

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori Mesin Diesel

2.1.1 Pembangkit listrik tenaga diesel

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) menggunakan motor diesel sebagai sebuah sumber tenaga penggerak utama, memiliki prinsip yang hampir sama dengan motor bensin, dimana *energy* dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar. Ada beberapa perbedaan utama antara karakteristik mesin bensin dan mesin diesel. Mesin diesel menggunakan prinsip *auto-ignition* terbakar sendiri. Sedangkan mesin bensin menggunakan prinsip *spark-ignition* pembakaran yang dipicu oleh percikan api pada busi. Oleh karenanya motor diesel sering juga disebut *compression ignition engine*.

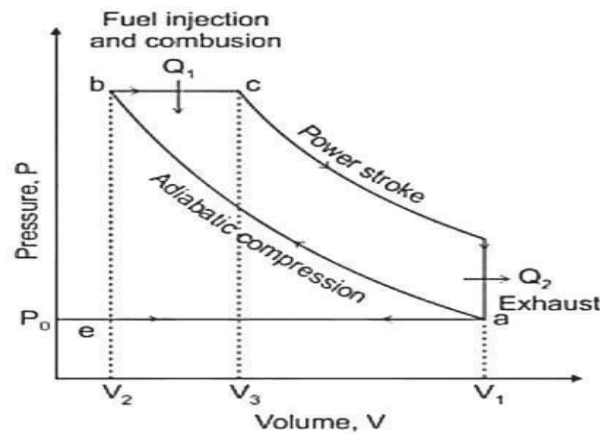
Untuk mencapai suhu dan tekanan pembakaran, tekanan kompresi pada mesin diesel diusahakan mampu mencapai $30 \pm 45 \text{ kg/cm}^2$, agar *temperature* udara yang dikompresikan kurang lebih mencapai 400°C , sehingga bahan bakar mampu terbakar dengan sendirinya tanpa dipicu oleh letikan bunga api busi. Untuk dapat mencapai tekanan dan temperature yang demikian, motor diesel harus memiliki perbandingan kompresi yang lebih tinggi kira-kira mencapai 25:1 dan membutuhkan gaya yang lebih besar untuk memutarinya, Sehingga motor diesel memerlukan alat pemutar seperti motor starter dan baterai yang berkapasitas besar pula.

Disamping itu motor diesel memiliki efisiensi panas yang sangat tinggi, hemat konsumsi bahan bakar, memiliki kecepatan yang rendah dibanding mesin bensin, getarannya sangat besar dan agak berisik, momen yang didapatkan lebih besar, sehingga motor ini umumnya digunakan pada kendaraan niaga, kendaraan penumpang dan sebagai motor penggerak lainnya. Karena tekanan pembakaran yang tinggi, maka mesin diesel harus dibuat dari bahan yang tahan terhadap tekanan tinggi dan harus mempunyai struktur yang kuat. Disamping itu getaran motor yang dihasilkan sangat besar, ini diakibatkan oleh tekanan pembakaran maksimum yang dicapai hampir dua kali lipat lebih besar dari pada motor bensin, sehingga suara dan getaran mesin

diesel menjadi lebih besar. Teknologi mesin diesel terus mengalami penyempurnaan sehingga menjadi lebih ramah lingkungan

Mesin diesel dibagi menjadi 2 dua tipe, yaitu mesin diesel 2 langkah dan mesin diesel 4 langkah. Mesin diesel 2 langkah adalah mesin yang setiap langkahnya terjadi satu kali langkah bertenaga dengan dorongan gas hasil ledakan pembakaran. Secara teoritis mesin 2 Langkah dengan dimensi dan jumlah putaran per detik yang sama seperti pada mesin empat langkah langkah, maka mesin 2 langkah ini akan menghasilkan daya 2 kali lebih besar. Namun dalam praktiknya, angka 2 kali lebih besar untuk daya yang di dapat pada mesin diesel 2 langkah tidak tercapai hanya sekitar 1,8 kali. Hal ini disebabkan karena pembilasan ruang bakar silinder mesin diesel 2 langkah tidak sebersih pada mesin diesel empat langkah, sehingga proses pembakarannya tidak sempurna seperti pada mesin diesel 4 langkah. Maka efisiensi mesin 2 langkah ini tidak sebaik efisiensi pada mesin diesel empat langkah. Pada pemakaian bahan bakarnya pun lebih boros dibanding mesin diesel 4 langkah.

Mesin 2 langkah ini biasanya lebih cocok digunakan pada keperluan yang memerlukan penghematan ruangan, seperti pada lokomotif kereta api atau pada kapal laut. Mesin diesel 4 langkah merupakan mesin yang setiap 4 langkah terjadi satu kali langkah bertenaga dengan dorongan gas hasil pembakaran. Atau dengan kata lain prinsip kerja mesin diesel langkah adalah proses kerja mesin untuk menghasilkan 1 kali pembakaran usaha kerja torak bergerak 4 kali. Gerakan torak yang menghasilkan kerja atau usaha berlangsung secara beruntun dan terus menerus maka kegiatan untuk menghasilkan kerja usaha tersebut siklus. Proses pembakaran pada mesin diesel 4 langkah lebih sempurna daripada mesin diesel 2 langkah, karena pada proses pembilasan ruang bakar di silinder mesinnya bersih. Pada mesin diesel 4 langkah pemakaian bahan bakarnya lebih hemat dibandingkan dengan mesin diesel 2 langkah.



