

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu yang Relevan

Penelitian terdahulu yang relevan dengan kajian sistem pendinginan mesin diesel dan analisis perpindahan panas dirangkum pada Tabel 2.1 berikut:

Tabel 2.1 Tabel Penelitian Relevan

No	Peneliti	Metode	Objek Penelitian	Hasil Utama	Keterbatasan
1.	(Gholinia et al., 2024)	Eksperimen	Blok mesin diesel heavy-duty	Fluks panas sangat dipengaruhi oleh kondisi aliran pendingin dan material	Fokus pada kondisi ekstrem dan mesin skala besar
2.	(Zhang , 2021)	Simulasi numerik	Mesin diesel marine	Laju aliran coolant mempengaruhi efisiensi pendinginan dan konsumsi bahan bakar	Tidak berbasis data eksperimen langsung
3.	(Chandan et al., 2024)	Model numerik (AI/NN)	Sistem termal umum	Model mampu memprediksi distribusi temperatur	Tidak spesifik pada mesin diesel dan tidak divalidasi eksperimen

4.	(Stanivuk , Lalić, and Žanić 2021)	Simulasi 1D	Sistem pendinginan diesel marine	Model 1D cukup representatif untuk analisis awal	Tidak ada validasi pada mesin sederhan a/laborato rium
5.	(Pratama et al. 2025)	Eksperi men	Sistem pendinginan mesin 1 silinder tipe laboratorium	Temperatur fluida pendingin berpengaruhi gnifikan terhadap performa mesin; pengukuran Tin dan Tout efektif untuk evaluasi kinerja pendinginan	Tidak menganali sis hubungan antara variasi beban mesin dengan laju perpindah an panas secara kuantitatif
6.	(Haurissa and Wambar uw, 2024)	Eksperi men dan analisis teoritis	Sistem pendinginan radiador pada mesin pembakaran dalam	Persamaan $Q = \dot{m} C_p \Delta T$ terbukti valid untuk menghitung laju perpindahan panas pada sistem radiador; selisih temperatur Tin-Tout menjadi indikator utama kinerja pendinginan	Penelitian dilakukan pada kondisi beban tunggal; belum mencakup variasi kondisi operasi mesin secara sistematis

7.	(Santosa 2024)	Analisis teoritis perpindahan panas	Mekanisme konduksi dan konveksi pada komponen mesin diesel	Hukum Fourier dan persamaan Newton untuk pendinginan konveksi menjadi dasar yang valid dalam menghitung perpindahan panas pada sistem pendinginan mesin diesel laboratorium	Bersifat kajian teoritis; tidak didukung data eksperimen langsung pada mesin diesel
----	----------------	-------------------------------------	--	---	---

Berdasarkan Tabel 2.1, sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada analisis sistem pendinginan menggunakan pendekatan Computational Fluid Dynamics (CFD) tiga dimensi maupun pemodelan numerik dengan tingkat kompleksitas tinggi, serta pengujian eksperimen pada mesin skala industri dan multi-silinder. Pendekatan tersebut umumnya membutuhkan sumber daya komputasi yang besar dan tidak secara langsung merepresentasikan kondisi mesin diesel satu silinder tipe laboratorium.

Selain itu, beberapa penelitian yang menggunakan pendekatan pemodelan numerik masih bersifat teoritis dan belum didukung oleh data eksperimen secara langsung, khususnya pada mesin diesel satu silinder dengan sistem pendinginan air sederhana.

Oleh karena itu, terdapat celah penelitian (research gap) berupa belum adanya kajian yang secara langsung mengintegrasikan pengukuran temperatur aktual dengan analisis

perpindahan panas pada mesin diesel satu silinder tipe laboratorium.

Berdasarkan celah penelitian tersebut, maka penelitian ini memiliki kebaruan (novelty) sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan pada mesin diesel satu silinder tipe laboratorium dengan sistem pendinginan air, yang lebih sederhana dan representatif sebagai media pembelajaran dibandingkan mesin skala industri.
2. Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen melalui pengukuran temperatur fluida pendingin pada sisi masuk dan keluar radiator secara langsung saat mesin beroperasi.
3. Data hasil pengukuran temperatur dianalisis menggunakan perhitungan teoritis perpindahan panas untuk menentukan laju perpindahan panas sistem pendinginan.
4. Hasil analisis disajikan dalam bentuk perhitungan dan grafik untuk mengevaluasi kinerja sistem pendinginan secara kuantitatif dan terukur.
5. Penelitian ini dilengkapi dengan visualisasi distribusi temperatur fluida pendingin menggunakan pendekatan simulasi CFD (Computational Fluida Dynamics) pendukung interpretasi data eksperimen, bukan sebagai analisis CFD mendalam atau optimasi desain sistem pendinginan.

Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan metode analisis yang lebih sederhana, aplikatif, dan sesuai untuk skala laboratorium, serta menjadi referensi dalam pengkajian sistem pendinginan mesin diesel berbasis data eksperimen.

