BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Mesin Diesel dan Komponen Utamanya

Mesin diesel merupakan motor bakar torak yang bekerja berdasarkan prinsip penyalaan kompresi (*compression ignition engine*), di mana proses pembakaran terjadi akibat kenaikan temperatur udara hasil kompresi yang sangat tinggi [6], [7]. Pada mesin diesel, udara terlebih dahulu dihisap ke dalam silinder dan kemudian dikompresi hingga mencapai tekanan dan temperatur yang cukup untuk memicu penyalaan bahan bakar. Bahan bakar yang diinjeksikan ke dalam ruang bakar akan mengalami *autoignition* secara spontan tanpa memerlukan percikan api dari sistem pengapian listrik, sebagaimana pada mesin bensin. Oleh karena itu, rasio kompresi yang tinggi menjadi faktor kunci dalam menjamin keberhasilan dan kestabilan proses pembakaran pada mesin diesel.

Dibandingkan dengan mesin bensin, mesin diesel memiliki efisiensi termal yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh karakteristik siklus diesel ideal, di mana proses pembakaran diasumsikan berlangsung pada tekanan konstan, sehingga menghasilkan kerja yang lebih besar per satuan volume campuran udara dan bahan bakar [6]. Efisiensi termal yang lebih baik tersebut berimplikasi langsung pada konsumsi bahan bakar yang lebih rendah untuk menghasilkan daya yang sama, sehingga mesin diesel lebih ekonomis untuk aplikasi pembangkitan energi listrik jangka panjang.

Selain efisiensi yang tinggi, mesin diesel juga memiliki kemampuan menghasilkan torsi besar pada putaran rendah. Karakteristik ini menjadikan mesin diesel sangat sesuai untuk digunakan pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), yang dituntut mampu merespons perubahan beban secara cepat dan stabil. Pada sistem isolated, seperti PLTD Lemukutan, fluktuasi beban yang dipengaruhi oleh aktivitas masyarakat dapat terjadi secara tiba-tiba,

sehingga diperlukan mesin dengan karakteristik torsi yang kuat dan respon dinamis yang baik untuk menjaga kestabilan tegangan dan frekuensi sistem.

Keunggulan lain dari mesin diesel adalah tingkat durabilitas dan keandalan operasi yang relatif tinggi. Mesin diesel dirancang untuk bekerja pada kondisi beban berat dan waktu operasi yang panjang, sehingga cocok untuk sistem pembangkitan yang beroperasi secara kontinu. Selain itu, mesin diesel memiliki konsumsi bahan bakar yang relatif lebih hemat serta kemampuan adaptasi yang baik terhadap variasi beban, yang sering terjadi dalam penyediaan listrik di wilayah kepulauan dan daerah terpencil. Karakteristik-karakteristik tersebut menjadikan mesin diesel sebagai pilihan utama dalam sistem kelistrikan isolated, di mana kontinuitas pasokan energi sangat bergantung pada performa dan efisiensi mesin pembangkit itu sendiri.

2.1.1.1 Blok Silinder dan Silinder

Blok silinder merupakan struktur utama mesin diesel yang berfungsi sebagai rumah bagi silinder, piston, serta jalur pendinginan dan pelumasan. Di dalam silinder berlangsung seluruh proses siklus kerja mesin diesel, mulai dari hisap udara, kompresi, pembakaran, hingga pembuangan gas sisa pembakaran. Oleh karena itu, kondisi geometris dan permukaan dinding silinder sangat menentukan keberhasilan proses kompresi dan kualitas pembakaran.

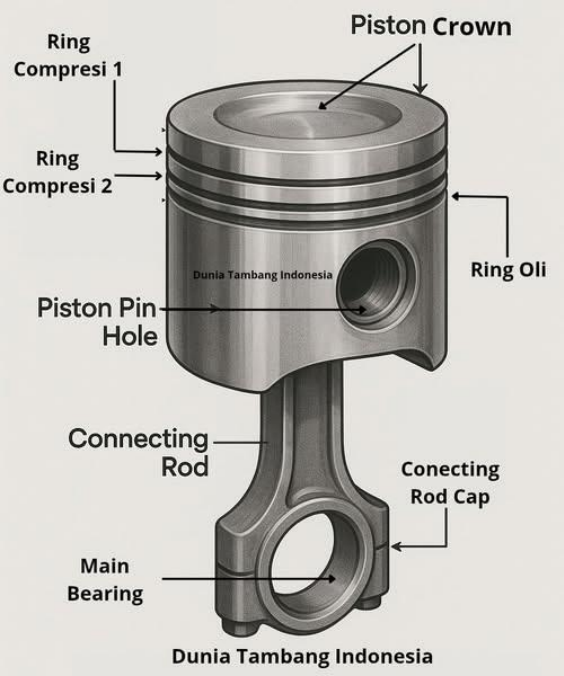
Keausan dinding silinder atau ketidaksempurnaan bentuk silinder dapat menyebabkan kebocoran tekanan kompresi (*blow-by*), yang berdampak pada penurunan tekanan efektif pembakaran. Kondisi tersebut secara langsung menurunkan efisiensi termal mesin dan meningkatkan konsumsi bahan bakar, yang pada akhirnya tercermin pada peningkatan nilai *Specific Fuel Consumption* (SFC).

Gambar 2.1 Potongan blok silinder mesin diesel

2.1.1.2 Piston, Ring Piston, dan Batang Penghubung

Piston berfungsi menerima tekanan gas hasil pembakaran dan mengubah energi tekanan tersebut menjadi gerak bolak-balik. Gerak ini kemudian diteruskan ke poros engkol melalui batang penghubung (*connecting rod*). Ring piston memiliki peran penting dalam menjaga kerapatan antara piston dan dinding silinder agar tekanan kompresi tidak bocor serta mengontrol jumlah oli yang masuk ke ruang bakar.

Keausan ring piston atau piston akan meningkatkan kebocoran gas pembakaran dan gesekan mekanis. Kondisi ini menyebabkan penurunan daya efektif yang dihasilkan mesin serta peningkatan kerugian energi mekanis. Dalam konteks pembangkit listrik tenaga diesel, kondisi tersebut berdampak pada meningkatnya konsumsi bahan bakar untuk menghasilkan daya listrik yang sama.