Gambar 1. Diaram P-V Siklus Diesel Ideal

Keterangan proses pada gambar 1 di atas sebagai berikut :

1. Langkah hisap (e - a) merupakan proses tekanan konstan
2. Langkah kompresi (a - b) merupakan proses isentropic.
3. Proses pembakaran pada tekanan konstan (b - c) dimana pada langkah ini bahan bakar diinjeksikan ke dalam ruang bakar
4. Langkah kerja (c - d) merupakan proses isentropic
5. Langkah pembuangan (d - a) dianggap sebagai proses pengeluaran kalor pada volume konstan.
6. Langkah buang (a - e) terjadi pada tekanan konstan

2.1.2 Prinsip Kerja Mesin Diesel Empat Langkah

Sebagian besar mesin diesel pada pembangkit listrik menggunakan sistem empat langkah (*four-stroke cycle*), yaitu:

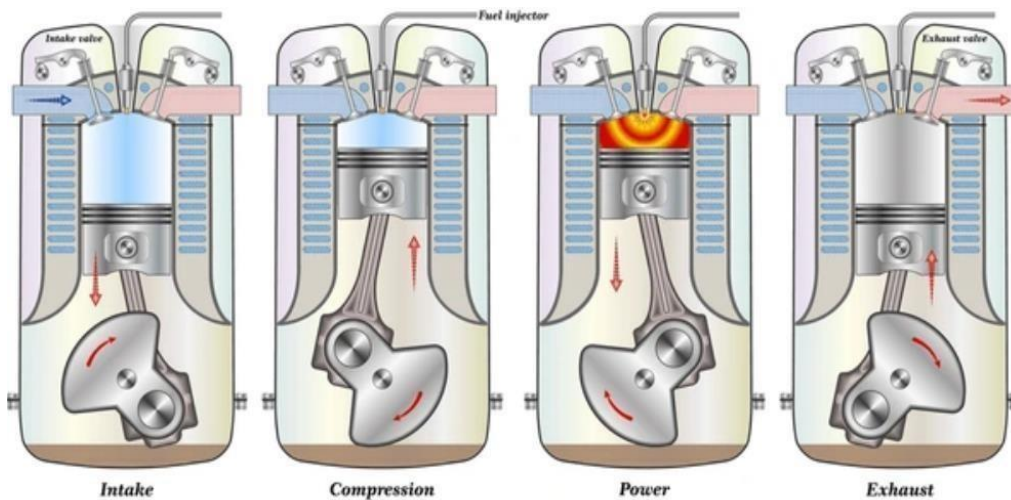
1. Langkah Hisap (*Intake Stroke*)
2. Katup masuk terbuka dan piston bergerak dari Titik Mati Atas (TMA) ke Titik Mati Bawah (TMB), sehingga udara murni masuk ke dalam silinder.
3. Langkah Kompresi (*Compression Stroke*)
4. Kedua katup tertutup dan piston bergerak dari TMB ke TMA, mengompresi udara hingga tekanan sangat tinggi ($\pm 30\text{--}50$ bar). Temperatur udara dapat mencapai lebih dari 500°C .
5. Langkah Usaha (*PowerStroke*)

Karena suhu udara sangat tinggi, bahan bakar terbakar secara spontan dan menghasilkan tekanan besar yang mendorong piston ke bawah.

6. Langkah Buang (*Exhaust Stroke*)

7. Katup buang terbuka dan piston bergerak ke atas untuk mendorong gas sisa pembakaran keluar dari silinder.

Siklus ini berlangsung secara kontinu dan menghasilkan energi mekanik yang diteruskan ke poros engkol (*crankshaft*) untuk memutar generator listrik.



Gambar 2. Siklus Mesin Diesel

2.1.3 Siklus Termodinamika Pendingin PLTD

Sistem pendingin PLTD dapat dimodelkan sebagai siklus termodinamika sederhana dengan aliran fluida berulang. Siklus pendingin PLTD dapat dianalogikan dengan siklus termodinamika tertutup (*closed-loop thermodynamic cycle*), di mana air berfungsi sebagai fluida kerja. Mesin diesel bertindak sebagai sumber panas (Q_{in}) yang memanaskan air pendingin. Pompa menambahkan kerja mekanik untuk mempertahankan aliran, sementara radiator berfungsi sebagai sink panas (Q_{out}), mengeluarkan panas ke lingkungan. Selama operasi, energi panas diserap dan dilepaskan secara terus-menerus sehingga suhu mesin tetap berada dalam batas kerja yang aman. Siklus ini memaksimalkan efisiensi pendinginan sekaligus menjaga keandalan mesin diesel pada beban penuh.

Siklus fluida PLTD:

- a. Mesin ke arah Water Jacket (Suhu naik)

Air pendingin menyerap panas dari silinder dan cylinder head. Energi

panas Q_{in} ditransfer dari gas hasil pembakaran ke air pendingin. Tekanan sedikit meningkat karena adanya pompa sirkulasi.

b. Water Jacket ke arah Pompa Sirkulasi Peningkatan Tekanan

Pompa sirkulasi memberikan tekanan tambahan sehingga air dapat mengalir ke seluruh sistem, termasuk radiator dan heat exchanger. Energi mekanik dari pompa ditambahkan ke fluida.

c. Pompa ke arah Radiator Pendinginan

Air panas mengalir ke arah radiator. Di radiator, panas dilepaskan ke udara sekitar melalui konveksi dan perpindahan panas. Thermostat mengatur jumlah air yang melewati radiator agar suhu mesin tetap stabil.

d. Radiator ke arah Mesin Fluida Dingin Kembali

Air yang sudah didinginkan kembali masuk ke water jacket, siap menyerap panas lagi. Siklus ini terus berulang selama mesin beroperasi, menjaga keseimbangan energi dan mencegah overheating

2.1.4 Parameter pendingin Kinerja Mesin Diesel

Sistem pendingin pada mesin diesel berfungsi menjaga suhu operasional mesin agar tetap dalam batas aman. Kinerja mesin sangat dipengaruhi oleh efisiensi pendinginan, karena panas yang berlebihan dapat menurunkan performa, mempercepat keausan komponen, dan menyebabkan kerusakan serius seperti overheating. Untuk mengevaluasi sistem pendingin, beberapa parameter utama digunakan:

1. Suhu Operasional Mesin
2. Temperatur Air Pendingin Masuk dan Keluar.
3. Laju Aliran Air Pendingin.
4. Tekanan Air Pendingin.
5. Perbedaan Suhu dan Efisiensi Heat Exchanger.
6. Kondisi Kipas Pendingin.
7. Konsistensi dan Kualitas Air Pendingin

2.1.5 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kinerja sistem pendingin

Kinerja sistem pendingin mesin diesel sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, baik yang bersifat teknis, lingkungan, maupun operasional. Pemahaman faktor-faktor ini penting agar sistem pendingin dapat bekerja

secara optimal, menjaga suhu mesin, dan mencegah kerusakan akibat overheating. Kualitas bahan bakar nilai kalor, kandungan sulfur, viskositas

1. Suhu dan Kondisi Lingkungan.
2. Beban Mesin.
3. Laju Aliran Air Pendingin.
4. Kondisi Radiator dan Heat Exchanger.
5. Kecepatan Kipas Pendingin.
6. Kualitas Air Pendingin.
7. Kondisi Pompa Sirkulasi.
8. Thermostat dan Kontrol Sistem

Kinerja sistem pendingin mesin diesel dipengaruhi oleh faktor lingkungan, beban mesin, kualitas dan laju aliran pendingin, serta kondisi komponen pendukung seperti radiator, pompa, kipas, dan thermostat. Pemeliharaan rutin dan pemantauan parameter kritis menjadi kunci agar mesin diesel PLTD dapat bekerja efisien dan aman.

