

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Landasan Teori

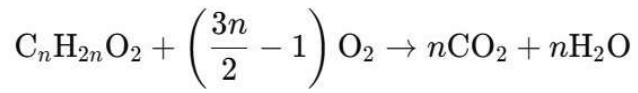
2.1.1. Pembangkit Listrik Tenaga Diesel

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) merupakan pembangkit listrik yang menggunakan mesin diesel untuk mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi mekanik, yang selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik melalui generator. Pada PLTD, bahan bakar yang digunakan dapat berupa diesel konvensional (B0) maupun campuran biodiesel, seperti B30 atau B40, tergantung kebijakan energi dan ketersediaan bahan bakar. Mekanisme kerja PLTD berbeda dengan pembangkit listrik termal uap, karena tidak memerlukan boiler atau uap, melainkan pembakaran langsung di dalam silinder mesin diesel untuk menghasilkan tekanan dan gerakan mekanik pada piston. Energi mekanik inilah yang memutar crankshaft dan rotor generator sehingga menghasilkan listrik.

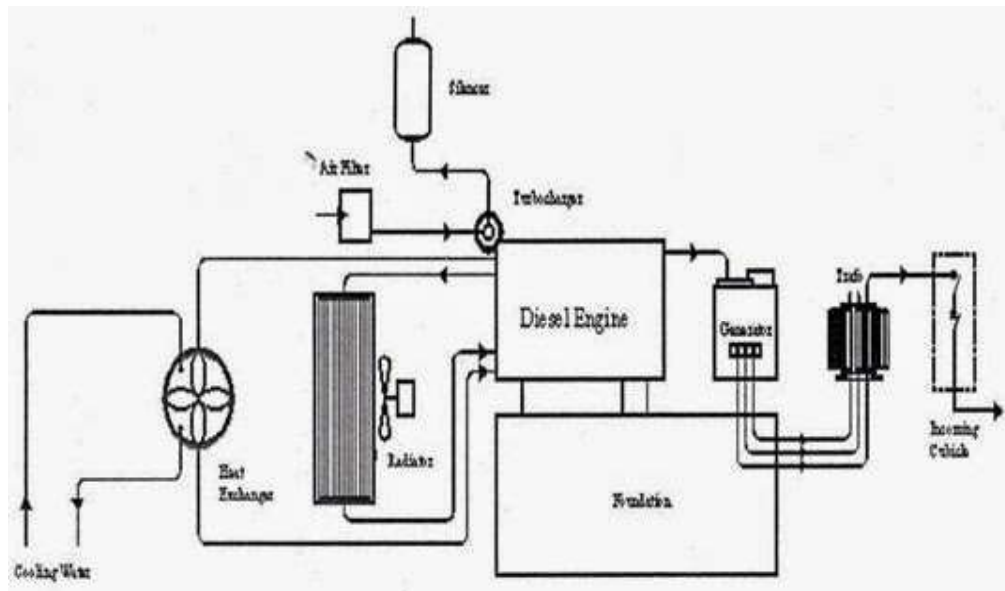
Proses pembakaran dalam PLTD dipengaruhi oleh kualitas bahan bakar, rasio udara-bahan bakar, tekanan kompresi, serta kondisi injektor dan ruang bakar. Energi yang dilepaskan dari pembakaran ini menentukan efisiensi termal mesin, konsumsi bahan bakar, serta output daya listrik. Selain itu, penggunaan campuran biodiesel seperti B40 memiliki implikasi terhadap viskositas bahan bakar, nilai kalor (LHV), dan sifat oksigenasi, yang berdampak pada performa mesin, keandalan komponen, serta pembentukan emisi. Oleh karena itu, pengelolaan bahan bakar, sistem pelumasan, dan perawatan rutin mesin menjadi faktor penting untuk memastikan PLTD bekerja optimal dan andal dalam memenuhi kebutuhan listrik.

Biodiesel umumnya memiliki komposisi kimia mendekati **C_nH_{2n}O₂** (metil ester).

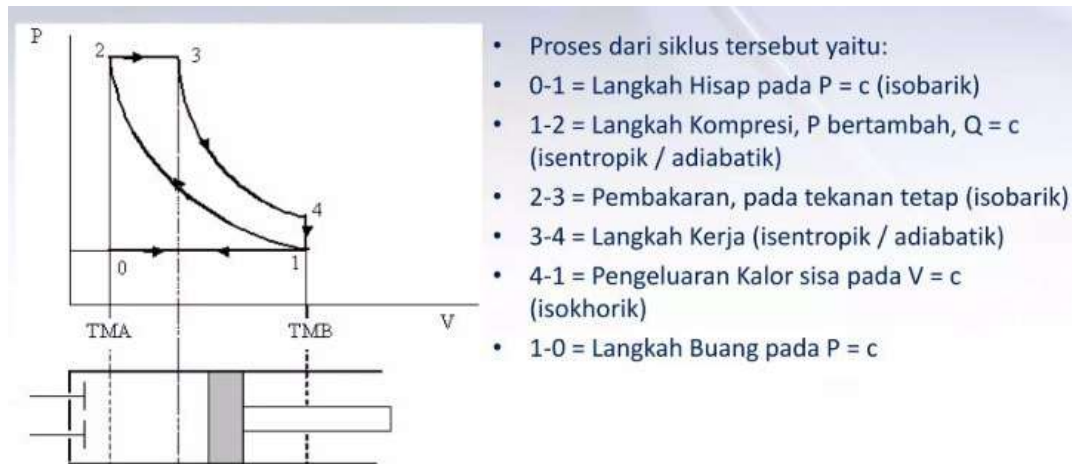
Reaksi Pembakaran Sempurna:



Gambar 2. 1 PLTD



Gambar 2. 2 Flow Diagram PLTD Air Upas



Gambar 2. 3 Diagram p v Pada Mesin Diesel

2.1.2. Separator

Separator merupakan suatu alat yang berfungsi untuk memisahkan kotoran dan air pada bahan bakar minyak (solar/bio solar) sebelum bahan bakar tersebut melewati filter minyak dan masuk ke mesin diesel.

Dalam sistem pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) bahan bakar yang digunakan harus benar-benar bersih, karena kotoran dan air di dalam bahan bakar dapat menyebabkan kerusakan pada injektor dan pompa bahan bakar, kotoran pada bahan bakar juga dapat menyebabkan penurunan kualitas pembakaran pada mesin diesel, menyebabkan karat pada komponen logam serta mengganggu kehandalan operasi mesin PLTD, oleh karena itu separator menjadi komponen penting dalam sistem bahan bakar PLTD.

