

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. PENELITIAN YANG RELEVAN

Untuk memperkuat landasan teoretis dan metodologis dalam penelitian ini, penulis melakukan tinjauan mendalam terhadap berbagai studi terdahulu yang memiliki fokus serupa, yaitu menganalisis secara komprehensif dampak pemeliharaan berat (*overhaul*) terhadap stabilitas kinerja dan efisiensi termal mesin diesel pada sektor pembangkitan listrik. Penelusuran literatur ini bukan sekadar formalitas akademik, melainkan sebuah upaya strategis untuk membedah mekanisme teknis bagaimana tindakan korektif berskala besar dapat mengintervensi laju degradasi sebuah mesin pembangkit yang telah mencapai jam operasional tertentu.

Penelitian-penelitian relevan yang dihimpun mencakup berbagai studi kasus dari pembangkit listrik tenaga diesel di berbagai wilayah, yang secara kolektif berfungsi sebagai parameter pembandingan yang krusial. Melalui tinjauan ini, penulis dapat memetakan korelasi antara variabel intervensi seperti penggantian komponen *moving parts* atau kalibrasi ulang sistem injeksi dengan variabel output berupa penurunan nilai *Specific Fuel Consumption* (SFC) dan peningkatan *reliability* unit. Hal ini menjadi sangat penting terutama saat mencoba menarik garis perbandingan antara perbaikan spesifik yang bersifat reaktif terhadap gangguan tertentu, dengan pemeliharaan periodik terencana yang bersifat menyeluruh seperti *Semi Overhaul*.

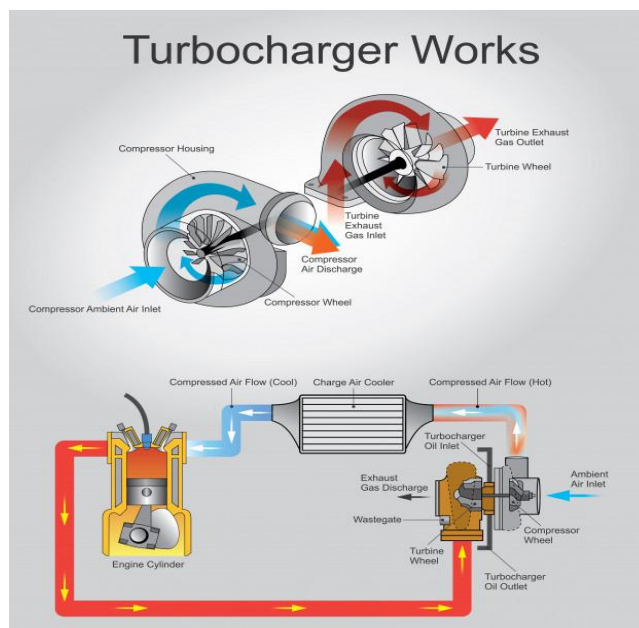
Lebih jauh lagi, tinjauan pustaka ini mengeksplorasi bagaimana literatur teknis memandang fenomena keausan komponen internal yang secara progresif meningkatkan biaya operasional akibat pemborosan bahan bakar. Dengan merujuk pada hasil-hasil penelitian sebelumnya, penulis dapat memperkuat argumentasi mengenai ambang batas efisiensi yang masih dianggap wajar serta titik kritis di mana sebuah mesin wajib menjalani *overhaul* demi menghindari kerugian finansial yang lebih besar.

Secara sistematis, tinjauan ini berfungsi untuk memposisikan *urgensi* penelitian mengenai *Semi Overhaul* pada Mesin MAK Unit 3 di PLTD Waena di tengah-tengah konstelasi literatur teknis yang sudah ada. Dengan mengidentifikasi celah (*gap*) antara kondisi teoretis yang ditemukan dalam studi terdahulu dengan realitas empiris di lapangan

khususnya pada karakteristik unik mesin MAK di wilayah Jayapura penelitian ini diharapkan tidak hanya memberikan solusi praktis bagi unit terkait, tetapi juga menyumbangkan data valid bagi pengembangan strategi pemeliharaan mesin pembangkit listrik yang lebih efisien dan ekonomis di masa depan.

2.1.1. Pengaruh Pemeliharaan Overhaul Turbocharger terhadap Kinerja Mesin

Dalam memperkuat kerangka teoretis penelitian ini, salah satu rujukan literatur yang memiliki *signifikansi* sangat tinggi adalah studi yang dilakukan oleh Win Alfalah, Eko Sulistiyo, dan Rahmat Ihksan (2017) melalui karya ilmiah mereka yang berjudul “PENGARUH PEMELIHARAAN OVERHAUL TURBOCHARGER TERHADAP KINERJA MESIN UNIT VII PLTD AMPENAN”. Penelitian ini memberikan fondasi bukti empiris yang sangat kuat mengenai peran vital kondisi komponen teknis, khususnya pada sistem induksi udara mesin diesel, terhadap keberlanjutan operasional pembangkit listrik. Fokus utamanya tertuju pada komponen *Turbocharger*, yang dalam arsitektur mesin diesel modern dianggap sebagai variabel penentu efisiensi termodinamika.



Gambar 2.1 Cara Kerja Turbocharger pada Mesin

Sumber: Speedwork Autocar, https://www.speedwork.id/prinsip_kerja_turbocharger.html

Eksplorasi Fokus dan Lokus Penelitian Terdahulu

Penelitian tersebut mengambil objek studi spesifik pada Mesin Diesel Pembangkit Listrik Unit VII PLTD Ampenan. Lingkup penelitiannya dirancang secara mendalam untuk mengisolasi dan menganalisis dampak langsung yang dihasilkan dari tindakan *Overhaul* (OH) yang bersifat spesifik dan intensif pada unit Turbocharger. Peneliti dalam studi tersebut tidak sekadar melihat tindakan ini sebagai prosedur pemeliharaan rutin, melainkan sebagai sebuah upaya restorasi performa yang bersifat fundamental untuk mengembalikan karakter mekanis mesin ke titik optimalnya.

Rangkaian tindakan *overhaul* yang mereka dokumentasikan meliputi protokol teknis yang sangat komprehensif dan sistematis, yang mencakup tahapan-tahapan sebagai berikut:

- a. Pembongkaran Total (*Full Disassembly*): Proses penguraian seluruh modul *Turbocharger* hingga ke bagian terkecil untuk melakukan inspeksi visual secara detail serta pengukuran mekanis pada tiap komponen guna mengidentifikasi tingkat keausan atau deviasi fisik.
- b. Prosedur Dekarbonisasi dan Pembersihan Menyeluruh: Langkah krusial ini bertujuan untuk mengeliminasi kerak karbon, jelaga, dan berbagai material asing yang menempel pada sudu-sudu turbin serta roda kompresor, yang mana deposit tersebut sering kali menjadi penyebab utama terganggunya aliran aerodinamika udara dan penurunan putaran turbin.
- c. Restorasi Komponen Presisi dan *Moving Parts*: Dilakukan penggantian elemen-elemen kritis yang memiliki tingkat gesekan tinggi, seperti *bearing* (bantalan) dan *seal* (segel), yang sangat vital untuk meminimalisir rugi-rugi mekanis serta mencegah terjadinya kebocoran internal pelumas ke dalam saluran udara pembakaran.
- d. Kalibrasi Ulang dan Pengujian Efisiensi: Langkah akhir ini merupakan prosedur teknis untuk memastikan bahwa seluruh unit *Turbocharger* mampu berputar kembali pada kecepatan tinggi dengan stabilitas yang terjaga, sehingga dapat bekerja pada tingkat efisiensi yang sesuai dengan spesifikasi desain asli pabrikannya (*design efficiency*).