2.2 Mesin Diesel

Motor bakar merupakan mesin kalor yang berfungsi mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi panas melalui proses pembakaran, kemudian mengkonversinya menjadi energi mekanik. Berdasarkan lokasi pembakarannya, motor bakar dibedakan menjadi External Combustion Engine dan Internal Combustion Engine. Mesin diesel termasuk dalam kategori Internal Combustion Engine, di mana pembakaran terjadi langsung di dalam ruang bakar.

2.2.1 Pengertian dan Karakteristik Mesin Diesel

Mesin diesel merupakan motor bakar torak yang bekerja berdasarkan prinsip penyalan sendiri (compression ignition), yaitu proses pembakaran yang terjadi akibat tekanan dan temperatur udara yang tinggi di dalam silinder. Pada mesin ini, hanya udara yang masuk ke dalam silinder pada langkah hisap. kemudian dikompresi hingga mencapai tekanan dan temperatur tinggi

Ketika piston mendekati Titik Mati Atas (TMA), bahan bakar diinjeksikan dalam bentuk kabut halus ke dalam ruang bakar. Akibat temperatur udara yang tinggi, bahan bakar mengalami pembakaran spontan tanpa bantuan busi. Karakteristik utama mesin diesel antara lain:

- a. Memiliki rasio kompresi tinggi
- b. Efisiensi termal relatif lebih baik dibanding mesin bensin
- c. Menghasilkan torsi yang besar
- d. Memiliki temperatur pembakaran yang tinggi

Sebagian energi hasil pembakaran diubah menjadi kerja mekanik, sedangkan sebagian lainnya dilepaskan dalam bentuk panas ke dinding silinder, kepala silinder, dan piston. Panas

tersebut kemudian diserap oleh sistem pendinginan mesin untuk menjaga temperatur kerja tetap stabil dan mencegah terjadinya overheating.

Pada penelitian ini, mesin yang digunakan adalah mesin diesel satu silinder tipe laboratorium dengan sistem pendinginan air (radiator), yaitu mesin diesel merk Yanmar tipe TF85MR di laboratorium. mesin ini merupakan tipe mesin diesel empat langkah yang umum digunakan sebagai media praktikum di laboratorium teknik mesin. **Skema aliran masukan dan keluaran pada sistem pengujian mesin ini dapat dilihat pada Gambar 2.2.**



Gambar 2.2 Diagram Blok Masukan dan Keluaran Sistem Pengujian Mesin Diesel
Sumber : (LEE HONG LEAN, 2017)

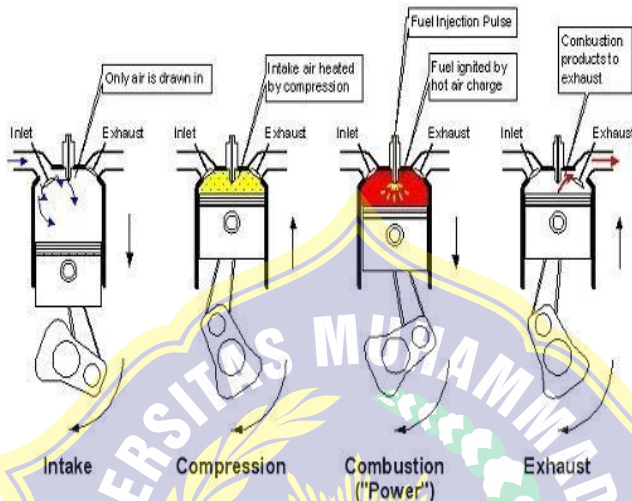
2.2.2 Prinsip Kerja Mesin Diesel Empat Langkah

Mesin diesel empat langkah bekerja melalui empat proses utama yang terjadi dalam dua kali putaran poros engkol. Setiap langkah memiliki peran penting dalam proses pembakaran dan pembangkitan energi mekanik.

Berikut adalah tahapan prinsip kerja mesin diesel empat langkah:

1. Langkah Hisap (Intake Stroke)
Piston bergerak dari Titik Mati Atas (TMA) ke Titik Mati Bawah (TMB), katup masuk terbuka, dan udara segar masuk ke dalam silinder.
 2. Langkah Kompresi (Compression Stroke)
Piston bergerak dari TMB ke TMA dengan kedua katup tertutup. Udara dikompresi sehingga tekanan dan temperaturnya meningkat secara signifikan.
 3. Langkah Usaha (Power Stroke)
Bahan bakar diinjeksikan saat piston mendekati TMA. Proses pembakaran menghasilkan tekanan tinggi yang mendorong piston dari TMA ke TMB sehingga menghasilkan kerja mekanik.
 4. Langkah Buang (Exhaust Stroke)
Piston bergerak dari TMB ke TMA dengan katup buang terbuka untuk mengeluarkan gas sisa pembakaran dari dalam silinder.
- Siklus tersebut berlangsung secara terus-menerus selama mesin beroperasi dan menjadi dasar dalam proses konversi energi pada mesin diesel.