Prinsip kerja separator :

Bahan bakar solar atau biosolar yang mengandung kotoran dan air masuk ke dalam mangkok separator dan di putar dengan kecepatan tinggi, air dan kotoran yang lebih berat akan terdorong ke bagian luar bowl separator, sedangkan bahan bakar bersih yang lebih ringan tetap di bagian tengah dan di alirkan keluar menuju filter minyak.

sebelum masuk ke pembangkit. Selanjutnya kotoran dan air dikumpulkan dibagian bawah dan kemudian di buang secara berkala.



Gambar 2. 4 Separator

Pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), separator berperan penting dalam memastikan kualitas bahan bakar dan pelumasan agar sistem pembakaran dan kerja mesin tetap optimal. Separator bekerja dengan prinsip pemisahan mekanis antara bahan bakar (solar atau biodiesel B40) dan kotoran seperti air, partikel padat, serta endapan minyak berat. Proses ini berlangsung melalui kombinasi gaya sentrifugal, gravitasi, dan filtrasi untuk memisahkan komponen yang memiliki perbedaan massa jenis.

$$\text{Rumus Gaya Sentrifugal : } F = m \cdot r \cdot \omega^2$$

Dengan keterangan:

F = gaya sentrifugal (Newton)

m = massa partikel, kotoran, atau fluida yang dipisahkan (kg)

r = jari-jari putaran rotor separator (meter)

ω = kecepatan sudut (rad/s)

Pada tahap pertama (*primary separation*), bahan bakar yang masuk ke separator diputar dengan kecepatan tinggi sehingga partikel padat dan air yang memiliki densitas lebih besar terdorong ke bagian luar wadah, kemudian terkumpul di area penampungan bawah. Tahap berikutnya adalah pemisahan sekunder (*secondary separation*), di mana sisa uap air dan partikel mikro disaring menggunakan elemen pemisah seperti coalescer atau filter fine mesh. Hasil dari proses ini adalah bahan bakar dengan tingkat kemurnian tinggi yang siap dialirkan menuju sistem injeksi.

Kinerja separator sangat memengaruhi efisiensi pembakaran dan umur komponen mesin, terutama injektor dan pompa bahan bakar. Apabila pemisahan tidak optimal, keberadaan air dan kotoran dapat menyebabkan korosi, penyumbatan nozzle, serta penurunan efisiensi termal.

Jenis separator dalam pembangkit tenaga listrik bervariasi tergantung pada lokasi dan fungsinya dalam siklus termal. Salah satu jenis yang paling umum adalah *Moisture Separator Reheater (MSR)*, yang biasanya digunakan pada PLTU modern dengan sistem reheating. MSR ditempatkan di antara turbin tekanan tinggi dan turbin tekanan rendah, dan memiliki dua fungsi utama, yaitu sebagai pemisah kelembapan dari uap keluaran turbin tekanan tinggi serta sebagai alat pemanas ulang uap kering dengan memanfaatkan uap panas dari boiler reheater line. Penggunaan MSR terbukti mampu meningkatkan efisiensi termal hingga 2–4% dan mengurangi tingkat keausan turbin bagian bawah. Selain itu, terdapat *Steam Drum Separator* yang berada di bagian atas boiler drum dan berfungsi memisahkan air serta uap hasil penguapan di pipa riser. Beberapa tipe pemisah yang digunakan dalam drum boiler antara lain *centrifugal separator* yang memanfaatkan gaya sentrifugal, *baffle plate separator* yang mengubah arah aliran agar droplet jatuh karena gravitasi, serta *wire mesh separator* yang menangkap partikel air berukuran mikroskopis sebelum uap masuk ke superheater.

Selain itu, *Cyclone Separator* digunakan pada pembangkit berbahan bakar batubara untuk memisahkan partikel padat seperti fly ash dari gas panas sebelum dialirkan ke *Electrostatic Precipitator (ESP)*. Alat ini memanfaatkan gaya sentrifugal dan mampu memisahkan partikel berukuran 5–50 mikrometer dengan efisiensi 70–90%. Sementara itu, *Electrostatic Precipitator* berperan memisahkan partikulat dari gas buang dengan prinsip pemberian muatan listrik melalui efek korona pada elektroda tegangan tinggi. Partikel bermuatan kemudian menempel pada pelat kolektor yang dibersihkan secara mekanis. ESP mampu menurunkan kadar partikulat di gas buang hingga di bawah 50 mg/Nm³ sesuai standar emisi nasional.

Efisiensi separator dapat dinilai melalui beberapa parameter teknis seperti dryness fraction (x) dengan nilai ideal $\geq 0,995$, carryover rate $< 0,25\%$, pressure drop $\leq 0,02$ MPa, temperature gain $+40^{\circ}\text{C}$ hingga $+80^{\circ}\text{C}$, dan efisiensi pengumpulan partikel antara 85–99,5%. Parameter-parameter ini menjadi dasar dalam uji kinerja tahunan guna memastikan separator bekerja optimal dan tidak menurunkan efisiensi pembangkit.

Dalam praktik operasional, separator dapat mengalami berbagai permasalahan teknis. *Carryover* air yang tinggi dapat disebabkan oleh penyumbatan pada vane atau mesh, aliran turbulen, maupun drain yang tidak berfungsi dengan baik. Penumpukan kerak atau kotoran juga dapat meningkatkan pressure drop dan menghambat aliran uap. Selain itu, korosi dan erosi internal akibat kandungan oksigen tinggi atau pH air yang tidak stabil dapat merusak material separator. Permasalahan lain seperti kondensasi tak terkendali dapat muncul akibat *drain valve* bocor atau tidak terkalibrasi, sedangkan gangguan pada ESP sering kali diakibatkan oleh tegangan listrik tidak stabil atau kerusakan isolator.

Untuk menjaga kinerja separator tetap optimal, strategi pemeliharaan dan monitoring harus dilakukan secara berkala. Pemeliharaan preventif meliputi inspeksi periodik terhadap vane separator dan mesh pad setiap 3–6 bulan, pembersihan saluran drain, pemeriksaan level steam drum, kalibrasi sistem reheating pada MSR, serta pemeriksaan arus dan tegangan elektroda ESP. Sementara itu, pemeliharaan prediktif dilakukan dengan analisis vibrasi dan termografi untuk mendeteksi sumbatan atau kebocoran, pengukuran kelembapan uap secara daring menggunakan moisture analyzer, serta pemantauan performa ESP melalui *Distributed Control System (DCS)*. Dari sudut pandang termodinamika, efisiensi siklus Rankine sangat bergantung pada kualitas uap yang dihasilkan. Jika kandungan kelembapan uap meningkat dari 1% menjadi 3%, efisiensi turbin dapat menurun hingga 2–3%, laju erosi bilah meningkat, dan biaya perawatan tahunan bisa naik 10–15%. Sebaliknya, separator yang berfungsi optimal dapat meningkatkan efisiensi netto pembangkit dari 35% menjadi sekitar 38–39%, tergantung pada sistem reheating dan tekanan operasinya.

