

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Relevan

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

1. Tentang Definisi dan Fungsi *Turbocharger*

DIO (2024) dalam penelitiannya menjelaskan bahwa *turbocharger* merupakan komponen penting dalam sistem penggerak kapal yang berperan dalam meningkatkan efisiensi dan kinerja mesin induk. *turbocharger* dioperasikan menggunakan energi panas yang dipindahkan dari gas buang, di mana sebagian kecil dari energi panas total yang ada dalam bahan bakar dikeluarkan bersamaan dengan gas buang ketika massa jenis udara meningkat. Proses ini memanfaatkan energi dalam gas buang untuk menggerakkan turbin gas yang selanjutnya menggerakkan kompresor, yang berfungsi untuk memampatkan udara yang masuk ke dalam silinder, meningkatkan tekanan dan volume udara yang tersedia untuk proses pembakaran.

2. Analisis Getaran untuk Monitoring Kondisi *turbocharger*

Penelitian tentang aplikasi vibrodiagnostik untuk monitoring kondisi *turbocharger* telah banyak dikembangkan. F. Tóth et al. (2025) melakukan studi tentang penerapan analisis getaran untuk menilai kondisi operasional *turbocharger* pada mesin pembakaran internal. Penelitian ini menggunakan *vibration* meter Lutron BVB-8207SD dan mesin uji CIMAT Turbo Test Pro untuk mengukur dan menganalisis getaran pada tiga *turbocharger* dengan tahapan siklus hidup berbeda. Hasilnya menunjukkan korelasi yang signifikan antara karakteristik getaran dan kondisi teknis *turbocharger*, di mana peningkatan getaran pada pita frekuensi tertentu mengindikasikan keausan bantalan, sedangkan getaran yang tidak merata menunjukkan masalah keseimbangan rotor. Pendekatan ini terbukti efektif untuk deteksi dini masalah seperti ketidakseimbangan, *misalignment*, dan kegagalan bantalan sebelum terjadi kerusakan fatal.

Studi serupa dilakukan oleh Sandoval et al. (2022) yang menganalisis respons getaran dan akustik pada kegagalan kompresor *turbocharger*. Dengan menguji

empat kompresor sentrifugal dalam kondisi blade sempurna dan bercacat, penelitian ini menemukan bahwa amplitudo getaran pada kompresor dengan blade bermasalah berkorelasi dengan frekuensi subsinkron. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa perubahan amplitudo frekuensi pada rentang 0,6 kHz hingga 1,6 kHz dapat menjadi indikator awal kegagalan blade kompresor. Penelitian ini merekomendasikan pengembangan alat diagnostik dengan transduser akselerasi dan filter frekuensi bandpass untuk identifikasi kegagalan operasional.

3. Metode Diagnosis untuk *Turbocharger* Kelautan dan Otomotif

Demirel (2020) menerapkan metode *Fault Tree Analysis (FTA)* untuk mengidentifikasi dan menilai kegagalan kritis pada sistem *turbocharger* mesin diesel kelautan, di mana keandalan operasional menjadi prioritas utama. Penelitian ini berhasil memetakan berbagai mode kegagalan dan hubungan sebab-akibatnya dalam struktur pohon kesalahan, sehingga memudahkan identifikasi akar masalah.

Sementara itu, Dong, Wang, and Liu (2023) mengembangkan metode diagnosis kesalahan untuk *turbocharger* kelautan menggunakan pendekatan transfer learning. Untuk mengatasi mahalnya biaya simulasi kegagalan dan sulitnya memperoleh data sampel kesalahan, mereka mengembangkan model dinamika multi-bodi untuk memperoleh sinyal getaran *turbocharger* secara simulasi. Hasil validasi menunjukkan bahwa dengan 40 sampel, akurasi model diagnosis mencapai 96%. Metode ini mampu melakukan transfer informasi diagnosis antara *turbocharger* aktual dan model simulasi, sehingga sangat berguna ketika data kegagalan aktual terbatas.

Payri, F., Luján, J. M., & Guardiola (2001) dari *Universidad Politécnica de Valencia* memperkenalkan teknik deteksi kegagalan pembakaran pada mesin diesel *turbocharger* berdasarkan pengukuran kecepatan putaran *turbocharger*. Berbeda dengan metode konvensional yang berbasis kecepatan poros engkol atau getaran mesin, pendekatan ini mampu tidak hanya mendeteksi kegagalan pembakaran tetapi juga mengidentifikasi silinder yang bermasalah. Teknik ini berlaku untuk seluruh rentang operasi mesin, termasuk pada kecepatan dan beban tinggi.

4. Pemodelan dan Diagnosis Berbasis Sistem Identifikasi

Sebuah penelitian disertasi oleh Payri, F., Luján, J. M., & Guardiola (2001) (dalam publikasi terpisah) menginvestigasi penerapan teknik *system identification*

dan analisis sinyal getaran untuk monitoring performa mesin diesel *turbocharged*. Pendekatan ini menggunakan model *ARMAX (Auto-Regressive Moving Average with Exogenous Input)* untuk merepresentasikan hubungan antara torsi yang diminta sebagai input dan kecepatan *turbocharger* sebagai *output*. Model sederhana ini dapat mendeteksi penyimpangan dari kondisi operasi normal yang mengindikasikan adanya kesalahan pada sistem.

5. Pengendalian Toleransi Kesalahan (Fault Tolerant Control)

Zhang et al. (2021) mengembangkan algoritma *fault tolerant control* untuk sistem jalur udara mesin diesel dengan mempertimbangkan ketidakpastian parameter, gangguan eksternal, dan kesalahan aktuator. Penelitian ini merancang *disturbance observer* untuk mengestimasi ketidakpastian dan mendesain hukum kontrol berdasarkan *sliding mode control* yang diadaptasi. Pendekatan ini relevan untuk pengembangan sistem diagnosis dan pemeliharaan prediktif pada *turbocharger*.

Penelitian terbaru oleh Wu, Zhang, and Li (2024) mengusulkan strategi *fault tolerant control* untuk sistem jalur udara mesin diesel *turbocharged* dengan mempertimbangkan gangguan eksternal yang *matched* dan *mismatched*, serta mode kesalahan aditif dan *loss of effectiveness* pada subsistem EGR dan VGT. Pendekatan ini menggunakan *disturbance observer* berbasis H_∞ dan integral *sliding mode control* untuk menjamin stabilitas sistem meskipun terjadi gangguan.

6. Analisis Keandalan Mesin Diesel setelah Top Overhaul (ITPLN)

Ramadhan and Sudirmanto (2024) dari Program Studi S1 Teknik Mesin ITPLN melakukan penelitian tentang analisis keandalan mesin diesel Unit 2 UL PLTD Panangkalan sebelum dan sesudah *Top overhaul*. Penelitian ini menggunakan data tekanan pembakaran dan vibrasi silinder sebagai indikator keandalan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa setelah *Top overhaul*, tekanan puncak pembakaran menjadi lebih seragam dengan selisih 22,99 bar, jauh lebih baik dibandingkan sebelum *overhaul* yang mencapai 48,9 bar. Temperatur gas buang tertinggi juga turun menjadi 460°C, mengindikasikan kemampuan mesin yang lebih baik dalam memenuhi permintaan beban. Penelitian ini sangat relevan karena menggunakan parameter keandalan yang serupa dan membahas pengaruh tindakan pemeliharaan terhadap performa mesin diesel PLTD.

