

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Mesin diesel merupakan salah satu jenis mesin kalor yang berfungsi mengubah energi kimia dalam bahan bakar menjadi energi panas, dan selanjutnya dikonversi menjadi energi mekanik. Keunggulan utama mesin diesel terletak pada sistem pembakaran kompresi yang dimilikinya, yang mampu memberikan efisiensi termal tinggi, keandalan operasional, serta fleksibilitas dalam penggunaan berbagai jenis bahan bakar. Oleh karena itu, mesin ini banyak digunakan dalam sektor transportasi, industri, serta alat berat. Proses pembakaran pada mesin diesel terjadi melalui mekanisme penyalaan akibat tekanan (*compression ignition*), di mana udara dikompresi hingga mencapai suhu dan tekanan tinggi, sehingga mampu membakar bahan bakar tanpa memerlukan busi. Efisiensi dan performa mesin diesel sangat bergantung pada kesempurnaan proses pembakarannya. Faktor-faktor seperti tekanan injeksi bahan bakar, turbulensi atau pusaran udara dalam ruang bakar, serta suhu udara saat masuk memegang peranan penting dalam menentukan efisiensi pembakaran tersebut. Oleh karena itu, pemahaman mendalam terhadap dinamika proses pembakaran menjadi aspek krusial dalam upaya peningkatan efisiensi dan pengembangan teknologi mesin diesel yang lebih ramah lingkungan (Yani, 2022).

Performa mesin diesel sangat dipengaruhi oleh jumlah udara yang masuk ke ruang bakar. Mesin ini bekerja dengan prinsip pembakaran kompresi, di mana bahan bakar terbakar akibat udara terkompresi yang bersuhu dan bertekanan tinggi, tanpa bantuan busi. Secara ideal, volume udara yang masuk saat langkah hisap sebanding dengan volume langkah piston. Namun, dalam praktiknya, jumlah udara sering kali lebih sedikit karena berbagai faktor mekanis dan aliran fluida (Putra, 2021).

Efisiensi volumetrik adalah rasio antara volume udara yang masuk ke dalam silinder dengan volume langkah torak dari titik mati atas ke titik mati bawah. Semakin tinggi efisiensi ini, semakin baik proses pembakaran dan daya mesin yang dihasilkan. (Sampurno, Widjanarko and Winarno, 2010). Efisiensi volumetrik menjadi indikator penting untuk menilai kemampuan mesin mengisap udara, yang berdampak langsung pada efisiensi pembakaran dan daya mesin (Putra, 2021).

Asupan udara yang masuk ke dalam mesin diesel memainkan peran krusial dalam menentukan kinerja mesin serta karakteristik emisi yang dihasilkannya. Sejumlah studi telah mengeksplorasi berbagai pendekatan dalam mengoptimalkan penggunaan udara guna meningkatkan efisiensi proses pembakaran sekaligus menekan tingkat emisi. Pengaturan asupan udara menjadi aspek yang sangat vital, khususnya pada mesin diesel berbahan bakar ganda yang menggunakan campuran solar konvensional dan bahan bakar alternatif seperti gas alam. Mesin jenis ini membutuhkan rasio udara dan bahan bakar yang seimbang agar proses pembakaran berlangsung secara optimal. Salah satu penelitian oleh Yuvenda dan rekan-rekannya (2022) mengungkapkan bahwa jika pasokan udara tidak mencukupi, maka proses pembakaran dapat terjadi secara tidak sempurna, yang pada akhirnya berdampak pada peningkatan emisi, terutama emisi hidrokarbon (HC) dan karbon monoksida (CO) (Yuvenda, D., Sudarmanta, B., Wahjudi, A., & Hirowati, no date).

Pengaturan asupan udara juga memiliki pengaruh yang signifikan terhadap dinamika pembakaran dalam mesin diesel. Beberapa temuan menunjukkan bahwa penggunaan *throttle* untuk mengatur aliran udara dapat meningkatkan rugi-rugi pemompaan, yang pada gilirannya berpotensi menurunkan efisiensi volumetrik mesin. Dengan kata lain, cara pengendalian udara masuk yang kurang tepat dapat menghambat proses pengisian silinder secara optimal, sehingga mengurangi performa keseluruhan sistem pembakaran (Zhou *et al.*, 2019).

1.2 Teori Dasar Mesin Diesel

Berdasarkan mekanisme pembakarannya, mesin pembakaran dalam terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu mesin bensin dan mesin diesel. Mesin diesel bekerja dengan prinsip penyalan kompresi, di mana udara dikompresi di dalam silinder hingga mencapai tekanan dan suhu tinggi yang melampaui titik nyala bahan bakar. Pada akhir langkah kompresi, bahan bakar disemprotkan ke dalam ruang bakar dan terbakar secara spontan tanpa bantuan busi. Energi panas dari pembakaran tersebut menghasilkan tekanan tinggi yang mendorong piston ke bawah, menghasilkan tenaga mekanis yang kemudian diteruskan menjadi gerakan putar melalui poros engkol. Siklus kerja mesin diesel terdiri dari empat tahap, yaitu langkah hisap, langkah kompresi, langkah usaha, dan langkah buang. Karena mesin diesel menghasilkan tenaga yang besar, maka dibutuhkan sistem suplai bahan bakar dan udara yang efisien serta proses pembakaran yang optimal agar performa mesin dapat tercapai secara maksimal (Putra, 2021).

