

BAB II

DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Umum

2.1.1. Motor Bakar

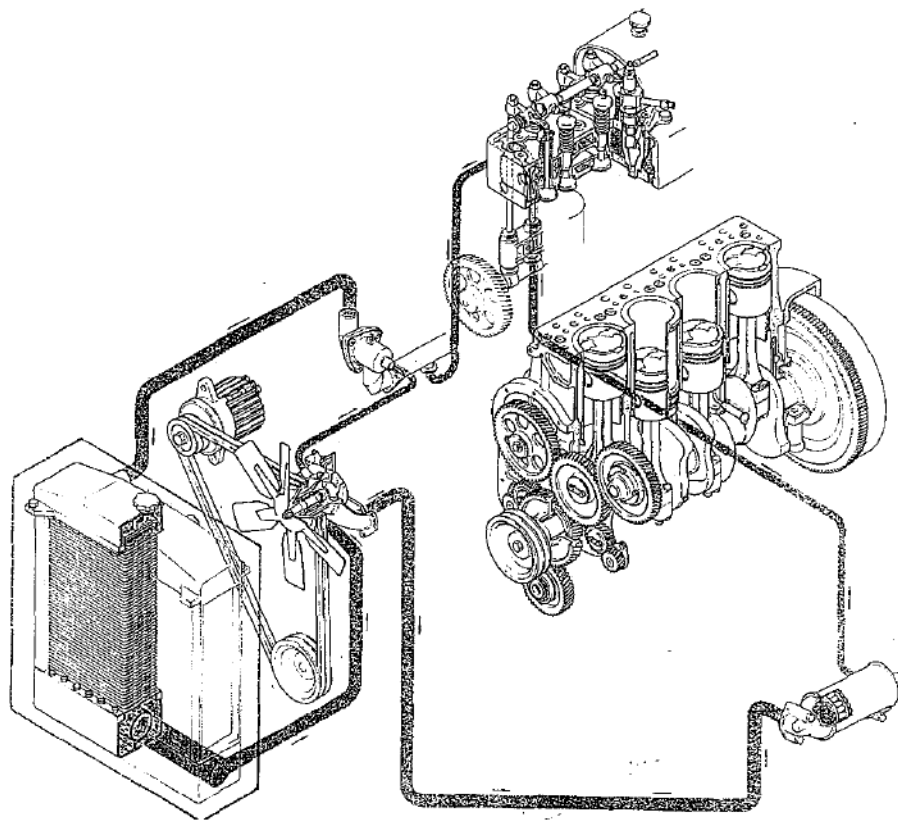
Motor adalah gabungan dari alat-alat yang bergerak yang bila bekerja dapat menimbulkan tenaga/ energi. Sedangkan pengertian motor bakar adalah suatu mesin kalor dimana tenaga/ energi dari hasil pembakaran bahan bakar didalam silinder akan diubah menjadi energi mekanik.

Pada mulanya perkembangan motor bakar ditemukan oleh Nichollus Otto pada tahun 1876 dengan bentuk yang kecil dan tenaga yang dihasilkan besar. Motor bakar dibagi menjadi dua yaitu, motor pembakaran luar (*external combustion engine*) dan motor pembakaran dalam (*internal combustion engine*), sedangkan mesin diesel merupakan motor pembakaran dalam.

Tenaga yang dihasilkan oleh motor berasal dari adanya pembakaran gas didalam ruang bakar. Karena adanya pembakaran gas, maka timbulah panas. Panas ini mengakibatkan gas mengembang/ ekspansi. Pembakaran dan pengembangan gas ini terjadi didalam ruang bakar yang sempit dan tertutup (tidak bocor) dimana bagian atas dan samping kiri kanan dari ruang bakar adalah statis/ tidak bisa bergerak, sedangkan yang dinamis atau bisa bergerak adalah bagian bawah, yakni piston sehingga piston dengan sendirinya akan terdorong kebawah oleh gaya dari gas yang terbakar dan mengembang tadi. Pada saat piston terdorong kebawah ini akan menghasilkan tenaga yang sangat besar dan tenaga inilah yang disebut dengan tenaga motor.

2.1.2. Motor Diesel

Motor diesel adalah motor bakar torak yang proses penyalanyaannya bukan menggunakan loncatan bunga api melainkan ketika torak hampir mencapai titik mati atas (TMA) bahan bakar disemprotkan ke dalam ruang bakar melalui nosel sehingga terjadilah pembakaran pada ruang bakar dan udara dalam silinder sudah mencapai temperatur tinggi. Syarat ini dapat terpenuhi apabila perbandingan kompresi yang digunakan cukup tinggi, yaitu berkisar 16-25. (Arismunandar. W,1988)



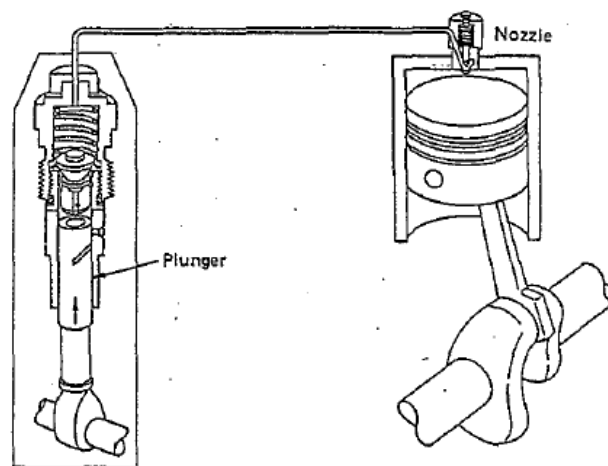
Gambar 2.1. Motor Diesel

Motor diesel adalah salah satu dari *internal combustion engine* (motor dengan pembakaran didalam silinder), dimana energi kimia dari bahan bakar langsung diubah menjadi tenaga kerja mekanik. Pembakaran pada motor diesel akan lebih sempurna pada saat unsur karbon (C) dan hidrogen (H) dari bahan bakar diubah

menjadi air (H_2O) dan karbon dioksida (CO_2), sedangkan gas karbon monoksida (CO) yang terbentuk lebih sedikit dibanding dengan motor bensin. (Mulyoto Harjosentono, 1981)