7. Pemeliharaan Sistem Bahan Bakar Mesin Diesel (STT PLN)

Bahar & Rusjdi (2011) dari Program Studi D3 Teknologi Mesin STT-PLN melakukan penelitian tentang pemeliharaan sistem bahan bakar mesin diesel Nissan SD25. Penelitian ini membahas komponen-komponen sistem bahan bakar, terutama *injection pump* dan *nozzle*, yang rentan terhadap kebocoran akibat panas dan kontaminasi bahan bakar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemeliharaan rutin pada sistem bahan bakar sangat penting untuk menjaga performa mesin diesel, termasuk membersihkan *nozzle* dan mengganti komponen yang aus. Penelitian ini relevan karena sistem bahan bakar yang terawat dengan baik akan mendukung kinerja optimal *turbocharger*.

8. Kesenjangan Penelitian dan Posisi Penelitian Ini

Penelitian-penelitian di atas umumnya berfokus pada deteksi getaran L. Tóth, Kovács, and Szabó (2025) dan Sandoval et al. (2022), diagnosis kegagalan Demirel (2020) dan Dong et al. (2023) atau DIO (2024). Namun, belum ada penelitian yang secara spesifik:

- a) Mengintegrasikan *RCA (fishbone)*, *FMEA*, analisis *Weibull*, dan simulasi keandalan dalam satu kerangka *RCFA*.
- b) Menggunakan data operasional *real* dari PLTD di lingkungan pesisir terpencil.
- c) Menganalisis mesin MTU 12V 2000 G63 dengan data manual *book* dan operasional lengkap.
- d) Merancang strategi pemeliharaan berbasis kondisi (*CBM*) dengan level P0-P6 untuk mengatasi tantangan logistik di daerah terpencil.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan menganalisis pengaruh pemeliharaan *turbocharger* terhadap keandalan mesin Unit 1 MTU 12V 2000 G63 di PLTD Tua Pejat, serta merancang strategi pemeliharaan berbasis kondisi yang sesuai dengan karakteristik operasi di lingkungan pesisir Mentawai.

2.2 Landasan Teori

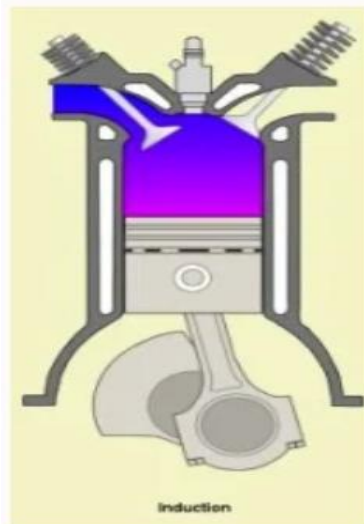
2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)

A. Pengertian dan Prinsip Kerja PLTD

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) adalah suatu instalasi pembangkit listrik yang mengubah energi kimia dari bahan bakar minyak (solar) menjadi energi listrik melalui proses pembakaran internal dalam mesin diesel. Prinsip kerjanya berdasarkan Siklus Diesel, yang meliputi empat langkah: langkah isap, langkah kompresi, langkah usaha, dan langkah buang.

B. Prinsip Kerja Mesin Diesel 4 Langkah

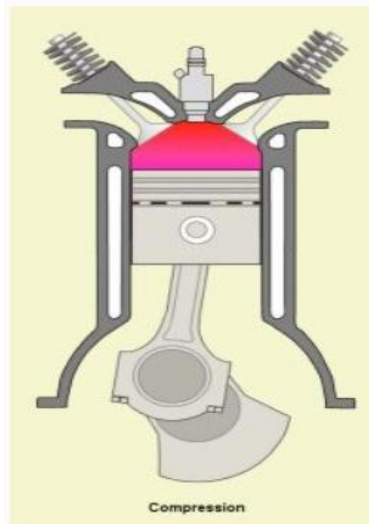
1. Langkah Isap (Kompresi Isobarik - teoritis): Piston bergerak dari TMA ke TMB, katup isap terbuka, dan udara murni dihisap masuk ke dalam silinder.



Langkah Hisap

Gambar 2. 1 Langkah Hisap

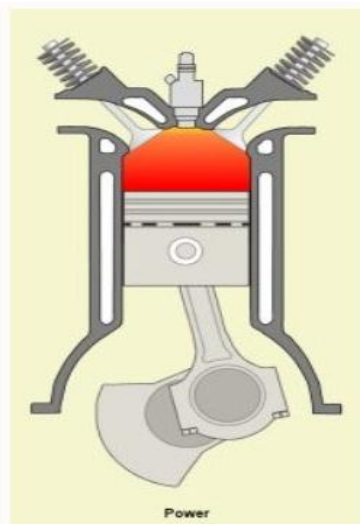
2. Langkah Kompresi (Kompresi Adiabatik): Katup isap dan buang tertutup. Piston bergerak dari TMB ke TMA, mengompresi udara hingga tekanan dan temperatur sangat tinggi (di atas temperatur nyala bahan bakar).



Langkah Kompresi

Gambar 2. 2 Langkah Kompresi

3. Langkah Tenaga (Pembakaran dan Ekspansi): Sesaat sebelum piston mencapai TMA, bahan bakar disemprotkan ke dalam ruang bakar oleh injector. Karena temperatur udara sangat tinggi, bahan bakar terbakar secara spontan. Tekanan pembakaran ini mendorong piston kembali ke TMB, menghasilkan tenaga mekanik pada poros engkol (*crankshaft*).



Langkah Tenaga

Gambar 2. 3 Langkah Tenaga

4. Langkah Buang: Piston bergerak kembali dari TMB ke TMA, katup buang terbuka, dan gas hasil pembakaran didorong keluar menuju sistem pembuangan.



Gambar 2. 4 Langkah Buang

Pada mesin diesel 4 langkah, keempat proses ini terjadi dalam dua putaran poros engkol. Tenaga mekanik dari poros engkol inilah yang kemudian memutar generator untuk menghasilkan listrik.

C. Spesifikasi Teknis Mesin MTU 12V 2000 G63

Berdasarkan *Manual Book* MTU 12V 2000 G63 (2003), berikut adalah spesifikasi teknis mesin yang menjadi objek penelitian:

Tabel 2. 1 Spesifikasi Teknis Mesin MTU 12V 2000 G63

Parameter	Nilai
Model Mesin	12V 2000 G63
Konfigurasi Silinder	12 silinder V 90°
Bore	130 mm
Stroke	150 mm
Volume Langkah per Silinder	1,99 liter
Total <i>Displacement</i>	23,88 liter

Parameter	Nilai
<i>Compression Ratio</i>	16:1
Daya Kontinu (CP) - Group 3B	565 kW (CP) 1500 rpm
Daya Standby (FSP) - Group 3D	625 kW (FSP) 1500 rpm
Sistem Pendingin	<i>Air-cooled charge air</i>
Kapasitas Oli Mesin	77 liter (<i>initial filling</i>)
Kapasitas <i>Coolant</i> (HT)	90 liter
Tekanan Oli Operasi	6,2 - 7,5 bar
Temperatur Oli Operasi	88 - 98°C
Temperatur <i>Coolant Outlet</i>	95°C
Berat Mesin (<i>dry</i>)	2.490 kg

Sumber: MTU 12V 2000 G63 Use and Maintenance Manual, 2003, Hal. 33-37

D. Karakteristik Bahan Bakar Diesel

Kualitas bahan bakar sangat mempengaruhi kinerja, efisiensi, dan keandalan mesin diesel, termasuk komponen *turbocharger*. Parameter penting bahan bakar diesel antara lain:

1. Angka Setana (*Cetane Number*): Ukuran kecepatan pembakaran bahan bakar. Angka setana yang tinggi (minimal 48) memastikan pembakaran lebih sempurna, mesin halus, dan emisi rendah. Angka setana rendah menyebabkan *ignition delay* panjang, pembakaran tidak sempurna, dan mesin kasar.
2. Kandungan Sulfur: Kandungan sulfur yang tinggi (misal > 2500-3500 ppm) saat dibakar akan menghasilkan gas SO_x yang bersifat korosif, terutama jika bercampur dengan uap air. Ini mempercepat korosi pada komponen *turbocharger* sisi turbin dan sistem pembuangan. Selain itu, sulfur juga berkontribusi pada pembentukan kerak karbon.