1.2.1 Prinsip Kerja Mesin Diesel 4 Langkah

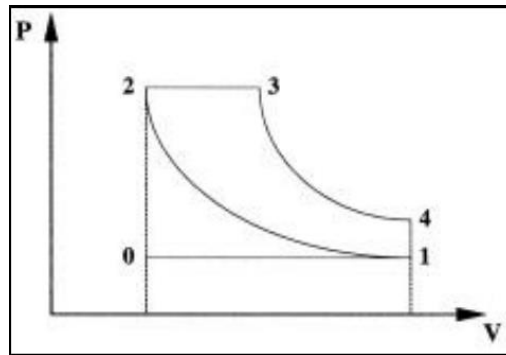
Secara umum, mesin diesel diklasifikasikan menjadi dua tipe berdasarkan siklus kerjanya, yaitu mesin diesel dua langkah dan empat langkah. Dalam praktiknya, mesin diesel empat langkah lebih umum digunakan pada kendaraan modern karena menawarkan efisiensi lebih tinggi, pembakaran yang lebih sempurna, dan tingkat emisi yang lebih rendah dibandingkan mesin dua langkah. Dinamakan mesin empat langkah karena siklus kerjanya terdiri dari empat gerakan piston, yang setara dengan dua kali putaran poros engkol. Setiap langkah memiliki peran penting dalam proses pembakaran, yaitu:

1. Langkah Hisap (*Intake Stroke*): Piston bergerak dari Titik Mati Atas (TMA) menuju Titik Mati Bawah (TMB) dengan katup masuk terbuka dan katup buang tertutup. Gerakan ini menciptakan ruang hampa yang menghisap udara segar ke dalam silinder. Berbeda dengan mesin bensin, yang masuk hanya udara tanpa bahan bakar.
2. Langkah Kompresi (*Compression Stroke*): Udara yang telah masuk kemudian dikompresi saat piston bergerak kembali dari TMB ke TMA. Selama proses ini, kedua katup tertutup rapat sehingga tekanan dan suhu dalam silinder meningkat drastis. Menjelang akhir langkah ini, bahan bakar disuntikkan ke dalam ruang bakar, dan karena suhu udara sangat tinggi, bahan bakar langsung menyala secara otomatis tanpa bantuan percikan api.
3. Langkah Ekspansi/Tenaga (*Power Stroke*): Akibat pembakaran, tekanan tinggi terbentuk di dalam silinder yang mendorong piston dari TMA ke TMB. Kedua katup tetap tertutup selama langkah ini. Tekanan gas

pembakaran ini menggerakkan piston dan menghasilkan energi mekanik yang diteruskan ke poros engkol sebagai tenaga penggerak mesin.

4. Langkah Buang (*Exhaust Stroke*): Setelah tenaga dihasilkan, piston kembali naik dari TMB ke TMA. Pada saat ini, katup buang terbuka dan katup masuk tertutup. Gas sisa pembakaran didorong keluar melalui katup buang. Setelah mencapai TMA, katup buang menutup dan katup masuk kembali terbuka, menandai awal dari siklus baru.

Secara lengkap keempat langkah tersebut dapat dinyatakan dalam P-V diagram yang ditunjukkan dalam gambar di bawah,



Gambar 1. Siklus Kerja Motor Diesel 4 Langkah

Dalam motor diesel, sistem bahan bakar merupakan salah satu komponen paling vital yang memengaruhi performa mesin secara keseluruhan. Pada mesin empat langkah dengan satu silinder, sistem ini berperan penting dalam menghasilkan tenaga dan torsi sesuai kebutuhan. Saat mesin bekerja dalam kondisi beban tinggi, torsi dan daya dapat meningkat secara signifikan. Meski konsumsi bahan bakar juga bertambah, sistem yang baik mampu menjaga kestabilan pembakaran dan performa mesin tetap optimal (FADLY and PAKAN YANRI, 2021). Pemanfaatan udara dalam pembakaran mesin diesel sangat berpengaruh terhadap performa dan efisiensi energi. Faktor seperti desain sistem intake, pengaturan aliran udara, dan kualitas campuran udara-bahan bakar menentukan seberapa optimal proses pembakaran berlangsung.

1.2.2 Karakteristik Pembakaran Mesin Diesel.

Proses pembakaran pada mesin diesel memiliki karakteristik tersendiri yang membedakannya secara fundamental dari mesin bensin. Tidak seperti mesin bensin yang menggunakan busi untuk memicu pembakaran, mesin diesel mengandalkan penyemprotan bahan bakar langsung ke dalam udara yang telah dikompresi hingga mencapai suhu dan tekanan tinggi, sehingga menghasilkan penyalaan otomatis (*auto-ignition*). Secara umum, proses pembakaran dalam mesin diesel terdiri atas beberapa tahap: pertama, periode penundaan pengapian, yaitu fase saat bahan bakar mulai bercampur dan menguap dalam udara panas; kedua, fase pembakaran cepat atau tidak terkendali yang terjadi sesaat setelah

penyalan dan ditandai oleh lonjakan tekanan yang signifikan; dan ketiga, fase pembakaran terkendali, di mana sisa bahan bakar terbakar secara bertahap seiring berlanjutnya penyemprotan. Karakteristik pembakaran ini berperan penting dalam menentukan efisiensi termal, tingkat emisi gas buang, serta performa akustik dari mesin diesel (Studi *et al.*, 2012).

Motor bakar merupakan jenis mesin konversi energi yang berfungsi mengubah energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar menjadi energi panas melalui proses pembakaran antara udara dan bahan bakar di dalam ruang bakar. Energi panas yang dihasilkan kemudian dikonversi menjadi energi mekanik atau energi gerak yang dapat dimanfaatkan untuk melakukan kerja (Hetharia, 2012).

Konsep pembakaran pada mesin diesel secara fundamental berbeda dengan mesin bensin. Mesin diesel mengandalkan prinsip penyalan akibat kompresi, di mana udara dikompresi di dalam ruang bakar hingga mencapai tekanan dan temperatur yang sangat tinggi, melampaui titik penyalan bahan bakar. Proses ini memungkinkan terjadinya pembakaran tanpa memerlukan percikan api dari busi, sebagaimana pada mesin bensin (Dharma, Nugroho and Fatkuahman, 2018).