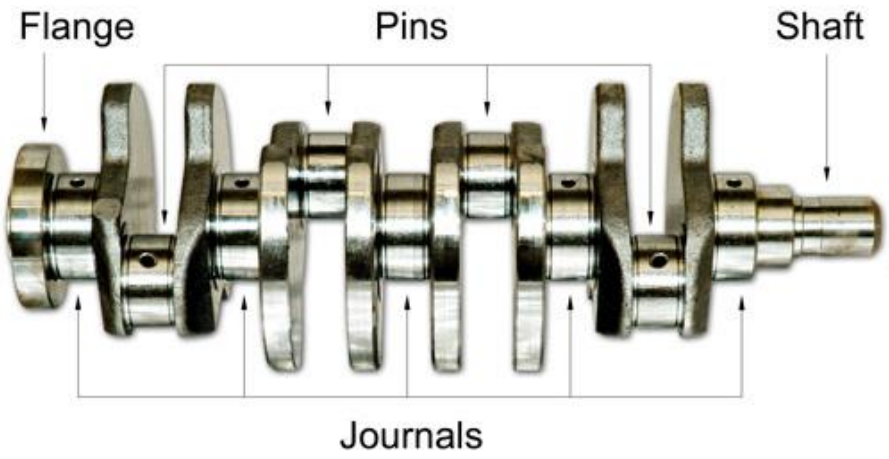


Gambar 2.2 Piston, ring piston, dan batang penghubung pada mesin diesel

2.1.1.3 Poros Engkol (Crankshaft)

Poros engkol berfungsi mengubah gerak bolak-balik piston menjadi gerak putar yang selanjutnya digunakan untuk memutar generator. Komponen ini menerima beban siklik yang besar akibat tekanan pembakaran, sehingga harus memiliki kekuatan mekanik tinggi dan keseimbangan yang baik.

Kerugian gesekan pada bantalan poros engkol merupakan salah satu sumber utama kerugian mekanis (*mechanical losses*) pada mesin diesel. Semakin besar kerugian gesekan yang terjadi, semakin besar pula energi yang hilang sebelum dikonversikan menjadi energi listrik, sehingga efisiensi keseluruhan sistem menurun.

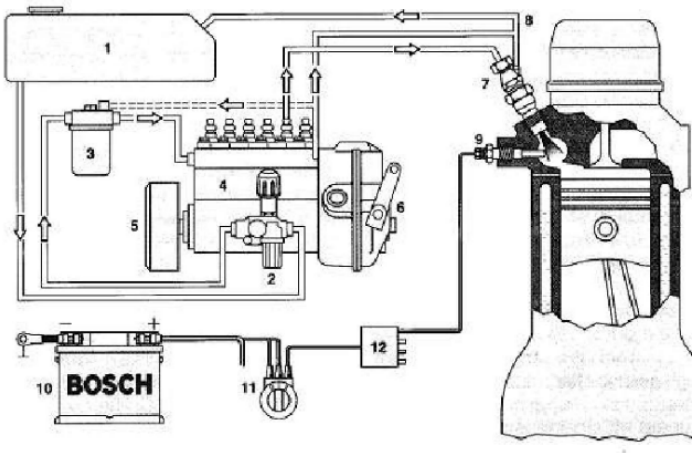


Gambar 2.3 Poros engkol dan bantalan utama pada mesin diesel

2.1.1.4 Sistem Bahan Bakar

Sistem bahan bakar pada mesin diesel terdiri dari tangki bahan bakar, pompa bahan bakar, filter, dan injektor. Sistem ini berfungsi menyuplai bahan bakar ke ruang bakar dalam jumlah, tekanan, dan waktu yang tepat. Kinerja injektor sangat menentukan kualitas atomisasi bahan bakar, yang berpengaruh langsung terhadap kesempurnaan pembakaran.

Gangguan pada sistem bahan bakar, seperti penyumbatan filter atau penurunan performa injektor, dapat menyebabkan pembakaran tidak sempurna. Kondisi ini akan meningkatkan konsumsi bahan bakar dan nilai SFC, terutama pada operasi beban parsial yang sering terjadi pada sistem isolated seperti PLTD Lemukutan.

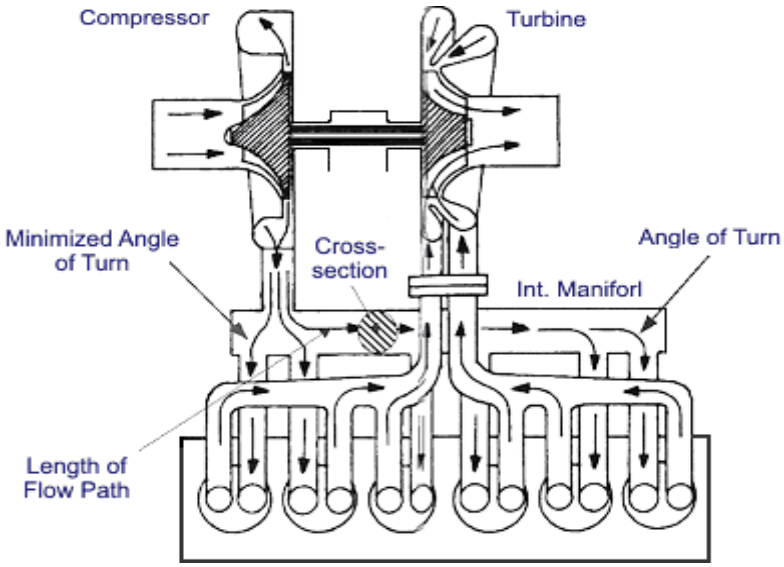


Gambar 2.4 Diagram sistem bahan bakar mesin diesel

2.1.1.5 Sistem Udara Masuk dan Buang

Sistem udara masuk berfungsi menyuplai udara bersih ke ruang bakar, sedangkan sistem buang mengalirkan gas sisa pembakaran keluar dari silinder. Keseimbangan antara suplai udara dan bahan bakar sangat menentukan kualitas pembakaran dan efisiensi mesin.

Hambatan pada saluran udara masuk atau buang dapat meningkatkan kerja pompa mesin (*pumping losses*). Kerugian ini menyebabkan sebagian energi hasil pembakaran digunakan untuk mengatasi hambatan aliran gas, sehingga menurunkan daya efektif dan efisiensi energi mesin diesel.

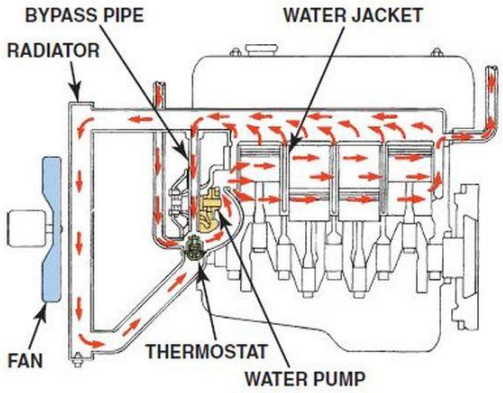


Gambar 2.5 Skema sistem intake dan exhaust mesin diesel

2.1.1.6 Sistem Pendingin

Sistem pendingin berfungsi menjaga temperatur kerja mesin agar tetap berada dalam batas aman. Panas hasil pembakaran yang berlebihan dapat menyebabkan kerusakan komponen, sedangkan pendinginan yang terlalu besar dapat menurunkan efisiensi termal mesin.

