

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Umum Motor Bakar

Motor bakar merupakan jenis motor yang banyak dipakai saat ini untuk menghasilkan energi. Energi tersebut diperoleh dari hasil pembakaran bahan bakar di dalam silinder. Motor bakar dapat dibedakan menjadi dua yaitu motor pembakaran dalam dan motor pembakaran luar. Motor pembakaran dalam adalah motor yang melakukan proses pembakaran bahan bakar di dalam silinder dan gas pembakaran yang terjadi berfungsi sebagai fluida kerja. Motor pembakaran luar adalah motor yang proses pembakaran bahan bakarnya terjadi di luar silinder dan energi panas dari gas pembakaran dipindahkan ke fluida mesin melalui beberapa dinding pemisah, contohnya ketel uap.

2.2 Pengertian Mesin Diesel

Mesin diesel adalah jenis motor pembakaran dalam dengan karakteristik utama yang berbeda dari motor bakar yang lain yaitu terletak pada metode pembakaran bahan bakarnya.

Torak (piston) yang bergerak secara translasi/bolak-balik didalam silinder mengkompresikan udara sehingga menaikkan temperatur dan tekanan, kemudian bahan bakar dikabutkan kedalam ruang bakar, karena suhu dan tekanan yang sangat tinggi menyebabkan bahan bakar yang dikabutkan oleh *nozzel* akan terbakar dengan sendirinya (*compression ignition engines*) dan terjadilah proses ekspansi yang mendorong piston. Tenaga dari piston diteruskan oleh batang piston menuju poros engkol, gerak translasi dirubah menjadi gerak rotasi oleh

poros engkol tersebut. Mesin diesel termasuk pembakaran dalam (*internal combustion engines*), karena pembakaran terjadi di dalam mesin itu sendiri.

2.2.1 Prinsip Kerja Mesin Diesel 4 Langkah

Prinsip kerja mesin diesel adalah gerakan bolak-balik dari torak hasil pembakaran yang membentuk siklus. Siklus kerja dari mesin diesel adalah sebagai berikut :

1. Langkah pengisian

Torak bergerak dari TMA ke TMB. Katup hisap terbuka dan katup buang tertutup. Kemudian torak akan menghisap udara yang mengalir kedalam silinder melalui katup masuk. Udara masuk kedalam silinder yang tekanannya lebih rendah dari tekanan atmosfer. Setelah sampai ke TMB katup hisap tertutup.

2. Langkah Kompresi

Pada langkah ini torak bergerak dari TMB ke TMA. Kedua katup tertutup karena gerakan torak keatas. Udara yang berada didalam silinder dikompresikan.

3. Langkah Kerja/Ekspansi

Torak bergerak dari TMA ke TMB. Kedua katup masih dalam keadaan tertutup, sebelum torak sampai TMA atau sebelum langkah kompresi selesai bahan bakar dikabutkan kedalam ruang bakar. Bahan bakar tersebut langsung terbakar dengan sendirinya karena udara pembakar didalam ruang bakar tersebut sudah memiliki temperatur sangat tinggi, karena pembakaran tersebut temperatur dan tekanannya naik, gas pembakaran berekspansi dan mendorong torak kebawah untuk melakukan kerja mekanis menggerakkan poros engkol.

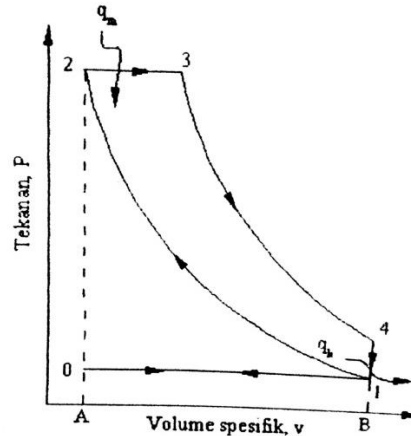
4. Langkah Buang

Torak bergerak dari TMB ke TMA. Pada proses ini katup hisap tertutup dan katup buang terbuka. Gas hasil pembakaran akan terdorong keluar melalui katup buang. Setelah torak menyelesaikan langkah ini sampai di TMA katup buang tertutup dan katup hisap terbuka, siap melakukan langkah pengisian kembali.

2.3 Siklus Pada Mesin Diesel 4 Langkah

2.3.1 Siklus Ideal

Proses termodinamika dan kimia yang terjadi didalam motor bakar torak sangat kompleks untuk dianalisa menurut teori. Untuk memudahkan analisa tersebut kita perlu membayangkan keadaan yang ideal.



Gambar 2.1 Diagram P-V Teoritis Mesin Diesel 4 Tak

Keterangan :

1. Langkah Hisap (0 - 1)

Torak bergerak dari TMA ke TMB, katup hisap terbuka dan katup buang tertutup. Piston akan menghisap udara yang tekanannya lebih

rendah dari tekanan atmosfer. Udara dan bahan bakar terhisap masuk kedalam silinder.

2. Langkah Kompresi (1 - 2)

Piston bergerak dari TMB ke TMA, udara didalam silinder dimampatkan (dikompresikan) sehingga tekanan naik.

3. Langkah Pembakaran (2 - 3)

Pada akhir langkah kompresi terjadi pembakaran tekanan konstan.

4. Langkah Ekspansi (3 - 4)

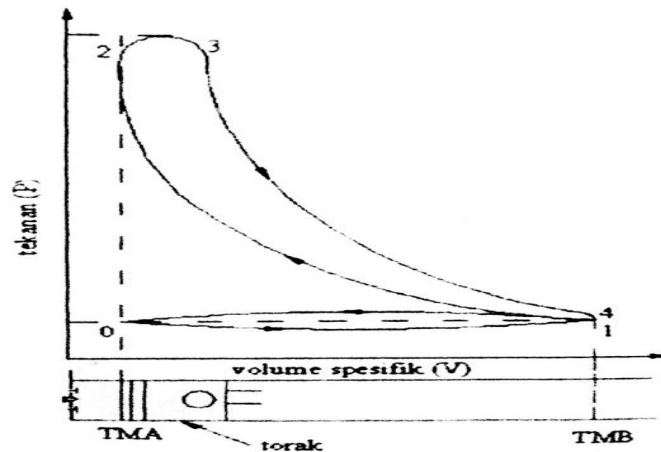
Piston bergerak dari TMA ke TMB, kedua katup masih menutup. Bergeraknya piston ke TMB ini akibat tekanan pembakaran, langkah ini merupakan langkah usaha (proses isentropik).