Secara teoritis, mesin diesel mengikuti siklus termodinamika yang dikenal sebagai *Diesel Cycle*, yang merupakan karakteristik utama dari compression ignition engine. Dalam siklus ini, penambahan panas (pembakaran) berlangsung pada tekanan konstan, sebagaimana tergambar dalam diagram tekanan-volume (P - V diagram). Oleh karena itu, *Diesel Cycle* juga sering disebut sebagai siklus tekanan tetap, karena proses pembakarannya berlangsung dalam kondisi tekanan yang relatif konstan di dalam silinder (Dharma, Nugroho and Fatkuahman, 2018).

1.2.3 Efisiensi Termal Mesin Diesel

Meskipun jurnal yang dikaji tidak secara eksplisit membahas mengenai *efisiensi termal mesin diesel*, namun terdapat uraian yang relevan terkait karakteristik dan performa mesin diesel, khususnya dalam hal pengendalian kecepatan serta respons mesin terhadap beban mendadak. Kajian ini menunjukkan bahwa variasi beban memiliki pengaruh langsung terhadap kualitas daya dan kinerja mesin secara keseluruhan. Dengan demikian, meskipun efisiensi termal tidak dijelaskan secara langsung, informasi tersebut tetap memberikan kontribusi penting dalam memahami aspek efisiensi operasional mesin diesel dalam kondisi dinamis (Zhang *et al.*, 2020).

Hal ini menunjukkan bahwa variasi beban memiliki keterkaitan langsung dengan efisiensi keseluruhan kinerja mesin. Ketidakstabilan beban dapat menyebabkan proses pembakaran yang kurang sempurna, meningkatkan konsumsi bahan bakar, serta menimbulkan kehilangan energi dalam bentuk panas yang tidak terserap secara efektif. Oleh karena itu, meskipun efisiensi termal tidak dijelaskan secara eksplisit, pembahasan mengenai perubahan performa mesin dalam kondisi operasi yang fluktuatif tetap memberikan wawasan penting terhadap pemahaman efisiensi operasional mesin diesel. Evaluasi terhadap bagaimana mesin merespons perubahan beban juga secara tidak langsung menggambarkan

tingkat efektivitas konversi energi bahan bakar menjadi tenaga mekanis, yang merupakan esensi utama dari efisiensi termal.

1.3 Perhitungan Teoritis

1.3.1 Volume Udara Teoritis mesin diesel

Perhitungan volume silinder merupakan langkah fundamental dalam menentukan kapasitas kerja mesin pembakaran dalam. Besarnya volume langkah silinder (*swept volume*) menggambarkan jumlah udara yang secara teoritis dapat diisap ke dalam ruang bakar pada setiap siklus hisap. Parameter ini sangat berpengaruh terhadap efisiensi pembakaran, konsumsi bahan bakar, serta daya keluaran mesin.

Secara teoritis, volume langkah silinder ditentukan oleh dimensi geometri mesin, yaitu diameter silinder (*bore*) dan panjang langkah piston (*stroke*). Hubungan antara kedua parameter tersebut dinyatakan oleh persamaan (Pesic and Petkovic, 2013):

$$V = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times L \quad (1)$$

Dimana,

V = Volume langkah silinder (m^3)

D = Diameter silinder atau bore (m)

L = Panjang langkah piston atau stroke (m)

Untuk mengetahui kapasitas total mesin (total displacement volume), perlu dihitung keseluruhan volume langkah dari seluruh silinder yang bekerja. Hubungan ini dinyatakan dalam bentuk persamaan:

$$V_{total} = n \times V \quad (2)$$

Persamaan di atas menunjukkan bahwa kapasitas total mesin merupakan hasil perkalian antara jumlah silinder dan volume langkah tiap silinder. Secara fisis, hal ini berarti bahwa setiap silinder memberikan kontribusi terhadap total volume udara yang diisap dan dikompresi oleh mesin dalam satu siklus pembakaran.

Dengan memasukkan nilai V_{total} ke dalam persamaan debit aliran udara teoritis, diperoleh debit aliran udara yang secara ideal dapat masuk ke dalam silinder pada berbagai variasi kecepatan putaran mesin.

Pada mesin diesel empat langkah, setiap silinder melakukan satu langkah hisap dalam dua kali putaran poros engkol. Oleh karena itu, jumlah langkah hisap dalam satuan waktu dapat dihitung berdasarkan kecepatan putaran mesin (RPM) dan jumlah silinder. Debit aliran udara teoritis (\dot{V}_{th}) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Pesic and Petkovic, 2013):

$$\dot{V}_{th} = V_s \times \frac{N}{120} \times Z \quad (3)$$

Keterangan:

- \dot{V}_{th} = Debit aliran udara teoritis (m^3/s)
- V_s = Volume langkah (m^3)
- N = Putaran mesin (RPM)
- Z = Jumlah silinder
- 120 = Konstanta untuk mesin 4 langkah (2 putaran per siklus \times 60 detik)

$$V_{S(total)} = 2 \times V_s \quad (4)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa kapasitas total mesin ditentukan oleh akumulasi volume langkah seluruh silinder yang bekerja. Nilai $V_{S(total)}$ selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menentukan debit aliran udara teoritis \dot{V}_{th} , sesuai dengan hubungan pada persamaan (3).