Relevansi Teknis Terhadap Parameter Kinerja

Melalui lingkup pemeliharaan yang sedemikian detail, penelitian tersebut berhasil membedah bagaimana pemeliharaan pada komponen pendukung seperti *Turbocharger* dapat memberikan efek domino terhadap kesehatan mesin secara keseluruhan. Fokus pada restorasi sistem induksi udara ini menjadi landasan penting dalam memahami mengapa nilai efisiensi seperti SFC dapat membaik secara signifikan. Dengan memastikan *Turbocharger* bekerja pada efisiensi desainnya, maka rasio pencampuran udara dan bahan bakar dapat dikontrol lebih akurat, yang mana hal ini merupakan kunci utama dalam meminimalisir inefisiensi pada mesin-mesin pembangkit besar seperti yang terdapat di PLTD Ampenan maupun objek penelitian di PLTD Waena.

Tinjauan ini berfungsi untuk memposisikan bahwa tindakan *overhaul* meskipun hanya pada satu sistem spesifik memiliki korelasi yang tidak terpisahkan dengan daya mampu mesin serta konsumsi bahan bakar yang lebih ekonomis, sehingga menjadi referensi pembandingan yang sangat kuat bagi tindakan *Semi Overhaul* (SO) pada Mesin MAK Unit 3 PLTD Waena.

2.1.2 Relevansi Mendasar dengan Penelitian Ini

Penelitian yang dilakukan oleh Win Alfalah, Eko Sulistiyo dan Rahmat Ihksan. (2017) merupakan landasan yang kuat karena secara spesifik menguji hubungan sebab-akibat antara pemeliharaan dan efisiensi (SFC). Namun, terdapat perbedaan mendasar yang memposisikan Tugas Akhir ini sebagai studi kasus yang lebih komprehensif dan relevan bagi manajemen asset

Penelitian Terdahulu: Bertujuan untuk mengukur seberapa efektif perbaikan *Turbocharger* dalam mengembalikan fungsi komponen tersebut.

Penelitian Ini: Bertujuan untuk mengukur efektivitas program pemeliharaan periodik (SO 12.000 jam) secara keseluruhan terhadap target kinerja operasional PLTD. Data kinerja yang dikumpulkan (sebelum dan sesudah SO) adalah hasil kolektif dari perbaikan di semua sistem mesin. Evaluasi ini lebih mendekati studi kasus pengelolaan

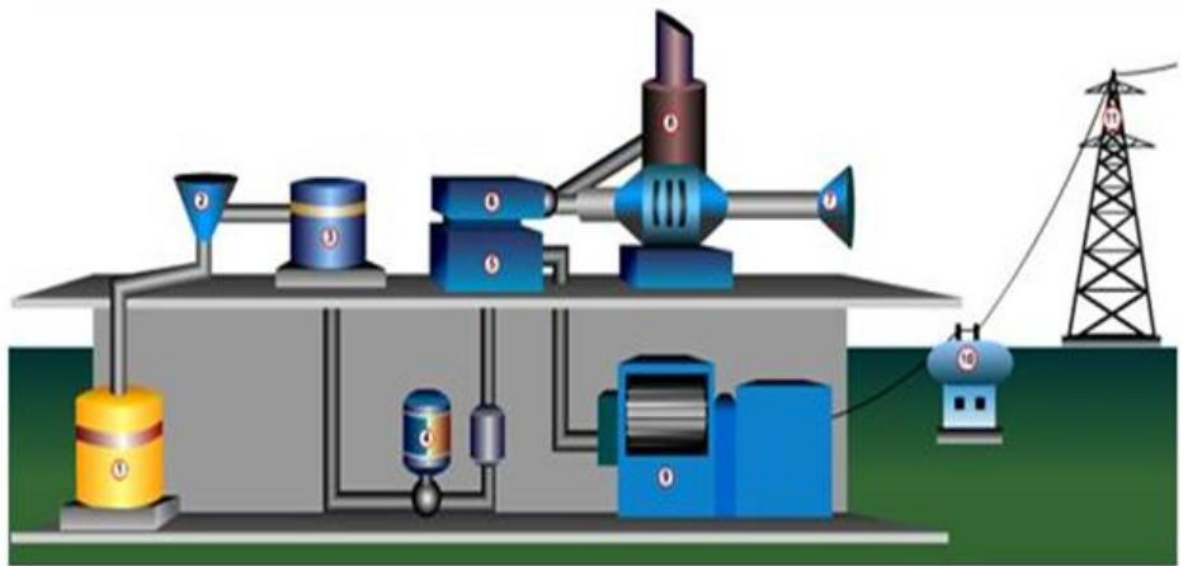
aset, di mana keputusan pemeliharaan periodik (per 12.000 jam) harus dibuktikan manfaatnya secara finansial dan teknis.

Perbandingan ini menegaskan bahwa penelitian Win Alfalah, Eko Sulistiyo dan Rahmat Ihksan. (2017) berfungsi sebagai bukti empiris bahwa intervensi pemeliharaan, meskipun spesifik pada turbocharger, dapat meningkatkan SFC, yang mana sejalan dengan hipotesis utama penelitian ini.

