

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Mesin Diesel sebagai Pembangkit Listrik

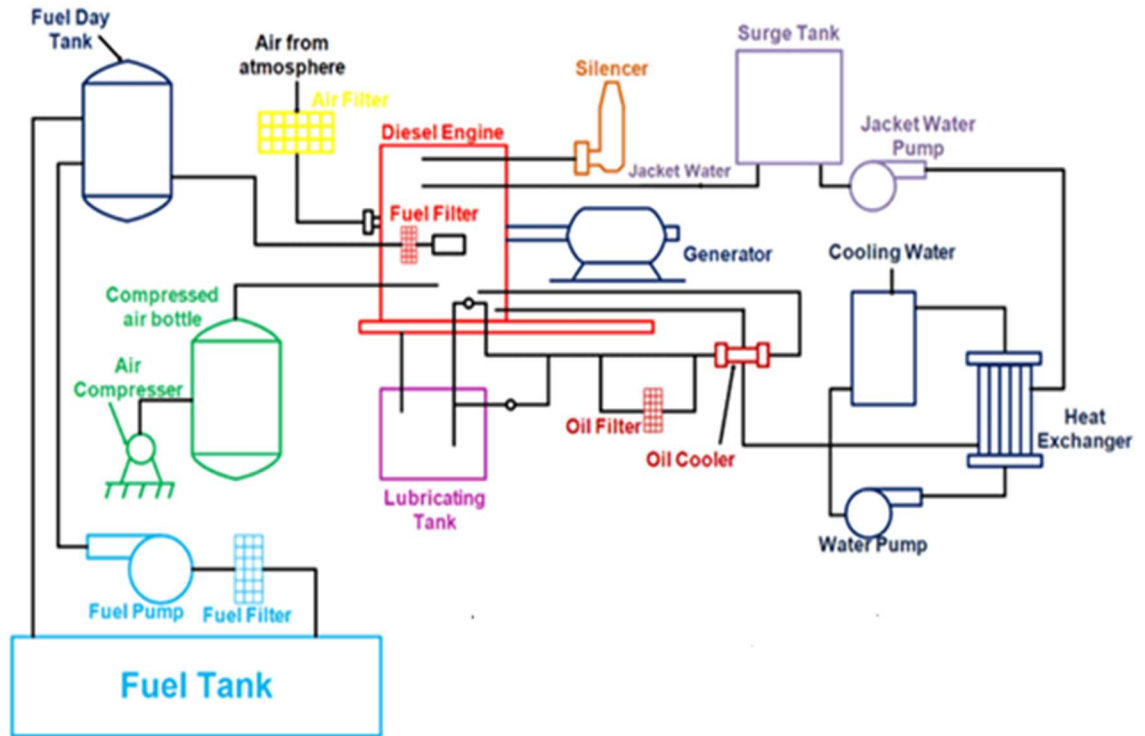
A. Pengertian Umum Mesin Diesel

Mesin diesel merupakan mesin pembakaran dalam (*internal combustion engine*) yang menggunakan udara bertekanan tinggi untuk memantik pembakaran bahan bakar. Proses pembakaran terjadi di dalam ruang bakar (*combustion chamber*) akibat kompresi udara yang sangat tinggi, yang menaikkan suhu hingga melebihi titik nyala bahan bakar solar.

Bahan bakar kemudian diinjeksikan ke ruang bakar pada akhir langkah kompresi melalui *nozzle injector*, menghasilkan penyemprotan halus (*atomisasi*) yang bercampur dengan udara panas sehingga terjadi pembakaran spontan. Energi panas hasil pembakaran tersebut dikonversi menjadi energi mekanik untuk menggerakkan *piston*, *crankshaft*, dan akhirnya generator listrik.



Gambar 2.1 Mesin Diesel sebagai Pembangkit Listrik (PLTD)



Gambar 2.2 Flow Diagram Mesin Diesel sebagai Pembangkit Listrik (PLTD)

B. Prinsip Kerja Mesin Diesel Empat Langkah

Mesin diesel pada umumnya bekerja dengan siklus empat langkah (*four-stroke cycle*) yang terdiri atas:

1. Langkah Hisap (*Intake Stroke*)

Piston bergerak dari TMA (Titik Mati Atas) ke TMB (Titik Mati Bawah), katup hisap terbuka, dan udara segar masuk ke dalam silinder.

2. Langkah Kompresi (*Compression Stroke*)

Piston bergerak ke atas, menekan udara hingga mencapai tekanan dan temperatur tinggi (sekitar 30–45 bar dan 500–700°C).

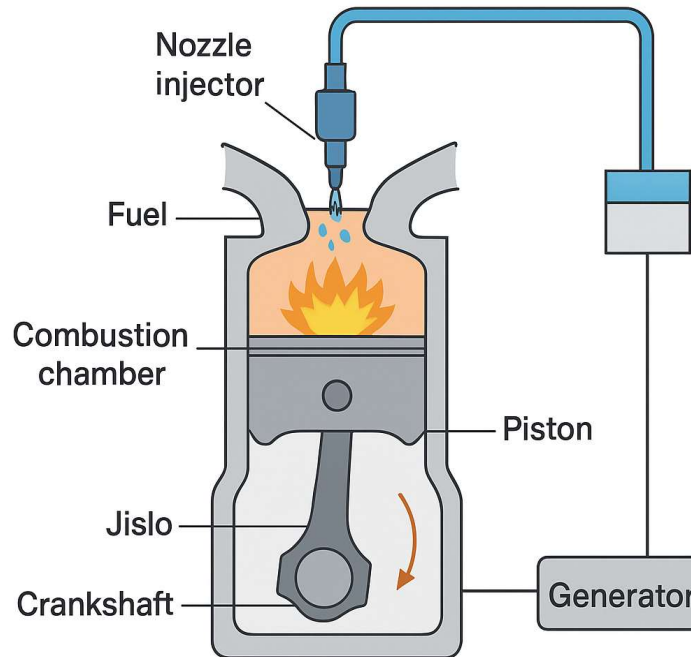
3. Langkah Usaha (*Power Stroke*)

Tepat sebelum piston mencapai TMA, bahan bakar disemprotkan melalui *nozzle injector*. Campuran udara dan bahan bakar terbakar spontan, menimbulkan tekanan tinggi yang mendorong piston ke bawah dan menghasilkan tenaga mekanik.

4. Langkah Buang (*Exhaust Stroke*)

Piston kembali naik ke atas, mendorong gas sisa pembakaran keluar melalui katup buang.

