
WCO	20Fe80Ba/Fe Al ₂ O ₃	Impregnation, calcination	800	5	Conventional	65	3	6%	18:1	84.02	[67]
WCO	Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃	co-precipitation	500		Conventional	99.8	2.95	5%	32.2:1	99.1	[68]
WCO	RS-SO ₂ H	Pyrolysis	480-510	0.0027	Conventional	70	6	10%	20:1	92.5	[69]
WCO	GO@ZrO ₂ -SrO	co-precipitation	550	3	Conventional	120	1.5	0.5 g	4:1	91%	[70]
kedelai	Tulang sapi	calcination	750	6	Conventional	65	3	4%	6:1	97%	[2]
kedelai	Cangkang bekicot	calcination	900	4	Conventional	60	8	3%	6:1	98%	[71]
biji karet	CaO kulit telur	calcination	900	4	Conventional		4	5 (%)	9:1	97.94 %	[32]
<i>Schlotzhera Oleosa Oil</i>	KOH	-	-	-	Conventional	55	1.5	1	8:1	96%	[37]
WCO, <i>Calophyllum mophyllum</i> (70:30)	KOH	-	-	-	monowave	60	2	0.5%	30%	93.33%	[72]
<i>Jatropha curcas-Ceiba pentandra</i>	KOH	-	-	-	Double jacket	60	2	0.5%	30%	93.33%	[35]
<i>Ceiba pentandra</i>	KOH	-	-	-	mikrowave	-	0,1	0.84%	60%	95.19%	[36]

Ceritera Mangha	KOH				Hot plate	55	1.2	1.1 %	9:1	98.72%	[73]
biji <i>Bruccea javanica</i>	KOH	-	-	-	Conventional	65		1%	6:1	94.34%	[74]
<i>Reutealis triperma</i>	KOH	-	-	-	inframerah	84	1.13	1.2% 65	8:1	97.78%	[75]
<i>Hevea brasiliensis</i>	NaHCO ₃	-	-	-	Double jacket	60	1.5	0.76%	9.6:1	99.32%	[76]
<i>Calophyllum mophyllum</i>	NaOH	-			Pilot plant	65	3	1%	12:1	80.83%	[77]
<i>Sterculia foetida</i>	NaOH	-	-	-	Double jacket	50	2	1%	10:1	90%	[78]
Okra (<i>Hibiscus esculentus</i>)	NaOCH ₃	-	-	-	Hot plate	65	2	1%	7:1	96.8%	[79]
<i>Capparis spinosa</i> L.	cangkang tiram [CaO]	calcination	700	5	Hot plate	65	3	10%	1:9	90%	[80]
Dedak padi	KOH	-	-	-	Infrared	60	0.12	1%	60%	98.16%	[81]
minyak biji semangka	Sarang semut	calcination	900	4	microwave	60	0.11	4%	8:1	93.41%	[82]

Daftar Pustaka

- [1] A. Dhar and A. K. Agarwal, "Effect of Karanja biodiesel blend on engine wear in a diesel engine," *Fuel*, vol. 134, pp. 81-89, 2014.
- [2] S. M. Smith *et al.*, "Transesterification of soybean oil using bovine bone waste as new catalyst," *Bioresource technology*, vol. 143, pp. 686-690, 2013.
- [3] V. M. e Melo, G. F. Ferreira, and L. V. Fregolente, "Sustainable catalysts for biodiesel production: The potential of CaO supported on sugarcane bagasse biochar,"

- Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 189, p. 114042, 2024.
- [4] M. N. Zahoor, S. Madapusi, S. and Giustozzi, F. , "Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: A comprehensive review," *J. Clean. Prod*, vol. 278, p. 123304, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123304.
 - [5] S. G. Joshi, P. R. Moreira, P. F. and Giudici, R. , "Intensification of biodiesel production from soybean oil and waste cooking oil in the presence of heterogeneous catalyst using high speed homogenizer," *Ultrason. Sonochem.*, vol. , no. May, pp. , 2017, doi: , " *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 39, pp. 645–653, 2017, doi: 10.1016/j.ultsonch.2017.05.029.
 - [6] N. N. Petchsoongsakul, K. Kiatkittipong, W. Wongsawaeng, D., and Assabumrungrat, S. , "Different water removal methods for facilitating biodiesel production from low-cost waste cooking oil containing high water content in hybridized reactive distillation," *Renew. Energy*, vol. 162, pp. 1906–1918, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.09.115.
 - [7] Y. X. Xiang, Y. and Wang, L. , "Microwave radiation improves biodiesel yields from waste cooking oil in the presence of modified coal fly ash," *J. Taibah Univ. Sci.*, vol. 11, pp. 1019–1029, 2017, doi: 10.1016/j.jtusci.2017.05.006.
 - [8] Q. Fu, C. Song, Y. Kansha, Y. Liu, M. Ishizuka, and A. Tsutsumi, "Energy saving in a biodiesel production process based on self-heat recuperation technology," *Chemical Engineering Journal*, vol. 278, pp. 556–562, 2015.
 - [9] J. Guo, S. Sun, and J. Liu, "Conversion of waste frying palm oil into biodiesel using free lipase A from *Candida antarctica* as a novel catalyst," *Fuel*, vol. 267, p. 117323, 2020.

- [10] T. H. Doğan, "The testing of the effects of cooking conditions on the quality of biodiesel produced from waste cooking oils," *Renewable Energy*, vol. 94, pp. 466-473, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.088>.
- [11] H. M. Khan *et al.*, "Production and utilization aspects of waste cooking oil based biodiesel in Pakistan," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 60, no. 6, pp. 5831-5849, 2021.
- [12] G. H. C. Soegiantoro, J. Rahmawati, P. Christiani, M. F. and Mufrodi, Z. , "Home-made ECO green biodiesel from chicken fat (CIAT) and waste cooking oil (pail)," *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 1105-1109, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.267.
- [13] F. L. Su, G. L. Fan, Y. L. and Yan, Y. J. , "Enhancing biodiesel production via a synergic effect between immobilized *Rhizopus oryzae* lipase and Novozym 435," *Fuel Process. Technol.*, vol. 137, pp. 298-30, 2015, doi: 10.1016/j.fuproc.2015.03.013.
- [14] N. K. Binhayeeding, S. Prasertsan, P. and Sangkharak, K. , "Improvement of biodiesel production using waste cooking oil and applying single and mixed immobilised lipases on polyhydroxyalkanoate," *Renew. Energy*, vol. 162, pp. 1819-1827, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.10.009.
- [15] S. G. Naveen, K.P; Malolan, R; Jayaramana, R.S; Aakriti, K; Arun, J., "Novel Solar Parabolic Trough Collector cum Reactor for the Production of Biodiesel from Waste Cooking Oil using Calcium Oxide catalyst derived from seashells waste " *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 157, pp. 1-8, 2020, doi: doi.org/10.1016/j.cep.2020.108145
- [16] N. K. Outili, H. Nekkab, C. Merouani, R. and Meniai, A. H. , "Biodiesel production optimization from waste cooking oil

- using green chemistry metrics," *Renew. Energy*, vol. 145, pp. 2575–2586, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.07.152.
- [17] S. C. Bargole, J. George, S. and Saharan, V. K. , "Process intensification of synthesis of biodiesel using a novel recirculating flow ultrasonication reactor," *Chem. Eng. Process. Process Intensif*, vol. 122, pp. 21–30, 2017, doi: 10.1016/j.cep.2017.09.010.
- [18] S. H. M. C. K. Shiao, J.Y. Hsieh, P.H. , "Improving Biodiesel Conversions from Blends of High- and Low-Acid-Value Waste Cooking Oils Using Sodium Methoxide as a Catalyst Based on a High," *Energies*, vol. 11, 2018, doi: 10.3390/en11092298.
- [19] S. E. R. Mahesh, A; Begum, K. M. M. S. and Narayanan, A. , "Biodiesel production from waste cooking oil using KBr impregnated CaO as catalyst," *Convers. Manag*, vol. 91, pp. 442–450, 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2014.12.031.
- [20] E. H. S. F. Moecke, R. Santos, H.A.D. Machado, M.D.M. Cubas, A.L.V. Dutra, A.R.D.A. Santos, L.L.V. Soares, S.R, "Biodiesel production from waste cooking oil for use as fuel in artisanal fishing boats: Integrating environmental, economic and social aspects," *J. Clean. Prod*, vol. 135, pp. 679–688, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.05.167.
- [21] A. H. G. A. Bakar, A. S. Jimoh, A. Agbajelola, O. D. Okafor, J. O. and Afolabi, E. A. , "Optimization of biodiesel production from waste cooking oil," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff*, vol. 38, pp. 2355–2361, 2016, doi: 10.1080/15567036.2015.1040899.
- [22] M. Mohadesi, B. Aghel, M. Maleki, and A. Ansari, "The use of KOH/Clinoptilolite catalyst in pilot of microreactor for biodiesel production from waste cooking oil," *Fuel*, vol. 263, p. 116659, 2020.

- [23] M. A. Mohadesi, B; Maleki, M. and Ansari, A. , "Production of biodiesel from waste cooking oil using a homogeneous catalyst: Study of semi-industrial pilot of microreactor," *Renew. Energy*, vol. 136, pp. 677-682, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.01.039.
- [24] S. B. Dhingra, G. and Dubey, K. K. , "Validation and enhancement of waste cooking sunflower oil based biodiesel production by the trans-esterification process," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 38, pp. 1448-1454, 2016, doi: 10.1080/15567036.2013.871610.
- [25] M. A. Hamza, M. Shamsuddin, R.B. Mukhtar, A. Saqib, S. Zahid, I. Ameen, M. Ullah, S. Al-Sehemi, A.G. Ibrahim, M. , "A review on the waste biomass derived catalysts for biodiesel production," *Environ. Technol. Innov*, vol. 21, p. 101200, 2020, doi: 10.1016/j.eti.2020.101200.
- [26] A. A. a. S. Hassan, J. D. , "Investigation of microwave-assisted transesterification reactor of waste cooking oil," *Renew. Energy*, vol. 162, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.09.123.
- [27] J. O. Gardy, A. Céspedes, O. Hassanpour, A. Lai, X. Lee, A.F. Wilson, K. Rehan, M., "A magnetically separable SO₄/Fe-Al-TiO₂ solid acid catalyst for biodiesel production from waste cooking oil," *Appl. Catal. B Environ*, vol. 234, pp. 268-278, 2018, doi: 10.1016/j.apcatb.2018.04.046.
- [28] A. R. a. R. Gupta, V. K., "Calcium diglyceroxide catalyzed biodiesel production from waste cooking oil in the presence of microwave: Optimization and kinetic studies," *Renew. Energy*, vol. 121, pp. 757-767, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.11.027.
- [29] M. R. B. AbuKhadra, M. G. El-Sherbeeney, A. M. El-Meligy, M. A. and Abd Elgawad, A. E. E. , "Transesterification of commercial waste cooking oil into biodiesel over innovative

- alkali trapped zeolite nanocomposite as green and environmental catalysts," *Sustain. Chem. Pharm*, vol. 17, p. 100289, 2020, doi: 10.1016/j.scp.2020.100289.
- [30] Y. S. Erchamo, T. T. Mamo, G. A. Workneh, and Y. S. Mekonnen, "Improved biodiesel production from waste cooking oil with mixed methanol-ethanol using enhanced eggshell-derived CaO nano-catalyst," *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, p. 6708, 2021.
- [31] W. U. Rahman, S. M. Yahya, Z. A. Khan, N. A. Khan, G. Halder, and S. H. Dhawane, "Valorization of waste chicken egg shells towards synthesis of heterogeneous catalyst for biodiesel production: Optimization and statistical analysis," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 22, p. 101460, 2021.
- [32] B. A. Sai, N. Subramaniapillai, M. S. B. K. Mohamed, and A. Narayanan, "Optimization of continuous biodiesel production from rubber seed oil (RSO) using calcined eggshells as heterogeneous catalyst," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 8, no. 1, p. 103603, 2020.
- [33] S. S. Bargole, P. K. Singh, S. George, and V. K. Saharan, "Valorisation of low fatty acid content waste cooking oil into biodiesel through transesterification using a basic heterogeneous calcium-based catalyst," *Biomass and Bioenergy*, vol. 146, p. 105984, 2021.
- [34] A. Hidayat, W. Kurniawan, and H. Hinode, "Sugarcane bagasse biochar as a solid catalyst: From literature review of heterogeneous catalysts for esterifications to the experiments for biodiesel synthesis from palm oil industry waste residue," *Indonesian Journal of Science and Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 337-352, 2021.

- [35] S. Dharma *et al.*, "Optimization of biodiesel production process for mixed *Jatropha curcas*-*Ceiba pentandra* biodiesel using response surface methodology," *Energy Conversion and Management*, vol. 115, pp. 178-190, 2016.
- [36] A. S. Silitonga *et al.*, "Biodiesel synthesis from *Ceiba pentandra* oil by microwave irradiation-assisted transesterification: ELM modeling and optimization," *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 1278-1291, 2020.
- [37] A. Silitonga *et al.*, "*Schleichera oleosa* L oil as feedstock for biodiesel production," *Fuel*, vol. 156, pp. 63-70, 2015.
- [38] A. K. T. Sodhi, S. and Kundu, K., "Biodiesel production using waste cooking oil: a waste to energy conversion strategy," *Clean Technol. Environ. Policy*, *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 19, pp. 1799-1807, 2017, doi: 10.1007/s10098-017-1357-6.
- [39] M. E. Almazrouei, S. and Janajreh, I. , "Transesterification of waste cooking oil: Quality assessment via thermogravimetric analysis," *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 2070-2076, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.478.
- [40] M. S. E.-S. Gad, A. I. Radwan, A. and He, Z., "Enhancing the combustion and emission parameters of a diesel engine fueled by waste cooking oil biodiesel and gasoline additives," *Fuel*, vol. 269, p. 117466, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117466.
- [41] A. K. Sharma, P. Kachhwaha, S. S. Raghavendra, H. B. and Thakkar, K. , "Application of Microwave Energy for Biodiesel Production using Waste Cooking Oil," *Mater. Today Proc*, vol. 5, pp. 23064-23075, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.11.036.
- [42] J. Hwang, D. Qi, Y. Jung, and C. Bae, "Effect of injection parameters on the combustion and emission characteristics in a common-rail direct injection diesel engine fueled with

- waste cooking oil biodiesel," *Renewable Energy*, vol. 63, pp. 9-17, 2014.
- [43] L. I. Razzaq, S. Anwar, Z. Farooq, M. Abbas, M.M. Khan, H.M. Asif, T. Amjad, M. Soudagar, M.M.E.M. Shaukat, N. Fattah, I.M.R. and Rahman, S.M.A "Maximising yield and engine efficiency using Optimised waste cooking oil biodiesel," *Energies*, vol. 13, pp. 1-16, 2020, doi: 10.3390/en13225941.
- [44] J. O. Milano, H.C. Masjuki, H.H. Silitonga, A.S. Kusumo, F. Dharma, S. Sebayang, A.H. , Cheah, A.H. Wang, C.T, "Physicochemical property enhancement of biodiesel synthesis from hybrid feedstocks of waste cooking vegetable oil and Beauty leaf oil through optimized alkaline-catalysed transesterification," *Waste Management*, vol. 80, pp. 435-449, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.09.005.
- [45] T. T. V. S. K. a. Tran, Suwadee Kongparakul a, Prasert Reubroycharoen b, Guoqing Guan c, Manh Huan Nguyen d, Chanatip Samart "Green biodiesel production from waste cooking oil using an environmentally benign acid catalyst," *Waste Management*, vol. 52, pp. 367-374, 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2016.03.053.
- [46] N. V. a. H. Lan, M. C. , "Improvement of Biodiesel Transesterification Efficiency by Activated Carbon and Microwave Power," *Proc. 2018 4th Int. Conf. Green Technol. Sustain. Dev. GTSD 2018*, pp. 181-186 2018, doi: 10.1109/GTSD.2018.8595508.
- [47] M.-C. L. Hsiao, P.-H. Lan, N. V. and Hou, S.S. , "Enhancement of Biodiesel Production from High-Acid-Value Waste Cooking Oil via a Microwave Reactor Using a Homogeneous Alkaline Catalyst," *Energies*, vol. 14, p. 437, 2021, doi: 10.3390/en14020437.

- [48] S. Chuepeng and C. Komintarachat, "Interesterification optimization of waste cooking oil and ethyl acetate over homogeneous catalyst for biofuel production with engine validation," *Applied Energy*, vol. 232, pp. 728-739, 2018.
- [49] M. W. A. A. Z. M. H. M. M. F. M. F. A. Q. Mumtaz, "Biodiesel from waste cooking oil: Optimization of production and monitoring of exhaust emission levels from its combustion in a diesel engine," *Int. J. Green Energy*, vol. 9, pp. 685-701, 2012, doi: 10.1080/15435075.2011.625583.
- [50] H. M. Khan, T. Iqbal, C. H. Ali, A. Javaid, and I. I. Cheema, "Sustainable biodiesel production from waste cooking oil utilizing waste ostrich (*Struthio camelus*) bones derived heterogeneous catalyst," *Fuel*, vol. 277, p. 118091, 2020.
- [51] H. Ala'a *et al.*, "Facile technique towards clean fuel production by upgrading waste cooking oil in the presence of a heterogeneous catalyst," *Journal of King Saud University-Science*, vol. 32, no. 8, pp. 3410-3416, 2020.
- [52] C. a. C. Komintarachat, S. , "Catalytic enhancement of calcium oxide from green mussel shell by potassium chloride impregnation for waste cooking oil-based biodiesel production," *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 12,, p. 100589, 2020, doi: 10.1016/j.biteb.2020.100589.
- [53] Y. H. Tan, M. O. Abdullah, J. Kansedo, N. M. Mubarak, Y. San Chan, and C. Nolasco-Hipolito, "Biodiesel production from used cooking oil using green solid catalyst derived from calcined fusion waste chicken and fish bones," *Renewable energy*, vol. 139, pp. 696-706, 2019.
- [54] M. F. F. K. Kamaronzaman, H. Hassan, N. Hanafi, M. F. and Sapawe, N. , "Optimization of biodiesel production from waste cooking oil using eggshell catalyst," *Mater. Today Proc.*, vol. 31, pp. 324-328, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.080.

- [55] N. S. H. R. Mansir, T.I. and Yap, Y. H. T., "Effective biodiesel synthesis from waste cooking oil and biomass residue solid green catalyst," *Chem. Eng. J.*, vol. 347, pp. 137-144, 2018, doi: 10.1016/j.cej.2018.04.034.
- [56] Y. H. Tan, M. O. Abdullah, C. Nolasco-Hipolito, and Y. H. Taufiq-Yap, "Waste ostrich-and chicken-eggshells as heterogeneous base catalyst for biodiesel production from used cooking oil: Catalyst characterization and biodiesel yield performance," *Applied Energy*, vol. 160, pp. 58-70, 2015.
- [57] M. D. I. Putra, C. Udiantoro, Ristianingsih, Y. and Nata, I. F. , "A cleaner process for biodiesel production from waste cooking oil using waste materials as a heterogeneous catalyst and its kinetic study," *J. Clean. Prod.*, vol. 195, pp. 1249-1258, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.010.
- [58] A. M. Rabie, M. Shaban, M. R. Abukhadra, R. Hosny, S. A. Ahmed, and N. A. Negm, "Diatomite supported by CaO/MgO nanocomposite as heterogeneous catalyst for biodiesel production from waste cooking oil," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 279, pp. 224-231, 2019.
- [59] M. T. Helmi, K. Hemmati, A. azar, P. A. and Safekordi, A. , "Phosphomolybdic acid/graphene oxide as novel green catalyst using for biodiesel production from waste cooking oil via electrolysis method: Optimization using with response surface methodology (RSM)," *Fuel*, vol. 287, p. 119528, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119528.
- [60] O. Sahu, "Characterisation and utilization of heterogeneous catalyst from waste rice-straw for biodiesel conversion," *Fuel*, vol. 287, p. 119543, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119543.
- [61] M. M. A.-S. Naem, E. G. Boffito, D. C. Gadalla, M. A. and Ashour, F. H. , "One-pot conversion of highly acidic waste cooking oil into biodiesel over a novel bio-based bi-

- functional catalyst," *Fuel*, vol. 283, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.118914.
- [62] S. W. Yahya, S.K.M. and Harun, F. W. , "Optimization of biodiesel production from waste cooking oil using Fe-Montmorillonite K10 by response surface methodology," *Renew. Energy*, vol. 157, pp. 164–172, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.04.149.
- [63] N. Y. N. Yahya, N. Jusoh, M. and Halim, N. A. A. , "Characterization and parametric study of mesoporous calcium titanate catalyst for transesterification of waste cooking oil into biodiesel," *Energy Convers. Manag*, vol. 129, pp. 275–283, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.10.037.
- [64] M. Guo *et al.*, "Process optimization of biodiesel production from waste cooking oil by esterification of free fatty acids using La³⁺/ZnO-TiO₂ photocatalyst," *Energy Conversion and Management*, vol. 229, p. 113745, 2021.
- [65] P. Pradhan, S. Chakraborty, and R. Chakraborty, "Optimization of infrared radiated fast and energy-efficient biodiesel production from waste mustard oil catalyzed by Amberlyst 15: Engine performance and emission quality assessments," *Fuel*, vol. 173, pp. 60–68, 2016.
- [66] M. D. Jyoti, A. Das, V. Bhuyan, N. and Deka, D. , "Transesterification of waste cooking oil for biodiesel production catalyzed by Zn substituted waste egg shell derived CaO nanocatalyst," *Fuel*, vol. 242, pp. 345–354, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.01.060.
- [67] N. F. H. Sulaiman, A.N.N. Toemen, S. Rosid, S.J.M. Mokhtar, W.N.A.W. Nadarajan, R. Bakar, W.A.W., "Biodiesel production from refined used cooking oil using co-metal oxide catalyzed transesterification," *Renew. Energy*, vol. 153, pp. 1–11, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.01.158.

- [68] A. B. Bayat, M. and Bidhendi, G. N. , "Tailored magnetic nano-alumina as an efficient catalyst for transesterification of waste cooking oil: Optimization of biodiesel production using response surface methodology," *Energy Convers. Manag.*, vol. 177, pp. 395-405, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.09.086.
- [69] R. M. K. Mohamed, G. A. Samad, H. A. A. and Awad, M. E. , "High operative heterogeneous catalyst in biodiesel production from waste cooking oil," *Egypt. J. Pet.*, vol. 29, pp. 59-65, 2020, doi: 10.1016/j.ejpe.2019.11.002.
- [70] B. H. G. Jume, M. A. Nodeh, H.R. Rezania, S. and Cho, J. , "Biodiesel production from waste cooking oil using a novel heterogeneous catalyst based on graphene oxide doped metal oxide nanoparticles," *Renew. Energy*, vol. 162, pp. 2182-2189, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.10.046.
- [71] I. B. Laskar, K. Rajkumari, R. Gupta, S. Chatterjee, B. Paul, and S. L. Rokhum, "Waste snail shell derived heterogeneous catalyst for biodiesel production by the transesterification of soybean oil," *RSC advances*, vol. 8, no. 36, pp. 20131-20142, 2018.
- [72] J. Milano *et al.*, "Optimization of biodiesel production by microwave irradiation-assisted transesterification for waste cooking oil-Calophyllum inophyllum oil via response surface methodology," *Energy conversion and management*, vol. 158, pp. 400-415, 2018.
- [73] A. S. Silitonga *et al.*, "Optimization of Cerbera manghas biodiesel production using artificial neural networks integrated with ant colony optimization," *Energies*, vol. 12, no. 20, p. 3811, 2019.
- [74] K. Hasni, Z. Ilham, S. Dharma, and M. Varman, "Optimization of biodiesel production from Brucea javanica seeds oil as novel non-edible feedstock using response

- surface methodology," *Energy Conversion and Management*, vol. 149, pp. 392-400, 2017.
- [75] A. Silitonga *et al.*, "Intensification of Reutealis trisperma biodiesel production using infrared radiation: Simulation, optimisation and validation," *Renewable Energy*, vol. 133, pp. 520-527, 2019.
- [76] A. Silitonga, H. Masjuki, H. C. Ong, T. Yusaf, F. Kusumo, and T. Mahlia, "Synthesis and optimization of Hevea brasiliensis and Ricinus communis as feedstock for biodiesel production: A comparative study," *Industrial Crops and Products*, vol. 85, pp. 274-286, 2016.
- [77] A. Silitonga, H. Masjuki, H. C. Ong, F. Kusumo, T. Mahlia, and A. Bahar, "Pilot-scale production and the physicochemical properties of palm and Calophyllum inophyllum biodiesels and their blends," *Journal of Cleaner Production*, vol. 126, pp. 654-666, 2016.
- [78] A. Sebayang *et al.*, "Modelling and prediction approach for engine performance and exhaust emission based on artificial intelligence of sterculia foetida biodiesel," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 8333-8345, 2022.
- [79] F. Anwar, U. Rashid, M. Ashraf, and M. Nadeem, "Okra (Hibiscus esculentus) seed oil for biodiesel production," *Applied Energy*, vol. 87, no. 3, pp. 779-785, 2010.
- [80] R. Shobana, S. Vijayalakshmi, B. Deepanraj, and J. Ranjitha, "Biodiesel production from Capparis spinosa L seed oil using calcium oxide as a heterogeneous catalyst derived from oyster shell," *Materials Today: Proceedings*, vol. 80, pp. 3216-3220, 2023.
- [81] A. Sebayang *et al.*, "Optimization of biodiesel production from rice bran oil by ultrasound and infrared radiation using ANN-GWO," *Fuel*, vol. 346, p. 128404, 2023.

- [82] S. C. Iweka, O. A. Falowo, A. A. Amosun, and E. Betiku, "Optimization of microwave-assisted biodiesel production from watermelon seeds oil using thermally modified kwale anthill mud as base catalyst," *Heliyon*, vol. 9, no. 7, 2023.

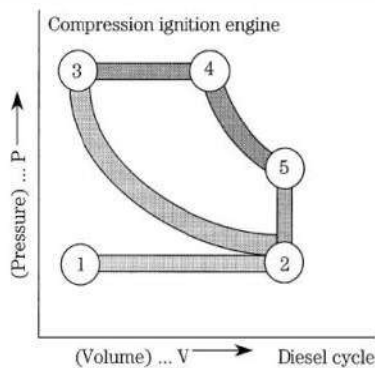
BAB VI

Performansi Mesin dengan Berbagai Jenis Biodiesel

A. Mesin Diesel

Mesin diesel adalah salah satu jenis mesin penyalan kompresi yang menggunakan bahan bakar solar [1]. Mesin diesel adalah jenis mesin yang menggunakan proses pembakaran dalam untuk mengubah energi yang tersimpan dalam ikatan kimia bahan bakar menjadi energi mekanik. Pertama sekali, bahan bakar bereaksi secara kimia (terbakar) dan melepaskan energi dalam bentuk panas. Kemudian panas menyebabkan gas yang terperangkap di dalam silinder memuai, dan gas yang memuai, dibatasi oleh silinder, menggerakkan piston untuk mengembang. Gerak bolak-balik dari piston kemudian diubah menjadi gerak rotasi oleh poros engkol [2].

Untuk mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi mekanik semua mesin pembakaran dalam harus melalui empat peristiwa yaitu proses masuk, kompresi, kerja, dan buang. Mesin diesel dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu mesin siklus dua langkah atau empat langkah. Dalam kasus mesin siklus empat langkah, mesin membutuhkan empat langkah piston (masuk, kompresi, kerja, dan buang) untuk menyelesaikan satu siklus penuh. Oleh karena itu, diperlukan dua putaran poros engkol, atau 720° rotasi poros engkol ($360^\circ \times 2$) untuk menyelesaikan satu siklus. Dalam mesin siklus dua langkah peristiwa (masuk, kompresi, daya, dan buang) terjadi hanya dalam satu putaran poros engkol, atau 360° [2].

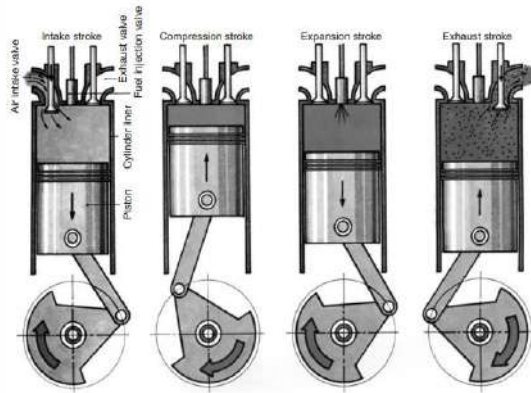


Gambar 6.1 Siklus Mesin Diesel [3]

Proses

- 1-2 : proses masuk
- 2-3 : proses kompresi
- 3-4 : proses kerja pada tekanan konstan
- 4-5 : proses ekspansi
- 5-2-1 : proses buang

Mesin diesel empat langkah beroperasi seperti ditunjukkan pada Gambar 6. 2. Udara, masuk di sekitar katup masuk yang terbuka, mengisi silinder saat piston jatuh pada langkah hisap. Katup menutup saat piston berputar bdc pada langkah kompresi. Piston naik, mengompresi dan memanaskan udara ke suhu pengapian. Injeksi dimulai terjadi dekat TDC pada langkah kompresi dan berlanjut sekitar 40° dari putaran poros engkol. Bahan bakar menyala, mendorong piston ke bawah di lubang pada proses ekspansi, atau power stroke. Katup buang terbuka dan piston naik pada langkah buang, membersihkan silinder dari gas sisa. Ketika piston kembali mencapai tdc, siklus empat langkah selesai (dua putaran poros engkol) [3]. Adapun proses kerja pada mesin diesel sebagaimana dijelaskan pada gambar (Gbr. 6. 2).



Gambar 6.2 Siklus Empat Langkah Pada Mesin Diesel [3]

Mesin diesel adalah penggerak utama yang signifikan untuk penggunaan yang sangat efisien dalam industri, pembangkit listrik dan transportasi. Sektor transportasi mengakibatkan dampak sekitar 22% dari total emisi gas rumah kaca di seluruh dunia [4]. Biodiesel dapat dianalisis dengan mempertimbangkan banyak faktor seperti: karakteristik kinerja, pembakaran dan emisi [5]. Pengetahuan tentang sifat termodinamika biodiesel dan sifat turunannya menjadi sangat penting tidak hanya untuk mengembangkan proses produksi dan pemurnian biodiesel yang optimal, tetapi juga untuk meningkatkan kinerja biodiesel di mesin [6]. Cheung et.al [7] menyebutkan bahwa peningkatan biodiesel dalam bahan bakar atau penurunan beban mesin, fraksi massa volatil dari partikulat meningkat dan suhu pengapian jelaga menurun. Pengaruh beberapa parameter pada kinerja mesin dengan karakteristik emisi dan karakteristik pembakaran dari biodiesel akan dijelaskan pada bagian berikut.

B. Efisiensi Volumetrik

Efisiensi volumetris merupakan perbandingan antara udara yang dapat dihisap piston terhadap volume ruang bakar yang tersedia. Efisiensi volumetris dapat dihitung menggunakan persamaan 6.1 di bawah ini:

$$\eta_v = \frac{2\dot{m}a}{60n} \times \frac{1}{\rho_a V_s} \quad (6.1)$$

Dimana:

η_v = Efisiensi volumetris

ρ_a = Kerapatan udara (kg/m³)

V_s = Volume langkah torak (m³)

= pada spesifikasi mesin 0,00023m³

Jenis udara diperoleh dengan persamaan 2.2 dibawah ini :

$$\rho_a = \frac{Pa}{RTa} \quad (6.2)$$

dimana :

R= Konstanta gas (untuk udara = 287 J/Kg.k)

Dengan memasukkan nilai tekanan dan temperature udara yaitu sebesar 100 kPa dan pada temperatur 27°C, maka didapat massa jenis udara sebesar :

C. Daya Poros (Brake Power/ BP)

Daya total yang dibangkitkan oleh mesin pada poros keluaran disebut Daya Rem (Brake Power/ BP). Hal ini juga bisa didefinisikan sebagai total energi yang dihasilkan per detik oleh mesin. BP berbanding lurus dengan harga BTE [5]. Chuah dkk, [8] menemukan bahwa tren serupa pada harga BP campuran biodiesel dan bahan bakar diesel, yang meningkat seiring dengan kecepatan mesin yang meningkat pula dari 1.000 rpm hingga mencapai nilai maksimum pada 1.900 rpm. Di luar kecepatan mesin ini, harga BP menurun karena efek gaya gesekan yang lebih tinggi. Hal ini dapat dikaitkan dengan kandungan energi yang lebih rendah, densitas dan viskositas biodiesel yang lebih tinggi

daripada bahan bakar diesel, yang menghasilkan efisiensi pembakaran, atomisasi yang buruk dan pembentukan campuran yang buruk.