1.3.2 Konsumsi bahan bakar teoritis

Konsumsi bahan bakar teoritis ditentukan berdasar hubungan antara udara dan bahan bakar yang diperlukan untuk mencapai pembakaran sempurna. Perhitungan dimulai dengan menentukan densitas udara menggunakan persamaan gas ideal (Chaim and Shmerling, 2013):

$$\rho_{udara} = \frac{p_{intake}}{R \times T_{intake}} \quad (5)$$

Selanjutnya, laju massa udara teoritis yang masuk ke dalam silinder dapat ditentukan dari volume udara teoritis V_{th} sebagai berikut :

$$\dot{m}_{udara} = \rho_{udara} \times V_{theo} \quad (6)$$

Rasio udara–bahan bakar (Air Fuel Ratio/AFR) merupakan perbandingan laju massa udara dengan laju massa bahan bakar yang dibutuhkan untuk pembakaran sempurna pada mesin. Untuk bahan bakar diesel, nilai AFR stoikiometri umumnya berada pada kisaran 14,5 : 1, artinya setiap 1 kg bahan bakar memerlukan sekitar 14,5 kg udara untuk terbakar dengan baik (*HPA Academy, 2023; GCG Engineering, 2023*). Penelitian oleh *Springer (2024)* juga menyebutkan bahwa mesin diesel bekerja pada campuran miskin ($\lambda > 1$) dengan udara berlebih untuk menghasilkan pembakaran yang efisien dan emisi yang rendah. adapun persamaan yang dinyatakan sebagai:

$$\dot{m}_{bakar} = \frac{\dot{m}_{udara}}{AFR}$$

(6)

Berdasarkan persamaan di atas, konsumsi bahan bakar dalam bentuk laju massa volume (\dot{V}_{bakar}) diperoleh dengan membagi Laju massa bahan bakar m_{bakar} terhadap densitas bahan bakar diesel ($\rho_{bakar} = 0,832 \text{ kg/L}$). Hubungan ini dinyatakan sebagai:

$$\dot{V}_{bakar} = \frac{m_{bakar}}{\rho_{bakar}} \quad (7)$$

1.4 Perhitungan Aktual

1.4.1 Tekanan Udara menggunakan Air Box Meter

Pengukuran tekanan udara yang masuk ke dalam silinder dilakukan menggunakan Air Box Meter. Pengukuran volume udara aktual yang masuk ke dalam silinder dilakukan dengan menggunakan Air Box Meter. Prinsip kerja alat ini adalah dengan mengukur beda tekanan (ΔP) yang dihasilkan akibat aliran udara yang melewati orifice. Beda tekanan tersebut diperoleh dari manometer tabung-U (U-Tube Manometer) yang diisi air, sehingga dapat diketahui tinggi kolom air (h). Secara prinsip, beda tekanan (ΔP) yang timbul akibat aliran udara dapat ditentukan melalui hubungan (Tomaszewska-wach, 2023). :

$$\Delta P = \rho_{air} g h \quad (8)$$

Dengan :

- $\rho_{air} = 995,65 \text{ kg/m}^3$ (massa jenis air)
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ (gravitasi)
- $h = \text{tinggi kolom air (m)}$

Persamaan ini menggambarkan bahwa semakin besar beda tinggi kolom air yang terbaca, semakin besar pula tekanan udara yang dihasilkan oleh aliran udara yang melewati orifice.

Selanjutnya, laju aliran udara aktual Q_{actual} yang masuk ke dalam sistem dapat dihitung berdasarkan hubungan antara beda tekanan dan karakteristik orifice, yang dinyatakan dengan persamaan:

$$Q_{actual} = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{udara}}} \quad (9)$$

Dengan :

- $C_d = 0,60$ (koefisien debit)
- $A = \pi \times (0,025)^2 = 1,963 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ (luas penampang, $D = 50 \text{ mm}$)
- $\rho_{udara} = 1,164 \text{ kg/m}^3$ (massa jenis udara pada suhu $30 \text{ }^\circ\text{C}$)

Persamaan ini menunjukkan bahwa laju aliran udara berbanding lurus dengan akar kuadrat dari beda tekanan dan luas penampang, serta dipengaruhi oleh karakteristik aliran melalui nilai koefisien debit.

Koefisien debit (C_d) berfungsi sebagai faktor koreksi untuk menyesuaikan hasil perhitungan teoritis dengan kondisi aliran nyata. Dalam aliran melalui orifice, terjadi penyusutan pada vena contracta dan kehilangan energi akibat gesekan serta turbulensi, sehingga debit aktual lebih kecil dari debit teoritis.

Berdasarkan ISO 5167-1:2003 dan ASME MFC-3M-2004, nilai Koefisien debit (C_d) untuk orifice bertepi tajam (sharp-edged) dengan aliran turbulen ($Re > 10^4$) umumnya berkisar antara 0,60–0,62. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan nilai Koefisien debit (C_d) = 0,60, yang mewakili kondisi standar untuk pengukuran laju aliran udara menggunakan Air Box Meter.

Efisiensi pembakaran pada mesin diesel sangat dipengaruhi oleh jumlah dan kecepatan udara yang masuk ke silinder. Karakter aliran udara, baik laminar maupun turbulen, juga memengaruhi pencampuran udara-bahan bakar. Untuk menganalisis aliran ini digunakan dua parameter utama, yaitu kecepatan udara (V) dan Reynolds number (Re), yang akan dijelaskan melalui persamaan berikut.

$$V = \frac{\dot{m}_{air}}{\rho A} \quad (10)$$

Dimana :

- V = Kecepatan Udara (m/s)
- \dot{m}_{air} = Laju massa udara Teoritis (kg/s)
- ρ = Densitas udara (kg/m³)
- A = Luas penampang saluran intake (m²)

Persamaan ini digunakan untuk menentukan berapa cepat udara bergerak ke dalam silinder, sehingga dapat dikaitkan dengan efisiensi pengisian silinder dan karakteristik aliran.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (11)$$

Dimana :

- Re = Reynold number
- ρ = Densitas udara (kg/m³)
- V = Kecepatan Udara (m/s)
- D = Diameter saluran intake (m)
- μ = Viskositas dinamis udara (kg/m.s)

Berdasarkan nilai Reynolds number, karakter aliran udara dalam saluran intake dapat diklasifikasikan menjadi tiga kondisi. Aliran dikatakan laminar jika $Re < 2.000$, di mana udara bergerak dalam lapisan-lapisan paralel dengan sedikit pencampuran lateral dan kehilangan tekanan yang minimal, namun pencampuran

udara-bahan bakar kurang optimal. Pada kisaran $2.000 < Re < 4.000$, aliran berada dalam zona transisi, di mana laminar mulai terganggu dan terbentuk vorteks serta turbulensi lokal, sehingga pencampuran udara meningkat tetapi aliran menjadi lebih tidak stabil. Sedangkan untuk $Re > 4.000$, aliran bersifat turbulen, ditandai dengan gerakan udara yang acak dan pencampuran intens, yang secara signifikan meningkatkan pencampuran udara-bahan bakar sehingga pembakaran menjadi lebih efisien dan merata. Dalam aplikasi mesin diesel, aliran turbulen di saluran intake sangat diinginkan untuk mendukung efisiensi pembakaran, meskipun turbulensi yang terlalu tinggi dapat menimbulkan kehilangan tekanan dan sedikit menurunkan efisiensi volumetrik jika saluran intake tidak dirancang secara optimal.