2.2. Prinsip Kerja

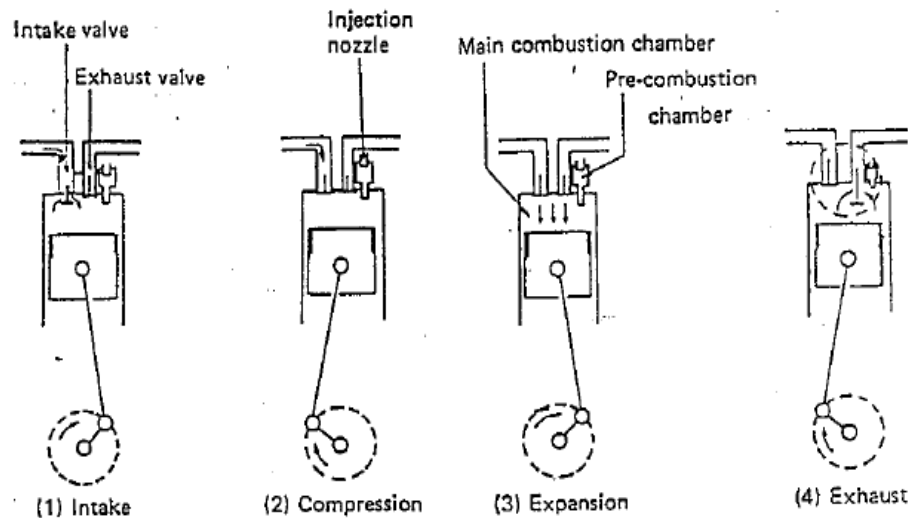
Pada motor diesel, solar dibakar untuk memperoleh energi termal. Energi ini selanjutnya digunakan untuk melakukan gerakan mekanik. Prinsip kerja motor diesel secara sederhana dapat dijelaskan sebagai berikut, yaitu solar dari boostpump dihisap masuk ke dalam silinder, udara murni dihisap dan dikompresikan pada 8° - 12° sebelum piston mencapai titik mati atas kemudian bahan bakar dikabutkan maka terjadilah pembakaran. Bila piston bergerak naik turun didalam silinder dan menerima tekanan tinggi akibat pembakaran, maka tenaga pada piston akan mengakibatkan piston terdorong ke bawah. Gerakan naik turun pada torak diubah menjadi gerak putar pada poros engkol oleh connecting rod. Selanjutnya gas-gas sisa pembakaran dibuang dan campuran udara bahan bakar tersedia pada saat-saat yang tepat untuk menjaga agar piston dapat bergerak secara periodik dan melakukan kerja tetap.



Gambar 2.2. Prinsip Kerja Motor Diesel

2.2.1. Prinsip Kerja Motor Diesel 4 Langkah

Siklus 4 langkah pada dasarnya adalah piston melakukan 4 kali langkah dan crankshaft melakukan 2 kali langkah untuk menghasilkan satu kali tenaga atau satu kali pembakaran. Untuk lebih jelasnya, gambar berikut adalah prinsip kerja motor diesel 4 langkah.



Gambar 2.3. Prinsip Kerja motor diesel 4 langkah

1. Langkah Hisap

Pada langkah hisap, udara dimasukkan ke dalam silinder. Piston membentuk kevakuman didalam silinder seperti pada mesin bensin, piston bergerak kebawah dari TMA menuju TMB. Terjadinya vakum ini menyebabkan katup hisap terbuka dan memungkinkan udara segar masuk kedalam silinder. Sedangkan katup buang menutup selama melakukan langkah hisap.

2. Langkah Kompresi

Pada langkah kompresi, piston bergerak dari TMB menuju TMA. Pada saat ini kedua katup hisap dan buang tertutup. Udara yang dihisap selama

langkah hisap kemudian ditekan pada 8° - 12° sebelum piston mencapai titik TMA bahan bakar dikabutkan maka terjadilah pembakaran.

3. Langkah Kerja

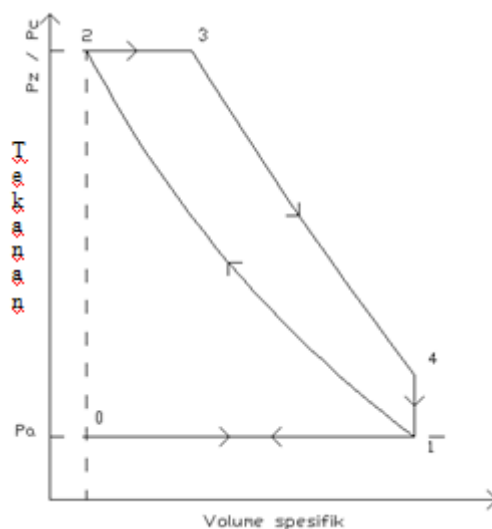
Energi pembakaran mengekspansikan dengan cepat sehingga piston terdorong kebawah. Gaya yang mendorong piston kebawah diteruskan ke connecting rod dan poros engkol dirubah menjadi gerak putar untuk memberi tenaga pada mesin.

4. Langkah Buang

Pada saat piston menuju TMB, katup buang terbuka dan gas sisa hasil pembakaran dikeluarkan melalui katup buang pada saat piston bergerak ke atas lagi. Gas akan terbuang habis pada saat piston mencapai TMA.