5. Langkah Buang (4 - 1)

Proses pembuangan ini terjadi sebelum torak mencapai TMB. Katup buang membuka dan gas sisa pembakaran keluar yang dianggap sebagai proses pengeluaran kalor pada volume konstan.

2.3.2 Siklus Sebenarnya

Dalam kenyataan tidak ada satu siklus ideal, tetapi boleh dikatakan hampir mendekati ideal.



Gambar 2.2 Diagram P-V sebenarnya Mesin Diesel 4 Tak

Keterangan :

0 - 1. Langkah hisap

20° sebelum torak mencapai TMA katup hisap sudah mulai terbuka dan 10° setelah TMA katup buang tertutup. Torak bergerak dari TMA menuju TMB sehingga tekanan dalam silinder sedikit lebih rendah dari tekanan udara luar, udara masuk kedalam silinder melewati katup hisap.

1 - 2. Langkah kompresi

Bergerakannya torak dari TMB menuju TMA menyebabkan ruang dalam silinder mengecil, katup hisap menutup pada 20° setelah TMB, sehingga pada langkah ini kedua katup tertutup. Tekanannya naik sampai $\pm 30 \text{ kg/cm}^2$ dan temperaturnya 550°C.

2 - 3. Pembakaran

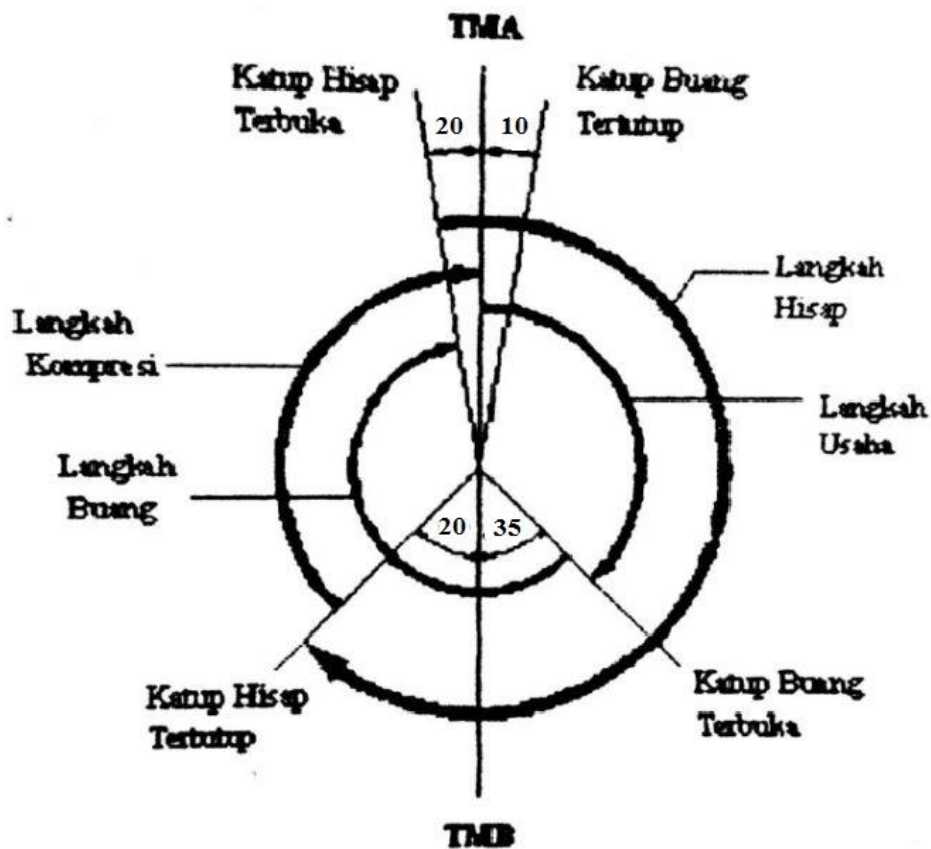
Pembakaran dimulai dari titik 2 bahan bakar dimasukkan kedalam silinder berangsur-angsur selama 10% dari langkah, setelah bahan bakar bersentuhan dengan udara yang sangat panas, maka mulai terjadi pembakaran dengan temperatur yang naik menjadi 1200-1600°C.

3 - 4. Langkah usaha/ekspansi.

Setelah pembakaran bahan bakar selesai pada titik 3, piston bergerak dari TMA menuju TMB gerak translasi piston di teruskan oleh batang piston untuk di ubah menjadi gerak rotasi oleh poros engkol dan menghasilkan kerja. Diperoleh tenaga yang langsung dipindahkan ke poros engkol. Dimana dalam langkah ini kedua katup masih tertutup.

4 - 0. Langkah buang

35° sebelum torak mencapai TMB katup buang mulai terbuka, dimana pada saat itu tekanan gas masih kurang lebih 2 atm dan gas-gas sisa pembakaran mengalir keluar. Tekanannya turun dengan cepat sehingga tekanannya sama dengan tekanan atmosfer. Torak bergerak dari TMB menuju TMA dengan mendorong gas sisa pembakaran keluar silinder.



Gambar 2.3 Diagram Kerja Katup Mesin Diesel 4 Langkah

2.4 Mesin Diesel 2 Tak

Mesin diesel 2 Tak adalah mesin yang dalam satu kali siklus kerjanya menghasilkan satu kali kerja dalam dua kali langkah torak atau satu kali putaran poros engkol.

