BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mesin *Dual-Fuel*

Mesin *dual-fuel* merupakan inovasi dari mesin diesel konvensional yang dirancang untuk dapat beroperasi menggunakan dua jenis bahan bakar secara bersamaan, yaitu bahan bakar gas (seperti *Compressed Natural Gas/CNG* atau biogas) dan bahan bakar solar (Rahmayanti, dkk, 2024). Mesin ini bekerja berdasarkan siklus kerja empat langkah (*four-stroke cycle*), yakni isap, kompresi, usaha, dan buang, yang secara prinsip serupa dengan mesin diesel murni. Pada langkah isap, udara bersih atau campuran udara dan gas masuk ke dalam ruang bakar (Lostari, dkk.,2024).

Langkah kompresi terjadi saat piston bergerak ke atas sehingga meningkatkan tekanan dan suhu dalam ruang bakar. Pada akhir langkah kompresi, solar disuntikkan sebagai bahan bakar primer (*pilot fuel*) untuk menyalakan campuran udara dan gas, menciptakan ledakan yang menghasilkan langkah usaha. Terakhir, gas buang dikeluarkan melalui langkah buang.

Salah satu keuntungan utama mesin *dual-fuel* adalah efisiensi bahan bakar yang lebih tinggi dan emisi gas buang yang lebih rendah, khususnya dalam hal karbon dioksida (CO_2) dan nitrogen oksida (NOx). Penggunaan gas alam sebagai bahan bakar utama dapat menurunkan emisi CO_2 hingga 20–30% dibandingkan penggunaan diesel murni (Zhang *et al.*, 2022). Selain itu, teknologi ini memungkinkan fleksibilitas operasi, di mana mesin dapat tetap berjalan dalam mode diesel penuh apabila suplai gas tidak tersedia, sehingga cocok untuk sektor transportasi berat dan pembangkit listrik.

Mesin *dual-fuel* juga menghadapi sejumlah tantangan teknis, termasuk emisi hidrokarbon yang relatif tinggi akibat pembakaran tidak sempurna pada beban rendah, serta kebutuhan kontrol pembakaran yang lebih presisi untuk menghindari misfiring dan knocking. Oleh karena itu,

pengaturan rasio campuran bahan bakar, waktu penyemprotan *pilot fuel*, serta temperatur dan tekanan pembakaran perlu dioptimalkan dengan dukungan sistem kontrol elektronik (ECU) yang canggih (Sharma *et al.,* 2021).

Adopsi mesin *dual-fuel* juga selaras dengan strategi global transisi energi menuju sistem yang lebih berkelanjutan. Dalam konteks ini, mesin dual-fuel dianggap sebagai teknologi jembatan (*bridge technology*) menuju dekarbonisasi penuh, karena mampu memanfaatkan infrastruktur mesin diesel yang sudah ada dengan emisi yang lebih rendah berkat penggunaan bahan bakar gas yang lebih bersih (Rahman *et al.,* 2021)

2.1.1 Siklus Kerja Mesin Dual Fuel

Mesin Dual-Fuel pada PLTMG berkapasitas 140 MW ini beroperasi berdasarkan prinsip siklus empat **langkah (*four-stroke cycle*), namun dengan mekanisme penyalaan yang berbeda secara fundamental dari mesin diesel konvensional. Pada konfigurasi ini, bahan bakar gas (gas alam) berperan sebagai bahan bakar utama (*main fuel*) yang diinduksi bersama udara pada langkah isap, sedangkan bahan bakar cair (dalam penelitian ini adalah *Biodiesel B were B40*) berfungsi sebagai bahan bakar pemantik (*pilot fuel*) dengan proporsi sekitar 1–5% dari total energi input. Interaksi antara siklus kerja mesin dan karakteristik B40 terjadi melalui tahapan kritis berikut:**

1. Langkah Isap dan Kompresi

   Campuran udara dan gas alam masuk ke dalam silinder dan dikompresi hingga mencapai tekanan dan suhu yang sangat tinggi. Rasio kompresi yang tinggi pada mesin *dual-fuel* modern ini dirancang khusus untuk menciptakan kondisi termal yang memadai agar *pilot fuel* dapat menyala secara spontan (*auto-ignition*) tanpa bantuan busi.

2. Langkah Usaha dan Peran B40 sebagai Pilot Fuel

Menjelang akhir langkah kompresi (mendekati Titik Mati Atas/TMA), B40 diinjeksikan ke dalam ruang bakar melalui sistem *common-rail* bertekanan tinggi (>600 bar). Tekanan injeksi yang ekstrem ini krusial untuk mengatasi viskositas B40 yang sedikit lebih tinggi dibandingkan B0, memastikan atomisasi yang halus *(fine atomization*).

Secara kimiawi, molekul *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME) pada B40 mengandung oksigen intrinsik (~11% berat) dan memiliki angka cetane yang memadai. Kombinasi ini menyebabkan *ignition delay* (masa tunda penyalaan) yang lebih pendek dibandingkan solar murni.

Ketika B40 menyala secara spontan, ia tidak hanya memicu pembakaran campuran gas-udara, tetapi oksigen yang terikat dalam struktur ester tersebut juga bertindak sebagai *internal oxidizer*. Mekanisme ini memperkaya campuran lokal (local equivalence ratio), mempercepat rambatan api (*flame propagation*), dan memastikan oksidasi hidrokarbon berlangsung lebih tuntas.