Proses ini terjadi berulang pada setiap silinder secara bergantian sehingga menghasilkan gerakan rotasi poros engkol (*crankshaft*) yang konstan.



Gambar 2.3 Skema Mesin Diesel Bekerja Siklus 4 langkah (four-stroke cycle)

C. Mesin Diesel sebagai Prime Mover pada PLTD

Dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), mesin diesel berfungsi sebagai penggerak utama (*prime mover*) yang mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi mekanik, lalu menggerakkan generator sinkron untuk menghasilkan energi listrik.

Keterkaitan energi dalam sistem PLTD adalah sebagai berikut:



Gambar 2.4 Skema Keterkaitan Energi dalam Sistem PLTD

Komponen utama sistem PLTD meliputi:

1. Mesin diesel (penggerak utama)

Mesin diesel berfungsi sebagai penggerak utama sistem pembangkit. Mesin ini mengubah energi kimia bahan bakar solar menjadi energi mekanik melalui proses pembakaran di ruang bakar (*combustion chamber*).

Proses utamanya meliputi:

- a. Langkah hisap (*intake*): udara bersih masuk ke silinder.
- b. Langkah kompresi: udara dikompresi hingga tekanan dan suhu tinggi.
- c. Langkah tenaga (*power stroke*): bahan bakar disemprotkan, terbakar spontan, dan menekan piston.
- d. Langkah buang (*exhaust*): gas hasil pembakaran dikeluarkan.

Energi mekanik hasil gerakan piston diteruskan ke poros engkol (*crankshaft*), yang menggerakkan generator listrik.

2. Generator listrik (pengubah energi mekanik menjadi listrik)

Generator berfungsi mengubah energi mekanik dari mesin diesel menjadi energi listrik melalui induksi elektromagnetik.

Komponen utamanya terdiri dari:

- a. *Rotor*: bagian berputar yang menghasilkan medan magnet.
- b. *Stator*: bagian diam yang memiliki kumparan tempat induksi arus listrik terjadi.
- c. *Exciter*: penghasil arus listrik kecil untuk membangkitkan medan magnet awal.

Output generator berbentuk arus bolak-balik (AC), biasanya 380 V atau 400 V untuk sistem tiga fasa.

3. Sistem pendingin (*water cooling/radiator*)

Sistem pendingin menjaga suhu kerja mesin agar stabil dan mencegah *overheating*.

Jenis pendinginan yang umum digunakan adalah pendinginan air (*water cooling*) melalui *radiator* atau *heat exchanger*.

Komponen utama:

- a. *Water pump*
- b. *Radiator*

c. *Thermostat*

d. *Cooling fan*

Air pendingin menyerap panas dari blok silinder dan kepala silinder, lalu dilepaskan melalui *radiator*.

4. Sistem pelumasan (*oil lubrication system*)

Berfungsi untuk mengurangi gesekan antar komponen yang bergerak, mendinginkan, dan membersihkan bagian dalam mesin.

Komponen utama:

- a. *Oil sump* (bak oli) sebagai tempat penampungan oli.
- b. *Oil pump* untuk mensirkulasikan oli.
- c. *Oil filter* untuk menyaring kotoran dan logam halus.
- d. *Oil cooler* untuk menjaga suhu oli agar stabil.

Pelumasan yang buruk dapat menyebabkan keausan dini dan kegagalan mekanis.

5. Sistem bahan bakar (*fuel injection system*)

Sistem bahan bakar berfungsi untuk menyimpan, menyaring, dan menyalurkan bahan bakar solar ke ruang bakar dalam jumlah dan tekanan yang tepat.

Terdiri dari:

- a. Tangki harian (*daily tank*) dan tangki utama (*main tank*).
- b. Pompa bahan bakar (*feed pump & injection pump*).
- c. *Fuel filter* untuk penyaringan.
- d. *Injector nozzle* untuk menyemprotkan bahan bakar ke ruang bakar.

6. Sistem pembuangan gas (*exhaust system*).

Bertugas untuk membuang sisa hasil pembakaran gas buang ke atmosfer serta mengurangi kebisingan dan emisi.

Terdiri dari:

- a. *Exhaust manifold*
- b. *Turbocharger* (bila ada)
- c. *Muffler* atau *silencer*

Beberapa PLTD besar menggunakan *turbocharger* untuk meningkatkan efisiensi dengan memanfaatkan energi gas buang guna menambah tekanan udara masuk.

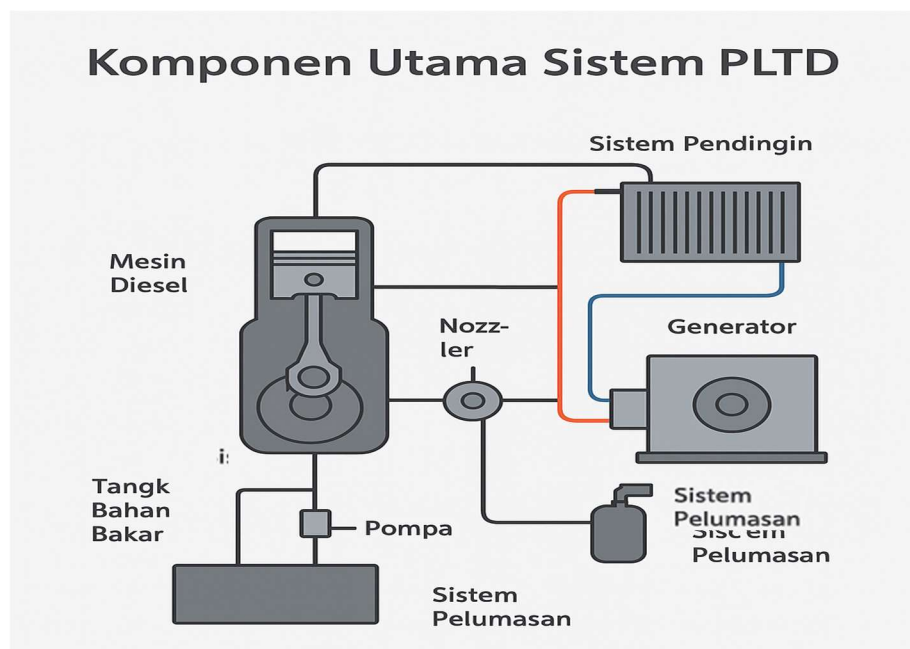
7. Sistem kontrol dan proteksi.

Sistem ini mengatur operasi, pemantauan, dan pengamanan PLTD agar bekerja dalam kondisi aman dan efisien.

