

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 PENELITIAN RELEVAN

Sebagai pendukung pengerjaan penelitian ini penulis mencantumkan beberapa referensi penelitian sebelumnya yang sejenis dengan penelitian ini.

1. Rahman, A. (2020). “Analisis Efektivitas Preventive Maintenance pada Mesin Diesel di PLTD Sorong.”

Sumber: Jurnal Energi dan Teknologi, Vol.8 No.2, 2020.

Tujuan Penelitian: Menilai efektivitas penerapan program *preventive maintenance* terhadap tingkat keandalan mesin diesel yang beroperasi di PLTD .

Metodologi: Penelitian dilakukan dengan menganalisis data historis pemeliharaan selama tiga tahun menggunakan parameter *MTBF (Mean Time Between Failures)* dan *MTTR (Mean Time To Repair)*.

Hasil Penelitian:

- a. Sebelum penerapan PM, nilai *MTBF* = 210 jam, meningkat menjadi *MTBF* = 320 jam setelah penerapan.
- b. Nilai *availability* meningkat dari 89,5% menjadi 94,7%
- c. .Frekuensi kerusakan sistem pelumasan dan pendinginan menurun hingga 30%.

2. Sutrisno, D. (2021). “Evaluasi Program Pemeliharaan Mesin Diesel terhadap Efisiensi Operasional di PLTD Ternate.”

Sumber: Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang, 2021.

Tujuan Penelitian: Mengukur dampak penerapan program *preventive maintenance* terhadap efisiensi termal dan konsumsi bahan bakar mesin diesel pembangkit.

Metode: Pendekatan kuantitatif eksperimental, dengan perbandingan antara kondisi sebelum dan sesudah perawatan rutin berdasarkan jadwal PM bulanan dan tahunan.

Hasil Penelitian:

- a. Konsumsi bahan bakar spesifik (BSFC) menurun dari 0,287 kg/kWh menjadi 0,264 kg/kWh.
- b. Efisiensi termal meningkat dari 32,8% menjadi 36,2%.
- c. Penurunan jumlah kerusakan minor sebesar 22% per tahun.

3. Fadli, M. (2019). “Pengaruh *Preventive Maintenance* terhadap Kinerja Mesin Diesel Jenis MAN 9L28/32H pada Pembangkit Listrik.”

Sumber: Jurnal Teknik Mesin Terapan, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Vol. 7 No. 3, 2019.

Tujuan Penelitian: Menganalisis hubungan antara jadwal pemeliharaan mesin diesel dan tingkat keandalan sistem operasi pembangkit dengan memperhatikan komponen kritis seperti *piston ring*, *injector*, dan *turbocharger*.

Metode: Data diperoleh melalui pencatatan logsheet pemeliharaan, kemudian diolah dengan metode *Reliability Analysis* berbasis distribusi *Weibull*.

Hasil Penelitian:

- a. Komponen injector memiliki reliabilitas terendah dengan waktu kerusakan rata-rata 150 jam.
- b. Setelah penerapan PM berbasis interval optimal, reliabilitas meningkat menjadi 0,87 (87%) dalam periode 200 jam operasi.
- c. *Downtime* total menurun 18%.

4. Gunawan, R. (2022). “Analisis MTBF dan MTTR pada Mesin Pembangkit Diesel untuk Evaluasi Keandalan Sistem di PLTD Ambon.”

Sumber: Jurnal Rekayasa Energi, Vol. 10 No. 1, 2022.

Tujuan Penelitian: Mengidentifikasi tingkat keandalan mesin diesel di PLTD Ambon dengan menghitung nilai *MTBF*, *MTTR*, dan *Availability* serta mengevaluasi efektivitas sistem perawatan.

Metode: Analisis data kerusakan dan waktu perbaikan selama 4 tahun dengan pendekatan statistik keandalan.

Hasil Penelitian:

- a. *MTBF* rata-rata: 310 jam, *MTTR* rata-rata: 8 jam
- b. *Availability* sistem mencapai 97,48%
- c. Kegagalan terbanyak terjadi pada sistem pendinginan dan bahan bakar.

5. Mulyadi, H. (2023). “Optimasi Preventive Maintenance dengan Metode Reliability Centered Maintenance (RCM) pada Mesin Diesel PLTD Bitung.”

Sumber: Jurnal Teknologi Energi dan Mesin, Vol. 11 No. 2, 2023.

Tujuan Penelitian: Mengoptimalkan jadwal *preventive maintenance* berdasarkan prinsip *Reliability Centered Maintenance (RCM)* guna menurunkan frekuensi kegagalan mesin.

Metode: Menggunakan pendekatan *analisis Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)* untuk menentukan komponen prioritas dan interval perawatan optimal.

Hasil Penelitian:

- a. Komponen turbocharger dan sistem bahan bakar memiliki nilai *Risk Priority Number (RPN)* tertinggi.
- b. Setelah implementasi PM berbasis RCM, frekuensi kerusakan turun 35% dan

efisiensi bahan bakar meningkat 4%.

c. *MTBF* meningkat dari 240 jam menjadi 360 jam

6. Fitriansyah, I. (2022). “Analisis Efisiensi Termal Mesin Diesel PLTD Balikpapan Berdasarkan Program *Preventive Maintenance*.”

Sumber: Jurnal Energi Listrik dan Mekanika, 2022.

Hasil Utama:

- a. Efisiensi termal meningkat dari 33,5% menjadi 37,1% setelah dilakukan overhaul berkala dan pembersihan sistem pendingin.
- b. Emisi CO₂ menurun hingga 5%. Relevansi: Menunjukkan korelasi langsung antara kualitas pemeliharaan preventif dengan efisiensi termal sistem PLTD. (Djohari, 2020)

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel



Gambar 2.2 PLTD REMA

Sumber Gambar: (Pribadi)

PLTD (Pembangkit Listrik Tenaga Diesel) adalah suatu instalasi pembangkit listrik yang menggunakan mesin diesel sebagai penggerak utamanya untuk mengubah energi kimia yang tersimpan dalam bahan bakar (solar/minyak diesel) menjadi energi listrik.

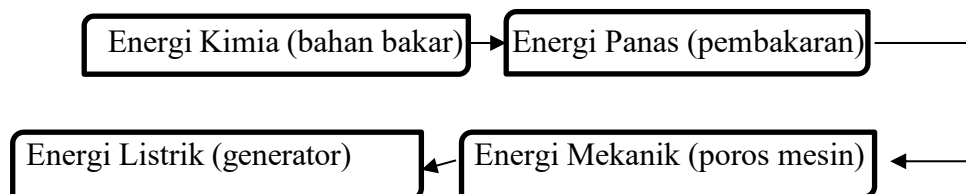
PLTD biasanya berfungsi sebagai:

1. Pembangkit Beban Puncak: Memikul beban listrik saat permintaan mencapai titik tertinggi.
2. Pembangkit Cadangan: Menggantikan pembangkit lain yang sedang mengalami pemeliharaan atau gangguan.
3. Pembangkit Utama: Di daerah-daerah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik utama (PLN).

2.2.1 Pengertian dan Prinsip Kerja PLTD

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) merupakan sistem pembangkitan listrik yang menggunakan mesin diesel sebagai penggerak mula (*prime mover*) untuk menggerakkan generator listrik. Energi kimia bahan bakar (biasanya solar) diubah menjadi energi panas melalui proses pembakaran, kemudian diubah menjadi energi mekanik (putaran poros), dan akhirnya dikonversikan menjadi energi listrik oleh generator.

Secara umum, prinsip kerja PLTD mengikuti hukum kekekalan energi, di mana energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, melainkan hanya dapat diubah bentuknya dari satu bentuk ke bentuk lain. Dalam hal ini:



PLTD bekerja berdasarkan siklus kerja mesin diesel, di mana udara dikompresi hingga tekanan dan suhu sangat tinggi, kemudian bahan bakar disemprotkan ke dalam silinder

dan terbakar secara spontan (*self-ignition*). Tekanan tinggi hasil pembakaran ini mendorong piston, menghasilkan tenaga mekanik yang memutar poros engkol dan generator. PLTD banyak digunakan pada sistem kelistrikan Indonesia karena keunggulannya:

- a. Mampu beroperasi dengan cepat (*quick start*) untuk menangani beban puncak.
- b. Fleksibel, dapat dioperasikan di daerah terpencil yang belum memiliki jaringan transmisi besar.
- c. Stabilitas frekuensi tinggi, cocok sebagai cadangan sistem (*backup supply*).