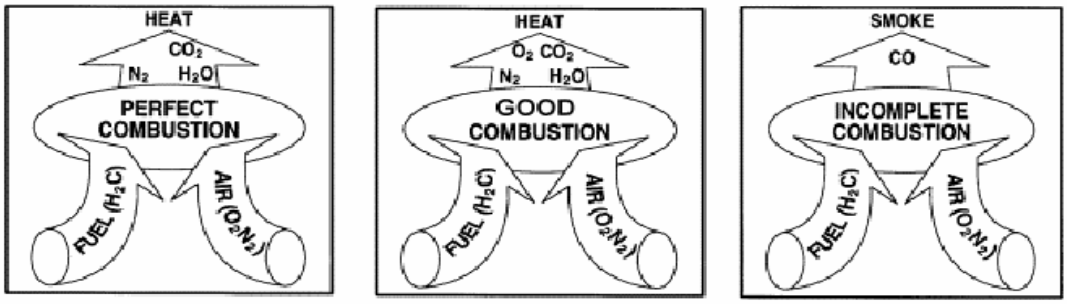
3. Langkah Buang

Dampak langsung dari pembakaran yang lebih tuntas akibat mekanisme *internal oxidizer* B40 tercermin pada komposisi gas buang. Emisi partikulat (PM) dan Karbon Monoksida (CO) cenderung menurun karena minimnya pembakaran tidak sempurna. Namun, pembakaran yang lebih cepat dan tuntas ini juga berpotensi meningkatkan temperatur puncak ruang bakar (*peak combustion temperature*), yang secara termodinamika dapat memicu mekanisme pembentukan thermal NOx (mekanisme Zeldovich), sebuah fenomena yang akan dianalisis secara empiris pada Bab IV.

Pemahaman mendalam terhadap interaksi antara siklus kompresi tinggi dan karakteristik fisika-kimia B40 ini sangat esensial. Hal ini menjadi landasan teoretis utama untuk menganalisis mengapa, meskipun B40 memiliki *Lower Heating Value* (LHV) yang lebih rendah, mesin tetap dapat mencapai efisiensi termal yang kompetitif (bahkan lebih tinggi pada *sweet spot* beban 8 MW), serta bagaimana profil emisi dan *Net Heat Rate* terbentuk pada kondisi operasional riil PLTMG.

2.1.2 Teori Pembakaran

Pada motor bakar, proses pembakaran merupakan reaksi kimia yang berlangsung sangat cepat antara bahan bakar dengan oksigen yang menimbulkan panas sehingga mengakibatkan tekanan dan temperatur gas yang tinggi (Shafir, 2024). Kebutuhan oksigen untuk pembakaran diperoleh dari udara yang memerlukan campuran antara oksigen dan nitrogen, serta beberapa gas lain dengan persentase yang relatif kecil dan dapat diabaikan. Reaksi kimia antara bahan bakar dan oksigen yang diperoleh dari udara akan menghasilkan produk hasil pembakaran yang komposisinya tergantung dari kualitas pembakaran yang terjadi. Dalam pembakaran proses yang terjadi adalah oksidasi dengan reaksi sebagai berikut Gambar 2.1 :



Gambar 2.1 Proses Pembakaran Mesin Diesel

(Sumber: Susanto, 2024)

Pembakaran di atas dikatakan sempurna bila campuran bahan bakar dan oksigen (dari udara) mempunyai perbandingan yang tepat, hingga tidak diperoleh sisa. Bila oksigen terlalu banyak, dikatakan campuran "*lean*" (kurus), pembakaran ini menghasilkan api oksidasi. Sebaliknya, bila bahan bakarnya terlalu banyak (atau tidak cukup oksigen), dikatakan campuran "*rich*" (kaya), pembakaran ini menghasilkan api reduksi.

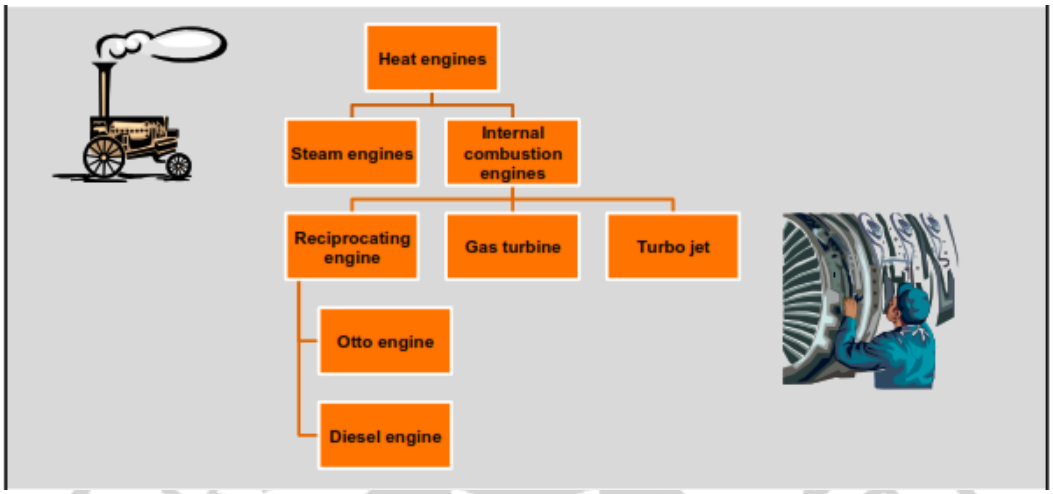
Dalam pembakaran, ada pengertian udara primer yaitu udara yang dicampurkan dengan bahan bakar di dalam *burner* (sebelum pembakaran) dan udara sekunder yaitu udara yang dimasukkan dalam ruang pembakaran setelah *burner*, melalui ruang sekitar ujung *burner* atau melalui tempat lain pada dinding dapur. Berat massa bahan yang masuk ruang pembakaran = berat massa bahan yang keluar.