Komponen umum:

- a. Panel kontrol utama (*Main Control Panel*)
- b. *Relay* dan sensor proteksi (tegangan, arus, suhu, tekanan, frekuensi)
- c. *Automatic Voltage Regulator (AVR)*
- d. *Governor* (pengatur kecepatan mesin)

Sistem ini mendeteksi gangguan seperti *over-speed*, *low oil pressure*, *high temperature*, atau *over-voltage* dan menghentikan operasi bila diperlukan.



Gambar 2.5 Skema Komponen Utama Sistem PLTD

D. Karakteristik dan Keunggulan Mesin Diesel sebagai Penggerak Pembangkit

Beberapa karakteristik yang membuat mesin diesel banyak digunakan pada pembangkit listrik, khususnya di wilayah terpencil, antara lain:

1. Efisiensi termal tinggi, karena rasio kompresi besar (14:1–20:1).
2. Torsi besar pada putaran rendah, cocok untuk penggerak generator.
3. Konstruksi kuat dan umur operasi panjang.
4. Kemudahan pengoperasian dan perawatan.
5. Dapat beroperasi dengan berbagai variasi beban.

Namun, kelemahan utama mesin diesel antara lain:

- a. Biaya bahan bakar yang relatif tinggi dibanding sumber energi terbarukan.
- b. Emisi gas buang (*NOx*, *CO₂*, *partikulat*) yang cukup signifikan.
- c. Kebisingan dan getaran tinggi.

E. Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Mesin Diesel PLTD

Kinerja mesin diesel diukur dari efisiensi termal, daya keluaran, dan konsumsi bahan bakar spesifik (*SFC*). Beberapa faktor penting yang mempengaruhi kinerja tersebut antara lain:

1. Tekanan Kompresi

Tekanan kompresi berpengaruh langsung terhadap efisiensi pembakaran. Kompresi yang menurun akibat keausan *piston ring* menyebabkan pembakaran tidak sempurna dan meningkatnya konsumsi bahan bakar.

2. Sistem Injeksi Bahan Bakar

Pengaturan waktu penyemprotan (*timing*) dan kualitas atomisasi sangat menentukan efisiensi pembakaran. *Nozzle* yang kotor atau aus mengakibatkan bahan bakar tidak tersebar merata di ruang bakar.

3. Kondisi Mekanis Komponen Bergerak

Keausan *bearing*, *connecting rod*, dan *piston ring* menimbulkan gesekan berlebih sehingga efisiensi mekanik menurun.

4. Kebersihan Sistem Udara dan Gas Buang

Filter udara yang kotor atau *turbocharger* yang tidak berfungsi optimal dapat menurunkan *efisiensi volumetrik*.

5. Kualitas dan Jenis Bahan Bakar

Parameter penting seperti nilai kalor, *viskositas*, dan kandungan *sulfur* mempengaruhi laju pembakaran dan pembentukan endapan karbon.

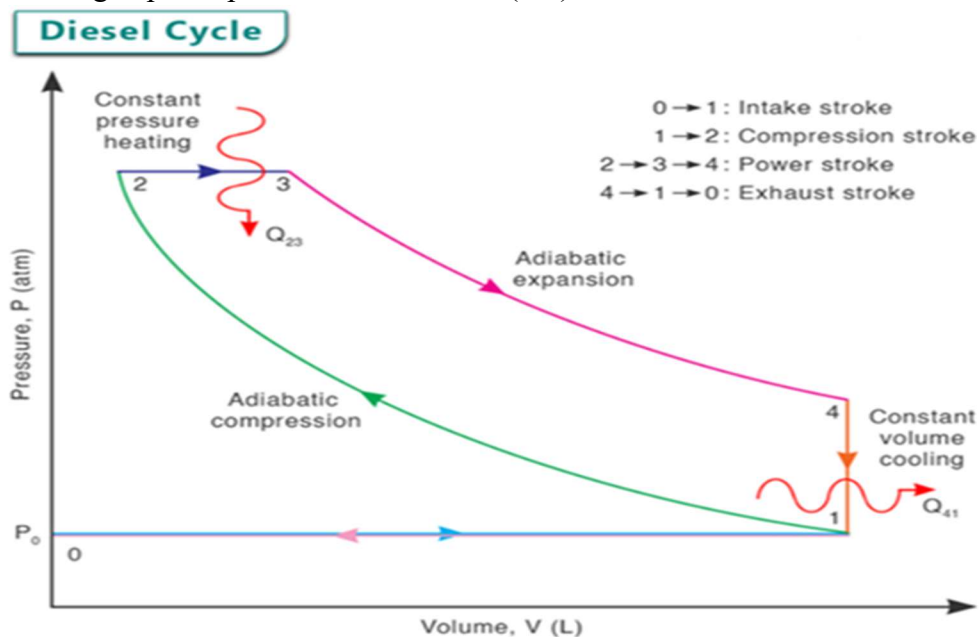
6. Sistem Pendinginan dan Pelumasan

Suhu operasi yang terlalu tinggi atau rendah akan mengganggu *viskositas* oli dan menurunkan efisiensi termal mesin.

F. Siklus Termodinamika Mesin Diesel (Siklus Ideal Diesel)

Secara teoritis, mesin diesel bekerja mengikuti Siklus Diesel Ideal, yang terdiri atas empat proses termodinamika:

1. Kompresi *adiabatic* (1-2)
2. Penambahan panas pada tekanan konstan (2-3)
3. Ekspansi *adiabatic* (3-4)
4. Pembuangan panas pada volume konstan (4-1)



Gambar 2.6 Diagram PV Siklus Termodinamika Mesin Diesel (Siklus Ideal Diesel)

G. Peranan Mesin Diesel Unit 4 DAF DKT 1160A di PLTD Lemukutan

Mesin Diesel Unit 4 DAF DKT 1160A merupakan jenis mesin 4 langkah, 6 silinder segaris, pendingin air, dan sistem injeksi langsung. Mesin ini digunakan sebagai salah satu

penggerak utama generator di PLTD Lemukutan karena memiliki karakteristik torsi besar dan efisiensi tinggi pada putaran rendah (sekitar 1500 rpm).

Spesifikasi umumnya:

- a. Daya Output: 140 kW
- b. *Governed Speed*: 1500 rpm
- c. Rasio kompresi: 15:1
- d. Jenis bahan bakar: Solar (*HSD/B40*)

Kinerja mesin ini sangat bergantung pada kondisi komponen mekanis dan sistem injeksi bahan bakarnya. Karena mesin bekerja terus-menerus dalam jangka waktu panjang, maka kegiatan Pemeliharaan *Major Overhaul* sangat penting untuk menjaga performa dan efisiensi agar nilai *SFC* tetap dalam batas standar pabrik.