2.2.2. Diagram P-V Teoritis Motor Diesel 4 Langkah

Pada saat proses kerja motor berlangsung, akan terjadi perubahan tekanan, temperatur dan volume yang ada didalam silinder. Perubahan-perubahan tersebut dapat digambarkan dalam diagram P-V sebagai berikut:



Gambar 2.4. Diagram P-V teoritis motor diesel 4 langkah

Keterangan :

0 – 1 = Langkah hisap

1 – 2 = Langkah kompresi

2 – 3 = Langkah pembakaran

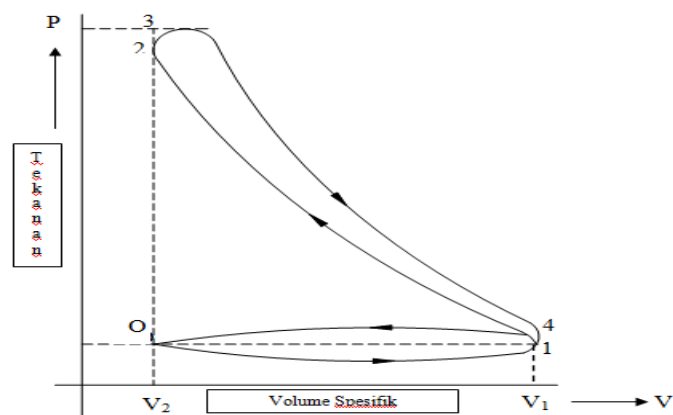
3 – 4 = Langkah ekspansi

4 – 1 = Pembuangan pendahuluan

1 – 0 = Langkah buang

2.2.3. Diagram P-V Sebenarnya Motor Diesel 4 Langkah

Proses ini sering disebut dengan proses otto yaitu proses yang sering terjadi dalam motor diesel 4 langkah, dimana proses pembakarannya menggunakan *nozzle* dan proses pembakaran terjadi dengan volume tetap.



Gambar 2.5. Diagram P-V sebenarnya motor diesel 4 langkah

Keterangan :

0 – 1 = Langkah hisap

1 – 2 = Langkah kompresi

2 – 3 = Langkah pembakaran

3 – 4 = Langkah ekspansi

4 – 1 = Pembuangan pendahuluan

1 – 0 = Langkah buang

1. Langkah hisap (0-1)

Pada waktu piston bergerak ke kanan, udara masuk ke dalam silinder. Karena piston dalam keadaan bergerak, maka tekanannya turun sehingga lebih kecil daripada tekanan udara luar, begitu juga suhunya. Garis langkah hisap dapat dilihat pada diagram di atas. Penurunan tekanan ini bergantung pada kecepatan aliran. Pada motor yang tidak menggunakan *supercharge* tekanan terletak antara 0,85-0,9 atm terhadap tekanan udara luar.

2. Langkah kompresi (1-2)

Dalam proses ini kompresi teoritis berjalan adiabatik.

3. Langkah pembakaran (2-3)

Pembakaran terjadi pada volume tetap sehingga suhu naik.

4. Langkah ekspansi (3-4)

Pada langkah ini terjadi proses adiabatik karena cepatnya gerak torak sehingga dianggap tidak ada panas yang keluar maupun masuk.

5. Pembuangan pendahuluan (4-1)

Terjadi proses isokhorik yaitu panas keluar dari katup pembuangan.

6. Langkah pembuangan (1-0)

Sisa gas pembakaran didesak keluar oleh torak. Karena kecepatan gerak torak, terjadilah kenaikan tekanan sedikit di atas 1 atm.

2.3. Klasifikasi Motor Diesel

2.3.1. Klasifikasi Motor Diesel Menurut Prinsip dan Proses Kerjanya

Cara lain dalam pengklasifikasian motor diesel adalah menurut prinsip/ proses kerjanya. Dengan pengelompokan ini dikenal dua jenis motor diesel yaitu motor diesel empat langkah dan motor diesel dua langkah, namun dalam perkembangannya motor diesel 4 langkah lebih banyak berkembang dan digunakan sebagai penggerak. Sebagaimana namanya, mesin diesel empat langkah mempunyai empat prinsip kerja, yaitu langkah hisap, langkah kompresi, langkah usaha dan langkah buang. Keempat langkah mesin diesel ini bekerja secara bersamaan untuk menghasilkan sebuah tenaga yang menggerakkan komponen lainnya. Pada motor diesel 4 langkah, katup masuk dan buang digunakan untuk mengontrol proses pemasukan dan pembuangan gas dengan membuka dan menutup saluran masuk dan buang. Pemakaian bahan bakar lebih hemat, diikuti dengan tingkat polutan gas buang yang relatif rendah, semuanya itu dihasilkan oleh motor diesel secara signifikan. Seperti halnya motor bensin maka ada motor diesel 4 langkah dan 2 langkah. Dalam aplikasinya pada sektor otomotif/ kendaraan kebanyakan dipakai motor diesel 4 langkah.

2.3.2. Klasifikasi Motor Diesel Menurut Posisi Silindernya

Cara pengaturan silinder motor juga sering digunakan untuk mengklasifikasikan motor diesel. Yang paling populer adalah motor diesel tegak/ vertical, dimana silinder motor diatur dalam satu baris silinder motor. Jenis lain adalah dimana silinder motor dibuat baris yang berseberangan bertolak belakang. Pada motor ini mungkin semua silinder motor dibuat pada satu sisi poros engkol. Dengan jumlah silinder yang sama pada masing-masing sisi dikenal motor datar

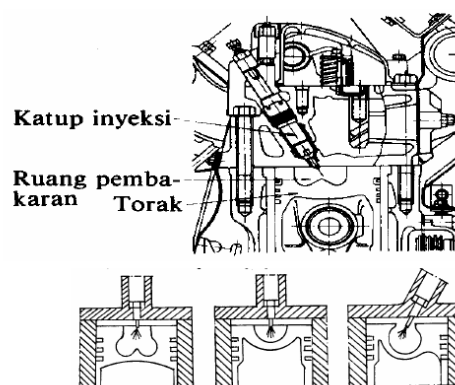
bersilinder bertolak belakang ataupun motor bersilinder V. Motor diesel dengan pengaturan baris membentuk V perlu dijelaskan besarnya sudut V untuk baris silinder yang bervariasi seperti : 45, 50, 55, 60 atau 90 derajat. Sudut V bergantung kepada jumlah silinder dan desain poros engkol.