Gambar 2. 2 Skema Sistem Penyaluran Bahan Bakar sampai Menjadi Gas Buang (Kusuma, dkk., 2024)

Supaya dihasilkan pembakaran yang baik, maka diperlukan syarat-syarat sebagai berikut: (King, dkk., 2023)

1. Jumlah udara yang sesuai
2. Temperatur yang sesuai dengan penyalaan bahan bahan bakar
3. Waktu pembakaran yang cukup
4. Kerapatan yang cukup untuk merambatkan api dalam silinder.
5. Reaksi pembakaran baik bahan bakar solar maupun bahan bakar methanol merupakan reaksi oksidasi antara senyawa hidrokarbon dengan oksigen sehingga dihasilkan produk berupa karbon dioksida, uap air, oksida nitrogen atau produk lainnya tergantung pada kualitas pembakaran.



Gambar 2. 3 Klasifikasi pembakaran internal
(Aprillia, dkk., 2024)

Mesin kalor merupakan suatu sistem yang berfungsi untuk mengubah energi termal menjadi output mekanik (Nurmuslimah, 2025). Gambar tersebut menjelaskan berbagai jenis mesin kalor yang diklasifikasikan berdasarkan prinsip kerjanya. Secara garis besar, mesin kalor dapat dibedakan menjadi dua kategori utama: mesin pembakaran eksternal dan internal.

Pada mesin pembakaran eksternal, seperti mesin uap (*steam engine*), proses pembakaran terjadi di luar sistem mesin utama, yaitu dalam boiler. Uap yang dihasilkan kemudian dialirkan ke dalam mesin untuk menggerakkan piston. Prinsip ini berbeda dengan mesin pembakaran internal, di mana pembakaran bahan bakar terjadi langsung di dalam ruang mesin. Contoh mesin pembakaran internal meliputi mesin *reciprocating* (torak bolak-balik), turbin gas, turbojet, mesin Otto (berdasarkan siklus Otto), dan mesin Diesel (berdasarkan siklus Diesel) (Heywood, J. B. 2018).

Mesin jet memiliki karakteristik khusus di mana daya dihasilkan melalui akselerasi massa udara di dalam mesin. Udara disuntikkan ke dalam nyala api yang terus-menerus terbakar, sementara bahan bakar diinjeksikan untuk mempertahankan pembakaran. Turbin yang terletak di belakang mesin jet berfungsi untuk mengekstrak energi dari gas buang (Widiasih, W. 2025).

Klasifikasi ini menunjukkan keragaman teknologi konversi energi termal-mekanik, di mana setiap jenis mesin memiliki keunggulan dan aplikasi spesifik. Mesin Diesel dan Otto, misalnya, banyak digunakan dalam otomotif, sementara turbin gas lebih umum diaplikasikan pada pembangkit listrik dan pesawat terbang. ini memberikan gambaran komprehensif tentang evolusi dan variasi mesin kalor dalam rekayasa termodinamika (Suryanto 2025).



Gambar 2. 4 Perbedaan pembakaran gas (*spark-ignition*) vs diesel (*compression-ignition*).

Mesin diesel merupakan salah satu jenis mesin kalor yang menggunakan proses pembakaran dalam untuk mengubah energi kimia yang tersimpan dalam bahan bakar menjadi energi mekanik yang bermanfaat. Berbeda dengan mesin bensin yang menggunakan pengapian busi, mesin diesel mengandalkan panas yang dihasilkan dari kompresi udara bertekanan tinggi untuk menyalakan bahan bakar (Fahdihilah, dkk, 2025).

Proses kerja mesin diesel dimulai ketika bahan bakar solar bereaksi secara kimiawi (terbakar) di dalam ruang bakar silinder, melepaskan energi dalam bentuk panas. Panas ini menyebabkan gas yang terperangkap di dalam silinder mengalami ekspansi secara cepat. Karena ekspansi gas tersebut dibatasi oleh dinding silinder, tekanan yang dihasilkan memaksa piston untuk

bergerak secara linier (gerak bolak-balik). Gerakan linier piston ini kemudian diubah menjadi gerak rotasi melalui mekanisme poros engkol (*crankshaft*), yang selanjutnya dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan berbagai aplikasi seperti kendaraan, generator listrik, atau peralatan industri (Harjanto, dkk., 2025).

Proses pembakaran pada mesin diesel terjadi secara spontan ketika bahan bakar diinjeksikan ke dalam udara bertekanan dan bersuhu tinggi, tanpa memerlukan percikan api dari busi. Karakteristik ini membuat mesin diesel memiliki efisiensi termal yang lebih tinggi dibandingkan mesin bensin, serta lebih cocok untuk aplikasi yang membutuhkan torsi besar dan konsumsi bahan bakar yang Ekonomi. Namun, mesin diesel cenderung menghasilkan emisi gas buang yang lebih tinggi, terutama partikulat dan nitrogen oksida, yang menjadi tantangan dalam pengembangan mesin diesel modern yang ramah lingkungan (Saputro, 2025).

2.1.3 Dampak Biodiesel terhadap Sistem Pelumasan dan Degradasi Oli pada Mesin Dual-Fuel

Sistem pelumasan pada Mesin Dual-Fuel berkapasitas besar seperti PLTMG 140 MW memegang peranan vital tidak hanya dalam mereduksi gesekan dan keausan antar komponen bergerak, tetapi juga berfungsi sebagai media pendingin, pembersih deposit, serta pelindung terhadap korosi. Namun, implementasi bahan bakar biodiesel B40 membawa tantangan tribologis dan kimiawi yang signifikan terhadap integritas oli pelumas, yang secara langsung berdampak pada strategi pemeliharaan dan keandalan operasional mesin.

Penggunaan biodiesel dengan kandungan *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME) yang tinggi secara inheren mempercepat laju degradasi oli pelumas dibandingkan dengan solar murni (B0). Iswantoro dkk. (2021) dalam penelitiannya mengenai dampak penggunaan biodiesel B30 dari

minyak sawit terhadap degradasi oli pada mesin diesel 4-langkah, menemukan bahwa pencampuran biodiesel memicu peningkatan laju oksidasi oli dan perubahan viskositas.