Untuk mendapatkan volume udara aktual $V_{udara\ aktual}$ yang benar-benar masuk ke dalam silinder selama proses pengisapan, digunakan hubungan antara laju aliran udara dengan waktu pengukuran, yaitu:

$$V_{udara\ aktual} = Q_{actual} \times t \quad (12)$$

Dengan (t) sebagai durasi pengukuran, persamaan ini menjelaskan bahwa volume udara aktual merupakan hasil integrasi dari laju aliran udara terhadap waktu. Jika pengukuran dilakukan per detik, maka nilai Q_{actual} secara langsung mewakili volume udara aktual dalam satuan waktu (m^3/s).

1.4.2 Konsumsi bahan bakar aktual

Pengukuran konsumsi bahan bakar aktual dilakukan untuk mengetahui seberapa besar jumlah bahan bakar yang digunakan mesin diesel dalam satuan waktu tertentu pada berbagai variasi putaran mesin. Pengujian ini dilakukan menggunakan alat ukur gelas ukur (*measuring glass*) yang berfungsi untuk menampung dan mengukur volume bahan bakar yang terpakai selama proses pengujian berlangsung.

Laju massa bahan bakar aktual pada mesin diesel dapat ditentukan dengan mengonversi volume bahan bakar yang terukur menjadi laju massa bahan bakar aktual. Konversi ini menggunakan nilai densitas bahan bakar diesel (ρ_{diesel}), yang pada kondisi standar umumnya sebesar ($\rho_{bakar} = 0,832 \text{ kg/L}$). Hubungan antara volume dan massa bahan bakar aktual dinyatakan dengan persamaan berikut (Arsie *et al.*, 2016) :

$$\dot{m}_{fuel-aktual} = \frac{V_{fuel-aktual}}{60} \times \rho_{diesel} \quad (13)$$

Dimana,

- $\dot{m}_{fuel-aktual}$ = Laju Massa Bahan Bakar Aktual (Kg/s)
- $V_{fuel-aktual}$ = Volume Bahan Bakar Aktual (L/menit)
- ρ_{diesel} = Densitas Solar (0.832 Kg/L)

Dari Persamaan diatas menunjukkan bahwa semakin besar volume bahan bakar yang digunakan dalam satuan waktu, maka semakin besar pula massa bahan bakar aktual yang dikonsumsi oleh mesin. Fenomena ini secara langsung menggambarkan peningkatan kebutuhan energi pembakaran ketika putaran mesin (RPM) meningkat. Semakin tinggi kecepatan putaran mesin, maka frekuensi siklus pembakaran per satuan waktu juga meningkat, sehingga suplai bahan bakar yang diinjeksikan ke ruang bakar menjadi lebih besar untuk menjaga daya mesin tetap optimal.

Nilai massa bahan bakar aktual tersebut kemudian digunakan untuk menentukan *Air Fuel Ratio* (AFR) aktual, yaitu perbandingan antara laju massa udara yang masuk ke dalam silinder dengan laju massa bahan bakar yang dikonsumsi pada kondisi operasi tertentu. Persamaannya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$AFR_{aktual} = \frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel-aktual}} \quad (14)$$

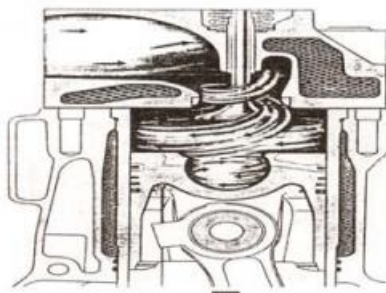
Dimana,

- AFR_{aktual} = Volume bahan bakar actual per menit (L/min)
- \dot{m}_{air} = Laju massa udara aktual (kg/s) dari perhitungan sebelumnya
- $\dot{m}_{fuel-aktual}$ = Laju massa bahan bakar aktual (kg/s)

Nilai AFR pada mesin diesel berubah sesuai beban karena udara yang masuk cenderung tetap, sementara bahan bakar bertambah saat kebutuhan daya naik. Pada kondisi idle atau tanpa beban, AFR bisa sangat tinggi, sekitar 80 hingga lebih dari 200, karena bahan bakar yang disuntikkan sangat sedikit sehingga campuran menjadi sangat kurus dan ini normal. Saat beban rendah, AFR turun ke kisaran 40-70, lalu menjadi 25-40 pada beban sedang sebagai area kerja yang paling stabil dan efisien. Pada beban tinggi, AFR berada di kisaran 18-25, mendekati batas udara untuk membakar bahan bakar secara sempurna. Jika AFR turun hingga sekitar 17 atau kurang, pembakaran mulai tidak sempurna dan dapat menyebabkan asap hitam. Rentang ini dapat dijadikan acuan apakah AFR yang diukur berada dalam kondisi normal untuk mesin diesel tanpa turbocharger (Arsie *et al.*, 2016).

1.5 Efisiensi Volumetrik

Efisiensi volumetrik pada mesin diesel adalah perbandingan antara volume udara yang masuk ke dalam silinder dan volume perpindahan piston. Studi ini menegaskan bahwa efisiensi volumetrik yang tinggi sangat berperan dalam meningkatkan kinerja mesin diesel, karena semakin banyak udara yang masuk, proses pembakaran akan berjalan lebih optimal.