2.5 Prinsip Kerja Mesin Disel 2 Tak

1. Langkah ekspansi / kerja

Pada langkah ini torak bergerak dari TMA ke TMB. Sesaat sebelum torak mencapai TMA *injector* menyembrotkan bahan bakar dan bahan bakar terbakar dengan sendirinya, setelah pembakaran dan terjadi ekspansi gas pembakaran diatas torak berlangsung kerja mekanis. Gas bekas akan mulai keluar pada saat torak mencapai sisi atas lubang pembilas maka pembilasan dimulai. Pada akhir langkah lubang pembuangan dan lubang pembilas terbuka penuh. Udara pembilas yang masuk ke dalam silinder melalui lubang pembilas mendesak gas bekas melalui pembuangan ke saluran pembuangan.

2. Langkah kompresi

Pada langkah ini torak bergerak dari TMB ke TMA. Langkah kompresi dimulai setelah lubang pembilasan dan lubang pembuangan tertutup sampai torak mencapai TMA. Tekanan kompresi mencapai lebih dari 30 bar dan setelah pembakaran meningkat menjadi 50 bar dengan suhu diatas 550⁰C.

2.5.1 Keuntungan Mesin Disel 2 Tak :

1. Untuk ukuran yang sama dayanya lebih besar
2. Pemeliharaan ringan karena konstruksinya sederhana

2.5.2 Kerugian Mesin Diesel 2 Tak :

Bahan bakarnya boros karena sebagian bahan bakar akan ikut terbang bersama langkah pembilasan.

2.6 Solar

Solar adalah bahan bakar mesin diesel dan merupakan fraksinasi dari minyak bumi. Umumnya solar mengandung kadar belerang yang cukup tinggi. Kualitas minyak solar dinyatakan dalam bilangan setana, angka setana solar dipasaran adalah 48. Nomor *cetane* atau tingkatan dari solar adalah satu cara untuk mengontrol bahan bakar solar dalam kemampuan untuk mencegah terjadinya *knocking*. Tingkatan yang lebih besar memiliki kemampuan yang lebih baik.

Bahan bakar solar atau minyak solar adalah bahan bakar yang digunakan untuk mesin diesel putaran tinggi diatas 1000 rpm. Bahan bakar solar disebut juga *High Speed Diesel (HSD)* atau *Automotif Diesel Oil (ADO)*. Pada mesin diesel, penyalan kompresi menggunakan jenis mesin *Internal Combustion Engine*, berbeda dengan bensin dimana mesin bensin penyalannya menggunakan busi mesin, baik dua langkah maupun empat langkah. Minyak solar adalah campuran kompleks hidrokarbon C21-C30, yang mempunyai titik didih 105°C-135°C. Mutu minyak solar harus memenuhi batasan sifat-sifat yang tercantum pada spesifikasi dalam segala cuaca. Minyak solar mudah teratomisasi menjadi butiran-butiran halus, sehingga dapat segera menyala dan terbakar dengan sempurna sesuai dengan kondisi dalam ruang bakar mesin.



Gambar 2.4 Solar

2.6.1 Sifat-sifat Bahan Bakar Solar

Bahan bakar solar disebut juga *light oil* atau diesel, adalah suatu campuran dari hidrokarbon yang telah didistilasi setelah bensin dan minyak tanah dari minyak mentah pada temperatur 105°C sampai 135°C . Sebagian besar solar digunakan untuk menggerakkan mesin diesel. Bahan bakar diesel mempunyai sifat utama sebagai berikut :

- a. Tidak berwarna atau sedikit kekuning-kuningan dan berbau.
- b. Berwujud Encer.
- c. Mempunyai titik nyala tinggi (40°C - 100°C).
- d. Terbakar spontan pada 350°C , sedikit dibawah temperatur bensin yang terbakar sendiri sekitar 500°C .
- e. Mempunyai berat jenis 0,82-0,86.
- f. Menimbulkan panas yang besar (sekitar 10.500 kcal/kg).
- g. Mempunyai kandungan sulfur lebih besar dibanding bensin.

Selain Sifat utama diatas, solar juga memiliki sifat tambahan dengan pengujian agar dapat digunakan dengan lebih baik, seperti dibawah ini:

1. Sifat Umum

Sifat umum minyak solar sangat erat hubungannya dengan pemuatan, kontaminasi, *material balance*.

Sifat umum minyak solar sesuai spesifikasinya ditunjukkan pada pengujian:

- a. *Specific Gravity* 60/60 °F, ASTM D 1298
- b. *Density* 15 °C, ASTM D 1298

2. Sifat Mutu Pembakaran (*Ignition Quality*)

Minyak solar dapat memberikan kerja mesin yang memuaskan apabila dapat menghasilkan pembakaran sempurna dalam ruang bakar. Udara yang dikompresikan ke dalam ruang bakar mesin sampai tekanan antara 20-30 kgf/cm² sehingga suhu dalam ruang bakar berkisar 650-750°C. Pembakaran yang sempurna dapat dilakukan dengan menginjeksikan bahan bakar yang di dalamnya terdapat udara panas sehingga mampu menyalakan bahan bakar. Pembakaran yang terjadi menyebabkan tekanan dalam ruang bakar naik secara mendadak dan menimbulkan tenaga. Bila hal ini dipenuhi, maka tidak akan terjadi ketukan (*knocking*) di dalam mesin.

Knocking di dalam mesin diesel terjadi akibat keterlambatan terbakarnya bahan bakar di dalam ruang bakar. Ini disebabkan oleh terjadinya akumulasi bahan bakar di dalam ruang bakar, dan begitu terbakar maka akan terjadi ledakan secara berturut-turut.