Hal ini disebabkan oleh sifat biodiesel yang memiliki volatilitas lebih rendah, sehingga cenderung terjadi *fuel dilution* (pengenceran bahan bakar) di mana biodiesel yang tidak terbakar sempurna merembes melalui *blow-by gas* ke dalam karter oli. Fenomena ini menurunkan flash point oli dan meningkatkan *Total Acid Number* (TAN), yang berpotensi memicu korosi pada komponen logam mesin. Meskipun studi tersebut menggunakan B30, prinsip degradasi yang sama berlaku dan diproyeksikan lebih signifikan pada B40 karena fraksi FAME yang lebih tinggi (40%), yang meningkatkan risiko kontaminasi dan oksidasi dini pada oli pelumas.

Selain degradasi sifat fisika-kimia oli, penggunaan biodiesel juga memengaruhi laju keausan komponen dan pembentukan deposit di dalam ruang bakar serta sistem pelumasan. Zeka dan Cahyono (2019) secara spesifik meneliti efek penggunaan biodiesel B30 sawit terhadap pembentukan deposit dan konsentrasi logam keausan (*wear metal*) pada komponen mesin diesel. Studi mereka mengungkapkan bahwa operasi dengan biodiesel meningkatkan kecenderungan pembentukan deposit karbon dan sludge akibat reaksi polimerisasi FAME pada temperatur tinggi.

Lebih lanjut, analisis spektrometri oli menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi logam keausan (seperti Fe, Cu, dan Al) yang mengindikasikan terjadinya abrasi mikro pada komponen seperti cylinder liner, bearing, dan oil pump. Sifat pelarut (*solvent effect*) alami dari biodiesel memang dapat membersihkan deposit lama di dinding silinder, namun partikel yang terlepas ini akan tersuspensi dalam oli, meningkatkan beban kerja filter oli dan mempercepat kejenuhan aditif dispersan di dalam oli.

Dalam konteks Mesin *Dual-Fuel* 140 MW yang beroperasi pada tekanan dan temperatur tinggi, mekanisme degradasi ini memiliki implikasi langsung terhadap keandalan operasional.

Penurunan kualitas oli akibat kontaminasi FAME dan peningkatan TAN dapat mengurangi ketebalan film pelumas (*oil film thickness*), yang pada gilirannya meningkatkan risiko keausan adhesif pada komponen kritis seperti crankshaft journal dan sistem injeksi common-rail.

Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai dampak biodiesel terhadap degradasi oli ini menjadi landasan teoretis yang krusial untuk mengevaluasi aspek teknis pengoperasian dan pemeliharaan. Transisi ke B40 mengharuskan pergeseran paradigma pemeliharaan dari berbasis waktu (*time-based maintenance*) menjadi berbasis kondisi (condition-based maintenance). Pemantauan parameter kunci oli secara berkala—seperti viskositas kinematik, *Total Acid Number* (TAN), *flash point*, dan analisis spektrometri logam keausan (*wear metal analysis*)—menjadi mutlak diperlukan untuk memprediksi umur pakai oli dan mencegah kerusakan katastropik pada mesin pembangkit berskala utilitas.

2.1.4 Sistem Pelumasan Pada Mesin Gas

Sistem minyak lumas berfungsi untuk mengurangi gesekan, keausan komponen-komponen pada mesin. Sistem ini bekerja dengan cara mensuplai oli atau minyak lumas ke bagian komponen-komponen mesin yang bergerak. Minyak lumas juga berfungsi untuk mendinginkan mesin yaitu dengan menyalurkan panas akibat gesekan dan pembakaran dengan kata lain dengan adanya gesekan pada dua permukaan maka akan menyebabkan terjadinya panas, sehingga perlu adanya pendinginan pada komponen tersebut. Selain berfungsi mencegah korosi, memelihara mesin tetap bersih, memaksimumkan kompresi dan mempertahankan tekanan. Jika tekanan yang hilang terlalu besar pembentukan seal (lapisan lumas)

yang tidak baik, mesin akan kehilangan tenaga sehingga konsumsi bahan bakar meningkat yang berarti pemborosan biaya (Hutagalung, 2025).

Begitu pentingnya minyak lumas bagi kendaraan sehingga memacu para ahli untuk tak hentinya berusaha menciptakan formula yang menghasilkan suatu minyak lumas berkualitas tinggi.

Sistem Pelumasan Pada Motor Diesel dibedakan menjadi 2 antara lain : (Hutagalung, 2025).

1) Sistem Percik *(splash type)*

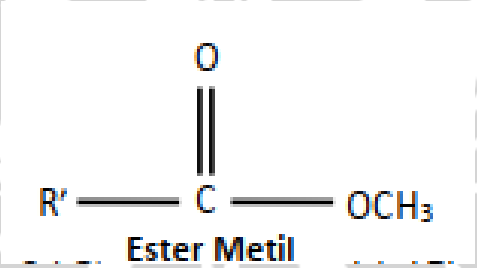
   Sistem minyak lumas percik adalah sistem pelumasan dengan memanfaatkan gerakan dari bagian yang bergerak untuk memercikan minyak lumas ke komponen-komponen yang memerlukan minyak lumas, misal: porong engkol berputar sambil memercikan minyak lumas untuk melumasi dinding silinder. Sistem pelumasan ini biasanya digunakan pada mesin dengan katup samping (*side valve*) dengan kapasitas kecil.