Dari aspek desain dan material, pemilihan bahan separator harus sesuai dengan kondisi termal dan lingkungan korosif sistem pembangkit. Umumnya, body separator dibuat dari stainless steel 304/316, Inconel, atau Chrome-Moly yang tahan terhadap tekanan tinggi. Elemen pemisah seperti vane dan mesh menggunakan bahan monel atau nikel yang tahan korosi, sementara lapisan luar diberi isolasi dari rockwool atau calcium silicate untuk menjaga kestabilan suhu. Desain separator modern juga dilengkapi flow deflector guna mengurangi turbulensi dan meningkatkan efisiensi pemisahan.

Sebagai reviewer, langkah evaluasi yang perlu dilakukan meliputi verifikasi kesesuaian desain separator terhadap kapasitas dan tekanan kerja, perbandingan data performa aktual dengan data desain, pemeriksaan sistem drain serta reheating untuk mencegah kondensasi balik, audit catatan operasional dan pemeliharaan ESP, serta analisis efisiensi termal guna melihat pengaruh separator terhadap heat rate pembangkit.

Separator merupakan komponen vital dalam pembangkit tenaga listrik karena secara langsung memengaruhi kualitas uap, efisiensi turbin, dan umur peralatan.

Penggunaan *Moisture Separator Reheater*, *Steam Drum Separator*, dan *Electrostatic Precipitator* secara terpadu terbukti mampu menjaga efisiensi sistem sekaligus menekan emisi gas buang. Dengan penerapan desain yang tepat, efektivitas pemisahan yang tinggi, serta pemeliharaan rutin yang konsisten, kinerja separator yang optimal tidak hanya meningkatkan efisiensi energi tetapi juga memperpanjang umur turbin dan mengurangi biaya operasional jangka panjang.

2.1.3. Filter Minyak

Filter minyak (oil filter) merupakan komponen vital dalam sistem pelumasan mesin pada pembangkit tenaga listrik, terutama pada unit yang menggunakan mesin diesel atau turbin gas. Fungsinya adalah untuk menyaring partikel-partikel pengotor, logam aus, karbon, dan residu pembakaran yang terbawa dalam oli pelumas sebelum oli tersebut kembali bersirkulasi ke bagian mesin. Keberadaan filter minyak memastikan kebersihan, keandalan, serta umur panjang dari komponen mesin seperti bearing, piston, dan turbocharger.

Prinsip kerja filter minyak didasarkan pada proses penyaringan mekanis dan perbedaan tekanan. Oli kotor masuk ke rumah filter melalui inlet port, kemudian melewati media penyaring yang umumnya terbuat dari pleated paper, synthetic fiber, atau micro-glass media. Partikel padat yang berukuran lebih besar dari batas micron rating filter akan tertahan di permukaan atau di dalam media penyaring, sementara oli bersih keluar melalui outlet port menuju sistem pelumasan kembali. Ketika tekanan diferensial antara sisi masuk dan sisi keluar meningkat melebihi batas yang ditentukan—yang menandakan filter tersumbat—bypass valve akan terbuka secara otomatis untuk mencegah kekurangan pasokan oli ke mesin meskipun oli belum sepenuhnya bersih.



Gambar 2. 5 Filter Minyak Daily Tank ke Unit Pembangkit

Dalam pembangkit tenaga listrik, filter minyak dapat dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan konstruksinya. Full-flow filter menyaring seluruh oli pelumas sebelum mencapai bagian mesin dan menjadi tipe paling umum pada sistem pelumasan mesin. By-pass filter hanya mengalirkan sebagian kecil oli ke filter tambahan dengan media penyaring halus untuk meningkatkan efisiensi pembersihan tanpa mengganggu aliran utama. Magnetic filter menggunakan medan magnet permanen untuk menangkap partikel logam feromagnetik hasil keausan mesin, sedangkan centrifugal filter atau *oil separator* memanfaatkan gaya sentrifugal untuk memisahkan partikel padat dan air dari oli, biasanya digunakan pada pembangkit berkapasitas besar karena dapat beroperasi secara kontinu tanpa sering diganti. Sistem pelumasan dalam pembangkit listrik memiliki fungsi utama untuk mengurangi gesekan antar komponen bergerak, mendinginkan bagian mesin akibat panas gesek, membersihkan kotoran serta partikel logam hasil keausan, dan mencegah korosi maupun oksidasi permukaan logam. Filter minyak berperan penting dalam menjaga efektivitas fungsi-fungsi tersebut. Tanpa penyaringan yang memadai, kontaminan seperti debu silika, karbon, dan serbuk logam dapat menyebabkan abrasi dan mempercepat keausan pada komponen kritis mesin.



Gambar 2. 6 Filter Minyak di Unit Pembangkit

Media penyaring pada filter minyak modern memiliki ukuran pori antara 5 hingga 25 mikron, tergantung kebutuhan sistem. Untuk mesin diesel generator, ukuran 10–15 mikron dianggap ideal, sedangkan pada turbin gas digunakan coalescing filter dengan efisiensi 99% pada partikel berukuran di bawah 1 mikron. Bahan penyaring yang digunakan dapat berupa selulosa (paper filter) yang murah dan efisien namun berumur pendek, synthetic fiber yang tahan suhu tinggi dan memiliki efisiensi tinggi, atau wire mesh stainless steel yang dapat dicuci ulang dan biasa digunakan pada sistem hidrolik maupun turbin besar.

Kinerja filter minyak perlu dimonitor secara berkala menggunakan indikator tekanan diferensial (ΔP indicator). Jika tekanan diferensial melebihi 2 bar (tergantung spesifikasi pabrikan), filter harus segera diganti atau dibersihkan. Interval penggantian oli dan filter biasanya mengikuti jam operasi mesin, misalnya setiap 500–1000 jam operasi untuk diesel genset, atau mengikuti jadwal inspection interval pada turbin gas. Selain itu, dilakukan pula analisis laboratorium melalui Oil Condition Monitoring (OCM) untuk mengevaluasi kontaminasi partikel, viskositas, serta kandungan logam aus seperti Fe, Cu, Al, dan P

Filter minyak yang berfungsi optimal memberikan berbagai keuntungan, seperti meningkatkan efisiensi pelumasan karena oli tetap bersih dan viskositas terjaga, menurunkan risiko kegagalan komponen seperti bearing seizure atau piston scuffing, serta memperpanjang umur mesin dan interval overhaul. Sebaliknya, filter yang tersumbat atau bocor dapat menyebabkan kegagalan pelumasan serius, menurunkan keandalan pembangkit, dan meningkatkan biaya pemeliharaan.