Gambar 2. Pusaran selama langkah masuk

Efisiensi volumetrik sangat dipengaruhi oleh tekanan dan suhu udara yang masuk ke mesin, karena semakin besar hambatan pada saluran masuk seperti filter udara, manifold, dan katup semakin besar penurunan tekanan sehingga udara yang masuk ke silinder menjadi lebih sedikit. Penurunan tekanan ini menyebabkan nilai efisiensi terlihat berbeda tergantung dari titik pengukurannya. Pada mesin diesel tanpa turbo, efisiensi volumetrik akan menurun pada RPM tinggi karena waktu hisap semakin singkat, aliran udara makin turbulen, resistansi saluran masuk meningkat, dan masih ada sisa gas buang yang menghambat masuknya udara baru. Oleh karena itu, nilai efisiensi volumetrik sekitar 55–70% pada putaran tinggi merupakan kondisi yang masih normal untuk mesin diesel *naturally aspirated* (Putra, 2021).

Efisiensi Volumetrik pada mesin juga dapat diketahui melalui pengukuran dengan menggunakan Air box meter seperti yang dinyatakan dalam rumus dibawah :

$$\text{Efisiensi Volumetrik } (\eta_v) = \frac{\text{Massa Udara Aktual yang masuk}}{\text{Massa udara teortis maksimal}} \times 100\% \quad (15)$$

Efisiensi volumetrik mengukur seberapa efektif mesin menyedot udara ke ruang bakar selama proses intake, dinyatakan sebagai perbandingan volume udara yang masuk dengan volume total silinder. Faktor seperti posisi throttle dan kecepatan mesin (RPM) sangat memengaruhi nilai efisiensi ini. Pada throttle penuh, efisiensi bisa mencapai nilai maksimal, misalnya 61,7% pada 9360 RPM. Namun, saat throttle dibuka sebagian, efisiensi menurun akibat vakum dan turbulensi di intake manifold yang menghambat aliran udara. Selain itu, peningkatan RPM juga dapat menurunkan efisiensi karena hambatan saluran udara dan ketidakseimbangan antara kecepatan putaran mesin dan volume udara masuk. Secara keseluruhan, efisiensi volumetrik menjadi indikator penting dalam menentukan kemampuan mesin mengisi ruang bakar secara optimal, yang berdampak langsung pada performa dan efisiensi mesin (Persisco *et al.*, 2022).

Beberapa faktor memengaruhi efisiensi volumetrik, antara lain tekanan dan suhu udara masuk, konfigurasi saluran masuk (intake manifold), posisi throttle, dan kecepatan putaran mesin (RPM). Pada kondisi ideal, efisiensi volumetrik tinggi menandakan bahwa silinder mampu terisi penuh dengan udara, sehingga pembakaran bahan bakar menjadi

lebih optimal dan menghasilkan tenaga yang maksimal. Sebaliknya, pada kondisi intake yang terbatas atau putaran mesin tinggi, efisiensi cenderung menurun karena waktu pengisian udara menjadi lebih singkat, timbul turbulensi, dan hambatan aliran pada saluran masuk (Zhang *et al.*, 2020).

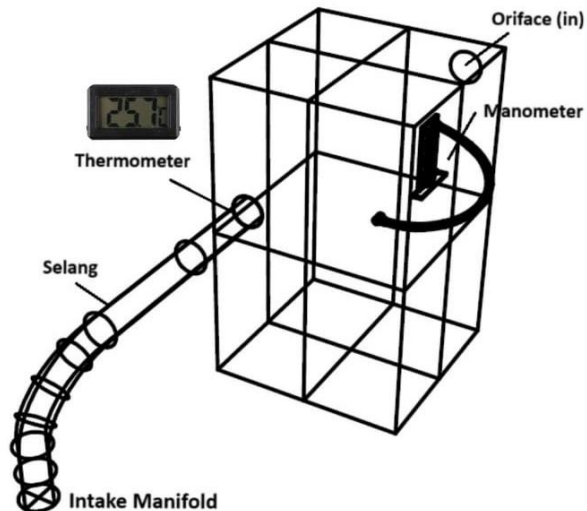
1.6 Putaran Mesin

Hubungan antara putaran mesin dan efisiensi volumetrik menunjukkan kecenderungan bahwa peningkatan putaran mesin dapat meningkatkan efisiensi volumetrik. Ketika mesin berputar lebih cepat, kecepatan aliran udara yang masuk ke dalam silinder juga meningkat. Aliran udara yang lebih cepat ini membantu mempercepat proses pengisian silinder dengan udara segar serta memperbaiki proses pembilasan sisa gas pembakaran dari siklus sebelumnya (Sidabutar, Siahaan and Sitanggung, 2024).

Dengan demikian, volume udara yang masuk ke dalam ruang bakar menjadi lebih optimal dan mendekati kapasitas teoritis silinder, yang pada akhirnya meningkatkan efisiensi volumetrik. Namun, penting untuk dicatat bahwa peningkatan ini hanya berlaku hingga titik tertentu. Setelah melewati batas putaran optimal, efisiensi volumetrik justru dapat menurun karena waktu yang tersedia untuk pengisian silinder menjadi terlalu singkat dan aliran udara bisa mengalami gangguan, seperti turbulensi atau hambatan aliran. Oleh karena itu, meskipun putaran mesin berpengaruh positif terhadap efisiensi volumetrik, efek ini bergantung pada batasan teknis dari desain mesin itu sendiri.

1.7 Alat Uji Prestasi Mesin

Pengujian dilakukan dengan memanfaatkan alat ukur air box meter untuk menganalisis karakteristik aliran udara yang masuk ke dalam mesin diesel. Tahapan awal dimulai dengan penyetelan celah katup masuk sesuai dengan nilai yang telah ditentukan dalam prosedur. Setelah proses penyetelan selesai, alat ukur dipasang pada mesin dengan menghubungkannya ke sistem saluran udara, tepatnya pada bagian intake manifold, setelah filter udara dilepas agar tidak menghambat aliran. Selanjutnya, mesin diesel dijalankan dan disetel pada putaran tertentu menggunakan tachometer untuk memastikan kestabilan kecepatan rotasi.