2.2. SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA DIESEL (PLTD)

2.2.1. PLTD

Bagian utama PLTD

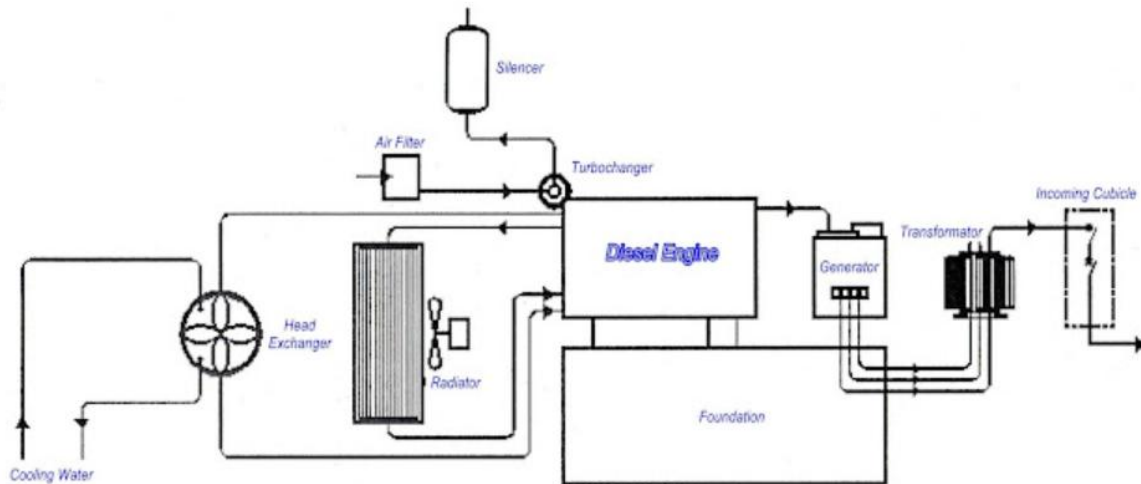


Gambar 2.2 PLTD

Sumber: Rakhman.net, <https://ezkhelenergy.blogspot.com/2011/07/pembangkit-listrik-tenaga-diesel-pltd.html>

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) adalah instalasi yang menggunakan mesin diesel sebagai penggerak mula (*prime mover*) untuk memutar generator yang menghasilkan energi listrik. Di PLN, PLTD seringkali berperan sebagai:

1. Pembangkit di Sistem Terisolasi: Beroperasi mandiri tanpa interkoneksi jaringan besar.
2. Pembangkit Puncak (*Peaker Plant*): Bekerja pada jam-jam beban puncak karena kemampuan *start-up* yang cepat.
3. Pembangkit Cadangan (*Spinning Reserve*): Siap beroperasi kapan saja untuk menggantikan unit besar yang tiba-tiba *trip* atau menambah daya saat darurat.



Gambar 2.3 Diagram Blok Sistem PLTD

Sumber: Ezkhel Energy, Mechanical – Electrical Engineering,
<https://ezkhelenergy.blogspot.com/2011/07/pembangkit-listrik-tenaga-diesel-pltd.html>

2.2.2. Komponen utama PLTD

Secara teknis, PLTD bukan hanya sekadar mesin diesel tunggal, melainkan sebuah ekosistem mekanikal dan *elektrikal* yang bekerja secara sinkron. Berikut adalah penjelasan detail mengenai komponen-komponen utamanya:

1. Mesin Diesel (*Prime Mover*): Ini adalah jantung dari seluruh sistem pembangkit. Mesin diesel berfungsi sebagai penggerak mula (*prime mover*) yang mengubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi mekanik putar.
 - a. Blok Silinder: Sebagai rangka utama tempat terjadinya proses pembakaran dan pergerakan piston.

- b. Piston dan Poros Engkol (*Crankshaft*): Piston bergerak translasi akibat ledakan pembakaran, yang kemudian diubah menjadi gerak rotasi oleh poros engkol.
 - c. Sistem Injeksi Bahan Bakar: Komponen ini sangat krusial terhadap nilai SFC; bertugas mengabutkan bahan bakar ke dalam ruang bakar dengan tekanan tinggi.
2. Generator Sinkron: Komponen utama yang berfungsi mengubah energi mekanik dari mesin diesel menjadi energi listrik arus bolak-balik (AC).



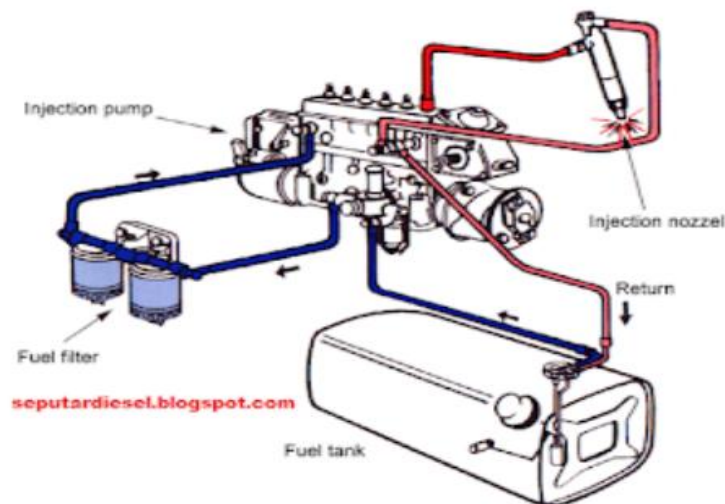
Gambar 2.4 Generator

Sumber: Slideshare.net, <https://www.slideshare.net/slideshow/09generator-sinkronpptx/257322791>

Prinsip kerja

- a. Penggerak mula: Mesin diesel membakar bahan bakar dan menghasilkan energi mekanik dalam bentuk putaran.
- b. Eksitasi: Arus searah (DC) dialirkan ke kumparan medan pada rotor, menciptakan medan magnet yang kuat.

- c. Induksi: Ketika rotor yang dialiri medan magnet ini berputar, garis-garis gaya magnet memotong kumparan kawat pada stator (bagian yang diam).
 - d. Menghasilkan tegangan: Perpotongan garis gaya magnet tersebut menginduksi Gaya Gerak Listrik (GGL) pada kumparan stator, yang menghasilkan tegangan bolak-balik (AC).
 - e. Kecepatan sinkron: Generator ini disebut "sinkron" karena rotornya berputar pada kecepatan yang sinkron dengan frekuensi listrik yang dihasilkan. Kecepatan putar ini bergantung pada jumlah kutub magnet dan frekuensi listrik yang diinginkan.
3. Sistem Bahan Bakar: Mencakup tangki penyimpanan, sistem purifikasi (Separator/Filter), dan sistem injeksi.



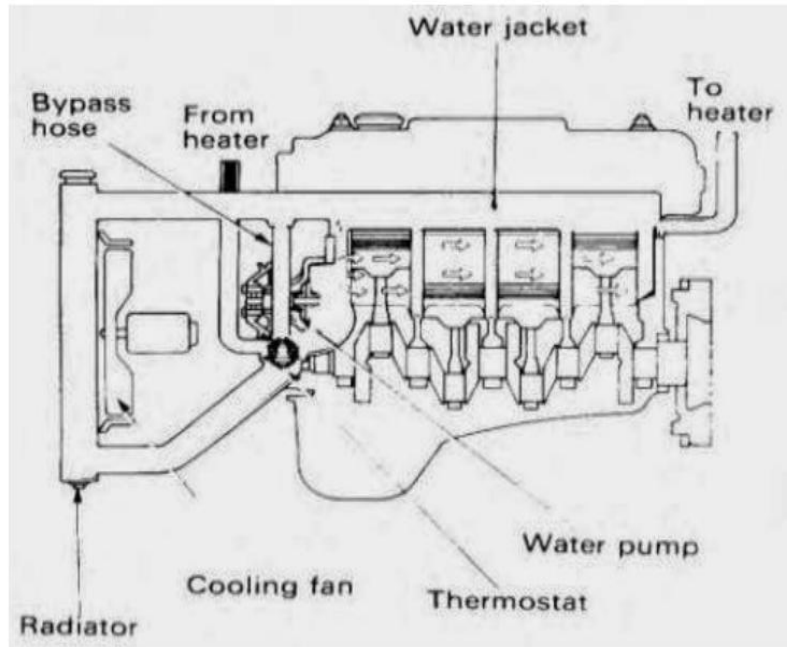
Gambar 2.5 Sistem Bahan Bakar

Sumber: seputardiesel.blogspot.com, <https://seputardiesel.blogspot.com/2015/09/sistem-bahan-bakar-diesel-dengan-pompa.html>

Sistem Bahan Bakar PLTD memastikan kualitas dan tekanan bahan bakar optimal untuk pembakaran. Prosesnya melewati tiga tahapan utama:

- a. Penyimpanan dan Penyaluran: Bahan bakar dari Tangki Penyimpanan dipindahkan ke Tangki Harian, yang juga berfungsi untuk pengendapan awal.