Chuah dkk. [8] mengkalim bahwa semua campuran biodiesel yang diuji cenderung memberikan torsi maksimum yang lebih rendah pada kecepatan mesin yang rendah 1.150 rpm dibandingkan dengan bahan bakar diesel. Hal ini terutama disebabkan oleh penurunan nilai kalor yang lebih rendah dari biodiesel. Kandungan Oksigen yang lebih tinggi pada WCOME juga menyebabkan penurunan torsi dibandingkan dengan bahan bakar diesel

Daya poros merupakan daya yang didapatkan dari poros mesin atau disebut sebagai daya poros yang digunakan untuk mengatasi beban sebuah kendaraan. Menurut Jrai et.al [9] untuk menghitung daya mesin (the engine brake power/ bp) dapat dihitung:

$$B.P = \frac{2\pi \times N \times T}{60000} \quad (6.3)$$

Dimana :

B.P = Daya poros (kW)

T= Torsi (Nm)

N = Besar putaran (rpm)

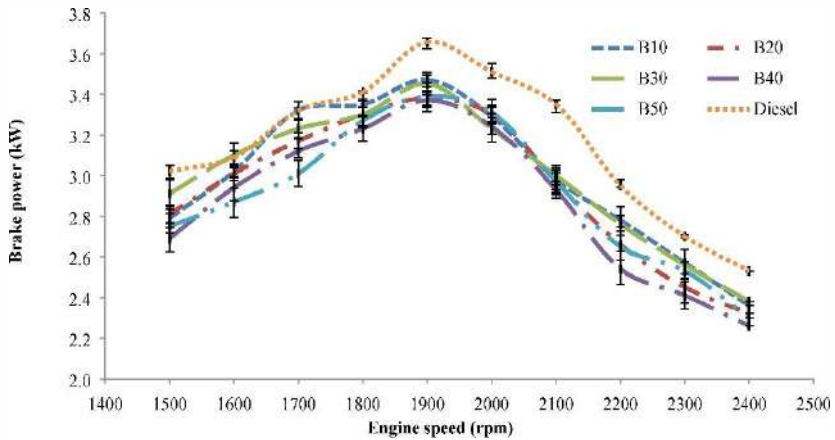
Efisiensi η (%) dapat dihitung menggunakan rumus dibawah

$$\eta(\%) = \frac{P(kW)}{m_{fuel}(\frac{kg}{s}) \times LHV_{fuel}(\frac{kJ}{kg})} \quad (6.4)$$

Banyak penelitian yang telah dipublikasikan terkait untuk menguji pengaruh rasio biodiesel didalam solar terhadap nilai BP dari berbagai jenis biodiesel. Sebagian besar menunjukkan tren penurunan daya poros ketika rasio biodiesel didalam solar dibanding ditingkatkan terutama ketika kandungan biodiesel lebih dari 10%. Sebagai contoh Dharma dkk [10] menguji biodiesel

dari campuran *Jatropha curcas* dan *ceiba pentandra*. Variasi daya rem campuran biodiesel-diesel dengan persentase volume biodiesel J50C50 yang berbeda diuji menggunakan mesin diesel injeksi langsung satu silinder ditunjukkan pada gambar (6.3). Dari hasil tersebut terlihat bahwa variasi tenaga rem sebagai fungsi kecepatan mesin adalah serupa untuk semua bahan bakar yang diuji dalam penelitian ini. Terbukti bahwa pencampuran biodiesel J50C50 dengan bahan bakar diesel menurunkan daya rem, meskipun penurunannya tidak terlalu signifikan. Daya rem tertinggi dicapai pada bahan bakar solar sebesar 3,7 kW. Penambahan biodiesel J50C50 menurunkan daya rem, meski penurunannya tidak terlalu signifikan. Daya rem campuran B10, B20, B30, B40, dan B50 mengalami penurunan masing-masing sebesar 5,41, 8,11, 5,41, 8,11 dan 8,11% dibandingkan bahan bakar solar.

Selain itu, tenaga rem meningkat seiring dengan bertambahnya putaran mesin, dimana tenaga rem mencapai nilai maksimum pada putaran mesin 1900 rpm, diikuti dengan penurunan pada putaran mesin yang lebih tinggi. Menurut Andkk. [11], penambahan metil ester minyak jelantah sebanyak 10% menghasilkan daya rem yang paling tinggi, dengan nilai yang sebanding dengan bahan bakar solar. Namun, daya rem menurun seiring dengan peningkatan persentase volume biodiesel dalam campuran. Berkurangnya daya rem disebabkan oleh gaya gesek, pembentukan campuran yang buruk, serta viskositas dan densitas biodiesel yang lebih tinggi. Semakin tinggi viskositas dan rendahnya nilai kalor biodiesel mengakibatkan karakteristik pembakaran tidak merata sehingga menurunkan daya rem mesin [10]



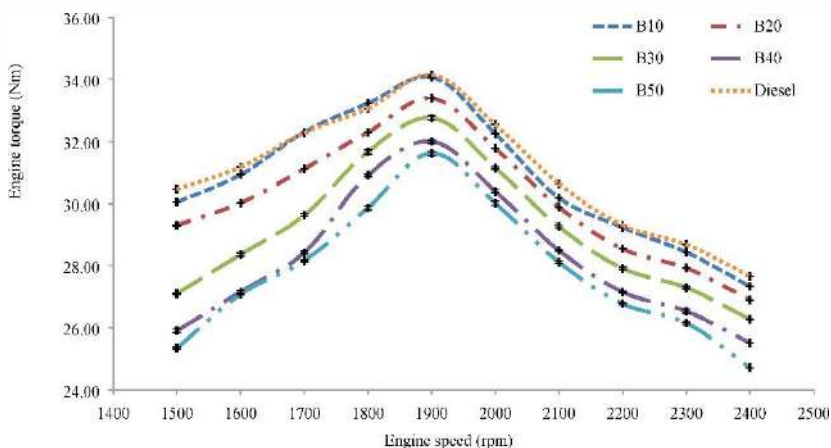
Gambar 6.3 Variasi daya rem pada campuran biodiesel-diesel dengan persentase biodiesel J50C50 yang berbeda pada beban penuh dan berbagai putaran mesin [10].

D. Torsi Mesin

Variasi torsi mesin untuk campuran biodiesel-diesel J50C50 dalam rentang kecepatan mesin 1500–2400 rpm ditunjukkan pada gambar (6.4). Terlihat dari hasil torsi mesin yang semakin meningkat seiring dengan bertambahnya putaran mesin hingga mencapai nilai maksimum, kemudian diikuti oleh penurunan seiring dengan bertambahnya putaran mesin. Torsi mesin tertinggi untuk bahan bakar solar, yakni sebesar 34,15 Nm pada putaran 1900 rpm. Torsi mesin campuran B10 (34,07 Nm) mendekati diesel pada putaran mesin yang sama. Terlihat juga bahwa torsi mesin maksimum untuk semua bahan bakar yang diuji pada putaran mesin 1900 rpm. Pada kecepatan tersebut torsi mesin campuran B20, B30, B40, dan B50 lebih kecil dibandingkan torsi mesin solar masing-masing sebesar 2,23, 4,07, 6,30, 7,41%.

Secara umum, nilai torsi mesin untuk campuran bahan bakar biodiesel-diesel J50C50 lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar diesel. Hal ini disebabkan karena biodiesel memiliki viskositas yang lebih tinggi, volatilitas yang lebih rendah, dan

molekul yang lebih berat. Akibatnya, campuran bahan bakar biodiesel-diesel akan menguap lebih lambat dan lebih sulit terbakar dibandingkan dengan bahan bakar diesel. Viskositas bahan bakar yang lebih tinggi mengurangi jumlah bahan bakar yang dimasukkan ke dalam pompa oli dan efisiensi volumetrik mesin tetap rendah sehingga menurunkan torsi mesin. Selain itu, nilai kalor bahan bakar merupakan salah satu sifat yang menentukan torsi mesin. Peningkatan persentase volume biodiesel dalam campuran bahan bakar biodiesel-diesel akan menurunkan nilai kalor bahan bakar yang dihasilkan, yang selanjutnya menurunkan torsi mesin [10]



Gambar 6.4 Variasi torsi mesin untuk campuran biodiesel-diesel dengan persentase biodiesel J50C50 yang berbeda pada beban penuh dan berbagai putaran mesin [10].

E. Efisiensi Termal (Brake Thermal Efficiency/BTE)

Brake Thermal Efficiency (BTE) didefinisikan sebagai rasio energi mekanik yang dihasilkan oleh mesin dengan energi panas total dipasok. BTE sangat tergantung pada nilai kalor, densitas dan viskositas bahan bakar [5]. Ada banyak penelitian yang berfokus pada efek biodiesel pada karakteristik pembakaran,

kinerja dan emisi mesin diesel. Sebagian besar literatur menunjukkan bahwa tidak ada perubahan signifikan dalam efisiensi termal rem (BTE) saat menggunakan biodiesel. Kannan dan Anand [12] meneliti pengaruh tekanan injeksi dan waktu injeksi pada mesin diesel DI berbahan bakar biodiesel dari Minyak Goreng Bekas. Efek gabungan dari tekanan injeksi yang lebih tinggi dari 280 bar dan waktu injeksi lanjutan dari 25,5 obTDC memiliki peningkatan yang signifikan dalam efisiensi termal rem. Nilai BTE meningkat dengan meningkatnya beban mesin dari 0,16 menjadi 0,65 MPa, tetapi menurun dari 0,65 menjadi 0,73 MPa. Penurunan BTE pada beban sangat berat (0,73 MPa) disebabkan oleh pembakaran tidak sempurna yang dihasilkan oleh rasio bahan bakar-udara yang sangat tinggi [13].

Dalam hal kinerja, penambahan bahan bakar nabati ke dalam bahan bakar diesel umumnya meningkatkan konsumsi bahan bakar spesifik rem (BSFC) tetapi mengurangi efisiensi termal rem (BTE) [5]. Hasil serupa menunjukkan bahwa BTE mempunyai tren meningkat dengan peningkatan beban mesin sebagai akibat dari tren penurunan BSFC. Secara umum, BTE mesin berbahan bakar campuran menurun dengan kandungan biodiesel [14]. Muvva et.al [15] membandingkan solar dan Campuran bahan bakar campuran 80% solar, 20% biodiesel Minyak Goreng Bekas, dan nanopartikel alumina 100 mg/ml. Mereka menyimpulkan bahwa efisiensi termal rem menunjukkan perbedaan yang sangat kecil antara bahan bakar yang diuji. Variasi tersebut terjadi karena meningkatnya viskositas dan rendahnya nilai kalor bahan bakar campuran WCO.

Efisiensi Termal diartikan sebagai rasio panas yang setara dengan daya poros terhadap energi panas yang disuplai oleh bahan bakar selama periode waktu tertentu.

Persamaan efisiensi termal poros dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$BTE = \frac{BP}{mf \times Q_{LHV}} \times 3600 \times 100\% \quad (6.5)$$

Dimana :

BTE = Efisiensi termal poros (%)

BP = Daya poros (kW)

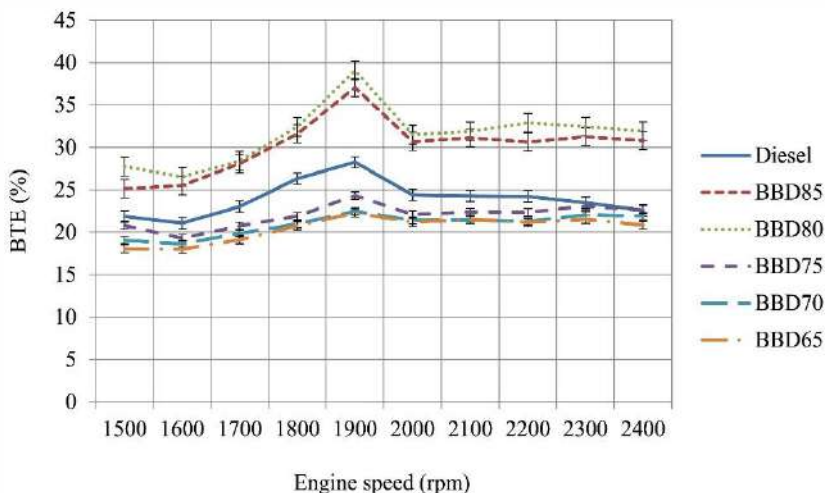
(mf) = Massa bahan bakar per jam (kg/h)

Q_{LHV} = Nilai kalor bawah (kJ/kg)

V_f = Volume bahan bakar per jam (kg/h)

ρ_f = Densitas bahan bakar (g/cm³)

BTE campuran biodiesel-bioetanol-diesel pada kecepatan mesin 1500–2400 rpm ditunjukkan pada Gambar (6.5) . Terlihat BTE campuran BBD85 dan BBD80 maksimum pada putaran mesin 1900 rpm dengan nilai masing-masing sebesar 37 dan 39%. Hal ini dapat disebabkan oleh penambahan bioetanol ke dalam campuran bahan bakar, yang mengurangi kepadatan bahan bakar yang dihasilkan. Pencampuran meningkatkan karakteristik semprotan bahan bakar dan meningkatkan penundaan pengapian , yang menghasilkan BTE lebih. Selain itu, kandungan oksigen yang lebih tinggi karena adanya bioetanol meningkatkan pembakaran yang dikontrol difusi serta meningkatkan pelumasan campuran biodiesel-bioetanol-diesel. BTE lebih rendah untuk campuran BBD70 dan BBD65 pada putaran 1900 rpm, dengan nilai masing-masing sebesar 22,5 dan 22,3%, dibandingkan dengan campuran BD75 (24,3%). Panas laten penguapan bioetanol yang lebih tinggi memberikan efek pendinginan, yang mengurangi BTE untuk campuran BBD70 dan BBD65. Selain itu, diamati bahwa viskositas kinematik yang lebih rendah memfasilitasi pembentukan campuran yang buruk pada campuran, yang menyebabkan pembakaran tidak sempurna , dan ini mengurangi efisiensi volumetrik untuk campuran BBD70 dan BBD65.



Gambar 6.5 Efisiensi termal rem dari campuran biodiesel-bioetanol-diesel dalam rentang kecepatan mesin 1500–2400 rpm [16].

F. Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (Brake-Specific Fuel Consumption/ BSFC)

Konsumsi bahan bakar spesifik rem (BSFC) adalah massa aktual bahan bakar yang dikonsumsi untuk menghasilkan 1 kilowatt (kW) output daya dalam satu jam [17, 18]. BSFC merupakan indikator hilangnya nilai kalor [8]. Yesilyurt et.al [19] menyebutkan semakin banyak bahan bakar yang dikonsumsi di dalam silinder karena nilai kalor biodiesel yang lebih rendah. Faktor paling signifikan yang mempengaruhi BSFC adalah densitas dan viskositas bahan bakar. Umumnya menggunakan biofuel menghasilkan BSFC yang lebih tinggi daripada Bahan bakar Solar. Karena biofuel memiliki kepadatan yang lebih tinggi dan lebih rendah nilai kalor dari bahan bakar Solar, peningkatan BSFC terlihat jelas perbedaannya [20].

Pengaruh biodiesel pada performa mesin bergantung pada hubungan antara sistem injeksi bahan bakar dan sifat bahan bakar seperti kandungan oksigen, viskositas, nilai kalor, kepadatan dan lain-lain. Biodiesel memiliki kepadatan yang lebih tinggi dari

diesel [5]. Maka massa bahan bakar lebih tinggi biodiesel diinjeksikan dalam durasi injeksi yang sama, menghasilkan lebih banyak konsumsi bahan bakar (BSFC) [5]. Yesilyurt et.al [19] menyebutkan bahwa BSFC biodiesel dan campurannya diperoleh lebih tinggi daripada solar. BSFC minimum bahan bakar diesel diamati pada tekanan injeksi bahan bakar 190 bar. Demikian pula, penelitian lain juga melaporkan BSFC yang lebih tinggi diamati dengan membandingkan bahan bakar campuran dan biodiesel murni karena nilai kalor biodiesel yang lebih rendah dibandingkan dengan diesel. BTE meningkat dengan meningkatnya beban mesin dari 0,16 menjadi 0,65 MPa [13]. Can et al [14] menemukan bahwa penambahan bahan bakar biodiesel 5% dan 10% menghasilkan sedikit peningkatan pada BSFC (hingga 4%). BSFC memiliki kecenderungan menurun dengan bertambahnya beban mesin. Peningkatan BSFC dapat dijelaskan dengan nilai kalor bahan bakar biodiesel yang lebih rendah, yaitu sekitar 10,5% lebih rendah dari bahan bakar diesel karena kandungan oksigen. Reddy et.al [21] melaporkan bahwa ketika beban meningkat, BSFC menurun pada campuran B20 biodiesel Minyak Goreng Bekas yang ditambahkan nanopartikel CaO sebagai aditif.

Konsumsi bahan bakar spesifik adalah jumlah bahan bakar yang digunakan untuk menghasilkan daya selama satu jam. Menurut Wei et.al [13] Konsumsi bahan bakar spesifik (Brake specific fuel consumption/ BSFC) dapat dihitung melalui persamaan (6.6):

$$BSFC = \frac{\dot{m}_f}{BP} \quad (6.6)$$

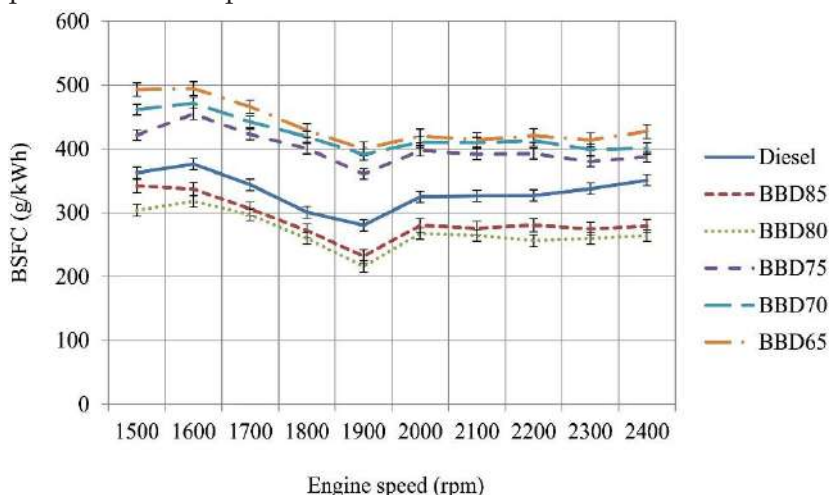
Dimana :

(mf) = Massa bahan bakar per jam (kg/h)

BP = Daya poros (kW)

BSFC = Konsumsi Bahan bakar spesifik (kg/kWh)

BSFC merupakan indikator efisiensi pembakaran karena mencerminkan jumlah bahan bakar yang diubah menjadi tenaga kuda tertentu. Gambar (6.6) menunjukkan BSFC campuran biodiesel-bioetanol-diesel untuk rentang putaran mesin 1500–2400 rpm. Jelas terlihat bahwa BSFC menurun pada 1900 rpm untuk semua bahan bakar yang diuji dalam penelitian ini. BSFC ditemukan sebesar 232,1, 215,9, 360,8, 391,3, dan 400,1 g/kWh masing-masing untuk campuran BBD85, BBD80, BBD75, BBD70, dan BBD65, pada kecepatan mesin ini. Terlihat bahwa BSFC lebih rendah untuk campuran BBD85 dan BBD80 dibandingkan dengan diesel. Hal ini disebabkan oleh nilai kalor bioetanol yang lebih rendah serta viskositas kinematik biodiesel yang lebih tinggi. Kandungan oksigen dalam bioetanol (35,1%) meningkatkan pembakaran campuran biodiesel-bioetanol-diesel.



Gambar 6.6 Konsumsi bahan bakar spesifik rem dari campuran biodiesel-bioetanol-diesel dalam kisaran kecepatan mesin 1500–2400 rpm [16].

Secara umum, etanol membutuhkan lebih banyak panas agar dapat menguap di dalam silinder selama langkah hisap dan kompresi. Oleh karena itu, suhu silinder menurun dan ini mengurangi kerja kompresi. Sebaliknya, penambahan 20 dan 25

%vol. Biodiesel (campuran BBD70 dan BBD65) meningkatkan BSFC karena biodiesel memiliki nilai kalor yang lebih rendah dibandingkan dengan solar. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa persentase volume biodiesel yang lebih tinggi dalam campuran bahan bakar menghasilkan lebih banyak bahan bakar yang diinjeksikan ke dalam silinder untuk mencapai kinerja mesin yang sama dengan kinerja mesin diesel. Selain itu, BSFC lebih tinggi pada kecepatan mesin yang lebih tinggi karena peningkatan kerugian gesekan dan penurunan efisiensi volumetrik.

G. Tekanan Efektif Rata-Rata (Mean Effective Pressure/ MEP)

Ukuran kinerja dari mesin yang relatif sangat lebih berguna adalah diperoleh dengan membagi kerja per siklus dengan volume silinder yang dipindahkan per siklus. Parameter yang diperoleh memiliki satuan gaya per satuan luas dan disebut tekanan efektif rata-rata (MEP). Heywood [22] menyebutkan, untuk menghitung nilai MEP dapat menggunakan persamaan (6.7) berikut:

$$MEP = \frac{BP (kW) \times n_c}{V_d \times n} (kPa) \quad (6.7)$$

BP : daya poros (kW)

n_c : jumlah putaran poros engkol per kerja (nilai $n = 2$ untuk diesel 4 tak)

n : kecepatan mesin (rpm)

V_d : volume perpindahan (m^3)

Secara umum peningkatan kecepatan mesin menunjukkan perubahan kurang signifikan terhadap nilai MEP. Pulkrabek dkk. [23] menyebutkan daya mesin yang dihasilkan akan lebih besar jika kecepatan mesin dan MEP ditingkatkan. Kecepatan mesin memainkan peran penting dalam menentukan tekanan efektif

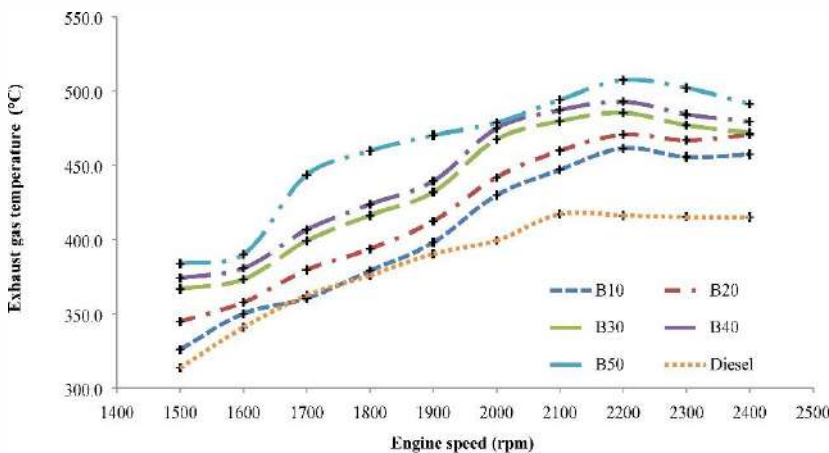
rata-rata pada mesin diesel. Penting untuk mengoperasikan mesin dalam rentang kecepatan yang dirancang untuk menyeimbangkan output daya dan efisiensi secara efektif. Faktor-faktor seperti beban dan waktu injeksi juga berinteraksi dengan kecepatan mesin untuk mempengaruhi MEP.

H. Suhu Gas Buang

EGT merupakan parameter yang mencerminkan kualitas pembakaran pada ruang bakar berbentuk silinder. EGT yang lebih tinggi menunjukkan bahwa jumlah bahan bakar yang dibutuhkan lebih banyak untuk menghasilkan tenaga yang lebih besar pada mesin guna mengatasi beban mesin tambahan. Selain itu, EGT berhubungan langsung dengan rasio udara/bahan bakar, yang menjelaskan mengapa rasio udara/bahan bakar diesel yang lebih tinggi menghasilkan EGT yang lebih tinggi. Variasi EGT untuk campuran biodiesel-diesel dengan persentase volume biodiesel J50C50 yang berbeda pada rentang putaran mesin 1500-2400 rpm pada kondisi beban penuh ditunjukkan pada gambar (6.7).

Secara umum EGT meningkat seiring dengan peningkatan putaran mesin hingga 2200 rpm, namun terdapat sedikit penurunan EGT pada putaran mesin yang lebih tinggi. Tampak jelas bahwa EGT lebih rendah untuk bahan bakar diesel dibandingkan dengan campuran biodiesel-diesel J50C50 dalam kisaran kecepatan mesin yang diselidiki dalam penelitian ini. EGT maksimum untuk solar adalah 416,2 °C. EGT untuk campuran B10, B20, B30, B40, dan B50 masing-masing meningkat sebesar 10,86, 13,07, 16,60, 18,38, 21,91% dibandingkan dengan EGT untuk solar. Jelas bahwa persentase volume biodiesel J50C50 dalam campuran mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap EGT. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa biodiesel memiliki angka setana yang lebih tinggi, sehingga menghasilkan waktu tunda

penyalaan yang lebih lama dan laju pembakaran yang lebih lambat [10].



Gambar 6.7 Variasi temperatur gas buang untuk campuran biodiesel-diesel dengan persentase biodiesel J50C50 yang berbeda pada beban penuh dan berbagai putaran mesin [10].

Meskipun sifat fisik dan kimia biodiesel mirip dengan minyak solar, biodiesel memiliki volatilitas rendah, viskositas tinggi dan nilai kalori rendah. Oleh karena itu, biodiesel 100% tidak dapat digunakan pada kendaraan dan harus dicampur dengan solar dengan persentase yang berbeda, mulai dari 5% hingga 20% [24].

Konsumsi bahan bakar spesifik rem untuk minyak komposit biodiesel Pongamia dan biodiesel limbah memasak 70:30 campuran B20 lebih tinggi daripada solar karena kandungan energinya lebih rendah dibandingkan semua campuran lainnya. Efisiensi termal rem dari campuran ternary dan diesel sebanding sedangkan Pongamia dan biodiesel limbah memasak memiliki efisiensi yang lebih tinggi [25]. Perubahan Daya, torsi, BSFC, BTE dan emisi dari Biodiesel WCO sebagaimana disajikan pada tabel (6.1)

Tabel 6.1 Perubahan Power, Torsi, BSFC, BTE Dan Emisi Dari Biodiesel

Biodiesel	Blends	Engine Specification		Engine Performance				Emissions					Ref
		cylinder	Compression ratio	Power	Torque	BSFC	BTE	NOx	CO	CO ₂	HC		
WCO	B100	1	-	-	-	↓ 10.52%	↓ 9%	↑ 18%	↓ 20%	↑ 26.67%	↓ 1.111%	[26]	
WCO		2	-	-	-	-	-	-	-	-	↓ 1.283%	[27]	
WCO	B100	1	17.5:1	-	-	↑ 4.2%	15.9%	↑ 9%	↓ 11.4%	↑ 2.1%	↓ 1.50%	[6]	
WCO	B100	1	17.4:1	-	-	-	-	↑ 42.85%	↓ 48.14%	-	↓ 1.00%	[28]	
WCO sunflower	B10	1	18:1	-	-	↑ 4%	12.8%	18.7%	1.7%	15%	-	[14]	
WCO	B100	1	18:1	↓ 25.92%	-	↓ 26.91%	-	-	-	-	-	[29]	
WCO	B30	-	-	↓ 6.70%	↓ 5.2%	↑ 9%	↓ 8.4%	↑ 19%	↓ 26.3%	↑ 38.3%	-	[6]	
WCO		1	17.5:1	-	-	-	-	-	-	-	-	[30]	
WCO	B100	1	17.5:1	-	-	↑ 12.5%	↓ 10%	↑ 20%	↓ 15%	-	↓ 23%	[31]	
WCO	B100	1	18:1	-	-	↑ 38.4%	↓ 26.1%	↑ 10.6%	↓ 44.05%	-	↓ 36.72%	[32]	
WCO	B100	1	17.5:1	-	-	↑ 20.83%	↓ 36.26%	↑ 120%	↓ 8.34%	-	↓ 20%	[33]	
WCO	B20	-	-	-	-	-	-	↑ 7.23%	↓ 24%	-	↓ 37.73%	[34]	
WCO	B100	2	18.5:1	-	-	↑ 27.27%	↓ 7.11%	↑ 1%	↓ 11.11%	↑ 7.33%	↓ 4.7%	[35]	
WCO	B100	1	18:1	-	-	↑ 18.9%	↓ 10%	-	↓ 72.4%	-	↓ 49.5%	[36]	
WCO	B20	1	-	-	-	↑ 12%	↑ 6.25%	-	↓ 14.23%	↓ 20.83%	↓ 67.5%	[37]	
WCO+ Propanol	B10	1	18:1	-	-	↑ 5.26%	-	↑ 16.67%	↓ 16.6%	-	-	[38]	
WCO+ Cso	B20	1	17.5:1	-	-	↑ 12%	↑	↑ 18.14%	↓ 100%	-	↓ 86.56%	[21]	
WCO	B10	4	17:1	-	-	↑ 2%	↓ 6.90%	↑ 4%	↓ 27.27%	↑ 7.14%	↓ 11.11%	[39]	
WCO	B20, B100	1	18:1	-	-	↑ 28%	↓ 3.34%	↑ 35.71%	↓ 33.34%	↑ 17.24%	-	[40]	
WCO	B0, B20, B40, 450	6	-	↓ 5.8%	↓ 4.9%	↑ 9%	↓ 5.9%	↓ 11.11%	↓ 38.8%	↑ 27.27%	-	[6]	
WCO sunflower	B10, B20, B30	1	17.5	-	-	↑ 14.28%	↓ 4.17%	↑ 25%	↓ 50%	↑ 33.24%	↓ 55.55%	[41]	
Pongpy20% WCO	B10	4	22.6	↓ 8.84%	↓ 4.28%	↑ 8.84%	↓ 6.48%	↑ 7.6%	↓ 23.6%	-	↓ 26.6%	[42]	
WCO	B100	1	-	↓ 52.72%	↓ 27.53%	↑ 38.78%	↓ 13%	↑ 5.6%	↓ 42.25%	↑ 49%	↓ 120%	[19]	
WCMO	B100	1	17.5:1	-	-	↑ 5.7%	↓ 17.64%	↑ 10.5%	↓ 34.48%	↑ 50%	↑ 80%	[43]	
WCMO	B100	1	17.5:1	↓ 16%	-	↑ 10.37%	↓ 27.4%	↑ 9.09%	↓ 110.81%	↑ 12%	↓ 99%	[44]	
WCMO	B5, B100	1	-	↓ 4.78%	-	-	-	↑ 28.20%	-	↑ 2.85%	-	[45]	
WCO	B100	4	17.3:1	-	↓ 10.29%	↑ 13.62%	-	↑ 14.01%	↓ 6.66%	-	↓ 170%	[46]	
WCO	B10	1	20:1	-	-	↑ 7.4%	↓ 3.7%	↑ 2%	↓ 80%	-	↓ 188%	[2]	
WCO	B100	1	17.5	-	-	↑ 17.64%	↓ 9.88%	-	-	-	-	[13]	
WCO	B100	1	-	↓ 5.56%	-	↑ 3%	↑ 14.2%	↑ 16.56%	↓ 73.34%	-	↓ 82.24%	[40]	
	B100	1	-	-	-	↑ 10%	↓ 6%	↓ 6%	↓ 25.0%	-	↑ 15%	[49]	
WCO	B10, B20, B30, B100	4	19.0:1	-	-	↑ 16.94%	↓ 5.2%	↑ 18.42%	↓ 44.73%	-	↓ 37.5%	[50]	
Cotton seed	B10	1	-	↓ 6.32%	-	↑ 13.50%	↓ 29.88%	↑ 10.33%	↓ 12.96%	↑ 59.63%	↓ 38.24%	[51]	
Neem seed	B5	4	18:1	↓ 0.550%	-	↑ 6.5%	-	↑ 18.7%	↓ 4.84%	↓ 2.44	↓ 6.48%	[52]	
sterculia foetida	B30	1	17.7:1	-	-	↑ 30.70%	↓ 19.20	↑ 97.50%	↓ 35.56%	↑ 9.57%	↑ 34%	[53]	
Yang-Na (<i>Dipterocarpus Alatus</i>)	B20	4	18:1	↓ 1.48%	-	↑ 3.12%	-	↑ 1.34%	↓ 6.25%	↓ 3.25%	↓ 1.66%	[54]	
Minyak sawit	B20	1	-	↓ 5.31%	-	↑ 7.17%	↓ 17.64%	↑ 7.91%	↓ 13.30%	-	↓ 1.9%	[55]	
Minyak Kelapa	B20	1	20:1	-	-	↑ 4.94%	↓ 30.97%	↑ 8.74%	↓ 0.02%	-	↓ 21.42%	[56]	
Callispyllum hispidum	B10	1	17.7:1	-	-	↑ 16%	↓ 26.57%	↑ 29.4%	↓ 15%	-	↓ 1.22%	[57]	
Bunga Matahari	B20	1	20:1	-	-	↑ 5.32%	↓ 30.56%	↑ 7.32%	↓ 0.04%	-	↓ 25.92%	[56]	
Jatropha curcas													
soybean		1	-	-	-	↑ 8.4%	-	↑ 19.2%	-	-	-	[58]	

Daftar Pustaka

- [1] Q. Xin, "The analytical design process and diesel engine system design," *Diesel engine system design*, pp. 3-112, 2013.
- [2] P. Gilbert Gedeon, "Diesel Engine Fundamentals," *New York: CED*.
- [3] P. Dempsey, *Troubleshooting and repairing diesel engines*. McGraw-Hill Education, 2018.
- [4] N. A. K. Nanihar, F. Hakim, N. Mohamed Sunar, B. Manshoor, and I. Zaman, "Influences of Storage Duration on the Fuel Properties of Biodiesel derived from Jatropha and Waste Cooking Oil," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1049, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1049/1/012091.
- [5] N. D. Nirmala, S. S. and Harindra, C. , "Analysis of performance and emission characteristics of Waste cooking oil and *Chlorella variabilis* MK039712.1 biodiesel blends in a single cylinder, four strokes diesel engine," , vol. , pp. , , doi: , " *Renew. Energy*, vol. 147, pp. 284–292, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.08.133.
- [6] R. Aitbelale, I. Abala, F. E. M. h. Alaoui, A. Sahibed-dine, N. M. Rujas, and F. Aguilar, "Characterization and determination of thermodynamic properties of waste cooking oil biodiesel: Experimental, correlation and modeling density over a wide temperature range up to 393.15 and pressure up to 140 MPa," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 497, pp. 87-96, 2019.
- [7] C. S. M. Cheung, X. J. Fong, K. W. and Tsang, O. K. , "Effect of Waste Cooking Oil Biodiesel on the Emissions of a Diesel Engine," *Phys. Procedia*, vol. 66,, pp. 93–96, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.02.050.
- [8] L. Chuah, A. Aziz, S. Yusup, J. Klemes, and A. Bokhari, "Waste cooking oil biodiesel via hydrodynamic cavitation on a diesel engine performance and greenhouse gas footprint reduction," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 50, pp. 301-306, 2016.
- [9] A. A. Y. Jrai, J. A.; Al-Muhtaseb, A. H. and Hararah, M. A. , "Combustion characteristics and engine emissions of a

- diesel engine fueled with diesel and treated waste cooking oil blends," *Chem. Eng. J.*, vol. 117, pp. 129–136, 2011, doi: 10.1016/j.cej.2011.05.078.
- [10] S. Dharma *et al.*, "Experimental study and prediction of the performance and exhaust emissions of mixed *Jatropha curcas*-*Ceiba pentandra* biodiesel blends in diesel engine using artificial neural networks," *Journal of cleaner production*, vol. 164, pp. 618–633, 2017.
 - [11] H. An, W. Yang, A. Maghbouli, J. Li, S. Chou, and K. Chua, "Performance, combustion and emission characteristics of biodiesel derived from waste cooking oils," *Applied energy*, vol. 112, pp. 493–499, 2013.
 - [12] G. R. a. A. Kannan, R. , "Effect of injection pressure and injection timing on DI diesel engine fuelled with biodiesel from waste cooking oil," *Biomass and Bioenergy*, vol. 46, pp. 343–352, 2012, doi: 10.1016/j.biombioe.2012.08.006.
 - [13] L. C. Wei, C. S. and Ning, Z. , "Influence of waste cooking oil biodiesel on combustion, unregulated gaseous emissions and particulate emissions of a direct-injection diesel engine," *Energy*, vol. 127, pp. 175–185, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.03.117.
 - [14] Ö. Can, "Combustion characteristics, performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with a waste cooking oil biodiesel mixture," *Energy Convers. Manag.*, vol. 87, pp. 676–686, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.07.066.
 - [15] R. T. Muvva, T. and Arunkumar, M. , "Experimental investigation by utilizing nano alumina with waste cooking oil biodiesel fuel in CI engine," *Mater. Today Proc.*, 2020, doi: 0.1016/j.matpr.2020.10.185.
 - [16] A. S. Silitonga *et al.*, "Evaluation of the engine performance and exhaust emissions of biodiesel-bioethanol-diesel blends using kernel-based extreme learning machine," *Energy*, vol. 159, pp. 1075–1087, 2018.
 - [17] C. a. P. Rekhate, A. K. , "Production, engine performance, combustion, emission characteristics and economic feasibility of biodiesel from waste cooking oil: A review,"

- Environ. Qual. Manag.*, vol. 29, pp. 7–35, 2019, doi: 10.1002/tqem.21645.
- [18] A. M. N. N. Zare, Timothy A. Bodisco, Farhad M. Hossain, M.M. Rahman, Zoran D. Ristovski, Richard J. Brown, "The effect of triacetin as a fuel additive to waste cooking biodiesel on engine performance and exhaust emissions," *Fuel*, vol. 182, pp. 640–649, 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2016.06.039.
- [19] M. K. Yesilyurt, "The effects of the fuel injection pressure on the performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with waste cooking oil biodiesel-diesel blends," *Renew. Energy*, vol. 132, pp. 649–666, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.08.024.
- [20] A. M. Sanjid, H. H. Kalam, M. A. Rahman, S. M. A. Abedin, M. J. and Palash, S. M. , "Impact of palm, mustard, waste cooking oil and Calophyllum inophyllum biofuels on performance and emission of CI engine," *Renew. Sustain. Energy Rev*, vol. 27, pp. 664–682, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.07.059.
- [21] M. J. R. Reddy, N. S. Jayaraman, J. Anand, K. V. Appavu, P. and Arunkumar, T. , "Effect of novel bio-waste derived nano particles as additives on the performance of diesel engine fuelled with waste cooking oil biodiesel blends," *Mater. Today Proc*, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.292.
- [22] J. B. Heywood, "Internal combustion engine fundamentals McGraw-hill book company," *New York*, xxix, 1988.
- [23] W. W. Pulkrabek, "Engineering fundamentals of the internal combustion engine," ed, 2004.
- [24] Y. Y. Liu, X. Adamu, A. and Zhu, Z. , "Economic evaluation and production process simulation of biodiesel production from waste cooking oil," " *Curr. Res. Green Sustain. Chem*, vol. 4, p. 100091, 2021, doi: 10.1016/j.crgsc.2021.100091.
- [25] S. R. C. Tilak, K. and Yogish, H. , "Effect of composite biodiesel of Pongamia - Waste cooking oils and its diesel blends on performance and emission characteristics of CI engine," *IEEE Int. Conf. Innov. Mech. Ind. Appl. ICIMIA 2017* pp. 383–387, 2017, doi: 10.1109/ICIMIA.2017.7975641.