Jarak waktu antara bahan bakar diinjeksikan ke ruang bakar sampai saat terbakar, disebut waktu tunda (*delay period*), dinyatakan dalam menit. Waktu tunda yang panjang akan menyebabkan terakumulasinya bahan bakar cukup

banyak, akibatnya terjadi penyalaan yang spontan dan akan menimbulkan suara yang keras dan kemudian disebut *Diesel Knock*. Sifat mutu pembakaran adalah salah satu ukuran sifat bahan bakar minyak solar. Sifat ini ditunjukkan oleh besar kecilnya angka setana.

Sifat mutu pembakaran minyak solar sesuai spesifikasinya ditunjukkan pada pengujian:

- a. *Diesel index*
- b. *Cetane index*
- c. *Cetane number*

3. Sifat penguapan (*Volatility*)

Dalam penggunaannya diharapkan minyak solar akan teruapkan sempurna dan terdistribusikan merata kedalam ruang bakar, sehingga dapat terbakar sempurna. Karena bahan bakar dapat terbakar dengan sempurna, mengakibatkan mudahnya *starting* pada mesin. Waktu pemanasan mesin dan akselerasi. Jika minyak solar sulit untuk terjadi penguapan maka minyak solar tersebut akan sulit pula untuk memenuhi kemudahan *start* mesin dan rendahnya akselerasi mesin, bila tingkat penguapannya rendah. Ini menunjukkan bahwa di dalam minyak solar terdapat fraksi yang lebih berat.

Sifat penguapan minyak solar sesuai spesifikasinya ditunjukkan pada pengujian:

- a. Distilasi ASTM D 86
- b. *Flash Point* ASTM D 93

4. Sifat Pengkaratan (*Corrosivity*)

Unsur-unsur dalam minyak solar disamping hidrokarbon terdapat pula unsur sulfur, oksigen, nitrogen, halogen dan logam. Unsur senyawa yang bersifat korosif adalah senyawa sulfur. Senyawa sulfur dalam minyak solar yang korosif dapat berupa *hydrogen sulfide*. Pada pembakaran bahan bakar senyawa sulfur akan teroksidasi oleh oksigen dalam udara menghasilkan oksida sulfur, bila oksida sulfur ini bereaksi dengan uap air akan menghasilkan asam sulfat. Terbentuknya asam sulfat dapat bereaksi dengan logam, terutama dalam gas buang. Terdapatnya senyawa sulfur dalam minyak solar dapat juga ditunjukkan dengan tingkat keasaman minyak solar. Makin tinggi sifat keasaman minyak solar itu, maka semakin tinggi pula nilai asam kuat (*strong acid number*).

Sifat pengkaratan minyak solar sesuai spesifikasinya ditunjukkan pada pengujian:

- a. Kandungan sulfur, ASTM D 1266
- b. *Copper strip corrosion*, ASTM D 130
- c. *Strong acid Number*, ASTM D 974
- d. Total *acid number*, ASTM D 974

5. Sifat Kebersihan (*Cleanless*)

Sifat kebersihan minyak solar yang berhubungan dengan ada/tidaknya kotoran yang terdapat di dalam minyak solar, sebab kotoran ini akan berpengaruh terhadap mutu, karena dapat mengakibatkan kegagalan dalam suatu operasi dan merusak mesin. Kotoran itu dapat berupa air, lumpur, atau endapan atau sisa pembakaran yang berupa abu dan karbon. Untuk itu makin

kecil adanya kotoran di dalam minyak solar makin baik mutu bahan bakar tersebut.

Sifat Kebersihan minyak solar sesuai spesifikasinya ditunjukkan pada pengujian:

- a. *Color* ASTM, ASTM D 1500
- b. *Water content*, ASTM D 96
- c. CCR (10% vol. *bottom*), ASTM D 189
- d. *Ash content*, ASTM D 482
- e. *Sediment by Extraction*, ASTM D 473

6. Sifat Keselamatan

Sifat keselamatan minyak solar meliputi keselamatan didalam pengangkutan, penyimpanan, dan penggunaan. Minyak solar harus memiliki salah satu sifat keselamatan yaitu bahwa minyak solar tidak akan terbakar akibat terjadi loncatan api.

Sifat Keselamatan minyak solar sesuai spesifikasinya ditunjukkan pada pengujian:

- a. *Flash point*, ASTM D 93

7. Sifat Kemudahan Mengalir

Sifat kemudahan mengalir minyak solar dinyatakan sebagai viskositas dinamik dan viskositas kinetik. Viskositas dinamik adalah ukuran tahanan untuk mengalir dari suatu zat cair untuk mengalir disebabkan gaya berat. Bahan yang mempunyai viskositas menunjukkan bahwa bahan itu mudah mengalir, sebaliknya bahan dengan viskositas tinggi sulit mengalir. Produk minyak bumi yang viskositasnya tinggi berarti minyak itu mengandung

hidrokarbon berat, sebaliknya jika viskositas rendah maka minyak itu mengandung hidrokarbon ringan.

Viskositas minyak solar erat kaitannya dengan kemudahan mengalir pada pemompaan, kemudahan menguap untuk pengkabutan dan mampu melumasi *fuel pump plungers*. Penggunaan bahan bakar yang mempunyai viskositas rendah dapat menyebabkan keausan pada pompa bahan bakar. Apabila bahan bakar mempunyai viskositas tinggi, berarti tidak mudah mengalir sehingga kerja pompa dan kerja injektor menjadi berat.