Namun, PLTD memiliki kelemahan seperti efisiensi yang lebih rendah dibanding pembangkit besar (PLTU, PLTG), tingkat kebisingan tinggi, serta biaya operasi yang relatif mahal akibat harga bahan bakar minyak.

Karakteristik Umum PLTD

- a. Skala daya: dari beberapa puluh kW sampai beberapa MW per unit (mis. 500 kVA, 1000 kVA, dst.).
- b. Respons beban: cepat, cocok untuk menutup celah beban puncak.
- c. *Mobilitas & fleksibilitas*: relatif mudah dipasang dan dioperasikan di lokasi terpencil.
- d. Efisiensi: lebih rendah dibanding pembangkit uap/GT untuk skala besar
- e. efisiensi termal berkisar 30–45% tergantung ukuran dan kondisi operasi.
- f. Biaya operasional: tinggi bila dibandingkan dengan pembangkit berbahan bakar murah karena harga bahan bakar dan frekuensi perawatan.

2.3 Komponen Utama dan Fungsi

Komponen utama pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) terdiri dari tiga bagian besar yang saling terkait, yaitu Mesin Diesel (*Prime Mover*), Generator, dan Sistem Pendukung operasional. Berikut adalah komponen utama dan fungsinya:



2.3.1 Mesin Diesel (*Prime Mover*)

Gambar 2.3 Mesin Diesel (*CUMMINS KTA50*)

Sumber Gambar: (Pribadi)

Sistem PLTD terdiri atas beberapa komponen utama yang saling berhubungan dan bekerja secara sinergis untuk menghasilkan tenaga listrik secara kontinu dan stabil. Mesin diesel berfungsi sebagai penggerak utama (*prime mover*) yang mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi mekanik. Mesin ini bekerja berdasarkan Teori siklus Mesin Diesel (*four stroke*), yaitu:

- a. Langkah hisap (*intake stroke*) udara masuk ke dalam silinder.
- b. Langkah kompresi (*compression stroke*) udara dikompresi hingga tekanan tinggi.
- c. Langkah tenaga (*power stroke*) bahan bakar diinjeksikan dan terbakar, menghasilkan gaya dorong piston.
- d. Langkah buang (*exhaust stroke*) gas sisa pembakaran dikeluarkan dari silinder. Adapun pada Mesin Diesel terdapat komponen utama lainnya, antara lain sebagai berikut:

Tabel. 2.4 Prinsip Dasar Pembakaran Internal pada Mesin Diesel

Langkah	Proses Utama	Penjelasan Singkat
1	Hisap (<i>Intake</i>)	Udara masuk ke silinder melalui katup masuk
2	Kompresi (<i>Compression</i>)	Udara dikompresi, suhu dan tekanan naik
3	Usaha (<i>Power</i>)	Injeksi bahan bakar, pembakaran, dan ekspansi gas
4	Buang (<i>Exhaust</i>)	Gas hasil pembakaran dikeluarkan dari silinder

2.3.1.1 Blok Silinder (*Cylinder Block*)



Gambar 2.5 Blok Silinder (*Cylinder Block*)

Sumber Gambar: (Pribadi)

Dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), Blok Silinder (*Cylinder Block*) merupakan komponen paling dasar dan vital. Bisa dikatakan, blok silinder adalah "tulang punggung" atau rumah bagi seluruh komponen bergerak di dalam mesin diesel.

Berikut adalah fungsi-fungsi utama Blok Silinder dalam mesin pembangkit listrik:

1. Sebagai Dudukan Komponen Utama

- a. Blok silinder berfungsi sebagai tempat bertumpu dan terpasangnya berbagai komponen mesin lainnya.
- b. Kepala Silinder (*Cylinder Head*): Dipasang di bagian atas blok.
- c. Bak Oli (*Carter*): Dipasang di bagian bawah blok.
- d. Poros Engkol (*Crankshaft*): Didukung oleh bantalan utama (*main bearing*) yang menyatu pada blok silinder.

2. Tempat Berlangsungnya Proses Pembakaran

Di dalam blok silinder terdapat lubang-lubang silinder (*silinder liner*). Di sinilah piston bergerak naik turun untuk melakukan siklus kerja: hisap, kompresi, usaha (pembakaran), dan buang. Energi panas dari pembakaran ini nantinya diubah menjadi energi mekanis untuk memutar generator.

3. Wadah Sistem Pendinginan (*Water Jacket*)

Mesin PLTD bekerja dalam durasi yang lama dan menghasilkan panas yang sangat tinggi. Blok silinder memiliki rongga-rongga di sekeliling dinding silinder yang disebut *Water Jacket*. Air pendingin mengalir di sini untuk menyerap panas mesin agar tidak terjadi *overheating* atau pemuaiian berlebih.

4. Menahan Tekanan Gas dan Beban Mekanis

Blok silinder dirancang sangat kokoh (biasanya dari besi tuang atau paduan aluminium khusus) karena harus mampu menahan:

- a. Tekanan Ledakan: Saat solar terbakar, terjadi tekanan ekspansi yang sangat kuat.
- b. Gaya Inersia: Gerakan piston dan poros engkol yang sangat cepat menciptakan getaran dan beban mekanis yang besar.

5. Jalur Pelumasan (*Oil Gallery*)

Blok silinder memiliki saluran-saluran internal yang mengalirkan oli bertekanan dari pompa oli ke bagian-bagian yang bergesekan, seperti bantalan poros engkol dan mekanisme katup. Ini penting untuk menjaga keawetan mesin PLTD yang beroperasi terus-menerus.

2.3.1.2 Kepala Silinder (*Cylinder Head*)



Gambar 2.6 Kepala Silinder (*Cylinder Head*)

Sumber Gambar: (Pribadi)

Jika Blok Silinder adalah "tulang punggung", maka Kepala Silinder (*Cylinder Head*) adalah "pusat kendali" atau otak dari proses pembakaran pada mesin diesel di pembangkit listrik. Komponen ini dipasang di atas blok silinder dan harus mampu menahan tekanan serta suhu yang jauh lebih ekstrem karena bersentuhan langsung dengan ledakan pembakaran solar.

Berikut adalah fungsi utama Kepala Silinder dalam mesin PLTD:

1. Menutup dan Menyegel Ruang Bakar

Fungsi paling mendasar adalah menutup bagian atas silinder secara rapat (*hermetis*). Bersama dengan piston dan dinding silinder, kepala silinder membentuk ruang bakar. Penutupan yang sempurna sangat krusial karena mesin diesel bekerja dengan rasio kompresi yang sangat tinggi untuk menciptakan panas yang cukup guna membakar solar secara mandiri (*self-ignition*).

2. Tempat Dudukan *Injektor* (*Nozzle*)

Berbeda dengan mesin bensin yang menggunakan busi, pada mesin diesel PLTD, kepala silinder menjadi tempat terpasangnya injektor. Injektor inilah yang menyembrotkan kabut solar dengan tekanan tinggi tepat ke tengah-tengah ruang bakar pada saat langkah kompresi mencapai puncaknya.

3. Mengatur Siklus Udara (Mekanisme Katup)

Kepala silinder menampung saluran udara masuk (*Intake Port*) dan saluran gas buang (*Exhaust Port*). Di dalamnya terdapat mekanisme katup yang mengatur kapan udara segar harus masuk dan kapan gas sisa pembakaran harus dibuang menuju cerobong asap (*stack*).

- a. Katup Hisap (*Intake Valve*): Memasukkan udara murni ke dalam silinder.
- b. Katup Buang (*Exhaust Valve*): Mengeluarkan gas hasil pembakaran.

4. Media Perpindahan Panas (Sistem Pendingin)

Karena menjadi area terpanas pada mesin, kepala silinder dilengkapi dengan saluran air (*Water Jacket*) yang sangat kompleks. Air pendingin bersirkulasi di dalam kepala silinder untuk menyerap panas dari area sekitar injektor dan katup guna mencegah keretakan material akibat tegangan termal.