- [26] S. E. R. Mahesh, A; Begum, K. M. M. S. and Narayanan, A. , "Biodiesel production from waste cooking oil using KBr impregnated CaO as catalyst," *Convers. Manag.*, vol. 91, pp. 442–450, 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2014.12.031.
- [27] A. A. Elshaib, Kamal, M. M. and Elahwany, A. A., "Performance of a diesel engine fueled by waste cooking oil biodiesel," *J. Energy Inst*, vol. 87, pp. 11–17, 2014, doi: 10.1016/j.joei.2014.02.001.
- [28] J. Q. Hwang, D. Jung, Y. and Bae, C. , "Effect of injection parameters on the combustion and emission characteristics in a common-rail direct injection diesel engine fueled with waste cooking oil biodiesel," *Renew. Energy*, vol. 63, pp. 9–17, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2013.08.051.
- [29] H. P. Maksum, W. and Pulungan, A. B. , "The effect of waste cooking oil biodiesel to the diesel engine performance," *Int. J. GEOMATE*, vol. 17, pp. 245–251, 2019, doi: 10.21660/2019.64.77868.
- [30] S. a. S. Aydin, C. , "Impact of thermal barrier coating application on the combustion, performance and emissions of a diesel engine fueled with waste cooking oil biodiesel-diesel blends," *Fuel*, vol. 136, pp. 334–340, 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2014.07.074.
- [31] M. S. a. I. Gad, M. A., "Effect of waste cooking oil biodiesel blending with gasoline and kerosene on diesel engine performance, emissions and combustion characteristics," *Process Saf. Environ. Prot*, vol. 149, pp. 1–10, 2021, doi: 10.1016/j.psep.2020.10.040.
- [32] S. K. H. Nayak, A. T. Nayak, B. and Mishra, P. C. , "Influence of fish oil and waste cooking oil as post mixed binary biodiesel blends on performance improvement and emission reduction in diesel engine," *Fuel*, vol. 289, p. 119948, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119948.
- [33] M. Gad, A. I. El-Seesy, A. Radwan, and Z. He, "Enhancing the combustion and emission parameters of a diesel engine fueled by waste cooking oil biodiesel and gasoline additives," *Fuel*, vol. 269, p. 117466, 2020.

- [34] S. M. W. M. Akram, Muhammad Danish, Hamid Mukhtar, Ahmad Irfan, Syed Ali Raza, Zhen Wang, Muhammad Arshad, "Impact of cerium oxide and cerium composite oxide as nano additives on the gaseous exhaust emission profile of waste cooking oil based biodiesel at full engine load conditions," *Renew. Energy*, vol. 143, pp. 898–905, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.05.025.
- [35] D. H. Balasubramanian, A. T. Venugopal, I.P. Shanmugam, A.Gao, J. and Wongwuttanasatian, T. , "Numerical and experimental evaluation on the pooled effect of waste cooking oil biodiesel/diesel blends and exhaust gas recirculation in a twin-cylinder diesel engine," *Fuel*, vol. 287, pp. 119815,, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119815.
- [36] S. Chuepeng and C. Komintarachat, "Interesterification optimization of waste cooking oil and ethyl acetate over homogeneous catalyst for biofuel production with engine validation," *Applied Energy*, vol. 232, pp. 728-739, 2018.
- [37] J. M. N. Pauline, R. Sivaramakrishnan, A. Pugazhendhi, T. Anbarasan, and A. Achary, "Transesterification kinetics of waste cooking oil and its diesel engine performance," *Fuel*, vol. 285, p. 119108, 2021.
- [38] K. A. E. A. Bencheikh, Sutha Shobana, M.N. Mohammed, Gediz Uğuz, Orhan Arpa, Gopalakrishnan Kumar, Abdulkadir Ayanoglu, Awais Bokhari, "Fuels properties, characterizations and engine and emission performance analyses of ternary waste cooking oil biodiesel–diesel–propanol blends," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 35, pp. 321–334, 2019, doi: 10.1016/j.seta.2019.08.007.
- [39] G. J. Wu, G. Yang, Z. and Huang, Z. , "Emission characteristics for waste cooking oil biodiesel blend in a marine diesel propulsion engine," ., vol. , no. 4, pp. , , doi: " *Polish J. Environ. Stud*, vol. 28, pp. 2911–2921, 2019, doi: 10.15244/pjoes/92704.
- [40] Ş. U. Yildizhan, E. Çalık, A. Dede,G. and Özcanlı, M. , "Fuel properties, performance and emission characterization of waste cooking oil (WCO) in a variable compression ratio

- (VCR) diesel engine," *Eur. Mech. Sci*, vol. 1, pp. 56–62, 2017, doi: 10.26701/ems.321789.
- [41] K. A. E. M. Abed, A. K.Sayed, M. M. Shaib, A. A. E. and Gad, M. S. , "Effect of waste cooking-oil biodiesel on performance and exhaust emissions of a diesel engine," *Egypt. J. Pet*, vol. 27, pp. 985–989, 2018, doi: 10.1016/j.ejpe.2018.02.008.
- [42] M. R. Bhuiya, M. Khan, M. and Ashwath,N. , "Performance and emission characteristics of binary mixture of poppy and waste cooking biodiesel," *Energy Procedia*, vol. 110, pp. 523–528, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.179.
- [43] A. B. a. Sahabdhenn, A. , "Synthesis and characterization of reusable heteropoly acid nanoparticles for one step biodiesel production from high acid value waste cooking oil - Performance and emission studies," *Mater. Today Proc*, vol. 22, pp. 383–392, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.249.
- [44] A. D. Ranjan, S. S. Jayaprabakar, J. Nirmala, N. Saikiran, K. and Sriram, S. Sai "Experimental investigation on effect of MgO nanoparticles on cold flow properties, performance, emission and combustion characteristics of waste cooking oil biodiesel," *Fuel*, vol. 220, pp. 780–791, 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.02.057.
- [45] M. A. M. Ali *et al.*, "Biodiesel synthesized from waste cooking oil in a continuous microwave assisted reactor reduced PM and NO_x emissions," *Environmental research*, vol. 185, p. 109452, 2020.
- [46] Y. C. Gao, Y. Gu, J. Xin, Z. and Sun,S. , "Butyl-biodiesel production from waste cooking oil: Kinetics, fuel properties and emission performance," *Fuel*, vol. 236, pp. 1489–1495, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2018.09.015.
- [47] Ü. K. Ağbulut, M. Sarıdemir, S. and Öztürk, A. , "Impact of various metal-oxide based nanoparticles and biodiesel blends on the combustion, performance, emission, vibration and noise characteristics of a CI engine," *Fuel*, vol. 270, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117521.
- [48] J. M. Kataria, S. K. and Kundu, K. , "Biodiesel production from waste cooking oil using heterogeneous catalysts and

- its operational characteristics on variable compression ratio CI engine," *J. Energy Inst*, vol. 92, pp. 275–287, 2019, doi: 10.1016/j.joei.2018.01.008.
- [49] A. M. A. a. H. Attia, A. E. , "Influence of diesel fuel blended with biodiesel produced from waste cooking oil on diesel engine performance," *Fuel*, vol. 167, pp. 316–328, 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2015.11.064.
- [50] X. J. C. Man, C. S. Ning, Z. Wei, L. and Huang, Z. H. , "Influence of engine load and speed on regulated and unregulated emissions of a diesel engine fueled with diesel fuel blended with waste cooking oil biodiesel," *Fuel*, vol. 180, pp. 41–49, 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2016.04.007.
- [51] M. Jamshaid, H. Masjuki, M. Kalam, N. Zulkifli, A. Arslan, and A. Qureshi, "Experimental investigation of performance, emissions and tribological characteristics of B20 blend from cottonseed and palm oil biodiesels," *Energy*, vol. 239, p. 121894, 2022.
- [52] B. A. Oni and D. Oluwatosin, "Emission characteristics and performance of neem seed (*Azadirachta indica*) and Camelina (*Camelina sativa*) based biodiesel in diesel engine," *Renewable Energy*, vol. 149, pp. 725-734, 2020.
- [53] A. Sebayang *et al.*, "Modelling and prediction approach for engine performance and exhaust emission based on artificial intelligence of *sterculia foetida* biodiesel," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 8333-8345, 2022.
- [54] C. Sakkampang, K. Sakkampang, P. Suwunnasopha, and S. Poojeera, "Performance, exhaust emission, and wear behavior of a direct-injection engine using biodiesel from Yang-Na (*Dipterocarpus Alatus*) oleoresins," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 7, p. 100328, 2023.
- [55] M. Mosarof *et al.*, "Optimization of performance, emission, friction and wear characteristics of palm and *Calophyllum inophyllum* biodiesel blends," *Energy Conversion and Management*, vol. 118, pp. 119-134, 2016.
- [56] M. M. Niyas and A. Shaija, "Performance evaluation of diesel engine using biodiesels from waste coconut,

- sunflower, and palm cooking oils, and their hybrids," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 53, p. 102681, 2022.
- [57] N. Damanik *et al.*, "The performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with *Calophyllum inophyllum* – Palm biodiesel," *Processes*, vol. 7, no. 9, p. 597, 2019.
- [58] S. Vellaiyan, "Combustion, performance and emission evaluation of a diesel engine fueled with soybean biodiesel and its water blends," *Energy*, vol. 201, p. 117633, 2020.



BAB VII

Emisi Gas Buang

A. Emisi Biodiesel WCO dan Campurannya

Seperti kita ketahui bahwa bahan bakar solar hampir tidak memiliki kandungan oksigen. Di sisi lain, metil ester dan alkohol memiliki kandungan oksigen yang relatif tinggi ($> 10\%$ massa) dibandingkan dengan bahan bakar diesel biasa. Kandungan oksigen yang tinggi dalam bahan bakar campuran biofuel meningkatkan proses pembakaran, yaitu oksigen mendorong bahan bakar untuk pembakaran yang lebih sempurna [1]. Parameter injeksi yang paling penting adalah waktu injeksi, durasi injeksi dan tekanan injeksi [2]. Hasil analisis lingkungan dan ekonomi lingkungan menunjukkan bahwa B100 memberikan hasil terbaik di antara bahan bakar lainnya pada seluruh kondisi operasi mesin [3].

Industri transportasi adalah sumber utama kualitas udara yang buruk, pengasaman, polusi karbon dioksida (CO_2), dan gas rumah kaca [1]. Ini adalah permasalahan utama yang dihadapi negara-negara maju. Telah dipahami dengan baik bahwa industri transportasi mengandung sekitar 20% polusi CO_2 , dengan sektor transportasi jalan raya menjadi salah satu sektor dengan emisi CO_2 tertinggi. Emisi transportasi diperkirakan meningkat tiga kali lipat pada tahun 2030 karena meningkatnya jumlah kendaraan bermotor, serta terus meningkatnya emisi di negara-negara kaya [4].

Emisi gas buang merupakan sisa-sisa hasil dari pembakaran bahan bakar di dalam mesin pembakaran dalam. Standar emisi Euro memiliki pengaruh signifikan dalam mengurangi emisi. Laporan tersebut menyatakan bahwa sejak 1993, tingkat emisi karbon monoksida berkurang sebesar 82% untuk mobil bermesin diesel dan 63% untuk bensin, sementara partikel turun sebesar

96%. Tercatat pula sejak tahun 2001, emisi nitrogen oksida turun 84% dan hidrokarbon turun 50% dalam mobil bermesin bensin.

Partikel asap berwarna hitam keabu-abuan hasil pembakaran dari mesin diesel, hal ini terjadi dikarenakan suplai dari udara yang kurang untuk bersenyawa dengan bahan bakar dan penginjeksian yang tidak tepat yang dikarenakan pembukaan tekanan *injector* yang kurang ditambah lagi beban yang berlebihan. Bila kandungan daripada asap tersebut dalam suatu ruangan mencapai 3000 (*part per million*) dapat membunuh manusia dalam 30 menit, karena sifat dari CO yang dapat menyesuaikan dengan darah manusia dan kandungan CO yang ada pada darah akan menolak oksigen yang dibutuhkan oleh tubuh sehingga tubuh akan kekurangan oksigen.

B. Konsentrasi Particulate Matter (PM)

Bahan partikulat dari emisi gas buang dari minyak solar dapat menyebabkan penyakit pernafasan, gangguan kesehatan paru dan kardiovaskular. Selain itu, materi partikulat dari diesel dan emisi biodiesel dikaitkan dengan karsinogenisitas genotoksisitas, dan mutagenisitas [5]. Zareh et.al [6] menyebutkan biodiesel WCO memiliki penurunan kandungan *Particulate Matter* paling sedikit karena kandungan oksigen lebih sedikit dalam struktur molekulnya. Untuk bahan bakar WCB20 di bawah 100% beban, kandungan PM menurun sebesar 40,06%.

Konsentrasi jejak yang signifikan dari logam Ca, Cu, Fe, K, Mg, Na, Zn, dan Al menunjukkan kehadiran partikulat yang lebih tinggi pada beban mesin 50%, sedangkan Ba, Cd, Cr, Mn dan Mo menunjukkan konsentrasi jejak yang relatif lebih rendah. Konsentrasi kebanyakan logam dalam partikulat ditemukan lebih rendah dari mesin yang berbahan bakar biodiesel, menunjukkan bahwa emisi dari mesin berbahan bakar biodiesel lebih ramah lingkungan dari sudut pandang emisi logam dibandingkan

dengan minyak diesel [7]. Nilai emisi gas buang CO_2 dan NO_x biodiesel ternary (WTC, WCO dan Diesel) lebih tinggi dibanding dengan menggunakan minyak Diesel [8, 9].

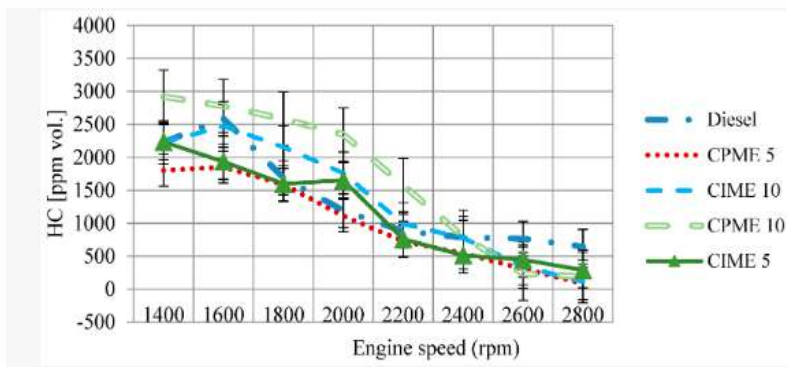
Densitas biodiesel yang lebih tinggi dibanding minyak diesel sebagai penyebab peningkatan angka CO_2 , selain itu sistem injeksi bahan bakar tidak sesuai dengan perubahan densitas [8]. Selain itu Oksigen yang berlebihan saat proses pembakaran berlangsung sebagai penyebab kandungan emisi CO_2 yang lebih tinggi [8, 10]. Kandungan oksigen yang tinggi akan menyusun pembentukan *nitric oxide* (NO), *nitrogen dioxide* (NO_2) dan *nitrous oxide* (N_2O), dalam kimia pembakaran sering disebut sebagai NO_x [10]. Hal ini bertolak belakang dengan pernyataan Hwang et.al [11], dimana peningkatan oksigen dalam proses pembakaran menurunkan emisi NO_x . Peningkatan campuran biodiesel hingga B30 berpengaruh terhadap pengurangan konsentrasi Hydrocarbon (HC) dan Carbon monoksida (CO), akan tetapi meningkatkan konsentrasi dari NO_x [12].

C. Emisi Unburned Hydrocarbon

Hidrogen dan karbon merupakan unsur utama bahan bakar diesel. Pembakaran bahan bakar yang tidak sempurna di dalam ruang bakar mengakibatkan emisi HC. Di sini, suhu campuran udara/bahan bakar jauh lebih rendah daripada suhu bagian tengah ruangan. Mesin diesel biasanya mengeluarkan HC tingkat rendah. Emisi HC sebagian besar terjadi pada beban ringan. Sumber beban ringan dalam emisi HC adalah pencampuran udara-bahan bakar yang buruk. HC yang tidak terbakar biasanya bereaksi di ruang pembuangan pada suhu di atas 650°C dan terdapat oksigen, sehingga emisi HC dari pipa knalpot mungkin jauh lebih rendah dibandingkan HC yang keluar dari silinder [13].

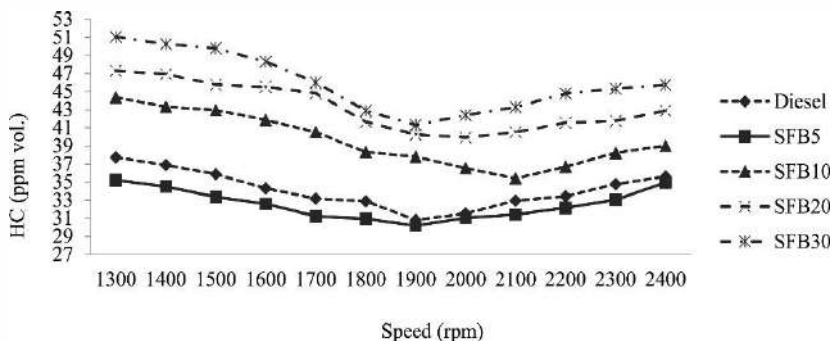
Emisi hidrokarbon (HC) yang tidak terbakar bergantung pada ketersediaan Oksigen. Semakin banyak kandungan Oksigen, semakin rendah emisi HC [14]. Cheung et.al [15] menyelidiki emisi gas dan partikulat dari mesin diesel injeksi langsung 4-silinder yang disedot dengan bahan bakar dengan konsentrasi campuran biodiesel dan bahan bakar diesel yang berbeda. Hasil penelitian menunjukkan bahwa biodiesel mengarah pada pengurangan HC. Hidrokarbon untuk campuran biodiesel lebih rendah dari solar [16]. Emisi hidrokarbon berkurang dengan daya beban yang lebih tinggi dan meningkat dengan konsentrasi biodiesel yang lebih tinggi. Jumlah massa yang bahan bakar biodiesel sulit terbakar karena viskositas biodiesel yang lebih tinggi, dibandingkan dengan minyak solar. Tambahan $Ce_{0.5}Co_{0.5}$ nano-komposit oksida (100 ppm) digunakan sebagai aditif, akan mengurangi emisi gas buang CO sebesar 24,18% [17].

Perbandingan emisi HC antar sampel bahan bakar biodiesel dari *Calophyllum inophyllum*-Palm Biodiesel dan solar disajikan pada gambar (7.1). Ditemukan bahwa rata-rata emisi HC campuran lebih sedikit dibandingkan solar. Jelas sekali bahwa bahan bakar campuran biodiesel menurunkan emisi HC sebesar 13%-22% dibandingkan bahan bakar diesel. Emisi HC dapat dikurangi dengan peningkatan kualitas pembakaran pada campuran biodiesel solar karena adanya kelebihan atom oksigen dalam biodiesel [18].



Gambar 7.1 Perubahan emisi Hidrokarbon (HC) solar, CPME, dan CIME bercampur dengan kecepatan [18].

Pada penelitian lain, Sebayang dkk. [19] mengamati nilai emisi HC campuran biodiesel-diesel *sterculia foetida* dan solar pada putaran mesin 1300–2400 rpm ditunjukkan pada gambar (7.2). Terlihat bahwa emisi HC paling tinggi pada SFB30 dibandingkan dengan campuran campuran lain dan solar pada putaran 1300 rpm. Pada kecepatan rendah, emisi HC untuk solar, SFB5, SFB10, SFB20, dan SFB30 berturut-turut adalah 37,73, 35,22, 44,36, 47,3 dan 51,1 ppm vol. Emisi HC terendah terdapat pada putaran mesin yang disetel pada 1900 rpm. Diesel, SFB5, SFB10, SFB20, dan SFB30 adalah 30,82, 30,18, 37,8, 40,26 dan 41,3 ppm vol. Dapat diamati bahwa emisi HC paling rendah untuk SFB5 jika dibandingkan dengan bahan bakar diesel. SFB5 lebih unggul dalam membantu mengurangi emisi HC dibandingkan dengan bahan bakar diesel. Dapat dijelaskan bahwa kandungan oksigen pada bahan bakar biodiesel akan meningkatkan proses pembakaran dan mengurangi hidrokarbon yang tidak terbakar. Namun pada konsentrasi biodiesel yang lebih tinggi, HC-nya lebih tinggi dibandingkan solar. Alasannya mungkin timbul dari peningkatan sifat fisiokimia lainnya seperti viskositas, densitas, dan nilai kalor setelah pencampuran [19].



Gambar 7.2 Emisi HC dengan putaran mesin bervariasi untuk bahan bakar campuran dan solar [19].

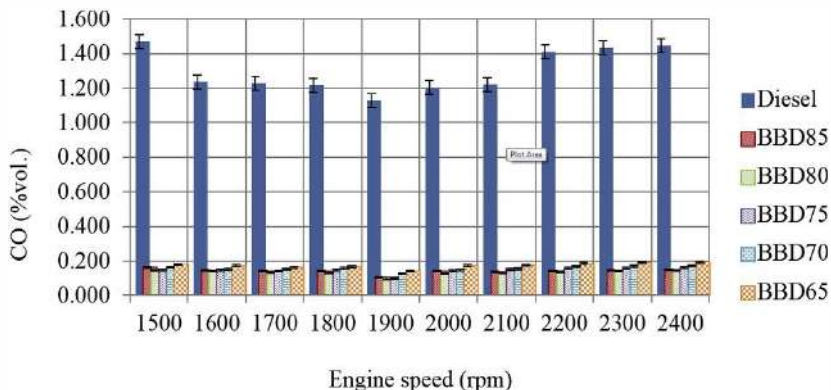
D. Emisi Carbon Monoxide

Emisi gas buang *Carbon monoxide* (CO) adalah gas beracun yang terbentuk selama pembakaran tidak sempurna karena bagian depan nyala api mendekati volume celah dan liner silinder yang relatif dingin. Emisi CO bahan bakar diesel lebih tinggi dari campuran biodiesel. Hal ini disebabkan campuran biodiesel mengandung lebih banyak unsur O, sehingga menghasilkan pembakaran yang lebih baik [20]. CO tidak berwarna, tidak berbau dan tidak berasa, tetapi sangat beracun. CO terbentuk ketika mesin beroperasi dengan campuran bahan bakar/udara yang kaya [21]. Emisi CO merupakan hasil pembakaran yang kaya akibat berkurangnya jumlah oksigen atau udara di ruang bakar [22]. Abed dkk [16] menyatakan bahwa emisi CO untuk campuran biodiesel lebih rendah dibanding bahan bakar solar. Peningkatan konsentrasi biodiesel dalam campuran bahan bakar menyebabkan peningkatan emisi CO. Alasan utama pembentukan CO di mesin diesel adalah berkurangnya atomisasi bahan bakar [23].

Penambahan nanopartikel CaO ke biodiesel telah mengurangi karbon monoksida daripada solar. Penambahan sedikit alumina pada biodiesel WCO mempengaruhi emisi CO. Emisi CO awalnya agak tinggi dan secara bertahap berkurang

untuk bahan bakar campuran dan kemudian meningkat lebih lanjut karena viskositas yang lebih tinggi [24]. Akram dkk. [17] menyebutkan kinerja oksida nano-komposit $Ce_{0.5}Co_{0.5}$ relatif lebih baik daripada CeO_2 dalam hal pengurangan emisi gas buang yang dihasilkan dari pembakaran berbagai campuran biodiesel. Tambahan $Ce_{0.5}Co_{0.5}$ nano-komposit oksida (100 ppm) digunakan sebagai aditif, pengurangan emisi gas buang CO sebesar 24,18%.

Nilai emisi CO campuran biodiesel-bioetanol-diesel pada rentang putaran mesin 1500–2400 rpm ditunjukkan pada gambar (7.3). Terlihat bahwa nilai emisi CO paling tinggi pada solar dibandingkan seluruh campuran biodiesel-bioetanol-diesel pada putaran 1900 rpm. Nilai emisi CO paling rendah pada campuran BBD80 dan BBD75 pada putaran 1900 rpm, dengan nilai masing-masing sebesar 0,099 dan 0,101 %vol. Sebaliknya nilai emisi CO paling besar pada bahan bakar solar pada putaran mesin ini yaitu sebesar 1,129 %vol. Nilai emisi CO untuk campuran BBD85, BBD70 dan BBD65 masing-masing sebesar 0,104, 0,125 dan 0,141 %vol., pada putaran 1900 rpm dengan beban penuh. Hasilnya menunjukkan bahwa penurunan emisi CO disebabkan oleh adanya bioetanol dalam campuran bahan bakar yang menyediakan lebih banyak oksigen untuk proses pembakaran. Selain itu, panas laten penguapan bioetanol lebih tinggi dibandingkan bensin, sehingga menyebabkan suhu di dalam silinder pembakaran lebih rendah

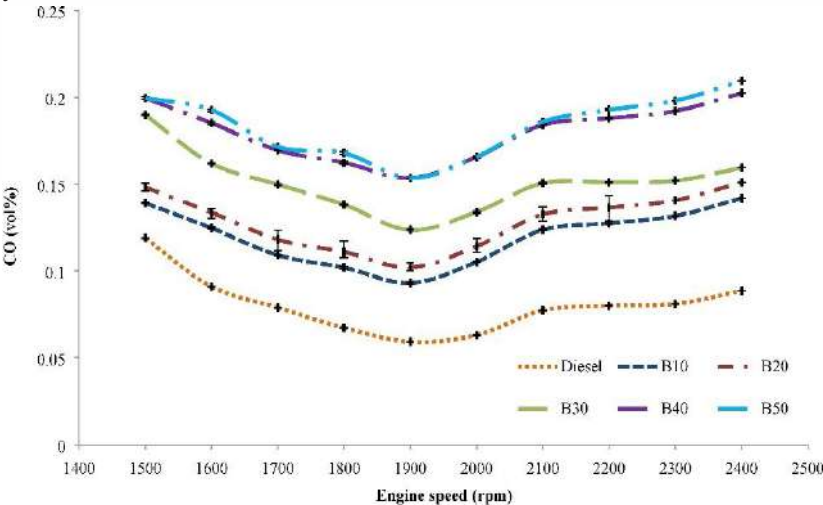


Gambar 7.3 Nilai emisi karbon monoksida dari campuran biodiesel-bioetanol-diesel pada rentang putaran mesin 1500–2400 rpm [21].

Pada publikasi lainnya, Dharma dkk [22] mengamati emisi CO pada berbagai putaran mesin dengan persentase volume biodiesel campuran *Jatropha curcas* dan *Ceiba pentandra* (J50C50) yang berbeda sebagaimana ditunjukkan pada gambar (7.4). Terlihat bahwa terdapat sedikit peningkatan emisi CO ketika biodiesel J50C50 dicampur dengan bahan bakar diesel. Nilai rata-rata emisi CO untuk bahan bakar solar sebesar 0,08%. Pencampuran 50% biodiesel J50C50 dengan bahan bakar solar (B50) meningkatkan nilai emisi CO hingga 137,5%. Nilai emisi CO menurun hingga putaran mesin 1900 rpm, dan nilai emisi CO meningkat melampaui putaran mesin tersebut. Peningkatan emisi CO dapat disebabkan oleh peningkatan suhu pembakaran, rasio udara/bahan bakar, sifat fisikokimia bahan bakar, kekurangan oksigen pada kecepatan mesin yang lebih tinggi, dan terbatasnya waktu yang tersedia untuk menyelesaikan pembakaran.

Selain itu, waktu injeksi, tekanan injeksi, dan jenis bahan bakar berperan penting dalam mempengaruhi tingkat emisi CO. Tingginya tingkat emisi CO untuk campuran biodiesel-diesel dikaitkan dengan semakin tinggi densitas dan viskositas

kinematik biodiesel, yang secara langsung mempengaruhi pola semprotan bahan bakar, sehingga mengakibatkan pembakaran yang lambat di ruang bakar. Banapurmath dkk [25] juga mengamati bahwa biodiesel menghasilkan emisi CO lebih tinggi dibandingkan bahan bakar diesel. Mereka menemukan nilai emisi CO masing-masing sebesar 0,15, 0,12, dan 0,14% untuk biodiesel yang dihasilkan dari minyak honge, jarak pagar, dan minyak wijen. Sebaliknya, emisi CO lebih rendah pada bahan bakar solar, yakni sebesar 0,11%.

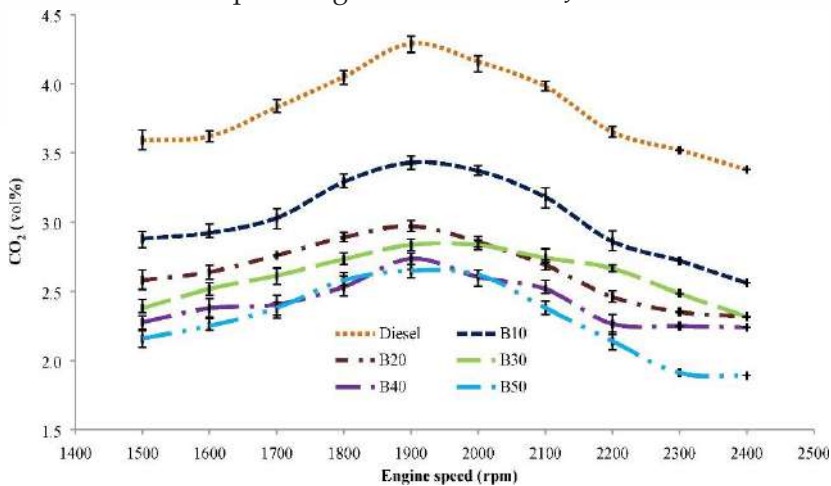


Gambar 7.4 Variasi emisi CO untuk campuran biodiesel-diesel dengan persentase biodiesel J50C50 yang berbeda pada beban penuh dan berbagai putaran mesin.

E. Karbon Dioksida (CO₂)

Pembakaran bahan bakar fosil mengakibatkan peningkatan konsentrasi CO₂ di atmosfer yang berujung pada efek rumah kaca. Oleh karena itu, penting untuk menganalisis emisi CO₂ yang dikeluarkan dari mesin diesel. Emisi CO₂ dihasilkan ketika jumlah oksigen yang ada di ruang bakar mencukupi untuk pembakaran sempurna (dengan kata lain pembakaran ideal). Namun, pembakaran sempurna jarang terjadi, sehingga

menghasilkan pembentukan CO sebagai salah satu produk sampingan. Variasi emisi CO₂ untuk campuran biodiesel-diesel J50C50 yang diselidiki oleh Dharma dkk [22] dengan putaran mesin divariasikan dari 1500 hingga 2400 rpm ditunjukkan pada gambar (7.5). Hasil penelitian menunjukkan bahwa bahan bakar solar mempunyai emisi CO₂ yang lebih tinggi (4,29 vol%) dibandingkan dengan campuran biodiesel-diesel J50C50 pada putaran 1900 rpm. Secara umum diketahui bahwa pencampuran biodiesel dengan bahan bakar diesel akan mengurangi emisi CO₂. Nilai emisi CO₂ memang menurun sebesar 40% bila bahan bakar solar dicampur dengan 50% biodiesel J50C50.



Gambar 7.5 Variasi emisi CO₂ untuk campuran biodiesel-diesel dengan persentase biodiesel J50C50 yang berbeda pada beban penuh dan berbagai putaran mesin.