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) merupakan salah satu jenis pembangkit listrik yang menggunakan mesin diesel sebagai penggerak utama (*prime mover*) untuk memutar generator dalam menghasilkan energi listrik. Mesin diesel bekerja berdasarkan prinsip pembakaran internal, di mana bahan bakar solar dikompresikan bersama udara di dalam ruang bakar hingga mencapai suhu dan tekanan tinggi, sehingga terjadi pembakaran spontan yang menghasilkan tenaga mekanik. Tenaga mekanik ini kemudian diubah menjadi energi listrik melalui poros penggerak generator sinkron. [

PLTD banyak digunakan di daerah dengan sistem kelistrikan yang belum terintegrasi dengan jaringan interkoneksi besar, atau sebagai pembangkit cadangan (*standby unit*) saat beban puncak dan kondisi darurat. Keunggulan utama PLTD adalah waktu *start-up* yang cepat, kemudahan pengoperasian, serta fleksibilitas dalam penyesuaian beban listrik. [Namun demikian, PLTD memiliki keterbatasan dari segi efisiensi bahan bakar dan biaya operasional yang relatif tinggi dibandingkan jenis pembangkit lainnya seperti Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) atau Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG).

Sebuah PLTD pada umumnya terdiri atas beberapa sistem pendukung utama, antara lain sistem bahan bakar (*fuel system*), sistem pelumasan (*lubrication system*), sistem udara masuk dan buang (*air intake and exhaust system*), sistem pendingin (*cooling system*), serta sistem pengontrol (*control system*). Semua sistem tersebut saling berinteraksi untuk memastikan mesin bekerja pada kondisi optimal. Apabila salah satu sistem mengalami gangguan, terutama sistem pendingin, maka temperatur mesin dapat meningkat melebihi batas aman yang ditentukan oleh pabrikan, yang berpotensi menimbulkan kerusakan pada komponen internal seperti piston, silinder, atau *head* mesin.



Gambar 3 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel

PLTD dirancang agar dapat bekerja secara kontinu dan andal (*reliable operation*). Keandalan operasi ini dipengaruhi oleh kondisi performa seluruh sistem pendukung, termasuk efisiensi perpindahan panas dari mesin menuju sistem pendingin. Dalam proses konversi energi, mesin diesel menghasilkan panas yang sangat tinggi, dan sebagian besar energi panas tersebut harus dilepaskan agar tidak terjadi *overheating*. Oleh karena itu, sistem pendingin menjadi bagian yang sangat vital dalam menjaga kestabilan termal mesin.

Selain faktor teknis, keandalan PLTD juga dipengaruhi oleh kegiatan pemeliharaan (*maintenance*) yang dilakukan secara rutin dan terjadwal. Pemeliharaan yang baik akan memperpanjang umur mesin dan mengurangi frekuensi gangguan tak terencana (*forced outage*). Di sisi lain, kelalaian dalam menjaga sistem pendingin atau komponen vital lainnya dapat menurunkan performa keseluruhan pembangkit, meningkatkan konsumsi bahan bakar, dan menurunkan efisiensi daya keluaran.

Dengan demikian, pemahaman mendalam tentang prinsip kerja PLTD dan keterkaitan antar sistem pendukungnya menjadi landasan utama dalam melakukan evaluasi kinerja sistem pendingin mesin diesel. Evaluasi ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana sistem pendingin berperan dalam menjaga suhu operasi mesin tetap dalam batas normal, sehingga keandalan operasi PLTD dapat dipertahankan dan peningkatan efisiensi pembangkit dapat dicapai.



Gambar 4. Sistem Pendingin

Sistem pendingin mesin diesel secara umum bertujuan untuk mengendalikan temperatur kerja mesin, mempercepat pencapaian suhu operasi ideal pada saat *start-up*, dan menjaga stabilitas temperatur saat beban berubah-ubah. Mesin yang beroperasi pada suhu terlalu tinggi dapat mengalami kerusakan pada dinding silinder, piston, katup, atau bahkan deformasi pada *head silinder*. Sebaliknya, mesin yang bekerja pada suhu terlalu rendah dapat menyebabkan pembakaran tidak sempurna, meningkatkan konsumsi bahan bakar, serta mempercepat pembentukan kerak karbon. Oleh karena itu, keseimbangan suhu kerja sangat menentukan efisiensi dan keandalan mesin diesel.

Terdapat dua jenis utama sistem pendingin pada mesin diesel, yaitu sistem pendingin udara (*air cooling*) dan sistem pendingin air (*water cooling*). Pada pembangkit tenaga diesel, sistem pendingin air lebih banyak digunakan karena mampu menyerap panas dalam jumlah besar dengan efisiensi yang lebih tinggi. Sistem ini menggunakan air pendingin atau cairan *coolant* yang disirkulasikan melalui saluran di sekitar silinder mesin untuk menyerap panas, kemudian mengalirkannya ke radiator atau *heat exchanger* untuk didinginkan sebelum

kembali bersirkulasi ke mesin.

Komponen utama dalam sistem pendingin meliputi:

- a. Radiator atau *Heat Exchanger*, berfungsi untuk membuang panas dari fluida pendingin ke udara sekitar melalui proses konveksi dan konduksi.
- b. *Water Pump*, bertugas mensirkulasikan cairan pendingin agar aliran tetap konstan di seluruh bagian mesin.
- c. *Thermostat*, mengatur pembukaan aliran pendingin sesuai dengan suhu kerja mesin agar mesin mencapai temperatur ideal secara cepat dan stabil.
- d. *Cooling Fan* atau *Blower*, membantu mempercepat perpindahan panas dari radiator ke udara.
- e. Pipa dan Selang Sirkulasi, sebagai jalur aliran fluida pendingin dari dan ke mesin.