Dari sisi teknis, oil filter berperan sebagai penjaga utama kualitas oli pelumas yang secara langsung berkontribusi terhadap keandalan operasional dan efisiensi pembangkit tenaga listrik. Sebagai seorang reviewer, dapat dinilai bahwa pemilihan filter harus mempertimbangkan micron rating, kapasitas aliran, dan ketahanan suhu. Sistem monitoring tekanan diferensial wajib diterapkan untuk mencegah kondisi filter blockage, dan perawatan berkala serta uji kualitas oli perlu menjadi bagian dari program Predictive Maintenance (PdM) guna mencegah kerusakan dini. Dengan demikian, efektivitas kerja filter minyak bukan hanya sebagai faktor pendukung, melainkan bagian integral dari sistem keandalan pembangkit tenaga listrik modern.

2.1.4. Biodiesel

Biodiesel adalah bahan bakar cair yang diperoleh melalui reaksi transesterifikasi minyak nabati atau lemak hewani menjadi ester asam lemak metil atau etil (FAME/FAEE). Bahan bakar ini dapat digunakan dalam bentuk murni (B100) atau dicampur dengan diesel fosil membentuk blend seperti B10, B20, B30, atau B40, di mana angka setelah huruf “B” menunjukkan persentase volume biodiesel dalam campuran. Secara kimia, biodiesel berbeda dari diesel konvensional karena

mengandung oksigen secara intrinsik, kadar aromatik yang lebih rendah, dan umumnya memiliki kandungan sulfur yang kecil sehingga berdampak pada karakteristik fisis bahan bakar serta pola pembakaran di ruang bakar mesin diesel. Perbedaan sifat ini menuntut perhatian pada aspek kualitas, kompatibilitas material, dan penyesuaian sistem bahan bakar saat diterapkan pada skala pembangkit.

B40 merujuk pada campuran bahan bakar yang terdiri atas 40% biodiesel (FAME/FAEE) dan 60% High Speed Diesel (HSD) berdasarkan volume. Pilihan tingkat blend semacam ini bertujuan menyeimbangkan manfaat lingkungan—seperti potensi pengurangan emisi gas rumah kaca dan partikulat—dengan kebutuhan kompatibilitas operasi mesin serta rantai pasok bahan bakar. Implementasi blend tinggi seperti B30–B40 memerlukan kontrol mutu yang lebih ketat dan pra-pengolahan bahan bakar yang andal untuk mengurangi risiko masalah operasional seperti penyumbatan filter, stabilitas penyimpanan, atau perubahan performa injektor pada mesin diesel konvensional.

Di Indonesia, mutu biodiesel diatur melalui standar nasional yang tercantum dalam SNI 7182 (serangkaian revisi ada pada tahun-tahun terakhir). Standar ini menetapkan parameter mutu yang wajib diuji, antara lain densitas, viskositas kinematik pada 40°C, cetane number minimal, kandungan air, nilai asam (acid number), dan batasan kontaminan lain sehingga campuran biodiesel aman digunakan pada kendaraan dan mesin industri. Angka ambang untuk tiap parameter dapat berbeda antara B100 dan blend, sehingga dalam praktik pengujian laboratorium terhadap batch bahan bakar yang akan digunakan menjadi langkah penting untuk memastikan kepatuhan terhadap SNI dan kompatibilitas operasional.

Beberapa sifat fisis dan kimia utama yang relevan untuk aplikasi PLTD antara lain densitas, viskositas kinematik, cetane number, nilai kalor (LHV), dan flash point. Densitas cenderung meningkat seiring naiknya fraksi biodiesel, yang berimplikasi pada energi per volume dan kebutuhan penyesuaian pompa atau kalibrasi injektor. Viskositas biodiesel lebih tinggi dibandingkan diesel sehingga dapat memengaruhi atomisasi bahan bakar, pola semprot nozzle, dan efisiensi pembakaran jika tidak diatasi, misalnya dengan pemanasan bahan bakar atau modifikasi sistem injeksi.

Cetane number umumnya lebih baik pada biodiesel sehingga memperbaiki kemampuan penyalaan, tetapi perubahan ini juga dapat mempengaruhi emisi NO_x. Nilai kalor (LHV) menurun pada campuran dengan biodiesel sehingga Specific Fuel Consumption (SFC) volumetrik berpotensi meningkat untuk mempertahankan daya keluaran. Sementara itu, flash point biodiesel yang lebih tinggi meningkatkan keselamatan penyimpanan dan penanganan, meski pengaruhnya terhadap proses pembakaran relatif kecil.

Secara umum, B0 (diesel murni), B30, dan B40 dapat dibandingkan berdasarkan kecenderungan parameter: densitas meningkat dari B0 ke B40; viskositas kinematik naik seiring persentase biodiesel; cetane number cenderung lebih tinggi pada blend yang mengandung biodiesel; lower heating value (LHV) menurun pada blend dengan biodiesel sehingga LHV B40 lebih rendah daripada B0; dan flash point meningkat pada blend biodiesel sehingga B30/B40 biasanya memiliki flash point yang lebih tinggi daripada diesel murni. Nilai numerik untuk tiap parameter bergantung pada feedstock (mis. sawit, jelantah, kedelai) dan proses produksi, sehingga verifikasi laboratorium pada sampel yang akan dipakai di PLTD adalah mutlak diperlukan sebelum implementasi.

Dalam perspektif operasional PLTD, peralihan ke B40 membawa beberapa konsekuensi praktis:

1. Efisiensi termal dan SFC—penurunan LHV B40 dapat menyebabkan peningkatan konsumsi volumetrik untuk mempertahankan output daya sehingga monitoring efisiensi secara kuantitatif harus dilakukan;
2. Sistem bahan bakar dan injektor—kenaikan viskositas dapat mempercepat penyumbatan nozzle dan menambah beban pompa, sehingga prasyarat teknis seperti pemanas bahan bakar dan penyesuaian kalibrasi injeksi mungkin diperlukan;
3. Keandalan komponen—biodiesel mampu melarutkan endapan yang ada sehingga fase transisi dapat memicu penyumbatan filter dan peningkatan keausan bila kandungan air atau asam tidak terkontrol;

4. Emisi—B40 umumnya menurunkan partikel dan CO tetapi berpotensi menaikkan NO_x bergantung pada kondisi pembakaran; oleh sebab itu, pengukuran emisi operasional diperlukan untuk menilai trade-off lingkungan secara empiris.