3. Viskositas: Mempengaruhi pengabutan bahan bakar oleh injektor. Viskositas yang terlalu tinggi menyebabkan butiran bahan bakar kasar (sulit menguap), sementara terlalu rendah menyebabkan kebocoran pada pompa injeksi. Keduanya menyebabkan pembakaran tidak sempurna.
4. Titik Nyala (*Flash Point*): Suhu terendah di mana uap bahan bakar dapat menyala. Parameter ini penting untuk keselamatan penyimpanan dan penanganan.
5. Kandungan Air dan Sedimen: Air dapat menyebabkan korosi pada sistem bahan bakar dan merusak presisi komponen injeksi. Sedimen dapat menyumbat filter dan mempercepat keausan pada pompa dan injektor.
6. Titik Tuang (*Pour Point*) dan *Cloud Point*: Parameter penting untuk operasi di daerah dingin, menunjukkan suhu di mana bahan bakar mulai membeku atau membentuk kristal lilin yang dapat menyumbat filter.

Untuk MTU G63 memakai solar B40.

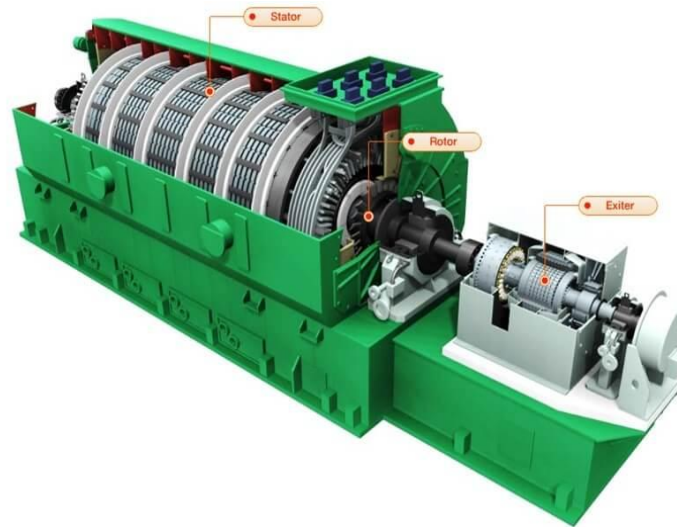
E. Komponen Utama PLTD

1. *Engine* (Mesin Diesel): Jantung dari PLTD, berfungsi sebagai penggerak utama. Terdiri dari blok silinder, kepala silinder, piston, *connecting rod*, dan *crankshaft*.



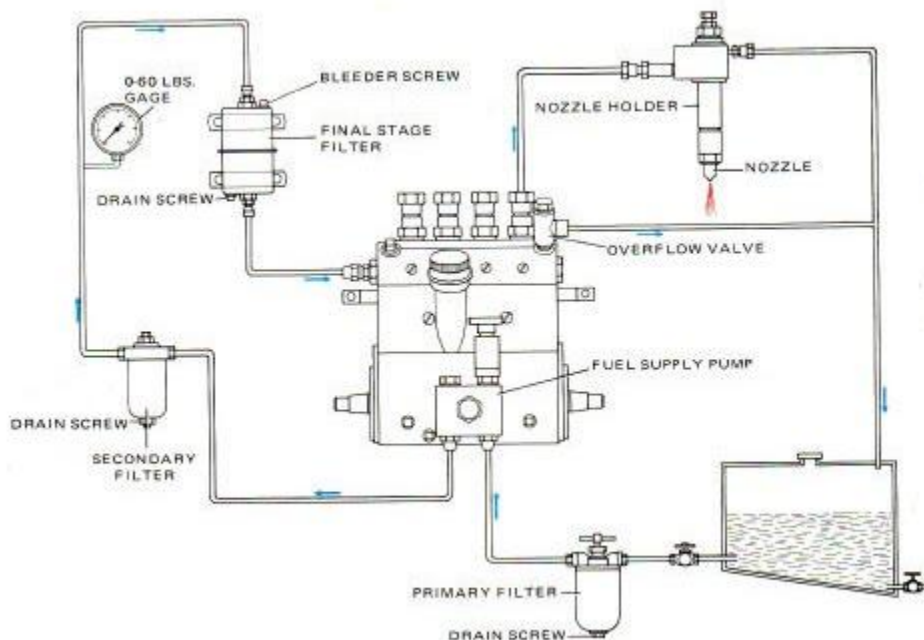
Gambar 2. 5 Mesin Diesel

2. Generator (Alternator): Mengubah energi mekanik dari putaran mesin menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik.



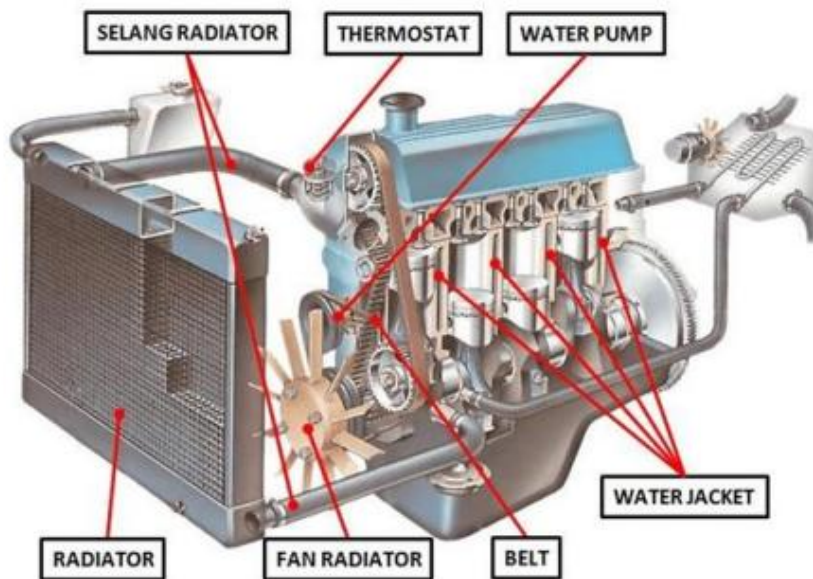
Gambar 2. 6 Generator

3. Sistem Bahan Bakar: Terdiri dari tangki harian, pompa transfer, filter, injektor, dan pompa injeksi. Berfungsi untuk menyimpan, menyaring, dan menyalurkan bahan bakar ke ruang bakar dengan tekanan tinggi.