2.3.3. Klasifikasi Motor Diesel Menurut Ruang Bakar

Pada umumnya ada 2 macam ruang bakar motor diesel yaitu: ruang bakar injeksi langsung (*direct injection combustion chamber*) dan ruang bakar tidak langsung (*in-direct injection combustion chamber*).

1. Ruang bakar injeksi langsung (*direct injection combustion chamber*)

Jenis ruang bakar injeksi langsung adalah mesin yang lebih efisien dan lebih ekonomis dari pada mesin yang menggunakan ruang bakar tidak langsung (*pre-chamber*), oleh karena itu mesin diesel injeksi langsung lebih banyak digunakan untuk kendaraan komersial dan truk, selain dari itu dapat menghasilkan suara dengan tingkat kebisingan yang lebih rendah.



Gambar 2.6. Ruang bakar tipe langsung (*direct injection type*)

Injection nozzle menyembrotkan bahan bakar langsung ke ruang bakar utama (*main combustion*) yang terdapat diantara silinder head dan piston.

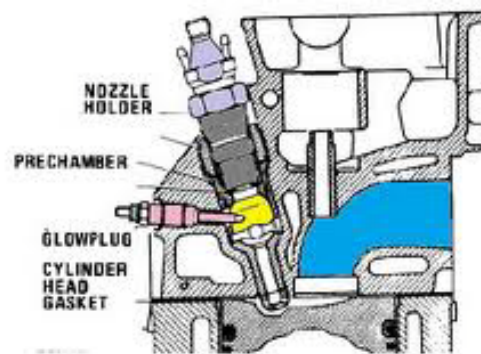
Ruang yang ada pada bagian atas piston merupakan salah satu bentuk yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi pembakaran.

2. Ruang bakar tidak langsung (*in-direct injection combustion chamber*)

Pada ruang bakar injeksi tidak langsung tampak bahwa bahan bakar diinjeksikan oleh pengabut (*nozzle*) tidak secara langsung pada ruang bakar utama (*combustion chamber*), namun diinjeksikan dalam ruang pembakaran awal (*pre-chamber*). Dalam pemakaiannya ruang pembakaran awal ini terdapat beberapa jenis diantaranya adalah :

a. Ruang bakar kamar depan

Bahan bakar disemprotkan oleh injection nozzle ke kamar depan (*precombustion-chamber*). Sebagian akan terbakar ditempat dan sisa bahan bakar yang tidak terbakar ditekan melalui saluran kecil antara ruang bakar kamar depan dan ruang bakar kamar utama dan selanjutnya terurai menjadi partikel yang halus dan terbakar habis diruang bakar utama (*main combustion*).

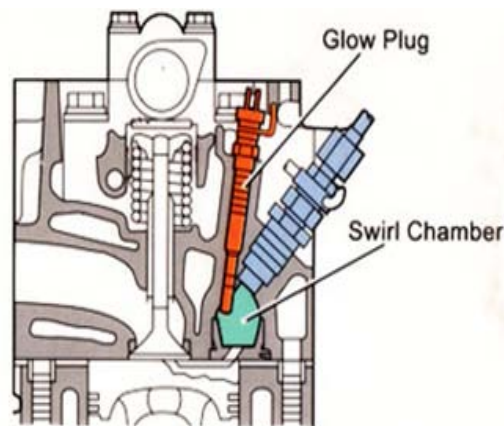


Gambar 2.7. Ruang bakar kamar depan

b. Ruang bakar kamar pusar (*swirl chamber*)

Kamar pusar (*swirl chamber*) mempunyai banyak bentuk spherical. Terlihat pada gambar berikut dimana udara yang dikompresikan oleh

piston memasuki kamar pusat dan membentuk aliran turbulen ditempat bahan bakar yang diinjeksikan. Tetapi sebagian bahan bakar yang belum terbakar akan mengalir ke ruang bakar utama melalui saluran transfer untuk menyelesaikan pembakaran.



Gambar 2.8. Ruang bakar kamar pusat (swirl chamber)

2.4. Keuntungan dan Kerugian

2.4.1. Keuntungan Motor Diesel

1. Mesin diesel mempunyai efisiensi panas yang lebih besar, sehingga kebutuhan bahan bakarnya lebih ekonomis.
2. Mesin diesel lebih tahan lama dan tidak memerlukan *electric igniter*, sehingga kemungkinan kesulitan dalam perawatannya lebih kecil.
3. Momen pada mesin diesel tidak berubah pada jenjang kecepatan yang berubah-ubah, sehingga lebih fleksibel dan mudah dioperasikan.
4. Pada mesin diesel rasio tekanan bahan bakar tidak dibatasi, karena yang dikompresikan hanyalah udara.
5. Semakin tinggi kompresi mesin diesel maka akan semakin besar tenaga yang dihasilkan dan sistem kerjanya semakin efisien.