2.1.5. Proses Pembakaran pada Mesin Diesel dengan Biodiesel

Proses pembakaran pada mesin diesel terjadi melalui mekanisme kompresi udara dan penyalaan sendiri (auto-ignition) bahan bakar. Udara yang diisap ke dalam silinder dikompresi hingga tekanan dan suhu yang sangat tinggi, umumnya mencapai 500–700°C, sehingga ketika bahan bakar diinjeksikan, campuran tersebut menyala tanpa memerlukan sumber api eksternal. Pembakaran pada mesin diesel berlangsung dalam tiga tahap utama, yaitu ignition delay, rapid combustion, dan diffusion combustion. Pada tahap pertama, terjadi penundaan singkat antara saat bahan bakar mulai diinjeksikan dan saat pembakaran dimulai. Tahap kedua ditandai oleh peningkatan tekanan silinder secara cepat akibat pembakaran sebagian besar bahan bakar. Tahap ketiga merupakan pembakaran lanjutan terhadap sisa bahan bakar yang belum terbakar sempurna.

Ketika biodiesel, seperti campuran B40, digunakan sebagai bahan bakar, proses pembakaran mengalami perubahan karakteristik akibat perbedaan komposisi kimia dibandingkan solar konvensional. Biodiesel memiliki kandungan oksigen internal yang tinggi, umumnya sekitar 10–12% berat, sehingga mampu memperbaiki proses oksidasi dan meningkatkan efisiensi pembakaran. Kandungan oksigen ini mempercepat reaksi kimia di ruang bakar, mengurangi ignition delay, serta memperbaiki homogenitas campuran udara-bahan bakar. Akibatnya, biodiesel sering menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna, dengan penurunan emisi karbon monoksida (CO) dan hidrokarbon (HC) yang tidak terbakar.

Namun, kandungan oksigen yang tinggi juga mempengaruhi suhu puncak ruang bakar (combustion temperature). Pada banyak penelitian, ditemukan bahwa penggunaan biodiesel, termasuk B40, menyebabkan kenaikan suhu puncak ruang bakar karena reaksi oksidasi yang lebih intensif. Meskipun efek ini memperbaiki efisiensi termal, konsekuensinya adalah peningkatan pembentukan nitrogen oksida

(NO_x). Gas NO_x terbentuk melalui reaksi antara nitrogen dan oksigen pada suhu di atas 1.800°C; semakin tinggi suhu puncak, semakin besar peluang terbentuknya senyawa ini. Oleh karena itu, walaupun biodiesel menurunkan CO dan HC, sering kali ditemukan peningkatan moderat pada kadar NO_x di gas buang mesin diesel berbahan bakar biodiesel.

Selain itu, biodiesel memiliki viskositas dan densitas yang lebih tinggi dibandingkan solar, yang mempengaruhi proses atomisasi bahan bakar di ujung injektor. Butiran bahan bakar yang lebih besar dapat mengubah pola semprot (spray pattern) dan memperlambat pencampuran bahan bakar dengan udara. Namun, kandungan oksigen dalam biodiesel sebagian besar mampu menutupi kelemahan tersebut dengan menyediakan oksigen tambahan untuk pembakaran di daerah yang miskin udara (fuel-rich zones).

Dari sisi emisi partikulat (PM atau soot), biodiesel terbukti mengurangi pembentukannya secara signifikan. Hal ini disebabkan oleh ketiadaan cincin aromatik dan kandungan sulfur yang sangat rendah dalam biodiesel, sehingga pembentukan jelaga berkurang. Mekanisme ini berbeda dari diesel fosil yang kaya hidrokarbon aromatik penyumbang utama pembentukan soot. Dengan demikian, penggunaan B40 secara umum menurunkan partikulat dan asap hitam, meningkatkan kualitas gas buang, serta mengurangi beban kerja sistem pembuangan (exhaust system).

Secara keseluruhan, proses pembakaran mesin diesel dengan biodiesel menunjukkan trade-off antara peningkatan efisiensi termal dan penurunan sebagian emisi, dengan konsekuensi peningkatan NO_x. Dalam konteks PLTD Air Upas, hal ini berarti penggunaan B40 dapat meningkatkan kebersihan pembakaran dan stabilitas operasi mesin, tetapi tetap memerlukan pengaturan timing injeksi dan tekanan injektor agar suhu puncak ruang bakar tidak terlalu tinggi. Pengendalian tersebut penting untuk menjaga keseimbangan antara efisiensi energi, keandalan mesin, dan kepatuhan terhadap batas emisi lingkungan.

2.1.6. Keandalan (Reliability) Mesin Diesel

Keandalan atau reliability pada mesin diesel mengacu pada kemampuan mesin untuk beroperasi secara kontinu dan konsisten sesuai spesifikasi desain tanpa mengalami kegagalan dalam jangka waktu tertentu. Dalam konteks pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD), keandalan mesin menjadi parameter kritis karena kegagalan komponen dapat menyebabkan downtime, gangguan suplai listrik, dan biaya perawatan yang meningkat.

Secara teknis, keandalan mesin diesel sering diukur menggunakan beberapa indikator utama, antara lain Mean Time Between Failure (MTBF) dan Mean Time To Repair (MTTR). MTBF menunjukkan rata-rata waktu operasi mesin atau komponen antara satu kegagalan dengan kegagalan berikutnya. Semakin tinggi nilai MTBF, semakin tinggi keandalan mesin. Sebaliknya, MTTR menunjukkan rata-rata waktu yang diperlukan untuk memperbaiki mesin setelah terjadi kegagalan; semakin rendah MTTR, semakin cepat mesin kembali beroperasi normal. Kedua parameter ini digunakan secara bersamaan untuk menilai efektivitas perawatan, desain mesin, serta kesiapan sistem dalam mendukung operasi pembangkit.

Penggunaan bahan bakar alternatif, seperti biodiesel B40, memiliki pengaruh langsung dan tidak langsung terhadap keandalan mesin diesel. Secara langsung, sifat fisik dan kimia B40—seperti viskositas lebih tinggi, kandungan oksigen, dan potensi larutan endapan (sludge)—dapat memengaruhi keausan injektor, pompa bahan bakar, dan filter minyak. Jika pengelolaan bahan bakar dan pemeliharaan sistem tidak memadai, hal ini dapat menurunkan MTBF dan meningkatkan frekuensi gangguan operasional. Secara tidak langsung, B40 dapat memberikan manfaat berupa pembakaran lebih bersih, mengurangi pembentukan jelaga dan deposit karbon di ruang bakar, sehingga beberapa komponen kritis, seperti piston, katup, dan kepala silinder, memiliki umur lebih panjang dibandingkan penggunaan diesel konvensional.

Selain itu, pengelolaan kualitas bahan bakar dan prosedur pemeliharaan rutin menjadi faktor penentu keandalan saat menggunakan B40. Strategi seperti filtering, pemisahan air, dan pemanasan bahan bakar sebelum injeksi dapat mencegah

penyumbatan nozzle, korosi pada sistem bahan bakar, dan degradasi komponen akibat sifat polar biodiesel. Kombinasi antara pengawasan kualitas bahan bakar dan perawatan preventif secara sistematis berpotensi mempertahankan MTBF tinggi dan MTTR rendah, sehingga operasi PLTD tetap andal meskipun terjadi peralihan ke biodiesel dengan tingkat blend tinggi seperti B40.