5. Jalur Pelumasan dan Udara Start

- a. Lubrikasi: Mengalirkan oli ke komponen yang bergerak di atasnya, seperti *rocker arm* dan poros bubungan (*camshaft*).

Air Starting Valve : Pada mesin PLTD berkapasitas besar, kepala silinder sering kali dilengkapi dengan katup udara tekan untuk memutar mesin pertama kali saat proses *startp*.

2.3.1.3 Piston



Gambar 2.7 Piston Sumber

Gambar: (Pribadi)

Dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), **Piston** (juga disebut torak) adalah komponen yang berfungsi sebagai "jantung" penggerak. Piston merupakan komponen pertama yang menerima energi hasil pembakaran untuk diubah menjadi kerja mekanis. (Sulistiyo et al., 2018)

Berikut adalah fungsi utama Piston dalam mesin diesel pembangkit listrik:

1. Mengubah Energi Panas Menjadi Energi Mekanis

Ini adalah fungsi yang paling krusial. Ketika solar disemprotkan ke dalam ruang bakar

dan meledak, gas hasil pembakaran berekspansi dengan sangat cepat. Tekanan gas yang sangat tinggi ini mendorong piston ke bawah. Gerakan naik-turun (*reciprocating*) inilah yang nantinya diubah menjadi gerakan putar oleh poros engkol untuk memutar generator.

2. Melakukan Kompresi Udara

Mesin diesel tidak menggunakan busi. Agar solar bisa terbakar spontan, piston harus bergerak naik untuk menekan (mengompresi) udara di dalam silinder hingga mencapai suhu dan tekanan yang sangat tinggi. Tanpa kompresi yang kuat dari piston, ledakan pembakaran tidak akan terjadi.

3. Menghisap Udara dan Membuang Gas Sisa

Piston bertindak sebagai pompa dalam dua fase lainnya:

- a. Langkah Hisap: Piston bergerak turun untuk menciptakan kevakuman sehingga udara segar masuk ke silinder.
- b. Langkah Buang: Piston bergerak naik untuk mendorong gas sisa pembakaran keluar menuju sistem pembuangan.

4. Sebagai "Dinding" Bawah Ruang Bakar

Piston berfungsi sebagai dasar yang menutup ruang bakar. Bagian atas piston (*piston crown*) dirancang dengan bentuk khusus (cekungan) untuk menciptakan efek pusaran (*swirl*) udara agar pencampuran solar dan udara lebih sempurna, sehingga pembakaran di PLTD menjadi lebih efisien.

Komponen Pendukung pada Piston

Untuk menjalankan fungsinya, piston dilengkapi dengan:

- a. Ring Piston (*Cincin Torak*): Mencegah kebocoran kompresi ke bak oli dan menyapu oli pelumas di dinding silinder agar tidak ikut terbakar.
- b. Piston Pin (Pena Torak): Penghubung antara piston dengan batang penghubung (*connecting rod*).
- c. Skirt (Mantel Piston): Bagian bawah piston yang berfungsi sebagai pemandu agar piston tetap bergerak lurus di dalam silinder liner.

2.3.1.3 Piston Poros Engkol (*Crankshaft*)



Gambar 2.8 Piston Poros Engkol (*Crankshaft*)

Sumber Gambar: (Pribadi)

Dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), Poros Engkol (*Crankshaft*) adalah komponen yang bertugas mengubah jenis energi mekanik agar bisa digunakan untuk membangkitkan listrik.

Jika piston menghasilkan gerak naik-turun, maka poros engkollah yang mengubahnya menjadi gerak putar. Berikut adalah fungsi utamanya secara mendetail:

1. Konversi Gerakan (Linear ke Rotasi)

Fungsi utama poros engkol adalah mengubah gerakan linier (naik-turun) piston menjadi gerakan rotasi (berputar).

- a. Piston terhubung ke poros engkol melalui batang penghubung (*connecting rod*).
- b. Saat piston didorong ke bawah oleh ledakan pembakaran, poros engkol akan berputar. Gerakan putar inilah yang diperlukan oleh generator untuk menciptakan medan magnet dan menghasilkan listrik.

2. Meneruskan Tenaga ke Generator

Poros engkol berfungsi sebagai poros utama yang mentransmisikan torsi (tenaga putar) dari seluruh silinder menuju unit generator. Ujung poros engkol biasanya terhubung langsung (*direct coupling*) dengan poros generator listrik di PLTD.

3. Menjaga Keselarasan Siklus Kerja (*Firing Order*)

Pada mesin PLTD yang memiliki banyak silinder (misalnya 6, 12, atau 16 silinder), poros engkol dirancang dengan sudut lekukan (*crank pin*) yang berbeda-beda. Hal ini berfungsi untuk:

- a. Mengatur urutan pembakaran (*firing order*) antar silinder agar tenaga yang dihasilkan mengalir secara terus-menerus dan halus.
- b. Memastikan tidak semua piston melakukan langkah usaha di waktu yang bersamaan, sehingga getaran mesin dapat diredam.

4. Menggerakkan Komponen Bantu (*Auxiliaries*)

Selain memutar generator, putaran poros engkol juga digunakan untuk menggerakkan sistem pendukung mesin lainnya melalui gigi transmisi atau sabuk, seperti:

- a. Camshaft (Poros Bubungan): Untuk mengatur pembukaan katup.
- b. Pompa Oli: Untuk melumasi seluruh bagian mesin.
- c. Pompa Air Pendingin: Untuk sirkulasi pendinginan.

5. Menyeimbangkan Gaya Inersia (*Counterweight*)

Poros engkol dilengkapi dengan bobot penyeimbang (*counterweight*). Mengingat piston PLTD berukuran sangat besar dan berat, *counterweight* ini berfungsi untuk melawan gaya sentrifugal dan inersia piston agar poros tetap berputar dengan stabil tanpa getaran yang bisa merusak struktur pondasi pembangkit.

2.3.1.4 Injektor (*Nozzle*)



Gambar 2.9 Injektor (*Nozzle*)

Sumber Gambar: (Pribadi)

Fuel Nozzle pada mesin turbin Diesel adalah komponen kritis yang digunakan untuk menyemprotkan bahan bakar ke dalam ruang bakar untuk pembakaran. Fungsi utama dari *fuel nozzle* adalah memberikan bahan bakar dalam bentuk tepat dan proporsi yang tepat ke dalam ruang pembakaran untuk menciptakan campuran udara-bahan bakar yang optimal. (IRIYANTO, 2021)

1. Prinsip Kerja *Fuel Nozzle*

Mesin *aeroderivative* TM2500 adalah turbin gas *mobile* yang sering digunakan untuk pembangkitan daya listrik sementara atau darurat. Prinsip kerja *fuel nozzle* pada mesin *aeroderivative* TM2500 melibatkan proses pembakaran bahan bakar dalam ruang bakar (*combustion chamber*) untuk menghasilkan gas panas yang kemudian digunakan untuk memutar turbin dan menghasilkan daya listrik. Berikut adalah umum prinsip kerja *fuel nozzle*:

a) Penyemprotan Bahan Bakar yang Optimal

Fuel nozzle berfungsi untuk menyemprotkan bahan bakar ke dalam ruang

bakar dengan pola semprotan yang merata dan atomisasi yang baik. Semprotan yang optimal diperlukan untuk menciptakan campuran udara-bahan bakar yang efisien dan merata di dalam ruang bakar mesin

b) Kontrol Suhu Pembakaran melalui *Water Injection*

Water injection melalui *fuel nozzle* digunakan untuk mengendalikan suhu pembakaran di dalam ruang bakar. Cairan yang disemprotkan, seperti air, menyerap panas pembakaran, membantu mencegah *overheating*, dan mengoptimalkan kondisi operasional mesin.

c) Reduksi Emisi Gas Buang dan Peningkatan Efisiensi

Integrasi *water injection* membantu mengurangi emisi gas buang, termasuk oksida nitrogen (NOx) dan partikulat. Dengan mengendalikan suhu pembakaran dan mengurangi beban termal, teknik ini juga dapat meningkatkan efisiensi keseluruhan mesin.