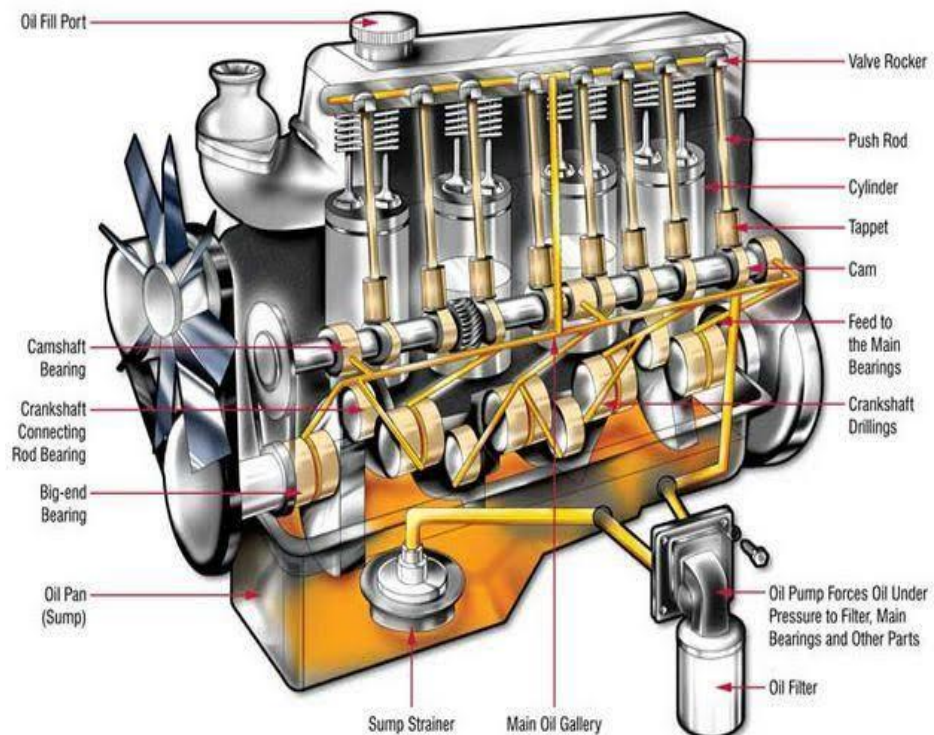
Gambar 2. 7 Sistem Bahan Bakar

4. Sistem Pendingin: Berfungsi menyerap panas berlebih dari mesin untuk mencegah *overheating*. Komponennya meliputi radiator, pompa air, kipas dan *thermostat*.



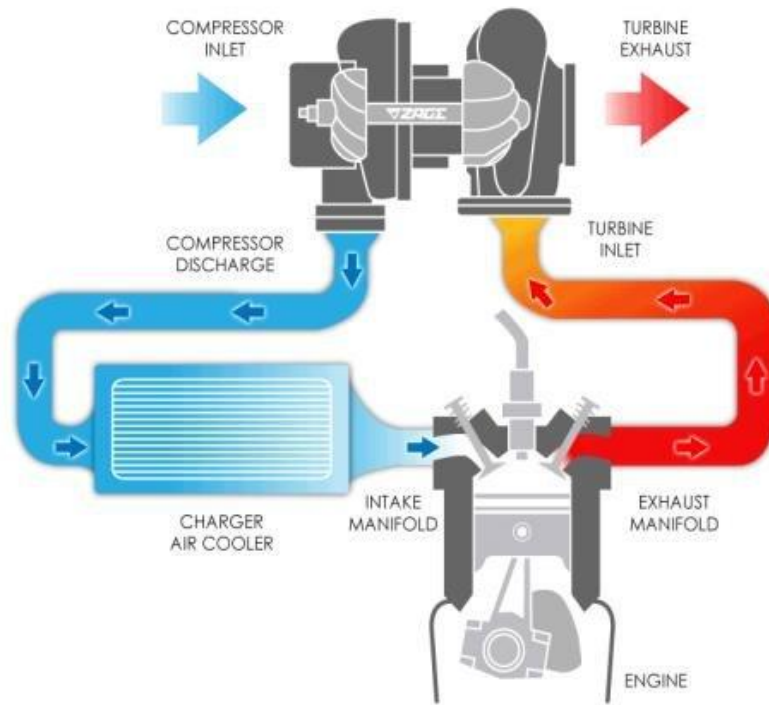
Gambar 2. 8 Sistem Pendingin

5. Sistem Pelumasan: Melumasi komponen yang bergesekan untuk mengurangi keausan dan panas. Terdiri dari pompa oli, filter oli, dan cooler oli.



Gambar 2. 9 Sistem Pelumasan

6. *Turbocharger*: Berfungsi untuk memampatkan gas masuk dengan memanfaatkan gas buang



Gambar 2. 10 *turbocharger*

7. Sistem Kontrol dan Panel Listrik: Berfungsi untuk mengatur operasi mesin (start, stop, kecepatan), proteksi terhadap gangguan, dan monitoring parameter operasi (tekanan oli, temperatur air, tegangan, frekuensi).



Gambar 2.11 Mesin PLTD Tuo Pejat

F. Karakteristik Operasi dan Efisiensi PLTD

1. Karakteristik Operasi: PLTD memiliki waktu *start* yang relatif cepat (beberapa menit), dapat beroperasi pada berbagai variasi beban, dan cocok untuk beban puncak maupun daerah terisolir. Namun, getaran dan tingkat kebisingannya tinggi.

2. Efisiensi: Efisiensi termal PLTD umumnya berkisar antara 30% - 40%. Efisiensi ini dipengaruhi oleh kondisi mesin, kualitas bahan bakar, sistem pendingin, dan besaran beban. Efisiensi tertinggi biasanya dicapai pada beban 70-80% dari kapasitas maksimal.

G. Faktor-faktor yang Memengaruhi Kinerja dan Keandalan Mesin Diesel

1. *Engine* (Mesin Diesel) - Kualitas Desain, Material, dan Perawatan Mekanis Sebagai jantung PLTD, (Departemen Teknik Mesin, Sekolah Vokasi Institut Teknologi PLN n.d.) kinerjanya ditentukan oleh:
 - a. Presisi Perakitan dan Keseimbangan: Kerataan kepala silinder, kelurusan *crankshaft*, dan keseimbangan putaran mesin sangat memengaruhi getaran, kebocoran, dan keausan dini.
 - b. Kualitas Material: Material blok silinder, ring piston, dan *bearing* yang tahan panas dan tekanan tinggi menentukan daya tahan dalam operasi terus-menerus. Kondisi Mekanis Internal: Keausan pada dinding silinder, ring piston, atau celah katup akan menyebabkan kompresi rendah, yang berakibat pada: Kesulitan *start*. Tenaga yang dihasilkan turun. Konsumsi bahan bakar dan oli yang meningkat (oli lolos ke ruang bakar). Asap putih/*blue smoke*.
2. Generator (Alternator) - Efisiensi Konversi Energi Kinerja mesin akan sia-sia jika generator tidak efisien.
 - a. Kondisi Insulasi Gulungan: Insulasi yang sudah tua atau rusak karena panas dapat menyebabkan hubung singkat, mengurangi *output* daya dan berpotensi merusak generator.
 - b. Kesejajaran (*Alignment*) dengan Mesin: Pemasangan *coupling* antara mesin dan generator yang tidak sejajar menyebabkan getaran berlebihan dan keausan pada bearing kedua peralatan.
 - c. Eksitasi dan *Voltage* Regulator: Sistem yang menjaga tegangan *output* stabil sangat penting untuk kualitas daya listrik. Kegagalan sistem ini menyebabkan tegangan naik-turun yang dapat merusak peralatan pelanggan.
3. Sistem Bahan Bakar - Kualitas dan Kebersihan