Efisiensi sistem pendingin dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain kualitas fluida pendingin, kondisi permukaan radiator atau *heat exchanger*, kinerja pompa sirkulasi, serta suhu lingkungan sekitar. Kualitas air pendingin yang buruk, seperti mengandung mineral tinggi atau tidak menggunakan cairan *coolant* yang sesuai, dapat menyebabkan kerak (*fouling*) dan korosi yang menurunkan kemampuan perpindahan panas. Selain itu, komponen yang aus, pompa yang kehilangan tekanan, atau adanya kebocoran kecil juga dapat menurunkan performa sistem pendingin secara keseluruhan.

sistem pendingin memiliki pengaruh langsung terhadap keandalan mesin diesel. Kegagalan sistem pendingin sering kali menjadi salah satu penyebab utama terjadinya *derating* (penurunan daya keluaran mesin) atau *shutdown* tidak terencana (*forced outage*). Ketika mesin beroperasi pada suhu melebihi batas normal, viskositas oli pelumas menurun, gesekan antar komponen meningkat, dan efisiensi termal menurun secara signifikan. Kondisi ini tidak hanya mengganggu kontinuitas pembangkitan daya, tetapi juga dapat meningkatkan biaya perawatan dan memperpendek umur pakai mesin.

Untuk memastikan sistem pendingin berfungsi optimal, perlu dilakukan pemeliharaan preventif dan prediktif secara rutin, seperti pemeriksaan tekanan dan temperatur pendingin, pembersihan radiator, penggantian *coolant* secara

berkala, serta pengujian kinerja pompa sirkulasi. Selain itu, penerapan sistem monitoring suhu berbasis sensor dan kontrol otomatis dapat membantu mendeteksi dini adanya ketidaksesuaian performa sehingga tindakan korektif dapat dilakukan sebelum terjadi kerusakan yang lebih parah.

2.2.1 Pemeliharaan Sistem Pendingin Mesin Diesel

Pemeliharaan sistem pendingin merupakan salah satu aspek krusial dalam menjaga keandalan dan efisiensi operasi mesin diesel di pembangkit listrik. Sistem pendingin berfungsi mempertahankan suhu kerja mesin agar berada pada batas optimal, sehingga setiap komponen mesin dapat beroperasi dengan efisiensi maksimal dan umur pakai yang panjang. Tanpa pemeliharaan yang tepat dan terjadwal, performa sistem pendingin dapat menurun secara signifikan, yang pada akhirnya berdampak pada peningkatan suhu mesin, konsumsi bahan bakar yang lebih tinggi, serta potensi kerusakan mekanis pada komponen utama mesin.

pemeliharaan sistem pendingin menjadi salah satu fokus penting bagi unit operasi dan pemeliharaan (O&M) karena kondisi lingkungan dan lama waktu operasi mesin sangat berpengaruh terhadap degradasi performa pendingin. Mesin diesel yang bekerja terus-menerus menghasilkan panas tinggi, sehingga sistem pendingin mengalami siklus termal yang berat. Kondisi ini dapat menyebabkan timbulnya kerak pada *heat exchanger*, penurunan tekanan pompa, atau bahkan kebocoran pada jalur pipa pendingin. Oleh sebab itu, kegiatan pemeliharaan yang terencana dan terukur diperlukan untuk mencegah terjadinya gangguan operasi (*forced outage*) yang dapat mengganggu kontinuitas pembangkitan daya.



Gambar 5. Pipa Pendingin PLTD

Secara umum, kegiatan pemeliharaan sistem pendingin dapat dibagi menjadi tiga jenis, yaitu

- a. Pemeliharaan Preventif (*Preventive Maintenance*), Pemeliharaan ini dilakukan secara terjadwal dan rutin dengan tujuan mencegah terjadinya kerusakan sebelum sistem mengalami gangguan. Kegiatan yang termasuk di dalamnya meliputi pemeriksaan tekanan dan suhu air pendingin, pengecekan level cairan *coolant*, pembersihan radiator dari debu dan kerak, serta pengujian fungsi *thermostat* dan pompa pendingin. Dengan melakukan *preventive maintenance* secara konsisten, potensi kerusakan dapat diminimalkan dan umur pakai sistem pendingin dapat diperpanjang.
- b. Pemeliharaan Prediktif (*Predictive Maintenance*), Pemeliharaan ini dilakukan dengan cara memantau kondisi aktual peralatan menggunakan alat ukur atau sensor untuk memprediksi kapan suatu komponen akan mengalami penurunan performa. Pada sistem pendingin, pendekatan ini dapat dilakukan melalui pengukuran temperatur fluida masuk dan keluar radiator, pemantauan tekanan sistem, serta analisis kualitas air pendingin. Data dari hasil pemantauan kemudian dianalisis untuk menentukan waktu yang tepat dalam melakukan perbaikan atau penggantian komponen sebelum terjadi kegagalan

- c. Pemeliharaan Korektif (*Corrective Maintenance*), Pemeliharaan ini dilakukan setelah terjadi gangguan atau kerusakan pada sistem pendingin. Contohnya adalah penggantian pompa pendingin yang rusak, perbaikan kebocoran pipa, atau penggantian *gasket* dan *seal* yang aus. Meskipun *corrective maintenance* tidak dapat dihindari sepenuhnya, namun frekuensinya dapat ditekan dengan penerapan program pemeliharaan preventif dan prediktif yang baik.

Selain ketiga jenis pemeliharaan tersebut, penting pula dilakukan inspeksi visual harian oleh operator untuk memastikan tidak ada kebocoran, suara abnormal pada pompa, atau peningkatan suhu yang tidak wajar. Inspeksi rutin ini sering kali menjadi langkah awal untuk mendeteksi dini adanya indikasi kerusakan sebelum menjadi lebih parah.

Dalam sistem pembangkit *modern*, penerapan *maintenance* berbasis kondisi (*condition- based maintenance*) semakin banyak digunakan. Metode ini mengandalkan data *real-time* dari sensor suhu, tekanan, dan laju aliran pendingin untuk menentukan kondisi kesehatan sistem. Teknologi monitoring ini memungkinkan pengambilan keputusan perawatan yang lebih cepat dan tepat sasaran, sehingga efisiensi operasi dapat meningkat sekaligus menekan biaya perawatan jangka panjang.