Sebagian besar kerugian energi pada mesin diesel dilepaskan melalui sistem pendingin. Oleh karena itu, sistem pendingin memiliki peran penting dalam analisis neraca energi mesin dan efisiensi keseluruhan, terutama pada operasi beban rendah dan fluktuatif.

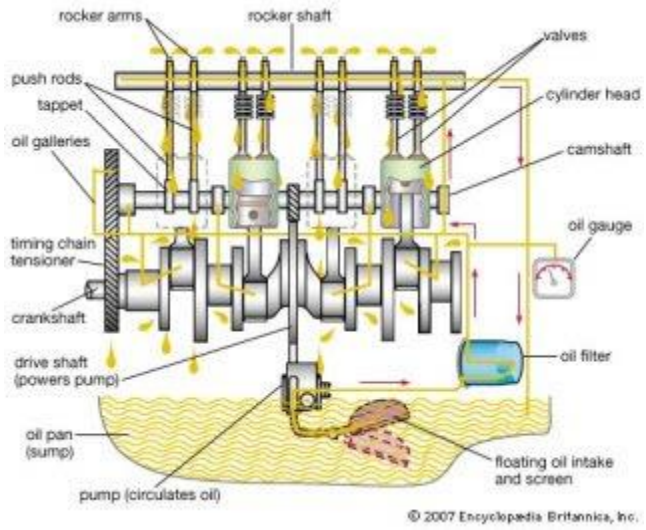


Gambar 2.6 Diagram sistem pendingin mesin diesel

2.1.1.7 Sistem Pelumasan

Sistem pelumasan berfungsi mengurangi gesekan antar komponen yang bergerak, seperti piston, poros engkol, dan bantalan. Pelumasan yang optimal dapat menurunkan kerugian gesekan dan meningkatkan efisiensi mekanis mesin.

Sebaliknya, pelumasan yang tidak memadai akan meningkatkan temperatur dan gesekan, sehingga memperbesar losses mekanis dan menurunkan efisiensi energi. Dalam jangka panjang, kondisi ini juga dapat mempercepat keausan komponen dan menurunkan keandalan operasi mesin diesel.



Gambar 2.7 Diagram aliran oli pelumas pada mesin diesel

2.1.2 Siklus Kerja Mesin Diesel

Siklus kerja mesin diesel ideal merupakan dasar teoritis dalam memahami proses konversi energi pada mesin diesel. Siklus diesel ideal terdiri dari empat langkah utama, yaitu langkah hisap (*intake*), kompresi (*compression*), langkah usaha (*power stroke*), dan buang (*exhaust*) [6]. Keempat langkah tersebut berlangsung secara berurutan dalam satu siklus kerja mesin dan menjadi acuan utama dalam analisis performa serta efisiensi termal mesin diesel.

Pada langkah hisap, piston bergerak dari titik mati atas menuju titik mati bawah, menyebabkan udara segar masuk ke dalam silinder melalui katup masuk yang terbuka. Tidak seperti mesin bensin, pada mesin diesel hanya udara yang dihisap ke dalam silinder tanpa campuran bahan bakar. Hal ini memungkinkan mesin diesel beroperasi dengan rasio kompresi yang lebih tinggi, yang menjadi salah satu faktor utama tingginya efisiensi mesin diesel dibandingkan mesin pembakaran dalam lainnya.

Langkah berikutnya adalah kompresi, di mana piston bergerak kembali ke titik mati atas dengan kedua katup tertutup. Udara yang terperangkap di dalam silinder dimampatkan hingga mencapai tekanan dan temperatur yang sangat tinggi. Peningkatan tekanan dan temperatur ini sangat penting karena menjadi syarat utama terjadinya penyalaan sendiri

(*autoignition*) pada mesin diesel. Pada tahap ini, tidak diperlukan sistem pengapian eksternal seperti busi, karena panas hasil kompresi sudah cukup untuk memicu pembakaran bahan bakar.

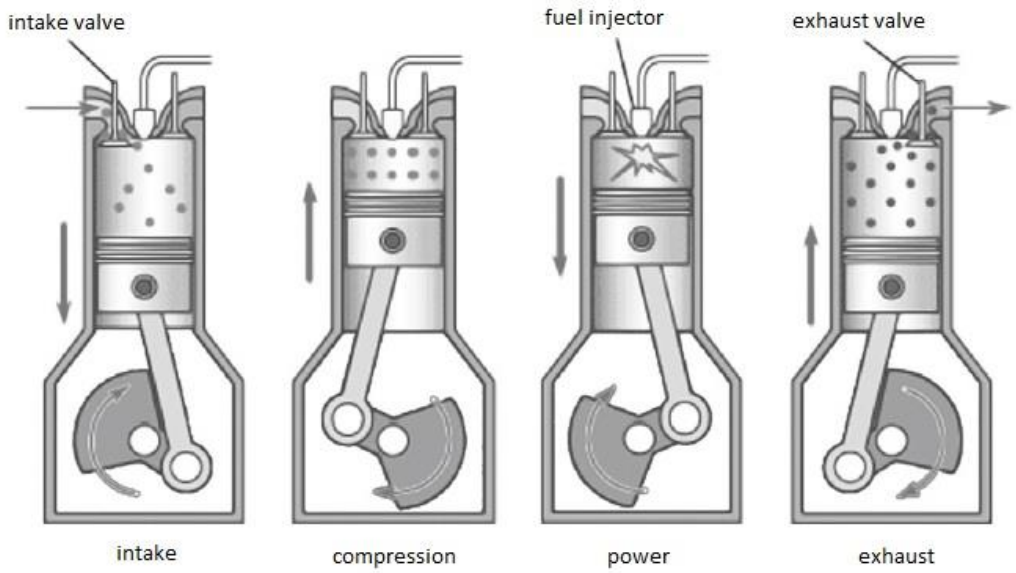
Pada akhir langkah kompresi, bahan bakar disemprotkan ke dalam ruang bakar melalui injektor dalam bentuk kabut halus. Bahan bakar yang masuk ke dalam udara panas bertekanan tinggi akan mengalami penyalaan secara spontan dan pembakaran pun terjadi. Dalam siklus diesel ideal, proses pembakaran diasumsikan berlangsung pada tekanan konstan, di mana penambahan panas akibat pembakaran diimbangi oleh pergerakan piston yang mulai bergerak turun. Asumsi tekanan konstan inilah yang membedakan siklus Diesel dari siklus Otto, yang mengasumsikan pembakaran berlangsung pada volume konstan [6].