2) Sistem tekanan *(pressure feed system)*

   Pada sistem ini minyak lumas terkumpul di dalam karter atau panic minyak lumas (*oil pan*) yang terdapat dibagian bawah mesin. Oli dari karter dihisap oleh pompa oli minyak melalui saringan kasar dari sini minyak lumas disirkulasikan ke komponen-komponen mesin melalui lubang-lubang minyak lumas yang terdapat pada blok silinder, poros engkol dan sebagainya yang memerlukan pelumasan. Sesudah minyak lumas melakukan pelumasan pada komponen-komponen mesin, minyak lumas akan kembali lagi ke panci minyak lumas. Setelah oli melumasi ke seluruh komponen yang bergesekan, dengan sendirinya oli akan kembali ke dalam karter dengan bantuan gaya gravitasi bumi, dan selanjutnya oli siap untuk disirkulasikan kembali.

2.2 Biodiesel

Biodiesel adalah bahan bakar nabati untuk aplikasi mesin/motor diesel berupa ester metil asam lemak (*fatty acid methyl ester*, FAME) yang terbuat dari minyak nabati atau lemak hewani dan memenuhi standar mutu yang disyaratkan, di Indonesia spesifikasi teknis biodiesel diatur dalam SK Dirjen EBTKE No. 189.K/10/DJE/2019. Struktur generik molekul FAME ditampilkan pada Gambar 2.7 dan biodiesel murni dinotasikan sebagai B100, sedangkan campuran biodiesel dinotasikan dengan Bxx yang menyatakan persentase biodiesel dalam campurannya dengan minyak solar. Biodiesel (B100) memiliki sifat-sifat fisika dan kimia yang „mirip" dengan minyak solar sehingga campuran biodiesel (Bxx) dapat digunakan langsung pada motor diesel tanpa modifikasi atau dengan modifikasi minor. (Knothe, G., 2010).



Gambar 2. 5 Standart Molekul Biodiesel

(Sumber: Knothe, G., 2010).

Sumber utama bahan baku minyak lemak biodiesel di Indonesia adalah kelapa sawit (*Elaeis guineensis*) dengan total produksi 42 juta ton per tahun, sumber tanaman potensial lainnya juga dapat dikembangkan sebagai bentuk diversifikasi bahan baku seperti kelapa (*Cocos nucifera*), nyamplung (*Calophyllum inophyllum*), malapari/kranji (*Pongamia pinnata*), jarak pagar (*Jathropa curcas*) dan lainnya. Gambar berikut menampilkan bagian-bagian tanaman penghasil minyak.



Gambar 2. 6 Foto Sumber Hayati untuk Bahan Baku Biodiesel

(Sumber: Amalia, 2021)

2.3 Biodiesel B40

Biodiesel B40 merupakan formulasi bahan bakar alternatif yang terdiri dari campuran 40% biodiesel murni (B100) dan 60% bahan bakar minyak solar konvensional. Biodiesel ini diolah melalui proses transesterifikasi menjadi Fatty Acid Methyl Esters (FAME) yang berasal dari sumber daya terbarukan, utamanya minyak nabati seperti kelapa sawit. Secara kimiawi, peningkatan fraksi FAME hingga 40% secara signifikan mengubah karakteristik fisika-kimia bahan bakar dibandingkan solar murni (B0), terutama terkait densitas energi, viskositas, dan kandungan oksigen intrinsik (~11% berat) yang terikat dalam struktur ester.

Berdasarkan perspektif teknis mesin berskala besar, implementasi biodiesel dengan fraksi tinggi seperti B40 pada mesin dual-fuel atau compression-ignition (CI) kapasitas besar menghadirkan dinamika termodinamika yang kompleks. Studi komprehensif oleh Rahman dkk. (2021) mengenai evaluasi performa mesin dual-fuel CI berskala utilitas menunjukkan bahwa peningkatan fraksi biodiesel secara fundamental memengaruhi kinetika pembakaran. Kandungan oksigen intrinsik pada FAME memperpendek *ignition delay* (masa tunda penyalaan) dan mempercepat flame propagation (rambatan api). Pada mesin besar, mekanisme ini dapat meningkatkan efisiensi termal pada beban menengah karena oksidasi hidrokarbon yang lebih

tuntas, namun di sisi lain berpotensi memicu peningkatan thermal NOx akibat lonjakan temperatur puncak ruang bakar (*peak combustion temperature*).

Hal ini diperkuat oleh temuan Zhang dkk. (2022) dalam analisis mesin dual-fuel gas alam-diesel, yang melaporkan bahwa penggunaan campuran biodiesel berfraksi tinggi (seperti B40) secara konsisten menurunkan emisi *Particulate Matter* (PM) dan Karbon Monoksida (CO) berkat efek oksigenasi (*internal oxidizer*). Namun, studi tersebut juga menekankan bahwa untuk memitigasi penalti emisi NOx dan menjaga stabilitas pembakaran, mesin dual-fuel kapasitas besar memerlukan kalibrasi waktu injeksi dan strategi pembebanan yang sangat presisi.

Pada konteks pembangkit listrik, Konitat dan Nina (2021) juga mengonfirmasi bahwa aplikasi B30/B40 pada power plant mampu menurunkan emisi gas buang berbahaya secara signifikan tanpa melanggar batas regulasi, asalkan sistem injeksi bahan bakar mampu mengatomisasi viskositas B40 yang lebih tinggi secara optimal. Meskipun literatur internasional telah memetakan dampak teknis B40 pada mesin dual-fuel secara umum, studi empiris yang secara spesifik mengevaluasi integrasi B40 pada arsitektur mesin dual-fuel berkapasitas sangat besar (seperti 140 MW) dengan sistem common-rail bertekanan tinggi (>600 bar) masih sangat terbatas, yang menjadi celah (gap) utama penelitian ini.