4-stroke Compression-ignition (Diesel) Engine Cycle



Gambar 2.3 Prinsip Kerja Mesin Diesel Empat Langkah
Sumber: (LEE HONG LEAN, 2017)

Proses empat langkah tersebut berpengaruh terhadap distribusi temperatur pada komponen mesin, sehingga sistem pendinginan berperan penting dalam menjaga kestabilan temperatur selama siklus kerja berlangsung.

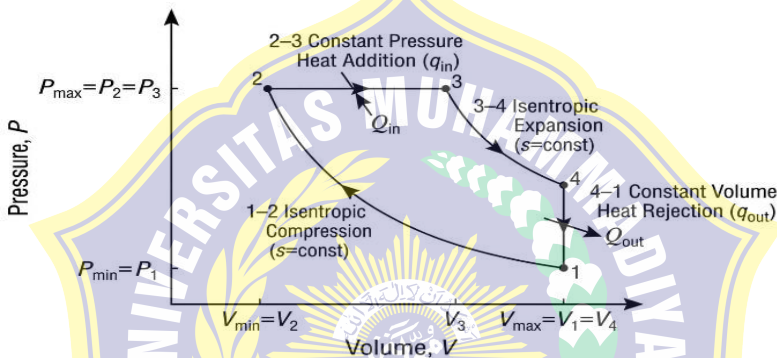
2.2.3 Siklus Diesel Ideal

Secara teoritis, mesin diesel mengikuti siklus diesel ideal yang terdiri dari empat proses termodinamika, yaitu:

1. Kompresi isentropik
2. Penambahan kalor pada tekanan konstan
3. Ekspansi isentropik
4. Pembuangan kalor pada volume konstan

Siklus tersebut digambarkan dalam diagram tekanan–volume (P–V). Luas area yang terbentuk pada diagram tersebut menunjukkan besarnya kerja yang dihasilkan dalam satu siklus.

Pada kondisi aktual, siklus mesin tidak sepenuhnya ideal karena adanya rugi-rugi panas dan gesekan. Sebagian panas hasil pembakaran diserap oleh dinding silinder dan dialirkan menuju sistem pendinginan air.



Gambar 2.4 (Diagram Siklus Diesel Ideal pada Diagram P-V)

Sumber: (Heywood et al. 2024)

Pemahaman siklus diesel ideal ini menjadi dasar menganalisis energi panas yang dihasilkan selama proses pembakaran dan bagaimana panas tersebut didistribusikan ke sistem pendinginan.

2.2.4 Neraca Energi (Heat Balance) pada Mesin Diesel

Dalam operasi mesin diesel, energi total yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar tidak seratus persen diubah menjadi daya mekanis yang berguna. Berdasarkan Hukum Pertama Termodinamika tentang kekekalan energi, distribusi kalor pada motor pembakaran dalam dapat digambarkan menggunakan Neraca Energi atau Diagram Sankey. Secara umum, persentase

distribusi energi pada mesin diesel terbagi menjadi: daya poros efektif (sekitar 30–40%), kerugian gas buang (sekitar 25–35%), kerugian gesekan dan radiasi (sekitar 5–10%), serta kalor yang diserap oleh sistem pendinginan (sekitar 25–40%). Persamaan kesetimbangan energi secara umum dituliskan sebagai berikut:

$$Q_{in} = P_{efektif} + Q_{buang} + Q_{pendingin} + Q_{gesek\&radiasi} \dots (2.1)$$

Di mana Q_{in} adalah total laju kalor masukan dari pembakaran bahan bakar (Watt), $P_{efektif}$ adalah daya poros efektif yang dihasilkan mesin (Watt), Q_{buang} adalah laju kalor yang terbuang melalui gas buang (Watt), $Q_{pendingin}$ adalah laju kalor yang diserap oleh sistem pendinginan air (Watt), dan $Q_{gesek\&radiasi}$ adalah laju kalor akibat gesekan mekanis dan radiasi permukaan mesin (Watt).

Adanya pembebanan yang bervariasi akan mengubah persentase distribusi energi ini secara dinamis. Peningkatan daya poros ($P_{efektif}$) akibat beban listrik yang lebih besar biasanya akan menurunkan persentase relatif kalor yang diserap oleh sistem pendingin ($Q_{pendingin}$) terhadap total energi masukan. Hal ini konsisten dengan tren penurunan efisiensi pendinginan yang dapat diamati pada pengujian berbeban secara eksperimental (Pulkrabek, 2021; Heywood, 2018)

2.3 Sistem Pendinginan Mesin Diesel

Sistem pendinginan merupakan salah satu subsistem penting pada mesin diesel yang berfungsi untuk menjaga temperatur kerja mesin agar tetap berada dalam batas operasi yang aman. Selama proses pembakaran berlangsung, sebagian energi panas yang dihasilkan akan diserap oleh komponen mesin seperti dinding silinder, kepala silinder, dan piston. Apabila panas tersebut tidak dikendalikan dengan baik, maka temperatur mesin dapat meningkat secara berlebihan (overheating) yang dapat menyebabkan penurunan efisiensi mesin, peningkatan keausan komponen, serta potensi kerusakan pada mesin.