- b. Purifikasi: Bahan bakar dimurnikan oleh *Separator Sentrifugal* (menghilangkan air/sedimen) dan *Filter* (menghilangkan partikel halus).
 - c. Injeksi: Pompa Injeksi (FIP) menaikkan tekanan bahan bakar, lalu Injektor menyembrotkannya menjadi kabut halus (atomisasi) ke ruang bakar.
4. Sistem Pendingin: Mengontrol suhu mesin agar tetap berada dalam batas operasional yang aman.



Gambar 2.6 Sistem Pendingin

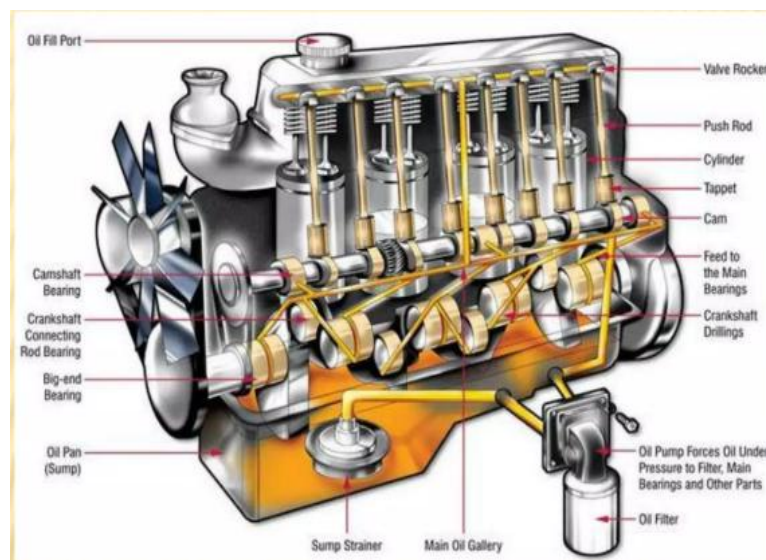
Sumber: TN Blogs, https://www.tneutron.net/blogs/sistem-pendingin-motor-diesel/#google_vignette

Sistem Pendingin berfungsi menjaga suhu mesin diesel dalam rentang optimal (~ 80°C - 90°C) untuk efisiensi dan mencegah kerusakan.

Sistem ini umumnya menggunakan dua sirkuit tertutup:

- a. Sirkuit Primer (*Jacket Water*): Mendinginkan *liner* dan *cylinder head*.
- b. Sirkuit Sekunder (*Raw Water*): Menerima panas dari sirkuit primer di Penukar Panas (*Heat Exchanger*) dan membuangnya ke luar (misalnya ke *cooling tower*).

5. Sistem Pelumas: Sistem ini berfungsi untuk meminimalisir gesekan antar komponen mesin yang bergerak, mendinginkan bagian internal, dan membersihkan kotoran.
- a. Pompa Oli & Filter: Memastikan oli bersih bersirkulasi ke seluruh bagian mesin seperti *bearing* dan *liner*.
 - b. Oil Cooler: Menjaga suhu oli agar viskositasnya tetap optimal untuk melumasi mesin pada beban tinggi.



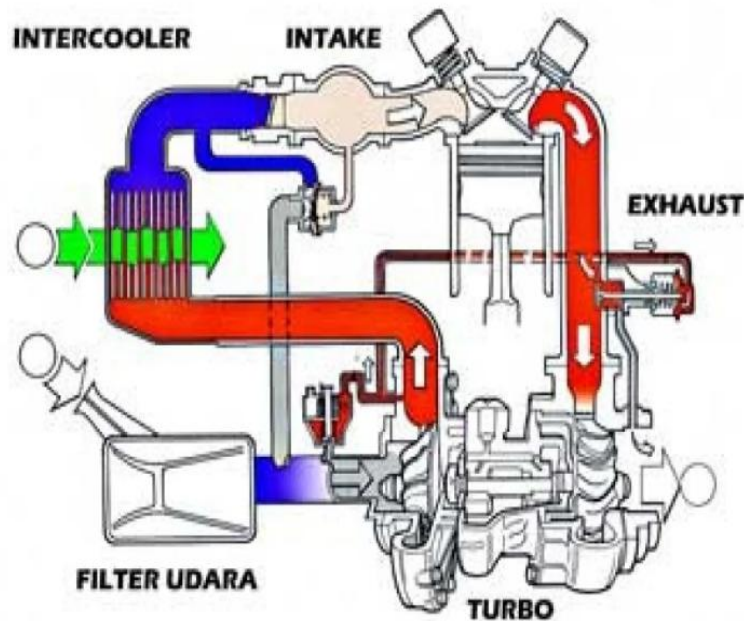
Gambar 2.7 Sistem Pelumasan

Sumber: *Slideshare.net*, <https://www.slideshare.net/slideshow/5sistem-pelumasan-motor-diesel/250888474>

Sistem Pelumas berfungsi mengurangi gesekan, mendinginkan, dan membersihkan komponen bergerak mesin.

- a. Sirkulasi Dasar: Pompa Oli mengambil oli dari Tangki Oli (*Sump*) dan menyalurkannya.
- b. Pemurnian: Oli melewati Oil Cooler untuk didinginkan dan kemudian menuju Filter Oli untuk menyaring kontaminan sebelum didistribusikan.

- c. Distribusi: Oli bertekanan disalurkan ke komponen vital seperti *crankshaft*, *connecting rod*, dan *cylinder head*.
 - d. Dampak Kinerja: Kondisi oli dan efisiensi pelumasan yang baik sangat penting untuk meminimalkan kerugian gesekan mekanis, yang merupakan faktor kunci dalam menjaga SFC (*Specific Fuel Consumption*) mesin tetap rendah.
6. Sistem Udara Masuk dan Gas Buang: Termasuk *Turbocharger* dan *Intercooler/Aftercooler*.