Langkah usaha atau *power stroke* merupakan tahap di mana energi panas hasil pembakaran diubah menjadi energi mekanik. Tekanan gas hasil pembakaran mendorong piston ke bawah, menghasilkan kerja yang diteruskan melalui batang penghubung ke poros engkol. Energi mekanik ini selanjutnya digunakan untuk memutar generator sehingga menghasilkan energi listrik. Besarnya kerja yang dihasilkan pada langkah ini sangat dipengaruhi oleh kualitas pembakaran, tekanan pembakaran, dan kondisi operasi mesin.

Langkah terakhir adalah langkah buang, di mana piston kembali bergerak ke titik mati atas dengan katup buang terbuka. Gas sisa hasil pembakaran dikeluarkan dari dalam silinder untuk memberi ruang bagi udara segar pada siklus berikutnya. Proses pembuangan gas ini penting untuk menjaga kualitas pembakaran pada siklus selanjutnya, karena sisa gas pembakaran dapat menurunkan efisiensi dan meningkatkan emisi jika tidak dikeluarkan secara efektif.

Meskipun siklus diesel ideal memberikan gambaran teoritis yang sederhana, dalam kondisi nyata terdapat berbagai penyimpangan akibat kerugian gesekan, perpindahan panas, dan keterbatasan proses pembakaran. Namun demikian, pemahaman terhadap siklus kerja mesin diesel ideal tetap menjadi landasan penting dalam menganalisis kinerja mesin diesel,

termasuk hubungan antara beban, konsumsi bahan bakar, dan efisiensi energi yang dibahas pada penelitian ini.



Gambar 2.8 Siklus Motor Diesel 4 langkah

(Sumber : mechanicalengineering03.wordpress.com)

1. Langkah Hisap : Katup isap terbuka, udara masuk ke silinder akibat gerakan piston dari TMA ke TMB.
2. Langkah Kompresi : Kedua katup menutup, udara dikompresi hingga temperatur > 500°C; injektor menyemprot bahan bakar sesaat sebelum mencapai TMA.
3. Langkah Ekspansi/Usaha : Pembakaran terjadi spontan, gas panas mengembang dan menghasilkan kerja dengan menekan piston ke TMB.
4. Langkah Buang : Katup buang terbuka, gas sisa pembakaran keluar ketika piston kembali menuju TMA.

   Siklus kemudian berulang kembali secara kontinu.

Secara teoritis, efisiensi termal siklus Diesel dapat dirumuskan [6] sebagai berikut:

$$\eta_{th} = 1 - \left(\frac{1}{r^{\gamma-1}}\right) \times \left(\frac{\rho^{\gamma}-1}{\gamma(\rho-1)}\right) \quad (1)$$

Keterangan:

η_{th} = efisiensi termal siklus Diesel

r = rasio kompresi

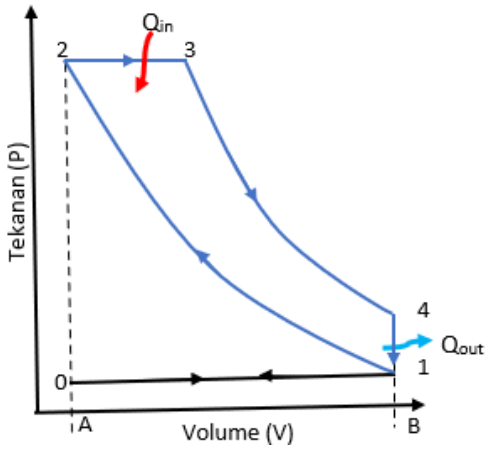
ρ = cut-off ratio (rasio volume setelah pembakaran terhadap sebelum pembakaran)

γ = rasio panas spesifik (Cp/Cv)

Dari persamaan tersebut dapat dilihat bahwa efisiensi dapat meningkat dengan menaikkan rasio kompresi dan mengendalikan nilai *cut-off ratio* agar tidak terlalu besar. Pada aplikasi PLTD, pengaturan ini diwujudkan melalui manajemen pembebanan dan kontrol suplai bahan bakar.

Siklus ini umumnya direpresentasikan dalam diagram p–V (*pressure–volume*) yang menggambarkan hubungan antara tekanan dan volume selama satu putaran siklus termodinamika. Representasi grafik ini membantu dalam mengidentifikasi potensi area losses dan peluang peningkatan efisiensi.

Gambar skematik diagram p–V siklus diesel ditampilkan pada gambar 2.2 sebagai bahan penjelas proses termodinamika.



Gambar 2.9 Siklus Diesel Diagram p-V

(Sumber : roboguru.ruangguru.com)

Penjelasan Tahapan Siklus Diesel Teoretis

Tabel 2.1 Siklus Diesel Teoretis

Tahap	Proses	Jenis Proses	Fenomena Fisik
0–1	Langkah hisap	Isobarik	Udara segar masuk dengan katup isap terbuka
1–2	Kompresi	Isentropik (adiabatik reversibel)	Udara dikompresi → tekanan & temperatur naik drastis
2–3	Pembakaran	Isobarik	Bahan bakar disemprotkan → terjadi auto-ignition
3–4	Ekspansi / langkah usaha	Isentropik	Tekanan mendorong piston menghasilkan kerja
4–1	Pembuangan kalor sisa	Isokhorik	Volume konstan, kalor dilepas ke lingkungan
1–0	Langkah buang	Isobarik	Gas buang keluar, mempersiapkan siklus berikutnya

Selain efisiensi termal siklus Diesel, analisis performa mesin diesel juga dapat menggunakan keseimbangan energi termodinamika yang melibatkan energi kimia bahan bakar dan konversinya menjadi energi mekanik. Persamaan umum neraca energi pada motor bakar torak dinyatakan sebagai:

$$Q_{in} = W_{net} + Q_{loss} \tag{2}$$

Keterangan:

Q_{in} = energi panas bahan bakar yang masuk (kJ)

W_{net} = kerja bersih yang dihasilkan piston (kJ)

Q_{loss} = kerugian panas menuju lingkungan atau sistem pendingin (kJ)

Nilai kerja bersih berkaitan dengan tekanan efektif yang dihasilkan selama pembakaran. Oleh karena itu, parameter indikasi performa mesin diesel secara termodinamika dapat dinyatakan menggunakan *Indicated Mean Effective Pressure* (IMEP), dengan persamaan:

$$\text{IMEP} = \frac{W_{ind}}{V_d} \tag{3}$$

Keterangan:
IMEP = tekanan efektif rata-rata indikasi (kPa)
W_{ind} = kerja indikasi dalam satu siklus (kJ)
V_d = volume langkah atau displacement (m^3)

Semakin tinggi IMEP, semakin besar energi mekanik yang dihasilkan untuk setiap volume langkah piston [9]. Pendekatan ini sering digunakan untuk mengoptimalkan pembakaran melalui pengaturan suplai bahan bakar dan pembebanan mesin diesel pada sistem isolated seperti di PLTD Lemukutan.