2.2.2 Kinerja Sistem Pendingin

Kinerja sistem pendingin mesin diesel merupakan ukuran sejauh mana sistem tersebut mampu menjaga kestabilan suhu operasi mesin agar tetap berada dalam batas optimal yang direkomendasikan oleh pabrikan. Sistem pendingin yang bekerja dengan baik akan memastikan mesin beroperasi pada temperatur ideal, sehingga efisiensi pembakaran, daya keluaran, dan umur komponen dapat terjaga. Sebaliknya, apabila sistem pendingin mengalami penurunan performa, suhu mesin dapat meningkat secara berlebihan (*overheating*), yang berpotensi menimbulkan kerusakan serius pada komponen internal mesin dan menurunkan keandalan operasi pembangkit. Kinerja sistem pendingin dapat dievaluasi melalui beberapa parameter utama, antara lain temperatur fluida pendingin masuk dan keluar mesin, tekanan sistem pendingin, debit atau laju aliran air pendingin, serta

efisiensi perpindahan panas pada radiator atau *heat exchanger*. Parameter-parameter ini saling berkaitan dan dapat digunakan untuk menilai sejauh mana sistem pendingin mampu mempertahankan keseimbangan panas yang dihasilkan mesin dengan panas yang dilepaskan ke lingkungan.

Salah satu indikator penting kinerja sistem pendingin adalah selisih temperatur (*temperature difference*) antara air pendingin masuk dan keluar radiator. Selisih yang terlalu kecil dapat menunjukkan penurunan efisiensi perpindahan panas akibat penumpukan kerak (*fouling*) atau aliran yang tidak merata. Sebaliknya, selisih yang terlalu besar dapat menandakan masalah pada sistem sirkulasi air, seperti pompa pendingin yang kehilangan tekanan atau adanya hambatan pada jalur pipa. Oleh karena itu, pemantauan temperatur dan tekanan sistem secara berkala menjadi langkah penting dalam menjaga kinerja pendingin.

Selain itu, efisiensi perpindahan panas (*heat transfer efficiency*) juga menjadi faktor utama dalam menentukan kinerja sistem pendingin. Efisiensi ini sangat dipengaruhi oleh kondisi permukaan radiator, kecepatan aliran fluida, jenis cairan pendingin, dan suhu udara lingkungan. Apabila radiator kotor atau tersumbat, maka kemampuan sistem untuk melepaskan panas akan menurun, menyebabkan peningkatan suhu pada air pendingin yang kembali ke mesin. Dalam jangka panjang, kondisi ini dapat mempercepat degradasi komponen mesin diesel seperti piston, *silinder liner*, dan *gasket head*. Kinerja sistem pendingin juga dipengaruhi oleh faktor eksternal dan operasional, di antaranya

- a. Kualitas cairan pendingin, yang menentukan kemampuan fluida dalam menyerap dan melepaskan panas. *Coolant* yang tercemar atau tidak diganti secara berkala dapat menurunkan efisiensi pendinginan.
- b. Kondisi lingkungan, seperti suhu udara sekitar dan kelembapan, yang berpengaruh pada efektivitas proses perpindahan panas di radiator.
- c. Durasi dan beban operasi mesin, karena beban tinggi dalam waktu lama meningkatkan produksi panas sehingga menuntut kinerja pendingin yang optimal.
- d. Kondisi komponen mekanis, seperti pompa, kipas, thermostat, dan katup, yang harus berfungsi sesuai spesifikasi untuk mempertahankan sirkulasi

pendingin secara stabil.

Dalam konteks PLTD 12V, pengukuran kinerja sistem pendingin menjadi sangat penting karena pembangkit ini beroperasi dalam siklus beban yang fluktuatif. Perubahan beban menyebabkan variasi temperatur pembakaran yang tinggi, sehingga sistem pendingin harus mampu beradaptasi dengan cepat untuk menjaga kestabilan suhu mesin. Evaluasi kinerja sistem pendingin dilakukan dengan menganalisis data temperatur, tekanan, dan debit pendingin selama mesin beroperasi, kemudian dibandingkan dengan standar operasional atau data pabrikan.

Penurunan kinerja sistem pendingin secara langsung dapat memengaruhi indikator keandalan pembangkit, seperti *availability factor* dan *forced outage rate*. Mesin diesel yang sering mengalami *overheating* cenderung memerlukan waktu perawatan lebih lama dan frekuensi *shutdown* yang lebih tinggi. Hal ini akan berdampak pada penurunan efisiensi operasi pembangkit secara keseluruhan. Oleh karena itu, kinerja sistem pendingin yang baik menjadi salah satu kunci dalam meningkatkan keandalan dan kontinuitas pasokan daya listrik di PLTD.

Dengan demikian, evaluasi kinerja sistem pendingin mesin diesel tidak hanya dimaksudkan untuk menilai performa teknis sistem pendingin itu sendiri, tetapi juga untuk memahami bagaimana efisiensinya berkontribusi terhadap stabilitas dan keandalan operasi pembangkit. Hasil evaluasi ini dapat digunakan sebagai dasar untuk perencanaan pemeliharaan, perbaikan teknis, maupun pengembangan sistem pendingin agar pembangkit dapat beroperasi lebih efisien dan berkelanjutan.

2.2.3 Keandalan Operasi PLTD

Keandalan operasi pembangkit merupakan ukuran kemampuan suatu unit pembangkit listrik dalam menjalankan fungsinya secara berkelanjutan tanpa mengalami gangguan atau penurunan performa yang signifikan. Dalam sistem tenaga listrik, keandalan menjadi faktor utama karena berkaitan langsung dengan kontinuitas pasokan daya kepada konsumen. Sebuah pembangkit dikatakan andal apabila mampu menghasilkan energi listrik sesuai kapasitas yang direncanakan, memiliki tingkat gangguan rendah, serta waktu