Secara teoritis, penggunaan campuran biodiesel seperti B40 memberikan sejumlah keuntungan makro, antara lain bersifat biodegradable, memiliki emisi karbon yang lebih rendah dibandingkan solar murni, dan berpotensi meningkatkan efisiensi energi nasional. Selain itu, biodiesel memiliki sifat pelumasan (*lubricity*) yang baik sehingga dapat memperpanjang usia pakai komponen sistem injeksi. Namun, peningkatan persentase biodiesel juga memunculkan tantangan teknis, seperti peningkatan risiko oksidasi dan stabilitas penyimpanan bahan bakar, yang

memerlukan manajemen rantai pasok dan material sistem bahan bakar yang kompatibel (Achmad, *et., al.,* 2025).

Pada konteks kebijakan energi nasional, implementasi B40 mencerminkan langkah progresif dalam pemanfaatan sumber daya domestik, khususnya kelapa sawit, sebagai sumber bahan bakar alternatif. Program ini sejalan dengan target nasional untuk mencapai bauran energi yang lebih bersih dan berkelanjutan sebagaimana diatur dalam Peraturan Presiden Nomor 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional dan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN). Dengan latar belakang tersebut, riset mengenai pemanfaatan B40 menjadi relevan untuk mengevaluasi efektivitas kebijakan, dampak teknis terhadap mesin pembangkit, serta implikasi sosial-ekonomi di sektor hulu dan hilir industri biodiesel (Tambarta, *et., al.,* 2025).

Untuk mewujudkan ketahanan energi nasional dan mengurangi ketergantungan terhadap impor solar, Pemerintah Indonesia resmi menerapkan mandatori penggunaan bahan bakar biodiesel B40 mulai 1 Januari 2025. Kebijakan ini diumumkan langsung oleh Menteri ESDM Bahlil Lahadalia dalam konferensi pers di Jakarta. Penerapan B40, yakni solar dengan campuran 40% biodiesel berbasis sawit, merupakan bagian dari agenda Asta Cita Presiden Prabowo Subianto dan upaya menuju net zero emission pada 2060. Bila implementasi B40 berjalan lancar, pemerintah bahkan menargetkan peningkatan ke B50 pada tahun 2026, dengan harapan menghentikan impor solar secara total.

Program ini juga diproyeksikan menghasilkan penghematan devisa hingga Rp147,5 triliun, sekaligus memberikan manfaat ekonomi, sosial, dan lingkungan. Selain meningkatkan nilai tambah CPO menjadi biodiesel sebesar Rp20,9 triliun, B40 turut menciptakan lapangan kerja bagi sekitar 1,95 juta tenaga kerja on-farm dan lebih dari 14 ribu tenaga kerja off-farm, serta mengurangi emisi gas rumah kaca sebesar 41,46 juta ton CO_2e per tahun. Tahun 2025, alokasi

biodiesel ditetapkan sebesar 15,6 juta kiloliter, terbagi untuk kebutuhan PSO dan non-PSO, dan didistribusikan oleh puluhan badan usaha BBN dan BBM. Implementasi B40 ini tertuang dalam Keputusan Menteri ESDM No. 341.K/EK.01/MEM.E/2024, sebagai bukti komitmen pemerintah dalam transisi energi dan kemandirian energi nasional (Kementerian ESDM, 2025).

2.4 Efisiensi Termal, Perhitungan SFC dan *Heat Rate*

1. Efisiensi Termal (*Thermal Efficiency*)

   Efisiensi termal pada mesin diesel adalah rasio energi yang berguna (kerja) yang dihasilkan oleh mesin terhadap total energi yang dikonsumsi dari bahan bakar. Efisiensi termal mengukur seberapa efisien mesin mengubah energi yang ada dalam bahan bakar menjadi kerja mekanis.

   Rumus untuk menghitung efisiensi termal adalah: (Ubaydillah & Sundari, 2025).

   $$\cap_{thermal} = \frac{W_{Output}}{Q_{In}} x\ 100$$

   Di mana:

   $\cap_{thermal}$ adalah efisiensi termal (%),

   W_{Output} adalah energi yang dihasilkan atau kerja yang dikeluarkan oleh mesin (Joule)

   Q_{In}adalah energi yang masuk ke mesin dari bahan bakar (Joule).

   Dalam konteks mesin diesel, efisiensi termal dapat dipengaruhi oleh banyak faktor, termasuk desain mesin, jenis bahan bakar, dan kondisi operasional mesin.

2. Spesifik Konsumsi Bahan Bakar (SFC, *Specific Fuel Consumption*)

   SFC adalah ukuran efisiensi bahan bakar dalam menghasilkan tenaga mekanik. Ini mengukur jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu unit daya (biasanya satuan gram per kWh atau g/kWh). SFC rendah menunjukkan bahwa mesin lebih efisien dalam mengubah bahan bakar menjadi tenaga.

Rumus untuk menghitung SFC adalah: (Putra, dkk., 2025).

SFC = $\frac{m\ fuel}{P}$

Di mana:

m Fuel adalah laju aliran massa bahan bakar (kg/jam),

P adalah daya yang dihasilkan oleh mesin (kW).

Nilai SFC yang lebih rendah mengindikasikan efisiensi mesin yang lebih tinggi, karena lebih sedikit bahan bakar yang digunakan untuk menghasilkan daya tertentu.

3. Perhitungan *Heatrate*

Heatrate adalah ukuran berapa banyak energi yang diperlukan untuk menghasilkan satu unit daya (biasanya satuan kJ/kWh). Ini mengindikasikan berapa banyak energi yang hilang sebagai panas selama proses pembakaran bahan bakar.

Rumus untuk menghitung heatrate adalah: (Cengel, Y. A., & Boles, M. A., 2014).