2.1.3 Karakteristik Operasi Mesin Diesel

Performa mesin diesel pada sistem isolated sangat dipengaruhi oleh variasi beban yang diterima oleh mesin selama operasi [3], [5]. Tidak seperti sistem interkoneksi yang memiliki kemampuan penyeimbang beban antar pembangkit, sistem isolated mengharuskan mesin diesel merespons secara langsung setiap perubahan beban listrik dari konsumen. Kondisi ini menyebabkan mesin sering beroperasi pada rentang beban yang berubah-ubah, sehingga karakteristik operasi mesin menjadi faktor penting dalam menentukan efisiensi dan konsumsi bahan bakar.

Pada kondisi beban rendah, mesin diesel cenderung bekerja jauh dari titik operasi optimalnya. Proses pembakaran pada kondisi ini berlangsung kurang sempurna akibat suplai bahan bakar yang relatif kecil dibandingkan udara masuk, serta rendahnya temperatur dan tekanan di dalam ruang bakar. Akibatnya, sebagian energi bahan bakar tidak dapat dikonversi menjadi energi mekanik secara efektif dan lebih banyak terbuang dalam bentuk panas dan

kerugian mekanis. Kondisi ini menyebabkan nilai *Specific Fuel Consumption* (SFC) meningkat, sebagaimana dijelaskan dalam penelitian sebelumnya [3], [5].

Sebaliknya, pada beban menengah hingga mendekati daya nominal, mesin diesel menunjukkan kinerja yang lebih stabil. Tekanan efektif rata-rata meningkat, proses pembakaran berlangsung lebih homogen, dan rasio energi yang dikonversi menjadi daya keluaran menjadi lebih besar. Oleh karena itu, mesin diesel umumnya dirancang untuk beroperasi paling efisien pada rentang beban tertentu, bukan pada kondisi beban sangat rendah maupun beban yang terlalu mendekati batas maksimum.

Di PLTD Lemukutan, sistem pembangkit terdiri dari tiga unit mesin diesel yang dioperasikan sesuai dengan pola kebutuhan beban harian masyarakat. Pada jam beban puncak, yaitu sekitar pukul 17.00–24.00, dua unit mesin diesel dioperasikan secara paralel untuk menjaga keandalan pasokan listrik dan mencegah kelebihan beban pada satu unit mesin. Sementara itu, pada jam beban rendah, yaitu sekitar pukul 24.00–06.00, hanya satu unit mesin diesel yang dioperasikan untuk melayani kebutuhan daya yang lebih kecil.

Perbedaan pola pembebanan ini menyebabkan masing-masing mesin bekerja pada kondisi operasi yang berbeda, baik dari sisi besarnya beban maupun efisiensi pembakaran. Pada mode dua unit, beban terbagi ke masing-masing mesin sehingga setiap unit bekerja pada beban parsial yang relatif rendah. Kondisi ini berpotensi meningkatkan konsumsi bahan bakar per satuan energi listrik yang dihasilkan. Sebaliknya, pada mode satu unit, beban terpusat pada satu mesin sehingga mesin bekerja pada beban yang lebih tinggi dan mendekati kondisi optimalnya.

Dengan demikian, karakteristik operasi mesin diesel pada sistem isolated tidak hanya ditentukan oleh spesifikasi teknis mesin, tetapi juga oleh strategi pengoperasian dan pembagian beban yang diterapkan. Pemahaman terhadap karakteristik ini menjadi dasar penting dalam analisis konsumsi bahan bakar, nilai SFC, serta efisiensi energi mesin diesel pada PLTD Lemukutan, sebagaimana dibahas pada bab-bab selanjutnya.

2.1.4 Konsumsi Bahan Bakar dan Efisiensi Energi

Konsumsi bahan bakar merupakan parameter utama dalam analisis ekonomi dan kinerja pembangkit listrik tenaga diesel, khususnya pada sistem isolated yang sangat bergantung pada mesin diesel sebagai sumber daya utama [5]. Besarnya konsumsi bahan bakar secara langsung menentukan biaya operasional pembangkit, sehingga efisiensi penggunaan bahan bakar menjadi aspek yang sangat penting dalam pengelolaan pembangkit diesel skala kecil maupun menengah. Pada sistem isolated, peningkatan konsumsi bahan bakar tidak dapat dikompensasi oleh sumber daya lain, sehingga setiap ketidakefisienan akan berdampak langsung pada biaya produksi energi listrik.

Dalam penelitian ini, data konsumsi bahan bakar diperoleh dari logsheet operasi harian PLTD Lemukutan yang mencatat volume bahan bakar B40 yang digunakan selama periode waktu tertentu. Data logsheet dipilih karena mencerminkan kondisi operasi aktual di lapangan, termasuk variasi beban dan pola operasi harian mesin diesel. Volume bahan bakar yang tercatat kemudian dikonversi menjadi laju aliran massa bahan bakar untuk memudahkan analisis kuantitatif terhadap kinerja mesin.

Laju aliran massa bahan bakar ($\dot{m}_f$) dihitung menggunakan Persamaan (4), yang menghubungkan volume bahan bakar yang digunakan, densitas bahan bakar, dan durasi waktu operasi. Pendekatan ini umum digunakan dalam analisis performa mesin diesel karena memberikan representasi yang lebih akurat terhadap jumlah bahan bakar yang benar-benar dibakar selama operasi dibandingkan hanya menggunakan data volume [5].

Sebagai indikator efisiensi penggunaan bahan bakar, *Specific Fuel Consumption* (SFC) digunakan untuk menunjukkan besarnya konsumsi bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu satuan energi listrik. Nilai SFC dihitung menggunakan Persamaan (5), yang membandingkan laju aliran massa bahan bakar terhadap daya keluaran generator. Semakin rendah nilai SFC, semakin efisien mesin diesel dalam mengonversi energi bahan bakar menjadi energi listrik. Sebaliknya, nilai SFC yang tinggi mengindikasikan adanya

kerugian energi yang besar, baik akibat pembakaran yang tidak sempurna maupun kerugian mekanis dan termal pada mesin.