2. Jenis – Jenis *Fuel Nozzle*

a) *Simplex Nozzel*

Fuel nozzle jenis *simplex* adalah jenis *nozzle* yang dirancang dengan struktur yang sederhana dan menggunakan satu jalur atau saluran untuk mengalirkan bahan bakar. *Fuel nozzle* jenis *simplex* adalah tipe *nozzle* pertama yang digunakan dalam mesin turbin dan kemudian digantikan oleh *nozzle* tipe *duplex* dalam sebagian besar pemasangan karena *nozzle* tipe *duplex* memberikan atomisasi bahan bakar yang lebih baik pada kecepatan mulai dan kecepatan mengendap (Sekman & Benjamin, 2000).

b) *Duplex Nozzle Single Line*

Fuel nozzle Duplex Single Line adalah jenis *nozzle* yang menggunakan dua saluran bahan bakar tetapi berbagi satu jalur tunggal untuk pengaliran bahan bakar. Dengan memadukan keunggulan dari konsep *duplex* (ganda) dan *single line* (satu jalur), *nozzle* ini memberikan tingkat redundansi yang tinggi serta

fleksibilitas dalam penyaluran bahan bakar. Meskipun lebih kompleks daripada *nozzle* tipe *simplex*, konfigurasi ini memungkinkan operasi bersamaan atau terpisah dari kedua *nozzle*, meningkatkan efisiensi penggunaan jalur bahan bakar. Fleksibilitas ini membuatnya cocok untuk berbagai aplikasi di mana diperlukan penyaluran bahan bakar yang andal dan beragam, sambil tetap mempertahankan tingkat keamanan dan kemudahan pemeliharaan. Kelebihan atomisasi pada kecepatan awal dan kecepatan rendah juga menjadi ciri khas dari *nozzle* tipe ini, meningkatkan kinerja penyaluran bahan bakar.

c) *Duplex Nozzle Dual Line*

Fuel nozzle Duplex Dual Line adalah *nozzle* yang menggunakan dua saluran bahan bakar, dengan setiap saluran memiliki jalur bahan bakar tersendiri. Konsep *duplex* memberikan kemampuan operasi bersamaan atau terpisah, sementara *dual line* menandakan bahwa setiap saluran mendukung jalur bahan bakar yang terpisah. Keunikan dari *nozzle* ini terletak pada tingkat redundansi yang sangat tinggi, di mana jika satu saluran atau jalur mengalami masalah, saluran atau jalur lainnya masih dapat menyuplai bahan bakar. Fleksibilitasnya juga meningkat karena *nozzle* ini dapat menyalurkan bahan bakar dari dua sumber yang berbeda atau jenis bahan bakar yang berbeda melalui jalur yang terpisah.

Konfigurasi ini sangat berguna di situasi-situasi di mana keandalan tinggi sangat diperlukan, serta di lingkungan di mana fleksibilitas dalam penyaluran bahan bakar menjadi kritis. Dengan menggunakan dua jalur bahan bakar yang terpisah, *nozzle* ini memungkinkan pengoperasian yang efisien dan dapat mendukung penyaluran bahan bakar yang lebih cepat. Meskipun lebih kompleks dalam struktur, *nozzle* Bahan Bakar *Duplex Dual Line* tetap dapat dikelola dengan baik dari segi pemeliharaan dan pengoperasian, menyediakan keseimbangan optimal antara kinerja dan keandalan

2.3.1.5 Turbocharger



Gambar 2.10 *Turbocharger*

Sumber Gambar: (Pribadi)

Dalam Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), Turbocharger adalah komponen sistem induksi paksa (*forced induction*) yang memanfaatkan energi gas buang untuk meningkatkan performa mesin.

Jika mesin tanpa turbo mengandalkan hisapan alami piston (*naturally aspirated*), turbocharger secara aktif "menyuapi" mesin dengan udara bertekanan tinggi agar proses pembangkitan listrik lebih efisien. (Alfalah et al., n.d.)

Berikut adalah fungsi utama Turbocharger pada unit PLTD:

1. Meningkatkan Daya Output Mesin (*Power Boost*)

Fungsi utama turbocharger adalah meningkatkan kepadatan udara yang masuk ke ruang bakar.

- a. Logikanya: Semakin banyak udara (oksigen) yang dimasukkan, semakin banyak pula bahan bakar solar yang dapat dibakar secara sempurna.
- b. Hasilnya: Ledakan tenaga yang dihasilkan jauh lebih besar. Hal ini memungkinkan mesin diesel menghasilkan daya (kVA/MW) yang tinggi tanpa harus memperbesar dimensi fisik mesinnya.

2. Meningkatkan Efisiensi Pembakaran dan Bahan Bakar

Dengan suplai udara yang melimpah, campuran udara dan bahan bakar menjadi lebih ideal.

- a. Pembakaran menjadi lebih tuntas, sehingga energi yang diekstraksi dari setiap tetes solar menjadi maksimal.
- b. Hal ini sangat krusial bagi operasional PLTD untuk menekan biaya konsumsi bahan bakar (*Specific Fuel Consumption*).

3. Memanfaatkan Energi Limbah (Gas Buang)

Turbocharger adalah alat yang sangat cerdas karena bekerja menggunakan "tenaga gratis".

- a. Ia menggunakan aliran gas buang yang seharusnya keluar lewat cerobong untuk memutar turbin.
- b. Turbin tersebut terhubung satu poros dengan kompresor yang kemudian menghisap dan memampatkan udara segar ke dalam mesin.

4. Mengurangi Emisi Gas Buang

Karena proses pembakaran di dalam silinder menjadi lebih sempurna (sedikit sisa bahan bakar yang tak terbakar), maka gas buang yang dihasilkan menjadi lebih bersih. Ini membantu PLTD memenuhi standar emisi lingkungan yang ketat.

5. Kompensasi Ketinggian (Altitude Compensation)

PLTD yang berlokasi di daerah pegunungan sering mengalami penurunan performa karena udara yang tipis (kurang oksigen). Turbocharger berfungsi mengkompensasi hal ini dengan memampatkan udara tipis tersebut menjadi lebih padat sebelum masuk ke mesin, sehingga daya listrik yang dihasilkan tetap stabil.

2.3.2 Generator (*Alternator*)



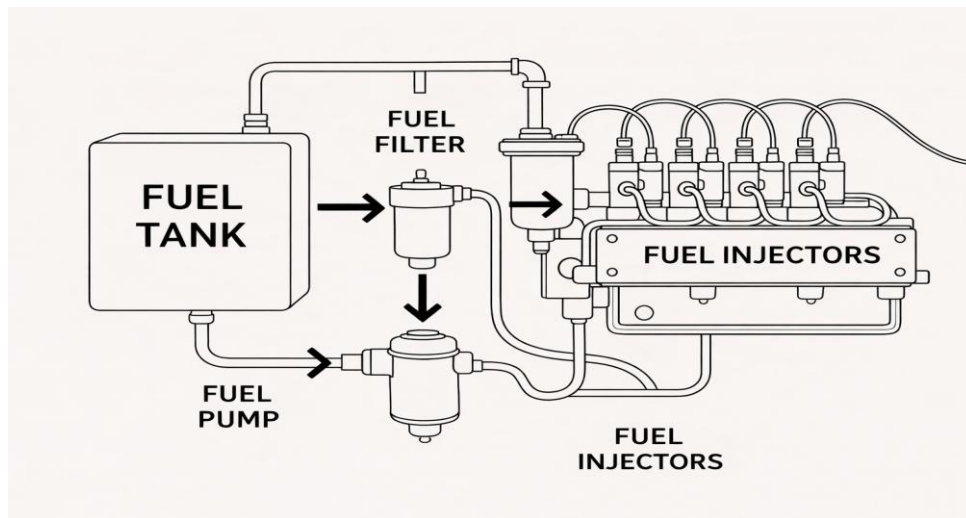
Gambar 2.11 *Generartor (Alternator)*

Sumber Gambar: (Pribadi)

Generator adalah mesin listrik yang berfungsi mengubah energi mekanik (putaran) dari poros engkol mesin diesel menjadi energi listrik. Komponen pada Generator antara lain sebagai berikut :

- a. Rotor, Bagian generator yang berputar, digerakkan langsung oleh poros engkol mesin. Perputarannya menciptakan medan magnet.
- b. Stator, Bagian generator yang diam. Kawat-kawat kumparan pada stator akan memotong garis gaya magnet dari rotor yang berputar, sehingga menghasilkan Gaya Gerak Listrik (GGL) atau tegangan listrik.