2.1.2 *Specific Fuel Consumption (SFC)*

A. Pengertian *Specific Fuel Consumption (SFC)*

Specific Fuel Consumption (SFC) adalah parameter yang menunjukkan tingkat efisiensi mesin dalam mengubah bahan bakar menjadi energi. Nilainya dinyatakan sebagai jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu *kilowatt-jam* energi listrik, dengan satuan *gram/kWh*.

Rumus umum *SFC*:

$$SFC = \frac{\dot{m}_{fuel}}{P_{output}}$$

Dengan:

$\dot{m}_{fuel}$ = laju aliran massa bahan bakar (*kg/jam* atau *g/detik*)

P_{output} = daya keluaran mesin (*kW*)

$$SFC = \frac{\text{Konsumsi Bahan Bakar (gram/jam)}}{\text{Daya Keluaran (kW)}}$$

Atau dalam satuan energi listrik:

$$SFC = \frac{\text{Konsumsi Bahan Bakar (liter/jam)}}{\text{Daya Keluaran (kWh)}}$$

Semakin rendah nilai *SFC*, semakin efisien mesin dalam menggunakan bahan bakar. Nilai *SFC* ideal untuk mesin *diesel stasioner* umumnya berkisar antara 200–240 *g/kWh*, tergantung jenis mesin dan kondisi operasinya (Heywood, 1988; Stone, 1999).

B. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Nilai *Specific Fuel Consumption (SFC)*

Nilai *Specific Fuel Consumption (SFC)* sangat dipengaruhi oleh faktor mekanis, termodinamika, dan operasional, antara lain:

1. Tekanan Kompresi

Tekanan kompresi yang rendah akibat keausan *piston ring* menyebabkan udara tidak cukup panas untuk pembakaran sempurna, sehingga konsumsi bahan bakar meningkat.

2. Sistem Injeksi Bahan Bakar

Kesalahan *injection timing* atau penyemprotan yang tidak sempurna (atomisasi buruk) membuat sebagian bahan bakar tidak terbakar secara efisien.

3. Kondisi *Nozzle* dan Pompa Injeksi

Keausan pada *nozzle* atau kebocoran di sistem injeksi mengubah pola semprotan bahan bakar dan memperburuk pembakaran.

4. Beban Operasi Mesin

Mesin diesel bekerja paling efisien pada beban 75–90% dari kapasitas nominal. Pada beban rendah, efisiensi turun karena sebagian besar energi digunakan untuk mengatasi gesekan internal dan kehilangan panas.

5. Kualitas Bahan Bakar

Nilai kalor (*LHV*), *viskositas*, dan kemurnian bahan bakar berpengaruh langsung terhadap energi yang dihasilkan per satuan massa.

6. Kondisi Komponen Mekanis

Gesekan akibat keausan pada *bearing*, *crankshaft*, dan *piston ring* meningkatkan *losses* dan menurunkan efisiensi mekanis.

7. Temperatur dan Sistem Pendingin

Suhu kerja mesin yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dapat mengganggu pembakaran dan *viskositas* pelumas, sehingga mempengaruhi nilai *Specific Fuel Consumption (SFC)*.

8. Perawatan dan Penyetelan Mesin

Mesin yang rutin dirawat dan disetel sesuai standar pabrikan akan mempertahankan nilai *Specific Fuel Consumption (SFC)* mendekati spesifikasi desain.

2.1.3 Pemeliharaan Mesin Diesel

A. Konsep Dasar Pemeliharaan Mesin Diesel

Pemeliharaan mesin diesel merupakan serangkaian kegiatan teknis yang bertujuan untuk menjaga agar mesin tetap beroperasi pada kondisi optimal, mempertahankan keandalan, dan mencegah penurunan efisiensi kerja. Dalam konteks Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), sistem pemeliharaan memiliki peran vital karena mesin diesel berfungsi sebagai penggerak utama generator listrik. Kegagalan atau penurunan performa mesin secara langsung akan berdampak pada kontinuitas pasokan listrik dan biaya operasional pembangkit.

Tujuan utama dari kegiatan pemeliharaan mesin diesel antara lain:

1. Menjaga kinerja mesin tetap optimal dalam jangka panjang,
2. Mengurangi biaya operasional akibat konsumsi bahan bakar berlebih,
3. Memperpanjang umur pakai mesin dan komponen utama,
4. Menjamin kontinuitas pasokan listrik pada PLTD,
5. Meningkatkan efisiensi termal dan efektivitas sistem konversi energi.

Manfaat strategis pemeliharaan yang dilakukan secara terencana dapat dilihat dari penurunan nilai *SFC* dan peningkatan faktor kapasitas (*capacity factor*) mesin. Dengan kata lain, perawatan yang efektif bukan hanya menjaga mesin tetap hidup, tetapi juga memastikan bahwa setiap tetes bahan bakar yang digunakan menghasilkan energi listrik maksimal.

Menurut Mobley (2002) dan standar *Total Productive Maintenance (TPM)*, pemeliharaan mesin dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis utama, yaitu:

1. *Preventive Maintenance* (Pemeliharaan Pencegahan)

Preventive maintenance merupakan kegiatan pemeliharaan yang dilakukan secara terjadwal dan sistematis untuk mencegah terjadinya kerusakan atau penurunan kinerja

mesin. Tujuan utamanya adalah menghindari *downtime* tak terencana dengan cara melakukan penggantian dan pemeriksaan komponen sebelum mengalami kegagalan.

Kegiatan ini meliputi:

- a. Pemeriksaan kondisi oli pelumas dan pendingin,
- b. Pembersihan filter udara dan bahan bakar,
- c. Penyetelan celah katup,
- d. Penggantian suku cadang yang memiliki masa pakai terbatas (seperti *gasket*, *seal*, dan *ring piston*).

Pada mesin diesel Unit 4 DAF DKT 1160A, *preventive maintenance* biasanya dilakukan setiap 500–1.000 jam operasi sesuai petunjuk pabrikan, tergantung beban kerja dan kondisi lingkungan operasi. Pelaksanaan *preventive maintenance* yang konsisten terbukti menurunkan tingkat keausan komponen serta menjaga kestabilan nilai *Specific Fuel Consumption (SFC)*.

2. *Corrective Maintenance* (Pemeliharaan Korektif)

Corrective maintenance merupakan tindakan perbaikan yang dilakukan setelah terjadi kerusakan atau gangguan pada mesin. Jenis pemeliharaan ini bersifat reaktif, yaitu baru dilaksanakan setelah sistem mengalami kegagalan fungsi atau performa menurun drastis.