Gambar 2.8 Sistem Udara Masuk dan Gas Buang

Sumber: *Slideshare.net*, <https://www.slideshare.net/slideshow/1-pengenalan-pembangkit-listrik-tenaga-diesel/271628095>

Sistem ini berfungsi vital untuk memasok udara bersih dan bertekanan ke silinder untuk pembakaran sempurna, sekaligus membuang sisa gas panas.

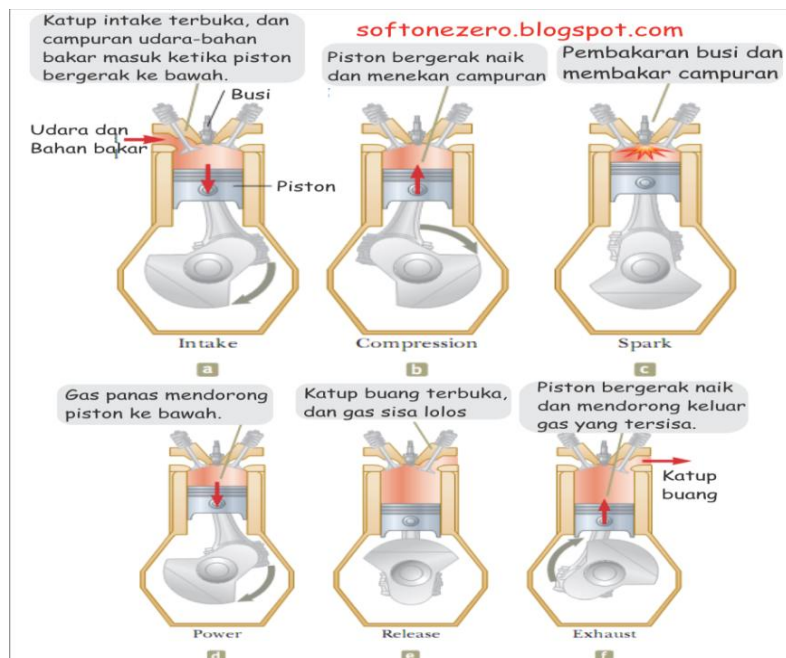
- a. Sirkuit Udara Masuk: Udara bersih disedot dari atmosfer, difilter, dan kemudian dikompresi oleh Kompresor *Turbocharger*.

- b. Pendinginan Udara: Udara panas dari kompresor didinginkan oleh *Intercooler* (Pendingin Udara) untuk meningkatkan densitasnya (jumlah oksigen per volume). Udara dingin bertekanan ini kemudian masuk ke silinder.
- c. Pembakaran: Udara bertekanan mendukung pembakaran bahan bakar.
- d. Sirkuit Gas Buang: Gas panas sisa pembakaran dikeluarkan dari silinder menuju Turbin *Turbocharger*. Energi kinetik dan panas gas buang ini memutar turbin, yang terhubung pada poros yang sama dengan kompresor (memasok energi untuk kompresi). Gas buang kemudian dilepas ke atmosfer melalui knalpot.

2.2. TINJAUAN TERMODINAMIKA

2.3.1. Siklus Diesel

Mesin diesel beroperasi berdasarkan Siklus Diesel, yang idealnya terdiri dari empat proses utama:



Gambar 2.9 Siklus Diesel

Sumber: *Softonezero.blogspot.com*

1. Langkah Isap (*Intake*): Udara murni diisap ke dalam silinder.
2. Langkah Kompresi (*Compression*): Udara dikompresi hingga tekanan dan suhu tinggi (di atas suhu swa-bakar bahan bakar). Kualitas 17 adalah 17 ini sangat dipengaruhi oleh kerapatan *sealing* ring piston dan katup.
3. Langkah Ekspansi/Pembakaran (*Combustion/Power*): Bahan bakar disemprotkan ke udara panas, terbakar secara spontan (bukan dengan busi), dan menghasilkan gaya dorong pada piston.
4. Langkah Buang (*Exhaust*): Gas sisa pembakaran dikeluarkan dari silinder.

Efisiensi termal mesin PLTD secara langsung terkait dengan rasio kompresi. Keausan pada komponen yang ditangani saat SO (terutama *ring piston* dan *liner*) akan menurunkan rasio kompresi efektif, sehingga menurunkan efisiensi pembakaran dan otomatis menaikkan SFC.

2.4. MESIN MAK TYPE 8M 453 AK UNIT 3 PLTD WAENA

2.4.1. Spesifikasi Teknis Mesin



Gambar 2.10 Mesin MAK type 8M 453 AK

Sumber: Burakmarine.com, <https://www.burakmarine.com/mak-8m453ak-diesel-engine/>

Mesin MAK Type 8M 453 AK adalah mesin diesel putaran menengah (*medium-speed diesel engine*) yang diproduksi oleh *MaK Motoren GmbH & Co. KG*. Mesin ini memiliki karakteristik teknis yang harus dipahami karena menentukan ruang lingkup SO:

Tabel 2.1 Spesifikasi Mesin MAK type 8M 453 AK

Parameter	Spesifikasi	Relevansi Terhadap SO/SFC
Tipe	8M 453 AK	Menunjukkan 8 silinder, 4 Langkah.
Daya Nominal	4.000 kW - 4.500 kW	Basis perhitungan Daya Mampu (100% beban)
Putaran Mesin	Sekitar 600 rpm	Kecepatan putar konsisten
Sistem Induksi	<i>Turbocharger</i> dan <i>Intercooled</i>	<i>Turbocharger</i> dan <i>Intercooler</i> Adalah komponen krusial yang efisiensinya diperiksa saat SO
Bahan Bakar	HSD atau MFO	Kualitas bahan bakar sangat mempengaruhi SFC

2.4.2. Komponen Kritis yang Mempengaruhi Efisiensi dan Ruang Lingkup SO

Pekerjaan *Semi Overhaul* (SO) pada 12.000 jam menargetkan pemulihan fungsi komponen yang vital untuk proses kompresi dan injeksi:

1. *Piston* dan *Ring Piston*: Fungsi utama *ring piston* adalah *sealing* (mencegah kebocoran gas kompresi/pembakaran ke *crankcase*) dan *oil scraping* (mengendalikan pelumas). Keausan *ring piston* menyebabkan *blow-by gas* yang signifikan, menurunkan tekanan kompresi, pembakaran tidak sempurna, dan menaikkan SFC. SO melibatkan pengecekan dan seringkali penggantian *ring piston*.
2. *Cylinder Liner*: Keausan pada permukaan *liner* (disebut *ovality* atau *taper*) akan memperburuk kinerja *ring piston* dalam menyegel silinder, yang berujung pada penurunan efisiensi.
3. Kepala Silinder (*Cylinder Head*): Komponen ini menampung katup isap dan buang. Kebocoran pada katup (akibat *pitting* atau *stuck*) akan mengurangi daya efektif dan meningkatkan kerugian energi, sehingga SFC meningkat.