2.3.3 Sistem Bahan Bakar (*Fuel System*)



Gambar 2.13 Sistem Bahan Bakar (*Fuel System*)

Sumber Gambar: (Google)

Sistem bahan bakar berfungsi untuk menyimpan, menyaring, dan menyalurkan bahan bakar diesel dari tangki utama menuju ruang bakar mesin melalui sistem injeksi. Komponen utama dari sistem ini meliputi:

- Tangki Penyimpanan (Fuel Tank): Menyediakan tempat penampungan bahan bakar yang cukup untuk operasi berjam-jam, biasanya dilengkapi dengan sistem ventilasi dan pengaman.
- Pompa Bahan Bakar (Fuel Pump): Bertugas mengalirkan bahan bakar dari tangki menuju filter dan kemudian ke injektor dengan tekanan tertentu.
- Filter Bahan Bakar (Fuel Filter): Menyaring kotoran dan air dari bahan bakar agar tidak masuk ke sistem injeksi yang sangat sensitif.
- Injektor (Injector): Mengabutkan bahan bakar ke dalam ruang bakar dengan tekanan tinggi agar bercampur sempurna dengan udara dan menghasilkan pembakaran yang efisien.

Fungsi utama sistem bahan bakar: memastikan suplai bahan bakar yang bersih, stabil, dan bertekanan tepat menuju ruang bakar agar pembakaran berlangsung sempurna dan tenaga mesin optimal. Adapun karakteristik dari bahan bakar solar sebagai berikut:

Tabel. 2.13 Karakteristik Bahan Bakar Solar

Parameter	Pengaruh ke Mesin
Nilai Kalor (LHV) 42.000–43.000 kJ/kg	Menentukan energi pembakaran
Cetane Number	Menentukan kualitas penyalaan
Viskositas	Pengaruh atomisasi injektor
Kandungan sulfur	Pengaruh korosi & emisi
Kandungan air	Menyebabkan kerusakan injector

Hubungan dengan efisiensi : Bahan Bakar berkualitas buruk Mengakibatkan Pembakaran tidak sempurna, *SFC* menjadi naik sehingga Efisiensi turun.

Karakteristik Fisika dan Kimia Solar

Sifat Fisika

- 1) Densitas : 820 – 860 kg/m³
- 2) Viskositas : mempengaruhi atomisasi injektor
- 3) *Flash point* : $\pm 52^{\circ}\text{C}$ (keamanan penyimpanan)
- 4) *Pour point* : suhu minimum aliran bahan bakar

Sifat Kimia

- 1) Nilai kalor (LHV) : ± 42.700 kJ/kg
- 2) *Cetane number* : kualitas penyalaan
- 3) Kandungan sulfur : mempengaruhi emisi & korosi
- 4) Kandungan air & sedimen : penyebab kerusakan injektor

2.3.4 Sistem Pelumasan (*Lubricating System*)

Sistem ini berfungsi untuk menjaga bagian-bagian mesin yang bergerak agar tidak bergesekan langsung, yang dapat menyebabkan keausan dan panas berlebih.



Gambar 2.14 Sistem Pelumasan (*Lubricating System*)

Sumber Gambar: (Pribadi)

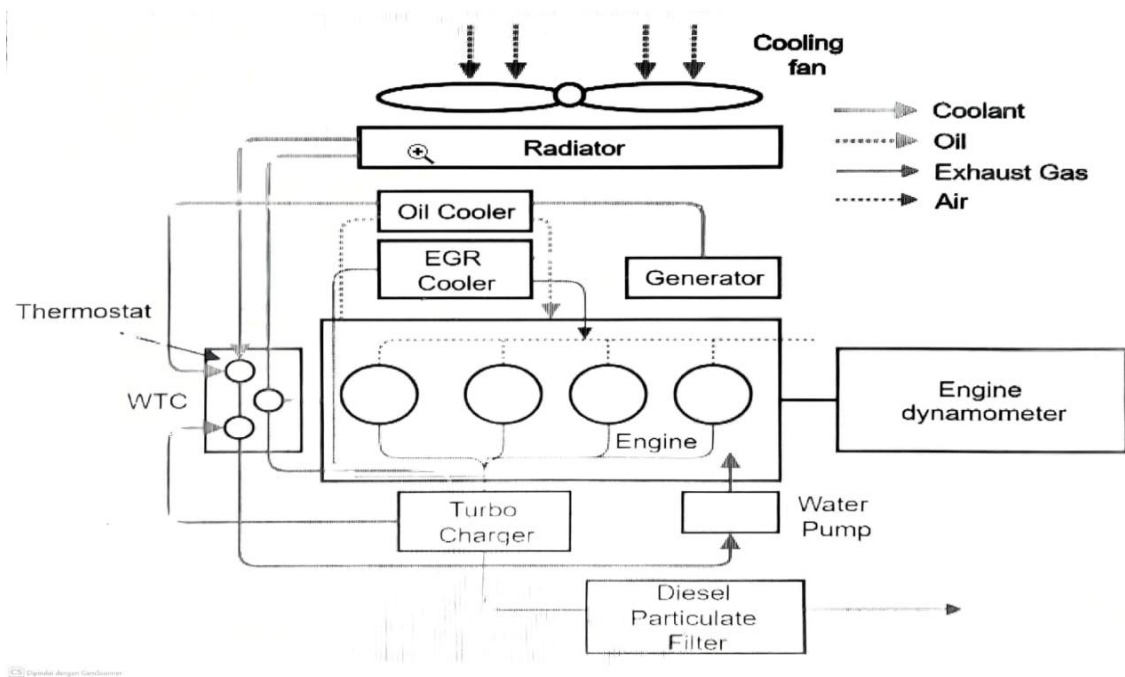
Sistem pelumasan bertugas mengurangi gesekan antar komponen mesin yang bergerak, seperti piston, poros engkol (*crankshaft*), dan batang penghubung (*connecting rod*). Selain itu, sistem ini juga mendinginkan dan membersihkan bagian dalam mesin dari sisa hasil pembakaran (debu karbon) serta menjaga umur komponen tetap panjang.

Komponen utama sistem pelumasan meliputi:

- 1) Bak Oli (*Oil Pan*): Tempat penampungan oli pelumas yang berada di bagian bawah mesin.
- 2) Pompa Oli (*Oil Pump*): Menyirkulasikan oli dari bak penampungan ke seluruh bagian mesin yang memerlukan pelumasan.
- 3) Filter Oli (*Oil Filter*): Menyaring partikel logam atau kotoran yang terbawa dalam sirkulasi oli agar tidak merusak komponen mesin.

Fungsi utama sistem pelumasan: menjaga agar seluruh komponen yang bergerak tetap terlumasi dengan baik, mengurangi keausan, dan membantu pembuangan panas dari bagian dalam mesin.