Contoh kegiatan *corrective maintenance*:

- a. Perbaikan sistem injeksi bahan bakar akibat kebocoran,
- b. Penggantian *valve* atau *ring piston* yang aus setelah terdeteksi kehilangan kompresi,
- c. Perbaikan sistem pendinginan akibat kebocoran pada *water jacket* atau *radiator*.

Meskipun *corrective maintenance* dapat mengembalikan fungsi mesin, namun pendekatan ini kurang efisien karena menyebabkan *downtime* panjang, gangguan pasokan listrik, serta peningkatan consumption rate bahan bakar akibat operasi mesin yang tidak stabil sebelum diperbaiki. Oleh sebab itu, *corrective maintenance* sebaiknya dijadikan tindakan pelengkap, bukan strategi utama dalam manajemen pemeliharaan.

3. *Predictive Maintenance* (Pemeliharaan Prediktif)

Predictive maintenance dilakukan dengan memantau kondisi aktual mesin secara berkala menggunakan data performa dan hasil pengujian untuk memprediksi waktu

optimal perawatan atau penggantian komponen. Pendekatan ini berbasis pada konsep *condition-based maintenance*, yaitu pemeliharaan dilakukan hanya ketika data menunjukkan tanda-tanda awal penurunan kondisi.

Beberapa parameter yang dipantau pada mesin diesel PLTD antara lain:

- a. Tekanan dan temperatur oli,
- b. Tekanan kompresi silinder,
- c. Getaran dan kebisingan mesin,
- d. Konsumsi bahan bakar spesifik (*SFC*),
- e. Emisi gas buang dan temperatur *exhaust*.

Dengan menggunakan data ini, operator dapat menentukan kapan mesin perlu dilakukan *overhaul* sebelum mengalami kerusakan besar. *Predictive maintenance* terbukti meningkatkan efisiensi bahan bakar hingga 5–10% (*Siregar, 2020*) dibandingkan sistem perawatan konvensional.

4. *Overhaul Maintenance* (Pemeliharaan Besar / *Major Overhaul*)

Overhaul Maintenance merupakan tindakan perawatan menyeluruh yang dilakukan setelah mesin mencapai jam operasi tertentu atau ketika performa sudah menurun signifikan. Tujuan *overhaul* adalah mengembalikan performa mesin mendekati kondisi baru (*as good as new*) dengan cara membongkar, memeriksa, membersihkan, memperbaiki, atau mengganti komponen utama yang mengalami keausan.

Pada mesin UNIT 4 di PLTD Lemukutan, kegiatan Pemeliharaan *Major Overhaul* umumnya dilakukan setiap 12.000–16.000 jam operasi, sesuai panduan pabrikan dan hasil evaluasi kondisi mesin. Komponen yang biasanya diperiksa dan diganti meliputi:

- a. *Piston, ring piston, dan liner silinder,*
- b. *Katup (valve), valve seat, dan guide,*
- c. *Bearing crankshaft dan connecting rod,*
- d. *Nozzle injektor dan pompa bahan bakar,*
- e. *Turbocharger, oil pump, dan water pump.*

Setelah dilakukan Pemeliharaan *Major Overhaul*, biasanya terjadi peningkatan tekanan kompresi, kestabilan pembakaran, dan penurunan konsumsi bahan bakar. Hal ini

berdampak langsung terhadap penurunan nilai *SFC (Specific Fuel Consumption)*, yang menjadi indikator peningkatan efisiensi mesin.

B. Klasifikasi Tingkatan Pemeliharaan *P-Level Maintenance* PLTD (P1 – P8)

Dalam sistem pemeliharaan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), pembagian *P-Level Maintenance* dipakai untuk mengelompokkan kegiatan perawatan berdasarkan tingkat kompleksitas pekerjaan, kedalaman pembongkaran mesin, durasi *downtime*, keterampilan teknisi, serta kebutuhan peralatan dan suku cadang. Pendekatan ini bertujuan menjaga keandalan mesin diesel, memperpanjang umur pakai, mengurangi biaya gangguan tak terencana, dan meningkatkan efisiensi operasi. Berikut ini penjelasan Klasifikasi Tingkatan Pemeliharaan *P-Level Maintenance* PLTD (P1 – P8):

1. P1 (Pemeriksaan Harian)

Fokus pada tindakan dasar untuk memastikan operasi mesin berjalan normal. Aktivitas meliputi pengecekan visual, level pelumas, temperatur, kebocoran, dan kontrol indikator keselamatan. Dilakukan tanpa menghentikan mesin atau hanya dengan jeda singkat.

2. P2 (Pemeliharaan Berkala Mingguan/Bulanan)

Melibatkan penyetelan ringan dan penggantian komponen minor seperti *filter*, saringan udara, serta pembersihan komponen utilitas. Dilakukan ketika mesin dimatikan sebentar dengan minim pembongkaran.

3. P3 (Pemeliharaan Periode Kecil / *Minor Maintenance*)

Mencakup penggantian komponen *fast-moving* (*injektor, nozzle, ring gasket* sederhana), pengecekan *fuel pump timing*, dan kalibrasi ringan. Membutuhkan teknisi berpengalaman serta *downtime* lebih lama daripada P2.

4. P4 (*Intermediate Maintenance*)

Pembongkaran sebagian *cylinder head, overhaul* pada Unit pompa pelumas atau pompa pendingin, pencucian *exhaust gas boiler* (jika ada), dan inspeksi ruang bakar untuk mendeteksi deposit karbon. Durasi *downtime* signifikan dan memerlukan peralatan bengkel.

5. P5 (*Top Overhaul*)

Pembongkaran *major* pada bagian atas mesin yaitu seluruh *cylinder head*, *piston*, *connecting rod*, *liner*, dan *crosshead* (untuk mesin besar). Pengecekan detail keausan, pengukuran *clearance*, dan penggantian part inti. Umumnya dilakukan setelah sejumlah jam operasi tertentu.

6. P6 (*Major Overhaul*)

Pembongkaran total mesin termasuk *crankshaft*, *block inspection*, *line boring*, *balancing*, dan *reconditioning*. Memerlukan fasilitas *workshop* besar, tim ahli, dan perencanaan operasi yang matang serta durasi *downtime* panjang.

7. P7 (*Re-Powering / Rehabilitation*)

Menangani kondisi ketika kerusakan total atau penurunan performa signifikan membuat *overhaul* tidak ekonomis. Meliputi penggantian mesin utama, *control system*, *generator*, atau sistem bahan bakar besar-besaran untuk mengembalikan performa desain.