4. *Turbocharger*: Bertanggung jawab untuk menekan udara yang masuk ke silinder. Kotoran atau erosi pada bilah turbin/kompresor menurunkan efisiensi *charging*, yang berakibat pada pembakaran kurang oksigen dan SFC tinggi.
5. Injektor Bahan Bakar (*Fuel Injector*): Komponen kunci yang menyemprotkan bahan bakar. Injektor yang tersumbat atau rusak akan menghasilkan pola penyemprotan yang buruk (atomisasi tidak ideal), mengarah pada pembakaran yang tidak tuntas dan pemborosan bahan bakar (SFC tinggi).

2.5. SPECIFIC FUEL CONSUMPTION (SFC) DAN ANALISIS EFISIENSI

2.5.1. Definisi dan Kebutuhan Pengukuran SFC

Specific Fuel Consumption (SFC) adalah parameter yang wajib diukur dalam operasional PLTD karena merefleksikan konversi energi secara langsung. SFC diartikan sebagai massa bahan bakar yang dikonsumsi untuk menghasilkan satu satuan daya listrik.

Secara operasional, SFC diukur dalam satuan gram per kilowatt-hour (g/kWh).

Implikasi SFC Rendah:

1. Efisiensi Tinggi: Mesin mampu menghasilkan energi listrik lebih banyak dari setiap gram bahan bakar.
2. Biaya Operasional Rendah: Pengurangan biaya bahan bakar, yang merupakan komponen biaya terbesar PLTD.
3. Dampak Lingkungan Minimal: Emisi karbon dioksida (CO₂) per kWh yang dihasilkan menjadi lebih rendah.

2.5.2. Hubungan SFC dengan Efisiensi Termal

Efisiensi Termal Mesin Diesel mengukur seberapa baik energi panas yang terkandung dalam bahan bakar (dihitung dari *Lower Heating Value/LHV*) diubah menjadi energi mekanik (kerja) yang kemudian menjadi energi listrik. Efisiensi Termal dan SFC memiliki hubungan berbanding terbalik.

1. Peningkatan Efisiensi Termal (misalnya, perbaikan *sealing* piston) Penurunan SFC (dibutuhkan bahan bakar lebih sedikit untuk daya yang sama).

2. Penurunan Efisiensi Termal (misalnya, panas terbuang ke sistem pendingin)
Peningkatan SFC (dibutuhkan bahan bakar lebih banyak untuk daya yang sama).

2.5.3. Keseimbangan Energi (*Energy Balance*) dan Kerugian

Untuk menganalisis efisiensi PLTD Unit 3, penting untuk memahami ke mana perginya energi dari bahan bakar (*Total Input Energy*). Dalam kondisi operasional yang ideal, energi terdistribusi sebagai berikut:

Tabel 2. 2 Keseimbangan Energi dan Kerugian

Distribusi Energi	Presentase Estimasi	Relevansi dengan SO
Energi Listrik (<i>Output</i>)	35% - 45%	Inilah <i>output</i> yang kita maksimalkan (melalui Daya Mampu)
Kerugian Gas Buang (<i>Exhaust Loss</i>)	30% - 40%	Kerugian terbesar, dipengaruhi oleh efisiensi pembakaran
Kerugian Sistem Pendingin	15% - 25%	Panas yang dibuang melalui air pendingin dan oli
Kerugian Radiasi Mekanis	5%	Gesekan internal dan panas yang hilang ke lingkungan

Pekerjaan *Semi Overhaul* (SO) berupaya menggeser persentase kerugian gas buang dan mekanis kembali menjadi energi listrik yang dapat digunakan, terutama dengan memulihkan tekanan kompresi yang menaikkan Efisiensi Termal dan memperbaiki komponen gesek yang menurunkan Efisiensi Mekanis.

2.5.4. Teori Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Efisiensi dan SFC

Efisiensi termal dan nilai SFC pada mesin diesel pembangkit (seperti MAK Type 8M 453 AK) dipengaruhi oleh interaksi beberapa faktor teknis utama:

1. Integritas Sistem Kompresi: Tekanan kompresi yang optimal bergantung sepenuhnya pada kerapatan *sealing ring piston* dan *cylinder liner*. Kebocoran tekanan (*blow-by*) akibat keausan komponen atau ketidakrataan permukaan *cylinder head* menyebabkan

suhu akhir kompresi tidak mencapai titik ideal, sehingga pembakaran tidak sempurna dan nilai SFC meningkat drastis.

2. Kualitas Udara Pembakaran (Efisiensi Volumetrik): Kebersihan sistem udara masuk, terutama *Charge Air Cooler* (CAC) dan filter udara, menentukan densitas oksigen yang masuk ke ruang bakar. Udara yang terlalu panas memiliki densitas rendah, menyebabkan campuran bahan bakar menjadi terlalu kaya (*rich mixture*) yang membuang energi kimia menjadi jelaga (pembakaran tidak sempurna).
3. Presisi Sistem Injeksi Bahan Bakar: Atomisasi bahan bakar yang tepat memastikan setiap tetes bahan bakar terbakar habis untuk menghasilkan daya dorong maksimal pada piston. Masalah pada injektor, seperti penyumbatan atau ketidakseimbangan aliran antar silinder, akan meningkatkan suhu gas buang (*Exhaust Gas Temperature*) dan memperburuk efisiensi bahan bakar.
4. Rugi-Rugi Mekanis (*Mechanical Losses*): Gesekan antar komponen bergerak menyerap sebagian energi mekanis yang dihasilkan. Kondisi sistem pelumasan, termasuk performa pompa oli mekanik, sangat menentukan minimalnya hambatan gesek ini; kegagalan pelumasan akan meningkatkan beban mesin untuk memutar dirinya sendiri, sehingga menurunkan efisiensi *output*.
5. Kualitas dan Nilai Kalor Bahan Bakar: Jenis bahan bakar yang digunakan (HSD atau MFO) memiliki nilai panas spesifik yang menentukan seberapa banyak energi yang bisa dikonversi per satuan massa.
6. Keseimbangan Beban Operasional: Mesin mencapai efisiensi puncaknya pada beban tertentu (seringkali pada kapasitas optimal di atas 75% daya nominal). Pengoperasian pada beban *fluktuatif* atau rendah cenderung meningkatkan nilai SFC karena mesin tidak bekerja pada kurva efisiensi desainnya.

2.6. MANAJEMEN PEMELIHARAAN OVERHAUL

2.6.1. Jenis-Jenis Pemeliharaan Mesin Diesel

Dalam manajemen aset pembangkitan PLN, pemeliharaan dibagi berdasarkan interval jam operasi (*Running Hours/RH*) dan ruang lingkup pekerjaannya:

1. *Timing Overhaul* (TO): Pemeliharaan ringan dengan interval jam operasi terpendek (misalnya, 4.000 jam). Fokus pada penggantian filter, oli, dan pengecekan ringan.
2. *Semi Overhaul* (SO): Pemeliharaan menengah dengan interval yang lebih panjang (misalnya, 12.000 jam atau 16.000 jam). Ini adalah fokus penelitian. SO melibatkan pembongkaran kepala silinder, pengecekan *bearing* dan piston, serta penggantian komponen yang bersifat *consumable* untuk memulihkan kinerja.
3. *Major Overhaul* (MO): Pemeliharaan besar dengan interval terlama (misalnya, 24.000 jam atau 36.000 jam). Melibatkan pembongkaran mesin secara total (*crankshaft*, *main bearing*, dll.).