Penurunan emisi CO₂ untuk campuran dengan kandungan biodiesel lebih tinggi disebabkan oleh semakin tingginya viskositas biodiesel. Xue dkk [26] menyatakan bahwa biodiesel dapat mengurangi emisi CO₂ sebesar 50–80% dibandingkan dengan bahan bakar diesel. Hal ini pada gilirannya akan membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dalam skala global

melalui siklus hidup emisi CO_2 . Selain itu, nilai kalor biodiesel yang lebih rendah menyebabkan konsumsi bahan bakar yang lebih tinggi untuk menghasilkan tenaga mesin yang sama, dan semakin tinggi kandungan oksigen pada biodiesel mengakibatkan lebih banyak karbon yang teroksidasi menjadi CO_2 .

F. Emisi Nitrogen Oksida (NO_x)

NO_x merupakan produk samping (polutan) yang terbentuk akibat pembakaran bahan bakar yang tidak sempurna. Secara umum, pembentukan emisi NO_x berhubungan langsung dengan parameter mesin seperti suhu dalam silinder, suplai oksigen, dan waktu tinggal. Hal ini disebabkan tingginya energi aktivasi yang diperlukan untuk reaksi pembakaran, dan reaksi ini ditentukan oleh rasio ekuitas, konsentrasi oksigen, dan suhu pembakaran [22].

Pengaruh parameter injeksi pada karakteristik pembakaran dan emisi pada mesin diesel *common-rail direct injection* berbahan bakar biodiesel Minyak goreng bekas diselidiki Hwang et.al [2]. Hasil penelitian disimpulkan bahwa emisi nitrogen oksida (NO_x) dari biodiesel relatif lebih tinggi dibandingkan dengan solar. Emisi NO_x untuk campuran biodiesel lebih tinggi daripada solar [16]. NO_x emisi meningkat hingga 6,4% dan 8,7% dengan campuran bahan bakar biodiesel B5 dan B10 untuk semua beban mesin. Diketahui bahwa pembentukan emisi NO_x tergantung pada suhu pembakaran, konsentrasi oksigen dan waktu [9]. Lebih lanjut, Reddy et.al [27] menyatakan bahwa emisi Nitrogen Oksida lebih tinggi dengan penambahan nanopartikel CaO . Peningkatan besar NO_x diamati terutama pada beban rendah. Kehadiran Oksigen dalam struktur molekul biodiesel mungkin sangat berpengaruh atas sedikit peningkatan produksi NO_x ketika campuran bahan bakar biodiesel digunakan sebagai pengganti

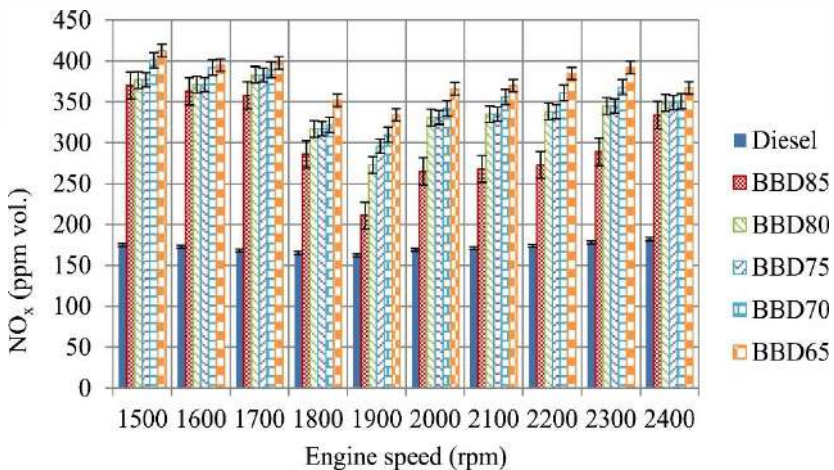
minyak diesel [23]. Emisi NO_x untuk campuran biodiesel sedikit lebih rendah hingga 50% pada kondisi awal pembebanan dan meningkat pada kondisi pembebanan lebih lanjut.

Peningkatan viskositas bahan bakar dan penurunan indeks setana mungkin menjadi salah satu alasan variasi emisi NO_x [24]. Akram et.al [17] meneliti dampak cerium oxide dan cerium composite oxide sebagai nano additive terhadap profil emisi gas buang limbah berbasis minyak goreng. Biodiesel pada kondisi beban mesin penuh, dengan penambahan Nano-komposit oksida Ce_{0.5}Co_{0.5} (100 ppm) yang digunakan sebagai aditif, menyebabkan pengurangan emisi gas buang NO_x sebesar 13,96%.

Namun Biodiesel WCO memiliki performa mesin yang lebih baik daripada biodiesel minyak alga yang terbukti dari BSFC-nya yang lebih rendah [14]. Nilai emisi HC dan CO menurun sementara NO_x dan emisi NO₂ juga meningkat [28], masalah ini dapat diatasi dengan menyetel injektor diesel [29]. Opasitas asap dan partikulat konsentrasi massa berkurang secara signifikan pada beban mesin yang tinggi. Bahwa bahan bakar dengan setana yang lebih tinggi memiliki penundaan pengapian yang lebih pendek, yang karenanya akan menyebabkan peningkatan pembentukan jelaga karena pencampuran bahan bakar-ambien yang tidak mencukupi sebelumnya permulaan pembakaran [30].

Hasil laju injeksi menunjukkan bahwa biodiesel WCO memiliki penundaan injeksi yang lebih lama dan puncak laju injeksi yang lebih tinggi karena viskositas dan kepadatan bahan bakarnya yang lebih tinggi. Semprotan makroskopis menunjukkan bahwa biodiesel WCO memiliki panjang penetrasi ujung cairan yang lebih panjang dan sudut semprotan yang lebih sempit menunjukkan kondisi pencampuran udara-bahan bakar yang buruk dibandingkan dengan diesel [11].

Peningkatan tekanan injeksi menyebabkan lokasi nyala api dingin didorong lebih jauh ke hilir. Hal ini menyebabkan stabilisasi nyala lebih jauh dari nosel injektor. WCO memiliki panjang *lift-off* yang lebih pendek dibandingkan dengan solar karena nyala api yang lebih dingin mendekati injector [31]. Selain itu Biodiesel WCO memiliki puncak tekanan dalam silinder yang sedikit lebih rendah dari pembakaran solar. Biodiesel WCO menunjukkan semakin tinggi puncak pembakaran yang tercampur karena penundaan penyalaan yang sedikit lebih lama dari solar [11].



Gambar 7.6 Nilai emisi nitrogen oksida dari campuran biodiesel-bioetanol-diesel pada rentang putaran mesin 1500–2400 rpm [21].

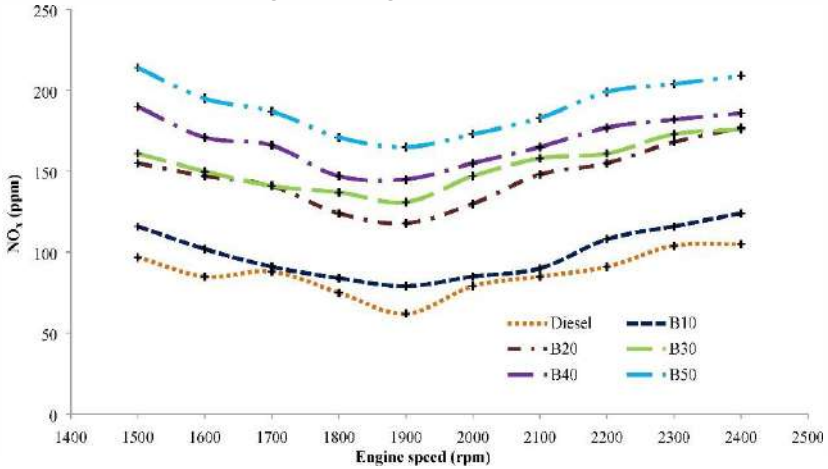
Emisi NO_x adalah salah satu karakteristik penting dari bahan bakar beroksigen. Dengan kata lain, emisi NO_x bergantung pada kandungan oksigen dalam bahan bakar. Emisi NO_x bervariasi tergantung pada reaksi antara udara dan bahan bakar di ruang bakar, konsentrasi oksigen, serta suhu dalam silinder. Emisi NO_x dari campuran biodiesel-bioetanol-diesel dalam kisaran kecepatan mesin 1500–2400 rpm ditunjukkan pada Gambar (7.6). Dapat diamati bahwa nilai emisi NO_x untuk

campuran BBD85 dan BBD80 lebih rendah dibandingkan dengan campuran lainnya dengan nilai masing-masing sebesar 273 dan 211 ppm vol. Apalagi solar memiliki nilai emisi NO_x terendah (162 ppm vol.) pada putaran 1900 rpm. Nilai emisi NO_x sebesar 296, 310 dan 334 ppm vol. untuk campuran BBD75, BBD70 dan BBD65 masing-masing pada 1900 rpm.

Selain itu, ketika campuran biodiesel-bioetanol-diesel yang mengandung biodiesel dengan konsentrasi tinggi diinjeksikan ke dalam ruang bakar, maka akan menyebabkan tingginya kandungan emisi NO_x yang dihasilkan. Namun, dalam penelitian ini, tren berbeda terlihat karena emisi NO_x dari campuran biodiesel-bioetanol-diesel mengalami penurunan. Diketahui bahwa penyebab penurunan emisi NO_x adalah karena rendahnya nilai kalor yang terdapat pada bioetanol. Oleh karena itu, jumlah bahan bakar yang lebih besar perlu diinjeksikan ke dalam ruang bakar untuk menghasilkan tenaga yang sebanding dengan bahan bakar diesel. Selain itu, panas laten penguapan yang lebih tinggi yang ditemukan dalam bioetanol telah menurunkan emisi NO_x secara signifikan, pola serupa diamati dan dilaporkan oleh peneliti lain. Oleh karena itu, peningkatan persentase volume biodiesel dan bioetanol dalam campuran bahan bakar merupakan metode yang efisien untuk meningkatkan pembakaran pra-campuran selama waktu tunda penyalan dan akan mengurangi emisi NO_x .

Variasi emisi NO_x campuran biodiesel-diesel dengan persentase volume biodiesel J50C50 yang berbeda pada saat putaran mesin divariasikan 1500 hingga 2400 rpm ditunjukkan pada gambar (7.7). Dapat diamati bahwa nilai emisi NO_x lebih tinggi untuk semua bahan bakar yang diuji pada rentang kecepatan mesin ekstrim yang lebih tinggi. Nilai emisi NO_x paling rendah pada bahan bakar diesel (105 ppm) dibandingkan dengan nilai emisi campuran biodiesel-diesel

J50C50. Nilai emisi NO_x untuk campuran B10, B20, B30, B40, dan B50 masing-masing meningkat sebesar 14,29, 68,57, 67,62, 77,14 dan 99,05% dibandingkan dengan nilai emisi bahan bakar solar.

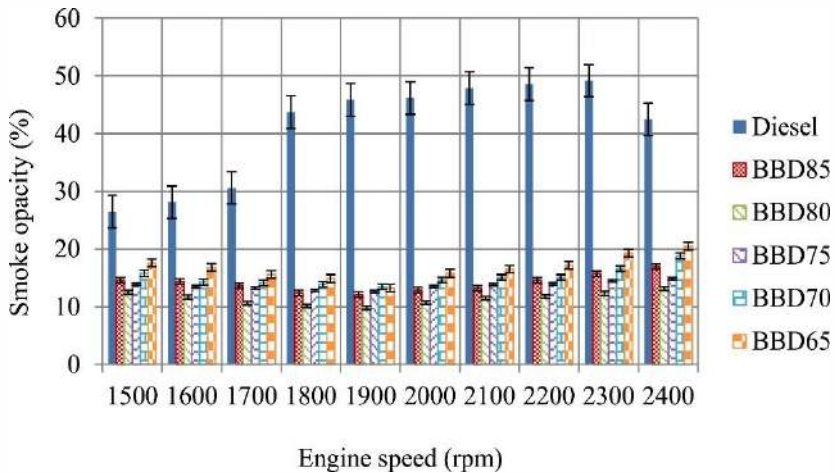


Gambar 7.7 Variasi emisi NO_x untuk campuran biodiesel-diesel dengan persentase biodiesel J50C50 yang berbeda pada beban penuh dan berbagai putaran mesin [22].

Emisi NO_x lebih tinggi pada biodiesel karena kandungan oksigen yang terikat secara kimia pada biodiesel, sehingga meningkatkan pembentukan NO_x . Selain itu, peningkatan emisi NO_x dapat dikaitkan dengan suhu nyala api adiabatik. Biodiesel umumnya memiliki kandungan asam lemak tak jenuh yang lebih tinggi, yang menyebabkan suhu nyala adiabatik bahan bakar menjadi lebih tinggi, dan hal ini meningkatkan emisi NO_x . Lebih lanjut semakin tinggi kandungan oksigen pada biodiesel, semakin tinggi temperatur dalam silinder, serta waktu tinggal yang lama menyebabkan emisi NO_x biodiesel lebih tinggi dibandingkan bahan bakar solar pada hampir semua putaran mesin [22].

G. Kepekatan Asap (*Smoke Opacity*)

Keburaman asap merupakan indikator jelaga kering dan emisi partikel. Pada mesin diesel, bahan bakar yang diatomisasi terpecah menjadi karbon (pembentukan jelaga) selama proses pembakaran, dan karbon kemudian teroksidasi di zona reaksi (oksidasi jelaga). Partikel karbon (yaitu jelaga atau asap) akan terbentuk jika jumlah oksigen atau suhu setempat tidak mendukung proses oksidasi [22]. *Smoke Opacity* (SO) mengacu pada visibilitas dari emisi pada saluran buang keluar knalpot suatu bahan bakar. Semakin bersih pembakaran, semakin rendah dan lebih baik *opacity* asap bahan bakar. Asap *Opacity* tergantung pada banyak parameter seperti titik nyala, kandungan O_2 , suhu pembakaran dan lain-lain [14]. Asap tercipta dari pembentukan partikel jelaga karbon padat yang dihasilkan di zona kaya bahan bakar di dalam silinder selama pembakaran [21]. Pengaruh tekanan dan waktu injeksi terhadap emisi asap bahan bakar biodiesel diselidiki kannan dan Anand [32]. Tingkat asap biodiesel akan menurun ketika tekanan injeksi dan waktu meningkat. Opasitas asap terendah sebesar 34,9% diperoleh tekanan operasi biodiesel sebesar 280 bar pada waktu injeksi 25,5 obTDC. Jrai et.al [33] melaporkan bahwa, Pembakaran *Treated Waste Cooking Oil* (TWCO)-diesel campuran (50/50 menghasilkan pengurangan yang cukup besar dalam *opacity* asap.

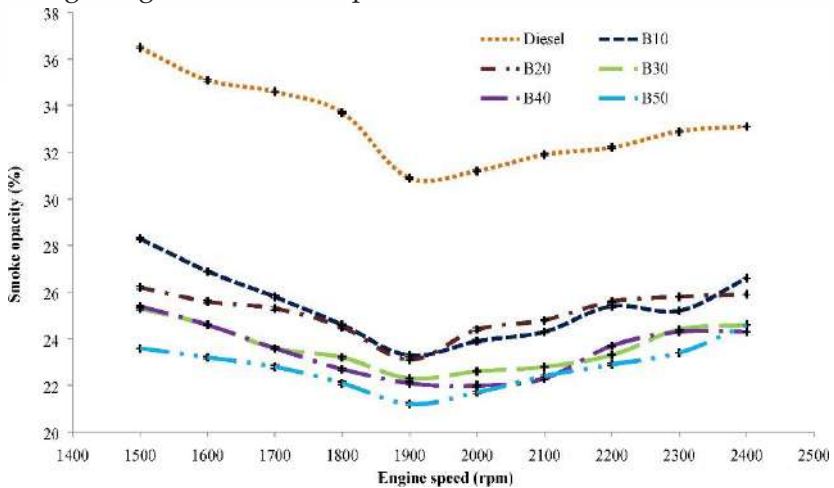


Gambar 7.8 Kekeruhan asap campuran biodiesel-bioetanol-diesel pada kisaran kecepatan mesin 1500–2400 rpm [21].

Pengurangan *opacity* asap (SO) WCOBD dibandingkan dengan minyak solar menunjukkan kecenderungan pembakaran bersih [14], tetapi nilai opasitas asap meningkat ketika ditambahkan nanopartikel CaO [27]. Nilai opasitas asap tergantung pada kecepatan mesin yang berbeda dan tekanan injeksi bahan bakar. Nilai opasitas asap minimum dari sampel bahan bakar ditemukan pada 210 bar dan 3200 rpm untuk bahan bakar B100 adalah 1,73 l/m [34].

Opasitas asap campuran biodiesel-bioetanol-diesel pada putaran mesin 1500–2400 rpm ditunjukkan pada Gambar (7.8). Terlihat bahwa opasitas asap campuran BBD85 dan BBD80 agak rendah pada putaran 1900 rpm, dengan nilai masing-masing sebesar 12,1 dan 9,8%. Opasitas asapnya sedikit lebih tinggi pada campuran BBD75, BBD70, dan BBD65 dengan nilai masing-masing sebesar 12,6, 13,5, dan 13,2%, sedangkan bahan bakar solar memiliki opasitas asap yang cukup tinggi, dengan nilai 45,9%. Terbukti di sini bahwa semua campuran biodiesel-bioetanol-diesel mempunyai opasitas asap yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan solar. Menurunnya opasitas asap

disebabkan oleh kandungan oksigen pada biodiesel dan bioetanol. Secara umum bahan bakar beroksigen memiliki atom oksigen yang terikat kuat pada atom karbon dan sulit untuk memutuskan ikatan tersebut. Hal ini menghambat pembentukan hidrokarbon aromatik dan karbon hitam. Oksigenat dalam campuran biodiesel-bioetanol-diesel dapat menyuplai oksigen selama pembakaran, yang pada gilirannya mengurangi emisi asap dari mesin diesel. Selain itu, campuran biodiesel-bioetanol-diesel memiliki nilai kalor yang lebih rendah, sehingga memperpanjang waktu tunda penyalan dan waktu untuk membentuk muatan yang tercampur dengan baik, serta mengurangi kekeruhan asap.



Gambar 7.9 Variasi opasitas asap campuran biodiesel-diesel dengan persentase biodiesel J50C50 yang berbeda pada berbagai putaran mesin [22].

Pada penelitian lainnya Dharma dkk. [22], mengamati opasitas/keburaman asap pada biodiesel campuran *Jatropha curcas* dan *Ceiba pentandra* (J50C50) dan dibandingkan dengan bahan bakar solar. Variasi opasitas asap untuk campuran biodiesel-diesel J50C50 dalam rentang kecepatan mesin 1500–2400 rpm ditunjukkan pada gambar (7.9). Terbukti bahwa opasitas asap

lebih rendah pada semua campuran biodiesel-diesel J50C50 yang diselidiki dalam penelitian ini dibandingkan dengan bahan bakar diesel. Bahan bakar solar memiliki rata-rata opasitas asap tertinggi yaitu sebesar 33,2%. Terjadi penurunan opasitas asap yang cukup signifikan akibat penambahan biodiesel J50C50 pada bahan bakar solar, hal ini terlihat pada B50 yang rata-rata opasitas asapnya menurun sebesar 45,6%. Nilai opasitas asap rata-rata yang lebih rendah pada campuran biodiesel-diesel J50C50 disebabkan oleh kandungan oksigen yang lebih tinggi dan angka setana biodiesel yang lebih tinggi. Pencampuran biodiesel dengan bahan bakar diesel mengurangi kekeruhan asap, yang disebabkan oleh semakin banyaknya molekul oksigen yang ada dalam biodiesel, dan hal ini meningkatkan pembakaran. Menurunnya opasitas asap pada penambahan biodiesel juga disebabkan oleh berkurangnya senyawa aromatik dalam campuran yang merupakan prekursor jelaga [22].

H. Standar Emisi Gas Buang

Dalam upaya mengurangi emisi, pada 1992 Uni Eropa mengeluarkan peraturan yang mewajibkan penggunaan katalis untuk mobil berbahan-bakar bensin, yang kemudian disebut standar Euro 1. Sejak saat itu, lima set standar telah ditetapkan Uni Eropa dengan tujuan meningkatkan kualitas udara, yakni standar Euro 2 (1996), Euro 3 (2000), Euro 4 (2005), Euro 5 (2009), dan Euro 6 (2014). Berikut pengertian spesifikasi standar Euro, mengutip laman resmi Kementerian Energi dan Sumber Daya Minera (Tabel 7.1).

Tabel 7. 1 Standar Emisi Gas Buang

Standar	Bensin	Diesel
Euro 1	CO : 2,72 g/km HC + NOx: 0,97 g/km	CO : 2,72 g/km HC + NOx : 0,97 g/km PM : 0,14 g/km
Euro 2	CO : 2,20 g/km HC + NOx: 0,50 g/km	CO : 1,00 g / km HC + NOx : 0,70 g/km PM : 0,08 g/km
Euro 3	CO : 2,30 g/km HC : 0,20 g/km NOx: 0,15 g/km	CO : 0,64 g/km HC : 0,56 g/km NOx: 0,50 g/km PM : 0,05 g/km
Euro 4	CO : 1,00 g/km HC : 0,10 g/km NOx: 0,08 g/km	CO : 0,50 g/km HC + NOx: 0,30 g/km NOx : 0,25 g/km PM : 0,025 g/km
Euro 5	CO : 1,00 g/km HC : 0,10 g/km NOx: 0,06 g/km PM : 0,005 g/km	CO : 0,50 g/km HC + NOx: 0,23 g/km NOx : 0,18 g/km PM : 0,005 g/km
Euro 6	CO : 1,00 g/km HC : 0,10 g/km NOx: 0,06 g/km PM : 0,005 g/km	CO : 0,50 g/km HC + NOx: 0,17 g/km NOx: 0,08 g/km PM : 0,005 g/km

Sumber : (Kementerian Lingkungan Hidup 2017)

Standar emisi kendaraan bermotor di Eropa juga diadopsi beberapa negara di dunia dengan berbagai modifikasi. Indonesia saat ini memberlakukan batas emisi setara Euro 4 melalui Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 20 Tahun 2017 dan berlaku dua tahun setelahnya bagi mobil tipe M, N, dan O. Kendaraan bermotor kategori M yaitu mobil untuk angkutan orang, kategori N mobil angkutan barang dan O untuk kendaraan bermotor gandengan atau tempel. Kementerian Energi

dan Sumber Daya Mineral bersama Pertamina bertugas mengembangkan bahan bakar yang sesuai spesifikasi Euro 4 ini. Namun kabarnya Indonesia belum dapat loncat atau meningkatkan spesifikasi kendaraan menjadi Euro 5 maupun Euro 6 sebab bahan bakarnya belum tersedia.

Daftar Pustaka

- [1] Ü. K. Ağbulut, M. Sarıdemir, S. and Öztürk, A. , "Impact of various metal-oxide based nanoparticles and biodiesel blends on the combustion, performance, emission, vibration and noise characteristics of a CI engine," *Fuel*, vol. 270, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117521.
- [2] J. Hwang, D. Qi, Y. Jung, and C. Bae, "Effect of injection parameters on the combustion and emission characteristics in a common-rail direct injection diesel engine fueled with waste cooking oil biodiesel," *Renewable Energy*, vol. 63, pp. 9-17, 2014.
- [3] D. R. Souza, T. Vats, A. Chattree, and P. F. Siril, "RETRACTED: Graphene supported magnetically separable solid acid catalyst for the single step conversion of waste cooking oil to biodiesel," ed: Elsevier, 2018.
- [4] M. Ateeq *et al.*, "Evaluating corrosion effect of biodiesel produced from neem oil on automotive materials," *Materials Today Sustainability*, vol. 18, p. 100130, 2022.
- [5] M. A. M. G. Ali, J. Lau, K.L. Cheng, C.K. D.V. N. Vo, Lam, S.S. Yunus, R.M, "Biodiesel synthesized from waste cooking oil in a continuous microwave assisted reactor reduced PM and NOx emissions," *Environmental Research*, vol. 185, p. 109452, 2020, doi: 10.1016/j.envres.2020.109452.
- [6] P. Z. Zareh, A. A. and Ghobadian, B. , "Comparative assessment of performance and emission characteristics of castor, coconut and waste cooking based biodiesel as fuel in

- a diesel engine," *Energy*, vol. 139, pp. 883–894, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.08.040.
- [7] C. K. C. a. Patel, Joonsik Hwang, Rashmi A. Agarwal, Neeraj Gupta, Choongsik Bae, Tarun Gupta, Avinash Kumar Agarwal "Comparative compression ignition engine performance, combustion, and emission characteristics, and trace metals in particulates from Waste cooking oil, Jatropha and Karanja oil derived biodiesels," *Fuel*, vol. 236, pp. 1366–1376, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2018.08.137.
- [8] M. A. R. Hazrat, M. G. Khan, M. M. K. Ashwath, N. and Rufford, T. E. , "Emission characteristics of waste tallow and waste cooking oil based termary biodiesel fuels," *Energy Procedia*,, vol. 160, pp. 842–847, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.149.
- [9] Ö. Can, "Combustion characteristics, performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with a waste cooking oil biodiesel mixture," *Energy Convers. Manag.*, vol. 87, pp. 676–686, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.07.066.
- [10] Ş. U. Yildizhan, E. Çalık, A. Dede, G. and Özcanlı, M. , "Fuel properties, performance and emission characterization of waste cooking oil (WCO) in a variable compression ratio (VCR) diesel engine," *Eur. Mech. Sci*, vol. 1, pp. 56–62, 2017, doi: 10.26701/ems.321789.
- [11] J. B. Hwang, C. and Gupta, T. , "Application of waste cooking oil (WCO) biodiesel in a compression ignition engine," *Fuel*, vol. 176, pp. 20–31, 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2016.02.058.
- [12] X. J. C. Man, C. S. Ning, Z. Wei, L. and Huang, Z. H. , "Influence of engine load and speed on regulated and unregulated emissions of a diesel engine fueled with diesel fuel blended with waste cooking oil biodiesel," *Fuel*, vol. 180, pp. 41–49, 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2016.04.007.

- [13] B. A. Oni and D. Oluwatosin, "Emission characteristics and performance of neem seed (*Azadirachta indica*) and Camelina (*Camelina sativa*) based biodiesel in diesel engine," *Renewable Energy*, vol. 149, pp. 725-734, 2020.
- [14] N. D. Nirmala, S. S. and Harindra, C. , "Analysis of performance and emission characteristics of Waste cooking oil and *Chlorella variabilis* MK039712.1 biodiesel blends in a single cylinder, four strokes diesel engine," , vol. , pp. , , doi: , " *Renew. Energy*, vol. 147, pp. 284-292, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.08.133.
- [15] C. S. M. Cheung, X. J. Fong, K. W. and Tsang, O. K. , "Effect of Waste Cooking Oil Biodiesel on the Emissions of a Diesel Engine," *Phys. Procedia*, vol. 66,, pp. 93-96, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.02.050.
- [16] K. A. E. M. Abed, A. K. Sayed, M. M. Shaib, A. A. E. and Gad, M. S. , "Effect of waste cooking-oil biodiesel on performance and exhaust emissions of a diesel engine," *Egypt. J. Pet.*, vol. 27, pp. 985-989, 2018, doi: 10.1016/j.ejpe.2018.02.008.
- [17] S. M. W. M. Akram, Muhammad Danish, Hamid Mukhtar, Ahmad Irfan, Syed Ali Raza, Zhen Wang, Muhammad Arshad, "Impact of cerium oxide and cerium composite oxide as nano additives on the gaseous exhaust emission profile of waste cooking oil based biodiesel at full engine load conditions," *Renew. Energy*, vol. 143, pp. 898-905, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.05.025.
- [18] N. Damanik *et al.*, "The performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with *Calophyllum inophyllum* – Palm biodiesel," *Processes*, vol. 7, no. 9, p. 597, 2019.
- [19] A. Sebayang *et al.*, "Modelling and prediction approach for engine performance and exhaust emission based on

- artificial intelligence of *sterculia foetida* biodiesel," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 8333-8345, 2022.
- [20] L. F. A. Chuah, A. R. A. Yusup, S. Klemeš, J. J. and Bokhari, A. , "Waste cooking oil biodiesel via hydrodynamic cavitation on a diesel engine performance and greenhouse gas footprint reduction," *Chem. Eng. Trans*, vol. 50, pp. 301-306, 2016, doi: 10.3303/CET1650051.
- [21] A. S. Silitonga *et al.*, "Evaluation of the engine performance and exhaust emissions of biodiesel-bioethanol-diesel blends using kernel-based extreme learning machine," *Energy*, vol. 159, pp. 1075-1087, 2018.
- [22] S. Dharma *et al.*, "Experimental study and prediction of the performance and exhaust emissions of mixed *Jatropha curcas*-*Ceiba pentandra* biodiesel blends in diesel engine using artificial neural networks," *Journal of cleaner production*, vol. 164, pp. 618-633, 2017.
- [23] O. S. P. Valente, V. M. D. Belchior, C. R. P. and Sodré, J. R. , "Exhaust emissions from a diesel power generator fuelled by waste cooking oil biodiesel," *Sci. Total Environ*, vol. 431, pp. 57-61, 2012, doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.05.025.
- [24] R. T. Muvva, T. and Arunkumar, M. , "Experimental investigation by utilizing nano alumina with waste cooking oil biodiesel fuel in CI engine," *Mater. Today Proc*, 2020, doi: 0.1016/j.matpr.2020.10.185.
- [25] N. Banapurmath, P. Tewari, and R. Hosmath, "Performance and emission characteristics of a DI compression ignition engine operated on Honge, *Jatropha* and sesame oil methyl esters," *Renewable energy*, vol. 33, no. 9, pp. 1982-1988, 2008.
- [26] J. Xue, T. E. Grift, and A. C. Hansen, "Effect of biodiesel on engine performances and emissions," *Renewable and Sustainable energy reviews*, vol. 15, no. 2, pp. 1098-1116, 2011.

- [27] M. J. R. Reddy, N. S. Jayaraman, J. Anand, K. V. Appavu, P. and Arunkumar, T. , "Effect of novel bio-waste derived nano particles as additives on the performance of diesel engine fuelled with waste cooking oil biodiesel blends," *Mater. Today Proc*, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.292.
- [28] S. a. S. Aydin, C. , "Impact of thermal barrier coating application on the combustion, performance and emissions of a diesel engine fueled with waste cooking oil biodiesel-diesel blends," *Fuel*, vol. 136, pp. 334–340, 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2014.07.074.
- [29] S. H. M. C. K. Shiao, J.Y. Hsie, P.H. , "Improving Biodiesel Conversions from Blends of High- and Low-Acid-Value Waste Cooking Oils Using Sodium Methoxide as a Catalyst Based on a High," *Energies*, vol. 11, 2018, doi: 10.3390/en11092298.
- [30] C. F. Ming, I.M.R. Chan, Q.N. Pham, P.X. Medwell, P.R. Kook, S. Yeoh, G.H. Hawkes, E.R. and Masri, A.R., "Combustion characterization of waste cooking oil and canola oil based biodiesels under simulated engine conditions," *Fuel*, vol. 224, pp. 167–177, 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.03.053.
- [31] O. A. S. Kutti, S. M. and Nishida, K. , "Spray combustion simulation study of waste cooking oil biodiesel and diesel under direct injection diesel engine conditions," *Fuel*, vol. 267, p. 117240, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117240.
- [32] J. Q. Hwang, D. Jung, Y. and Bae, C. , "Effect of injection parameters on the combustion and emission characteristics in a common-rail direct injection diesel engine fueled with waste cooking oil biodiesel," *Renew. Energy*, vol. 63, pp. 9–17, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2013.08.051.
- [33] A. A. Y. Jrai, J. A.; Al-Muhtaseb, A. H. and Hararah, M. A. , "Combustion characteristics and engine emissions of a

diesel engine fueled with diesel and treated waste cooking oil blends," *Chem. Eng. J.*, vol. 117, pp. 129–136, 2011, doi: 10.1016/j.cej.2011.05.078.

- [34] M. K. Yesilyurt, "The effects of the fuel injection pressure on the performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with waste cooking oil biodiesel-diesel blends," *Renew. Energy*, vol. 132, pp. 649–666, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.08.024.

BAB VIII

Laju Korosi Logam

Biodiesel (metil ester) umumnya dihasilkan dari proses metanolisis trigliserida minyak nabati yang berasal dari minyak sawit. Menurut Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral RI Nomor 12 Tahun 2015, biodiesel pada umumnya dicampur dengan petrodiesel dengan volume maksimum 30%-v seperti yang disajikan pada produk biodiesel B30 [1]. Kombinasi biodiesel dan petrodiesel dapat meningkatkan kualitas minyak solar dan memberikan keunggulan produk yang lebih ramah lingkungan, lebih aman dalam penanganannya, dan angka setana. Namun biodiesel lebih higroskopis dibandingkan solar biasa, sehingga memungkinkan memiliki kandungan air yang lebih tinggi dalam campuran solar. Meningkatnya kadar air dapat mempercepat aktivitas mikroba sehingga meningkatkan peluang kontaminasi mikroba dan menjadi media penting bagi pertumbuhan mikroorganisme. Kondisi ini menyebabkan terjadinya degradasi biodiesel (ester) selanjutnya melalui reaksi hidrolisis [2].

Oksidasi biodiesel menghasilkan keton, aldehida, dan asam karboksilat yang sangat mudah menguap, dll., yang menyebabkan efek parah pada mesin diesel tergantung pada durasi oksidasi. Tingkat ketidakjenuhan yang tinggi membuat biodiesel rentan terhadap oksidasi. Selain itu, biodiesel bersifat korosif karena adanya Asam Lemak Bebas (FFA) dan kandungan air. Kandungan FFA merupakan ukuran tidak langsung dari laju reaksi transesterifikasi. Reaksi transesterifikasi yang lambat atau tidak lengkap akan meningkatkan kandungan FFA dan pada akhirnya meningkatkan sifat korosif biodiesel. Karena sifat

higroskopis biodiesel, air mudah diserap oleh molekul biodiesel sehingga menyebabkan korosi pada berbagai bagian mesin [3]

Biodiesel pada dasarnya adalah bahan bakar teroksigenasi berbasis mono-alkil ester (11% oksigen berat) yang sebagian besar dihasilkan dari trigliserida (minyak nabati/lemak hewani) melalui reaksi transesterifikasi. Untuk meningkatkan laju reaksi dan mencapai hasil yang lebih baik, berbagai jenis katalis seperti katalis basa homogen (misalnya NaOH, KOH, CH_3ONa , CH_3OK , dll) dan katalis asam (misalnya asam sulfat, asam klorida, asam fosfat, dll) sebagian besar digunakan dalam memproduksi biodiesel dari bahan baku yang berbeda. Sesuai standar EN 14214, jumlah minimum ester dalam biodiesel harus sekitar 96,5%. Sisanya dapat berupa katalis yang tidak terpakai, asam lemak bebas, uap air, mono-, di-, trigliserida dan lain-lain yang sebagian besar dianggap sebagai pengotor dalam biodiesel. Kehadiran pengotor ini dapat mempengaruhi kompatibilitas bahan otomotif yang terpapar biodiesel. Terutama residu katalis asam seperti asam sulfat, asam klorida, asam fosfat, dll. Hal ini bisa sangat agresif terhadap korosi logam yang berbeda [4].