Untuk menjaga kestabilan temperatur kerja mesin, panas yang diserap oleh komponen mesin harus dipindahkan ke lingkungan melalui suatu sistem pendinginan. Pada mesin diesel, sistem pendinginan umumnya menggunakan fluida pendingin berupa air atau campuran air dengan cairan pendingin khusus (coolant) yang dialirkan melalui saluran pendingin di sekitar silinder mesin yang dikenal sebagai water jacket. Fluida pendingin tersebut kemudian mengalir menuju radiator untuk melepaskan panas ke lingkungan sebelum kembali bersirkulasi ke dalam mesin.

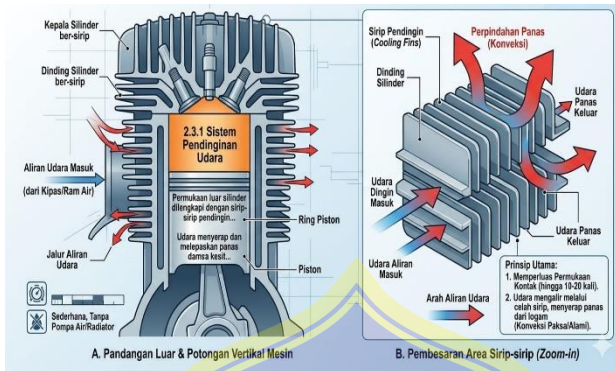
Secara umum, sistem pendinginan pada mesin diesel dapat dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu sistem pendinginan udara dan sistem pendinginan air.

2.3.1 Sistem Pendinginan Udara

Sistem pendinginan udara merupakan sistem pendinginan yang menggunakan aliran udara sebagai media untuk menyerap dan melepaskan panas dari mesin. Pada sistem ini, permukaan luar silinder dan kepala silinder biasanya dilengkapi dengan sirip-sirip pendingin (cooling fins) yang berfungsi untuk memperluas luas permukaan sehingga perpindahan panas ke udara dapat berlangsung lebih efektif.

Pendinginan udara umumnya digunakan pada mesin dengan kapasitas kecil karena konstruksinya lebih sederhana dan tidak memerlukan komponen tambahan seperti pompa air atau radiator. Namun, kemampuan pendinginan sistem ini relatif terbatas dibandingkan dengan sistem pendinginan air.

Untuk memperjelas mekanisme perpindahan panas pada sistem pendinginan udara, ditunjukkan pada Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 Sistem Pendinginan Udara pada Mesin Diesel
Sumber: (Heywood et al. 2024)

Meskipun sistem pendinginan udara memiliki konstruksi yang sederhana, keterbatasan dalam mengontrol temperatur secara stabil menyebabkan sistem ini kurang digunakan pada mesin diesel dengan kebutuhan beban kerja tinggi.

2.3.2 Sistem Pendinginan Air

Sistem pendinginan air merupakan sistem pendinginan yang menggunakan fluida cair sebagai media untuk menyerap panas dari mesin. Pada sistem ini, air atau coolant dialirkan melalui saluran pendingin (water jacket) yang berada di sekitar silinder dan kepala silinder mesin. Fluida tersebut akan menyerap panas dari dinding mesin melalui proses perpindahan panas konduksi dan konveksi.

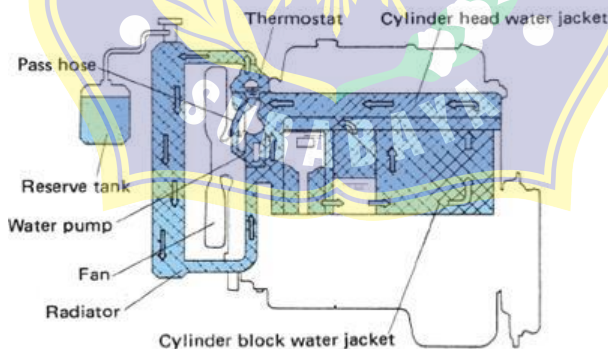
Setelah menyerap panas dari mesin, fluida pendingin akan mengalir menuju radiator untuk melepaskan panas ke udara lingkungan. Di dalam radiator, panas dipindahkan dari fluida pendingin ke udara melalui mekanisme konveksi dan konduksi pada permukaan pipa dan sirip radiator. Setelah temperatur fluida menurun, fluida tersebut akan kembali bersirkulasi ke dalam mesin untuk menyerap panas kembali.

Sistem pendinginan air umumnya terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu:

1. Radiator, berfungsi sebagai penukar panas untuk melepaskan panas fluida pendingin ke udara.
2. Pompa air (water pump), berfungsi untuk mensirkulasikan fluida pendingin melalui sistem.
3. Water jacket, yaitu saluran pendingin yang mengelilingi silinder mesin.
4. Selang dan pipa pendingin, yang menghubungkan komponen sistem pendinginan.