Heatrate= $\frac{Qin}{P}$

Di mana:

Qin adalah energi yang dimasukkan ke mesin dari bahan bakar (kJ),

P adalah daya yang dihasilkan oleh mesin (kW).

Semakin rendah nilai heatrate, semakin efisien mesin dalam mengubah energi dari bahan bakar menjadi daya yang berguna. Mesin dengan heatrate yang lebih rendah akan menghasilkan lebih banyak daya dengan jumlah bahan bakar yang lebih sedikit.

2.5 Spesifikasi Teknis Mesin Dual-Fuel

Objek utama dalam penelitian ini adalah Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG) dengan kapasitas total 140 MW, yang terdiri dari 14 unit mesin tipe Wärtsilä Dual-Fuel. Mesin ini dirancang untuk beroperasi secara fleksibel menggunakan campuran gas alam dan biodiesel (B0,

B30, dan B40) sebagai bahan bakar utama, serta didukung oleh sistem injeksi common-rail bertekanan tinggi (>600 bar) untuk memastikan atomisasi yang optimal. Pemahaman terhadap spesifikasi teknis dan historis operasional mesin ini menjadi fondasi penting dalam mengevaluasi dampak penggunaan B40 terhadap performa termal dan keekonomian pembangkit.

Spesifikasi teknis mesin, khususnya sistem injeksi common-rail bertekanan tinggi (>600 bar) dan kapasitas faktor historis sebesar 80%, memiliki implikasi yang sangat signifikan terhadap karakteristik pembakaran B40 di dalam ruang bakar. Tekanan injeksi yang ekstrem ini krusial untuk mengatasi tantangan fisika-kimia B40, seperti viskositas yang sedikit lebih tinggi dan *Lower Heating Value* (LHV) yang lebih rendah dibandingkan solar murni.

Atomisasi yang sangat halus dari sistem common-rail memastikan bahwa tetesan bahan bakar (droplet) memiliki luas permukaan yang maksimal, sehingga oksigen intrinsik di dalam FAME (~11% wt) dapat bereaksi lebih cepat dan sempurna. Selain itu, tingginya kapasitas faktor (80%) mengindikasikan bahwa mesin secara historis beroperasi pada beban yang stabil dan cenderung tinggi. Kondisi ini sangat menguntungkan karena, sebagaimana akan dibuktikan pada bab hasil, B40 memiliki sweet spot efisiensi termal pada beban menengah-tinggi (60–70% load factor), di mana kerugian panas (heat loss) relatif minimal dibandingkan dengan operasi beban rendah.

Kesesuaian antara karakteristik mesin dual-fuel skala besar dengan bahan bakar biodiesel ini sejalan dengan temuan Zhang dkk. (2022), yang menyatakan bahwa mesin dual-fuel modern dengan sistem injeksi canggih mampu mempertahankan efisiensi termal yang tinggi bahkan saat menggunakan bahan bakar alternatif dengan nilai kalor lebih rendah, berkat kontrol pembakaran yang presisi.

Lebih lanjut, pentingnya tekanan injeksi tinggi dalam mengatasi keterbatasan sifat fisika biodiesel juga dikonfirmasi oleh studi Sharma dkk. (2021), yang menemukan bahwa kalibrasi injeksi yang optimal pada mesin dual-fuel secara signifikan menekan emisi hidrokarbon tak terbakar dan meningkatkan stabilitas pembakaran.

Hal ini memvalidasi bahwa infrastruktur PLTMG yang ada secara inheren sudah siap (*ready-to-use*) untuk mengakomodasi transisi ke B40 tanpa memerlukan modifikasi hardware mayor pada sistem injeksinya, sebuah temuan yang juga didukung oleh tinjauan komprehensif Rahman dkk. (2021) mengenai evaluasi performa mesin compression-ignition dual-fuel dalam aplikasi pembangkit listrik.

2.6 Analisis Keekonomian Penggunaan Bahan Bakar Alternatif

Analisis keekonomian bertujuan untuk menilai kelayakan penggunaan sistem mesin dual-fuel dengan campuran biodiesel B40 dan gas (seperti CNG atau biogas) sebagai pengganti atau pelengkap bahan bakar fosil konvensional (Nurmila, 2024).

2.6.1 Komponen Keekonomian Sistem Dual-Fuel

Beberapa komponen utama dalam perhitungan keekonomian adalah:

1. Biaya Investasi Awal (*Capital Cost*)

   Meliputi biaya modifikasi mesin, instalasi sistem bahan bakar gas, ECU/ECM (engine control unit), serta konversi atau retrofit injector dan filter.

2. Biaya Operasional (*Operating Cost*)

   Mencakup harga per liter biodiesel B40 dan per m^3 gas, biaya pelumasan tambahan, serta perawatan komponen akibat perubahan sifat pembakaran. Dalam banyak kasus,

harga gas per energi yang dihasilkan jauh lebih murah dibandingkan biodiesel murni atau solar, memberikan peluang penghematan.

3. Penghematan Konsumsi Bahan Bakar (SFC)

   Penurunan *specific fuel consumption* (SFC) dengan kombinasi bahan bakar yang optimal dapat menghasilkan penghematan biaya harian operasional yang signifikan.

4. Efisiensi Termal yang Lebih Tinggi

   Mesin dual-fuel memiliki potensi meningkatkan efisiensi termal hingga 5–15% tergantung pada kalibrasi dan kondisi pengoperasian, yang secara langsung memengaruhi biaya energi per satuan daya.

5. Umur Komponen dan Perawatan

   Penggunaan gas (yang lebih bersih) dapat memperpanjang umur oli dan mengurangi deposit karbon, sehingga mengurangi biaya penggantian komponen dalam jangka panjang.