Sifat kemudahan mengalir minyak solar sesuai spesifikasinya ditunjukkan pada pengujian:

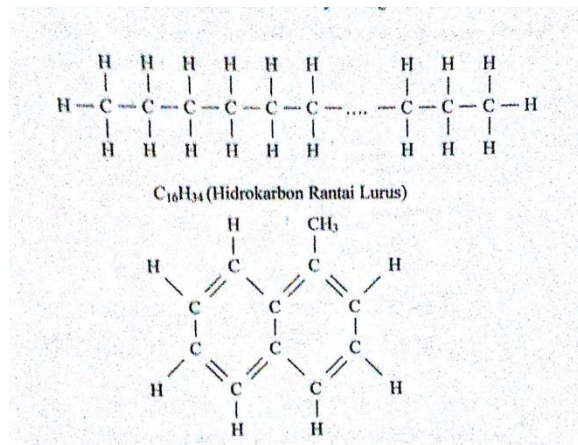
- a. Viskositas kinetik, ASTM D 445
- b. *Pour point*, ASTM D 97

Tabel 2.1 Hasil Pengujian Bahan Bakar Motor Diesel

NO	Jenis Pemeriksaan	Hasil Pemeriksaan Sample dengan Kode		Metode Pemeriksaan
		B0	B5	
1	Viscosity kinematic at 100 °F ,cst	3,694	4,442	ASTM D 1298
2	Flash point P.M,c.c.,°F	144	101	ASTM D 445
3	Specific gravity at 60	0,8478	0,8547	ASTM D 93
4	Calori value,BTU / lb	19603	19559	
5	Catana number	51,4		

(Sumber : Laporan Tugas Akhir Pengaruh Temperatur Bahan Bakar Solar dan Biosolar Terhadap Performa Mesin Diesel Dong Feng 20 PK, 2008)

2.6.2 Rumus Senyawa Solar



Gambar 2.5 $C_{16}H_{34}$ (Hidrokarbon Rantai Lurus) dan α -Methilnaphthalene

2.6.3 Syarat-syarat Bahan Bakar Solar

Kualitas solar memerlukan syarat sebagai berikut:

1. Mudah terbakar

Waktu tertundanya pembakaran harus pendek/singkat sehingga mesin mudah dihidupkan. Solar harus dapat memungkinkan mesin bekerja lembut dengan sedikit *knocking*.

2. Tetap encer pada suhu dingin (tidak mudah membeku)

Solar harus tetap cair pada temperatur rendah sehingga mesin akan mudah dihidupkan dan berputar lembut.

3. Daya Pelumasan

Solar juga berfungsi sebagai pelumas untuk pompa injeksi dan *nozzel*, oleh karena itu harus mempunyai sifat daya pelumas yang baik.

4. Kekentalan

Solar harus mempunyai kekentalan yang memadai sehingga dapat disemprotkan oleh injektor.

5. Kandungan Sulfur

Sulfur merusak pemakaian komponen *engine*, dan kandungan sulfur solar harus sekecil mungkin.

6. Stabil

Tidak mudah larut selama disimpan.

2.7 Konsumsi bahan bakar

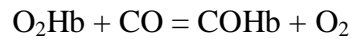
Konsumsi bahan bakar adalah ukuran banyak sedikitnya bahan bakar yang digunakan suatu mesin untuk diubah menjadi panas pembakaran dalam jangka waktu tertentu. Campuran bahan bakar yang dihisap masuk ke dalam silinder akan mempengaruhi tenaga yang dihasilkan, karena jumlah bahan bakar akan menentukan besar panas dan tekanan akhir pembakaran yang digunakan untuk mendorong torak dari TMA ke TMB pada saat langkah usaha (Soenarta, 1985 : 20). Menurut (Sutomo, Murni, Rahmat, 2011) Semakin tinggi temperatur pemanasan bahan bakar maka viskositas dan densitas bahan bakar akan semakin menurun yang akan memudahkan proses terjadinya pembakaran yang lebih sempurna.

2.8 Karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida (CO) adalah gas yang berasal dari sisa pembakaran bahan bakar yang tidak sempurna dengan proses kerja pembakarannya menggunakan tekanan tinggi seperti yang terjadi di dalam mesin (*internal combustion engine*). Karbon monoksida tidak berwarna dan tidak berbau. Asap dari Kendaraan bermotor menyumbang 80% karbon monoksida dan proses artifisial membantu diproduksinya karbon monoksida tersebut. Secara alamiah CO diproduksi oleh

suatu makhluk laut yang bernama Hydrozoa (*siphonophores*) dan juga oleh reaksi-reaksi kimia yang terjadi di dalam atmosfer.

Efek CO terhadap kesehatan adalah dapat menggeser oksigen yang terikat pada hemoglobin (Hb) dan mengikat Hb menjadi karboksi-hemoglobin (COHb) seperti pada reaksi berikut ini :



Afinitas CO terhadap Hb = 210 x daripada afinitas O₂ terhadap Hb. Reaksi ini mengakibatkan berkurangnya O₂ dalam darah untuk disalurkan ke jaringan-jaringan tubuh. Kadar COHb akan bertambah dengan meningkatnya kadar CO dalam atmosfer. Sebagai contoh, pada konsentrasi CO sebesar 10 ppm, terdapat 2% COHb dalam darah pada keadaan seimbang. Gejala pusing-pusing, kurang memperhatikan sekitarnya, kemudian terjadi kelainan fungsi susunan saraf pusat, perubahan fungsi paru-paru dan jantung, terjadi rasa sesak napas, pingsan pada 250 ppm, dan akhirnya dapat menyebabkan kematian pada 750 ppm. Kadar CO di dalam udara bebas jarang dapat mencapai kadar 100 ppm, oleh karenanya jarang menyebabkan bahaya terhadap kesehatan orang yang sehat. Karbon Monoksida dalam dosis rendah akan menimbulkan efek gangguan bagi mereka yang telah mengidap penyakit-penyakit lain. Hal ini terjadi misalnya, pada penderita penyakit paru-paru, jantung, ataupun pada perokok yang sebagian dari hemoglobinnya sudah terikat oleh CO, maka adanya CO dalam atmosfer dapat memperparah keadaan.