Serquera dkk. [5] menyatakan biodiesel bersentuhan dengan berbagai macam bagian mesin, seperti pompa bahan bakar, gasket, injektor bahan bakar, filter, tangki penyimpanan bahan bakar, bantalan, piston, ring piston, dan lain-lain. Bagian-bagian ini terbuat dari paduan logam, termasuk tembaga, aluminium, besi tuang, baja ringan, dan baja tahan karat, sehingga rentan terhadap korosi. Oleh karena itu, ketika biofuel mengalir dan bersentuhan dengan bahan logam ini dalam berbagai kondisi (tekanan, suhu aliran), kerusakan dan degradasi bahan sistem bahan bakar terjadi dengan cara yang berbeda. Pada bagian ini akan dibahas secara komprehensif kompatibilitas berbagai jenis logam yang terpapar biodiesel dari jenis yang berbeda.

A. Laju Korosi Pada berbagai Material

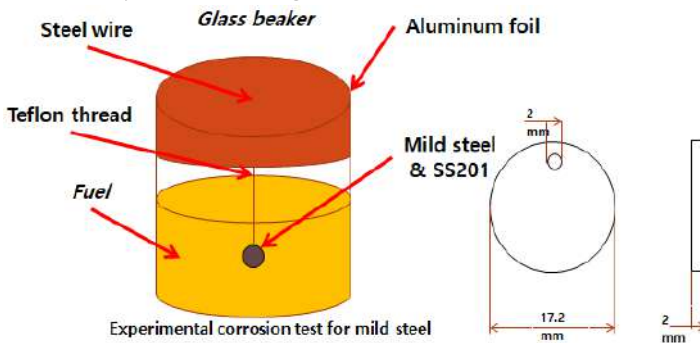
Korosi mesin merupakan masalah operasional signifikan yang dihadapi pada skala laboratorium dan industri. Minyak Bensin telah digantikan oleh biofuel di industri transportasi. Beberapa bagian mesin yang paling umum termasuk sistem pembuangan, piston, pompa bahan bakar, filter bahan bakar, pengisian bahan bakar, tangki bahan bakar, dan sistem injeksi bahan bakar. Bahan yang paling umum digunakan dalam pembuatan komponen ini meliputi baja, aluminium, tembaga, plastik, karet dan keramik. Biofuel memiliki pelumasan yang lebih baik pada suhu kamar dan dengan meningkatnya konsentrasi biofuel, luas permukaan yang aus akan berkurang [6]. Selain itu Baja ringan (*mild steel*) dan Baja tahan karat banyak digunakan pada tangki penyimpanan biodiesel, kedua jenis bahan ini memiliki karakteristik jenis korosi yang berbeda [7].

Salah satu kekhawatiran utama dalam penggunaan biodiesel di industri otomotif adalah masalah korosi yang terkait dengan ketidakcocokannya dengan bahan logam yang berinteraksi dengannya; seperti tangki bahan bakar, pompa bahan bakar, pompa pengumpan bahan bakar, saluran bahan bakar, injektor bahan bakar, dan piston, sistem pembuangan, dan lain-lain. Misalnya, bagian-bagian mesin diesel terbuat dari baja ringan, seperti tangki bahan bakar, saluran bahan bakar dan saluran keluar tabung bahan bakar; tembaga, pada paking tangki bahan bakar, washer, dan bushing. Persentase aluminium pada komponen mesin meliputi piston (100%), kepala silinder (70%) dan blok mesin (19%); filter bahan bakar, katup, nozel, dan cincin pompa adalah bagian baja tahan karat [8]. Syahzad dkk. [6] menyebutkan, untuk menghitung laju korosi pada logam yang terpapar biodiesel dapat dihitung menggunakan persamaan (8.1)

$$\text{Laju korosi (CR)} = \frac{8,76 \times 10^4 \times W}{D \times A \times T} \quad (8.1)$$

Dimana W = pengurangan berat (g),
 D = Massa jenis (g/cm^3),
 A = Luas penampang dalam (cm^2) dan
 T = Waktu dalam (jam).

Pengujian laju korosi metode perendaman logam dilakukan dengan menggunakan pedoman dari ASTM G1 dan G31. Setiap kupon logam direndam dalam 38 ml bahan bakar sesuai SAE J1747, disegel dan disimpan dalam kondisi gelap dan tertutup pada suhu kamar 24–26 °C. Kupon logam direndam selama 240 hingga 1.500 jam dalam solar emulsi, sedangkan kupon logam direndam selama 1.500 jam dalam solar dan biodiesel. Untuk duplikatnya, kupon tambahan dibenamkan di setiap bahan bakar pada kondisi tertentu [9]. Pengujian korosi metode immersed seperti ditunjukkan pada gambar (8.1)



Gambar 8.1 Pengujian Korosi Metode Immersed

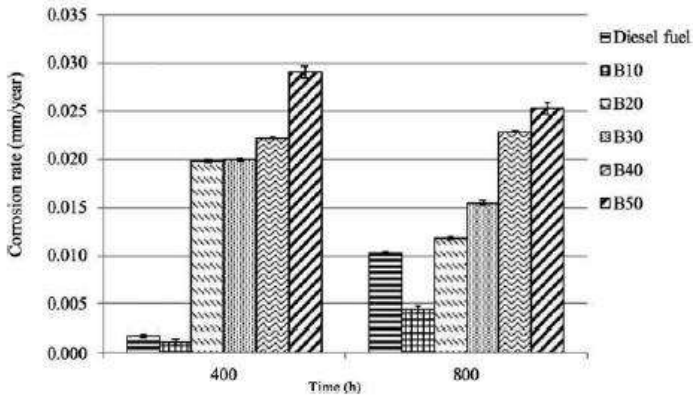
1. Laju Korosi Baja Ringan Yang Terpapar Biodiesel Campuran

Secara khusus, tangki penyimpanan biodiesel umumnya terbuat dari baja karbon karena memiliki sifat mekanik yang sangat baik dan biaya rendah. Korosi adalah salah satu masalah utama yang ditemukan pada tangki penyimpanan bahan bakar. Lebih dari 80% sistem tangki diesel mengalami korosi sedang hingga parah. Korosi saat ini menghabiskan miliaran

dolar setiap tahun untuk memperbaiki atau mengganti barang yang terkorosi. Banyak pengguna industri percaya bahwa salah satu penyebab utama kegagalan tangki penyimpanan adalah korosi. Sebagian besar kebocoran tangki penyimpanan bahan bakar minyak dan jaringan pipa biasanya disebabkan oleh kurangnya penilaian korosi dan pemeliharaan yang buruk [7]. Namun, baja karbon rentan terhadap MIC, yang dapat ditingkatkan dengan produksi metabolit seperti asam organik, yang mengakibatkan oksidasi baja karbon. Selain itu, pembentukan biofilm yang tidak merata mendorong serangan lokal dalam bentuk korosi lubang [10]. Misalnya, *Bacillus*, yang dapat dianggap sebagai bakteri pembentuk lender dan terkadang sebagai bakteri penghasil asam, sering ditemukan dalam campuran solar yang dapat berkontribusi terhadap biodegradasi hidrokarbon dan biokorosi pada logam tangki penyimpanan solar, karena kemampuannya menghasilkan EPS dan asam organik [2].

Karakterisasi logam korosif sangat penting untuk ketahanan jangka panjang bagian-bagian mesin saat digunakan biodiesel sebagai bahan bakar mesin. Gambar 8.1 perbandingan laju korosi biodiesel campuran jatropa curcas dan Ceiba pentandra (J50C50) yang dicampur dengan bahan bakar solar pada suhu sekitar. Laju korosi baja ringan untuk berbagai campuran bahan bakar (B0, B10, B20, B30, B40, dan B50) lebih tinggi pada perendaman 400 jam pertama yaitu 0,0018 mm/tahun, 0,0011 mm/tahun, 0,0198 mm/tahun, 0,0199 mm/tahun, 0,0222 mm/tahun dan 0,0289 mm/tahun. Laju korosi baja ringan yang direndam dalam B50 15 kali lebih cepat dibandingkan dengan bahan bakar diesel. Biodiesel B50 memiliki korosi paling tinggi tingkat korosi dibandingkan dengan bahan bakar lain sementara B10 memiliki tingkat korosi paling rendah,

sekitar 38% lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar diesel [11].



Gambar 8.2 Laju korosi baja ringan pada solar dan biodiesel setelah perendaman selama 400 dan 800 jam [11].

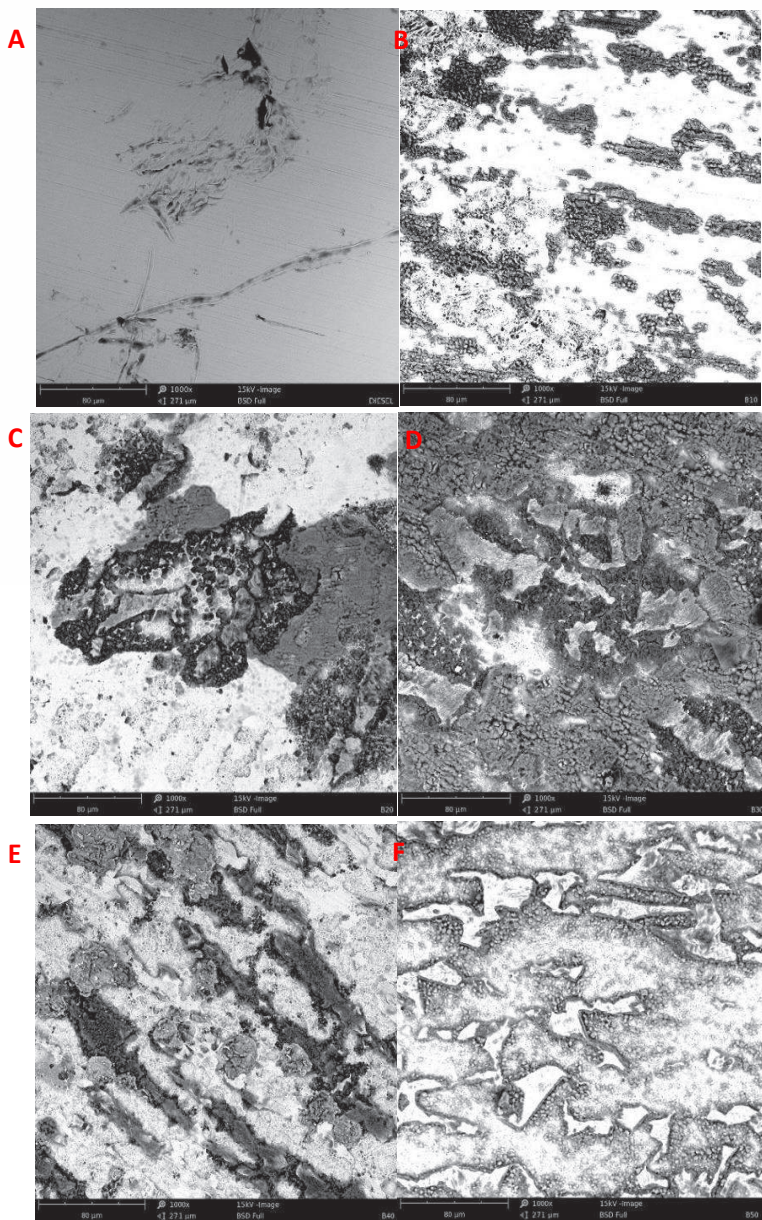
Secara keseluruhan, penambahan biodiesel J50C50 ke dalam bahan bakar diesel menyebabkan percepatan laju korosi baja ringan. Laju korosi tergantung pada persentase volume biodiesel dalam campuran biodiesel-diesel. Peningkatan laju korosi ini seiring dengan peningkatan kandungan biodiesel di solar. Tingginya laju korosi menunjukkan bahwa biodiesel lebih korosif dibandingkan bahan bakar diesel [12]. Hu dkk [13] juga menyebutkan bahwa baja karbon ringan dan tembaga merupakan material yang mudah teroksidasi dibandingkan dengan aluminium dan baja tahan karat.

Stabilitas oksidasi biodiesel yang rendah dibandingkan dengan bahan bakar solar pada mesin menimbulkan masalah, seperti korosi, penyumbatan filter dan deposit pada mesin. Selain itu, kandungannya tidak jenuh metil ester, seperti metil linoleat (C18:2) dan metil linolenat (C18:3) menyebabkan terbentuknya senyawa biodegradable, yaitu asam, aldehida, ester, keton, peroksida dan alkohol [14]. Asam lemak komposisi biodiesel

J50C50 yang sebagian besar terdiri dari asam oleat (36,2%) dan asam linoleat (34,3%), dan asam linolenat dalam jumlah kecil (0,8%). Lama perendaman (jam) berpengaruh terhadap laju korosi, dimana baja ringan direndam dalam durasi waktu lama cenderung memiliki tingkat korosi yang lebih rendah. Namun perlu dicatat, pengurangan berat tidak demikian linier dengan waktu perendaman karena cenderung mengalami perlambatan dibandingkan dengan waktu yang bertambah.

Scanning Electron Microscopy (SEM) digunakan untuk menganalisis morfologi permukaan baja ringan yang direndam dalam bahan bakar: B0, B10, B20, B30, B40 dan B50 masing-masing selama 400 jam dan 800 jam seperti yang ditunjukkan pada Gambar (8.3). Pengamatan dilakukan untuk mengevaluasi dampak bahan bakar biodiesel terhadap korosi selama statis pencelupan. Terlihat jelas adanya perubahan morfologi permukaan logam akibat korosi. Waktu perendaman menunjukkan degradasi material baja ringan lebih besar akibat perendaman dalam bahan bakar dicampur dengan biodiesel. Pada perbesaran 1000x, luas area pada permukaan logam yang terkena korosi baja ringan menjadi lebih luas dengan bertambahnya durasi waktu. SEM juga menunjukkan tingkat korosi dan degradasi material permukaan. Lubang bundar terlihat pada permukaan merupakan indikasi serangan korosi [11].

Korosi lubang pada logam permukaan juga dapat disebabkan oleh beberapa jenis asam monokarboksilat, seperti asam format, asam asetat, asam propionat, asam kaproat. Kupon baja ringan itu rentan terhadap serangan biodiesel campuran padahal kupon kat baja ringan direndam di dalamnya diesel tidak menunjukkan korosi yang signifikan. Durasi waktu perendamannya juga cukup besar pengaruhnya terhadap perubahan morfologi permukaan kupon [11].



Gambar 8.3. Foto optik (1000×) yang menunjukkan morfologi produk korosi pada permukaan baja ringan setelah perendaman 400 jam pada suhu kamar (25~30 °C) untuk (a) B0, (b) B10, (c) B20, (d) B30, (e) B40 dan (f) B50 [11].

Laju korosi pada pada baja ringan untuk tangki penyimpanan dapat direduksi dengan memberikan lapisan CaCO_3 yang berasal dari limbah cangkang telur. Metode Codeposition digunakan untuk mengembangkan Zn-10% CaCO_3 -ESP (*single and double layer*). Korosi sampel diuji dalam lingkungan biodiesel *Jatropha curcas* (JBD). Efisiensi proteksi korosi sebesar 68,87% diperoleh dengan menggunakan lapisan ganda Zn-10% CaCO_3 -ESP. Kerusakan korosi yang tinggi akibat mekanisme korosi lubang terlokalisasi diamati pada baja ringan tanpa pelapis. Lapisan baru ini dapat digunakan dalam fabrikasi industri tangki penyimpanan biodiesel karena CaCO_3 -ESP dibuat dengan metode sederhana [15].

2. Laju Korosi Pada Aluminium

Degradasi, kontaminasi dan korosi masih menjadi permasalahan utama dalam permasalahan pemanfaatan biodiesel. Seperti diketahui, biodiesel memiliki kerentanan yang lebih tinggi terhadap degradasi dan kontaminasi. Biodiesel menunjukkan stabilitas penyimpanan yang lebih rendah karena biodiesel sensitif terhadap oksigen. Ketika oksidasi biodiesel terjadi, beberapa turunan terbentuk akibat degradasi. Hal ini dapat menghasilkan senyawa yang memicu kontaminasi pada bahan bakar minyak. Seperti diketahui, biodiesel lebih korosif dibandingkan minyak petrodiesel [7].

Efek korosi biodiesel minyak lobak pada aluminium dan baja tahan karat hanya kecil, serupa dengan solar. Efek biodiesel terhadap logam ini disebabkan oleh oksidasi komponen dalam biodiesel, oksigen, dan atom oksigen aktif dalam biodiesel sehingga menyebabkan terbentuknya oksida logam (CuO , Cu_2O , Fe_2O_3) [13].

Beberapa uji korosi yang melibatkan aluminium yang bersentuhan dengan berbagai biodiesel menunjukkan bahwa laju

korosi bervariasi tergantung pada kandungan biodiesel. aluminium menunjukkan ketahanan kontak yang tinggi selama uji korosi pada biodiesel bunga matahari dengan penampakan a fase pada permukaannya. Terciptanya lapisan oksida Al_2O_3 yang kuat dan protektif (85,59%) pada permukaan logam. Selain itu, komponen asam lemak jenuh dan tak jenuh tunggal dalam komposisi metil ester asam lemak kurang rentan terhadap proses oksidasi, sehingga mengurangi kerusakan material [16].

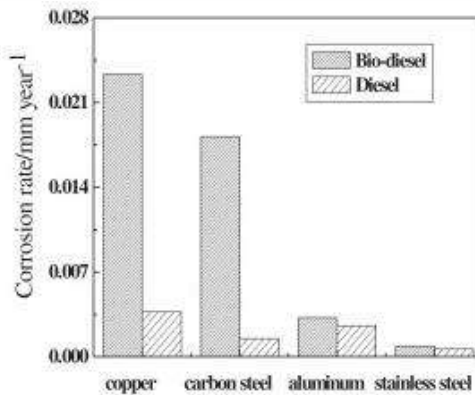
Efek korosi biodiesel minyak lobak pada aluminium dan baja tahan karat hanya kecil, hampir serupa dengan solar (gambar 8.4). Efek biodiesel terhadap logam ini disebabkan oleh oksidasi komponen dalam biodiesel, oksigen, dan atom oksigen aktif dalam biodiesel sehingga menyebabkan terbentuknya oksida logam (CuO , Cu_2O , Fe_2O_3 , dll). Baik tembaga maupun baja karbon ringan mudah teroksidasi, dan reaksi kimia terjadi dengan cepat pada oksida logam. Sebaliknya, aluminium dan baja tahan karat mendukung pembentukan lapisan oksida logam, yang mencegah oksidasi logam dan memungkinkan laju korosi yang lebih rendah. Lapisan oksida logam tidak hanya mencegah oksigen dan atom oksigen bersentuhan dengan permukaan logam, tetapi juga mencegah sampel minyak bersentuhan dengan permukaan logam. Jadi, tingkat korosinya lebih rendah. Demikian pula, laju korosi empat logam lebih rendah pada solar, hal ini disebabkan oleh stabilitas kimia solar yang terdiri dari hidrokarbon jenuh [13].

3. Laju Korosi Pada Tembaga

Hu dkk. [13] menyatakan, korosi tembaga dan baja karbon ringan lebih parah dibandingkan aluminium dan baja tahan karat pada biodiesel minyak lobak yaitu masing-masing 0,02334 mm/tahun dan 0,01819 mm/tahun untuk biodiesel, serta 0,0037 mm/tahun dan 0,0015 mm/tahun untuk solar. Laju

korosi tembaga pada biodiesel kira-kira enam kali lebih cepat dibandingkan pada solar. Laju korosi baja karbon ringan pada biodiesel kira-kira 12 kali lebih cepat dibandingkan pada solar.

Laju korosi pada tembaga dan baja karbon ringan lebih parah dibandingkan aluminium dan baja tahan karat setelah terpapar biodiesel lobak yaitu masing-masing 0,02334 mm/tahun dan 0,01819 mm/tahun untuk biodiesel (gambar 8.4). Laju korosi tembaga pada biodiesel dari minyak lobak kira-kira enam kali lebih cepat dibandingkan pada solar. Laju korosi baja karbon ringan pada biodiesel kira-kira 12 kali lebih cepat dibandingkan pada solar [13].



Gambar 8.4 Variasi laju korosi logam pada biodiesel dan solar [13]

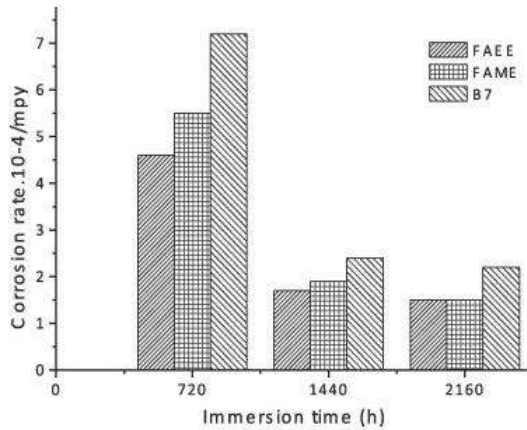
4. Laju Korosi Pada Baja Tahan Karat

Komposisi kimia ester dalam biodiesel bertanggung jawab atas sifat utamanya dan bergantung pada bahan bakunya. Korosivitas biodiesel juga dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain bilangan asam, kadar air, logam dan asam tak jenuh [19]. Logam yang terpapar biodiesel kedelai akan mengalami pengurangan berat, mungkin karena kontak oksidatif dengan bahan bakar, yang menunjukkan pelepasan ion dari permukaan logam ke cairan. Biodiesel minyak kedelai (B7) menyebabkan penurunan berat badan yang besar pada baja tahan

karat AISI 316 jika dibandingkan dengan yang lain (Gambar. 8.4), kemungkinan karena bilangan asamnya sedikit lebih tinggi. Laju korosi pada baja tahan karat sangat rendah, seperti yang diharapkan, dengan nilai berkisar antara $1,5 \times 10^{-4}$ hingga $7,5 \times 10^{-4}$ mpy.

Pengaruh waktu pemaparan dan komposisi bahan bakar telah diverifikasi. Laju korosi juga dapat bergantung pada bagian alkohol dari rantai ester, yang masing-masing terdiri dari gugus etil dan metil dalam sampel Metil ester asam lemak (FAME) dan etil ester asam lemak (FAEE). Komposisi berpengaruh terhadap korosi, dimana baja tahan karat AISI 316 lebih rentan terhadap FAME dibandingkan FAEE, hal ini menunjukkan peningkatan korosifitas pada sampel tersebut, sejalan dengan bilangan asam yang lebih rendah. Pengaruh gugus metil dan etil alkohol terutama relevan pada tahap perendaman pertama (720 jam), pada awal korosi (Gambar 8.5). Pada tahap ini korosi ditentukan oleh sifat bahan bakar, karena proses oksidasi berada pada tahap awal. Laju korosi tidak bergantung pada komposisi ester.

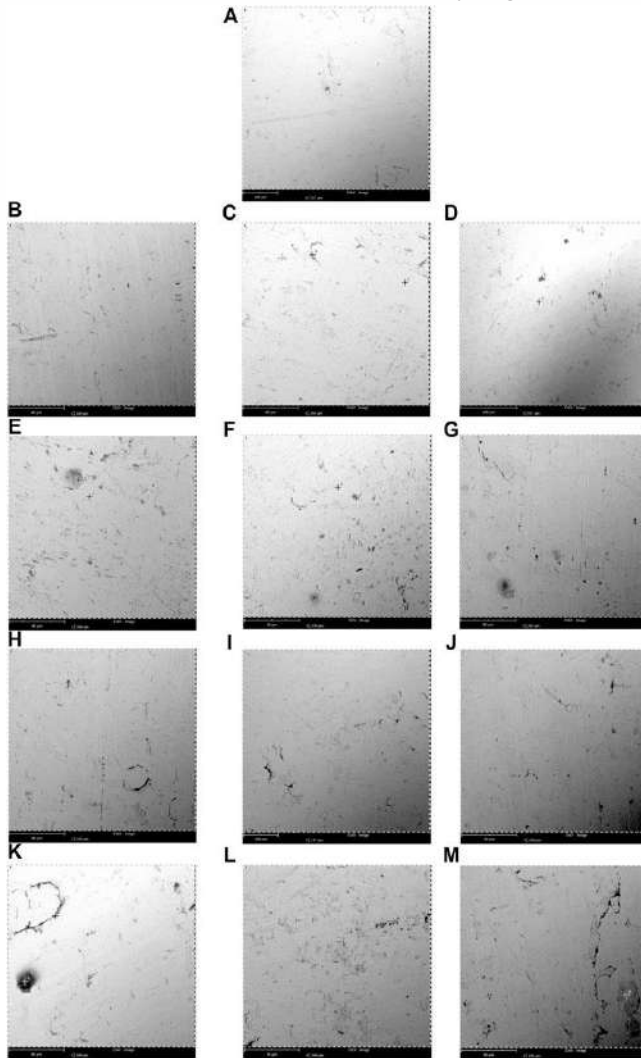
Korosi dapat dipicu oleh senyawa asam dalam biodiesel, setelah itu identitas kimia ester, terutama ditandai dengan polaritasnya yang memberikan atom oksigen, bertindak sebagai penghambat degradasi logam. Gugus fungsi ester telah dikaitkan dengan peningkatan pelumasan ultra low sulfur diesel (ULSD). [17] mengamati sifat kontradiktif biodiesel berdasarkan pernyataan tribo-korosi. Meskipun biodiesel rentan terhadap oksidasi dan sangat korosif, beberapa pengujian menunjukkan bahwa biodiesel dapat mengurangi keausan dan gesekan pada kondisi tertentu (misalnya penggunaan jangka pendek). Secara umum oksidasi biodiesel adalah ion logam yang dilepaskan dari permukaan logam yang mampu mengubah beberapa sifat bahan bakar, terutama stabilitas oksidatif.



Gambar 8.5 Laju korosi baja tahan karat pada waktu perendaman [18].

Milano dkk. [19] mengamati permukaan tahan karat SS316 yang telah terpapar biodiesel campuran WCO dan *C. innopylum* hingga 600 hari pada berbagai rasio (B5-B30) (gambar 8.6). Gambar (8.6-A) menunjukkan benda uji baja tahan karat 316 sebelum perendaman (0 hari), Gambar 8.6B-G menunjukkan perendaman baja tahan karat 316 pada B5, B10, B15, B20, B25, dan B30 pada waktu 300 hari (7.200 jam), dan Gambar 8.6H -M menunjukkan perendaman baja tahan karat 316 dalam B5, B10, B15, B20, B25, dan B30 pada 600 hari (14,400 jam). Paparan kupon baja tahan karat pada B5 dan B10 selama 7.200 jam menunjukkan kehilangan massa yang lebih sedikit dan laju korosi yang rendah. Mikrograf SEM menunjukkan sedikit titik korosi tergambar pada B5 dan B10. Lubang korosi kecil (*pitting corrosion*) terlihat pada morfologi SEM untuk B15 dan B20. Lebih banyak lubang ditemukan pada bahan bakar campuran B25 dan B30. Laju korosi selama 7.200 jam pada semua bahan bakar campuran adalah minimal. Morfologi SEM berhasil menangkap pembentukan lubang di kupon. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi biodiesel yang lebih tinggi pada bahan bakar

campuran akan merangsang terjadinya korosi pada kupon baja tahan karat 316 pada periode perendaman yang sama.



Gambar 8.6 mikrograf campuran biodiesel-diesel dengan lama perendaman berbeda untuk baja tahan karat 316 (A) 0 hari, (B-G) B5, B10, B15, B20, B25, dan B30 pada umur 300 hari, (H-M) B5, B10, B15, B20, B25, dan B30 pada umur 600 hari pada suhu kamar (25°C–30°C) [19].

Morfologi yang diperoleh dari SEM yang disajikan pada Gambar 8.6 H-M menunjukkan bahwa baja tahan karat 316

memiliki ketahanan korosi yang lebih tinggi ketika spesimen direndam dalam berbagai rasio bahan bakar biodiesel-diesel. Meskipun periode perendaman diperpanjang melampaui periode perendaman spesimen baja ringan, serangan korosi masih kecil dengan sedikit pembentukan sedimen. Hasil uji EDS menunjukkan adanya kandungan karbon, oksigen, dan kromium untuk B20 pada waktu 600 jam sebesar 22,22 (b/b)%, 9,59 (b/b)%, dan 8,14 (b/b)%. Paparan baja tahan karat 316 terhadap campuran biodiesel-diesel menyebabkan terbentuknya titanium karbida (TiC) dan kromium (III) oksida (Cr_2O_3) pada spesimen. Partikel TiC membentuk penstabil karbida yang memperkuat permukaan baja tahan karat 316, sedangkan Cr_2O_3 membentuk lapisan oksida tipis pada permukaan baja tahan karat, yang disebut “lapisan pasif”. Baja tahan karat yang terkena molekul oksigen menyebabkan terbentuknya lapisan oksida logam yang mencegah oksidasi logam dan menghasilkan laju korosi yang lebih rendah.

Film pasif tipis dan tidak terlihat, dan logam tetap berkilau dan halus dengan film yang menempel padanya. Lapisan film pasif akan terbentuk kembali saat permukaan tergores, dan mencegah korosi menyebar ke struktur internal logam. Baja tahan karat dapat mencegah kontaminasi logam pada campuran biodiesel-diesel karena sifat film yang pasif. Paduan tersebut dapat digunakan untuk membuat tangki penyimpanan atau kapal tanker untuk mengangkut biodiesel karena ketahanannya terhadap korosi. Disarankan juga untuk digunakan untuk membuat beberapa bagian umum pada mesin seperti manifold buang, pompa bahan bakar, filter bahan bakar, saluran bahan bakar, tangki bahan bakar, bahkan pengikat, penahan, klip, sekrup, mur, dan baut yang dapat digunakan. untuk mengamankan bagian-bagian mesin. Bagian-bagian tersebut secara sadar terkena biodiesel-diesel, sehingga sangat penting

untuk memilih bahan yang cocok untuk mengamankan ruang mesin dan jalur perutean serta untuk detail mesin.

Selain itu, biodiesel dari minyak non nabati (minyak jelantah campuran dengan minyak *C. inophyllum*) dengan kandungan asam lemak tak jenuh yang tinggi. Faktanya, kandungan asam lemak tak jenuh yang tinggi akan menyebabkan tingginya reaktivitas dengan molekul oksigen. Hal ini akan menyebabkan rendahnya stabilitas oksidasi biodiesel. Menurut standar ASTM D6751 dan EN 14214, stabilitas oksidasi pada 110°C masing-masing harus berada pada 3–6 jam. Biodiesel W70CI30 memiliki stabilitas oksidasi yang jauh lebih tinggi (18,03 jam). Stabilitas oksidasi yang unggul telah memperlambat laju korosi bahan logam. Bahan logam direndam dalam lingkungan dengan atom oksigen aktif rendah yang akan menciptakan lingkungan yang kurang menguntungkan untuk serangan korosi [19].

5. Laju Korosi Pada Besi Cor

Besi cor juga memiliki tingkat korosif paling rendah pada solar dibandingkan biodiesel. Laju korosi pada petrodiesel sebesar 0,077 mpy dan biodiesel sebesar 0,112 mpy. Biodiesel tidak hanya menimbulkan korosi pada tembaga, kuningan dan aluminium, namun juga menimbulkan korosi pada besi cor dibandingkan dengan petrodiesel. Ditemukan juga bahwa laju korosi meningkat pada logam besi dengan biodiesel dibandingkan dengan solar karena adanya oksigen dan penyerapan air [20].

Tabel 8.1 Laju Korosi Pada Logam Yang Terpapar Biodiesel

Jenis biodiesel	Material	Lama perenda man (jam)	Laju korosi (mm/tahun	author
J.curcas dan Ceiba pentandra.	Baja ringan	800	0,023	[11]
lobak	Baja ringan	1.440	0,01819	[13]
WCO (B100)	Baja ringan	1.200	0.00043	[21]
WCO (B100)	Baja ringan	2.000	0.04	[5]
Lemak ayam	Aluminium	1120	0,00192	[6]
lobak	Aluminium	1.440	0,005	[13]
WCO	Al 1050/ Al 7075	270	< 0.0012	[22]
Lemak ayam (B10)	Tembaga	1120	0,00318	[6]
lobak	Tembaga	1.440	0,024	[13]
WCO (B100)	Tembaga	2.000	0,2	[5]
Mimba (B10)	Tembaga	360	8,108	[23]
Sawit	Besi cor nodular	168	0,776	[20]
Sawit	Baja tahan karat	1.200	0,0000902	[9]
sawit	Baja galvanis	1.200	$3.628 \cdot 10^{-4}$	[9]
WCO (B100)	Kuningan	270	< 0.0075	[22]
C. inophyllum (CI) dan WCO	Baja ringan	7.200	0,6257	[19]
C. inophyllum (CI) dan WCO	SS 316	7.200	0,0472	[19]
J.curcas	Baja tahan karat	1.600	0.1 m/y	[24]

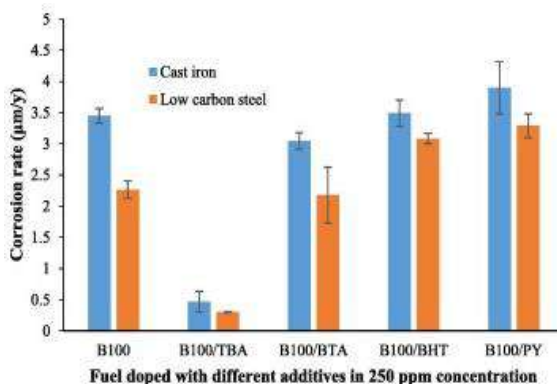
Laju korosi yang lebih tinggi pada biodiesel 100%, dan laju korosi menurun seiring dengan menurunnya persentase biodiesel dalam campuran. Tingkat korosi terendah ditemukan pada petrodiesel. Perilaku serupa juga terlihat pada kupon Besi tuang nodular yang diperkeras. Ketika membandingkan kondisi yang tidak diperkeras dan yang diperkeras, perbedaannya menunjukkan bahwa laju korosi dari 100% biodiesel dan campurannya, serta 100% solar lebih tinggi pada kupon yang tidak diperkeras. dibandingkan dengan kupon pengerasan Besi tuang nodular Hal ini disebabkan karena perlakuan pengerasan yang mengubah fasa, kekerasan dan struktur mikro. Perlakuan panas yang tepat juga meningkatkan ketahanan terhadap korosi [20].