2.6.2 Indikator Keekonomian

Beberapa indikator yang umum digunakan dalam analisis keekonomian proyek energi antara lain (Sullivan & Neff, 2016):

1. *Net Present Value* (NPV)

   Mengukur selisih antara nilai sekarang dari penerimaan kas dan pengeluaran kas selama masa proyek. NPV > 0 berarti proyek layak secara finansial.

2. *Internal Rate of Return* (IRR)

   Tingkat pengembalian investasi. IRR yang lebih tinggi dari bunga pinjaman atau tingkat pengembalian minimal yang disyaratkan menunjukkan kelayakan investasi.

3. *Payback Period*

Waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan investasi awal. Sistem dual-fuel yang hemat bahan bakar biasanya memiliki payback period lebih singkat.

4. *Levelized Cost of Energy* (LCOE)

   Biaya produksi per kWh energi selama umur proyek. Cocok untuk membandingkan efisiensi ekonomi antara sistem energi berbeda.

2.6.3 Analisis Sensitivitas dan Risiko

Analisis sensitivitas dan risiko merupakan tahapan penting dalam mengevaluasi ketidakpastian pada hasil simulasi dan keekonomian penggunaan bahan bakar B40 dibandingkan dengan B0 pada mesin dual-fuel. Tujuan dari analisis ini adalah untuk mengetahui seberapa besar perubahan output (misalnya efisiensi, biaya operasional, atau konsumsi bahan bakar) akibat variasi input atau asumsi kunci seperti harga bahan bakar, nilai kalor bahan bakar, beban operasi mesin, dan konsumsi pelumas. Beberapa komponen yang dianalisis dalam sensitivitas dan risiko meliputi:

1. Variasi Harga Bahan Bakar

   Mengkaji pengaruh fluktuasi harga solar dan biodiesel terhadap biaya produksi energi (Rp/kWh).

2. Nilai Kalor dan Kualitas Bahan Bakar

   Melihat dampak penurunan nilai kalor biodiesel terhadap efisiensi termal mesin, mengingat nilai kalor biodiesel umumnya lebih rendah dari solar murni.

3. Beban Operasi Mesin

   Menganalisis pengaruh variasi beban terhadap efisiensi energi dan konsumsi spesifik bahan bakar (SFC). Beban rendah dapat meningkatkan SFC dan menurunkan efisiensi mesin.

4. Konsumsi Oli dan Dampak Pemeliharaan

Evaluasi sensitivitas terhadap kenaikan atau penurunan konsumsi oli mesin akibat penggunaan B40, serta implikasinya terhadap biaya pemeliharaan jangka panjang.

5. Risiko Kinerja dan Operasional

   Menganalisis potensi risiko seperti penyumbatan filter bahan bakar, keausan komponen mesin, atau kestabilan operasi mesin akibat sifat kimia B40 (misalnya kandungan FAME).

6. Ketidakpastian Regulasi dan Insentif

   Mempertimbangkan kemungkinan perubahan kebijakan pemerintah terkait insentif biodiesel, subsidi bahan bakar, atau perubahan standar teknis yang dapat memengaruhi keekonomian jangka panjang.

Melalui analisis sensitivitas ini, dilakukan pemodelan skenario "*what-if*" untuk mengevaluasi skenario terbaik (optimis), sedang (moderat), dan terburuk (pesimis). Dengan pendekatan ini, peneliti dapat menyusun strategi mitigasi risiko serta menyarankan kebijakan operasional atau teknis untuk mengoptimalkan manfaat penggunaan B40 dalam sistem pembangkitan energi berbasis mesin diesel.

2.6.4 Valuasi Ekonomi Emisi dan Carbon Pricing (Carbon Credit)

Analisis keekonomian konvensional seringkali belum menginternalisasi biaya eksternalitas lingkungan (*environmental externalities*) yang timbul dari emisi gas rumah kaca (GRK). Untuk menjembatani kesenjangan ini dan memberikan gambaran kelayakan yang lebih komprehensif, diperlukan integrasi mekanisme carbon pricing (penetapan harga karbon) ke dalam perhitungan biaya energi. Carbon pricing merupakan instrumen kebijakan yang memberikan nilai finansial pada emisi karbon, sehingga mendorong transisi ke teknologi atau bahan bakar yang lebih bersih.

Mekanisme carbon pricing umumnya diimplementasikan melalui dua instrumen utama: pajak karbon (*carbon tax*) dan sistem perdagangan emisi (*Emission Trading System*/ETS) atau berbasis pasar karbon. Dalam skema ETS, setiap pengurangan emisi yang dapat diverifikasi—seperti yang dihasilkan dari substitusi bahan bakar fosil (B0) ke biodiesel fraksi tinggi (B40) yang memiliki jejak karbon lebih rendah—dapat dikonversi menjadi carbon credit. Satu unit carbon credit merepresentasikan pengurangan emisi sebesar satu ton karbon dioksida ekuivalen (tCO2e).

Dalam konteks pembangkit listrik, monetisasi carbon credit berfungsi sebagai revenue stream (arus pendapatan) tambahan atau financial buffer (penyangga finansial) yang secara langsung memengaruhi struktur biaya. Secara matematis, pendapatan dari penjualan carbon credit akan mengurangi total biaya operasional tahunan (OPEX) dalam pembilang rumus *Levelized Cost of Electricity* (LCOE). Integrasi variabel ini sangat krusial dalam analisis komparatif B40 versus B0, karena mampu meng-*offset* (menutup) defisit ekonomi akibat premi harga bahan bakar nabati. Dengan memasukkan valuasi emisi, analisis *break-even point* tidak lagi hanya bertumpu pada selisih harga bahan bakar dan efisiensi termal semata, melainkan juga memperhitungkan insentif makroekonomi dari bursa karbon (seperti IDXCarbon), sehingga memberikan landasan teoritis yang kokoh bagi kelayakan finansial transisi energi berkelanjutan.