Pada penelitian ini, sistem pendinginan yang dianalisis adalah sistem pendinginan air dengan radiator yang digunakan pada mesin diesel satu silinder tipe laboratorium. Analisis dilakukan dengan mengukur temperatur fluida pendingin yang masuk dan keluar radiator untuk mengetahui karakteristik perpindahan panas yang terjadi pada sistem pendinginan tersebut.

Untuk memperjelas aliran fluida pada sistem pendinginan air, ditunjukkan pada **Gambar 2.6** berikut.



Gambar 2.6 Sistem Pendinginan Air pada Mesin Diesel
Sumber: (Almeshaal and Choubani 2023)

Parameter temperatur fluida masuk (T_{in}) dan keluar (T_{out}) radiator menjadi dasar utama dalam analisis laju perpindahan panas pada penelitian ini.

2.3.3 Karakteristik Aliran pada Pompa Air (Water Pump)

Pompa air pada sistem pendinginan mesin diesel umumnya berjenis pompa sentrifugal yang putarannya digerakkan langsung oleh poros engkol mesin melalui transmisi sabuk atau roda gigi. Karakteristik laju aliran fluida pada pompa sentrifugal tunduk pada Hukum Afinitas Pompa (Pump Affinity Laws), yang menyatakan bahwa kapasitas atau debit aliran fluida berbanding lurus secara linier dengan kecepatan putaran poros pompa. Secara matematis, hubungan tersebut dinyatakan sebagai:

$$Q_1 / Q_2 = N_1 / N_2 \quad \text{atau} \quad \dot{m}_1 / \dot{m}_2 = N_1 / N_2 \dots (2.2)$$

Di mana Q_1 dan Q_2 adalah debit aliran pada kondisi putaran N_1 dan N_2 (m^3/s), $\dot{m}_1$ dan $\dot{m}_2$ adalah laju aliran massa fluida pada putaran N_1 dan N_2 (kg/s), serta N_1 dan N_2 adalah kecepatan putaran poros pompa pada kondisi 1 dan 2 (RPM).

Persamaan ini berlaku untuk pompa sentrifugal yang beroperasi pada titik kerja yang secara geometris serupa (Cangel & Cimbala, 2021). Dengan demikian, setiap fluktuasi pada putaran mesin (RPM) akan secara langsung dan proporsional mempengaruhi laju aliran massa fluida pendingin yang bersirkulasi menuju radiator. Penerapan hukum afinitas ini memungkinkan estimasi laju aliran massa pada berbagai kondisi putaran mesin tanpa memerlukan pengukuran langsung dengan flow meter, asalkan nilai $\dot{m}$ pada salah satu kondisi referensi telah diketahui (Elger et al., 2022).

2.4 Perpindahan Panas

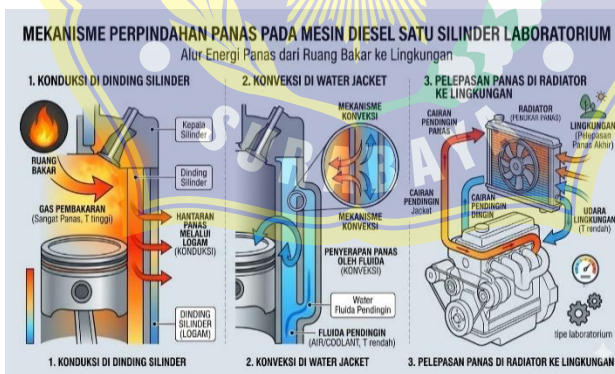
Perpindahan panas merupakan proses berpindahnya energi panas dari suatu sistem yang memiliki temperatur lebih tinggi ke

sistem lain yang memiliki temperatur lebih rendah. Proses ini terjadi karena adanya perbedaan temperatur antara dua media atau lebih.

Pada mesin diesel, energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran di dalam ruang bakar tidak seluruhnya diubah menjadi energi mekanik, melainkan sebagian diserap oleh komponen mesin seperti dinding silinder dan kepala silinder. Panas tersebut kemudian dialirkan menuju sistem pendinginan untuk menjaga temperatur kerja mesin tetap stabil.

Pada mesin diesel satu silinder tipe laboratorium yang digunakan dalam penelitian ini, proses perpindahan panas terjadi secara berurutan mulai dari ruang bakar hingga ke lingkungan. Panas dari gas pembakaran berpindah ke dinding silinder melalui mekanisme konduksi, kemudian diserap oleh fluida pendingin yang mengalir di dalam water jacket melalui mekanisme konveksi. Selanjutnya, fluida pendingin membawa panas tersebut menuju radiator untuk dilepaskan ke udara lingkungan.