B. Penambahan Anti Oksidan pada Laju Korosi

Peroksida dan hidroperoksida merupakan produk utama oksidasi biodiesel dengan degradasi lebih lanjut; produk ini membentuk senyawa rantai pendek seperti asam, aldehida, keton, dan alkohol. Kehadiran alkohol menurunkan titik nyala dan kehadiran asam meningkatkan keasaman total dan risiko korosi. Reaksi lebih lanjut dengan spesies hidroperoksida yang tidak stabil dengan rantai asam lemak lain dapat membentuk bahan dengan berat molekul tinggi, seperti asam dimer atau trimer yang dapat menyebabkan pemblokiran filter, kegagalan injektor, dan pembentukan endapan. Stabilitas oksidasi biodiesel merupakan kriteria kualitas penting untuk kemungkinan komersialnya. Untuk dapat dikomersialkan, stabilitas oksidasi biodiesel yang dihasilkan dari berbagai bahan baku harus dipahami dengan baik dan memenuhi standar [25].

Inhibitor adalah adsorbat yang dapat membantu dalam pembentukan ikatan antara permukaan logam dan molekul cair. Efektivitas inhibitor korosi akan bergantung pada kemampuan

adsorpsinya pada permukaan logam. Inhibitor korosi yang paling terkenal adalah senyawa 191electro yang mengandung atom nitrogen, oksigen dan/atau sulfur, senyawa heterosiklik dan 191lectron pi. Fungsi polar biasanya dianggap sebagai pusat reaksi terbentuknya proses adsorpsi [21]. Fazal dkk [26] menyebutkan beberapa bahan bisa digunakan sebagai ditambahkan inhibitor seperti Tert-Butilamin (TBA), Benzotriazol (TBA), Butilat-dhidroksi-toluen (BHT) dan Pirogallol (PY) untuk menghambat laju korosi *Cast Iron* (CI) dan *Low Carbon Steels* (LCS) yang direndam dalam B100 (Gambar 8.7). Terlihat bahwa laju korosi CI dan LCS masing-masing adalah 2,26 $\mu\text{m}/\text{y}$ dan 3,45 $\mu\text{m}/\text{y}$. Setelah menambahkan 250 ppm TBA dalam B100, laju korosi CI dan LCS berkurang masing-masing menjadi 0,46 $\mu\text{m}/\text{y}$ dan 0,3 $\mu\text{m}/\text{y}$. Dibandingkan dengan CI, LCS lebih melindungi terhadap korosi; selain itu, sifat pelindungnya semakin meningkat dengan penambahan TBA. Namun bahan tambahan lainnya yaitu BTA, BHT, dan PY tidak terlalu efektif dalam mengurangi korosi. LCS juga menunjukkan ketahanan korosi yang lebih baik daripada CI. Laju korosi LCS semakin meningkat dengan penambahan TBA pada biodiesel sawit.



Gambar 8.7 laju korosi pada besi tuang dan baja karbon pada biodiesel sawit [26]

Butylated hydroxytoluene BHT adalah senyawa 192lectro yang larut dalam lemak, secara kimia merupakan turunan dari fenol. BHT terutama digunakan sebagai bahan tambahan makanan yang memanfaatkan sifat antioksidannya. BHT juga didokumentasikan sebagai aditif antioksidan dalam beragam produk seperti kosmetik, obat-obatan, karet, minyak trafo listrik, dan cairan pembalseman. Dalam industri perminyakan, di mana BHT dikenal sebagai aditif bahan bakar, BHT juga digunakan dalam cairan hidrolik, oli turbin dan roda gigi, serta bahan bakar jet, dan aplikasi lainnya. BHT merupakan senyawa yang mengandung oksigen dengan cincin electron yang melaluinya teradsorpsi pada permukaan logam [21].

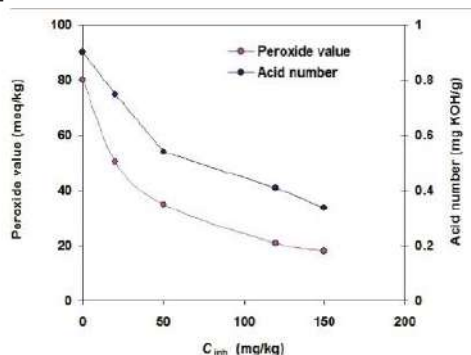
Penurunan berat dan nilai laju korosi baja karbon pada paparan bahan bakar yang berbeda setelah perendaman selama 1200 jam disajikan pada tabel (8.2). Terlihat bahwa biodiesel murni (B100) lebih korosif dibandingkan solar murni (B0). Ditemukan juga bahwa laju korosi baja karbon dalam campuran bahan bakar meningkat seiring dengan meningkatnya persentase biodiesel.

Tabel 8.2 Penurunan Berat Dan Nilai Laju Korosi Baja Karbon Yang Telah Terpapar Bahan Bakar Yang Berbeda [21]

Jenis bahan bakar tanpa dan penambahan BHT	Berat yang hilang (mg)	Laju korosi (mg/cm ² /h)
B0	1,2	$1,66 \times 10^{-4}$
B20	1,8	$2,50 \times 10^{-4}$
B50	2,3	$3,19 \times 10^{-4}$
B100	3,1	$4,30 \times 10^{-4}$
B20 (20 mg/kg)	0,8	$1,11 \times 10^{-4}$
B20 (50 mg/kg)	0,6	$8,33 \times 10^{-4}$
B20 (120 mg/kg)	0,2	$2,77 \times 10^{-4}$
B20 (150 mg/kg)	0,1	$1,38 \times 10^{-4}$

Fazal dkk. [27] menjelaskan bahwa keberadaan asam lemak bebas, gugus oksigen, kandungan air dan pengotor yang tersisa setelah pengolahan tampaknya meningkatkan sifat korosif biodiesel dibandingkan dengan bahan bakar diesel. Selain itu, biodiesel bersifat higroskopis [28] dan hal ini tampaknya meningkat seiring bertambahnya waktu pemaparan. Dibandingkan dengan solar, biodiesel lebih higroskopis. Peningkatan laju korosi dalam campuran bahan bakar yang meningkat seiring dengan peningkatan persentase biodiesel dapat disebabkan oleh adanya konsentrasi komponen asam tak jenuh dan kandungan air yang lebih tinggi [29]. Efek korosi biodiesel pada baja karbon disebabkan oleh oksidasi komponen dalam biodiesel, oksigen, dan atom oksigen aktif dalam biodiesel sehingga menyebabkan terbentuknya oksida logam (Fe_2O_3).

Efisiensi penghambatan korosi meningkat dengan meningkatnya konsentrasi BHT, sedangkan laju korosi menurun dengan konsentrasi BHT. Penghambatan korosi baja karbon pada campuran biodiesel B20 oleh BHT dapat disebabkan oleh dua 194lectr. Faktor pertama adalah adsorpsi BHT pada antarmuka baja karbon/biodiesel. Jelas bahwa molekul BHT mampu teradsorpsi pada permukaan baja karbon melalui pasangan 194lectron bebas gugus OH [30]. Faktor kedua adalah terhambatnya oksidasi biodiesel dengan penambahan BHT dan hal ini menyebabkan penurunan keasaman dan bilangan peroksida campuran biodiesel B20 dan akibatnya menurunkan laju korosi [31].



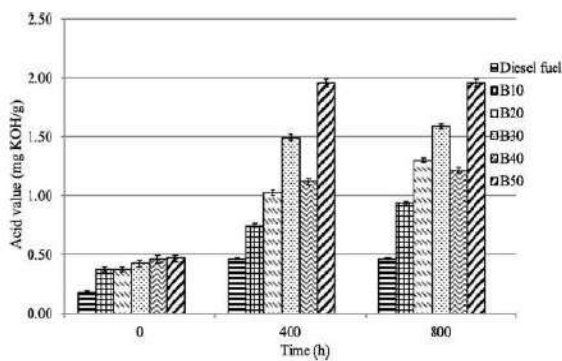
Gambar 8.8 Hubungan bilangan asam dan bilangan peroksida biodiesel campuran B20 dengan konsentrasi BHT yang berbeda [21].

Untuk membahas lebih lanjut pengaruh penambahan BHT terhadap bilangan asam dan bilangan peroksida campuran biodiesel B20 selama periode penyimpanan 1200 jam pada suhu 298 K. Ditunjukkan hubungan bilangan asam dan bilangan peroksida campuran biodiesel B20 dengan konsentrasi BHT yang berbeda. Pada Gambar (8.8). Seperti yang diharapkan, bilangan asam dan bilangan peroksida campuran biodiesel B20 menurun dengan meningkatnya konsentrasi BHT. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan BHT menghambat oksidasi biodiesel

campuran B20. Hasil ini jelas menunjukkan bahwa baja karbon kurang rentan terhadap korosi akibat campuran biodiesel B20 dengan adanya BHT [21].

C. Nilai Asam Biodiesel Setelah Terpapar Logam

Peningkatan viskositas dapat disebabkan oleh pembentukan produk dengan berat molekul lebih tinggi dan isomerisasi ikatan rangkap. Biodiesel juga mengandung lebih banyak asam lemak tak jenuh dibandingkan asam lemak jenuh sehingga stabilitas oksidasinya lebih rendah. Pembentukan produk teroksidasi terjadi setelah jangka waktu penyimpanan yang lama (lebih dari 4 bulan). Molekul yang terbentuk bersifat polar dan mengandung lebih banyak oksigen. Proses oksidasi selanjutnya menyebabkan peningkatan kadar asam lemak bebas, pembentukan isomerisasi ikatan rangkap dan peningkatan saturasi serta produksi molekul dengan berat molekul lebih tinggi. Selain itu, biodiesel dapat menyerap air karena masih adanya mono- dan di-gliserida yang dihasilkan dari reaksi tidak sempurna dalam sintesis metil ester. Molekulnya dapat bertindak sebagai pengemulsi dan mendorong air tercampur dengan biodiesel. Kehadiran air merupakan pemicu penting terjadinya reaksi yang berujung pada korosi [7].



Gambar 8.9 Perubahan nilai asam total campuran bahan bakar biodiesel-diesel J50C50 sebelum dan sesudah paparan baja ringan [11].

Bilangan asam adalah nilai konsentrasi kandungan asam dalam larutan tidak berair. Nilai ini diturunkan dengan menghitung jumlah kalium hidroksida (KOH) yang diperlukan untuk menetralkan 1 g sampel dan itu menunjukkan jumlah gugus asam karboksilat di dalamnya. Batas baku nilai asam pada campuran biodiesel adalah 0,5 mg KOH/g untuk standar ASTM D6751 dan EN 14214 [11].

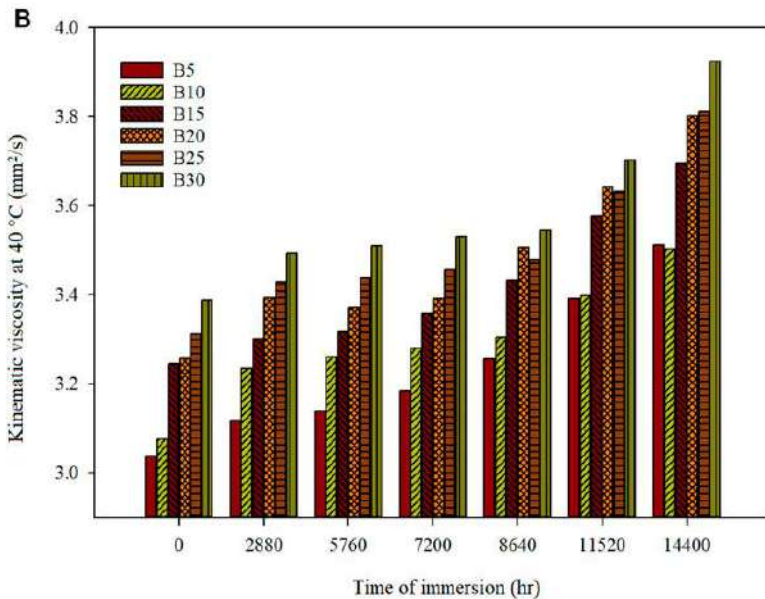
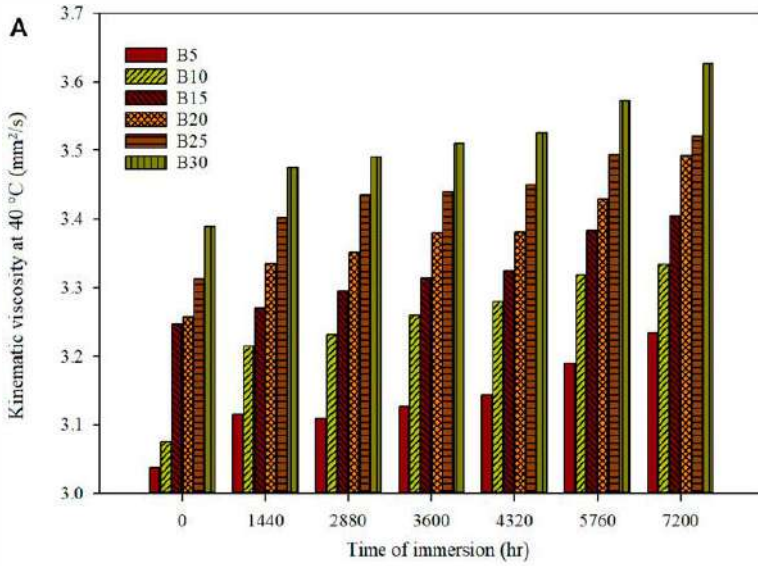
Nilai asam yang diukur untuk campuran bahan bakar biodiesel-diesel masing- B0, B10, B20, B30, B40 dan B50 sebelum terpapar baja ringan masing-masing adalah 0,17, 0,373, 0,374, 0,428, 0,455 dan 0,468 mg KOH/g. Nilai asam meningkat seiring bertambahnya waktu perendaman baja ringan. Gambar (8.9) menunjukkan bahwa terjadi peningkatan nilai asam yang signifikan pada setiap waktu pengamatan akibat paparan baja ringan. Nilai asam bahan bakar solar lebih stabil dan sedikit meningkat, namun dalam skala yang lebih kecil. Hampir pada seluruh bahan bakar yang terpapar kupon logam (baja ringan) mengalami proses oksidasi yang pada akhirnya meningkatkan konsentrasi asam dalam campuran bahan bakar. Nilai asam untuk B50 yang menunjukkan nilai tertinggi pada saat direndam antara 400 jam dan 800 jam. Menurut Fazal dkk. [27], peningkatan nilai asam disebabkan oleh peningkatan oksidasi biodiesel untuk membentuk asam lemak bebas dalam bahan bakar. Adanya asam korosif pada kaleng bahan bakar meningkatkan nilai asam. Selain itu, banyaknya asam juga dapat digunakan untuk menentukan kadar bebasnya asam lemak dan asam lainnya, yang bertanggung jawab atas degradasi biodiesel [12].

Komariah dkk, [7] menyebutkan keasaman biodiesel meningkat dengan semakin lamanya durasi penyimpanan di setiap tangki penyimpanan. Oleh karena itu, peningkatan nilai asam mungkin bukan disebabkan oleh paparan bahan tangki baja melainkan dari kandungan oksigen biodiesel dan interaksi

molekul selama durasi penyimpanan. Jumlah asam lemak bebas yang lebih besar dalam bahan bakar tidak hanya akan menyebabkan nilai asam yang lebih besar tetapi juga dapat menjadi penyebab terjadinya karat pada pipa bahan bakar.

D. Viskositas Kinematik

Paparan campuran biodiesel-diesel dengan bahan logam menyebabkan terjadinya degradasi pada campuran bahan bakar. Viskositas mewakili fluiditas campuran yang dicampur; Perubahan viskositas akan mempengaruhi pembakaran campuran bahan bakar. Viskositas yang tinggi pada campuran yang dicampur akan menimbulkan beban pada pompa bahan bakar, sehingga mengakibatkan lebih banyak energi bagi pompa bahan bakar untuk mengalirkan bahan bakar ke injektor. Viskositas biodiesel yang tinggi pada akhirnya akan menurunkan daya mesin karena memerlukan energi masukan yang lebih banyak. Selain itu, viskositas yang lebih tinggi akan menyebabkan tetesan yang lebih besar ketika bahan bakar keluar dari injektor. Tetesan besar akan menyebabkan perubahan suhu mendadak pada permukaan silinder sehingga menyebabkan pembakaran tidak sempurna. Pembakaran yang tidak sempurna akan meningkatkan deposit dalam ruang dan menghasilkan gas yang berbau tajam membentuk aldehida dan asam [19].



Gambar 8.10 Viskositas kinematik pada suhu 40°C pada perbandingan pencampuran biodiesel-diesel yang berbeda untuk (A) baja ringan dan (B) baja tahan karat 316 untuk waktu perendaman tertentu [19].

Viskositas kinematik bahan bakar harus berada dalam kisaran 1,90–6 mm²/s dan 3,5–5 mm²/s sesuai dengan standar ASTM D6751 dan EN 14214. Viskositas kinematik campuran campuran biodiesel-diesel WC70CI30 sebelum dan sesudah perendaman baja ringan dan baja tahan karat 316 masing-masing ditunjukkan pada Gambar 8.10A dan B. Viskositas kinematik campuran biodiesel-diesel meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi biodiesel dalam campuran campuran dalam semua kasus. Selain itu viskositas kinematiknya meningkat seiring dengan lamanya perendaman baja ringan dan baja tahan karat 316 dalam campuran yang dicampur [19].

Viskositas kinematik baja ringan dengan lama perendaman 7.200 jam untuk campuran biodiesel-diesel B5, B10, B15, B20, B25, dan B30 berturut-turut adalah 3,2348, 3,3349, 3,4043, 3,4925, 3,5213, dan 3,6267 mm²/s. Penurunan viskositas kinematik bahan bakar setelah terpapar selama 7.200 jam dalam berbagai rasio pencampuran kurang dari 9% dibandingkan dengan kondisi awal bahan bakar. Viskositas kinematik baja tahan karat dengan lama perendaman 14.400 jam untuk campuran biodiesel-diesel B5, B10, B15, B20, B25, dan B30 berturut-turut adalah 3,5123, 3,5032, 3,6959, 3,8023, 3,8121, dan 3,9245 mm²/s. Penurunan viskositas kinematik bahan bakar setelah terpapar selama 14.400 jam dalam berbagai rasio pencampuran kurang dari 16% dibandingkan dengan kondisi awal bahan bakar. Viskositas kinematik dari semua bahan bakar campuran memenuhi spesifikasi yang diberikan oleh ASTM D6751, tetapi B5–B20 tidak memenuhi persyaratan standar EN 14214. B5–B20 tidak terdegradasi secepat bahan bakar campuran lainnya. Viskositas kinematik menunjukkan tren serupa untuk material baja ringan dan baja tahan karat, dengan persentase degradasi bahan bakar yang serupa berdasarkan waktu perendaman [19].

Umumnya viskositas untuk solar dan biodiesel setelah pengujian meningkat, meskipun peningkatan biodiesel jauh lebih tinggi dibandingkan solar. Fenomena ini dapat dijelaskan dengan adanya perbedaan komposisi bahan bakar karena bahan bakar diesel terdiri dari ratusan senyawa berbeda, sedangkan biodiesel biasanya hanya mengandung empat hingga lima senyawa utama yang semuanya mendidih pada suhu yang sama. Oleh karena itu, ketika dua jenis bahan bakar yang berbeda (diesel dan biodiesel) dicampur dan disimpan pada suhu selama jangka waktu tertentu, terjadi beberapa perubahan komposisi kimia pada campuran tersebut. Selain itu, struktur molekul biodiesel berubah lebih kuat dibandingkan solar murni [24].

E. Pengaruh Temperatur terhadap Laju Korosi

Fazal dkk. [27] meneliti Pengaruh suhu terhadap perilaku korosi baja ringan pada paparan biodiesel sawit. Korosi baja ringan pada solar dan biodiesel meningkat seiring dengan peningkatan suhu. Degradasi sifat bahan bakar akibat paparan baja ringan pada biodiesel sawit meningkat seiring dengan peningkatan suhu. Paparan baja ringan pada biodiesel dapat meningkatkan ketidakstabilan oksidasinya. Hal ini semakin meningkat karena peningkatan suhu perendaman. Serangan korosi pada permukaan logam relatif lebih besar pada biodiesel dibandingkan bahan bakar diesel. Kandungan oksigen pada permukaan logam yang terpapar biodiesel meningkat seiring dengan kenaikan suhu. Oksigen dapat hadir dalam bentuk senyawa yaitu besi karbida atau besi oksida. Pembentukan senyawa oksida selanjutnya dan pelarutannya tampaknya menurunkan permukaan logam.

Tabel 8.3 Nilai laju korosi dan efisiensi inhibitor korosi baja karbon pada campuran biodiesel B20 tanpa dan dengan penambahan BHT yang berbeda pada temperatur yang berbeda [21].

Dengan dan tanpa penambahan BHT (mg/kg)	Temperatur (°K)	laju korosi (mg/cm ² /h)	η _w (%)
B20 tanpa penambahan	298	2.5 x 10 ⁴	
	308	2.76 x 10 ⁴	
	318	4.01 x 10 ⁴	
	328	4.69 x 10 ⁴	
B20+20	298	1.11 x 10 ⁴	55.6
	308	1.5 x 10 ⁴	45.6
	318	2.47 x 10 ⁴	38.4
	328	3.47 x 10 ⁴	26
B20+50	298	8.33 x 10 ⁴	66.6
	308	1.28 x 10 ⁴	53.6
	318	2.19 x 10 ⁴	45.3
	328	2.92 x 10 ⁴	37.7
B20+120	298	2.77 x 10 ⁴	88.9
	308	6.67 x 10 ⁴	75.8
	318	1.5 x 10 ⁴	62.5
	328	2.07 x 10 ⁴	55.8
B20+150	298	1.38 x 10 ⁴	94.4
	308	4.36 x 10 ⁴	84.2
	318	9.98 x 10 ⁴	75.1
	328	1.57 x 10 ⁴	66.5

Tabel (8.3) menunjukkan nilai laju korosi dan efisiensi inhibitor pada baja karbon pada campuran biodiesel B20 tanpa adanya dan adanya konsentrasi BHT yang berbeda pada temperatur yang berbeda. Data pada Tabel 3 menunjukkan

bahwa laju korosi meningkat seiring dengan peningkatan suhu baik dalam larutan tanpa hambatan maupun dengan penghambatan. Dapat dilihat bahwa efisiensi penghambatan menurun dengan meningkatnya suhu. Namun, penurunan η_w % ini kecil pada konsentrasi BHT yang lebih tinggi. Penurunan η_w % ini dapat disebabkan oleh peningkatan laju proses disolusi baja karbon dan desorpsi parsial inhibitor dari permukaan logam dengan peningkatan suhu [21].

F. Bahan Penghambat Korosi

Oksidasi merupakan hambatan utama komersialisasi biodiesel di pasar bahan bakar. Untuk mengurangi perilaku oksidatif biodiesel, penggunaan antioksidan sintetik adalah praktik yang umum dilakukan. Antioksidan digunakan untuk menghambat proses oksidasi biodiesel karena proses ini tidak dapat dihilangkan, hanya dapat diperlambat. Secara kimiawi terdiri dari senyawa fenolik, campuran alkilfenol dan diamina aromatik yang meningkatkan stabilitas biodiesel dengan menghambat kecenderungan kerusakannya selama penyimpanan [32].

Antioksidan/ Inhibitor korosi yang paling terkenal adalah senyawa organik yang mengandung atom nitrogen, oksigen dan/atau sulfur, senyawa heterosiklik dan elektron pi. Fungsi polar biasanya dianggap sebagai pusat reaksi berlangsungnya proses adsorpsi [33]. *Butylated hydroxytoluene* (BHT) adalah senyawa organik yang larut dalam lemak, secara kimia merupakan turunan dari fenol. BHT terutama digunakan sebagai bahan tambahan makanan yang memanfaatkan sifat antioksidannya. BHT juga didokumentasikan sebagai aditif antioksidan dalam beragam produk seperti kosmetik, obat-obatan, karet, minyak trafo listrik, dan cairan pembalseman. Dalam industri perminyakan, di mana BHT

dikenal sebagai aditif bahan bakar, BHT juga digunakan dalam cairan hidrolis, oli turbin dan roda gigi, serta bahan bakar jet, dan aplikasi lainnya. BHT merupakan senyawa organik yang mengandung oksigen dengan cincin aromatik yang melaluinya teradsorpsi pada permukaan logam [34]. Berikut ini beberapa bahan inhibitor untuk penghambat korosi yang digunakan oleh beberapa peneliti (tabel 8.6)

Kinerja tert-butylamine (TBA) hampir delapan kali lebih baik untuk CI dan 20 kali lebih baik untuk LCS dibandingkan benzotriazole (BTA) dalam mengurangi laju korosi. Fazal dkk. [26] menemukan efisiensi penghambatan maksimum sebesar 47% untuk biodiesel sawit yang didoping TBA 100 ppm. Penelitian ini menemukan efisiensi penghambatan sebesar 86,54% untuk biodiesel sawit yang didoping TBA 250 ppm. Efisiensi TBA yang lebih tinggi dapat dikaitkan dengan adanya amina dalam strukturnya, yang dapat membentuk lapisan pelindung terhadap serangan korosi [26].

Serqueira dkk. [5] membandingkan beberapa jenis antioksidan sebagai penghambat laju korosi dengan material yang berbeda. Penambahan antioksidan pada biodiesel dari minyak goreng daur ulang sangat penting dalam memperlambat degradasi dan reaksi korosif. Dalam kasus baja karbon, *Butylated hydroxytoluene* (BHT) merupakan antioksidan yang paling efektif dalam mengurangi laju korosi meskipun semua antioksidan memberikan efek serupa. Laju korosi pada tembaga 10 kali lipat lebih tinggi dibanding dengan baja karbon. Setelah 100 jam percobaan, jelas bahwa semua antioksidan mengurangi proses korosi, yang menunjukkan tindakan mereka sebagai inhibitor korosi.

Efisiensi penghambatan setelah jam percobaan 2016 dihitung masing-masing sebesar 36%, 62%, 81%, dan 45% untuk *tert*-butylhydroquinone (TBHQ), Curc, BHT, dan *Propyl gallate*

(PG). Oleh karena itu, tingkat efisiensi penghambatan korosi pada pengujian baja karbon dengan bahan aditif adalah sebagai berikut: BHT > Curc > PG > TBHQ. Untuk pengujian tembaga, laju korosi pada 2016 jam pada biodiesel murni adalah 0,149 mpy, setelah penambahan antioksidan laju tersebut menurun menjadi 0,086, 0,095, 0,063 dan 0,049 mpy dengan adanya TBHQ, Curc, BHT dan PG, masing-masing. Nilai efisiensi penghambatan masing-masing sebesar 42%, 33%, 56%, dan 66% untuk TBHQ, Curc, BHT dan PG. Dengan demikian, tingkat efisiensi penghambatan korosi untuk pengujian tembaga dan aditif adalah sebagai berikut: PG > BHT > TBHQ > Curc [5].

Tabel 8.4 Inhibitor Untuk Penghambat Laju Korosi Pada Logam

Jenis inhibitor	Jenis biodiesel	Logam	Lama perendaman (jam)	Hasil pengujian	author
Butylated hydroxytoluene (BHT) 150 gram	WCO (B20)	Baja karbon	1.200	Laju korosi 1,11 x 10 ⁻⁴	[34]
tert-butylamine (TBA) (100 ppm)	Palm oil (B100)	Baja karbon	1.200	Laju korosi 0,3 mm/tahun	[26]
daun <i>Psidium guajava</i> L.	kedelai	tembaga	1.440	Efek penghambatan 55,37 %	[32]
tert-butylhydroquinone (TBHQ)	WCO	tembaga	2016	0,086 mpy dan eff 42%	[5]

BHT menunjukkan efisiensi penghambatan yang lebih tinggi untuk biodiesel yang bersentuhan dengan baja karbon, sedangkan PG lebih efektif untuk pengujian tembaga. Penting untuk disebutkan bahwa selain tindakan anti korosi, antioksidan

bertindak sebagai menangkap radikal bebas yang juga mungkin berkontribusi terhadap pengurangan korosi dengan menurunkan konsentrasi pro-oksidan [5].

Selain menggunakan antioksidan sintetis/ bahan kimia, antioksidan alami digunakan untuk meningkatkan stabilitas oksidasi pada biodiesel. Devi dkk [25] menambahkan ekstrak kulit kentang meningkatkan stabilitas oksidasi pada biodiesel minyak Nahar (*Mesua ferrea* L.) dari 5,95 jam menjadi 7,02 jam.

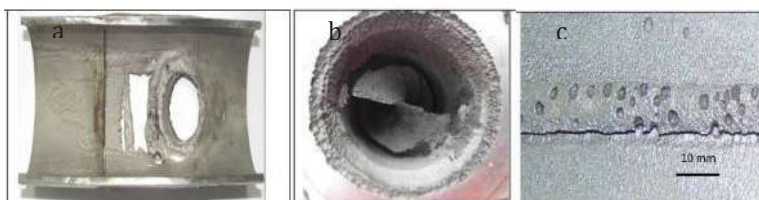
G. Korosi Pada Pabrik Biodiesel

Biodiesel yang memiliki molekul ester (di atas 96%) memiliki sekitar 40% molekul tak jenuh. Dalam hal komposisi unsur, ia memiliki sekitar 10% oksigen. Sedangkan solar yang memiliki rantai hidrokarbon jenuh tidak memiliki unsur oksigen. Mereka juga menambahkan bahwa auto-oksidasi, sifat higroskopis, polaritas dan sifat solvabilitas biodiesel dapat menjadi penyebab utama peningkatan korosi logam dan degradasi elastomer. Selain itu, adanya asam lemak bebas, derajat ketidakjenuhan, pengotor yang tersisa setelah pengolahan dapat memicu degradasi permukaan logam ketika biodiesel bersentuhan [35].

Korosi peralatan baja merupakan masalah utama di pabrik biofuel. Kegagalan yang terjadi akibat korosi mengganggu keandalan operasional yang menyebabkan kerugian produksi dan ekonomi. Korosi baja tahan karat dalam media yang mengandung klorida dipelajari secara luas, namun penelitian ini memiliki aspek baru dalam memantau laju korosi dalam media yang sangat spesifik yang terdiri dari gliserin yang diasamkan dan pada pabrik industri biodiesel. Laju korosi pada proses industri dapat diukur dengan memasang perangkat elektronik online. Probe hambatan listrik adalah perangkat yang menentukan laju korosi elemen sensor dengan variasi hambatan

listrik. Proses korosi cenderung mengurangi luas penampang elemen penginderaan sehingga menyebabkan peningkatan ketahanan terhadap lewatnya arus. Untuk mengimbangi pengaruh suhu terhadap konduktivitas, dua elemen penginderaan digunakan: satu di dalam badan probe dan yang lainnya dipaparkan ke media. Berdasarkan resistansi awal sensor yang diukur, variasi resistansi listrik diukur secara kumulatif dari waktu ke waktu dan kemudian diubah menjadi laju korosi [36].

Torres dkk. [36] menyebutkan dari total kegagalan yang dianalisis di tiga pabrik biodiesel di Brazil, 45,5% terjadi pada unit biodiesel dan 54,5% pada unit gliserin. Kegagalan korosi terjadi pada pipa yang mengangkut biodiesel dan air asam, pada injeksi air asam, pada pencampur biodiesel statis dengan air asam, pada bejana decanter berbentuk silinder, dan pada unit penukar panas. Ketercampuran yang buruk antara biodiesel dan air asam menghasilkan cakupan permukaan pipa dan peralatan yang heterogen oleh biodiesel dan air asam, adanya sel galvanik dan korosi lokal. Penghentian produksi tanpa drainase fase asam yang tepat, konfigurasi yang tidak efisien (geometri diagonal) dari kumparan penyisipan arus netralisasi dalam aliran biodiesel, konsentrasi katalis yang tinggi merupakan penyebab spesifik dari kegagalan yang diteliti. Spesifikasi material tidak cukup untuk mencegah kegagalan korosi [36].



Gambar 8.11 a) Korosi pada pipa berbahan AISI 904L, b) korosi pada mixer statis berbahan AISI 316L dan c) bejana decanter berbentuk silinder [36].

Daftar Pustaka

- [1] *Peraturan Menteri ESDM RI Nomor 12 Tahun 2015 Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral RI , Jakarta (2015), 2015.*
- [2] Y. M. Pusparizkita, T. Setiadi, and A. Harimawan, "Effect of biodiesel concentration on corrosion of carbon steel by *Serratia marcescens*," in *MATEC Web of conferences*, 2018, vol. 156: EDP Sciences, p. 01008.
- [3] V. Thangarasu, B. Balaji, and A. Ramanathan, "Experimental investigation of tribo-corrosion and engine characteristics of Aegle Marmelos Correa biodiesel and its diesel blends on direct injection diesel engine," *Energy*, vol. 171, pp. 879-892, 2019.
- [4] M. Fazal, A. Haseeb, and H. Masjuki, "A critical review on the tribological compatibility of automotive materials in palm biodiesel," *Energy Conversion and Management*, vol. 79, pp. 180-186, 2014.
- [5] D. S. Serqueira *et al.*, "Oxidative stability and corrosivity of biodiesel produced from residual cooking oil exposed to copper and carbon steel under simulated storage conditions: Dual effect of antioxidants," *Renewable Energy*, vol. 164, pp. 1485-1495, 2021.
- [6] A. Shehzad, A. Arslan, F. Rehman, M. Quazi, S. Butt, and M. Jamshaid, "Corrosion behavior of copper, aluminium, and stainless steel 316L in chicken fat oil based biodiesel-diesel blends," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 56, p. 103089, 2023.
- [7] L. N. Komariah, S. Arita, B. E. Prianda, and T. K. Dewi, "Technical assessment of biodiesel storage tank; A corrosion case study," *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 2021.