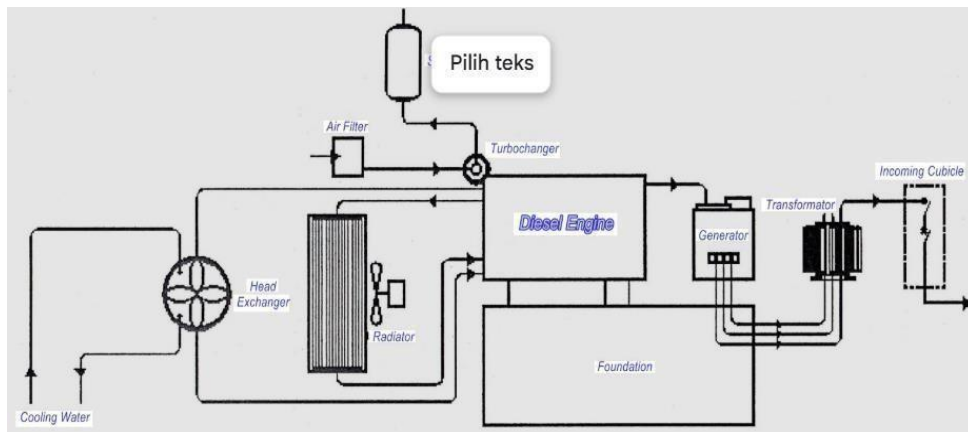
pemeliharaan yang efisien. Pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), keandalan operasi sangat bergantung pada kondisi mesin diesel dan sistem pendukungnya seperti sistem bahan bakar, pelumasan, kontrol, dan terutama sistem pendingin. Gangguan kecil pada sistem pendingin dapat menyebabkan kenaikan suhu mesin (*overheating*) yang berujung pada *derating*, peningkatan konsumsi bahan bakar, hingga *shutdown* mendadak yang secara langsung menurunkan keandalan operasi pembangkit.



Gambar 6. PLTD

Dalam konteks PLTD 1 2V, keandalan operasi menjadi indikator penting kinerja pembangkit karena unit ini berperan besar dalam menjaga kontinuitas suplai listrik di wilayah sekitar. Sistem pendingin memiliki kontribusi langsung terhadap stabilitas operasi mesin, sebab kemampuannya dalam menjaga suhu kerja menentukan efisiensi pembakaran dan umur komponen mesin. Penurunan kinerja sistem pendingin dapat meningkatkan frekuensi gangguan (*forced outage*) dan menurunkan faktor ketersediaan (*availability factor*) pembangkit. Oleh karena itu, evaluasi terhadap performa sistem pendingin diperlukan untuk memastikan suhu kerja mesin tetap stabil dan berada dalam batas aman[. Melalui perawatan preventif yang terjadwal dan pemantauan kondisi secara berkala, keandalan operasi PLTD dapat dipertahankan bahkan ditingkatkan, sehingga pembangkit mampu beroperasi secara efisien, stabil, dan mendukung keandalan sistem kelistrikan.

2.2.4 Siklus Pembangkit Listrik Tenaga Diesel



Gambar 7. Siklus PLTD

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) merupakan pembangkit yang menggunakan mesin diesel sebagai penggerak utama (*prime mover*) untuk menghasilkan energi listrik melalui generator. Siklus kerja PLTD dimulai dari proses penyediaan bahan bakar hingga konversi energi mekanik menjadi energi listrik.

Secara umum, siklus operasi PLTD meliputi beberapa tahapan utama sebagai berikut:

1. Sistem bahan bakar (*fuel system*), Bahan bakar solar disuplai dari tangki penyimpanan menuju mesin melalui sistem pompa dan filter. Proses ini bertujuan menjaga tekanan dan kualitas bahan bakar sebelum masuk ke ruang bakar.
2. Proses pembakaran dalam mesin diesel, Udara dikompresi hingga tekanan dan temperatur tinggi. Bahan bakar kemudian diinjeksikan ke dalam ruang bakar, sehingga terjadi pembakaran spontan. Energi panas yang dihasilkan akan mendorong piston.
3. Konversi energi mekanik, Gerakan piston diubah menjadi putaran poros engkol, yang selanjutnya memutar generator.
4. Pembangkitan energi listrik, Generator sinkron menghasilkan energi listrik melalui induksi elektromagnetik.
5. Pembuangan panas dan gas buang, Panas dari pembakaran dilepaskan melalui sistem pendingin, sedangkan gas buang keluar melalui sistem *exhaust*.

Sistem pendingin menjadi bagian penting dalam siklus PLTD karena

berfungsi menjaga temperatur mesin agar tetap dalam batas aman. Jika sistem pendingin tidak bekerja optimal, maka dapat menyebabkan *overheating*, *derating*, hingga *shutdown* pembangkit

2.2.5 Parameter Evaluasi Kinerja Sistem Pendingin

Evaluasi kinerja sistem pendingin mesin diesel dilakukan untuk mengetahui sejauh mana kemampuan sistem dalam menjaga suhu operasi mesin agar tetap stabil dan efisien. Kinerja sistem pendingin dapat dinilai dari beberapa parameter utama, yaitu efisiensi penyerapan panas, efisiensi *heat exchanger*, neraca energi mesin, dan perbandingan suhu operasi.

Parameter pertama adalah efisiensi penyerapan panas, yang digunakan untuk menghitung besarnya energi panas yang diserap oleh fluida pendingin dari mesin diesel. Perhitungan ini menggunakan rumus:

$$Q = \dot{m} \times c_p \times (T_{out} - T_{in})$$

Keterangan:

Q = jumlah panas yang diserap (kJ/s)

$\dot{m}$ = laju aliran massa

air

pendingin (kg/s) c_p = kapasitas panas jenis air (kJ/kg°C)

T_{out} , T_{in} = suhu keluar dan masuk air pendingin (°C)

Semakin besar nilai Q, semakin baik kemampuan sistem dalam menyerap panas dari mesin.

Parameter kedua adalah efisiensi *heat exchanger* atau radiator, yang menunjukkan kemampuan alat penukar panas dalam melepas energi panas dari fluida pendingin ke udara atau air laut. Nilai efisiensi dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$= \frac{T_{hot,in} - T_{hot,out}}{T_{hot,in} - T_{cold,in}} \times 100\%$$

$T_{hot,in}$ = suhu fluida panas sisi masuk (°C)

$T_{hot,out}$ = suhu fluida panas sisi keluar (°C)

$T_{cold,in}$ = suhu fluida pendingin sisi masuk (°C)

Nilai efisiensi yang tinggi menandakan sistem pendingin bekerja optimal dalam melepas panas dari mesin ke media luar.