Studi mengenai keandalan mesin diesel pada PLTD Air Upas harus mempertimbangkan interaksi antara sifat fisik-kimia B40, kondisi operasional mesin, dan prosedur pemeliharaan. Analisis keandalan berbasis MTBF dan MTTR dapat memberikan gambaran kuantitatif tentang pengaruh B40 terhadap umur komponen dan frekuensi gangguan, yang pada akhirnya mendukung pengambilan keputusan terkait optimasi bahan bakar, pemeliharaan prediktif, dan kontinuitas suplai listrik.

2.1.7. Efisiensi Termal dan Efisiensi Bahan Bakar PLTD

Efisiensi termal merupakan ukuran seberapa efektif energi yang terkandung dalam bahan bakar diubah menjadi energi mekanik oleh mesin diesel. Dalam konteks Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), efisiensi termal menjadi parameter penting karena berpengaruh langsung terhadap konsumsi bahan bakar, output daya, dan biaya operasional. Efisiensi ini mencerminkan proporsi energi bahan bakar yang berhasil diubah menjadi kerja mekanik, sedangkan sisanya hilang melalui panas buang, gesekan, dan kehilangan lainnya.

Selain efisiensi termal, efisiensi bahan bakar dapat dianalisis melalui Specific Fuel Consumption (SFC), yaitu jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu unit daya selama satu jam operasi. SFC menjadi indikator utama untuk menilai penggunaan bahan bakar PLTD; semakin rendah SFC, semakin hemat konsumsi bahan bakar untuk daya tertentu.

Beberapa faktor utama memengaruhi efisiensi termal dan SFC pada mesin diesel. Pertama, rasio udara-bahan bakar, di mana campuran udara yang ideal memastikan pembakaran lengkap. Rasio terlalu rendah menyebabkan pembakaran tidak sempurna dan meningkatnya emisi CO serta partikulat, sedangkan rasio terlalu tinggi mengurangi output daya dan meningkatkan SFC. Kedua, kondisi injektor dan

atomisasi bahan bakar, karena injektor yang bersih dan presisi menghasilkan semprotan bahan bakar optimal sehingga pembakaran lebih lengkap, meningkatkan efisiensi termal. Ketiga, tekanan kompresi dan suhu ruang bakar, di mana tekanan kompresi tinggi mendukung penyalaan cepat dan pembakaran efisien, sementara mesin dengan tekanan kompresi rendah biasanya memiliki efisiensi termal lebih rendah.

Selain itu, karakteristik bahan bakar, termasuk viskositas, densitas, dan nilai kalor (LHV), berpengaruh terhadap distribusi bahan bakar dan energi yang tersedia untuk konversi kerja. Penggunaan biodiesel B40, misalnya, dapat menurunkan nilai kalor dan meningkatkan viskositas, sehingga konsumsi bahan bakar cenderung meningkat untuk mempertahankan daya keluaran. Faktor terakhir adalah kondisi operasi mesin, seperti suhu pendinginan, kebersihan filter, dan perawatan rutin, yang berpengaruh terhadap efisiensi termal karena mengurangi kehilangan energi akibat gesekan atau pembakaran tidak sempurna.

2.1.8. Sistem Bahan Bakar dan Pelumasan pada PLTD

Sistem bahan bakar pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) merupakan jaringan yang mengalirkan bahan bakar dari tangki penyimpanan utama hingga ke ruang bakar mesin. Alur distribusi bahan bakar dimulai dari tangki utama, di mana bahan bakar diambil oleh pompa utama dan dialirkan melalui saringan untuk memisahkan kotoran, air, atau endapan sebelum mencapai pompa injeksi dan ruang bakar. Pada beberapa sistem, bahan bakar juga melewati pemanas (fuel heater) untuk menurunkan viskositas, terutama saat menggunakan campuran biodiesel dengan fraksi tinggi seperti B40, sehingga memudahkan atomisasi dan pembakaran yang lebih efisien di ruang bakar.

Kualitas bahan bakar menjadi faktor penting dalam kinerja sistem bahan bakar dan pelumasan. Biodiesel yang memiliki sifat lebih polar dapat melarutkan endapan atau sludge pada tangki dan pipa lama, sehingga berpotensi menyumbat saringan atau injektor jika tidak dilakukan filtrasi dan pemeliharaan rutin. Kandungan air atau asam

yang tinggi dalam bahan bakar juga dapat memicu korosi pada komponen logam, mempengaruhi efisiensi pompa, serta mempercepat degradasi oli mesin.

Sistem pelumasan mesin PLTD sangat terkait dengan kualitas bahan bakar karena oli berfungsi mengurangi gesekan, mendinginkan komponen, dan melindungi permukaan logam dari keausan. Bahan bakar yang mengandung air atau senyawa asam dapat meningkatkan kontaminasi oli, mengurangi viskositas pelumas, dan memicu korosi pada silinder, piston, serta bantalan. Oleh karena itu, pengelolaan bahan bakar yang tepat, termasuk filtrasi, pemanasan, dan pemantauan kualitas, menjadi kunci untuk menjaga keandalan sistem pelumasan dan umur komponen mesin diesel.

2.1.9. Pengaruh Kualitas Bahan Bakar terhadap Performa Mesin Diesel

Kualitas bahan bakar memiliki pengaruh yang signifikan terhadap performa dan umur mesin diesel. Kandungan air dalam bahan bakar, meskipun dalam jumlah kecil, dapat menurunkan efisiensi pembakaran, menyebabkan korosi pada komponen logam, dan memicu kerusakan pada sistem injeksi. Air yang bercampur dengan bahan bakar dapat membentuk uap di ruang bakar, mengganggu pola semprot bahan bakar dari nozzle, sehingga pembakaran menjadi tidak sempurna dan meningkatkan residu karbon pada piston, ring, dan katup (valve).

Selain itu, kandungan sulfur yang tinggi dalam bahan bakar juga berdampak negatif terhadap mesin. Sulfur dapat bereaksi membentuk asam sulfat saat pembakaran, yang bersifat korosif dan dapat mempercepat keausan pada permukaan logam seperti piston ring, katup, dan dinding silinder. Hal ini tidak hanya menurunkan efisiensi termal mesin, tetapi juga meningkatkan risiko kerusakan jangka panjang pada komponen utama mesin.