2.3.5 Sistem Pendinginan (*Cooling System*)



Gambar 2.15 Sistem Pendinginan (*Cooling System*)

Sumber Gambar: (Pribadi)

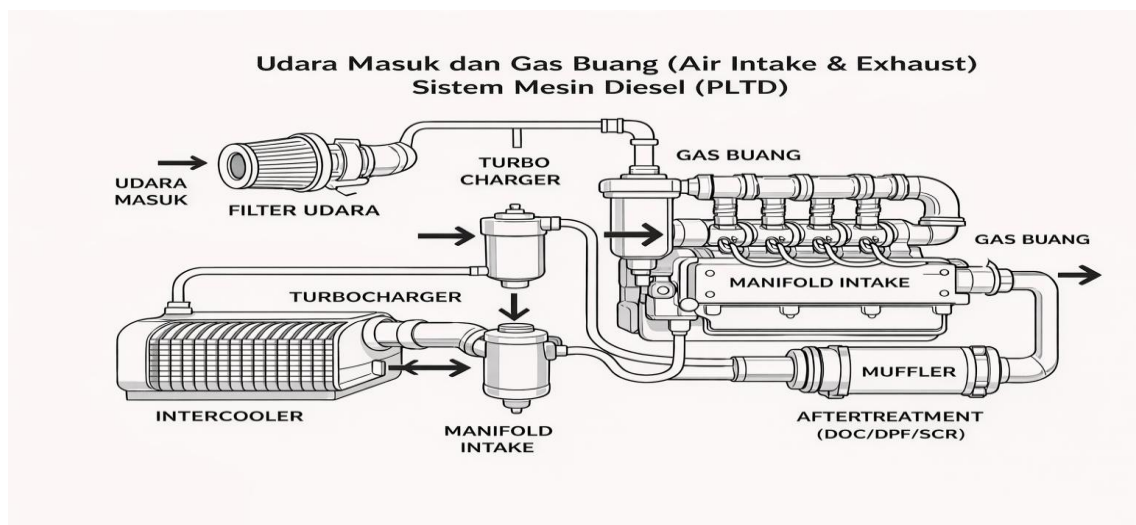
Sistem pendinginan berfungsi mengatur suhu kerja mesin agar tetap berada pada kondisi operasional yang ideal. Mesin diesel yang bekerja menghasilkan panas tinggi akibat proses pembakaran; tanpa sistem pendinginan, suhu mesin dapat naik secara ekstrem dan menyebabkan kerusakan serius pada komponen internal. Komponen utama sistem pendinginan meliputi:

- Pompa Air Pendingin (*Cooling Water Pump*): Mengalirkan cairan pendingin (biasanya campuran air dan *coolant*) ke seluruh saluran pendingin mesin.
- Radiator atau Menara Pendingin (*Cooling Tower*): Melepaskan panas dari cairan pendingin ke udara luar.

- c. Saluran Air Pendingin (*Water Jacket*): Saluran di sekitar silinder dan kepala silinder tempat cairan pendingin menyerap panas dari mesin.

Fungsi utama sistem pendinginan: memastikan suhu mesin tidak melebihi batas operasional agar performa tetap optimal, serta mencegah deformasi dan kerusakan akibat panas berlebih (*overheating*).

2.3.6 Sistem Udara Masuk dan Gas Buang (*Air Intake & Exhaust System*)



Gambar 2.16 Sistem Udara Masuk dan Gas Buang (*Air Intake & Exhaust System*)

Sumber Gambar: (Pribadi)

Sistem ini terdiri dari dua bagian utama, yaitu sistem udara masuk (*intake*) dan sistem pembuangan (*exhaust*). Keduanya bekerja secara berurutan dalam siklus pembakaran mesin diesel. Komponen utamanya meliputi:

- Filter Udara (*Air Filter*): Menyaring udara yang masuk agar bebas dari debu atau partikel yang dapat merusak ruang bakar.
- Turbocharger: Meningkatkan tekanan udara masuk ke ruang bakar untuk menghasilkan pembakaran yang lebih efisien dan daya mesin lebih besar.
- Pipa Knalpot (*Exhaust Pipe*): Menyalurkan gas sisa pembakaran keluar dari mesin.
- Peredam Suara (*Muffler*): Mengurangi kebisingan suara gas buang sebelum

dilepaskan ke atmosfer.

Fungsi utama sistem udara masuk dan buang: menyediakan udara bersih bertekanan tinggi untuk pembakaran, serta membuang gas buang secara efisien agar tekanan dalam ruang bakar tetap stabil dan lingkungan kerja aman.

2.3.7 Sistem Pengendalian & Pengaman (*Governor System*)



Gambar 2.17 Sistem Pengendalian & Pengaman (*Governor System*)

Sumber Gambar: (Pribadi)

Sistem pengatur atau *governor* adalah perangkat otomatis yang berfungsi mengendalikan jumlah bahan bakar yang diinjeksikan ke mesin berdasarkan perubahan beban listrik. Ketika beban meningkat, *governor* akan menambah suplai bahan bakar agar kecepatan mesin tetap konstan sebaliknya, saat beban turun, pasokan bahan bakar dikurangi.

Fungsi utama *governor*: menjaga stabilitas putaran mesin (RPM) sehingga frekuensi listrik keluaran generator (biasanya 50 Hz) tetap stabil meskipun beban berubah-ubah. Sistem ini sangat penting untuk menjaga kualitas tegangan dan frekuensi agar sesuai dengan standar jaringan listrik PLN.

1. Prinsip Kerja Governor System

Governor bekerja berdasarkan prinsip pengendalian umpan balik (*feedback control*). Sistem ini secara kontinu memonitor kecepatan putaran mesin menggunakan sensor kecepatan (*speed sensor*). Apabila terjadi perubahan beban pada generator, maka akan terjadi perubahan kecepatan putar mesin. *Governor* akan mendeteksi perubahan tersebut dan mengirimkan sinyal ke aktuator untuk menyesuaikan jumlah bahan bakar yang diinjeksikan ke ruang bakar.

Ketika beban meningkat, kecenderungan yang terjadi adalah penurunan kecepatan putar mesin akibat peningkatan torsi beban. *Governor* akan merespons kondisi tersebut dengan menambah suplai bahan bakar sehingga daya mekanik meningkat dan kecepatan kembali ke nilai nominal. Sebaliknya, ketika beban menurun, *governor* akan mengurangi suplai bahan bakar untuk mencegah kenaikan kecepatan berlebih (*over-speed*).

Fungsi *Governor System* Secara umum, *governor system* memiliki dua fungsi utama, yaitu fungsi pengendalian (*control*) dan fungsi pengaman (*protection*).

a. Pengendalian Kecepatan (*Speed Control*)

Fungsi utama *governor* adalah menjaga kestabilan kecepatan putar mesin agar frekuensi generator tetap berada pada nilai nominal. Stabilitas frekuensi sangat penting karena deviasi frekuensi yang besar dapat menyebabkan gangguan pada peralatan listrik, menurunkan kualitas daya, bahkan menyebabkan pemadaman sistem (*blackout*).

b. Pengaturan Beban (*Load Control*)

Governor berperan dalam menyesuaikan daya keluaran mesin terhadap perubahan beban sistem. Pada operasi paralel beberapa unit pembangkit, *governor* juga berfungsi dalam pembagian beban (*load sharing*) antar unit sehingga operasi sistem menjadi lebih efisien dan stabil.

c. Pengendalian Frekuensi Sistem

Governor merupakan bagian dari pengendalian frekuensi primer (*primary frequency control*). Respons cepat governor terhadap perubahan beban membantu menjaga keseimbangan antara daya pembangkitan dan daya beban dalam sistem tenaga listrik.

d. Fungsi Pengaman (*Protection Function*)

Selain sebagai sistem pengendali, governor juga memiliki fungsi pengaman untuk mencegah kerusakan mesin akibat kondisi operasi yang tidak normal, antara lain:

- 1) *Overspeed protection*, yaitu perlindungan terhadap kecepatan putar berlebih yang dapat terjadi saat beban tiba-tiba hilang.
- 2) *Overload protection*, yaitu pembatasan suplai bahan bakar ketika mesin mengalami beban berlebih.
- 3) *Emergency shutdown (trip)*, yaitu penghentian operasi mesin secara otomatis pada kondisi kritis untuk mencegah kerusakan yang lebih parah.

2.3.8 Sistem Kontrol dan Proteksi (*Control and Protection System*)



Gambar 2.18 Sistem Kontrol dan Proteksi (*Control and Protection System*)

Sumber Gambar: (Pribadi)

Sistem kontrol dan proteksi merupakan pusat kendali operasi PLTD. Sistem ini memantau, mengatur, dan melindungi mesin diesel serta generator dari potensi gangguan operasional atau kerusakan mekanis.

Komponen utama meliputi:

- a. Panel Kontrol (*Control Panel*): Mengatur fungsi start/stop mesin, sinkronisasi generator, serta memantau parameter seperti tegangan, arus, dan frekuensi.
- b. Sensor: Mendeteksi kondisi suhu, tekanan oli, getaran, dan parameter penting lainnya untuk mencegah kegagalan dini.
- c. Pemutus Sirkuit (*Circuit Breaker*): Melindungi sistem listrik dari arus lebih, hubung singkat, atau beban berlebih (*overload*).