Parameter ketiga adalah neraca energi sistem pendingin, yaitu perbandingan antara energi panas yang dibuang ke sistem pendingin terhadap energi yang dihasilkan dari bahan bakar. Rumusnya adalah:

$$= \frac{T_{hot,in} - T_{hot,out}}{T_{hot,in} - T_{coolant}} \times 100\%$$

Keterangan:

$\eta_{cooling}$ = efisiensi sistem pendingin (%)

$Q_{coolant}$ = energi panas yang dibuang oleh pendingin (kJ/s) $\dot{m}_{fuel}$ = laju aliran bahan bakar (kg/s)

LHV_{fuel} = nilai kalor bahan bakar (kJ/kg)

Nilai efisiensi pendinginan yang tinggi menunjukkan sistem bekerja sesuai desain untuk menjaga stabilitas suhu mesin.

Parameter terakhir adalah perbandingan suhu operasi, yaitu dengan membandingkan suhu aktual air pendingin terhadap suhu kerja ideal mesin diesel (80–95°C). Jika suhu aktual melebihi batas tersebut, maka sistem pendingin dinyatakan tidak efisien dan berpotensi menyebabkan *overheating*.

Melalui analisis keempat parameter tersebut, kinerja sistem pendingin mesin diesel pada PLTD 12v dapat dievaluasi secara menyeluruh untuk mengetahui efisiensi, kestabilan, dan efektivitas pendinginan dalam menjaga keandalan operasi pembangkit listrik.

Selisih temperatur air pendingin merupakan parameter dasar yang digunakan untuk mengetahui seberapa besar panas yang dilepaskan oleh mesin diesel ke sistem pendingin. Selisih temperatur diperoleh dari perbedaan antara temperatur air pendingin yang keluar dari mesin dan temperatur air pendingin yang masuk ke mesin. Nilai selisih temperatur yang terlalu kecil dapat mengindikasikan rendahnya perpindahan panas, sedangkan selisih temperatur yang terlalu besar dapat menandakan beban mesin yang tinggi atau gangguan pada sistem sirkulasi pendingin.

Secara matematis, selisih temperatur air pendingin dapat dihitung

menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta T = T_{out} - T_{in}$$

Keterangan:

ΔT = selisih temperatur air pendingin ($^{\circ}\text{C}$)

T_{out} = temperatur air pendingin keluar mesin ($^{\circ}\text{C}$)

T_{in} = temperatur air pendingin masuk mesin ($^{\circ}\text{C}$)

Besarnya panas yang diserap oleh sistem pendingin menunjukkan kemampuan sistem dalam mengambil energi panas dari mesin diesel. Panas ini berasal dari proses pembakaran bahan bakar di dalam silinder yang tidak seluruhnya diubah menjadi energi mekanik. Sebagian besar energi panas tersebut harus dilepaskan melalui sistem pendingin agar suhu mesin tetap stabil. Semakin besar panas yang mampu diserap sistem pendingin, semakin baik kinerja pendinginan yang dihasilkan.

Panas yang diserap sistem pendingin dapat dihitung dengan menggunakan persamaan neraca energi sebagai berikut:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in})$$

Keterangan:

Q = panas yang diserap sistem pendingin (kJ/s)

$\dot{m}$ = laju aliran massa air pendingin (kg/s)

c_p = kalor jenis air (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$)

T_{out}, T_{in} = temperatur air pendingin keluar dan masuk mesin ($^{\circ}\text{C}$)

Karakteristik aliran air pendingin di dalam pipa sirkulasi sangat memengaruhi efektivitas perpindahan panas. Aliran fluida dapat bersifat laminar atau turbulen. Aliran turbulen lebih diinginkan pada sistem pendingin karena mampu meningkatkan perpindahan panas antara dinding pipa dan fluida pendingin.

Keterangan:

ρ = densitas air (kg/m 3)

v = kecepatan aliran fluida (m/s) D = diameter pipa (m)

μ = viskositas dinamis fluida (Pa·s)

Efisiensi sistem pendingin digunakan untuk mengetahui seberapa besar energi panas hasil pembakaran yang berhasil dibuang oleh sistem pendingin dibandingkan dengan energi total yang dihasilkan dari bahan bakar. Parameter ini penting untuk menilai kontribusi sistem pendingin terhadap kestabilan temperatur mesin dan keandalan operasi pembangkit. Efisiensi pendinginan yang tinggi menandakan sistem pendingin bekerja sesuai dengan desain dan kebutuhan operasi mesin diesel.

Efisiensi sistem pendingin dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\text{Keterangan:} \quad = \frac{Q_{coolant}}{m'_{fuel} \cdot LHV} \times 100\%$$

= efisiensi sistem pendingin (%)

= panas yang dibuang oleh sistem pendingin (kJ/s)

m'_{fuel} = laju aliran bahan bakar (kg/s)

LHV = nilai kalor bawah bahan bakar (kJ/kg)

Pompa pendingin berfungsi untuk mensirkulasikan air pendingin ke seluruh bagian mesin dan sistem penukar panas. Daya pompa yang dibutuhkan harus cukup untuk mengatasi kehilangan tekanan akibat gesekan dalam pipa dan komponen sistem. Analisis daya pompa penting untuk mengetahui besarnya energi listrik internal yang digunakan dalam sistem pendingin serta untuk memastikan bahwa pompa bekerja pada kondisi optimal.

Daya pompa pendingin dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$= \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta}$$

Keterangan:

P = daya pompa pendingin (W) ρ = densitas air (kg/m^3)

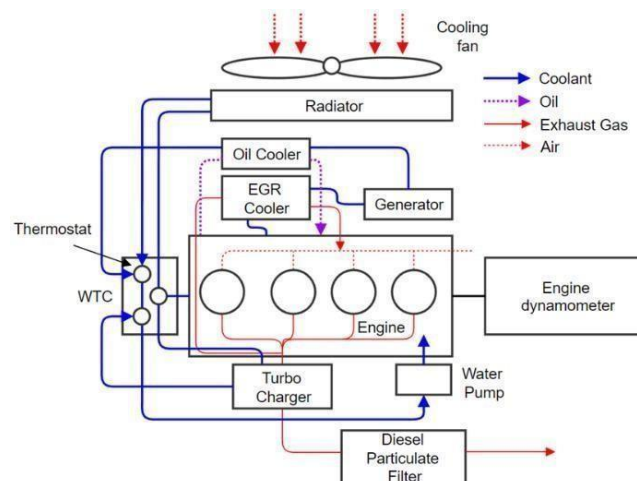
g = percepatan gravitasi (m/s^2)