Pemeliharaan Periodik (P-Level) pada PLTD adalah sistem terstruktur yang didasarkan pada jam operasi mesin (*Operating Hours*). Tujuannya adalah menjaga keandalan (*reliability*) dan efisiensi (*efficiency*) mesin. Level Pemeliharaan Periodik terdiri dari P0 sampai dengan P8 dengan penjelasan sebagai berikut:

Tabel 2.3 Pemeliharaan Periodik

Level Pemeliharaan	Interval Jam Operasi	Sifat Kegiatan (Ringkas)
P0	Harian/Mingguan	Pemeliharaan Inspeksi Harian/Mingguan. Kegiatan : <i>Running check</i> (pengamatan visual, pencatatan parameter logsheet, pembersihan area sekitar mesin)
P1	250 – 500 jam	Inspeksi dasar dan pelumasan Kegiatan : Penggantian oli, <i>fuel filter</i> , pengecekan level <i>fluida</i> , pengecekan ketegangan <i>V-belt</i>
P2	1.000 – 2.000 jam	Pemeliharaan <i>Minor</i> . Kegiatan Pemeliharaan P1 ditambah pengecekan dan pembersihan dan inspeksi komponen kecil seperti <i>turbocharger air filter</i> dan <i>fuel injector</i> (pembongkaran selektif)
P3	4.000 – 6.000 jam	Inspeksi Menengah. Kegiatan : Pemeliharaan P2 ditambah pengecekan dan penyetelan celah katup

		(<i>valve clearance</i>), pemeriksaan pompa, dan pembersihan <i>oil cooler</i> .
P4	8.000 - 12.000 jam	<i>Semi Overhaul</i> (SO). Pemeliharaan <i>major</i> yang berfokus pada <i>system</i> pembakaran dan Gerakan <i>piston</i> .
P5	16.000 - 24.000 jam	Pemeliharaan Lanjutan. Sering kali merupakan kombinasi P3 dan P4 tergantung kondisi mesin.
P6	24.000 - 36.000 jam	<i>Major Overhaul</i> (MO) atau <i>Top Overhaul</i> (TO). Pembongkaran besar pada bagian atas mesin (Termasuk SO)
P7	48.000 jam	Pemeliharaan Lanjutan
P8	60.000 - 80.000 jam	<i>General Overhaul</i> (GO) atau <i>Overhaul Total</i> (OT). Pembongkaran mesin hingga crankshaft

Semi Overhaul (SO) termasuk dalam kategori Pemeliharaan Level P4 (8.000 - 12.000 jam operasi).

2.6.2. Tujuan Spesifik *Semi Overhaul* (SO) 12.000 Jam

SO adalah jenis pemeliharaan periodik berat yang ditujukan untuk mengembalikan kinerja mesin setelah masa operasi yang signifikan, fokus pada sistem pembakaran dan bagian gerak utama mesin.

Semi Overhaul (SO) pada Mesin MAK 8M 453 AK Unit 3 dilakukan pada interval 12.000 jam untuk mencapai tujuan spesifik berikut:

1. Pemulihan Tekanan Kompresi: Dengan mengganti atau memeriksa *ring piston* dan *seating* katup, SO bertujuan mengembalikan tekanan kompresi mendekati nilai pabrik, yang secara langsung meningkatkan Efisiensi Termal.
2. Optimalisasi Sistem Injeksi: Menguji atau mengganti *nozzle* injektor dan memastikan *timing* injeksi tepat, sehingga bahan bakar diatomisasi dan terbakar sempurna, yang merupakan faktor tunggal terbesar dalam menurunkan SFC.
3. Pemeliharaan Sistem Udara: Membersihkan atau memperbaiki *Turbocharger* dan *Intercooler* agar pasokan udara ke silinder maksimal, menaikkan Daya Mampu, dan meningkatkan Efisiensi Pembakaran.

4. Kontrol Keausan: Melakukan pengukuran pada komponen utama (*liner, piston, crankshaft deflection*) secara *sampling* untuk mendeteksi dini kerusakan yang dapat menyebabkan *Major Breakdown*.

2.6.3. Dampak Kegagalan Pemeliharaan (Kenaikan SFC)

Jika *Semi Overhaul* tidak dilakukan tepat waktu atau kualitas pelaksanaannya buruk, beberapa dampak negatif akan terjadi, yang semuanya akan termanifestasi sebagai kenaikan SFC:

1. Peningkatan *Blow-by Gas*: Kehilangan daya karena gas pembakaran bocor ke *crankcase*, menaikkan suhu oli, dan menurunkan SFC.
2. Pembentukan Deposit: Pembakaran tidak sempurna meninggalkan kerak pada *liner* dan katup, memperburuk perpindahan panas dan mengurangi *seating* katup.
3. Kerusakan Katup dan Injektor: *Nozzle* yang rusak menyebabkan tetesan bahan bakar besar, tidak terbakar sepenuhnya, dan terbang sia-sia melalui gas buang, yang merupakan pemborosan bahan bakar langsung.

2.7. PARAMETER KINERJA DAN UJI KINERJA PASCA-OVERHAUL

2.7.1. Daya Mampu (*Output Power*)

Daya Mampu adalah daya maksimum yang dapat dihasilkan Unit 3 secara berkelanjutan (*rating*) pada kondisi operasional tertentu (suhu lingkungan, kelembaban, tekanan atmosfer). Dalam konteks PLN, pemulihan Daya Mampu adalah tujuan utama SO.

Daya Mampu diukur dalam kilowatt (kW) dan dibandingkan dengan Daya Nominal mesin. Kontrak pemeliharaan seringkali mensyaratkan Daya Mampu *Pasca-SO* harus mencapai minimal 75% atau lebih dari daya nominal mesin sebagai indikasi keberhasilan pemeliharaan.

Korelasi Daya Mampu dan SFC: Ketika Daya Mampu mesin pulih, mesin mampu membawa beban yang lebih besar pada titik efisiensi optimalnya, yang secara statistik seringkali berkorelasi dengan penurunan SFC.