Gambar 3. Air Box Meter

Setelah kondisi mesin dinyatakan stabil, stopwatch diaktifkan untuk mencatat durasi pengujian. Selama pengukuran berlangsung, dilakukan observasi terhadap tinggi kolom fluida pada manometer sebagai indikator tekanan isap, serta pengukuran suhu ruang menggunakan termometer. Seluruh parameter yang diperoleh dari proses ini digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi performa hisap udara mesin diesel dengan variasi celah katup masuk.

1.8 Tujuan Dan Manfaat Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu sebagai berikut

1. Mengetahui hubungan antara variasi putaran mesin dengan nilai Efisiensi Volumetrik Mesin Diesel.
2. Mengidentifikasi karakteristik aliran fluida udara yang masuk ke dalam silinder pada tingkat putaran mesin.

Adapun manfaat yang diharapkan penulis dari penelitian ini yaitu sebagai berikut

1. Penelitian ini membantu memahami hubungan antara variasi putaran mesin dengan efisiensi volumetrik mesin diesel untuk pengoptimalan kinerja mesin.
2. Penelitian ini memberikan informasi mengenai karakteristik aliran udara masuk ke silinder pada berbagai tingkat putaran mesin sebagai dasar peningkatan desain sistem pemasukan udara.
3. Penelitian ini menjadi acuan praktis bagi teknisi dalam mengatur kondisi operasi mesin diesel agar efisiensi bahan bakar dan performa mesin dapat ditingkatkan.

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Departemen Teknik Sistem Perkapalan dengan objek Mesin diesel. Data pada penelitian ini dilakukan di laboratorium Permesinan Kapal Departemen Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Gowa.



Gambar 4. Lokasi Penelitian

2.2 Sumber dan Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan data primer yang diperoleh secara langsung melalui serangkaian pengujian eksperimen pada mesin diesel dengan memanfaatkan alat uji prestasi (*performance test equipment*). Data yang dikumpulkan mencakup pengukuran efisiensi volumetrik, tekanan isap udara, serta variasi putaran mesin sesuai dengan parameter yang telah ditetapkan. Selain itu, penelitian ini juga mengandalkan data sekunder dari sumber literatur dan referensi ilmiah yang relevan untuk mendukung analisis dan memperkuat interpretasi hasil eksperimen.

2.3 Tahap Penelitian

1. Menyiapkan mesin diesel dan alat uji prestasi berupa air box meter beserta perlengkapan pendukung seperti manometer, tachometer, termometer, dan stopwatch.
2. Memasang air box meter pada intake manifold.
3. Menghidupkan mesin diesel dengan pemanasan awal mesin dengan asumsi bahwa mesin telah mencapai suhu kerja mesin selama 10- 15 menit, kemudian mengatur putaran mesin pada variasi yang telah ditetapkan menggunakan tachometer hingga mencapai kestabilan.
4. Melakukan pengukuran tekanan isap udara dengan manometer, suhu ruang dengan termometer, serta mencatat durasi pengujian menggunakan stopwatch pada setiap variasi putaran.
5. Mengumpulkan data hasil pengukuran untuk dianalisis efisiensi volumetrik dan hubungan antara variasi putaran mesin dengan performa mesin.

6. Mengevaluasi dan menyimpulkan hasil penelitian sebagai dasar rekomendasi peningkatan efisiensi mesin diesel.

2.4 Penyajian Data

2.4.1 Data Mesin

Adapun sebagai objek penelitian yaitu mesin Diesel dengan spesifikasi sebagai berikut :



Gambar 5. Mesin Diesel Weifang

- Merek Mesin : Weifang
- Tipe : 2105D
- Daya Mesin (Kw/HP/Rpm) : 18 / 24 / 1800
- Rasio kompresi : 17:1
- Bore (mm) : 105
- Stroke (mm) : 117
- Berat Mesin (kg) : 240 Kg
- Fuel Consumption (g/kw.h) : 243.3
- Exhaust Temperature (°C) : 470

2.4.2 Alat dan Bahan Penelitian

Adapun alat dan bahan yang di gunakan dalam proses pengambilan data yaitu sebagai berikut;

2.4.2.1 Alat

Adapun alat yang di gunakan sebagai berikut;

1. Tachometer

Tachometer digunakan untuk mengukur RPM pada mesin, dalam hal ini menggunakan variasi RPM dari 900 sampai 1600 RPM.



Gambar 6. Tachometer

2 Air Box Meter

Alat uji prestasi berupa air box meter juga menjadi bagian penting dalam penelitian ini sebagai media pengukuran karakteristik aliran udara masuk dan tekanan hisap pada intake manifold mesin diesel selama pengujian. Data yang diperoleh dari eksperimen ini akan digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara variasi putaran mesin dengan efisiensi volumetrik dan performa mesin diesel secara keseluruhan.



Gambar 7. Air Box Meter

3 Manometer



Gambar 8. Manometer

Pada penelitian ini, air box meter dilengkapi dengan manometer tabung-U (U-tube manometer) yang berisi fluida sebagai media pembacaan tekanan. Manometer U-tube bekerja berdasarkan prinsip perbedaan tekanan hidrostatik. Saat mesin beroperasi, udara yang terhisap ke dalam silinder menciptakan perbedaan tekanan antara bagian dalam air box dan atmosfer luar. Perbedaan tekanan ini menyebabkan permukaan fluida di dalam U-tube mengalami perbedaan tinggi (Δh), yang selanjutnya digunakan untuk menghitung tekanan hisap aktual.

4. Selang Bening

Selang yang di gunakan ada 2 jenis ukuran, untuk selang ukurn $\frac{1}{4}$ inch digunakan untuk menyambungkan manometer ke air box meter, sedangkan untuk selang yang berukuran 2 inch digunakan untuk sambungan dari intake manifold mesin ke air box meter.