- a. Kualitas Bahan Bakar: Penggunaan bahan bakar dengan *Cetane Number* rendah, kadar sulfur tinggi, atau terkontaminasi air dan kotoran (Setyo Wibowo and Rekan n.d.) akan menyebabkan:
 - 1) Injektor dan Pompa Injeksi Rusak: Komponen presisi ini sangat rentan terhadap gesekan dan karat akibat kotoran.
 - 2) Pembakaran Tidak Sempurna: Menghasilkan tenaga kurang, asap hitam (*smoke*), dan kerak karbon di ruang bakar dan katup.
 - b. Kinerja Filter Bahan Bakar: Filter yang tersumbat akan membatasi aliran bahan bakar, membuat mesin kekurangan bahan bakar dan tidak bisa menghasilkan daya maksimal.
 - c. Kalibrasi Injektor dan *Timing* Injeksi: Waktu dan besarnya bahan bakar yang disemprotkan harus tepat. *Timing* yang salah mengurangi efisiensi dan meningkatkan emisi.
4. Sistem Pendingin - Pengendalian Suhu Operasi
- Mesin diesel menghasilkan panas sangat besar. Sistem pendingin yang gagal akan menyebabkan kerusakan fatal dalam hitungan menit.
- a. Kualitas Cairan Pendingin (*Coolant*): *Coolant* bukan hanya air, tetapi campuran dengan inhibitor untuk mencegah karat dan kavitasi pada *water jacket*. Penggunaan air biasa akan menyebabkan kerak dan karat.
 - b. Kondisi Radiator dan Kipas: Sirip radiator yang tersumbat debu atau kipas yang tidak berputar optimal mengurangi kemampuan pembuangan panas, menyebabkan mesin *overheat*.
 - c. *Thermostat* yang Macet: *Thermostat* mengatur sirkulasi *coolant*. Jika macet tertutup, mesin akan cepat *overheat*. Jika macet terbuka, mesin sulit mencapai suhu operasi ideal sehingga boros bahan bakar dan terjadi kondensasi dalam oli.
 - d. Pompa Air yang Lemah: Sirkulasi *coolant* yang tidak lancar menyebabkan *hot spot* (area panas lokal) yang dapat merusak kepala silinder.
5. Sistem Pelumasan - Penghambat Keausan
- a. Kualitas dan Viskositas Oli: Oli yang salah spesifikasi (terlalu encer/terlalu kental) atau sudah aus (kehilangan aditif) tidak dapat membentuk film pelindung yang memadai pada komponen yang bergesekan.

- b. Kebersihan Oli: Filter oli yang tersumbat atau masa pakai oli yang terlampaui akan menyebabkan oli penuh dengan partikel logam dan jelaga (*soot*). Oli kotor ini menjadi amplas yang mengikis komponen internal mesin.
- c. Tekanan Oli: Pompa oli yang lemah atau kebocoran menyebabkan tekanan oli turun. Tekanan oli rendah adalah alarm bahaya yang dapat menyebabkan *keausan bearing crankshaft* (bab metal) yang mahal dan kerusakan total.

6. Sistem Kontrol dan Panel Listrik - Otak dan Sistem Saraf

Sistem ini memastikan mesin beroperasi dalam parameter yang aman dan efisien.

- a. *Governor*: Mengatur pasokan bahan bakar untuk menjaga kecepatan (RPM) mesin tetap stabil meskipun beban listrik berubah-ubah. *Governor* yang responsif menjaga frekuensi listrik output tetap stabil pada 50/60 Hz.
- b. Sensor dan Proteksi: Sensor (tekanan oli, temperatur air, tekanan bahan bakar) yang akurat dan sistem proteksi yang bekerja dengan cepat (*auto-shutdown*) adalah garis pertahanan terakhir untuk mencegah kerusakan besar. Contoh: Mesin mati otomatis saat tekanan oli hilang.
- c. Kalibrasi dan Koneksi: *Setting* yang salah atau koneksi yang kendur dapat menyebabkan pembacaan parameter yang tidak akurat, *leading to* operasi yang tidak optimal atau bahkan *shutdown* palsu.

2.2.2 Keandalan Mesin (*Reliability*)

A. Pengertian Keandalan dan Indikatornya

Keandalan (*Reliability*) didefinisikan sebagai probabilitas suatu komponen, peralatan, atau sistem dapat menjalankan fungsinya dengan memuaskan, dalam kondisi operasi tertentu, untuk periode waktu tertentu (Syahrudin 2013). Indikator keandalan antara lain:

1. *Availability* (Ketersediaan): Persentase waktu dimana sistem siap beroperasi.
2. *Failure Rate* (Tingkat Kegagalan): Frekuensi terjadinya kegagalan.
3. *Mean Time Between Failures (MTBF)*: Rata-rata waktu antar kegagalan.
4. *Mean Time To Repair (MTTR)*: Rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk perbaikan.

B. Parameter Keandalan

1. *MTBF (Mean Time Between Failures)*: Rata-rata waktu operasi antara dua kegagalan yang berurutan.

$$MTBF = (\text{Total Waktu Operasi}) / (\text{Jumlah Kegagalan})$$

2. *MTTR (Mean Time To Repair)*: Rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki sistem setelah kegagalan.

$$MTTR = (\text{Total Waktu Perbaikan}) / (\text{Jumlah Kegagalan})$$

3. *Availability (Ketersediaan)*: Probabilitas sistem tersedia untuk beroperasi pada saat dibutuhkan.

$$Availability = MTBF / (MTBF + MTTR)$$

4. *Reliability Function, R(t)*: Probabilitas sistem tetap beroperasi tanpa kegagalan hingga waktu (t). Untuk tingkat kegagalan konstan, $R(t) = e^{(-\lambda t)}$, dimana λ (lambda) adalah failure rate ($\lambda = 1/MTBF$).

C. Metode Analisis Keandalan

1. *Reliability Centered Maintenance (RCM)*

Reliability Centered Maintenance (RCM) adalah suatu proses untuk menentukan tindakan pemeliharaan yang paling efektif berdasarkan fungsi sistem, mode kegagalan, dan konsekuensinya. Moubray (1997) dalam bukunya yang menjadi rujukan utama *RCM* mendefinisikan *RCM* sebagai "suatu proses yang digunakan untuk menentukan apa yang harus dilakukan untuk memastikan bahwa setiap aset fisik terus berfungsi sesuai dengan yang diinginkan penggunaanya dalam konteks operasinya saat ini". Buku ini secara komprehensif membahas berbagai aspek *RCM* mulai dari pengenalan, fungsi dan kegagalan fungsional, *Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)*, konsekuensi kegagalan, hingga tugas pemeliharaan proaktif seperti preventive dan *predictive maintenance*. Pendekatan *RCM* telah banyak diadopsi di berbagai industri, termasuk sistem tenaga listrik, untuk mengoptimalkan frekuensi tugas pemeliharaan dan meningkatkan keandalan peralatan.

2. *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) adalah metode sistematis untuk mengidentifikasi potensi kegagalan dalam suatu desain, proses, atau sistem, beserta penyebab dan efeknya. D H Stamatis (2003) dalam bukunya yang

komprehensif tentang *FMEA* menjelaskan bahwa metode ini bertujuan untuk mengenali dan mengevaluasi potensi kegagalan serta dampaknya, mengidentifikasi tindakan yang dapat menghilangkan atau mengurangi peluang terjadinya kegagalan, dan mendokumentasikan proses tersebut. *FMEA* menggunakan pendekatan kuantitatif melalui *Risk Priority Number (RPN)* yang diperoleh dari perkalian tiga faktor: *Severity* (tingkat keparahan), *Occurrence* (tingkat kejadian), dan *Detection* (tingkat deteksi). Buku ini mencakup berbagai aspek *FMEA* mulai dari teori dasar hingga implementasi praktis, termasuk design *FMEA*, process *FMEA*, dan perhitungan *RPN*.