2.7.2. Uji Kinerja (*Performance Test*)

Performance Test adalah prosedur standar wajib yang dilakukan untuk memvalidasi kualitas pekerjaan *Overhaul*. Uji ini dilaksanakan dalam dua tahap utama:

1. *Pre-SO Test (Before Overhaul)*: Dilakukan sebelum unit masuk *shutdown* untuk pemeliharaan. Tujuannya adalah untuk mencatat kondisi awal SFC, Daya Mampu, dan parameter kritis lainnya (seperti *Exhaust Gas Temperature/EGT*, tekanan kompresi, dan tekanan *charging*) untuk dijadikan data pembanding (Baseline).
2. *Post-SO Test (After Overhaul)*: Dilakukan setelah *Overhaul* selesai dan unit siap dioperasikan kembali (*commissioning*). Tujuannya adalah untuk memverifikasi bahwa kinerja mesin (terutama Daya Mampu dan SFC) telah memenuhi standar kontrak dan telah pulih secara signifikan.

2.7.3. Parameter Pengujian Kunci Selain SFC

Meskipun SFC adalah metrik utama efisiensi finansial, parameter teknis berikut wajib diukur saat *Performance Test* karena menjelaskan penyebab SFC:

1. Suhu Gas Buang (*Exhaust Gas Temperature/EGT*): EGT adalah indikator langsung dari proses pembakaran.
 - EGT yang tinggi secara umum menunjukkan adanya masalah seperti *after-burning* atau *blow-by* yang parah.
 - Ketidakeimbangan EGT antar silinder mengindikasikan masalah individual pada silinder tertentu (misalnya, injektor tersumbat atau katup bocor), yang menaikkan SFC secara keseluruhan.
2. Tekanan Kompresi dan Pembakaran: Diukur untuk memastikan integritas *sealing* yang dipulihkan oleh SO. Tekanan yang rendah mengonfirmasi masalah keausan *ring piston* atau kebocoran katup, yang merupakan akar masalah dari SFC tinggi.
3. Tekanan Udara Masuk (*Boost Pressure*): Diukur untuk memastikan kinerja *Turbocharger* memadai. Tekanan *boost* yang rendah berarti udara pembakaran kurang, pembakaran tidak sempurna, dan SFC melonjak.

2.8. ASPEK EKONOMI PEMELIHARAAN (ANALISIS *COST SAVING*)

2.8.1. Struktur Biaya PLTD dan Sensitivitas Bahan Bakar

Dalam biaya operasional pembangkitan listrik (BPP), PLTD merupakan pembangkit yang sangat sensitif terhadap harga bahan bakar (BBM). Umumnya, bahan bakar menyumbang lebih dari 70% dari total BPP PLTD. Dengan dominasi biaya yang begitu besar, pekerjaan pemeliharaan yang menghasilkan penurunan SFC dapat dianggap sebagai investasi yang menghasilkan *return* finansial yang cepat.

2.8.2. Perhitungan *Cost Saving* Bahan Bakar

Penghematan biaya (*Cost Saving*) bahan bakar yang dihasilkan dari *Semi Overhaul* dihitung berdasarkan selisih SFC sebelum dan sesudah intervensi pemeliharaan, yang diproyeksikan selama jam operasi berikutnya.

$$\text{Penghematan Biaya} = \Delta SFC \times P_{avg} \times RH_{periode} \times \text{Harga BBM}$$

Keterangan:

- a. ΔSFC (g/kWh) : Selisih SFC sebelum dan sesudah *Semi Overhaul*
- b. P_{avg} (kW) : Daya rata-rata unit selama operasi
- c. $RH_{periode}$ (jam) : Jam operasi hingga SO berikutnya
- d. Harga BBM : Harga bahan bakar (Rp/gram atau Rp/kg)

Jika harga BBM dinyatakan dalam Rp/kg, maka hasil penghematan bahan bakar dikonversi terlebih dahulu dari gram ke kilogram.

2.8.3. Justifikasi Ekonomi (*Return on Investment/ROI*)

Konsep *Return on Investment* (ROI) digunakan untuk memvalidasi investasi pada *Semi Overhaul*. ROI dihitung dengan membandingkan keuntungan bersih (penghematan bahan bakar) dengan biaya total pelaksanaan SO.

$$ROI = \left(\frac{\text{Total Penghematan Bahan Bakar} - \text{Biaya SO}}{\text{Biaya SO}} \times 100\% \right)$$

ROI yang positif mengindikasikan bahwa investasi pemeliharaan Unit 3 tidak hanya memulihkan kinerja teknis tetapi juga memberikan keuntungan finansial yang menguntungkan bagi PT PLN (PERSERO).

2.9. Hubungan *Corrective Maintenance* dengan Efisiensi dan *Specific Fuel Consumption* (SFC)

Corrective maintenance merupakan tindakan pemeliharaan yang dilakukan untuk mengembalikan kondisi peralatan ke keadaan operasi yang layak setelah terjadi penurunan kinerja atau indikasi ketidakwajaran pada sistem. Pada pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD), salah satu bentuk *corrective maintenance* yang diterapkan adalah *Semi Overhaul* (SO), yaitu pemeliharaan menengah yang dilaksanakan berdasarkan jam operasi mesin.

Pelaksanaan *Semi Overhaul* (SO) bertujuan untuk memperbaiki dan memulihkan kondisi komponen internal mesin diesel yang mengalami keausan akibat operasi jangka panjang. Komponen yang menjadi fokus dalam kegiatan SO antara lain *piston* dan *ring piston*, *cylinder liner*, katup isap dan buang, sistem injeksi bahan bakar, serta sistem udara masuk termasuk *turbocharger*. Keausan atau penurunan performa pada komponen-komponen tersebut dapat menyebabkan kebocoran kompresi, atomisasi bahan bakar yang tidak sempurna, serta suplai udara pembakaran yang tidak optimal.

Perbaikan dan penggantian komponen selama SO akan meningkatkan kualitas proses pembakaran di dalam silinder. Pembakaran yang lebih sempurna menghasilkan tekanan dan temperatur kerja yang optimal, sehingga energi kimia bahan bakar dapat dikonversi menjadi energi mekanik secara lebih efisien. Kondisi ini berdampak langsung pada peningkatan efisiensi mesin dan penurunan konsumsi bahan bakar per satuan energi listrik yang dihasilkan, yang dinyatakan dalam parameter *Specific Fuel Consumption* (SFC).

Specific Fuel Consumption (SFC) merupakan indikator utama efisiensi operasional mesin diesel, karena menunjukkan jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu kilowatt-jam (kWh) energi listrik. Nilai SFC yang tinggi mengindikasikan pembakaran yang tidak efisien dan potensi pemborosan bahan bakar,

sedangkan nilai SFC yang lebih rendah menunjukkan kinerja mesin yang lebih baik dan efisiensi energi yang lebih tinggi.

Oleh karena itu, analisis perbandingan nilai efisiensi dan SFC sebelum dan sesudah pelaksanaan *Semi Overhaul* (SO) dapat digunakan sebagai parameter kuantitatif untuk menilai pengaruh *corrective maintenance* terhadap kinerja mesin pembangkit. Penurunan nilai SFC pasca SO menjadi bukti bahwa tindakan *corrective maintenance* yang dilakukan mampu memperbaiki kondisi teknis mesin dan meningkatkan efisiensi operasional Unit 3 PLTD Waena.