Umur karbon monoksida dalam udara ± 0,3 tahun. CO akan berubah menjadi CO₂ apabila tereksitasi dan bereaksi dengan O₂. Oksidasi berjalan kurang lebih 0,1% per jam apabila terdapat cukup cahaya matahari. Hasil penelitian

memperlihatkan bahwa menghilangnya CO dari atmosfer berjalan lebih cepat daripada yang dapat dijelaskan oleh proses oksidasi biasa. Hal ini, antara lain, disebabkan karena terdapat mikroorganisme dalam tanah yang dapat menghilangkannya. Berbagai jenis fungi seperti *Penicillium* dan *Aspergillus* dan mungkin pula berbagai jenis bakteri dapat menghilangkan CO dari udara. Dikatakan bahwa, kadar CO 120 ppm dapat dihilangkan dalam waktu tiga jam setelah kontak dengan tanah seberat 2,8 kg.

Tabel 2.2 Baku Mutu Kualitas Udara Ambien Nasional

No	Parameter	Waktu Pengukuran	Baku Mutu	Metode Analisis	Peralatan
1	SO ₂ (sulfur dioksida)	1 jam 24 jam 1 tahun	900 µg/Nm ³ 365 µg/Nm ³ 60 µg/Nm ³	Pararosanilin	Spektrofotometer
2	CO (karbon monoksida)	1 jam 24 jam 1 tahun	30.000 µg/Nm ³ 10.000 µg/Nm ³	NIDR	NIDR Analyzer
3	NO ₂ (nitrogen oksida)	1 jam 24 jam 1 tahun	400 µg/Nm ³ 150 µg/Nm ³ 100 µg/Nm ³	Saltzman	Spektrofotometer
4	O ₃ (oksidan)	1 jam 1 tahun	235 µg/Nm ³ 50 µg/Nm ³	Chemiluminescent	Spektrofotometer
5	HC (hidro karbon)	3 jam	160 µg/Nm ³	Flame Ionization	Gas Kromatografi
6	PM ₁₀ (partikel <10 mium) PM _{2,5} (partikel <2,5 mium)	24 jam 24 jam 1 tahun	150 µg/Nm ³ 65 µg/Nm ³ 15 µg/Nm ³	Gravimetrik	Hi-vol
7	TSP (debu)	24 jam 1 tahun	230 µg/Nm ³ 90 µg/Nm ³	Gravimetrik	Hi-vol
8	Pb (timbal hitam)	24 jam 1 tahun	2 µg/Nm ³ 1 µg/Nm ³	Gravimetrik Ekstraktif Pengabuan	Hi-vol AAS
9	Dustfall (debu jatuh)	30 hari	10 ton/km ³ /bulan (pemukiman) 20 ton/km ³ /bulan (industri)	Gravimetrik	Cannister
10	Total Fluorides (as F)	24 jam 90 hari	3 µg/Nm ³ 0,5 µg/Nm ³	Specific Ion Electrode	Impinger Atau Continuos Analyzer
11	Fluor Indeks	30 hari	40/100 cm ² dari kertas lined filter	Colourimetric	Limed Filter Paper
12	Khlorin & Khlorin Dioksida	24 jam	150 µg/Nm ³	Specific Ion Electrode	Impinger Atau Continuos Analyzer
13	Sulfat Indeks	30 hari	1 mg SO ₃ /100 cm ³ dari lead perioksida	Colourimetric	Lead Peroxide Candle

Sumber : Lampiran Peraturan Pemerintah RI No. 41 tahun 1999, 26 Mei 1999

2.9 Metode Perhitungan

2.9.1 Data Pengukuran :

$$\text{Diameter Torak (D)} = 95 \text{ mm} = 9,5 \text{ cm}$$

$$\text{Panjang langkah (L)} = 115 \text{ mm} = 11,5 \text{ cm}$$

$$\text{Tekanan Akhir Kompresi (Pc)} = 1900 \text{ Kpa} = 19 \text{ kg/cm}^2$$

Perbandingan Kompresi (ϵ) = 20 :1

untuk perhitungan digunakan = 20

2.9.2 Data – data Teoritis

- Temperatur udara luar (T_o)

Untuk perhitungan ini temperatur udara sekitar, diambil :

$$T_o = 30 \text{ }^\circ\text{C} = 303 \text{ }^\circ\text{K}$$

- Tekanan udara luar (P_o)

Untuk perhitungan ini diambil $P_o = 1 \text{ atm, abs} = 1,033 \text{ kg/cm}^2$

- Tekanan gas pada awal kompresi (P_a)

Harga P_a (tekanan udara di akhir langkah isap untuk motor 4 langkah

berkisar antara 0,85 – 0,92 atm, abs). P_o

Untuk perhitungan ini diambil $P_a = 0,92 \text{ atm}$ ¹

- Kenaikan harga temperatur udara di dalam silinder akibat suhu dinding silinder (Δt_w)

Harga Δt_w berkisar antara 10°K – 20°K

Untuk perhitungan diambil $\Delta t_w = 20^\circ\text{K}$ ²

- Koefisien dari gas buang (γ_r)

γ_r untuk mesin 4 langkah berkisar antara (0,03 – 0,04) .