6. Bahaya kebakaran lebih rendah, karena titik nyala (*flashing point*) bahan bakar relatif lebih tinggi.

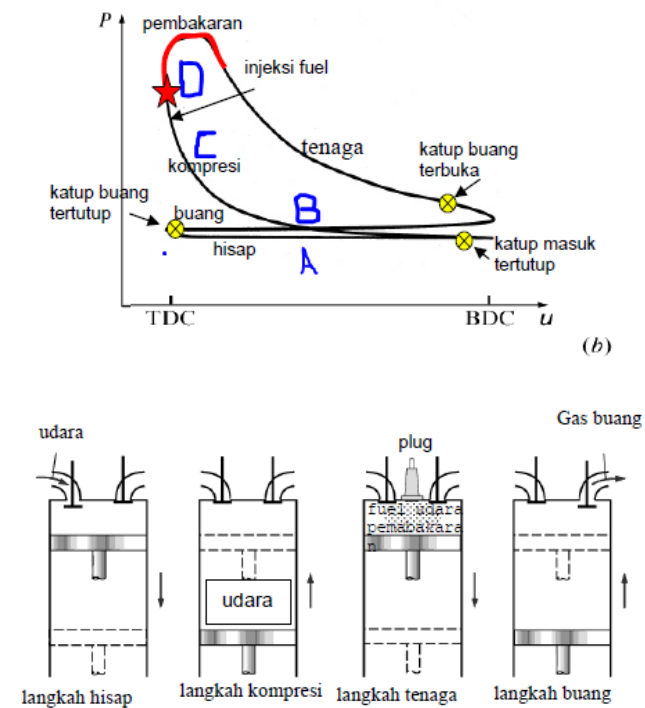
2.4.2. Kerugian Motor Diesel

1. Tekanan pembakaran maksimum hampir dua kali dari mesin bensin sehingga motor diesel menghasilkan suara dan getaran yang lebih besar.
2. Tekanan pembakaran pada mesin diesel sangat tinggi sehingga membutuhkan konstruksi dari bahan yang sangat kuat, jadi jika dibandingkan dengan motor bensin dengan daya yang sama motor diesel lebih mahal harganya.
3. Pada mesin diesel memerlukan sistem injeksi bahan bakar yang sangat presisi.
4. Karena mempunyai perbandingan kompresi yang sangat tinggi dan menghasilkan gaya yang lebih besar, maka motor diesel memerlukan alat pemutar seperti motor starter dan baterai yang berkapasitas besar.
5. Untuk akselerasi mesin diesel lebih lambat.

2.5. Dasar Perhitungan Thermodinamika

2.5.1. Siklus Thermodinamika

Siklus aktual pada mesin dengan pembakaran didalam (*internal combustion engine*) dihitung dengan maksud untuk menentukan parameter dasar thermodinamika suatu siklus kerja yang ditunjukkan dengan tekanan yang konstan dan konsumsi bahan bakar spesifik. Untuk siklus aktual dari motor diesel sendiri ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 2.9. Siklus aktual motor diesel

Dari gambar sebelumnya dapat diketahui perhitungan dasar termodinamika dalam siklus aktual motor diesel sebagai berikut :

1. Keadaan langkah hisap

Keadaan dimana piston bergerak dari titik mati atas ke titik mati bawah dan mendorong udara pembakaran.

a. Temperatur awal kompresi (T_a)

Temperatur awal kompresi adalah temperatur campuran bahan bakar yang berada dalam silinder saat piston melakukan langkah kompresi.

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T_w + \gamma_r \cdot T_r}{1 + \gamma_r} \dots\dots\dots 1$$

¹Petrovsky.N, Marine Internal Combustion Engines, Mir Publishers. Moscow, hal. 29

Dimana :

T_a = Temperatur awal kompresi (°K)

T_0 = Temperatur udara luar (°K)

T_r = Temperatur gas bekas (°K)

γ_r = Koefisien gas bekas

ΔT_w = Kenaikan udara karena menerima suhu dari dinding (°K)

b. Efisiensi pemasukan (*Charge Efficiency*)

Efisiensi pemasukan adalah perbandingan jumlah pemasukan udara segar sebenarnya yang dikompresikan didalam silinder mesin yang sedang bekerja dan jumlah volume langkah pada tekanan dan temperatur udara luar (P_0 dan T_0).

$$\eta_{ch} = \frac{\varepsilon \cdot P_a \cdot T_0}{(\varepsilon - 1) \cdot P_0 (T_0 + \Delta T_w + \gamma_r \cdot T_r)} \dots\dots\dots^2$$

Dimana :

η_{ch} = Efisiensi pemasukan

ε = Perbandingan kompresi

P_0 = Tekanan udara luar (Kg/cm^2)

P_a = Tekanan awal kompresi (Kg/cm^2)

T_a = Temperatur awal kompresi (°K)

T_0 = Temperatur udara luar (°K)

T_r = Temperatur gas bekas (°K)

γ_r = Koefisien gas bekas

ΔT_w = Kenaikan udara karena menerima suhu dari dinding (°K)

²Petrovsky.N, Marine Internal Combustion Engines, Mir Publishers. Moscow, hal. 31

2. Keadaan langkah kompresi

Keadaan dimana tekanan dan temperatur udara pembakaran sangat tinggi dan merupakan awal proses pembakaran bahan bakar.

a. Tekanan akhir kompresi

Tekanan akhir kompresi adalah tekanan campuran bahan bakar dalam silinder pada akhir langkah kompresi.

$$P_c = P_a \cdot \varepsilon^{n_1} \dots\dots\dots^3$$

Dimana :

P_c = Tekanan akhir kompresi (Kg/cm^2)

P_a = Tekanan awal kompresi (Kg/cm^2)

ε = Perbandingan kompresi

n_1 = Koefisien polytropik

b. Temperatur akhir kompresi

Temperatur akhir kompresi adalah temperatur campuran bahan bakar dalam silinder pada akhir langkah kompresi.

$$T_c = T_a \cdot \varepsilon^{(n_1-1)} \dots\dots\dots^4$$

Dimana :

T_c = Temperatur akhir kompresi ($^{\circ}K$)

T_a = Temperatur awal kompresi ($^{\circ}K$)

ε = Perbandingan kompresi

n_1 = Koefisien polytropik

³Petrovsky.N, Marine Internal Combustion Engines, Mir Publishers. Moscow, hal. 32

⁴Ibid, hal. 32

3. Keadaan langkah pembakaran

Pada keadaan ini proses dimana pembakaran terus berlangsung pada volume tetap.

a. Nilai kalor pembakaran bahan bakar (Q_i)