Q = debit aliran air pendingin (m^3/s) H = head pompa (m)

η = efisiensi pompa

2.2.6 Skema Sistem Pendingin Mesin Diesel

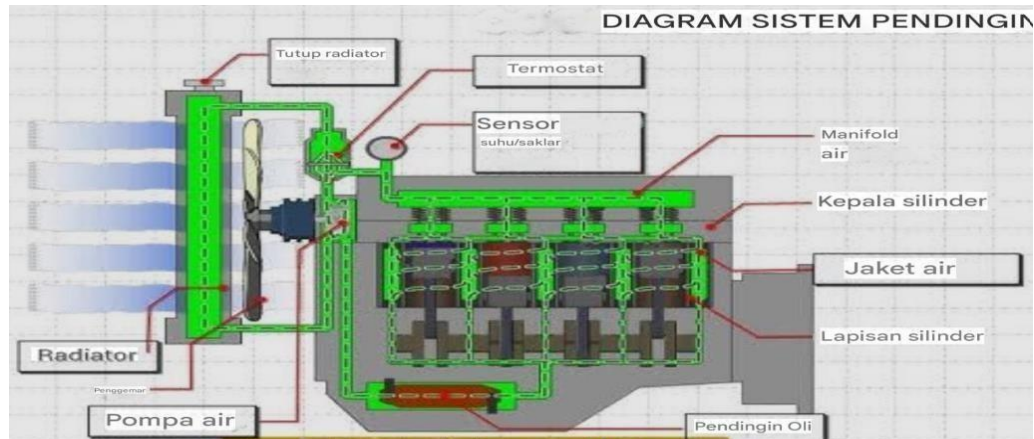
Sistem pendingin mesin diesel berfungsi menjaga temperatur mesin agar tetap berada pada kisaran kerja yang optimal, yaitu antara 80°C hingga 95°C . Ketika mesin beroperasi, ruang bakar menghasilkan panas yang sangat tinggi. Panas tersebut perlu diserap dan dilepas secara terus-menerus agar komponen mesin tidak mengalami kerusakan akibat *overheating*. Sistem pendingin bekerja dengan memanfaatkan *coolant* (air yang dicampur aditif) yang bersirkulasi melalui *water jacket*, radiator, dan komponen pengendali suhu seperti *thermostat*.



Gambar 8. Gambar Skema Pendingin Sistem PLTD

Dengan penelitian ini, sistem pendingin mesin diesel pada PLTD 12v dievaluasi dengan tujuan untuk mengetahui kondisi sebenarnya sistem, menemukan penyebab penurunan kinerjanya, serta memahami dampaknya terhadap keandalan mesin saat beroperasi. Hasil evaluasi diharapkan bisa menjadi acuan untuk menentukan langkah-langkah perbaikan dan peningkatan kinerja sistem pendingin, baik dari segi teknis maupun manajemen. Dengan meningkatkan kinerja sistem pendingin, diharapkan kinerja pembangkit bisa lebih stabil, penggunaan bahan bakar tetap efisien, dan risiko gangguan saat beroperasi bisa lebih sedikit.

2.2.7 Sistem Pendingin yang Digunakan pada PLTD



Gambar 9. Sistem Pendingin

Sistem pendingin yang digunakan pada PLTD 12v adalah sistem pendingin air tertutup (*closed loop cooling system*) dengan media pendingin berupa air yang dicampur bahan aditif (*coolant*). Sistem ini banyak digunakan pada pembangkit diesel skala besar karena memiliki efisiensi perpindahan panas yang tinggi serta mampu menjaga stabilitas temperatur mesin.

Sistem pendingin terdiri dari beberapa subsistem utama, yaitu:

1. *Jacket Cooling Water (JCW)*

Jacket cooling water berfungsi menyerap panas dari blok mesin, silinder, dan kepala silinder. Air pendingin bersirkulasi melalui water jacket untuk menjaga suhu mesin pada kisaran optimal.

2. *Intercooler Cooling System*

Intercooler berfungsi mendinginkan udara masuk mesin setelah kompresi. Pendinginan ini meningkatkan densitas udara sehingga meningkatkan efisiensi pembakaran.

3. *Lube Oil Cooling System*

Sistem ini menjaga suhu oli pelumas agar tetap stabil, sehingga viskositas oli tetap optimal dan mengurangi gesekan antar komponen.

4. *Radiator atau Heat Exchanger*

Berfungsi membuang panas dari air pendingin ke udara atau media lain sebelum air kembali ke mesin.

Penggunaan sistem pendingin tertutup memberikan keuntungan seperti:

- a. Mengurangi korosi dan *fouling*.

- b. Stabilitas suhu yang lebih baik.
- c. Efisiensi perpindahan panas tinggi.
- d. Umur komponen lebih panjang.

2.2.8 Siklus Pendinginan Air (Cooling Water Cycle)

Siklus pendinginan air pada mesin diesel bekerja dengan mengalirkan *coolant* secara terus-menerus untuk menjaga temperatur mesin tetap stabil. Prosesnya adalah sebagai berikut:

1. Air/*coolant* dingin dipompa masuk ke *water jacket* di sekitar silinder mesin.
2. Air menyerap panas dari blok dan kepala silinder, sehingga suhunya meningkat.
3. Air panas keluar dari mesin menuju radiator atau *heat exchanger*.
4. Radiator melepaskan panas melalui sirip pendingin yang dibantu aliran udara dari *cooling fan*.
5. Setelah mendingin, air kembali ke mesin untuk mengulang siklus.
6. *Thermostat* menjaga agar suhu mesin tetap ideal dengan mengatur besar kecilnya aliran *coolant*.

2.2.9 Cara Kerja Sistem Pendingin Mesin Diesel

Cara kerja sistem pendingin mesin diesel mengikuti prinsip perpindahan panas dari mesin ke media pendingin. Proses kerjanya sebagai berikut:

1. Panas dari ruang bakar diteruskan ke dinding silinder dan blok mesin.
2. *Water pump* mengalirkan air pendingin ke seluruh *water jacket* untuk menyerap panas.
3. *Coolant* panas mengalir ke radiator untuk didinginkan oleh udara.
4. *Cooling fan* mempercepat proses pembuangan panas.
5. *Thermostat* mengatur aliran agar suhu mesin stabil di 80–95°C.
6. Air yang sudah didinginkan kembali ke mesin dan siklus berulan