- [8] C. Rocabrundo-Valdés *et al.*, "Corrosion rate prediction for metals in biodiesel using artificial neural networks," *Renewable Energy*, vol. 140, pp. 592-601, 2019.
- [9] D. Chandran, R. Raviadaran, H. L. N. Lau, A. Numan, P. Elumalai, and O. D. Samuel, "Corrosion characteristic of stainless steel and galvanized steel in water emulsified diesel, diesel and palm biodiesel," *Engineering Failure Analysis*, vol. 147, p. 107129, 2023.
- [10] M. S. Khan *et al.*, "Microbiologically Influenced Corrosion Mechanism of Ferrous Alloys in Marine Environment," *Metals*, vol. 12, no. 9, p. 1458, 2022.
- [11] S. Dharma *et al.*, "Properties and corrosion behaviors of mild steel in biodiesel-diesel blends," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 45, no. 2, pp. 3887-3899, 2023.
- [12] D.-L. Cursaru, G. Brănoiu, I. Ramadan, and F. Miculescu, "Degradation of automotive materials upon exposure to sunflower biodiesel," *Industrial Crops and Products*, vol. 54, pp. 149-158, 2014.
- [13] E. Hu, Y. Xu, X. Hu, L. Pan, and S. Jiang, "Corrosion behaviors of metals in biodiesel from rapeseed oil and methanol," *Renewable energy*, vol. 37, no. 1, pp. 371-378, 2012.
- [14] K. A. Sorate and P. V. Bhale, "Biodiesel properties and automotive system compatibility issues," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 777-798, 2015.
- [15] V. S. A. b. c. d. E. Atikpo a, D.V. Von Kallon "CaCO₃-derived from eggshell waste for improving the corrosion resistance of zinc composite coating on mild steel for biodiesel storage tank," *Chemical Data Collections*, vol. Volume 37, pp. 1-11, 2022.
- [16] M. El Hawary *et al.*, "Investigation of the corrosion of stainless steel, copper and aluminium in sunflower

- biodiesel solution: Experimental and theoretical approaches," *Chemical Data Collections*, vol. 40, p. 100870, 2022.
- [17] F. Sundus, M. Fazal, and H. Masjuki, "Tribology with biodiesel: A study on enhancing biodiesel stability and its fuel properties," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 399-412, 2017.
 - [18] S. M. p. Alves, F. K. D. and Bicudo, T. C. , "Influence of stainless steel corrosion on biodiesel oxidative stability during storage
" *Fuel*, vol. 249, pp. 73-79, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.03.097.
 - [19] J. Milano *et al.*, "Experimental Study of the Corrosiveness of Ternary Blends of Biodiesel Fuel," *Frontiers in Energy Research*, vol. 9, p. 724, 2021.
 - [20] S. Deshpande, A. Joshi, S. Vagge, and N. Anekar, "Effect of heat treatment on corrosion behavior of nodular (spheroidal graphite) cast iron using electrochemical tests in biodiesel environments," *Materials Today: Proceedings*, vol. 28, pp. 684-692, 2020.
 - [21] M. A. Deyab, "The inhibition activity of butylated hydroxytoluene towards corrosion of carbon steel in biodiesel blend B20," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 60, pp. 369-375, 2016, doi: 10.1016/j.jtice.2015.10.035.
 - [22] M. W. Matbouei, D. P. Liang, X. and Hainsworth, S. V, "An investigation of the effect of temperature on the oxidation processes of metallic diesel engine fuel system materials and B100 biodiesel from used cooking oil in exposure testing," *Fuel*, vol. 285, p. 119063, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119063.
 - [23] M. Ateeq *et al.*, "Evaluating corrosion effect of biodiesel produced from neem oil on automotive materials," *Materials Today Sustainability*, vol. 18, p. 100130, 2022.

- [24] M. M. M. Shahabuddin, Md. Bengir Ahmed Shuvho, M. A. K. Chowdhury, M. A. Kalam, and H. H. M. a. M. A. Chowdhury, "A Study on the Corrosion Characteristics of Internal

Combustion Engine Materials in Second-Generation Jatropha Curcas Biodiesel," *energies*, vol. 14, pp. 1-15, 2021.

- [25] A. Devi, V. K. Das, and D. Deka, "Evaluation of the effectiveness of potato peel extract as a natural antioxidant on biodiesel oxidation stability," *Industrial Crops and Products*, vol. 123, pp. 454-460, 2018.
- [26] M. Fazal, B. Sazzad, A. Haseeb, and H. Masjuki, "Inhibition study of additives towards the corrosion of ferrous metal in palm biodiesel," *Energy conversion and management*, vol. 122, pp. 290-297, 2016.
- [27] M. Fazal, A. Haseeb, and H. H. Masjuki, "Effect of temperature on the corrosion behavior of mild steel upon exposure to palm biodiesel," *Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 3328-3334, 2011.
- [28] A. Haseeb, H. H. Masjuki, L. Ann, and M. Fazal, "Corrosion characteristics of copper and leaded bronze in palm biodiesel," *Fuel Processing Technology*, vol. 91, no. 3, pp. 329-334, 2010.
- [29] W. Wang, P. E. Jenkins, and Z. Ren, "Heterogeneous corrosion behaviour of carbon steel in water contaminated biodiesel," *Corrosion Science*, vol. 53, no. 2, pp. 845-849, 2011.
- [30] S. Martinez and I. Štern, "Inhibitory mechanism of low-carbon steel corrosion by mimosa tannin in sulphuric acid solutions," *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 31, pp. 973-978, 2001.
- [31] D. M. Fernandes *et al.*, "Storage stability and corrosive character of stabilised biodiesel exposed to carbon and galvanised steels," *Fuel*, vol. 107, pp. 609-614, 2013.

- [32] F. Fernandes, L. Ferreira, and M. da Silva, "Application of Psidium guajava L. leaf extract as a green corrosion inhibitor in biodiesel: biofilm formation and encrustation," *Applied Surface Science Advances*, vol. 6, p. 100185, 2021.
- [33] M. Deyab, "Application of nonionic surfactant as a corrosion inhibitor for zinc in alkaline battery solution," *Journal of Power Sources*, vol. 292, pp. 66-71, 2015.
- [34] M. Deyab, "The inhibition activity of butylated hydroxytoluene towards corrosion of carbon steel in biodiesel blend B20," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 60, pp. 369-375, 2016.
- [35] M. Fazal, S. Rubaiee, and A. Al-Zahrani, "Overview of the interactions between automotive materials and biodiesel obtained from different feedstocks," *Fuel Processing Technology*, vol. 196, p. 106178, 2019.
- [36] C. E. d. A. S. Torres, C. G. F. Costa, A. P. Pereira, M. d. M. R. de Castro, and V. d. F. C. Lins, "Corrosion failure analysis in a biodiesel plant using electrical resistance probes," *Engineering Failure Analysis*, vol. 66, pp. 365-372, 2016.



BAB IX

Karakteristik Keausan dan Gesekan Biodiesel

Salah satu kendala terbesar yang dihadapi para insinyur akibat penggunaan biodiesel adalah kegagalan bagian-bagian mesin yang mahal termasuk (i) komponen statis: tangki bahan bakar, filter, rumah injektor pompa bahan bakar, saluran bahan bakar, sistem pembuangan, liner silinder, dll dan (ii) komponen dinamis: piston, ring piston, katup masuk dan buang, pompa bahan bakar dan filter pendorong, batang penghubung dan lain-lain. Komponen ini terbuat dari logam besi dan non-besi yang berbeda dan dapat bersentuhan langsung dengan bahan bakar dan oli mesin. Telah banyak penelitian mendalam tentang tribologi pada bahan bakar atau minyak berbeda selain biodiesel [1].

Kualitas bahan bakar sangat dipengaruhi oleh tingkat pelumasannya. Pelumasan bahan bakar mesin sangat penting untuk memperpanjang umur mesin. Hal ini memberikan perlindungan pada permukaan bergerak terhadap keausan. Pelumasan yang baik juga penting untuk mengurangi konsumsi energi dengan mengurangi gesekan pada komponen otomotif [2]. Untuk beberapa komponen mobil seperti injektor bahan bakar dan pompa, masalah pelumasan sangatlah penting karena komponen tersebut dilumasi oleh bahan bakar itu sendiri. Pada mesin mobil, suhu saluran masuk bahan bakar tampaknya berada di atas 60 °C yang juga dapat mempengaruhi pelumasan [3]. Terutama, pelumasan bahan bakar pada injektor bahan bakar dan pompa bahan bakar bertekanan tinggi dapat berubah secara signifikan karena suhu yang lebih tinggi. Faktanya, pelumasan bahan bakar diesel konvensional buruk. Selain itu, pesatnya

pertumbuhan modernisasi dan perkembangan teknologi menyebabkan menipisnya sumber daya bahan bakar fosil (diesel) dunia yang terbatas. Oleh karena itu, sangat penting untuk menemukan bahan bakar alternatif yang dapat mengatasi permasalahan yang semakin meningkat ini.

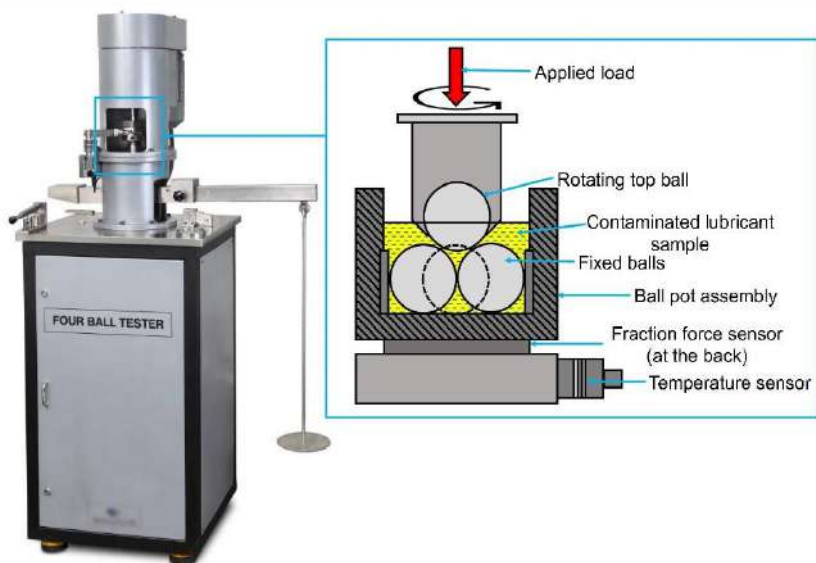
Biodiesel merupakan salah satu bahan bakar alternatif yang paling menjanjikan untuk mengatasi permasalahan tersebut. Ini terbarukan dan dapat diproduksi dari berbagai minyak nabati dan lemak hewani. Biodiesel menawarkan beberapa keunggulan teknis dibandingkan dengan bahan bakar diesel konvensional. Keuntungan paling umum dari biodiesel dibandingkan bahan bakar diesel adalah biodegradabilitas, titik nyala yang lebih tinggi, angka cetane yang lebih baik, emisi gas buang yang lebih rendah, dll [4]. Banyak hasil penelitian melaporkan bahwa biodiesel murni memberikan pelumasan yang lebih besar dibandingkan minyak solar. Meskipun biodiesel semakin populer karena aspek-aspek positif ini, terdapat beberapa kelemahan signifikan yang membatasi penggunaan komersialnya. Kekhawatiran utama penyumbatan pada injektor, penyumbatan filter, pengendapan karbon atau bubur padat yang kaya akan ester lemak, auto-oksidasi, sifat korosif, reaktivitas rantai hidrokarbon tak jenuh, dll [5]. Banyak dari masalah ini juga dapat mempengaruhi gesekan dan keausan berbagai komponen mesin yang bersentuhan dengan biodiesel dalam kondisi geser. [6].

Karakteristik penggunaan biodiesel terhadap keausan dan gesekan beberapa komponen mesin dan sistem injeksi bahan bakar baik secara langsung maupun menggunakan beberapa metode seperti metode empat bola, metode pin on disk dan metode rig bolak balik akan dijelaskan pada bab ini.

A. Metode Empat Bola

Keausan komponen mesin sangat dipengaruhi oleh kualitasnya dan pelumasan bahan bakar. Keausan terjadi karena gesekan dan ini tidak diinginkan karena mengurangi umur komponen mesin. Gesekan terjadi ketika dua permukaan yang bersentuhan saling bergesekan satu sama lain, dan besarnya gesekan bergantung pada beban, kecepatan, suhu, jenis pelumas serta aditif [7]. Ada beberapa komponen mesin yang bahan bakarnya digunakan untuk melumasi komponen tersebut seperti injektor bahan bakar dan pompa. Pelumasan bahan bakar mesin merupakan faktor utama dalam memperpanjang umur mesin. Pelumasan yang baik membantu mengurangi gesekan antar komponen mesin, yang pada gilirannya, mengurangi konsumsi energi dengan meminimalkan gesekan antara bagian yang bergerak (keausan) [8].

Bahan bakar dengan komposisi yang berbeda telah dikembangkan selama bertahun-tahun untuk memenuhi standar spesifikasi bahan bakar di berbagai Negara serta memenuhi standar peraturan lingkungan hidup dengan membatasi emisi polutan berbahaya seperti sulfur dan nitrogen bahan bakar. Padahal proses hidrogenasi sangat efektif untuk mengurangi senyawa belerang, ia juga menghilangkan poliaromatik, nitrogen, oksigen dan komponen tak jenuh, yang menurunkan pelumasan bahan bakar. Gambar (1) menunjukkan diagram skematik konfigurasi uji keausan empat bola sesuai dengan metode diberikan dalam standar ASTM D4172 [9].



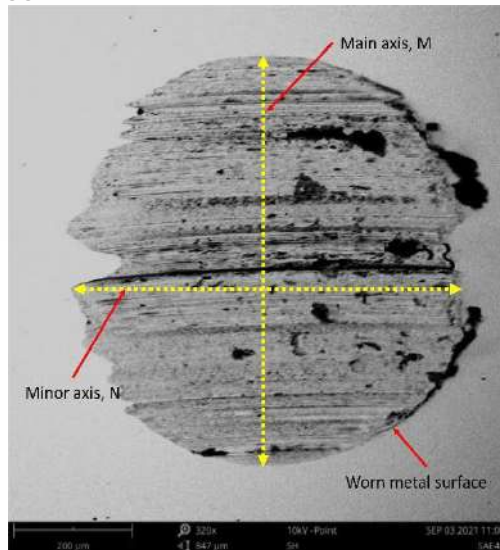
Gambar 9.1 Diagram skema konfigurasi uji keausan empat bola [10]

Dalam pengujian wear dan friction pada biodiesel langkah-langkah yang harus dilakukan adalah sebagai berikut. Bola baja dan wadah minyak dibersihkan secara menyeluruh terlebih dahulu menggunakan toluena kemudian dilap menggunakan tisu hingga benar-benar kering. Tiga bola baja ditempatkan ke dalam wadah minyak dan kemudian dikunci rapat. Satu bola baja dipegang oleh collet dan kemudian ditempatkan di dalam mesin. Bahan bakar uji dituangkan ke dalam cawan minyak hingga menutupi ketiga bola sepenuhnya. Percobaan dilakukan selama 300 detik, dengan menggunakan kecepatan spindel tertentu (kecepatan putar) konstan dan memvariasikan beban (kg). Setelah setiap pengujian, tiga bola bagian bawah dikumpulkan untuk mengukur diameter bekas luka dan analisis SEM/EDX [8]. Mikroskop optik (OM) digunakan untuk menentukan diameter bekas luka aus (the wear scar diameter/ WSD) bola baja yang aus setelah studi tribologi. Persamaan (1) dan (2) di bawah ini

digunakan untuk menghitung WSD permukaan yang aus dan COF [10]:

$$WSD = \frac{M+N}{2} \quad (9.1)$$

dimana M adalah sumbu utama (μm) yang diukur dengan OM. N adalah sumbu minor (μm) yang diukur dengan OM. Gambar xx menunjukkan pengukuran nilai M dan N bola baja aus dengan menggunakan OM.



Gambar 9.2 Pengukuran sumbu utama, M dan sumbu minor, N pada permukaan logam yang aus dengan OM.

Untuk menghitung koefisien gesekan (coefficient of friction/ COF) dapat menggunakan persamaan dibawah:

$$COF = \frac{\text{gaya gesekan sebenarnya (N)}}{\text{beban yang diterapkan (N)}} \quad (9.2)$$

Dalam beberapa tahun terakhir, produsen mesin mobil menghadapi tantangan besar terkait kompatibilitas komponen otomotif dengan bahan bakar alternatif yang paling menjanjikan adalah, biodiesel. Penggunaan biodiesel diharapkan dapat

memenuhi kekhawatiran yang timbul dari menipisnya bahan bakar fosil dan degradasi lingkungan. Sementara bahan bakar diesel konvensional akan digantikan sebagian atau seluruhnya oleh biodiesel, tantangan yang harus dihadapi meliputi korosi, korosi tribo, ketidakstabilan sifat biodiesel akibat paparan logam dan beberapa faktor lingkungan terkait lainnya [1].

Milano dkk [11] menyebutkan, koefisien gesekan dihitung dengan mengalikan torsi gesekan rata-rata dan konstanta pegas. Jadi, torsi gesekan pada bola bawah dapat dinyatakan sebagai:

$$T = \frac{\mu \times 3 W \times r}{\sqrt{6}} \rightarrow \mu = \frac{T\sqrt{6}}{3W \times r} \quad (9.3)$$

Di mana, μ = koefisien gesekan, r = jarak pusat permukaan kontak pada bola bawah terhadap sumbu putar yaitu 3,67 mm, τ = torsi gesekan dalam kg-mm; W = beban yang diterapkan dalam kg. Kemudian wear scar diameter (WSD) diukur dan dianalisis dengan perangkat lunak DuCOM dengan sistem akuisisi gambar yang diinstal.

Banyak studi yang telah dilakukan untuk meneliti penggunaan biodiesel terhadap perilaku wear dan friction pada komponen utama mesin. Gupta dkk [12] menyatakan kompatibilitas bahan jangka panjang dari campuran metil ester (biodiesel) minyak Karanja pada sistem injeksi langsung common rail modern yang dilengkapi mesin diesel yang digunakan pada kendaraan selama 274 jam dan menggunakan bahan bakar diesel mineral dasar dan biodiesel Karanja 20% v/v yang dicampur dengan bahan bakar diesel mineral (KB20).

Setelah 274 jam pertama, Mesin berbahan bakar KB20 menunjukkan keausan yang lebih rendah pada katup dan pin engkol, tetapi keausan yang lebih tinggi pada liner, ring piston, piston, pin gudgeon, bantalan ujung kecil dan besar pada batang penghubung, dan bantalan utama. Sifat kimia bahan bakar mempengaruhi kemanjuran minyak pelumas dan sisa umur

manfaatnya. Minyak pelumas dari mesin berbahan bakar KB20 menunjukkan peningkatan densitas dan kadar abu yang lebih tinggi. Minyak pelumas mesin berbahan bakar KB20 mengalami oksidasi dan polimerisasi yang lebih tinggi. Karakteristik kekasaran permukaan liner silinder diukur sebelum dan sesudah uji ketahanan untuk evaluasi keausan komparatif selama kedua fase uji ketahanan. Endapan karbon pada kepala silinder, bagian atas piston, dan injektor dibandingkan, dan piston mesin berbahan bakar KB20 menunjukkan endapan karbon yang lebih tinggi. Campuran biodiesel merusak sistem injeksi bahan bakar mesin CRDI. Biodiesel merusak peralatan injeksi bahan bakar (FIE) mesin CRDI. Tabel 9.1 menunjukkan karakteristik wear and friction berbagai jenis bahan baku biodiesel yang diuji dengan berbagai metode.

Tabel 9. 1 Karakteristik Wear And Friction Berbagai Jenis Bahan Baku Biodiesel

Feedstock	Metode/ spesifikasi alat	Kondisi pengujian	Metode pengujian	author
<i>Calophyllum inophyllum</i>	Mesin TIL30H. speed 300-3.000 rpm. max load 10.000 N. temp ambient, scar range 100-4.000 μ m. test ball Φ 12,7 mm.	Beban 40, 50,63 dan 80 kg; putaran 1800 rpm; temp 27 °C; waktu pengujian 300 detik; material bola baja karbon-kromium SKF	↓ koefisien gesekan 16% dan WSD 140%	[8]
soybean	HFRF, CFT-1.	Cakram baja ASTM 52100 dan bola baja dengan diameter 3,9 mm. Beban 200 gram, waktu 75 menit	The coefficient of friction (COF) tidak signifikan	[13].
Jarak	HFRF, CFT-1.	Beban 40 dan 100 N, kecepatan putaran 150 rpm, waktu 3600, temperatur ruang,	Koefisien gesekan ↓ B100, diameter scar menurun	[14]
Palm oil	Metode 4 bola dengan bahan baja paduan krom	Beban 40 kg, suhu 75 °C, kecepatan 1200 rpm. Waktu 1 jam	Kesausan bola baja turun sebesar 10% untuk B20 pada kecepatan putar di bawah 1500 rpm dan pada B100 menurun sekitar 20% lebih rendah, dibandingkan dengan bahan bakar diesel	[6]
Palm oil dan minyak plastik	Metode 4 bola	Beban 40 kg, suhu 75 °C, kecepatan 600-1500 rpm	COF Campuran SAE40+ B10 lebih tinggi 11,52%. SAE40-B300 memiliki sifat gesekan yang lebih sedikit	[10]
WCO+ <i>Calophyllum inophyllum</i>	Metode 4 bola	Beban 40 kg, suhu 75 °C, kecepatan 1200 rpm dan Waktu 3600 detik	biodiesel-diesel memiliki koefisien gesek paling rendah [0,072] di banding lainnya	[11]
Karanja (B20)	Uji ketahanan (daya tahan) dilakukan pada mesin diesel SUV (Tata: Safari DICOR 2.2 L) sesuai dengan kode standar India (IS: 10000 Part IX	Kecepatan 40-100, beban 30-100% Selama 30 menit	keausan yang lebih rendah pada katup dan pin engkol, tetapi keausan yang lebih tinggi pada liner, ring piston, piston, pin gudgeon, bantalan ujung kecil & besar pada batang penghubung, dan bantalan utama	[12]
Yang-Na (<i>Dipterocarpus Alatus</i>)	mesin Kubota RT DI 110DL. Mesin 4 tak 1 silinder berpendingin air horizontal, vol silinder 666cc; Lebar silinder × langkah (92 mm × 90 mm); 11 hp/2400 rpm; 18: 1;	Pengujian keausan pada sistem pembakaran	Terjadi peningkatan ring piston dan katup mesin. 76,66%. Keausan meningkat 14% pada permukaan kepala silinder, pemandu katup masuk, batang katup masuk, pemandu katup buang, dan batang katup buang kurang dari 2%.	[15]
Cotton seed (B20)	Rig bolak-balik frekuensi tinggi (HFRF)	beban (100 N), suhu bahan bakar (60 °C), frekuensi (5 Hz), durasi pengujian (3600 s), dan panjang langkah (2 mm). Material baja grade AISI 52100	COF menurun 5,71% dan koefisien keausan lebih tinggi 25,7%	[16]
Lemak bebek	Pin on disk, cakram aus yang dibuat dari baja perkakas JIS SKD-11 (diameter 75 mm dan tebal 4 mm) diputar terhadap pin besi cor stasioner (diameter 10 mm dan panjang 32 mm)	beban konstan 20 N dengan kecepatan putar 20-2000 rpm. Panjang pada 20 mm, kecepatan geser linier cakram keausan antara 0,042 m/s dan 4,2 m/s, maksimum kontak adalah 0,96 GPa,	koefisien gesekan 0,5 m/s dan 1,4 m/s	[17]

Pada pengujian *wear and Friction* pada biodiesel dengan metode 4 bola biasanya menimbulkan bekas luka (*scar*) pada bola setelah pengujian. Diameter bekas pakai (*wear scar diameter /WSD*) yang besar umumnya menunjukkan keausan yang parah. Diameter ini meningkat seiring bertambahnya beban keausan, yang merupakan akibat dari fakta bahwa peningkatan tekanan pada permukaan kontak logam menurunkan karakteristik tribologi biodiesel sebagai akibat dari oksidasi. Kerusakan ini juga disebabkan oleh hilangnya lapisan film logam yang dihasilkan

pada beban tinggi. Habibullah dkk [8] menyebutkan, rata-rata WSD untuk solar 41,02% lebih tinggi dibandingkan CIB100 dan menurun secara bertahap seiring dengan peningkatan konsentrasi biodiesel.

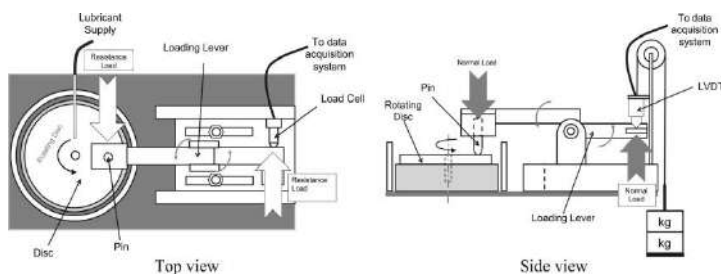
Haseem dkk. [18] menyebutkan temperatur sangat mempengaruhi keausan pada logam. Gesekan dan keausan meningkat seiring dengan meningkatnya suhu. Hal ini mungkin disebabkan oleh penurunan viskositas dengan meningkatnya suhu. ester rantai asam lemak teradsorpsi ke permukaan logam, sehingga memungkinkan pembentukan film monolayer dengan ujung hidrokarbon asam lemak berorientasi menjauhi permukaan logam. Rantai asam lemak menawarkan permukaan geser yang mencegah kontak langsung logam-ke-logam. Stabilitas film ini bergantung pada kondisi operasi seperti beban, suhu, kecepatan serta viskositas dan komposisi fluida. Pada suhu yang lebih tinggi, film-film ini tampaknya menjadi kurang stabil dan dengan demikian menyebabkan keausan dan gesekan yang relatif lebih tinggi. Pada semua campuran biodiesel menghasilkan diameter bekas luka yang lebih kecil dibandingkan dengan solar. Diameter bekas keausan turun drastis untuk B10 dibandingkan dengan solar. Peningkatan lebih lanjut dalam konsentrasi biodiesel menyebabkan sedikit penurunan diameter.

Lebih lanjut, biodiesel yang mengandung lebih banyak oksigen dapat mengurangi gesekan dan keausan dibandingkan dengan solar. Hal ini juga dapat dikaitkan dengan adanya asam lemak alifatik dengan rumus umum $C_nH_{2n+1}COOH$, seperti asam stearat dalam POME yang dapat meningkatkan sifat pelumasan dengan mengendalikan gesekan dan keausan antara permukaan kontak melalui pengembangan lapisan pelumasan [19]. Film pelindung dapat mengurangi energi panas pada kontak geser dan dengan demikian meningkatkan pelumasan. Film peningkat pelumasan ini kemungkinan besar berbahan dasar asam karboksilat [20]. Dalam penjelasan lain, komponen jejak yang ditemukan dalam bahan bakar biodiesel termasuk asam lemak bebas, monogliserida, digliserida dilaporkan dapat meningkatkan pelumasan biodiesel. Bagian teroksigenasi, derajat ketidakjenuhan, panjang rantai molekul dalam biodiesel juga

berperan penting dalam meningkatkan pelumasan. Dari hasil yang diperoleh diketahui bahwa kadar air bebas dan oksidasi bahan bakar uji meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi biodiesel. Biodiesel lebih higroskopis dibandingkan minyak solar. Oleh karena itu, ia menyerap lebih banyak kelembapan. Peningkatan suhu tampaknya telah meningkatkan penyerapan air.

B. Metode Pin on Disk

Uji gesekan dilakukan pada biodiesel untuk mengkarakterisasi sifat gesekannya pada gerakan geser murni. Pengujian dilakukan dengan menggunakan tribometer yang dikonfigurasi untuk pengaturan pin-on-disc (gambar 9.3). Cakram aus yang dibuat dari baja perkakas (diameter 75 mm dan tebal 4 mm), diputar terhadap pin besi cor stasioner (diameter 10 mm dan panjang 32 mm). Pin besi cor memiliki tutup ujung berbentuk bola dengan radius kelengkungan 5 mm. Baik pin maupun cakram aus polis hingga kekasaran permukaan, R_a sebesar $0,2\text{ }\mu\text{m}$. Sebelum dilakukan uji gesekan, pin dan *wear disc* dibersihkan menggunakan penangas ultrasonik kemudian dibiarkan kering dalam desikator. Hal ini untuk menghilangkan sisa cairan perkakas dari proses pemesinan.



Gambar 9.1 skema pengujian tribology [17]

Uji gesekan dilakukan pada kondisi suhu kamar. Selama pengujian, pin dan wear disc dikenai beban normal konstan sebesar 20 N dengan kecepatan putar wear disc berkisar

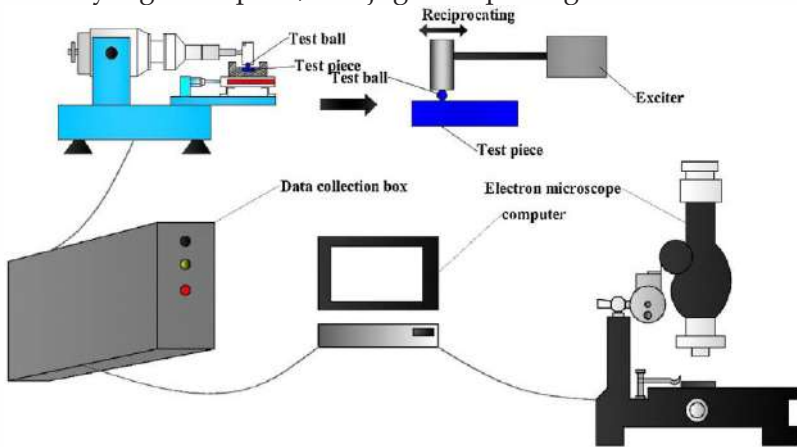
antara 20 rpm hingga 2000 rpm. Jalur pengujian keausan diatur sepanjang 20 mm, sesuai dengan kecepatan geser linier cakram keausan antara 0,042 m/s dan 4,2 m/s. Untuk kondisi pengujian yang dipilih, tekanan Hertzian maksimum untuk kontak adalah 0,96 GPa, dihitung dengan mengambil modulus elastisitas untuk besi tuang dan baja perkakas JIS SKD-11 sebesar 110 GPa dan 210 GPa dengan rasio Poisson masing-masing sebesar 0,21 dan 0,27. Uji run-in berpelumas dilakukan selama tiga menit pada 1000 rpm dengan pembebanan normal 20 N untuk meratakan puncak awal asperitas permukaan tinggi yang dipisahkan oleh lembah yang dalam [17].

C. Metode Rig bolak-balik frekuensi tinggi (A High-frequency reciprocating rig/ HFRR)

Rig test Bolak-balik dengan Frekuensi Tinggi ball-on-disk (HFRR) digunakan untuk melakukan eksperimen tribologi seperti yang ditunjukkan secara skematis pada gambar (9.4). Sebelum setiap percobaan, semua sampel dibersihkan secara ultrasonik dengan petroleum eter dan etanol selama 10 menit. Dalam percobaan tersebut, sebuah bola baja digeser pada permukaan datar baja, keramik, dan berlian dengan gerakan bolak-balik. Koefisien gesekan (COF) diukur selama gerakan. Menurut standar ISO12156, yang ditetapkan untuk memeriksa pelumasan diesel, 2 mL campuran cairan dimasukkan ke dalam kontak hingga tergenang seluruhnya. Beban yang diterapkan dipertahankan pada 200 g di semua percobaan. Pada setiap percobaan, gerakan bolak-balik dengan pukulan 1 mm dan frekuensi 50 Hz berlangsung selama 75 menit. Setiap percobaan dilakukan dua kali atau lebih [13].

Hamdan dkk [17] menyebtukan, Rig Bolak-balik Frekuensi Tinggi (HFRR) biasanya digunakan untuk memahami sifat pelumasan biodiesel, terutama untuk menguji perannya dalam pelumasan bahan bakar. Uji HFRR dilakukan sepanjang rezim pelumasan, dengan fokus utama pada diameter bekas luka. Akibatnya, hal ini mengabaikan informasi terkait gesekan untuk kontak yang dilumasi. Sifat gesekan dari kontak yang

dilumasi diketahui bergantung pada sifat pelumas, beban normal yang diterapkan, dan juga kecepatan geser.



Gambar 9.2 Ilustrasi Skema Kontak Geser Dengan Pelumasan Solar/Biodiesel/Campuran [13].

D. Pengujian Keausan Secara Langsung

Pengaruh minyak non nabati dan biodieselnnya terhadap keausan komponen peralatan injeksi bahan bakar mesin genset telah diamati oleh Reddy dkk [21]. Uji ketahanan 250 jam dilakukan di rig uji sistem injeksi bahan bakar (SIB) untuk mengevaluasi keausan, penurunan berat, kehilangan dimensi, dan perubahan tekstur permukaan di lokasi berbeda di berbagai komponen yang digunakan di sistem injeksi bahan bakar seperti jarum nosel, pendorong, katup, dan dudukan katup. Oli karanja menunjukkan keausan paling rendah dan solar mineral menunjukkan keausan tertinggi pada komponen, kecuali plunyer. Keausan komponen sistem injeksi bahan bakar terjadi terutama karena tekanan mekanis dan termal, serta reaktivitas kimia bahan bakar uji dengan komponen. Secara keseluruhan, keausan komponen SIB relatif lebih rendah pada penggunaan biodiesel dan *vegetable oil* dibandingkan dengan penggunaan bahan bakar diesel mineral pada rig pengujian.

Lebih lanjut, kinerja dari campuran biodiesel Karanja 20% (KOME20) terhadap keausan dan daya tahan mesin dipelajari dibandingkan dengan solar dalam uji ketahanan jangka panjang

selama 250 jam pada mesin pengapian kompresi injeksi langsung oleh Dhar dkk [22]. Pemeriksaan visual terhadap komponen mesin menunjukkan adanya endapan karbon yang lebih tinggi pada bagian atas piston, kepala silinder dan ujung injektor. Keausan yang relatif lebih rendah ditemukan pada katup, piston, ring piston, liner dan bantalan ujung kecil pada batang penghubung diamati pada mesin berbahan bakar biodiesel. Keausan bantalan ujung besar pada batang penghubung, bantalan utama, dan pin engkol ditemukan lebih tinggi pada mesin berbahan bakar biodiesel.

Daftar Pustaka

- [1] M. Fazal, A. Haseeb, and H. Masjuki, "A critical review on the tribological compatibility of automotive materials in palm biodiesel," *Energy Conversion and Management*, vol. 79, pp. 180-186, 2014.
- [2] S. C. Tung and M. L. McMillan, "Automotive tribology overview of current advances and challenges for the future," *Tribology International*, vol. 37, no. 7, pp. 517-536, 2004.
- [3] A. Sarvi, C.-J. Fogelholm, and R. Zevenhoven, "Emissions from large-scale medium-speed diesel engines: 1. Influence of engine operation mode and turbocharger," *Fuel processing technology*, vol. 89, no. 5, pp. 510-519, 2008.
- [4] D. Kannan, S. Pachamuthu, M. N. Nabi, J. E. Hustad, and T. Løvås, "Theoretical and experimental investigation of diesel engine performance, combustion and emissions analysis fuelled with the blends of ethanol, diesel and jatropha methyl ester," *Energy conversion and management*, vol. 53, no. 1, pp. 322-331, 2012.
- [5] M. Sulek, A. Kulczycki, and A. Malysa, "Assessment of lubricity of compositions of fuel oil with biocomponents derived from rape-seed," *Wear*, vol. 268, no. 1-2, pp. 104-108, 2010.
- [6] M. Fazal, A. Haseeb, and H. H. Masjuki, "Investigation of friction and wear characteristics of palm biodiesel," *Energy conversion and management*, vol. 67, pp. 251-256, 2013.