Untuk memperjelas mekanisme perpindahan panas pada mesin penelitian, ditunjukkan pada **Gambar 2.7 berikut.**



Gambar 2.7 Mekanisme Perpindahan Panas pada Sistem Pendinginan Mesin Diesel
Sumber: (Santosa 2024)

Berdasarkan **Gambar 2.7**, proses perpindahan panas pada sistem pendinginan mesin diesel dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Panas dari hasil pembakaran di dalam ruang bakar berpindah ke dinding silinder melalui mekanisme konduksi.
2. Panas dari dinding silinder kemudian diserap oleh fluida pendingin yang mengalir di dalam water jacket melalui mekanisme konveksi.
3. Fluida pendingin yang telah menyerap panas mengalir menuju radiator.
4. Di dalam radiator, panas dilepaskan ke udara lingkungan melalui konveksi pada permukaan pipa dan sirip radiator.

Pada penelitian ini, analisis perpindahan panas difokuskan pada fluida pendingin di radiator, yaitu berdasarkan perbedaan temperature fluida masuk (T_{in}) dan keluar (T_{out}) radiator.

2.4.1 Perpindahan Panas Secara Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi adalah proses perpindahan panas melalui suatu medium padat tanpa disertai perpindahan massa. Pada mesin diesel, proses konduksi terjadi ketika panas dari gas hasil pembakaran di dalam ruang bakar merambat melalui dinding silinder menuju permukaan luar yang bersentuhan dengan fluida pendingin.

Besarnya laju perpindahan panas secara konduksi dapat dinyatakan menggunakan Hukum Fourier sebagai berikut: (Incropera et al.,2017)

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.3)$$

Dimana:

q = laju perpindahan panas (W)

k = konduktivitas termal material (W/m·K)

A = luas penampang perpindahan panas (m^2)
 dT/dx = gradien temperatur (K/m)

Persamaan (2.3) menunjukkan bahwa laju perpindahan panas secara konduksi berbanding lurus dengan konduktivitas termal material, luas penampang perpindahan panas, dan gradien temperatur pada arah perpindahan panas

2.4.2 Perpindahan Panas Secara Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi merupakan perpindahan panas yang terjadi antara permukaan padat dengan fluida yang bergerak. Pada sistem pendinginan mesin diesel, proses konveksi terjadi ketika fluida pendingin menyerap panas dari permukaan dinding silinder yang berada di dalam water jacket.

Laju perpindahan panas secara konveksi dapat dinyatakan dengan Hukum Newton tentang Pendinginan sebagai berikut: (Incropera et al., 2017)

$$q = hA(T_s - T_f) \quad (2.4)$$

Dimana:

q = laju perpindahan panas (W)

h = koefisien perpindahan panas konveksi ($W/m^2 \cdot K$)

A = luas permukaan perpindahan panas (m^2)

T_s = temperatur permukaan (K)

T_f = temperatur fluida (K)

Persamaan (2.4) menunjukkan bahwa perpindahan panas konveksi dipengaruhi oleh koefisien konveksi, luas permukaan, serta perbedaan temperatur antara permukaan dan fluida

2.4.3 Laju Perpindahan Panas pada Fluida Pendingin

Berdasarkan mekanisme perpindahan panas yang telah dijelaskan pada Subbab 2.4.1 dan 2.4.2, panas dari hasil pembakaran di dalam ruang bakar akan berpindah melalui dinding silinder secara konduksi, kemudian diserap oleh fluida pendingin yang mengalir di dalam water jacket melalui proses konveksi.

Fluida pendingin yang telah menyerap panas tersebut selanjutnya mengalir menuju radiator untuk melepaskan panas ke lingkungan. Oleh karena itu, analisis laju perpindahan panas pada sistem pendinginan mesin diesel dapat dilakukan dengan menggunakan pendekatan keseimbangan energi pada fluida pendingin di radiator.

Persamaan laju perpindahan panas pada fluida pendingin di radiator dapat dinyatakan menggunakan prinsip keseimbangan energi sebagai berikut: (Cengel & Ghajar, 2020)

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (2.5)$$

Dimana:

Q = laju perpindahan panas (W)

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

C_p = kalor jenis fluida pendingin (J/kg·K)

T_{out} = temperatur fluida keluar radiator (K)

T_{in} = temperatur fluida masuk radiator (K)

Persamaan (2.5) menunjukkan bahwa besarnya panas yang dipindahkan oleh fluida pendingin bergantung pada laju aliran massa serta perbedaan temperatur antara sisi masuk dan keluar radiator

Dalam penelitian ini, nilai temperature T_{in} dan T_{out} diperoleh melalui pengukuran langsung menggunakan thermocouple yang dipasang pada saluran masuk dan keluar radiator. Data temperatur tersebut kemudian digunakan untuk menghitung laju perpindahan panas serta mengevaluasi kinerja sistem pendinginan mesin diesel satu silinder tipe laboratorium.



Gambar 2.8 Mekanisme Perpindahan Panas pada Radiator Sistem Pendinginan Mesin Diesel
Sumber : (Haurissa and Wambaruw 2024)

Berdasarkan Gambar 2.8, fluida pendingin yang telah menyerap panas dari mesin mengalir menuju radiator melalui sisi masuk (inlet) dengan temperatur . Di dalam radiator, fluida tersebut melepaskan panas ke udara lingkungan yang mengalir melewati permukaan radiator melalui proses konveksi.