Fungsi utama sistem kontrol dan proteksi: memastikan operasi mesin dan generator berlangsung aman, stabil, dan efisien, serta mencegah kerusakan fatal akibat gangguan teknis atau kelalaian operasional.

2.4 Jenis Perawatan / Pemeliharaan

Penerapan *Preventive Maintenance* Mesin Diesel di PLTD

Pemeliharaan (*maintenance*) adalah kegiatan yang dilakukan secara terus-menerus untuk menjaga agar suatu peralatan atau mesin dapat berfungsi dengan andal, efisien, serta mencapai umur operasi yang diharapkan. Tujuan utama pemeliharaan di pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) adalah:

- a. Menjamin keandalan operasi pembangkit. (Nugroho, 2022)
- b. Menjaga mutu daya listrik yang dihasilkan agar tetap stabil (tegangan, frekuensi, dan daya).
- c. Menekan biaya operasi dan pemeliharaan seminimal mungkin.
- d. Memperpanjang umur teknis komponen mesin dan generator.

2.4.1 *Corrective Maintenance (CM)*

Corrective maintenance (CM) adalah jenis Perawatan reaktif yang dilakukan setelah kerusakan atau kegagalan terjadi pada sebuah aset untuk mengembalikannya ke kondisi operasional normal. Ini berbeda dengan pemeliharaan preventif, yang dilakukan secara berkala sebelum kerusakan terjadi. Contohnya adalah mengganti komponen yang rusak setelah mesin berhenti mendadak atau memperbaiki kerusakan yang ditemukan saat pemeriksaan rutin

2.4.2 *Preventive Maintenance (PM)*

Preventive Maintenance (PM) adalah tindakan perawatan rutin yang terjadwal untuk mencegah kerusakan tak terduga pada peralatan atau aset, serta menjaga kinerjanya secara optimal. Tujuannya adalah untuk meminimalkan downtime (waktu henti), menghemat biaya perbaikan darurat, meningkatkan efisiensi, dan memperpanjang usia pakai peralatan. Contoh aktivitas PM meliputi inspeksi, pembersihan, pelumasan, dan penggantian suku cadang secara berkala

2.4.3 *Predictive Maintenance (PdM)/ Condition Based Maintenance (CBM)*

Predictive Maintenance (PdM) atau Condition Based Maintenance (CBM) adalah strategi perawatan modern yang memantau kondisi peralatan secara terus-menerus untuk mengidentifikasi kerusakan sebelum terjadi kegagalan total. CBM memantau kondisi aktual secara real-time dan melakukan pemeliharaan saat indikator tertentu menunjukkan penurunan kinerja. Sementara itu, PdM adalah strategi yang lebih canggih karena menggunakan data dan algoritma prediktif untuk memprediksi kapan pemeliharaan dibutuhkan di masa depan, bukan hanya bereaksi terhadap kondisi saat ini. (Harindah, n.d.)

2.5 Konsep Preventive Maintenance (PM)

Definisi dan Tujuan

1. Pemeliharaan Preventif

Definisi: Kegiatan perawatan yang dilakukan secara rutin dan terjadwal untuk mencegah kerusakan sebelum terjadi. (Alfalah et al., 2018)

Tujuan:

- a. Mencegah kerusakan yang tidak terduga.
- b. Mengurangi downtime (waktu henti produksi).
- c. Memperpanjang usia pakai mesin dan peralatan.
- d. Meningkatkan efisiensi operasional.

2. Jenis Perawatan Preventif

A. Time Based Maintenance (TBM)

- 1) Definisi: Perawatan yang dilakukan berdasarkan jadwal waktu tetap, seperti mingguan, bulanan, atau tahunan, tanpa memandang kondisi aktual peralatan.
- 2) Contoh: Mengganti oli mesin setiap 6 bulan.
- 3) Keunggulan: Sederhana dan mudah diterapkan karena tidak memerlukan data atau alat pemantauan khusus.
- 4) Keterbatasan: Mungkin menyebabkan pemeliharaan yang tidak perlu jika peralatan masih dalam kondisi baik, atau tidak mencegah kerusakan jika keausan lebih cepat dari perkiraan.

B. Usage Based Maintenance (UBM)

- 1) Definisi: Perawatan yang dijadwalkan berdasarkan jumlah penggunaan atau output, seperti jam operasi, jumlah siklus, atau jarak tempuh.

- 2) Contoh: Mengganti filter setelah 500 jam kerja atau menyervis mobil setelah menempuh 10.000 km.
- 3) Keunggulan: Lebih akurat daripada TBM karena memperhitungkan beban kerja aktual mesin.
- 4) Keterbatasan: Memerlukan pencatatan yang akurat mengenai penggunaan peralatan.

2.6. Faktor-Faktor Utama yang Memengaruhi Efisiensi PLTD

Faktor utama yang memengaruhi efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) berkaitan dengan kinerja pembakaran di mesin diesel, kondisi mekanis mesin, dan cara pembebanan unit. Secara umum, efisiensi PLTD adalah perbandingan antara energi listrik yang dihasilkan (*output*) dengan energi kimia dari bahan bakar yang dikonsumsi (*input*). Faktor-faktor utama tersebut antara lain sebagai berikut.

2.6.1 Kualitas Bahan Bakar

Kualitas bahan bakar merupakan faktor yang paling krusial.

- a. Nilai Kalor (*Heating Value*): Semakin tinggi nilai kalor bahan bakar (misalnya, per 1 liter), semakin besar energi yang tersedia untuk diubah menjadi listrik, sehingga efisiensi termal cenderung lebih baik. (Djohari, 2020)
- b. Angka Setana (*Cetane Number*): Angka setana yang memadai memastikan penyalaan bahan bakar yang cepat dan sempurna dalam ruang bakar, menghasilkan pembakaran yang lebih efisien.
- c. Kandungan Air dan Kotoran: Bahan bakar yang terkontaminasi (air, sedimen) akan mengganggu proses pembakaran dan menyebabkan penyumbatan pada sistem injeksi, yang secara drastis menurunkan efisiensi.

2.6.2 Kondisi Mesin dan Perawatan (*Maintenance*)

Kondisi fisik dan mekanis mesin diesel sangat menentukan efisiensi konversi energi.

- a. Kompresi Ruang Bakar: Kebocoran kompresi (akibat keausan ring piston, liner, atau katup) akan menurunkan tekanan dan suhu di ruang bakar, membuat pembakaran tidak sempurna dan mengurangi tenaga yang dihasilkan.
- b. Sistem Injeksi Bahan Bakar: Pengaturan waktu injeksi (*injection timing*) dan kondisi *nozzle* harus presisi. Jika injeksi terlalu cepat atau terlambat, atau *nozzle* tersumbat, pembakaran menjadi tidak optimal.
- c. Sistem Pelumasan: Kualitas dan kuantitas oli pelumas yang buruk akan meningkatkan gesekan antar komponen bergerak, menghabiskan energi mekanik yang seharusnya diubah menjadi listrik.
- d. Turbocharger & Intercooler: Kinerja turbocharger yang optimal memastikan suplai udara bertekanan ke mesin, yang sangat penting untuk pembakaran efisien. Perawatan *intercooler* mencegah udara masuk yang terlalu panas.

2.6.3 Beban Operasi Mesin

PLTD memiliki efisiensi terbaik pada tingkat beban tertentu, biasanya antara 75% hingga 90% dari kapasitas nominalnya.

- a. Operasi Beban Parsial (*Low Load*): Mesin diesel yang dioperasikan pada beban sangat rendah (misalnya di bawah 50%) cenderung memiliki konsumsi bahan bakar spesifik (*Specific Fuel Consumption* - SFC) yang lebih tinggi, yang berarti efisiensi menurun.
- b. Faktor Daya Beban (*Load Power Factor*): Faktor daya beban yang buruk (jauh dari 1) akan meningkatkan rugi-rugi daya pada sistem dan dapat menyebabkan konsumsi bahan bakar yang lebih tinggi pada *output* daya aktif yang sama.