8. P8 (*Re-Engineering / Modernisasi Sistem*)

Tahap tertinggi, yaitu peningkatan sistem pembangkit berbasis teknologi baru seperti digitalisasi kontrol, konversi bahan bakar (misal ke *dual-fuel/LNG*), otomasi sensor, peningkatan efisiensi dan emisi. Berorientasi pada pengembangan, bukan hanya pemulihan.

Tabel 2.1 P-Level Maintenance PLTD

<i>P-Level Maintenance</i>	Jenis Pemeliharaan	Tingkat Pembongkaran	<i>Downtime</i>	Contoh Kegiatan
P1	Pemeriksaan Harian	Tanpa pembongkaran	Sangat singkat	Cek oli, temperatur, kebocoran, indikator
P2	Pemeliharaan Berkala	Minor	Singkat	Ganti <i>filter</i> , pembersihan air <i>intake</i>
P3	<i>Minor Maintenance</i>	Parsial kecil	Sedang	Ganti <i>injektor</i> , kalibrasi pompa bahan bakar
P4	<i>Intermediate Maintenance</i>	Parsial sedang	Cukup lama	Bongkar sebagian <i>cylinder head</i> , cek ruang bakar
P5	<i>Top Overhaul</i>	Besar	Lama	Cek/pasang <i>piston</i> , <i>liner</i> , <i>connecting rod</i>
P6	<i>Major Overhaul</i>	Total	Sangat lama	Bongkar penuh mesin, cek <i>crankshaft</i> dan <i>block</i>
P7	<i>Re-Powering / Rehabilitation</i>	Penggantian sistem utama	Sangat lama	Ganti <i>engine/generator/control system</i>
P8	<i>Re-Engineering / Modernisasi</i>	Rekonstruksi sistem total	Tergantung proyek	Digitalisasi, konversi bahan bakar, sistem efisiensi baru

2.1.4 Major Overhaul Mesin Diesel

A. Pengertian Major Overhaul

Major Overhaul adalah proses pemeliharaan menyeluruh (*comprehensive maintenance*) pada mesin diesel yang dilakukan setelah jangka waktu operasi tertentu atau ketika performa mesin mengalami penurunan signifikan. Tujuan utamanya adalah mengembalikan kondisi dan kinerja mesin mendekati kondisi semula (*as good as new*) melalui pembongkaran, pemeriksaan, perbaikan, penggantian, dan penyetelan kembali seluruh komponen utama mesin.

Menurut Cengel dan Boles (2015), *overhaul* termasuk dalam kategori *corrective and restorative maintenance*, yaitu perawatan yang bertujuan mengembalikan efisiensi termal dan mekanis mesin melalui restorasi komponen yang aus atau rusak. Dalam praktik industri pembangkitan, *major overhaul* menjadi bagian dari strategi pemeliharaan berbasis jam operasi (*running hour maintenance*), yang dilakukan pada interval antara 12.000 hingga 16.000 jam kerja tergantung spesifikasi pabrikan dan kondisi beban mesin.

B. Tujuan dan Fungsi Major Overhaul

Pelaksanaan *Major Overhaul* memiliki beberapa fungsi strategis, antara lain:

- a. Mengembalikan performa mesin diesel yang menurun akibat keausan komponen, kehilangan kompresi, atau penurunan efisiensi pembakaran.
- b. Menurunkan nilai *Specific Fuel Consumption (SFC)* dengan memastikan sistem pembakaran kembali bekerja optimal.
- c. Mencegah kerusakan besar (*breakdown*) yang berpotensi menyebabkan *downtime* panjang dan biaya perbaikan tinggi.
- d. Menjaga keandalan operasi pembangkit listrik (*reliability improvement*), terutama di wilayah terpencil seperti Lemukutan yang tidak memiliki cadangan sistem interkoneksi.
- e. Memperpanjang umur pakai mesin (*engine lifetime extension*) melalui penggantian komponen vital sesuai batas keausan (*wear limit*).

C. Tahapan Umum Pelaksanaan *Major Overhaul*

Pelaksanaan Pemeliharaan *Major Overhaul* meliputi beberapa tahapan sistematis yang mengikuti standar prosedur dari pabrikan mesin (dalam hal ini DAF) dan pedoman operasi PLN, yaitu:

1. Tahap Persiapan
 - a. Pengumpulan data jam operasi mesin, histori gangguan, dan data konsumsi bahan bakar.
 - b. Persiapan alat ukur (*compression tester, dial gauge, micrometer, fuel pump tester, dsb*).
 - c. Pengadaan suku cadang dan bahan habis pakai seperti *gasket set, bearing, piston ring, dan filter*.
2. Tahap Pembongkaran (*Disassembly*)
 - a. Pembongkaran seluruh komponen utama: *head silinder, piston-liner, crankshaft, connecting rod, sistem injeksi, turbocharger, dan pompa oli*.
 - b. Setiap komponen diberi label dan disusun sesuai urutan untuk menghindari kesalahan saat perakitan kembali.
 - c. Dokumentasi visual dilakukan untuk referensi analisis keausan.
3. Tahap Pemeriksaan dan Pengukuran

Setiap komponen diperiksa menggunakan alat ukur presisi untuk menilai kondisi dan batas keausan terhadap spesifikasi pabrikan:

Tabel 2.2 Kondisi dan Batas Keausan Komponen Terhadap Spesifikasi Pabrik

Komponen	Parameter Pemeriksaan	Batas Keausan Umum
<i>Liner silinder</i>	Diameter & ovalitas	≤ 0.15 mm
<i>Piston ring</i>	Celah ujung & groove	≤ 0.3 mm
<i>Valve</i>	Kebocoran, seating, keausan	≤ 0.1 mm
<i>Crankshaft</i>	Keausan jurnal & out of round	≤ 0.05 mm
<i>Bearing</i>	Clearance & scoring	≤ 0.1 mm

Jika nilai keausan melebihi batas, komponen harus diganti atau direkondisi.

4. Tahap Perbaikan dan Penggantian Komponen
 - a. Penggantian komponen aus seperti *ring piston*, *bearing*, *liner*, *seal*, *valve*, dan *nozzle injector*.
 - b. *Regrinding crankshaft* atau *reboring liner* bila diperlukan.
 - c. Penyetelan sistem injeksi bahan bakar sesuai tekanan dan *timing* standar pabrik.
5. Tahap Perakitan (*Assembly*)
 - a. Komponen dirakit kembali dengan torsi pengencangan sesuai spesifikasi manual DAF.
 - b. Pelumasan awal dilakukan untuk mencegah *dry friction* saat mesin pertama kali dijalankan.
 - c. Pemeriksaan sistem pendingin, pelumasan, dan kelistrikan dilakukan sebelum *starting test*.
6. Tahap Pengujian (*Testing dan Commissioning*)
 - a. Mesin dijalankan tanpa beban (*no-load test*) untuk memastikan tidak ada kebocoran dan bunyi abnormal.
 - b. Dilanjutkan dengan uji beban bertahap (25%, 50%, 75%, 100%) untuk memverifikasi tekanan kompresi, suhu *exhaust*, dan konsumsi bahan bakar.