Selain SFC, efisiensi energi mesin diesel merupakan parameter penting untuk mengevaluasi kinerja termal mesin secara keseluruhan. Efisiensi energi dinyatakan sebagai perbandingan antara daya keluaran generator dengan energi kimia bahan bakar yang dilepaskan selama proses pembakaran, sebagaimana dirumuskan dalam Persamaan (6) [6]. Parameter ini menggambarkan sejauh mana energi bahan bakar dapat dimanfaatkan secara efektif untuk menghasilkan daya listrik.

Nilai efisiensi energi yang rendah menunjukkan bahwa sebagian besar energi bahan bakar hilang dalam bentuk panas buang, gesekan mekanis, dan kerugian lainnya. Kondisi ini tidak hanya menurunkan kinerja mesin, tetapi juga meningkatkan konsumsi bahan bakar dan biaya operasional pembangkit. Oleh karena itu, analisis efisiensi energi menjadi penting untuk mengidentifikasi kondisi operasi yang paling ekonomis bagi mesin diesel.

Dengan mengombinasikan analisis laju aliran massa bahan bakar, nilai SFC, dan efisiensi energi, penelitian ini mampu memberikan gambaran yang komprehensif mengenai kinerja mesin diesel pada PLTD Lemukutan. Hasil analisis tersebut menjadi dasar dalam mengevaluasi strategi pembebanan mesin diesel yang optimal, sehingga konsumsi bahan bakar dapat ditekan tanpa mengorbankan keandalan pasokan listrik pada sistem isolated.

2.1.5 *Specific Fuel Consumption (SFC)*

Specific Fuel Consumption (SFC) merupakan salah satu indikator utama dalam menilai efisiensi penggunaan bahan bakar pada pembangkit listrik tenaga diesel. Parameter ini menyatakan besarnya konsumsi bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu satuan energi listrik dalam periode waktu tertentu, sehingga menjadi dasar penting dalam analisis kinerja dan biaya operasi pembangkit diesel [6]. Pada sistem isolated, peranan SFC menjadi semakin krusial karena seluruh pasokan energi listrik sepenuhnya bergantung pada ketersediaan dan pemanfaatan bahan bakar.

Nilai SFC memberikan gambaran langsung mengenai seberapa efektif mesin diesel dalam mengonversi energi kimia bahan bakar menjadi energi listrik. Semakin kecil nilai SFC, semakin efisien mesin dalam memanfaatkan bahan bakar, dan semakin rendah pula biaya operasional yang harus ditanggung oleh pengelola pembangkit. Sebaliknya, nilai SFC yang tinggi mengindikasikan adanya kerugian energi yang besar, baik akibat pembakaran yang tidak sempurna, kerugian mekanis, maupun kerugian termal selama proses konversi energi.

Hubungan antara daya keluaran mesin dan konsumsi bahan bakar bersifat tidak linear. Pada kondisi beban rendah, mesin diesel cenderung memiliki nilai SFC yang tinggi. Hal ini disebabkan oleh dominasi kerugian gesekan dan rendahnya tekanan serta temperatur di dalam ruang bakar, yang menyebabkan proses pembakaran berlangsung kurang sempurna. Pada kondisi ini, sebagian besar energi bahan bakar tidak berkontribusi secara efektif terhadap daya keluaran, sehingga konsumsi bahan bakar per kWh menjadi lebih besar.

Seiring dengan meningkatnya beban, nilai SFC akan menurun karena mesin mulai beroperasi pada kondisi yang lebih mendekati titik optimalnya. Pada rentang beban menengah hingga mendekati kapasitas nominal, proses pembakaran berlangsung lebih stabil dan efisien, sehingga proporsi energi bahan bakar yang dikonversi menjadi energi listrik meningkat. Pada kondisi inilah nilai SFC umumnya mencapai titik minimum, yang menandakan kondisi operasi paling ekonomis bagi mesin diesel.

Karakteristik hubungan antara SFC dan daya keluaran mesin dapat dimodelkan secara matematis menggunakan pendekatan empiris, sebagaimana ditunjukkan dalam Persamaan (7). Model kuadratik ini digunakan untuk menggambarkan kecenderungan penurunan SFC pada peningkatan beban hingga mencapai nilai minimum, kemudian kembali meningkat apabila mesin dioperasikan mendekati atau melampaui batas optimalnya.

Pendekatan matematis tersebut memungkinkan penentuan titik operasi mesin dengan nilai SFC minimum, yang sangat berguna dalam perencanaan dan pengaturan strategi pembebanan mesin diesel. Dengan mengetahui karakteristik SFC terhadap daya keluaran,

operator pembangkit dapat mengatur jumlah unit mesin yang beroperasi serta besarnya beban pada setiap unit agar mesin bekerja pada kondisi yang paling efisien.

Dalam konteks PLTD Lemukutan sebagai sistem isolated, pemahaman terhadap karakteristik SFC menjadi dasar penting dalam upaya menekan konsumsi bahan bakar dan biaya operasional tanpa mengurangi keandalan pasokan listrik. Oleh karena itu, analisis SFC tidak hanya berfungsi sebagai indikator teknis kinerja mesin, tetapi juga sebagai alat bantu pengambilan keputusan dalam pengelolaan operasi pembangkit diesel secara keseluruhan.

2.1.6 Sistem Isolated PLTD

Sistem *isolated* merupakan konfigurasi pembangkitan tenaga listrik yang beroperasi secara mandiri tanpa terhubung ke jaringan transmisi utama atau *grid* nasional [1], [9]. Sistem ini umumnya diterapkan pada wilayah kepulauan, daerah terpencil, atau lokasi dengan keterbatasan infrastruktur kelistrikan, di mana pembangunan jaringan interkoneksi tidak memungkinkan secara teknis maupun ekonomis. Pada sistem *isolated*, pembangkit listrik berfungsi sebagai satu-satunya sumber energi, sehingga keandalan dan kualitas daya sepenuhnya ditentukan oleh kinerja pembangkit tersebut.

Dalam sistem *isolated*, kestabilan frekuensi dan tegangan jaringan lokal sangat bergantung pada stabilitas operasi pembangkit serta pola konsumsi beban masyarakat [10]. Tidak adanya sistem penyeimbang eksternal menyebabkan pembangkit harus secara langsung menyesuaikan keluaran dayanya terhadap setiap perubahan beban. Oleh karena itu, dinamika antara pembangkit dan beban menjadi sangat sensitif, khususnya pada pembangkit berbasis mesin diesel yang memiliki karakteristik respon mekanis dan termal tertentu.