Untuk perhitungan diambil $\gamma_r = 0,04$ ³

- Temperatur gas buang (T_r)

Mesin diesel T_r berkisar antara (700 °K – 800 °K)

Untuk perhitungan diambil $T_r = 800 \text{ }^\circ\text{K}$ ⁴

¹ Petrovsky.N, Marine Internal Combustion Engines, Mir Publishers. Moscow, Hal 27

² Ibid, Hal 81

³ Ibid, Hal 29

⁴ Petrovsky.N, Marine Internal Combustion Engines, Mir Publishers. Moscow , Hal 32

- Koefisien kelebihan udara (α)
Mesin Diesel $\alpha = (1,3 - 1,7)$
Untuk perhitungan ini diambil $\alpha = 1,7$ ⁵
- Faktor koreksi dari diagram (ϕ)
Mesin 4 langkah ϕ besarnya $(0,95 - 0,97)$
Dalam perhitungan diambil $\phi = 0,97$ ⁶
- Efisiensi mekanis (η_m)
Mesin Diesel 4 langkah $\eta_m = (0,8 - 0,88)$
Untuk perhitungan diambil $\eta_m = 0,87$ ⁷
- Koefisien penggunaan panas hasil pembakaran (ξ_z)
Motor Diesel $\xi_z = (0,65 - 0,85)$
Untuk perhitungan diambil : $\xi_z = 0,85$ ⁸
- Eksponen politropis ekspansi (n_2)
Nilai n_2 berkisar antara $(1,15 - 1,3)$
Untuk perhitungan diambil $n_2 = 1,3$ ⁹

2.9.3 Perhitungan

1. Volume langkah

Volume langkah adalah besarnya volume silinder yang ditempuh oleh torak selama melakukan langkah kerja (dari TMA sampai TMB).

$$\begin{aligned}
 \mathbf{VL} &= \frac{\pi}{4} \cdot \mathbf{D}^2 \cdot \mathbf{L} \\
 &= 0,785 \cdot 9,5^2 \cdot 11,5 \\
 &= 814,73 \text{ cm}^2
 \end{aligned}$$

⁵ Petrovsky.N, Marine Internal Combustion Engines, Mir Publishers. Moscow, Hal 38

⁶ Petrovsky.N, Marine Internal Combustion Engines, Mir Publishers. Moscow, Hal 55

⁷ Ibid, Hal 61

⁸ Ibid, Hal 44

⁹ Ibid, Hal 52

$$P_a = 0,92 \cdot P_o = 0,92 \cdot 1,033 = 0,95 \text{ Kg/Cm}^2$$

2. Eksponen politropis kompresi

$$P_c = P_a \cdot \epsilon^{n_1}$$

$$19 = 0,95 \cdot 20^{n_1}$$

$$\text{Log } 19 = \text{Log } 0,95 \cdot 20^{n_1}$$

$$n_1 = \frac{\text{Log } 19}{\text{Log } 19}$$

$$n_1 = \frac{1,27}{1,27}$$

$$n_1 = 1,00$$

Diketahui :

$$T_o = 30^{\circ}\text{C} = 303^{\circ}\text{K} \quad \gamma_r = 0,04$$

$$\Delta t_w = 20^{\circ}\text{K} \quad T_r = 800 \text{ K}$$

3. Temperatur awal kompresi

Adalah temperatur udara yang berada di dalam silinder saat torak mulai melakukan langkah kompresi.

$$T_a = \frac{T_o + \Delta t_w + \gamma_r \cdot T_r}{1 + \gamma_r}$$

$$T_a = \frac{303 + 20 + 0,04 \cdot 800}{1 + 0,04}$$

$$T_a = \frac{355}{1,04}$$

$$T_a = 341,35^{\circ}\text{K}$$

4. Temperatur akhir kompresi

Adalah temperatur udara sebelum pembakaran (pada akhir langkah kompresi)

$$\begin{aligned}
 T_c &= T_a \cdot \varepsilon^{(n1-1)} \\
 &= 341,35 \cdot 20^{-0,00013} \\
 &= 341,35 \cdot 0,99 \\
 &= 341,21 \text{ } ^0\text{K}
 \end{aligned}$$

5. Efisiensi pemasukan

Adalah perbandingan yang menunjukkan kemampuan silinder dalam menghisap udara.

$$\begin{aligned}
 \eta_{ch} &= \frac{\varepsilon \cdot P_a \cdot 1}{(\varepsilon - 1) \cdot P_o \cdot \frac{T_a}{T_o} (1 + \gamma r)} \\
 &= \frac{20 \cdot 0,95 \cdot 1}{(20 - 1) \cdot 1,033 \cdot \frac{341,35}{303} \cdot (1 + 0,04)} \\
 &= \frac{19}{22,99} \\
 &= 0,82 \\
 &= 83 \%
 \end{aligned}$$

6. Nilai kalor pembakaran bahan bakar (Q_1)

Adalah jumlah panas yang mampu dihasilkan dalam pembakaran 1 kg bahan bakar. Pada mesin diesel digunakan bahan bakar solar ($C_{16}H_{34}$). Solar memiliki komposisi sebagai berikut :

$$C = 85,5 \%, H = 14,5 \%, O = 0 \%$$

Menurut persamaan Dulong mempunyai nilai pembakaran (Q_1) sebesar :

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= 81 C + 200 (H - O/8) \\
 &= 81 \cdot 85,5 + 200 (14,5 - 0/8) \\
 &= 9825,5 \text{ Kkal/kg}
 \end{aligned}$$

Solar mempunyai nilai pembakaran 9.700 – 10.700 Kkal/kg. Jadi komposisi tersebut dapat dipakai.

7. Kebutuhan udara teoritis (L_o')

Dengan jumlah oksigen di dalam atmosfer 21 %, banyaknya udara teoritis yang dibutuhkan untuk pembakaran sempurna 1 kg dari bahan bakar adalah :

$$\begin{aligned} L_o' &= \frac{1}{0,21} \left[\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{O}{32} \right] \\ &= \frac{1}{0,21} \left[\frac{0,855}{12} + \frac{0,145}{4} + \frac{0}{32} \right] \\ &= 4,76 \cdot 0,102 \\ &= 0,487 \text{ mol} \end{aligned}$$