Akibat proses tersebut, temperatur fluida pendingin mengalami penurunan dan keluar melalui sisi keluar (outlet) dengan temperatur. Perbedaan temperatur antara dan menunjukkan besarnya panas yang dilepaskan oleh fluida pendingin.

Dalam penelitian ini, selisih temperatur tersebut digunakan sebagai dasar dalam perhitungan laju perpindahan panas menggunakan **Persamaan (2.5)**, sehingga kinerja sistem pendinginan mesin diesel dapat dievaluasi secara kuantitatif.

2.4.4 Keadaan Transien dan Steady-State pada Sistem Termal

Proses perpindahan panas pada mesin yang sedang beroperasi dapat terjadi dalam dua keadaan, yaitu transien (unsteady) dan steady-state (tunak). Keadaan transien terjadi

ketika laju perpindahan panas dan temperatur sistem masih berubah terhadap waktu, biasanya terjadi saat mesin baru dihidupkan atau saat mengalami perubahan pembebanan secara tiba-tiba. Pada fase ini, temperatur fluida pendingin, dinding silinder, dan komponen termal lainnya belum mencapai keseimbangan dengan kondisi operasi yang baru (Bergman et al., 2022)

Setelah mesin beroperasi dalam waktu tertentu pada kondisi beban dan putaran yang konstan, sistem termal akan mencapai keadaan steady-state, di mana temperatur operasi mesin dan fluida pendingin menjadi stabil serta tidak lagi mengalami fluktuasi yang signifikan terhadap waktu. Pada keadaan steady-state, laju kalor yang masuk ke sistem pendinginan sama dengan laju kalor yang dibuang melalui radiator, sehingga data yang diambil pada kondisi ini lebih representatif untuk analisis kinerja sistem pendinginan secara termodinamika (Cengel & Ghajar, 2020)

Pemahaman terhadap perbedaan kedua keadaan ini penting dalam interpretasi data eksperimen, terutama apabila pengukuran temperatur dilakukan pada kondisi di mana mesin baru mengalami perubahan pembebanan sehingga sistem termal belum sepenuhnya stabil.

2.5 Analisis Perpindahan Panas pada Sistem Pendinginan Radiator

Pada sistem pendinginan mesin diesel, radiator berfungsi sebagai alat penukar panas yang melepaskan energi panas dari fluida pendingin ke udara lingkungan. Fluida pendingin yang telah menyerap panas dari mesin melalui water jacket akan mengalir menuju radiator untuk menurunkan temperaturnya sebelum kembali bersirkulasi ke dalam mesin.

Selain laju perpindahan panas, kinerja radiator juga dapat dievaluasi menggunakan parameter efektivitas pendinginan (ϵ), yang menunjukkan seberapa besar kemampuan radiator

menurunkan temperatur fluida pendingin relatif terhadap selisih temperatur maksimum yang mungkin terjadi. Efektivitas radiator didefinisikan sebagai berikut:

$$\varepsilon = \Delta T / (T_{in} - T_{lingkungan}) \times 100\% \dots\dots\dots (2.6)$$

Di mana:

ε = efektivitas pendinginan radiator (%)

ΔT = selisih temperatur masuk dan keluar radiator ($^{\circ}\text{C}$)

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

$T_{lingkungan}$ = temperatur udara lingkungan ($^{\circ}\text{C}$)

Nilai ε berkisar antara 0% hingga 100%. Semakin tinggi

Nilai ε berkisar antara 0% hingga 100%. Semakin tinggi nilai ε , semakin efektif radiator dalam mendinginkan fluida pendingin. Parameter ini diterapkan pada kondisi tanpa pembebanan listrik di mana data konsumsi bahan bakar tidak diukur secara langsung.

Proses perpindahan panas pada radiator terjadi melalui mekanisme konveksi antara fluida pendingin dan dinding pipa radiator, serta konveksi antara permukaan radiator dengan udara lingkungan. Oleh karena itu, analisis kinerja sistem pendinginan dapat dilakukan berdasarkan perubahan temperatur fluida pendingin pada radiator.

Dalam penelitian ini, parameter utama yang dianalisis adalah temperatur fluida pendingin pada sisi masuk radiator (T_{in}) dan temperatur fluida pada sisi keluar radiator (T_{out}). Data temperatur tersebut digunakan untuk menghitung laju perpindahan panas yang dilepaskan oleh fluida pendingin menggunakan **Persamaan (2.5)**.

Selain itu, selisih temperatur ($\Delta T = T_{in} - T_{out}$) juga dianalisis sebagai indikator kemampuan sistem pendinginan dalam menurunkan temperatur fluida. Semakin besar nilai ΔT , maka menunjukkan bahwa kemampuan radiator dalam melepaskan panas semakin baik.