- c. Pengambilan data *Specific Fuel Consumption (SFC)* dilakukan pada setiap level beban sebagai parameter utama efisiensi *pasca-overhaul*.

D. Komponen-Komponen Utama yang Diperiksa Saat *Major Overhaul*

Komponen vital yang menjadi fokus pemeriksaan dan perbaikan meliputi:

1. Sistem Bahan Bakar (*Fuel System*): *Pompa injeksi, nozzle injector, filter*, dan pipa tekanan tinggi.
Tujuan: memastikan atomisasi bahan bakar sempurna dan tekanan injeksi sesuai spesifikasi.
2. Sistem Pelumasan (*Lubrication System*): *Pompa oli, filter, saluran oli, dan bearing*.
Tujuan: mengurangi gesekan dan mencegah *overheating* pada komponen bergerak.
3. Sistem Pendinginan (*Cooling System*): *Water jacket, radiator*, dan pompa air.
Tujuan: menjaga suhu operasi optimal sekitar 80–90°C agar pembakaran efisien.
4. Mekanisme Katup dan Kepala Silinder (*Valve Mechanism*)
Tujuan: memastikan bukaan dan penutupan katup sesuai *timing* yang benar.
5. Sistem *Piston–Liner–Crankshaft*
Tujuan: mengembalikan tekanan kompresi optimal untuk efisiensi pembakaran maksimal.

E. Dampak *Major Overhaul* terhadap Kinerja Mesin Diesel

Pelaksanaan *Major Overhaul* yang tepat waktu memberikan beberapa dampak positif terhadap performa mesin, di antaranya:

Tabel 2.3 Dampak Aspek Sebelum dan Sesudah *Major Overhaul*

Aspek	Sebelum <i>Major Overhaul</i>	Setelah <i>Major Overhaul</i>
Tekanan Kompresi	Menurun (kebocoran kompresi)	Meningkat stabil sesuai spesifikasi
Pembakaran	Tidak sempurna (asap hitam, <i>SFC</i> tinggi)	Lebih sempurna, <i>SFC</i> menurun
Konsumsi Oli	Tinggi akibat keausan <i>ring piston</i>	Normal dan stabil
Temperatur <i>Exhaust</i>	<i>Fluktuatif</i> , cenderung tinggi	Stabil pada rentang normal
<i>Efisiensi Termal</i>	Rendah	Meningkat signifikan (3–10%)

Studi oleh *Hasibuan (2021)* menunjukkan bahwa *Major Overhaul* dapat menurunkan *Specific Fuel Consumption (SFC)* hingga 6–12% tergantung kondisi awal mesin. Dengan demikian, kegiatan ini secara langsung meningkatkan efisiensi konversi energi dan menurunkan biaya bahan bakar di pembangkit diesel.

F. Hubungan *Major Overhaul* dengan Nilai *Specific Fuel Consumption (SFC)*

Nilai *Specific Fuel Consumption (SFC)* sangat sensitif terhadap kondisi teknis mesin. Setelah dilakukan *Major Overhaul*, terjadi peningkatan:

- Tekanan kompresi (meningkatkan efisiensi pembakaran),
- Distribusi bahan bakar lebih merata (karena *nozzle injector* baru atau dikalibrasi),
- Gesekan mekanis menurun (karena *bearing* dan *ring piston* baru),
- Temperatur operasi stabil (karena pendinginan dan pelumasan optimal).

Secara termodinamika, perbaikan ini meningkatkan efisiensi siklus diesel (η_{th}) dan menurunkan *SFC*, sesuai hubungan dasar:

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{P_{out}}$$

Dengan:

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

P_{out} = daya keluaran efektif (kW atau Kwh)

Penurunan $\dot{m}_f$ untuk daya keluaran sama berarti efisiensi mesin meningkat.

Analisis persentase perubahan sebelum dan sesudah *major overhaul*:

$$\%Perubahan\ SFC = \frac{SFC_{sebelum} - SFC_{sesudah}}{SFC_{sebelum}} \times 100\%$$

2.2 Penelitian Terkait

Dalam penelitian dilakukan tinjauan literatur untuk menemukan referensi yang relevan dengan pokok bahasan penelitian ini. Referensi ini dapat berasal dari buku, artikel, jurnal, atau proposal skripsi yang relevan. Beberapa referensi yang berkaitan dengan penelitian ini, yaitu :

1. Siregar, A. (2018). *Analisis Efektivitas Overhaul terhadap Kinerja Mesin Diesel pada PLTD Belawan*.
Hasil penelitian menunjukkan bahwa setelah dilakukan *Major Overhaul*, nilai *SFC* menurun rata-rata 7,5% dan efisiensi termal meningkat sebesar 5%.
2. Rahmad, D. & Prasetyo, H. (2020). *Pengaruh Perawatan Mesin terhadap Konsumsi Bahan Bakar PLTD di Pulau Nias*.
Studi ini mengungkapkan bahwa jadwal *overhaul* yang tepat dan pengaturan sistem injeksi dapat menurunkan konsumsi bahan bakar hingga 10%.
3. Yunus, M. (2021). *Evaluasi Performa Mesin Diesel Unit 4 DAF DKT 1160A Setelah Overhaul pada PLTD Karimunjawa*.
Penelitian menunjukkan peningkatan tekanan kompresi sebesar 12% dan penurunan *SFC* dari 235 g/kWh menjadi 210 g/kWh.

4. PLN Unit Pembangkitan Isolated Area (2022). *Laporan Internal Efisiensi PLTD Lemukutan*.

Menunjukkan bahwa salah satu faktor utama peningkatan biaya operasional adalah kenaikan *SFC* akibat keterlambatan *overhaul*.