- [7] M. H. Mosarof *et al.*, "Implementation of palm biodiesel based on economic aspects, performance, emission, and wear characteristics," *Energy conversion and Management*, vol. 105, pp. 617-629, 2015.
- [8] M. Habibullah *et al.*, "Friction and wear characteristics of Calophyllum inophyllum biodiesel," *Industrial Crops and Products*, vol. 76, pp. 188-197, 2015.
- [9] S. Dharma, H. C. Ong, H. Masjuki, A. Sebayang, and A. Silitonga, "An overview of engine durability and compatibility using biodiesel-bioethanol-diesel blends in compression-ignition engines," *Energy Conversion and Management*, vol. 128, pp. 66-81, 2016.
- [10] M. S. N. Awang *et al.*, "Effect of diesel-palm biodiesel fuel with plastic pyrolysis oil and waste cooking biodiesel on tribological characteristics of lubricating oil," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 9, pp. 7221-7231, 2022.
- [11] J. Milano *et al.*, "Tribological study on the biodiesel produced from waste cooking oil, waste cooking oil blend with Calophyllum inophyllum and its diesel blends on lubricant oil," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 1578-1590, 2022.
- [12] J. G. Gupta and A. K. Agarwal, "Engine durability and lubricating oil tribology study of a biodiesel fuelled common rail direct injection medium-duty transportation diesel engine," *Wear*, vol. 486, p. 204104, 2021.
- [13] H. Xiao, H. Zou, S. Liu, and C. Li, "An investigation of the friction and wear behavior of soybean biodiesel," *Tribology International*, vol. 131, pp. 377-385, 2019.
- [14] Y. Singh, M. Gwalwanshi, P. Negi, G. K. Badhotiya, N. K. Singh, and A. Sharma, "Performance of castor based biodiesel during tribological characterization at different load," *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, pp. 6678-6681, 2021.
- [15] C. Sakkampang, K. Sakkampang, P. Suwunnasopha, and S. Poojeera, "Performance, exhaust emission, and wear behavior of a direct-injection engine using biodiesel from Yang-Na (*Dipterocarpus Alatus*) oleoresins," *Case Studies in*

- Chemical and Environmental Engineering*, vol. 7, p. 100328, 2023.
- [16] M. Jamshaid, H. Masjuki, M. Kalam, N. Zulkifli, A. Arslan, and A. Qureshi, "Experimental investigation of performance, emissions and tribological characteristics of B20 blend from cottonseed and palm oil biodiesels," *Energy*, vol. 239, p. 121894, 2022.
 - [17] S. Hamdan, W. Chong, J.-H. Ng, M. Ghazali, and R. Wood, "Influence of fatty acid methyl ester composition on tribological properties of vegetable oils and duck fat derived biodiesel," *Tribology International*, vol. 113, pp. 76-82, 2017.
 - [18] A. Haseeb, S. Sia, M. Fazal, and H. H. Masjuki, "Effect of temperature on tribological properties of palm biodiesel," *Energy*, vol. 35, no. 3, pp. 1460-1464, 2010.
 - [19] H. Masjuki and M. Maleque, "The effect of palm oil diesel fuel contaminated lubricant on sliding wear of cast irons against mild steel," *Wear*, vol. 198, no. 1-2, pp. 293-299, 1996.
 - [20] J. Hu, Z. Du, C. Li, and E. Min, "Study on the lubrication properties of biodiesel as fuel lubricity enhancers," *Fuel*, vol. 84, no. 12-13, pp. 1601-1606, 2005.
 - [21] S. M. Reddy, N. Sharma, N. Gupta, and A. K. Agarwal, "Effect of non-edible oil and its biodiesel on wear of fuel injection equipment components of a genset engine," *Fuel*, vol. 222, pp. 841-851, 2018.
 - [22] A. Dhar and A. K. Agarwal, "Effect of Karanja biodiesel blend on engine wear in a diesel engine," *Fuel*, vol. 134, pp. 81-89, 2014.



BAB X

Tekno Ekonomi

Harga minyak mentah mempengaruhi keputusan investasi di seluruh sektor bahan bakar untuk transportasi terbaru, termasuk biodiesel dan etanol. Transportasi, terutama di negara-negara berkembang dimana armada truk berkembang pesat. Sejalan dengan tren ini, pertumbuhan produksi biodiesel jauh lebih tinggi dibandingkan pertumbuhan produksi etanol sejak tahun 2005, meskipun pada tingkat dasar yang lebih rendah. Permintaan minyak solar untuk kegiatan transportasi diperkirakan akan meningkat pada tingkat yang berbeda-beda di semua negara, dan pada skala global, biodiesel diperkirakan akan menyumbang 70% dari pertumbuhan permintaan bahan bakar transportasi pada tahun 2040 [1].

Selain itu, perdagangan biodiesel internasional jauh lebih tinggi dibandingkan perdagangan etanol. Meskipun perdagangan biodiesel hanya menyumbang 10–15% dari produksi global, perdagangan ini berperan penting dalam pengembangan sektor biodiesel di negara-negara berkembang tertentu. Kebijakan yang diperkenalkan untuk memperluas penggunaan biodiesel di UE dan AS telah menjadi kekuatan motivasi yang kuat bagi negara-negara dengan sektor tanaman penghasil minyak yang besar untuk mengembangkan industri biodiesel untuk ekspor, khususnya dalam kasus Argentina (biodiesel berbasis kedelai) dan Indonesia (biodiesel berbasis sawit). Dinamika industri biodiesel global berkisar pada serangkaian kebijakan dan interaksi perdagangan yang kompleks [1].

Namun, ada juga kendala yang besar dalam produksi biodiesel skala besar termasuk daya saing harga dan keterbatasan

produksi. Selain itu, teknologi produksi saat ini memaksa harga biodiesel menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar diesel. Sebagai upaya untuk menurunkan harga, disarankan untuk menggunakan minyak jelantah sebagai cara yang hemat biaya sumber untuk memproduksi biodiesel. Ketersediaan minyak jelantah berasal dari restoran/hotel. Sebagian besar minyak goreng bekas adalah dikumpulkan dari gorengan yang dapat menghasilkan minyak jelantah sebanyak 15 L per hari [2].

Dari berbagai faktor yang berkontribusi terhadap harga biodiesel, bahan baku dianggap sebagai faktor yang paling penting. Selain menyumbang sekitar 75–80% dari total biaya operasional [3]. Oleh karena itu, pemanfaatan Minyak goreng bekas (WCO) merupakan bahan baku yang menjanjikan untuk memproduksi biodiesel, yang memainkan peran penting dalam penggunaan kembali sumber daya limbah dan produksi energi terbarukan. Diketahui bahwa biaya merupakan faktor utama yang membatasi produksi biodiesel dalam skala besar. Metode *Life Cycle Cost (LCC)* digunakan untuk menganalisis kelayakan ekonomi proses produksi biodiesel dari WCO. Biaya produksi 1 ton biodiesel WCO adalah 6291,56 RMB, 65,28% lebih tinggi dibandingkan biaya solar. lebih lanjut, WCO membutuhkan biaya proses *pretreatment* relatif tinggi yaitu sebesar 15,60% dari total biaya [4].

Untuk mendorong pertumbuhan industri biodiesel, banyak negara telah mulai mengalokasikan insentif awal kepada perusahaan-perusahaan baru untuk membangun infrastruktur bagi fasilitas produksinya. Oleh karena itu, penilaian ekonomi yang komprehensif sangat penting untuk menjaga bisnis tetap berada pada jalur yang benar dalam jangka panjang [5].

Namun, sebagian besar pabrik biodiesel di Jepang kesulitan menghasilkan keuntungan dan harus bergantung pada subsidi dari pemerintah daerahnya. Oleh karena itu, efisiensi kegiatan

pabrik mereka perlu ditingkatkan. melakukan analisis biaya siklus hidup produksi biodiesel minyak sawit dan mereka mengevaluasi kinerja biaya tergantung pada porsi biodiesel sawit yang dicampur dengan solar konvensional [6]. Kajian ekonomi telah banyak dilaporkan oleh para peneliti baik secara simulasi maupun secara langsung pada pabrik percontohan pabrik biodiesel skala besar.

Lebih lanjut, Hussain dkk [7] mengkaji perbandingan antara metode produksi konvensional dan sonikasi berdasarkan harga jual, nilai sekarang bersih (NPV) dan tingkat pengembalian internal (IRR). Produksi berbantuan sonikasi cocok untuk hasil produksi yang tinggi, produksi ini menunjukkan profitabilitas yang lebih baik meskipun CAPEX dan OPEX-nya lebih tinggi. Produksi skala besar mendukung pengurangan harga jual dan subsidi. Manfaat tambahan seperti emisi CO₂ telah dihitung dan menunjukkan pengurangan emisi sebesar 23,1% dan pengurangan biaya pemeliharaan. Produksi skala besar dengan sonikasi dan tanpa insentif merupakan model yang paling layak secara ekonomi di UEA.

Zhao dkk [8] melakukan pendekatan pemodelan LCA dan LCC untuk menganalisis dampak lingkungan dan ekonomi CtG dari biodiesel WCO di Tiongkok. Hasilnya menunjukkan bahwa dampak utama biodiesel berbasis WCO terhadap lingkungan adalah berkurangnya sumber daya dan rusaknya kesehatan manusia. Secara keseluruhan, biodiesel berbasis WCO memiliki kinerja lingkungan yang lebih baik dibandingkan solar konvensional. Hasil LCC menunjukkan bahwa biaya ekonomi biodiesel berbasis WCO 31% lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar diesel fosil. Pengumpulan WCO menyumbang bagian terbesar (83%) dari LCC terutama karena tingginya harga pembelian WCO, yang diakibatkan oleh persaingan dengan penggunaan minyak ilegal. Namun, karena tingginya konsumsi

batu bara dan penggunaan metanol dalam proses transesterifikasi, biodiesel berbasis WCO mempunyai dampak lingkungan yang lebih besar pada kategori tertentu seperti CC, PMF, dan HT.

Lisboa dkk, [3] menganalisis biaya produksi pada pabrik biodiesel dari minyak jelantah melalui transesterifikasi enzimatik menggunakan karbon dioksida superkritis. Perkiraan biaya investasi dan produksi untuk konversi 8000 ton WCO /tahun. Hal ini menyebabkan biaya biodiesel sebesar 1,64€/L dan 0,75€/L (untuk harga WCO sebesar 0,25€/kg; harga enzim masing-masing sebesar 800€/kg dan 8€/kg), yang sudah mencerminkan ca. 10% dampak penjualan gliserol.

Lee dkk [9] telah melakukan simulasi dengan ASPEN HYSYS proses dan analisis ekonomi proses produksi biodiesel menggunakan minyak nabati segar dan limbah serta metanol superkritis. Variabel yang paling signifikan mempengaruhi biaya produksi biodiesel adalah biaya umpan minyak, yang mencakup 64-84% dari biaya produksi biodiesel. Makepa dkk [10] menganalisis tekno-ekonomi dan penilaian dampak lingkungan produksi biodiesel dari bio-oil yang berasal dari pirolisis serbuk gergaji pinus dengan bantuan gelombang mikro. Temuan pemodelan mengungkapkan bahwa bagian pirolisis menghasilkan 65,8% berat bio-minyak, 8,9% berat biochar, dan 25,3% berat NCG. Hasil produk biodiesel adalah 48% berat bio-minyak mentah, menghasilkan 631,7 ton biodiesel per hari. Dengan biaya metanol yang memainkan peran penting, investasi modal keseluruhan adalah \$286,1 juta dan total biaya operasional tahunan adalah \$164,9 juta. Perkiraan MFSP untuk biodiesel adalah \$2,31/L, dengan biaya operasional tahunan dan produksi biodiesel menjadi faktor terpenting. Emisi dari proses produksi biodiesel mengakibatkan potensi pemanasan global

sebesar 70,97 kg CO₂eq. Dengan antisipasi MFSP yang kompetitif dengan bahan bakar diesel tradisional, studi ini menyimpulkan bahwa metode ini layak secara ekonomi.

Sejak tahun 1990an, para peneliti mulai membangun model analisis siklus hidup (LCA) untuk memodelkan konsumsi energi (EC) dan emisi gas rumah kaca (GRK). Hasilnya adalah model yang memahami GRK, Regulated Emission and Energy Consumption of Transportation Fuel (GREET), dan model emisi siklus hidup (LEM) [11].

Untuk mengevaluasi kelayakan berdirinya suatu pabrik dan tingkat pendapatannya, maka dilakukan analisa perhitungan secara teknik. Selanjutnya perlu juga dilakukan analisa terhadap aspek ekonomi dan pembiayaannya. Dari hasil analisa tersebut diharapkan berbagai kebijaksanaan dapat diambil. Suatu rancangan pabrik dianggap layak didirikan bila dapat beroperasi dalam kondisi yang memberikan keuntungan.

Berbagai parameter ekonomi digunakan sebagai pedoman untuk menentukan layak tidaknya suatu pabrik didirikan dan besarnya tingkat pendapatan yang dapat diterima dari segi ekonomi. Parameter-parameter tersebut antara lain:

1. Modal investasi / *Capital Investment* (CI)
2. Biaya produksi total / *Total Cost* (TC)
3. Marjin keuntungan / *Profit Margin* (PM)
4. Titik impas / *Break Even Point* (BEP)
5. Laju pengembalian Modal / *Return On Investment* (ROI)
6. Waktu pengembalian Modal / *Pay Out Time* (POT)
7. Laju pengembalian internal / *Internal Rate of Return* (IRR)

A. Modal Investasi

Modal investasi adalah seluruh modal untuk mendirikan pabrik dan mulai menjalankan usaha sampai mampu menarik hasil penjualan. Modal investasi terdiri dari:

1. Modal Investasi Tetap / *Fixed Capital Investment* (FCI)

Modal investasi tetap adalah modal yang diperlukan untuk menyediakan segala peralatan dan fasilitas manufaktur pabrik. Modal investasi tetap ini terdiri dari:

1. Modal Investasi Tetap Langsung (MITL) / *Direct Fixed Capital Investment* (DFCI), yaitu modal yang diperlukan untuk mendirikan bangunan pabrik, membeli dan memasang mesin, peralatan proses, dan peralatan pendukung yang diperlukan untuk operasi pabrik.

Modal investasi tetap langsung ini meliputi:

- Modal untuk tanah
- Modal untuk bangunan
- Modal untuk peralatan proses
- Modal untuk peralatan utilitas
- Modal untuk instrumentasi dan alat kontrol
- Modal untuk perpipaan
- Modal untuk instalasi listrik
- Modal untuk insulasi
- Modal untuk investaris kantor
- Modal untuk perlengkapan kebakaran dan keamanan
- Modal untuk sarana transportasi

2. Biaya Siklus Hidup

Biaya siklus hidup (LCC) juga mengevaluasi manfaat ekonomi dari pabrik. Pada bagian ini, dikembangkan biaya siklus hidup untuk produksi biodiesel dari sumber bahan baku terbarukan dari keanekaragaman hayati tropis, dan dibagi menjadi enam parameter sebagai berikut [12]:

$$LCC = CC + OC + MC = FC - SV - BP \quad (10.1)$$

Baru-baru ini, ilmu ekonomi dan bisnis banyak menggunakan perhitungan nilai sekarang untuk membandingkan arus kas pada periode yang berbeda. Dengan menerapkan metode ini, model nilai sekarang untuk

penghitungan biaya siklus hidup disajikan dengan persamaan berikut [12]

$$LCC = CC + \sum_{i=1}^n \frac{OC_i + MC_i + FC_i}{(1+r)^i} - \frac{SV}{(1+r)^n} - \sum_{i=1}^n \frac{BP_i}{(1+r)^i} \quad (10.2)$$

3. Faktor Nilai Saat Ini

Total perkiraan biaya proyek yang saat ini dikumpulkan dari arus kas masa depan disebut faktor nilai sekarang (PWF). Penentuan kelayakan pabrik produksi biodiesel dilakukan dengan menggunakan PWF dengan tingkat bunga yang dipilih. Untuk tahun i , PWF dapat dihitung dengan persamaan berikut [12]

$$PWF = \frac{1}{(1+r)^i} \quad (10.3)$$

Menjumlahkannya selama masa hidup n tahun menghasilkan faktor nilai sekarang majemuk (the compound present worth factor/ CPW), yang dapat ditulis sebagai berikut:

$$CPW = \sum_{i=1}^n \frac{1}{(1+r)^i} \quad (10.4)$$

$$CPW = \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} \quad (10.5)$$

4. Biaya Modal

Ada tiga kategori dalam menghitung biaya modal; yaitu biaya modal awal maksimum, nominal, dan minimum suatu pabrik produksi biofuel, yang didasarkan pada kemampuan produksinya. Ketiga kategori untuk menghitung biaya modal pabrik untuk produksi biofuel ditentukan sebagai berikut:

$$CC_{high} = -517,76 \times PC^2 + 252928 \times PC + 3446300 \quad (10.6)$$

$$CC_{avg} = -430,13 \times PC^2 + 205235 \times PC + 2696000 \quad (10.7)$$

$$CC_{low} = -342,49 \times PC^2 + 157542 \times PC + 1945700 \quad (10.8)$$

Menurut Hussain untuk menghitung *net present value* (NPV) dapat menggunakan persamaan:

$$NPV = \sum_{i=0}^n \frac{C_i}{(1+r)^i} - C_0 \quad (10.9)$$

Dimana, C_0 adalah penanaman modal, r adalah tingkat diskon sebesar 4%, dan C_i adalah arus kas pada tahun ke- i , n adalah tahun umur pakai.

B. Modal Kerja / *Working Capital* (WC)

Modal kerja adalah modal yang diperlukan untuk memulai usaha sampai mampu menarik keuntungan dari hasil penjualan dan memutar keuangannya. Jangka waktu pengadaan biasanya antara 3-4 bulan, tergantung pada cepat atau lambatnya hasil produksi yang diterima. Dalam perancangan ini jangka waktu pengadaan modal kerja diambil 3 bulan. Modal kerja ini meliputi:

- Modal untuk biaya bahan baku proses dan utilitas
- Modal untuk kas

Kas merupakan cadangan yang digunakan untuk kelancaran operasi dan jumlahnya tergantung pada jenis usaha. Alokasi kas meliputi gaji pegawai, biaya administrasi umum dan pemasaran, pajak, dan biaya lainnya.

- Modal untuk mulai beroperasi (*start-up*)
- Modal untuk piutang dagang

Piutang dagang adalah biaya yang harus dibayar sesuai dengan nilai penjualan yang dikreditkan. Besarnya dihitung berdasarkan lamanya kredit dan nilai jual tiap satuan produk. Rumus yang digunakan:

$$PD = \frac{IP}{12} \times HPT \quad (10.10)$$

C. Biaya Produksi Total (BPT) / *Total Cost* (TC)

Biaya produksi total merupakan semua biaya yang digunakan selama pabrik beroperasi. Biaya produksi total meliputi:

1. Biaya Tetap (BT) / *Fixed Cost* (FC)

Biaya tetap adalah biaya yang jumlahnya tidak tergantung pada jumlah produksi, meliputi:

- Gaji tetap karyawan
- Bunga pinjaman bank
- Depresiasi dan amortisasi
- Biaya tetap perawatan
- Biaya tambahan industri
- Biaya administrasi umum
- Biaya pemasaran dan distribusi
- Biaya laboratorium, penelitian dan pengembangan
- Hak paten dan royalti
- Biaya asuransi
- Pajak bumi dan bangunan

2. Biaya Variabel (BV) / *Variable Cost* (VC)

Biaya variabel adalah biaya yang jumlahnya tergantung pada jumlah produksi. Biaya variabel meliputi:

- Biaya bahan baku proses dan utilitas
- Biaya tambahan meliputi biaya perawatan dan penanganan lingkungan serta biaya pemasaran dan distribusi
- Biaya lainnya

• Profit Margin (PM)

Profit Margin adalah persentase perbandingan antara keuntungan sebelum pajak penghasilan PPh terhadap total penjualan.

$$PM = \frac{\text{Labasebelumpajak}}{\text{totalpenjualan}} \times 100 \% \quad (10.11)$$

- **Break Even Point (BEP)**

Break Even Point adalah keadaan kapasitas produksi pabrik pada saat hasil penjualan hanya dapat menutupi biaya produksi. Dalam keadaan ini pabrik tidak untung dan tidak rugi.

$$BEP = \frac{\text{Biaya Tetap}}{\text{Total Penjualan} - \text{Biaya Variabel}} \times 100\% \quad (10.12)$$

- **Return On Investment (ROI)**

Return on Investment adalah besarnya persentase pengembalian modal tiap tahun dari penghasilan bersih.

$$ROI = \frac{\text{Laba setelah pajak}}{\text{Total modal investasi}} \times 100\% \quad (10.13)$$

Analisa ini dilakukan untuk mengetahui laju pengembalian modal investasi total dalam pendirian pabrik. Kategori resiko pengembalian modal tersebut adalah:

- $ROI \leq 15\%$ resiko pengembalian modal rendah
- $15 \leq ROI \leq 45\%$ resiko pengembalian modal rata-rata
- $ROI \geq 45\%$ resiko pengembalian modal tinggi

- **Pay Out Time (POT)**

Pay Out Time adalah angka yang menunjukkan berapa lama waktu pengembalian modal dengan membandingkan besar total modal investasi dengan penghasilan bersih setiap tahun. Untuk itu, pabrik dianggap beroperasi pada kapasitas penuh setiap tahun.

- **Return on Network (RON)**

Return on Network merupakan perbandingan laba setelah pajak dengan modal sendiri.

$$RON = \frac{\text{Labasetelahpajak}}{\text{Modalsendiri}} \times 100\% \quad (10.14)$$

- **Internal Rate of Return (IRR)**

Internal Rate of Return merupakan persentase yang menggambarkan keuntungan rata-rata bunga pertahunnya dari semua pengeluaran dan pemasukan besarnya sama. Apabila IRR ternyata lebih besar dari bunga riil yang berlaku, maka pabrik akan menguntungkan tetapi bila IRR lebih kecil dari bunga riil yang berlaku maka pabrik dianggap rugi.

Daftar Pustaka

- [1] R. L. Naylor and M. M. Higgins, "The political economy of biodiesel in an era of low oil prices," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, pp. 695-705, 2017.
- [2] A. a. M. Avinash, A. , "Economic analysis of biodiesel production from waste cooking oil," *Energy Sources, Part B Econ. Plan. Policy*, vol. 12, pp. 890-894, 2017, doi: 10.1080/15567249.2017.1319438.
- [3] P. R. Lisboa, A. R. Martín, J. L. Simões, P. Barreiros, S. and Paiva, A, "Economic analysis of a plant for biodiesel production from waste cooking oil via enzymatic transesterification using supercritical carbon dioxide," *J. Supercrit. Fluids*, vol. 85, pp. 31-40, 2014, doi: 10.1016/j.supflu.2013.10.018.
- [4] Y. Y. Liu, X. Adamu, A. and Zhu,Z. , "Economic evaluation and production process simulation of biodiesel production from waste cooking oil," " *Curr. Res. Green Sustain. Chem*, vol. 4, p. 100091, 2021, doi: 10.1016/j.crgsc.2021.100091.
- [5] M. A. A. Farid, A. M. Roslan, M. A. Hassan, M. Y. Hasan, M. R. Othman, and Y. Shirai, "Net energy and techno-economic assessment of biodiesel production from waste cooking oil using a semi-industrial plant: A Malaysia perspective," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 39, p. 100700, 2020.

- [6] S. Eguchi, S. Kagawa, and S. Okamoto, "Environmental and economic performance of a biodiesel plant using waste cooking oil," *Journal of Cleaner Production*, vol. 101, pp. 245-250, 2015.
- [7] M. N. A. S. Hussain, T. and Janajreh, I. , "Economic feasibility of biodiesel production from waste cooking oil in the UAE," *Sustain. Cities Soc*, vol. 26, pp. 217-226, 2016, doi: 10.1016/j.scs.2016.06.010.
- [8] Y. Zhao, C. Wang, L. Zhang, Y. Chang, and Y. Hao, "Converting waste cooking oil to biodiesel in China: Environmental impacts and economic feasibility," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 140, p. 110661, 2021.
- [9] S. Lee, D. Posarac, and N. Ellis, "Process simulation and economic analysis of biodiesel production processes using fresh and waste vegetable oil and supercritical methanol," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 89, no. 12, pp. 2626-2642, 2011.
- [10] D. C. Makepa, C. H. Chihobo, and D. Musademba, "Techno-economic analysis and environmental impact assessment of biodiesel production from bio-oil derived from microwave-assisted pyrolysis of pine sawdust," *Heliyon*, 2023.
- [11] X. Ou, X. Zhang, S. Chang, and Q. Guo, "Energy consumption and GHG emissions of six biofuel pathways by LCA in (the) People's Republic of China," *Applied energy*, vol. 86, pp. S197-S208, 2009.
- [12] N. Jamaluddin *et al.*, "Techno-economic analysis and physicochemical properties of Ceiba pentandra as second-generation biodiesel based on ASTM D6751 and EN 14214," *Processes*, vol. 7, no. 9, p. 636, 2019.

Glosarium

Biodiesel	Minyak untuk mesin disel yang berasal dari nabati, lemak hewan atau minyak limbah
Bilangan asam	Dapat digambarkan sebagai ukuran konsentrasi asam dalam larutan air.
Bilangan setana	Nomor indeks solar yang menunjukkan kualitas penyalaan bahan bakar solar
Calorie Value (CV)	Suatu bahan bakar dapat digambarkan sebagai jumlah energi panas yang dipancarkan per satuan berat bahan bakar ketika dibakar
Densitas	Besaran yang sesuai dengan jumlah materi yang dimiliki suatu benda dengan volumenya
Edible	Minyak nabati yang tidak bisa dimakan
Feedstock	Sumber minyak berasal yang akan dijadikan biodiesel
Fatty acid metyl ester	Suatu jenis asam lemak hasil dari proses transesterifikasi dari minyak nabati
Internal Rate of Return	Persentase yang menggambarkan keuntungan rata-rata bunga pertahunnya dari semua pengeluaran dan pemasukan besarnya sama.

Katalis	Suatu zat berbentuk cair atau padat yang membantu laju reaksi kimia
Non edible	Minyak nabati yang tidak bisa dimakan
Nilai yodium (IV)	Ukuran ketidak jenuhan total terlepas dari proporsi relatif mono-, di-, tri-, dan tak jenuh ganda dalam suatu campuran.
Stabilitas oksidasi	Kecenderungan bahan bakar bereaksi dengan oksigen pada suhu sekitar, dan ini mencerminkan kerentanan relative bahan bakar terdegradasi oleh oksidasi
Torsi	Disebut juga momen gaya, yang merupakan gaya dikalikan dengan jarak
Transesterifikasi	Proses perlakuan kimia untuk mensistesis minyak ester menjadi metil ester
Titik nyala	Suhu di mana bahan bakar akan menyala ketika terkena percikan atau nyala api.
Titik awan	Didefinisikan sebagai suhu di mana awan kristal lilin pertama kali muncul ketika bahan bakar didinginkan
Viskositas kinematik	Didefinisikan sebagai resistensi cairan untuk mengalir.

Indeks

A

Agitasi
ASME
Alkali
Asam Lemak Bebas
adsorpsi

B

Baja tahan karat
Baja karbon
Biodesel
Biofuel
Badan Pengkajian dan
Penerapan Teknologi (BPPT)
Bioetanol
Brake Power
Brake specific fuel consumption
Brake Thermal Efficiency (BTE)

C

Calorie value
Callopyllum inopyllum
cloud point
Cetane Number
Cold Filter Plugging Point
(CFPP)
Calorific value
Carbon monoxide
Cast Iron
Corrosion rate
coefficient of friction

D

double jacket

E

EN standard
emisi
Energi
EBT
Edible
Elektromagnetik induksi
Enzim
Esterifikasi
Ekspansi
Efisiensi Volumetrik

F

Fatty acid Methyl ester
Fire Point
Flash Point (FP)
Feedstock
Friction
Four Ball

G

Gliserol

H

Homogeny
Heterogen
High-frequency
reciprocating rig

I

Iodine Value
infrared
Inhibitor

J

Jatropha curcas

K

Kavitasi
Karbon dioksida

L

Low Carbon Steels

M

Mean Effective Pressure
Microwave
mikroorganisme
metil ester
Molar ratio

N

Nick-Break
Nitrogen Oxida
Non edible

O

Oxidation Stability
Oksidasi

P

particulate matter
pitting corrosion
Pin on Disk
Pirolisis
pre- treatment

Plasma discharge
pilot plant
power stroke

R

reaktor

S

Saturated fatty acids
Scanning Electron
Microscopy Sintesis
Standar Nasional Indonesia
(SNI)
Smoke opacity
Supercritical transesterification

T

Torsi
Transesterifikasi
Trigliserida
Tribologi

U

Unsaturated fatty acids
Ultrasonic
unburned hydrocarbon

V

Visible Oxide Film
viskositas

W

Waste cooking oil (WCO)
Wear
wear scar diameter

Tentang Penulis



Dr. Suherman, S.T., M.T

Penulis lahir di Bagan Baru pada tanggal 09 Juli 1979, Penulis menyelesaikan pendidikannya di Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Medan (ITM) tahun 2003, selanjutnya pada tahun 2004 penulis melanjutkan pendidikan di Sekolah Pasca sarjana (S2) Program Studi Teknik Mesin Universitas Gadjah Mada (UGM). Penulis menyelesaikan pendidikan S-3 di Univ Sumatera Utara bidang Energi (2023). Saat ini penulis merupakan Dosen tetap di Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU) dan telah banyak mempublikasikan hasil penelitiannya dibidang Energi dan Material baik di jurnal nasional maupun internasional. Sejak tahun 2020 penulis telah meneliti bidang biodiesel dan telah mempublikasikan di jurnal nasional dan internasional terindeks scopus dengan topic biodiesel.



Prof. Ir Ilmi Abdullah, M.Sc

Penulis merupakan Guru Besar di Departemen Teknik Mesin Universitas Sumatera Utara (USU) Medan. Sehari-hari penulis mengajar mata kuliah Termodinamika, Perpindahan Panas dan Mekanika Fluida. Selain sebagai dosen, penulis memiliki pengalaman di bidang industry seperti di PT Deserco, PT Indah Kiat, Pollution Engineering (M) Sdn Bhd, Selangor Malaysia, PT Kawasan Industri Medan (KIM). Penulis menyelesaikan pendidikan (S1) tahun 1988 di USU dan menyelesaikan pendidikan pada program pascasarjana di Departemen Mechanical dan Material Engineering Universitas

Kebangsaan Malaysia (UKM) Malaysia pada tahun 1997 sedangkan S-3 penulis peroleh pada tahun 2002 di Universitas yang sama (UKM). Penulis telah banyak mempublikasikan hasil penelitian baik di jurnal Nasional maupun internasional dengan bidang kajian energy dan pembakaran.



Dr. Surya Dharma S.T., M.T

Dr. Surya Dharma S.T., M.T saat ini adalah dosen di Politeknik Negeri Medan, Medan, Sumatera Utara, Indonesia. Menyelesaikan gelar Sarjana (S.T.) di bidang Teknik Mesin di Institut Teknologi Medan, Medan, di mana gelar pascasarjana (MT) dari Jurusan Teknik Mesin di Universitas Gadjah Mada, dan doctoral dari Fakultas Teknik, Universitas

Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia. Penulis melakukan penelitian tentang Energi di Pusat Ilmu Energi, Fakultas Teknik, Universitas Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia dan di Laboratorium energi Baru dan Terbarukan di Politeknik Negeri Medan. Minat penelitiannya pada fokus bahan bakar alternatif pada Biofuel dan telah menerbitkan lebih dari 20 artikel yang memiliki dampak tinggi jurnal ISI Web of Science dalam waktu 5 tahun (dengan lebih dari 2000 kutipan).



Buku ini sengaja disusun penulis karena masih kurangnya referensi terkait buku dengan topik biodiesel dalam bahasa Indonesia yang sesuai digunakan untuk semua kalangan. Buku referensi ini sangat sesuai menjadi rujukan bagi Mahasiswa Program Studi Teknik Mesin, Teknik Kimia, yang sedang menempuh pendidikan di perguruan tinggi. Pembahasan yang sedikit mendalam pada isi buku ini sangat sesuai digunakan sebagai referensi terutama para peneliti pemula di bidang energi dan kimia. Materi yang disusun bertahap sangat memungkinkan digunakan rekan-rekan dosen yang mengampu mata kuliah energi Baru dan terbarukan atau mata kuliah bahan bakar alternatif. Buku ini juga sangat bagus sebagai buku pegangan, yaitu sebagai referensi untuk dibaca oleh para praktisi di Industri pengolahan biodiesel.

Buku ini terdiri dari 10 Bab yang membahas tentang standard biodiesel dari berbagai Negara. Disisi lain, potensi Bahan bakar generasi kedua dan ketiga yang ada di Indonesia serta sifat fisiokimianya disajikan secara konprehensif. Dalam buku ini juga dibahas tentang teknologi pembuatan biodiesel sehingga penentu kebijakan bisa memilih teknologi yang paling tepat. Selain itu, dalam buku ini juga mereview tentang penerapan katalis homogen dan heterogen dalam produksi biodiesel dari berbagai jenis feedstock. Kinerja mesin diesel yang menggunakan bahan bakar biodiesel direview secara rinci yang disarikan dari hasil penelitian terbaru. Lebih lanjut, karakteristik emisi gas buang dari hasil pembakaran biodiesel dibahas secara khusus dalam satu bab tersendiri. Kompabilitas biodiesel dari berbagai jenis feedstock penting dipelajari untuk mengetahui karakteristik laju korosi dan keausan pada berbagai jenis material ini bisa ditemukan dalam buku ini sehingga bisa menjadi pertimbangan dalam penggunaan biodiesel. Tidak cukup hanya terkait masalah keteknikan, dalam buku ini juga dibahas mengenai tekno ekonomi dalam produksi biodiesel.



Jl. Kapten Mukhtar Basri No. 3
Medan, Sumatera Utara
Website: <http://umsupress.umsu.ac.id/>
Email: umsupress@umsu.ac.id

REFERENSI

ISBN 978-623-408-539-6



9 786234 085396

ISBN 978-623-408-540-2 (PDF)



9 786234 085402

Harga P. Jawa Rp. 92.000,00