Berbeda dengan sistem interkoneksi, di mana fluktuasi beban dapat diserap oleh beberapa pembangkit dalam jaringan, sistem *isolated* tidak memiliki cadangan daya eksternal yang dapat digunakan sebagai penyangga. Setiap perubahan beban pelanggan secara langsung memengaruhi torsi resistif pada generator, kecepatan putar mesin diesel, serta kondisi pembakaran di dalam silinder [11], [12]. Perubahan-perubahan ini, apabila tidak

dikendalikan dengan baik, dapat menyebabkan deviasi frekuensi dan tegangan yang berpotensi menurunkan kualitas pasokan listrik.

Oleh karena itu, pengaturan distribusi daya antar unit mesin dalam sistem *isolated* menjadi sangat krusial. Strategi pengoperasian yang tidak tepat dapat menyebabkan mesin bekerja pada beban parsial yang terlalu rendah atau mendekati batas maksimum, yang keduanya berdampak negatif terhadap efisiensi dan umur pakai mesin. Selain itu, operasi pada kondisi yang tidak stabil juga dapat meningkatkan konsumsi bahan bakar dan memperbesar kerugian energi akibat pembakaran yang tidak optimal.

PLTD Lemukutan merupakan contoh sistem *isolated* murni yang beroperasi tanpa dukungan jaringan interkoneksi. Sistem ini terdiri dari tiga unit mesin diesel dengan total kapasitas daya mampu sebesar 300 kW, yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik sekitar 472 pelanggan dengan beban puncak mencapai ±160 kW. Pola operasi pembangkit disesuaikan dengan karakteristik beban harian masyarakat, di mana pada saat beban puncak, yaitu sekitar pukul 16.00–23.00, dua unit mesin diesel dioperasikan secara paralel untuk menjaga kestabilan tegangan dan frekuensi pada nilai nominal 50 Hz.

Sebaliknya, pada jam beban rendah, yaitu sekitar pukul 00.00–06.00, hanya satu unit mesin diesel yang dioperasikan. Strategi ini diterapkan untuk menekan konsumsi bahan bakar dan meningkatkan efisiensi operasional, mengingat pengoperasian lebih dari satu unit pada beban rendah cenderung meningkatkan nilai Specific Fuel Consumption. Pola operasi tersebut mencerminkan upaya kompromi antara kebutuhan menjaga keandalan sistem dan tuntutan efisiensi bahan bakar.

Secara teoritis, sistem *isolated* dapat diklasifikasikan ke dalam dua pola pengendalian daya, yaitu *load-following system* dan *fixed load system* [9]. Pada *load-following system*, pembangkit secara otomatis menyesuaikan keluaran daya terhadap perubahan beban, sehingga fluktuasi konsumsi listrik pelanggan langsung direspons oleh sistem pengaturan mesin. Sementara itu, pada *fixed load system*, pembebanan diatur secara manual atau

berdasarkan jadwal tertentu, dengan fleksibilitas yang relatif terbatas terhadap perubahan beban.

PLTD Lemukutan termasuk dalam kategori *load-following system*, di mana variasi beban sepenuhnya dipengaruhi oleh aktivitas pelanggan. Ketiadaan sistem penyimpanan energi, seperti *battery storage*, menyebabkan seluruh fluktuasi beban harus ditanggung langsung oleh mesin diesel. Kondisi ini menjadikan fluktuasi beban sebagai determinan utama dalam variasi efisiensi termal mesin. Semakin besar fluktuasi beban, semakin dinamis pula respon mesin terhadap perubahan suplai bahan bakar dan udara, yang pada akhirnya berpotensi meningkatkan kerugian energi akibat ketidakseimbangan proses pembakaran.

Dengan karakteristik tersebut, sistem *isolated* PLTD Lemukutan menjadi objek yang relevan untuk dianalisis dalam kaitannya dengan konsumsi bahan bakar, nilai SFC, dan efisiensi energi mesin diesel. Pemahaman yang komprehensif terhadap sistem *isolated* ini diperlukan sebagai landasan teoritis dalam mengevaluasi kinerja pembangkit dan merumuskan strategi pengoperasian yang lebih efisien dan andal.

Gambar 2.10 PLTD Lemukutan

(Sumber : Dokumentasi pribadi)

2.1.7 Kehilangan Energi dalam Mesin Diesel

Kehilangan energi dalam mesin diesel merupakan fenomena yang tidak dapat dihindari karena tidak seluruh energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar dapat dikonversi menjadi energi mekanik yang berguna [6], [8]. Proses konversi energi pada mesin diesel melibatkan tahapan pembakaran, ekspansi gas, serta transmisi daya melalui komponen mekanis, yang masing-masing mengandung potensi terjadinya kerugian energi. Oleh karena itu, pemahaman terhadap sumber-sumber kehilangan energi menjadi penting dalam analisis kinerja dan efisiensi mesin diesel.

Salah satu bentuk utama kehilangan energi adalah kerugian gesekan mekanis (*friction losses*) yang terjadi pada komponen bergerak mesin, seperti piston, ring piston, poros engkol, bantalan, dan mekanisme katup. Gesekan ini menyebabkan sebagian energi mekanik hasil pembakaran terdisipasi dalam bentuk panas. Besarnya kerugian gesekan relatif konstan terhadap perubahan beban, sehingga pada kondisi beban rendah, proporsi energi yang hilang akibat gesekan menjadi lebih besar dibandingkan energi yang diubah menjadi daya keluaran. Kondisi ini berkontribusi terhadap rendahnya efisiensi energi dan tingginya nilai *Specific Fuel Consumption* pada beban rendah.

Selain kerugian gesekan, kerugian panas (*heat losses*) juga merupakan komponen signifikan dalam neraca energi mesin diesel. Sebagian besar panas hasil pembakaran dialirkan ke sistem pendingin mesin dan terbuang ke lingkungan melalui radiator, serta keluar bersama gas buang. Kerugian panas ini diperlukan untuk menjaga temperatur kerja mesin agar tetap berada pada batas aman, namun di sisi lain mengurangi porsi energi yang dapat dimanfaatkan sebagai kerja mekanik. Besarnya kerugian panas sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi mesin, seperti beban, kecepatan putar, dan temperatur pembakaran [6], [8].

Kerugian energi juga dapat terjadi akibat pembakaran yang tidak sempurna (*incomplete combustion*), terutama pada kondisi beban rendah. Pada kondisi ini, temperatur dan tekanan di dalam ruang bakar belum cukup optimal untuk memastikan pembakaran bahan bakar berlangsung secara menyeluruh. Akibatnya, sebagian bahan bakar tidak terbakar secara

sempurna dan energi kimianya tidak berkontribusi terhadap pembentukan daya. Fenomena ini semakin signifikan pada sistem *isolated* yang sering mengalami fluktuasi beban, seperti pada PLTD Lemukutan.