Nilai keasaman bahan bakar (acid value) juga menjadi indikator penting kualitas bahan bakar. Acid value tinggi menunjukkan adanya senyawa asam bebas yang dapat merusak oli pelumas, memicu korosi, dan menurunkan kemampuan pelumasan mesin. Dampaknya, komponen seperti nozzle, piston ring, dan valve

mengalami keausan lebih cepat, sehingga frekuensi perawatan dan penggantian komponen meningkat.

2.1.10. Specific Fuel Consumption (SFC)

1. Specific Fuel Consumption (SFC) atau Konsumsi Bahan Bakar Spesifik adalah parameter yang menunjukkan jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu satuan daya dalam waktu tertentu.

Pada sistem PLTD Air Upas, SFC digunakan untuk:

1. Mengukur efisiensi penggunaan bahan bakar
2. Membandingkan performa sebelum dan sesudah penggunaan B40
3. Menilai dampak nilai kalor (LHV) terhadap konsumsi bahan bakar
4. Menentukan biaya operasional pembangkit

Semakin kecil nilai SFC, maka semakin efisien mesin diesel tersebut.

2. Rumus Specific Fuel Consumption (SFC)

2.1 Rumus Dasar SFC

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{P}$$

Keterangan :

SFC = Specific Fuel Consumption (kg/kWh atau liter/kWh)

$\dot{m}_f$ = laju aliran massa bahan bakar (kg/jam)

P = daya output mesin (kW)

2.2 Rumus SFC Berdasarkan Data Operasional PLTD

Jika menggunakan data pemakaian harian atau bulanan:

$$SFC = \frac{\text{Total Konsumsi BBM (kg atau liter)}}{\text{Energi Listrik yang Dihasilkan (kWh)}}$$

Jika konsumsi dalam liter, maka:

$$SFC = \frac{\text{Liter BBM}}{\text{kWh}}$$

Jika ingin lebih akurat dalam satuan massa:

$$SFC = \frac{\text{Liter} \times \rho}{kWh}$$

Dimana : ρ = massa jenis bahan bakar (kg/liter)

2.3 Hubungan SFC dengan Nilai Kalor (LHV)

Karena B40 memiliki nilai kalor lebih rendah dibanding solar murni, maka:

$$SFC \propto \frac{1}{LHV}$$

Artinya:

1. Jika LHV turun, maka SFC naik
2. Jika LHV naik, maka SFC turun

Inilah sebabnya penggunaan B40 biasanya menyebabkan kenaikan SFC 2–5% dibanding B30.

2.4 Hubungan SFC dengan Efisiensi Termal

Efisiensi termal mesin diesel dapat dihitung dengan:

$$\eta_{th} = \frac{P}{\dot{m}_f \times LHV}$$

Karena:

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{P}$$

Maka hubungan efisiensi dengan SFC adalah:

$$\eta_{th} = \frac{1}{SFC \times LHV}$$

Artinya:

Semakin kecil SFC → efisiensi termal semakin besar
Semakin besar SFC → efisiensi menurun

2.2. Penelitian yang Relevan

Pada penelitian ini penulis melakukan tinjauan literatur pada beberapa penelitian yang relevan untuk dijadikan referensi. Referensi dapat berasal dari jurna, artikel, skripsi, atau buku yang relevan. Beberapa referensi yang penulis dapatkan sebagai berikut:

1. Menurut peneliti dalam jurnal berjudul “Pengaruh Biodiesel Terhadap Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca dengan Aplikasi APPLE-GATRIK (Studi Kasus PLTD Talaga Sulawesi Tenggara)” [36] penelitian ini membahas emisi Gas Rumah Kaca (GRK) yang masih tinggi dari PLTD berbahan bakar solar murni. Tujuannya adalah untuk menganalisis dampak penggunaan biodiesel terhadap penurunan emisi. Metode yang digunakan adalah analisis menggunakan aplikasi Apple-Gatrik, dengan memasukkan data operasi tahunan seperti daya mampu pembangkit, produksi listrik, efisiensi termal, dan konsumsi bahan bakar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan Biodiesel B30 menurunkan intensitas emisi menjadi 0,708 ton CO₂e/MWh, atau lebih rendah 28,19% dibandingkan solar murni. Penurunan ini dipengaruhi oleh pemeliharaan mesin yang tepat serta pengelolaan bahan bakar untuk mencegah endapan. Namun, riset ini belum membahas pengaruh Biodiesel B40 terhadap efisiensi operasional dan keandalan mesin PLTD, termasuk pengaruhnya terhadap sistem pelumasan, transformator, dan umur peralatan, yang menjadi fokus dalam penelitian PLTD Air Upas.
2. Menurut peneliti dalam jurnal berjudul “Penggunaan Bahan Bakar High Speed Diesel dan Marine Fuel Oil Terhadap Biaya Operasi PLTD” [37], penelitian ini menyoroti meningkatnya biaya operasional PLTD akibat kenaikan harga bahan bakar. Tujuannya untuk mengevaluasi efisiensi penggunaan HSD dan MFO tanpa mengurangi produksi listrik. Metode penelitian dilakukan dengan pengamatan langsung terhadap data operasional harian PLTD Tello, termasuk perhitungan efisiensi termal dan Specific Fuel Consumption (SFC). Hasil penelitian

menunjukkan efisiensi tertinggi sebesar 40,02% dengan SFC 0,262 l/kWh, sedangkan efisiensi terendah 38,62% dengan SFC 0,267 l/kWh. Biaya bahan bakar tertinggi tercatat sebesar Rp181.014.222,00, dengan dominasi penggunaan MFO. Adapun riset ini belum meninjau penggunaan bahan bakar alternatif seperti Biodiesel (B30/B40) terhadap efisiensi dan keandalan sistem PLTD, serta belum menganalisis dampak jangka panjang biodiesel terhadap performa mesin dan transformator, yang menjadi fokus penelitian PLTD Air Upas.