Nilai kalor pembakaran bahan bakar adalah jumlah panas yang mampu dihasilkan dalam pembakaran 1 Kg bahan bakar. Untuk nilai kalor bahan bakar motor diesel pada umumnya tidak jauh menyimpang dari 10.100 Kcal/Kg.

b. Kebutuhan udara teoritis

Kebutuhan udara teoritis adalah kebutuhan udara yang diperlukan untuk membakar bahan bakar jika jumlah oksigen di udara sebesar 21% .

$$L'_0 = \frac{1}{0,21} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right) \dots\dots\dots^5$$

Dimana :

L'_0 = Kebutuhan udara teoritis (mole)

C = Kandungan karbon (%)

H = Kandungan hidrogen (%)

O = Kandungan oksigen (%)

c. Koefisien pembakaran

Koefisien pembakaran adalah koefisien yang menunjukkan perubahan molekul yang terjadi selama proses pembakaran bahan bakar.

$$\mu_0 = \frac{M_g}{\alpha \cdot L'_0} \dots\dots\dots^6$$

⁵Petrovsky.N, Marine Internal Combustion Engines, Mir Publishers. Moscow, hal. 37

⁶Ibid,hal. 40

Dimana :

- μ_0 = Koefisien pembakaran
 L'_0 = Kebutuhan udara teoritis (mole)
 M_g = Jumlah molekul yang terbakar
 α = Koefisien kelebihan udara

d. Koefisien pembakaran molekul

Koefisien pembakaran molekul adalah koefisien yang menunjukkan perubahan molekul yang terjadi sebelum dan sesudah pembakaran.

$$\mu = \frac{\mu_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r} \dots\dots\dots 7$$

Dimana :

- μ = Koefisien pembakaran molekul
 μ_0 = Koefisien pembakaran
 γ_r = Koefisien gas bekas

e. Temperatur pembakaran pada volume tetap

Temperatur pembakaran pada volume tetap adalah temperatur hasil gas pembakaran campuran bahan bakar untuk motor diesel.

$$\frac{\xi_z \cdot Q_i}{\alpha \cdot L'_0(1 + \gamma_r)} + (mc_v)_{mix} \cdot T_c = \mu (mc_v)_g \cdot T_z \dots\dots\dots 8$$

Dimana :

- ξ_z = Heat utilization coefficient (koefisien perbandingan panas)
 Q_i = Nilai pembakaran bahan bakar ($Kcal/Kg$)
 α = Koefisien kelebihan udara
 L'_0 = Kebutuhan udara teoritis (mole)

⁷Petrovsky.N, Marine Internal Combustion Engines, Mir Publishers. Moscow, hal. 40

⁸Ibid, hal. 46

- γ_r = Koefisien gas bekas
 T_c = Temperatur akhir kompresi ($^{\circ}\text{K}$)
 μ = Koefisien pembakaran molekul
 T_z = Temperatur pembakaran pada volume tetap ($^{\circ}\text{K}$)
 $(mc_v)_{mix}$ = Kapasitas udara panas volume tetap ($Kcal/mol$ per $^{\circ}\text{C}$)
 $(mc_v)_g$ = Kapasitas udara panas dari gas ($Kcal/mol$ per $^{\circ}\text{C}$)

f. Tekanan akhir pembakaran

$$P_z = \mu \left(\frac{T_z}{T_c} \right) P_c \dots\dots\dots^9$$

Dimana :

- P_z = Tekanan akhir pembakaran (Kg/cm^2)
 μ = Koefisien pembakaran molekul
 T_c = Temperatur akhir kompresi ($^{\circ}\text{K}$)
 T_z = Temperatur pembakaran pada volume tetap ($^{\circ}\text{K}$)

g. Perbandingan tekanan dalam silinder selama pembakaran

Perbandingan tekanan dalam silinder selama pembakaran adalah rasio yang menunjukkan perbandingan tekanan akhir pembakaran dengan tekanan awal pembakaran.

$$\lambda = \frac{P_z}{P_c} \dots\dots\dots^{10}$$

Dimana :

- λ = Perbandingan tekanan dalam silinder selama pembakaran
 P_z = Tekanan akhir pembakaran (Kg/cm^2)
 P_c = Tekanan akhir kompresi/ tekanan awal pembakaran (Kg/cm^2)

⁹Petrovsky.N, Marine Internal Combustion Engines, Mir Publishers. Moscow, hal. 50

¹⁰Ibid, hal. 14

4. Keadaan langkah buang

Keadaan ini merupakan keadaan selama proses pembuangan gas hasil pembakaran.

a. Perbandingan ekspansi pendahuluan

Perbandingan ekspansi pendahuluan adalah rasio yang menunjukkan perubahan yang terjadi pada gas hasil pembakaran campuran bahan bakar pada awal langkah kompresi.

$$\rho = \frac{\mu \cdot T_z}{\lambda \cdot T_c} \dots\dots\dots 11$$

Dimana :

ρ = Perbandingan ekspansi pendahuluan

μ = Koefisien pembakaran molekul

T_z = Temperatur pembakaran pada volume tetap (°K)

λ = Perbandingan tekanan dalam silinder selama pembakaran

T_c = Temperatur akhir kompresi (°K)

b. Perbandingan kompresi selanjutnya

Perbandingan kompresi disini adalah rasio yang menunjukkan perubahan pada gas hasil pembakaran selama langkah ekspansi.