3. *Root Cause Analysis (RCA)* dengan *fishbone* Diagram

Root Cause Analysis (RCA) adalah pendekatan terstruktur untuk mencari akar penyebab fundamental dari suatu masalah, bukan hanya gejala permukaannya. Salah satu alat yang paling populer dalam *RCA* adalah diagram *fishbone* (juga dikenal sebagai diagram Ishikawa atau cause and effect diagram). Diagram ini pertama kali dikembangkan oleh Kaoru Ishikawa pada tahun 1943 dan digunakan untuk mengidentifikasi, mengeksplorasi, dan menampilkan secara grafis semua penyebab potensial yang berkontribusi terhadap suatu masalah. Dalam praktiknya, penyebab dikelompokkan ke dalam kategori utama yang sering disebut 6M: *Man* (manusia/tenaga kerja), *Machine* (mesin/peralatan), *Method* (metode/prosedur), *Material* (bahan baku), *Environment* (lingkungan), dan *Measurement* (pengukuran). Pendekatan ini banyak diterapkan dalam analisis keandalan komponen teknik, seperti yang ditunjukkan dalam penelitian tentang analisis keandalan pompa hidrolik menggunakan metode *fishbone* dan *lifetime prediction*.

4. Analisis *Weibull*

Distribusi *Weibull* banyak digunakan dalam analisis keandalan karena fleksibilitasnya dalam memodelkan berbagai perilaku kegagalan. Ebeling (2019) dalam bukunya *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering* edisi ketiga memberikan penjelasan komprehensif tentang distribusi *Weibull* dan aplikasinya dalam analisis keandalan. Fungsi keandalan untuk distribusi *Weibull* dinyatakan sebagai:

$$R(t) = e^{-(t/\eta)^\beta} \dots \dots \dots (1)$$

di mana:

- $R(t)$ = *Reliability* pada waktu t
- η = *Characteristic life* (parameter skala)
- β = *Shape* parameter (parameter bentuk)

Parameter bentuk β mengindikasikan perilaku kegagalan: jika $\beta < 1$ menunjukkan *infant mortality* (kegagalan awal), $\beta = 1$ menunjukkan kegagalan acak dengan laju konstan (eksponensial), dan $\beta > 1$ menunjukkan kegagalan karena aus (*wear out failure*). Buku Ebeling mencakup berbagai topik seperti model keandalan dasar, distribusi kegagalan, model laju kegagalan konstan dan bergantung waktu, keandalan sistem, desain untuk keandalan, serta analisis data kegagalan dan pengujian keandalan.

Penerapan analisis *Weibull* dalam dunia industri ditunjukkan oleh Furqon and Pramono (2025) dalam penelitian tentang analisis keandalan *Fuel Control* Unit pada pesawat Airbus 320-200. Penelitian ini menggunakan distribusi probabilitas *Weibull* sebagai dasar analisis reliabilitas, dimulai dari penentuan parameter shape (β) dan scale (η) melalui regresi linier, kemudian dilanjutkan dengan perhitungan nilai *mean time to failure (MTTF)*, keandalan (*reliability*), dan laju kegagalan (*failure rate*). Pendekatan serupa juga banyak digunakan dalam analisis keandalan komponen kritis di berbagai sektor industri, termasuk pompa hidrolik dan sistem permesinan lainnya.

2.2.3 Pemeliharaan dan Perawatan Mesin

A. Pengertian dan Tujuan Pemeliharaan

Pemeliharaan adalah kombinasi dari semua tindakan teknis dan administratif, termasuk tindakan pengawasan, yang dimaksudkan untuk mempertahankan atau mengembalikan suatu item ke dalam keadaan yang dapat melaksanakan fungsi yang disyaratkan (Standar SNI ISO 67038:2016) (PLN n.d.) . Tujuannya adalah untuk:

1. Mempertahankan keandalan dan ketersediaan peralatan.
2. Memperpanjang usia pakai aset.
3. Menjamin keselamatan operasi.
4. Mengoptimalkan biaya *lifecycle*.

B. Jenis-jenis Pemeliharaan

1. *Corrective Maintenance (CM)*: Pemeliharaan yang dilakukan setelah terjadi kegagalan. Tujuannya untuk mengembalikan kondisi peralatan ke keadaan semula. Bersifat reaktif.
2. *Preventive Maintenance (PM)*: Pemeliharaan yang dilakukan secara rutin dan terjadwal untuk mencegah terjadinya kegagalan. Dapat berdasarkan waktu (*Time-Based*) atau jam operasi (*Usage-Based*). Bersifat proaktif. (Paillin and Widiatmoko 2021)
3. *Predictive maintenance (PdM)*: Pemeliharaan yang dilakukan berdasarkan kondisi aktual peralatan, yang dipantau melalui inspeksi dan analisis data (getaran, temperatur, analisis oli). Memungkinkan intervensi dilakukan tepat sebelum kegagalan terjadi.
4. *Condition-Based Maintenance (CBM)*: Sering disamakan dengan *PdM*, *CBM* adalah subset dari *PdM* yang mengambil keputusan pemeliharaan berdasarkan data kondisi *real-time*.

C. Faktor-faktor yang Memengaruhi Efektivitas Pemeliharaan

1. Ketersediaan dan kompetensi tenaga teknis.
2. Ketersediaan suku cadang dan alat.
3. Kualitas sistem perencanaan dan penjadwalan.
4. Akurasi data historis peralatan.
5. Dukungan manajemen dan budaya kerja.

D. Konsep *Total Productive Maintenance (TPM)*

TPM adalah sistem pemeliharaan yang melibatkan semua karyawan, dari level *top management* hingga operator, untuk meningkatkan efektivitas peralatan dengan menghilangkan *six big losses* (enam kerugian besar), yaitu: kerusakan, pengaturan/penyesuaian, menganggur/penghentian kecil, penurunan kecepatan, cacat proses, dan penurunan hasil produksi.

E. Untuk Perawatan *turbocharger*, kita dapat mengadopsi level perawatan sebagai berikut:

1) P0 (*Operator Maintenance*):

Dilakukan oleh operator. Meliputi inspeksi visual harian (cek kebocoran oli, suara tidak normal, getaran rabaan), pencatatan parameter tekanan *boost* dan suhu gas buang dari panel.

2) P1 (*Basic Inspection* - 250 jam):

Inspeksi visual menyeluruh oleh mekanik. Memeriksa kebocoran, kekencangan baut, kondisi selang dan sambungan.

3) P2 (*Light Cleaning & Inspection* - 500 jam):

Pembersihan ringan sisi kompresor dari debu dan kotoran. Pemeriksaan *axial clearance* menggunakan *feeler gauge*. Pengukuran getaran awal jika ada alat.

4) P3 (*Intermediate Inspection* - 1000 jam):

Pemeriksaan lebih detail, termasuk pengambilan sampel oli untuk analisis, inspeksi sisi turbin dengan *borescope* jika memungkinkan, dan pengukuran getaran terstandar.

5) P4 (*Carbon Cleaning* - 1500 jam):

Pembersihan kerak karbon dari sisi turbin dan *nozzle ring* menggunakan pembersih kimia atau metode mekanis non-abrasif. Komponen tidak dibongkar total.

6) P5 (*Minor overhaul* - 2000 jam):

turbocharger diturunkan dan dibongkar. Penggantian *bearing*, *seal*, dan gasket secara rutin. Inspeksi semua komponen (roda turbin, kompresor, *housing*). Rotor dikirim untuk *balancing*.

7) P6 (*Major overhaul* - 4000 jam):

Bongkar total, penggantian semua komponen yang aus termasuk *nozzle ring* jika diperlukan. Rekondisi *housing*. *Balancing* presisi dan uji kinerja di *test bench*.

8) P7 (*Repair*):

Tindakan perbaikan tidak terjadwal karena kerusakan tak terduga (misal: penggantian rotor karena patah, perbaikan *housing* retak). Ini termasuk dalam *corrective maintenance*.

9) P8 (*Replacement*):

Penggantian unit *turbocharger* secara keseluruhan dengan unit baru atau yang sudah direkondisi.