3. Menurut peneliti dalam jurnal berjudul “Potensi Pemanfaatan Gelombang Laut Menjadi Tenaga Listrik Dengan Metoda Oscillating Water Column di Pulau Bawean Gresik” [38], penelitian ini dilatarbelakangi oleh keterbatasan pasokan listrik di Pulau Bawean yang masih bergantung pada PLTD, di mana suplai bahan bakar sering terganggu akibat kondisi laut bergelombang besar. Penelitian dilakukan dengan metode Oscillating Water Column (OWC), melalui analisis karakteristik gelombang laut bulanan untuk menghitung daya potensial yang dapat dikonversi menjadi energi listrik. Hasil menunjukkan daya terendah sebesar 4.869,91 Watt dan daya tertinggi 272.236,17 Watt, dengan efisiensi sistem 11,971%, yang mampu memasok listrik bagi sekitar 325 rumah nelayan sederhana. Riset ini berfokus pada energi alternatif laut, tetapi belum membahas integrasi sistem hybrid PLTD–PLTGL untuk menjamin kontinuitas suplai listrik, serta belum menilai keekonomian dan keandalan sistem kombinasi tersebut, yang dapat menjadi arah lanjutan seperti pada penelitian efisiensi PLTD berbasis Biodiesel B40 di Air Upas.
4. Menurut peneliti dalam jurnal berjudul “Analisis Kinerja Mesin Diesel Terhadap Pemakaian Bahan Bakar Heavy Fuel Oil (HFO) pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) Tallasa Kabupaten Takalar” [39], penelitian ini membahas penurunan daya keluaran mesin PLTD akibat penggunaan bahan bakar HFO yang tidak sesuai standar. Kandungan air dalam HFO melebihi batas yang diizinkan, sehingga menurunkan kinerja mesin diesel pembangkit. Penelitian dilakukan melalui analisis kualitas bahan bakar HFO yang digunakan di PLTD Tallasa Takalar serta pengukuran daya keluaran mesin New Sulzer 16ZA40S dan

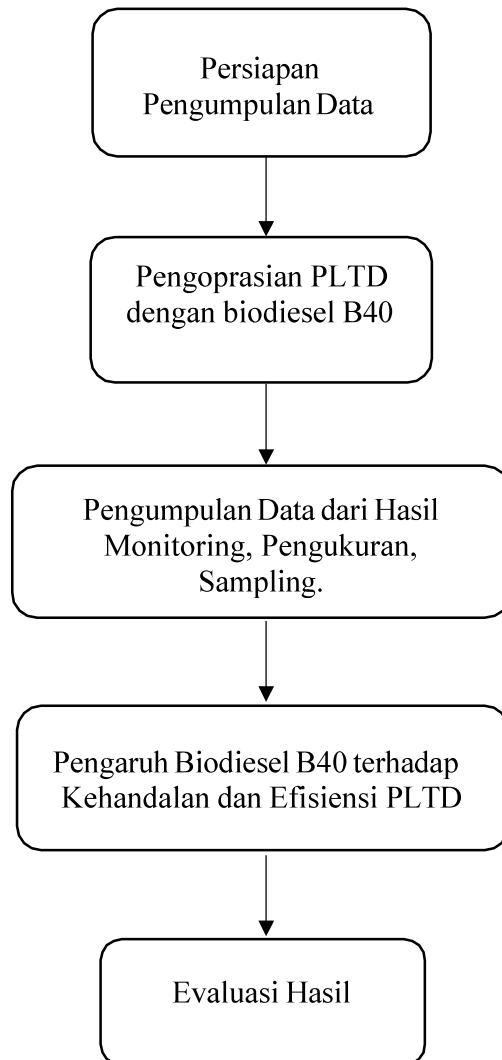
efisiensi termalnya. Hasil menunjukkan bahwa kandungan air dalam HFO melebihi standar, menyebabkan daya mesin turun dari 11 MW menjadi 7–8 MW, dengan efisiensi termal hanya 58,2%. Namun, riset ini belum mengkaji penyebab peningkatan kandungan air dalam HFO, seperti dari proses penyimpanan atau distribusi, serta belum mengevaluasi solusi teknis seperti sistem pemurnian, fuel heating, atau alternatif bahan bakar yang lebih stabil dan efisien.

Tabel 2. 1 Penelitian yang Relevan

Judul	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
Pengaruh Biodiesel Terhadap Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca dengan Aplikasi APPLE-GATRIK (Studi Kasus PLTD Talaga Sulawesi Tenggara)	Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dari PLTD yang menggunakan bahan bakar solar murni masih tinggi, sehingga perlu dianalisis dampak penggantian bahan bakar ke biodiesel terhadap penurunan emisi.	Analisis dilakukan menggunakan aplikasi Apple-Gatrik untuk menghitung dan melaporkan emisi ketenagalistrikan berdasarkan data operasi tahunan seperti daya mampu pembangkit, produksi listrik, faktor kapasitas, efisiensi termal, load factor, dan konsumsi bahan bakar.	Rata-rata intensitas emisi dengan Biodiesel B30 adalah 0,708 ton CO ₂ e/MWh, lebih rendah 28,19% dibandingkan solar murni (0,986 ton CO ₂ e/MWh). Penurunan emisi dipengaruhi oleh pemeliharaan mesin yang tepat dan pengelolaan bahan bakar untuk mencegah endapan.	Penelitian ini belum membahas pengaruh Biodiesel B40 terhadap efisiensi operasional dan keandalan mesin PLTD secara menyeluruh, termasuk dampaknya terhadap sistem pelumasan, , dan umur peralatan, yang menjadi fokus penelitian PLTD Air Upas.
Penggunaan Bahan Bakar High Speed Diesel dan Marine Fuel Oil Terhadap Biaya Operasi PLTD.	Biaya operasional PLTD meningkat akibat kenaikan harga bahan bakar, sehingga diperlukan evaluasi terhadap efisiensi penggunaan HSD dan MFO tanpa	Penelitian dilakukan melalui pengamatan langsung terhadap data operasional harian PLTD Tello, dengan menghitung efisiensi termal dan Specific Fuel Consumption (SFC) berdasarkan	Efisiensi termal tertinggi PLTD tercatat 40,02% dengan SFC 0,262 l/kWh pada 20 Januari 2018, sedangkan efisiensi terendah 38,62% dengan SFC 0,267 l/kWh pada 25 Januari 2018. Biaya terbesar penggunaan bahan bakar tercatat Rp 181.014.222,00, dengan dominasi	Penelitian ini belum meninjau penggunaan bahan bakar alternatif seperti Biodiesel (B30/B40) terhadap efisiensi dan keandalan sistem PLTD. Selain itu, dampak jangka

Judul	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
	mengurangi produksi listrik.	volume bahan bakar yang digunakan serta daya listrik yang dihasilkan.	bahan bakar MFO.	panjang biodiesel terhadap performa mesin dan transformator belum dianalisis, yang menjadi fokus dalam penelitian PLTD Air Upas.
Judul	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
				dievaluasi, yang dapat menjadi arah penelitian lanjutan seperti pada studi efisiensi PLTD berbasis Biodiesel B40 di Air Upas.

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2. 7 Kerangka Pemikiran

Sesuai dengan kerangka pemikiran penulis, sebelum melakukan evaluasi pengaruh biodiesel B40 penulis melakukan persiapan pengumpulan data terlebih dahulu, lalu mengoprasikan mesin PLTD dengan kondisi normal seperti biasa menggunakan biodiesel B40, setelah mesin beroperasi penulis melakukan data dari hasil monitoring, pengukuran dan sampling, dari data-data tersebut penulis dapat menganalisa pengoprasian mesin PLTD dengan biodiesel B40.