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\rho} \dots\dots\dots 12$$

Dimana :

δ = Perbandingan kompresi selanjutnya

ε = Perbandingan kompresi

ρ = Perbandingan ekspansi pendahuluan

¹¹Petrovsky.N, Marine Internal Combustion Engines, Mir Publishers. Moscow, hal. 50

¹²Ibid, hal. 14

c. Tekanan gas pada akhir ekspansi

$$P_b = \frac{P_z}{\delta^{n_2}} \dots\dots\dots 13$$

Dimana :

P_b = Tekanan gas pada akhir ekspansi (Kg/cm^2)

P_z = Tekanan akhir pembakaran (Kg/cm^2)

δ = Perbandingan kompresi selanjutnya

n_2 = Ekspansi polystropik

d. Temperatur akhir ekspansi

$$T_b = \frac{T_z}{\delta^{n_2-1}} \dots\dots\dots 14$$

Dimana :

T_b = Temperatur pada akhir ekspansi ($^{\circ}K$)

T_z = Temperatur akhir pembakaran ($^{\circ}K$)

δ = Perbandingan kompresi selanjutnya

n_2 = Ekspansi polystropik

e. Tekanan rata-rata indikator teoritis

Besarnya rata - rata tekanan yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar yang bekerja pada piston.

$$P_{it} = \frac{P_c}{\epsilon-1} \left\{ \lambda (\rho-1) + \frac{\lambda \cdot \rho}{n_2-1} \left[1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}} \right] - \frac{1}{n_1-1} \left[1 - \frac{1}{\epsilon^{n_1-1}} \right] \right\} \dots\dots\dots 15$$

Dimana :

P_{it} = Tekanan rata-rata indikator teoritis (Kg/cm^2)

δ = Perbandingan kompresi selanjutnya

n_2 = Ekspansi polystropik

¹³Petrovsky.N, Marine Internal Combustion Engines, Mir Publishers. Moscow, hal. 52

¹⁴Ibid, hal. 52

¹⁵Ibid, hal. 55

- ε = Perbandingan kompresi
- ρ = Perbandingan ekspansi pendahuluan
- P_c = Tekanan akhir kompresi/ tekanan awal pembakaran (Kg/cm^2)
- λ = Perbandingan tekanan dalam silinder selama pembakaran
- n_1 = Koefisien polytropik

f. Tekanan rata-rata indikator sebenarnya

Tekanan rata-rata indikator sebenarnya adalah besar tekanan rata-rata yang dihasilkan dari pembakaran campuran bahan bakar.

$$P_i = P_{it} \cdot \varphi \quad \dots\dots\dots^{16}$$

Dimana :

- P_i = Tekanan rata-rata indikator sebenarnya (Kg/cm^2)
- P_{it} = Tekanan rata-rata indikator teoritis (Kg/cm^2)
- φ = Faktor koreksi

g. Tekanan efektif rata-rata

Tekanan efektif rata-rata adalah besarnya tekanan rata-rata efektif yang bekerja pada permukaan piston.

$$P_e = \eta_m \cdot P_i \quad \dots\dots\dots^{17}$$

Dimana :

- P_e = Tekanan efektif rata-rata (Kg/cm^2)
- P_i = Tekanan rata-rata indikator sebenarnya (Kg/cm^2)
- η_m = Efisiensi mekanik

¹⁶Petrovsky.N, Marine Internal Combustion Engines, Mir Publishers. Moscow, hal. 55

¹⁷Ibid, hal. 61

2.5.2. Efisiensi Mesin

Efisiensi mesin menggambarkan tingkat efektifitas mesin dalam bekerja. Konsep efisiensi menjelaskan tentang perbandingan antara energi yang berguna dengan energi yang masuk secara alamiah yang tidak pernah mencapai 100%. Pada motor bakar ada beberapa definisi dari efisiensi yang menggambarkan kondisi efektifitas mesin saat bekerja.

1. Efisiensi thermal

Efisiensi thermal adalah perbandingan antara energi yang berguna dengan energi yang masuk.

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \dots\dots\dots^{18}$$

Dimana :

η_t = Efisiensi thermal

ε = Perbandingan kompresi

k = Adiabatik eksponen

2. Efisiensi thermal indikator

Efisiensi thermal indikator adalah efisiensi thermal dari siklus aktual diagram indikator.

$$\eta_i = \frac{632}{F_i \cdot Q_i} \dots\dots\dots^{19}$$

Dimana :

η_i = Efisiensi thermal indikator

F_i = Pemakaian bahan bakar indikator ($Kg/HP - jam$)

Q_i = Nilai pembakaran bahan bakar ($Kcal/Kg$)

¹⁸Petrovsky.N, Marine Internal Combustion Engines, Mir Publishers. Moscow, hal. 16

¹⁹Ibid, hal. 62

3. Efisiensi thermal efektif

Efisiensi thermal efektif adalah perbandingan daya efektif dengan kalor yang masuk.

$$\eta_b = \frac{632}{F \cdot Q_i} \dots\dots\dots 20$$

Dimana :

η_b = Efisiensi thermal efektif

F = Pemakaian bahan bakar spesifik efektif (*Kg/HP – jam*)

Q_i = Nilai pembakaran bahan bakar (*Kcal/Kg*)

4. Efisiensi mekanik

Efisiensi mekanik adalah perbandingan antara daya efektif dengan daya indikator.

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} \dots\dots\dots 21$$

Dimana :

η_m = Efisiensi mekanik

N_e = Daya efektif (HP)

N_i = Daya indikator (HP)

5. Efisiensi volumetrik

Efisiensi volumetrik adalah perbandingan jumlah pemasukan udara segar sebenarnya yang dikompresikan didalam silinder mesin yang sedang bekerja dan jumlah volume langkah pada tekanan dan temperatur udara luar.

$$\eta_{ch} = \frac{\varepsilon \cdot P_a \cdot T_0}{(\varepsilon - 1) \cdot P_0 (T_0 + \Delta T_w + \gamma_r \cdot T_r)} \dots\dots\dots 22$$

²⁰Petrovsky.N, Marine Internal Combustion Engines, Mir Publishers. Moscow, hal. 62

²¹Ibid, hal. 60

²²Ibid, hal. 31

Dimana :

η_{ch} = Efisiensi volumetrik

ε = Perbandingan kompresi

P_0 = Tekanan udara luar (Kg/cm^2)

P_a = Tekanan awal kompresi (Kg/cm^2)

T_a = Temperatur awal kompresi ($^{\circ}K$)

T_0 = Temperatur udara luar ($^{\circ}K$)

T_r = Temperatur gas bekas ($^{\circ}K$)

γ_r = Koefisien gas bekas

ΔT_w = Kenaikan udara karena menerima suhu dari dinding ($^{\circ}K$)

2.5.3. Daya Motor

Daya motor adalah salah satu parameter dalam menentukan kinerja dari suatu motor tersebut. Untuk itu, ada beberapa hal yang harus diperhatikan dalam menentukan suatu daya motor itu sendiri.