2.2.4 Strategi Optimalisasi Pemeliharaan

A. Pengertian Strategi dan Optimalisasi

Strategi pemeliharaan adalah suatu pendekatan terencana yang menggabungkan berbagai jenis pemeliharaan (*CM, PM, PdM*) untuk mencapai tujuan keandalan dengan biaya yang efektif. Optimalisasi adalah proses untuk menemukan strategi terbaik yang menyeimbangkan antara biaya pemeliharaan dan risiko kegagalan.

B. Prinsip Penyusunan Strategi Pemeliharaan Berbasis Data

Strategi yang efektif disusun berdasarkan analisis data historis, seperti data *MTBF*, *MTTR*, biaya perbaikan, dan *criticality asset*. Data ini digunakan untuk memprioritaskan peralatan mana yang paling kritis dan menentukan jenis pemeliharaan yang paling cocok.

C. Penerapan *Maintenance Scheduling* dan Prioritas Perawatan

1. *Maintenance Scheduling*: Membuat jadwal terperinci untuk semua aktivitas *PM* dan *PdM* berdasarkan interval yang telah ditetapkan.
2. Prioritas Perawatan: Dapat ditentukan menggunakan matriks kritikalitas yang mempertimbangkan faktor *Safety, Environment, Production*, dan *Cost*.

D. Pendekatan Analisis untuk Menentukan Strategi Optimal

1. *FMEA*: Seperti telah dijelaskan, untuk mengidentifikasi dan memprioritaskan mode kegagalan.
2. *Pareto Analysis* (Analisis ABC): Prinsip 80/20, yaitu 80% masalah disebabkan oleh 20% komponen. Digunakan untuk memfokuskan sumber daya pada komponen yang paling sering rusak.
3. *Root Cause Analysis (RCA)*: Metode terstruktur untuk mengidentifikasi akar penyebab fundamental dari suatu masalah, bukan hanya gejalanya, sehingga solusi yang diambil dapat permanen.

2.2.5 Rumus Perhitungan

Penerapan rumus-rumus kinerja mesin di PLTD Tua Pejat, Mentawai, berdasarkan skenario nyata yang mungkin terjadi.

1. *Mean Time Between Failures (MTBF)*

MTBF mengukur rata-rata waktu operasi antara satu kegagalan dengan kegagalan berikutnya. Nilai *MTBF* yang tinggi menunjukkan keandalan yang baik.

Rumus:

$$MTBF = (\text{Total Waktu Operasi}) / (\text{Jumlah Kegagalan}) \dots\dots\dots (2)$$

2. *Mean Time To Repair (MTTR)*

MTTR mengukur rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki mesin dan mengembalikannya ke operasi normal. Nilai *MTTR* yang rendah menunjukkan efisiensi perbaikan yang baik.

Rumus:

$$MTTR = (\text{Total Downtime untuk Perbaikan}) / (\text{Jumlah Kegagalan}) \dots\dots\dots (3)$$

3. *Availability* (Ketersediaan)

Availability adalah persentase waktu dimana mesin siap dan dapat dioperasikan. Ini adalah metrik kunci bagi pelanggan.

Rumus:

$$Availability = (MTBF / (MTBF + MTTR)) \times 100\% \dots\dots\dots (4)$$

4. *Reliability Function*

Reliability Function memperkirakan probabilitas (peluang) sebuah sistem untuk tetap beroperasi tanpa kegagalan hingga waktu tertentu (*t*).

Rumus:

$$R(t) = e^{(-t/MTBF)} \dots\dots\dots (5)$$

(dimana *e* adalah konstanta matematika ~2.718)

5. *Overall Equipment Effectiveness (OEE)* - (Konsep TPM)

OEE adalah ukuran komprehensif yang menggabungkan ketersediaan, kinerja, dan kualitas.

Rumus:

$$OEE = Availability \times Performance Efficiency \times Rate of Quality Products$$

$$P = (\text{Output Aktual} / \text{Output Ideal}) \times 100\% \dots\dots\dots (6)$$

Rate of Quality Products (Q): Dalam konteks PLTD, "produk berkualitas" adalah listrik yang stabil (tanpa fluktuasi voltase/frekuensi yang merusak). Misalnya, 98% dari total waktu operasi, listrik yang dihasilkan memenuhi standar kualitas.

$$Q = 98\%$$

Perhitungan:

$$OEE = 96.77\% \times 95\% \times 98\% = 90.1\%$$

Interpretasi:

Nilai *OEE* 90.1% dianggap sangat baik dalam standar manufaktur kelas dunia. Namun, di PLTD dengan tantangan seperti Mentawai, angka ini bisa jadi lebih rendah. *OEE* membantu mengidentifikasi kerugian tersembunyi selain sekadar mesin mati.

6. Pemeliharaan Preventif (*Preventive Maintenance*)

Berdasarkan rekomendasi pabrik dan analisis kondisi, jadwal pemeliharaan preventif untuk generator dapat berupa:

1. Setiap 250 jam operasi: Ganti oli mesin dan filter.
2. Setiap 500 jam operasi: Bersihkan dan uji *nozzle injector*.
3. Setiap 1000 jam operasi: Periksa dan sesuaikan celah katup (*valve clearance*).
4. Setiap 2000 jam operasi: *overhaul* terencana pada komponen utama.

Dampak yang Diharapkan:

Dengan konsisten menjalankan jadwal ini, *MTBF* akan meningkat (mesin lebih jarang rusak), *MTTR* akan turun (karena kerusakan besar dicegah), dan pada akhirnya *Availability* serta *Reliability* akan membaik secara signifikan. Pemeliharaan Prediktif (*predictive maintenance*)/ Berbasis Kondisi (*Condition-Based Maintenance*): Pemeliharaan berdasarkan monitoring kondisi aktual peralatan (getaran, suhu, analisis oli).

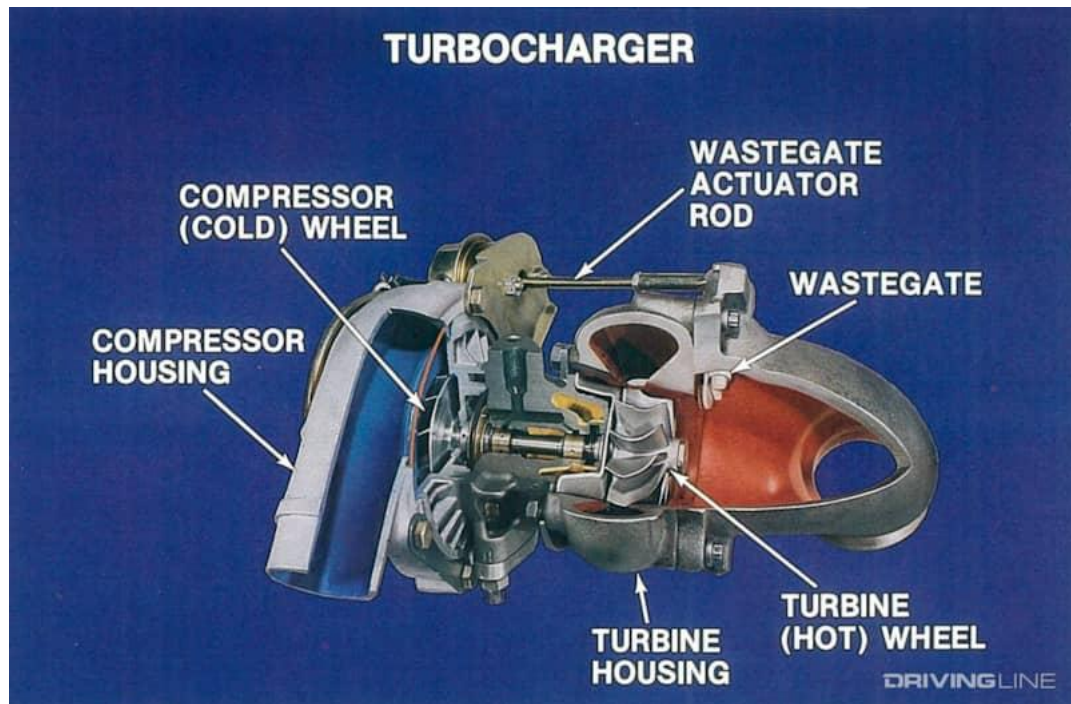
Reliability-Centered Maintenance (RCM): Filosofi pemeliharaan yang berfokus pada fungsi sistem dan keandalan.