2.6.4 Sistem Pendukung Lain

Kinerja sistem pendukung juga memengaruhi efisiensi secara tidak langsung.

- a. Sistem Pendinginan: Jika suhu pendingin terlalu rendah atau terlalu tinggi,

kinerja mesin akan terganggu. Suhu yang terkontrol membantu menjaga viskositas oli dan meminimalkan kerugian panas.

- b. Sistem Udara Masuk: Filter udara yang kotor membatasi jumlah udara bersih ke mesin, menyebabkan pembakaran kaya bahan bakar dan tidak efisien.
- c. Kondisi Generator: Efisiensi generator itu sendiri (rugi-rugi tembaga dan besi) akan memengaruhi efisiensi keseluruhan PLTD, meskipun umumnya generator memiliki efisiensi yang sangat tinggi.

2.6.5 Pemeliharaan Rutin (*Preventive Maintenance Routine*)

Tabel 2.19 Jadwal PM mesin diesel PLTD

Kode Pemeliharaan	Periode Waktu	Jam Operasi	Kegiatan Utama
P0	Harian	24 jam	Pemeriksaan visual, level oli, temperatur, dan kebocoran
P1	Mingguan	125 jam	Pengujian sistem pendingin, pelumasan, dan bahan bakar
P2	Dua Mingguan	250 jam	Pengekangan tekanan oli dan saringan
P3	Bulanan	500 jam	Pengangkatan filter dan saringan udara
P4	Triwulan	1.500 jam	Kalibrasi sensor, dan pengecekan baut
P5	Semesteran	3.000 jam	Kalibrasi intercooler, radiator, dan oil cooler

P6	Top Overhaul 1	6.000 jam	Pembersihan silinder, injektor, dan turbocharger
P7	Semi Overhaul (SO)	12.000 jam	
P8	Major Overhaul (MO)	24.000 jam	Penggantian komponen utama mesin (bearing, liner, piston)

2.6.6 Pemeliharaan Berkala/Periodik (Overhaul Maintenance)

Pemeliharaan periodik atau *Overhaul* dilakukan berdasarkan jam operasi (*Operating Hour*) dan rekomendasi pabrikan mesin diesel. Tujuan dari *overhaul* adalah untuk mengembalikan performa mesin ke kondisi optimal setelah jangka waktu operasi tertentu.(Harindah, n.d.)

Tabel 2.20 Interval Pemeliharaan Berkala

JENIS OVERHAUL	INTERVAL WAKTU/JAM OPERASI	KODE PEMELIHARAAN
Top Overhaul	6.000 jam	P6
Semi Overhaul	12.000 jam	P7
Major Overhaul	24.000 jam	P8

2.7 Rumus Perhitungan

Rumus utama untuk perhitungan Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) adalah Efisiensi Termal (*Thermal Efficiency*). Rumus ini membandingkan energi listrik yang dihasilkan (*output*) dengan energi panas yang masuk dari bahan bakar (*input*) (Djohari, 2020)

2.7.1 Rumus Efisiensi Termal PLTD

Efisiensi PLTD (biasanya dinyatakan dalam persen) dihitung dengan membandingkan daya listrik keluaran terhadap energi yang terkandung dalam bahan bakar yang dikonsumsi per satuan waktu.

$$\eta_{th} = \frac{P_{out}}{Q_{in}} \times 100\% \dots \dots \dots (1)$$

- η_{th} = Efisiensi termal PLTD (%)
- P_{out} = Daya keluaran mesin/generator (kW atau kJ/s)
- Q_{in} = Laju energi panas yang masuk dari bahan bakar (kW atau kJ/s)

2.7.2 Rumus Persamaan Efisiensi Pembakaran dan Konsumsi Bahan Bakar

Meskipun bukan rumus efisiensi secara langsung, *SFC* adalah indikator kunci kinerja PLTD yang berbanding terbalik dengan efisiensi. Semakin rendah nilai *SFC*, semakin efisien mesin tersebut. (Djohari, 2020)

SFC mengukur berapa banyak bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan setiap satuan daya listrik.

Untuk mengevaluasi efisiensi energi, digunakan dua tingkat efisiensi utama :

efisiensi pembakaran (η_{-c}) dan efisiensi termal (η_{-th}).

a. Efisiensi Pembakaran

$$\eta_c = \frac{Q_{aktual}}{Q_{teoritis}} = \frac{m'_{udara} \times (Y_{O2,in} - Y_{O2,out}) \times h_c}{m'_{bb} \times LHV}$$

dengan:

- a. m'_{udara} = laju aliran massa udara (kg/s)
- b. $Y_{O2,in}$ dan $Y_{O2,out}$ = fraksi mol oksigen masuk dan keluar
- c. h_c = entalpi pembakaran per mol O_2
- d. m'_{bb} = laju bahan bakar (kg/s)
- e. LHV = nilai kalor bawah bahan bakar (kJ/kg)

Persamaan ini menggambarkan seberapa efektif oksigen digunakan dalam proses pembakaran.

b. Efisiensi Termal (η_{th})

$$\eta_{th} = \frac{P_{out}}{m'_{bb} \times LHV}$$

dimana:

- P_{out} = daya keluaran poros (kW)
 - $m'_{bb} \times LHV$ = daya input bahan bakar (kW)
- Jika dikaitkan dengan konsumsi bahan bakar spesifik (BSFC):

$$\eta_{th} = \frac{3600}{BSFC \times LHV}$$

Keterangan:

- $BSFC$ = konsumsi bahan bakar spesifik (kg/kWh)
- LHV dalam kJ/kg
- Konstanta 3600 mengubah kWh ke kJ

$$SFC = \frac{\text{Masa Bahan Bakar yang digunakan}}{\text{Energi yang dihasilkan}}$$

Jika $BSFC = 0,23 \text{ kg/kWh}$ dan $LHV = 42.700 \text{ kJ/kg}$

$$\eta_{th} = \frac{3600}{0,23 \times 42700} = 0,37 = 37\%$$

2.7.3 Mean Time Between Failures (MTBF)

MTBF digunakan untuk mengetahui rata-rata waktu operasi mesin antara dua kegagalan.

$$MTTR = \frac{\text{Total Waktu Operasi}}{\text{Jumlah kegagalan}}$$

$$MTTR = \frac{720}{4} = 180 \text{ jam}$$

2.7.4. Mean Time To Repair (MTTR)

MTTR menunjukkan rata-rata waktu yang diperlukan untuk memperbaiki mesin setelah terjadi kerusakan.

$$MTTR = \frac{\text{Total waktu perbaikan}}{\text{Jumlah kegagalan}}$$

$$MTTR = \frac{20}{4} = 5 \text{ jam}$$

2.7.5. Availability (Ketersediaan Mesin)

Menunjukkan tingkat kesiapan mesin untuk beroperasi.

$$\text{Availability} = \frac{\text{Jam Operasi}}{\text{Jam Operasi} + \text{Downtime}} \times 100\%$$

$$\text{Availability} = \frac{180}{180+5} \times 100\% = 97,29\%$$

2.7.6 Tujuan dan Manfaat Preventive Maintenance di PLTD

1. Meningkatkan keandalan (Reliability) mesin dan sistem pembangkit.
2. Menekan downtime akibat kerusakan mendadak (unscheduled outage).
3. Menjaga efisiensi bahan bakar (SFC rendah).
4. Menjamin kualitas daya listrik (power quality) tetap stabil.
5. Memperpanjang umur komponen utama (piston, bearing, turbocharger, dan generator).
6. Mengoptimalkan biaya operasional dengan mencegah perbaikan darurat.

Penerapan Preventive Maintenance pada mesin diesel PLTD merupakan langkah penting untuk menjaga keandalan operasi sistem tenaga listrik. Dengan jadwal pemeliharaan rutin dan berkala yang disiplin (P0–P8), performa mesin dapat dijaga tetap optimal, efisiensi termal tinggi, serta umur teknis mesin sesuai standar pabrikan. Langkah ini juga menjadi indikator profesionalisme pengelolaan pembangkit listrik berbasis standar PLN dan ISO 9001:2015 dalam aspek *Operation and Maintenance*. (Nugroho, 2022)