Gambar 9. Selang Bening

5. Klem Selang

Klem selang ini digunakan untuk perekat antara sambungan pada air box meter maupun pada intake manifold mesin.



Gambar 10. Klem Selang

6. *Thermometer* Air Box Meter

Thermometer di air box meter digunakan untuk mengukur suhu tekanan udara yang masuk ke air box meter



Gambar 11. *Thermometer*

7. Gelas Ukur

Gelas ukur digunakan untuk menghitung konsumsi bahan bakar yang di gunakan mesin pada setiap waktu penelitian yang telah ditentukan.



Gambar 12. Gelas Ukur

2.4.2.2 Bahan

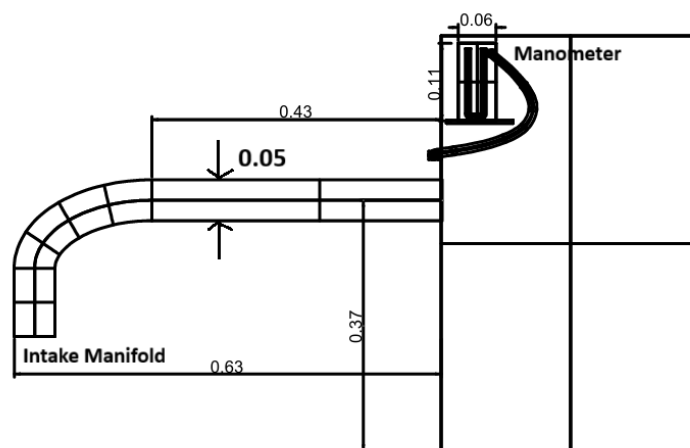
Adapun Bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu;

1. Solar
Solar digunakan sebagai bahan bakar mesin diesel



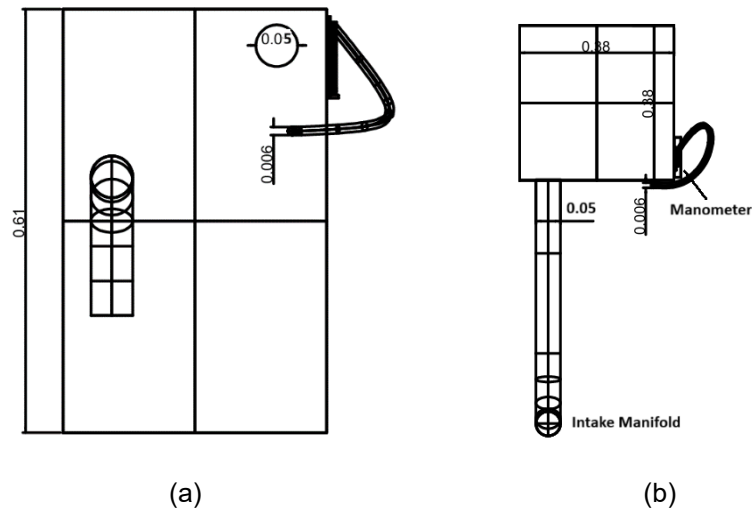
Gambar 13. Solar

2.4.2.3 Model Instalasi Alat Air Box Meter



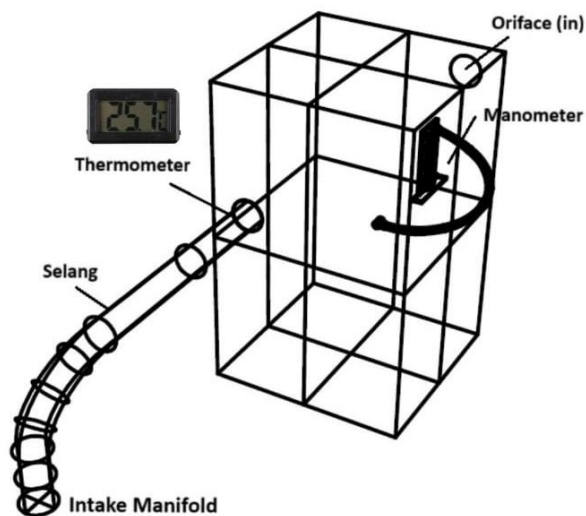
Gambar 14. Model Instalasi Air Box Meter

Model instalasi Air Box Meter ditunjukkan pada Gambar 11, yang terdiri atas air box, pipa saluran udara, dan manometer tabung-U. Udara masuk melalui saluran masuk (*intake*) menuju air box, kemudian melewati orifice yang menyebabkan terjadinya perbedaan tekanan (ΔP). Nilai perbedaan tekanan ini diukur oleh manometer untuk menentukan debit udara aktual yang masuk ke mesin.



Gambar 15. (a) tampak samping air box meter, (b) tampak atas Air Box Meter

Pada gambar 14, menunjukkan instalasi yang dilihat dari tampak samping dan tampak atas air box meter. Dimana dapat kita lihat dari ukuran air box meter yaitu dengan tinggi 0.61 m dengan lebar 0.35 m. adapun penggunaan intalasi yang tersambung ke mesin menggunakan ukuran diameter 0.05 m.



Gambar 16. Intalasi Air Box Meter Ke Intake Mesin

Berdasarkan Gambar 15, instalasi Air Box Meter pada mesin dihubungkan melalui selang berdiameter 0,05 m. Aliran udara menuju Air Box Meter masuk melalui orifice berukuran 0,06 m. Tekanan udara

yang masuk ke Air Box Meter kemudian diukur menggunakan U-tube manometer, sehingga besarnya tekanan udara yang mengalir ke mesin dapat diketahui secara akurat. Selain dari manometer, terdapat thermometer digital yang di pasang pada air box meter tersebut untuk mengetahui suhu aliran udara yang masuk kedalam mesin melalui air box meter.

2.5 Kerangka Berpikir