1. Torsi

Torsi adalah besaran turunan yang biasa digunakan untuk menghitung energi yang dihasilkan dari benda yang berputar pada porosnya. Torsi juga dapat diperoleh dari perhitungan daya indikator dan putaran mesin yang terjadi.

$$T_i = 716,2 \frac{N_e}{n} \dots\dots\dots 23$$

Dimana :

T_i = Torsi mesin (Nm)

N_e = Daya efektif (HP)

²³Petrovsky.N, Marine Internal Combustion Engines, Mir Publishers. Moscow, hal. 99

n = Putaran motor (rpm)

2. Volume langkah

Volume langkah adalah besarnya ruang yang ditempuh oleh piston selama melakukan langkah kerja.

$$V_s = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{4} \dots\dots\dots 24$$

Dimana :

V_s = Volume langkah (cm^3)

D = Diameter silinder (cm)

L = Panjang langkah piston (cm)

3. Daya indikator

Daya indikator adalah daya motor yang bersifat teoritis, yang belum dipengaruhi oleh kerugian-kerugian dalam mesin.

$$N_i = \frac{10^4 \cdot P_i \cdot V_s \cdot n \cdot i \cdot a}{60 \cdot 75} \dots\dots\dots 25$$

Dimana :

N_i = Daya indikator (HP)

P_i = Tekanan rata-rata indikator sebenarnya (Kg/cm^2)

V_s = Volume langkah (m^3)

n = Putaran motor (rpm)

i = Jumlah silinder

a = Jumlah langkah kerja (motor 4 tak = 1/2 dan motor 2 tak = 1)

²⁴Petrovsky.N, Marine Internal Combustion Engines, Mir Publishers. Moscow, hal. 22

²⁵Ibid, hal. 58

4. Daya efektif

Daya efektif atau daya usaha adalah daya yang berguna sebagai penggerak atau daya poros.

$$N_e = N_i \cdot \eta_m \quad \dots\dots\dots^{26}$$

Dimana :

N_e = Daya efektif (HP)

N_i = Daya indikator (HP)

η_m = Efisiensi mekanik

2.5.4. Kebutuhan Bahan Bakar

Dalam melakukan kerjanya, motor memerlukan bahan bakar yang harus dikonsumsi selama mesin dalam keadaan hidup. Parameter dalam perhitungan kebutuhan bahan bakar motor adalah sebagai berikut.

1. Pemakaian bahan bakar indikator

Pemakaian bahan bakar indikator adalah jumlah bahan bakar yang diperlukan untuk menghasilkan tekanan indikator.

$$F_i = \frac{318,4 \cdot \eta_{ch} \cdot P_0}{P_i \cdot \alpha \cdot L'_0 \cdot T_0} \quad \dots\dots\dots^{27}$$

Dimana :

F_i = Pemakaian bahan bakar indikator ($Kg/HP - jam$)

η_{ch} = Efisiensi volumetrik

P_0 = Tekanan udara luar (Kg/cm^2)

P_i = Tekanan rata-rata indikator sebenarnya (Kg/cm^2)

α = Koefisien kelebihan udara

²⁶Petrovsky.N, Marine Internal Combustion Engines, Mir Publishers. Moscow, hal. 62

²⁷Ibid, hal. 64

L'_0 = Kebutuhan udara teoritis (*mol/Kg*)

T_0 = Temperatur udara luar ($^{\circ}\text{K}$)

2. Konsumsi bahan bakar spesifik efektif

Konsumsi bahan bakar spesifik efektif adalah jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan kerja efektif.

$$F_e = \frac{F_i}{\eta_m} \dots\dots\dots 28$$

Dimana :

F_e = Konsumsi bahan bakar spesifik efektif (*Kg/HP – jam*)

F_i = Pemakaian bahan bakar indikator (*Kg/HP – jam*)

2.5.5. Kebutuhan Air Pendingin

Selama bekerja mesin menghasilkan panas yang sangat tinggi, untuk itu dalam mesin dibutuhkan pendinginan yang cukup agar mesin tetap bekerja secara maksimal.

1. Panas yang ditimbulkan

$$Q_{cool} = 0,3 \cdot F_e \cdot Q_i \cdot N_e \dots\dots\dots 29$$

Dimana :

Q_{cool} = Panas yang ditimbulkan (*Kcal/jam*)

Q_i = Nilai pembakaran bahan bakar (*Kcal/Kg*)

F_e = Konsumsi bahan bakar spesifik efektif (*Kg/HP – jam*)

N_e = Daya efektif (HP)

²⁸Petrovsky.N, Marine Internal Combustion Engines, Mir Publishers. Moscow, hal. 63

²⁹Daryanto, Drs., Contoh Perhitungan Perencanaan Motor Diesel 4 Langkah, Tarsito. Bandung, hal. 81

2. Kapasitas air pendinginan

$$\dot{m} = \frac{Q_{cool}}{K_u} \dots\dots\dots^{30}$$

Dimana :

\dot{m} = Kapasitas air pendinginan (*Kg/Jam*)

Q_{cool} = Panas yang ditimbulkan (*Kcal/jam*)

K_u = Kalor uap (*Kcal/Kg*)

³⁰Kamajaya, Drs. Lingsih, S, Ir. Fisika, Ganeca Exact, Bandung, hal. 154