Secara matematis, hubungan antara energi yang masuk dan energi yang dihasilkan dalam mesin diesel dapat dinyatakan melalui neraca energi sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (8). Persamaan ini menggambarkan bahwa energi panas dari bahan bakar yang masuk ke mesin akan terbagi menjadi kerja efektif pada poros, kerugian panas, serta kerugian akibat gesekan mekanis. Dengan demikian, efisiensi mesin sangat ditentukan oleh seberapa besar porsi energi yang dapat dimanfaatkan sebagai kerja efektif dibandingkan dengan energi yang hilang.

Kerugian panas yang terjadi pada mesin diesel dapat diperkirakan menggunakan Persamaan (9), yang mengaitkan massa fluida, panas jenis, dan perubahan temperatur. Pendekatan ini sering digunakan untuk menganalisis panas yang dilepaskan melalui sistem pendingin maupun gas buang. Meskipun tidak seluruh parameter pengukuran tersedia secara langsung di lapangan, estimasi kerugian panas tetap memberikan gambaran mengenai besarnya energi yang tidak termanfaatkan selama operasi mesin.

Analisis kehilangan energi ini diperlukan untuk memastikan bahwa mesin diesel beroperasi pada kondisi yang paling efisien. Dengan memahami sumber dan besarnya kerugian energi, operator pembangkit dapat mengoptimalkan strategi pengoperasian mesin, khususnya dalam pengaturan beban dan jumlah unit yang beroperasi. Pada PLTD Lemukutan, analisis ini menjadi dasar dalam upaya menekan konsumsi bahan bakar dan meningkatkan efisiensi energi, sehingga kinerja pembangkit dapat ditingkatkan tanpa mengorbankan keandalan pasokan listrik.

2.2 Penelitian Terkait

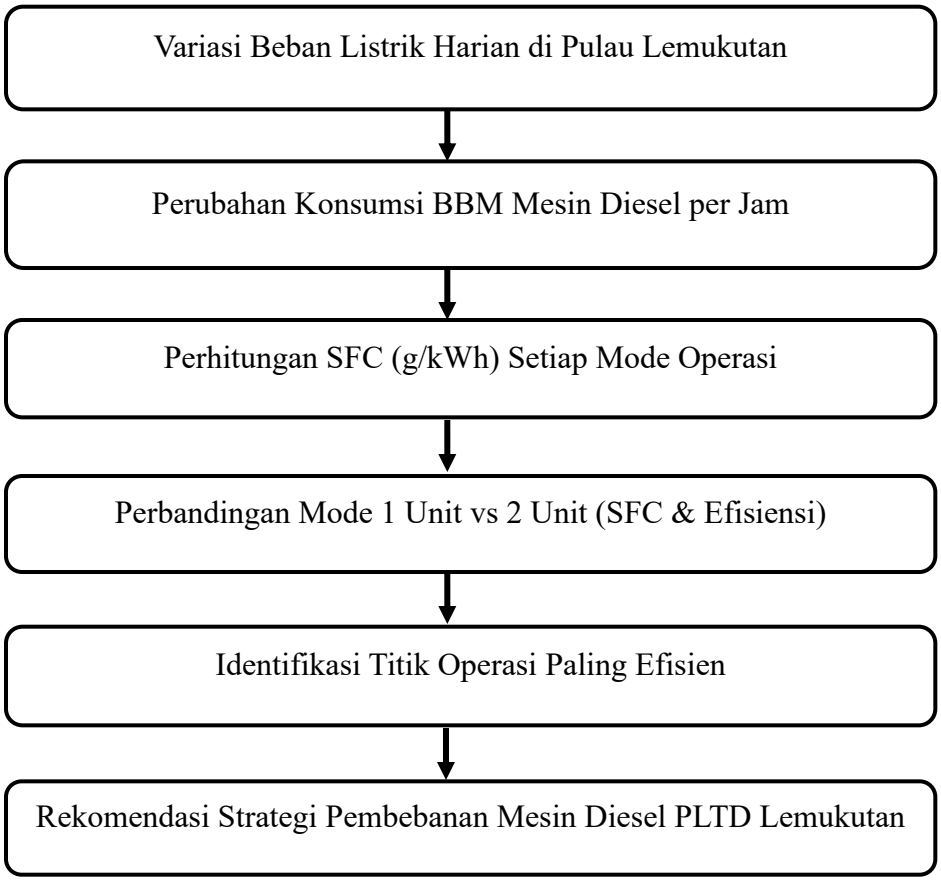
Penelitian terdahulu yang relevan ditampilkan pada Tabel 2.2 berikut:

Tabel 2.2 Penelitian terdahulu tentang efisiensi mesin diesel pada sistem isolated

Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
Elkasabgy, M. (2011) – "*Performance Analysis of a Diesel Engine under Variable Load Conditions*"	Variasi beban pada mesin diesel	Pengujian performa pada beberapa level beban	Efisiensi tertinggi pada beban 80%	Belum diterapkan pada PLTD isolated skala kecil
Nabi, H., Rahman, M., & Dowling, R. (2011) – *"Impact of Biodiesel Blends on Diesel Engine Performance"*	Pengaruh biodiesel pada performa mesin	Eksperimen penggunaan biodiesel	Konsumsi BBM meningkat pada beban rendah	Belum fokus analisis SFC dalam mode operasi berbeda
Ali, A., Idris, T., & Arifin, M. (2019) – *"Load Variation Analysis in an Isolated Diesel Power System"*	Operasi PLTD dengan beban fluktuatif	Studi kasus sistem isolated	SFC meningkat signifikan pada beban rendah	Belum analisis strategi pembebanan efisien
Noronha, P., Lima, S., & Costa, R.	Efisiensi rendah pada	Observasi lapangan dan	Nilai efisiensi sangat	Tidak ada kajian optimasi mode operasi

Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
(2020) – *"Efficiency Study of Diesel Generators in Remote Amazon Areas"*	jam beban minimal	analisis efisiensi	dipengaruhi pola beban	
Wibisono, W., Putra, S., & Ramadhan, D. (2023) – *"Load Distribution Optimization in Small Diesel Power Plants"*	Optimasi pembagian beban	Simulasi redistribusi beban	Efisiensi naik 8–12% setelah redistribusi	Belum mempertimbangkan karakteristik BBM B40

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2.11 Kerangka Pemikiran Penelitian

Keterangan Pemaknaan Alur :

1. Arah alir dari input kondisi nyata → indikator teknis → strategi optimasi
2. Fokus utama: minimasi SFC sebagai indikator efisiensi
3. Cakupan penelitian hanya pada parameter yang tersedia di PLTD Lemukutan:
    1. Beban
    2. Konsumsi BBM
    3. Daya keluaran
    4. Tidak ada EGT dan *intake pressure*