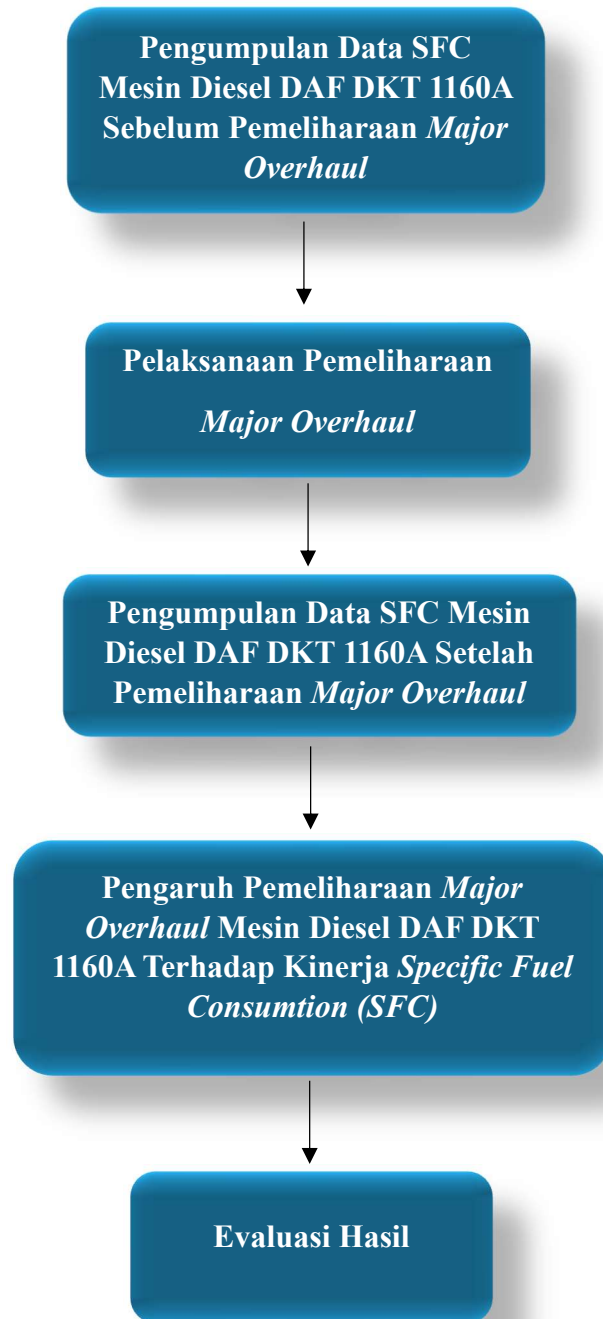
Dari berbagai penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa kegiatan *Major Overhaul* memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi bahan bakar dan kinerja mesin diesel pembangkit.

Tabel 2.4 Penelitian Terkait

No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1	Siregar, A. (2018) – <i>Analisis Efektivitas Overhaul terhadap Kinerja Mesin Diesel pada PLTD Belawan</i>	Kinerja mesin diesel menurun akibat jam operasi tinggi dan keterlambatan <i>overhaul</i> .	Studi eksperimental dengan pengukuran tekanan kompresi, temperatur <i>exhaust</i> , dan <i>SFC</i> sebelum dan sesudah <i>overhaul</i> .	<i>SFC</i> menurun rata-rata 7,5%, efisiensi termal meningkat 5% setelah <i>major overhaul</i> .	Belum menganalisis faktor penyebab utama peningkatan efisiensi (seperti sistem injeksi dan pelumasan).
2	Rahmad, D. & Prasetyo, H. (2020) – <i>Pengaruh Perawatan Mesin terhadap Konsumsi Bahan Bakar</i>	Tingginya konsumsi bahan bakar akibat jadwal perawatan	Studi lapangan dan analisis korelasi antara interval <i>overhaul</i>	Jadwal <i>overhaul</i> yang tepat dan kalibrasi sistem injeksi menurunkan konsumsi	Tidak dilakukan pengukuran kuantitatif terhadap <i>SFC</i> atau perbandingan kinerja mesin

	<i>PLTD di Pulau Nias</i>	yang tidak konsisten.	dan konsumsi bahan bakar.	bahan bakar hingga 10%.	sebelum–sesudah <i>overhaul</i> .
3	Yunus, M. (2021) – <i>Evaluasi Performa Mesin Diesel Unit 4 DAF DKT 1160A Setelah Overhaul pada PLTD Karimunjawa</i>	Mesin UNIT 4 mengalami penurunan tekanan kompresi dan peningkatan konsumsi bahan bakar.	Analisis eksperiment al dengan uji performa dan pengukuran parameter pembakaran <i>pasca-overhaul</i> .	Tekanan kompresi meningkat 12%, SFC turun dari 235 g/kWh menjadi 210 g/kWh.	Belum membahas pengaruh kondisi lingkungan operasi dan beban parsial terhadap <i>SFC</i> .
4	PLN Unit Pembangkitan Isolated Area (2022) – <i>Laporan Internal Efisiensi PLTD Lemukutan</i>	Kenaikan biaya operasional akibat meningkatn ya <i>SFC</i> karena keterlambatan <i>overhaul</i> .	Analisis operasional berbasis data historis konsumsi bahan bakar dan jam operasi mesin.	Ditemukan bahwa <i>SFC</i> meningkat signifikan ketika jadwal <i>overhaul</i> melebihi batas jam operasi.	Tidak dilakukan analisis teknis rinci tentang pengaruh <i>overhaul</i> terhadap efisiensi mesin diesel secara termodinamik.

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2.7 Kerangka Pemikiran

Sesuai dengan kerangka pemikiran penulis, sebelum dimulainya pemeliharaan *Major Overhaul*, diperlukan pengumpulan data *Specific Fuel Consumption (SFC)* Mesin Diesel Unit 4 DAF DKT 1160A. Pada pelaksanaan pemeliharaan *Major Overhaul* dilakukan sesuai dengan langkah-langkah SOP yang berlaku dan standar pemeliharaan dari pabrikan. Setelah pelaksanaan pemeliharaan *Major Overhaul* Mesin Diesel Unit 4 DAF DKT 1160A selesai, maka akan dilakukan pengujian sesuai dengan SOP dan standar pemeliharaan dari pabrikan. Setelah pengujian berhasil, Mesin Diesel Unit 4 DAF DKT 1160A beroperasi normal dan penulis akan kembali melakukan pengumpulan data *Specific Fuel Consumption (SFC)* Mesin Diesel Unit 4 DAF DKT 1160A pasca setelah pemeliharaan *Major Overhaul*. Data *Specific Fuel Consumption (SFC)* diolah oleh penulis yang tahap berikutnya akan di analisis, sehingga penulis dapat memahami hasil dari pengaruh pemeliharaan *Major Overhaul* Mesin Diesel Unit 4 DAF DKT 1160A terhadap Kinerja *Specific Fuel Consumption (SFC)*.