2.2.6 Turbocharger: Fungsi, Komponen, dan Permasalahan Umum

A. Fungsi dan Prinsip Kerja Turbocharger

Turbocharger adalah sistem pemaksa induksi yang memanfaatkan energi gas buang untuk memutar turbin, yang kemudian menggerakkan kompresor guna memasok udara bertekanan tinggi ke ruang bakar. Prinsip kerjanya berdasarkan siklus Brayton, di mana peningkatan massa udara masuk (*boost pressure*) meningkatkan efisiensi volumetrik mesin dan tenaga yang dihasilkan.

B. Komponen Utama Turbocharger



Gambar 2. 12 Komponen *Turbocharger*

- Turbin: Terdiri dari roda turbin dan *housing*, berfungsi menangkap energi gas buang.



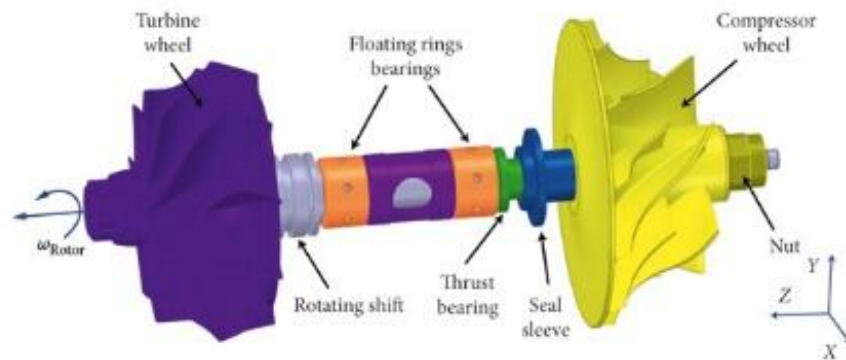
Gambar 2. 13 Turbin

- Kompresor: Memampatkan udara masuk sebelum masuk ke *intake manifold*.



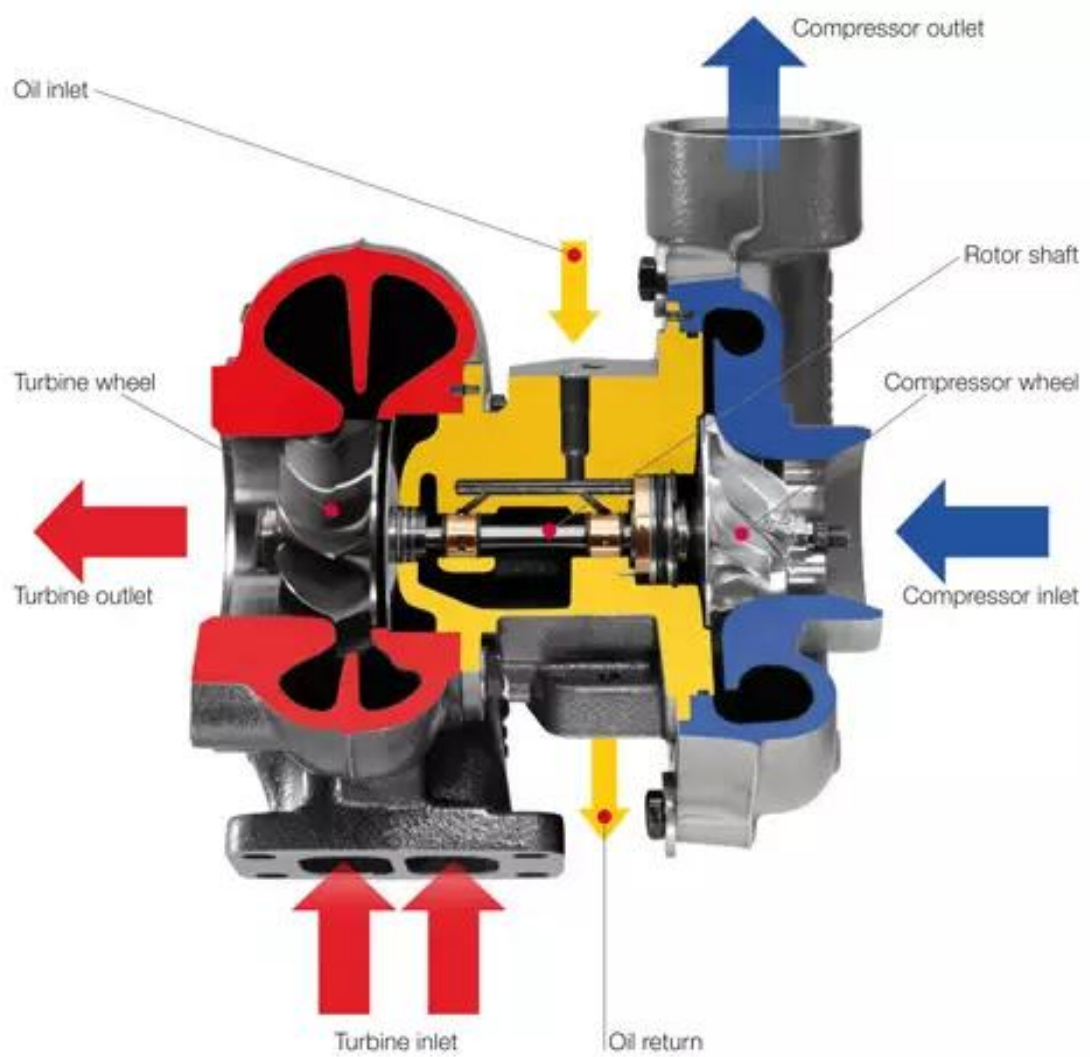
Gambar 2. 14 Kompresor Turbo

- *Shaft dan Bearing System*: Menghubungkan turbin dan kompresor, memerlukan sistem pelumasan yang optimal.



Gambar 2. 15 Shaft dan Bearing

- *Housing* dan Sistem Pendingin: Melindungi komponen inti dan mengelola panas operasi.



Gambar 2. 16 *Housing turbocharger*

C. Permasalahan Umum *turbocharger* di Lingkungan Pesisir

1. *Carbon Fouling*: Akumulasi kerak karbon pada sisi turbin dan *nozzle* akibat pembakaran tidak sempurna dan kualitas BBM rendah.
2. *Corrosion*: Korosi pada housing dan komponen internal akibat paparan udara laut yang mengandung garam.
3. *Bearing Wear*: Keausan bearing karena kontaminasi oli, pelumasan tidak optimal, atau getaran berlebih.
4. *Boost Pressure Drop*: Penurunan tekanan udara masuk akibat kebocoran atau penyumbatan saluran.

D. Strategi Pemeliharaan *turbocharger* Berbasis Kondisi

Pemeliharaan *turbocharger* di lingkungan korosif sebaiknya mengintegrasikan:

1. *Vibration Analysis* untuk deteksi dini ketidakseimbangan mekanis.
2. *Thermal Monitoring* untuk mengidentifikasi *hot spot* dan efisiensi termal.
3. *Oil Debris Analysis* untuk memantau keausan internal.
4. *Scheduled Cleaning* berdasarkan interval jam operasi.