Berdasarkan data hasil pengukuran, analisis yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi:

1. Perhitungan laju perpindahan panas (Q) berdasarkan data temperatur fluida pendingin.
2. Analisis perubahan temperatur fluida pendingin antara sisi masuk dan keluar radiator.
3. Visualisasi hubungan antara temperatur dan laju perpindahan panas dalam bentuk grafik.

Dengan analisis tersebut, kinerja sistem pendinginan radiator pada mesin diesel satu silinder tipe laboratorium dapat dievaluasi secara kuantitatif dan terukur.

Selain pendekatan eksperimen dan analisis teoritis, dalam penelitian ini juga digunakan visualisasi termal berbasis kecerdasan buatan (AI-assisted thermal visualization) sebagai pendekatan pendukung untuk memvisualisasikan distribusi temperatur dan pola aliran fluida pendingin pada radiator. AI-assisted thermal visualization difokuskan pada bagian masuk (inlet) dan keluar (outlet) radiator untuk melihat karakteristik penurunan temperatur fluida secara numerik.

Hasil simulasi AI-assisted thermal visualization digunakan sebagai pembandingan terhadap data eksperimen dan hasil perhitungan teoritis laju perpindahan panas, sehingga dapat memberikan validasi tambahan terhadap kinerja sistem pendinginan yang dianalisis yang dilakukan menjadi lebih komprehensif karena menggabungkan metode eksperimen, teoritis, dan simulasi numerik.

2.6 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan metode simulasi numerik yang digunakan untuk membantu menganalisis karakteristik aliran fluida dan perpindahan panas dengan bantuan

perangkat lunak komputer. Metode CFD memungkinkan distribusi aliran fluida, temperatur, dan perpindahan panas divisualisasikan secara lebih mudah dan sistematis.

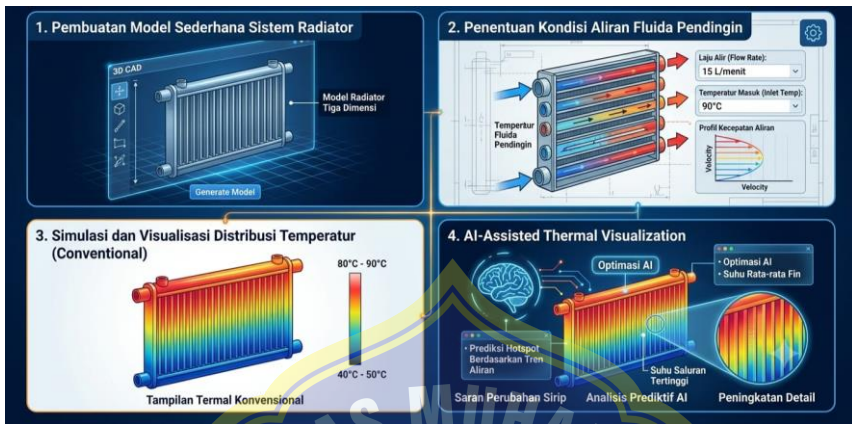
Dalam bidang teknik mesin, CFD banyak digunakan untuk membantu analisis sistem pendinginan, perpindahan panas, serta karakteristik aliran fluida pada suatu sistem. Hasil simulasi CFD umumnya berupa visualisasi distribusi temperatur, tekanan, dan pola aliran fluida.

Pada penelitian ini, visualisasi termal AI-assisted (AI-assisted thermal visualization) digunakan sebagai metode pendukung untuk memvisualisasikan distribusi temperatur fluida pendingin pada radiator, khususnya pada bagian keluar (outlet) radiator. Pendekatan ini tidak digunakan sebagai analisis CFD utama, melainkan hanya sebagai pembanding kualitatif terhadap hasil eksperimen dan perhitungan teoritis yang telah diperoleh.

Perangkat visualisasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah pendekatan visualisasi termal berbasis kecerdasan buatan (AI-assisted thermal visualization). Pendekatan ini dipilih berdasarkan pertimbangan keterbatasan sumber daya komputasi dan kesesuaian dengan fungsi simulasi yang bersifat kualitatif-pendukung. Visualisasi difokuskan pada distribusi gradien temperatur inlet-ke-outlet radiator secara dua dimensi untuk memperkuat interpretasi data eksperimen, bukan sebagai analisis CFD kuantitatif mendalam.

Secara umum, tahapan visualisasi termal AI-assisted pada penelitian ini meliputi:

1. Pembuatan model sederhana sistem radiator.
2. Penentuan kondisi aliran fluida pendingin.
3. Proses visualisasi dilakukan menggunakan AI-assisted thermal visualization untuk menghasilkan pola distribusi temperatur pada radiator secara kualitatif
4. Visualisasi distribusi temperatur hasil simulasi.



Gambar 2.9 Skala Gradasi Warna Spektrum Termal Standar pada Distribusi

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Visualisasi termal AI-assisted pada penelitian ini digunakan sebagai visualisasi distribusi temperatur dan pembandingan terhadap hasil eksperimen, sehingga membantu memperjelas proses perpindahan panas yang terjadi pada sistem pendinginan radiator.