8. Koefisien kimia dari perubahan molar selama pembakaran (μ_o)

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

$$\mu_o = \frac{Mg}{L'} = \frac{Mg}{\alpha \cdot L_o'}$$

$$MG = MCO_2 + MH_2O + MO_2 + MN_2$$

- $MCO_2 = \frac{C}{12} = \frac{0,855}{12} = 0,07$
- $MH_2O = \frac{H}{2} = \frac{0,145}{2} = 0,07$
- $MO_2 = 0,21 \cdot (\alpha - 1) = 0,21 \cdot (1,7 - 1) = 0,147$
- $MN_2 = 0,79 \cdot (\alpha - 1) = 0,79 \cdot (1,7 - 1) = 0,553$

$$MG = MCO_2 + MHO_2 + MO_2 + MN_2$$

$$= 0,07 + 0,07 + 0,147 + 0,553$$

$$= 0,84 \text{ mol}$$

$$\begin{aligned}\mu_o &= \frac{0,84}{1,7,0,487} \\ &= 1,01\end{aligned}$$

9. Koefisien dari perubahan molar (μ)

Adalah perubahan jumlah sebenarnya dari mol gas setelah pembakaran.

$$\begin{aligned}\mu &= \frac{\mu_o + \gamma r}{1 + \gamma r} \\ &= \frac{1,01 + 0,04}{1 + 0,04} \\ &= \frac{1,05}{1,04} \\ &= 1,01\end{aligned}$$

10. Temperatur gas pada akhir pembakaran (T_z)

Adalah temperatur gas hasil pembakaran campuran udara dan bahan bakar untuk motor diesel yang memiliki siklus volume tetap T_z dapat dicari dengan rumus :

$$\frac{\xi z \cdot Q_l}{\alpha \cdot L_o' (1 + \gamma r)} + [(Mcv)_{max} + 1985 \lambda] TC = \mu (Mcp)_{gas} \cdot T_z$$

Keterangan :

$(Mcv)_{max}$: Kapasitas panas molar isokhorik rata – rata dari udara yang bercampur dengan gas bekas dari $0^\circ K$ sampai $T_c^\circ K$

$$: 4,62 + 53 \cdot 10^{-5} T_c$$

$(Mcp)_g$: Kapasitas panas molar isokhorik rata – rata dari hasil pembakaran dari $0^\circ K$ sampai $T_z^\circ K$

$$: V_{CO_2} (Mcv)_{CO_2} + V_{H_2O} (Mcv)_{H_2O} + V_{N_2} (Mcv)_{N_2} + V_{O_2} (Mcv)_{O_2}$$

Isi volumetrik relatif dari unsur pokok dalam hasil pembakaran.

Menurut N.M Glagolev (kapasitas panas molar isokhorik rata-rata dari hasil pembakaran dari 0°K sampai $T_z^\circ \text{K}$).

$$(\text{Mcv}) \text{CO}_2 = 7,82 + (125 \cdot 10^{-5}) \cdot T_z$$

$$(\text{Mcv}) \text{H}_2\text{O} = 5,79 + (112 \cdot 10^{-5}) \cdot T_z$$

$$(\text{Mcv}) \text{O}_2 = 4,62 + (53 \cdot 10^{-5}) \cdot T_z$$

$$(\text{Mcv}) \text{N}_2 = 4,62 + (112 \cdot 10^{-5}) \cdot T_z$$

Volume relatif gas hasil pembakaran :

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{gas}}} = \frac{0,072}{0,53} = 0,136$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{gas}}} = \frac{0,063}{0,53} = 0,104$$

$$V_{\text{O}_2} = \frac{M_{\text{O}_2}}{M_{\text{gas}}} = \frac{0,11}{0,53} = 0,021$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{M_{\text{N}_2}}{M_{\text{gas}}} = \frac{0,38}{0,53} = 0,740$$

$$\begin{aligned} A_{\text{gas}} &= V_{\text{CO}_2} \cdot A_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot A_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{O}_2} \cdot A_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2} \cdot A_{\text{N}_2} \\ &= (0,136 \cdot 7,82) + (0,104 \cdot 5,79) + (0,021 \cdot 4,62) + (0,740 \cdot 4,62) \\ &= 5,182 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{\text{gas}} &= V_{\text{CO}_2} \cdot B_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot B_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{O}_2} \cdot B_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2} \cdot B_{\text{N}_2} \\ &= (0,136 \cdot 125) + (0,104 \cdot 114) + (0,021 \cdot 53) + (0,740 \cdot 53) \cdot 10^{-5} \cdot T_z \\ &= 68,981 \cdot 10^{-5} \cdot T_z \end{aligned}$$

$$(\text{Mcv}) = 5,182 + 68,981 \cdot 10^{-5} \cdot T_z$$

Jadi,

$$\begin{aligned}(\text{Mcp})_{\text{gas}} &= 5,182 + 68,981 \cdot 10^{-5} \cdot Tz + 1,985 \\ &= \mathbf{7,167 + 68,981 \cdot 10^{-5} \cdot Tz}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(\text{Mcv})_{\text{max}} &= 3,62 + 53 \cdot 10^{-5} \cdot Tc \\ &= 3,62 + 53 \cdot 10^{-5} \cdot 288,4 \\ &= 3,62 + 0,12 \\ &= \mathbf{3,74}\end{aligned}$$

Jadi,

$$\mu \cdot (\text{Mcp})_{\text{gas}} \cdot Tz = \frac{\delta_z \cdot Q_1}{\alpha \cdot Lo'(1 + yr)} + [(\text{Mcv})_{\text{max}} + 1,985] TC$$

$$1,01 \cdot (7,167 + 69,67 \cdot 10^{-5} \cdot Tz) Tz = \frac{0,85 \cdot 9825,5}{1,7 \cdot 0,487(1 + 0,04)} + [3,74 + 1,985] \cdot 341,21$$

$$7,23 Tz + 0,000696 Tz^2 = 9699,79 + 1953,47$$

$$7,23 Tz + 69,67 \cdot 10^{-5} Tz^2 - 11653,26 = 0$$

Diambil harga Tz yang positif

$$\begin{aligned}Tz &= \frac{-B \pm (b^2 - 4ac)^{0,5}}{2a} \\ &= \frac{-7,23 \pm (7,23^2 - 4 \cdot 69,67 \cdot 10^{-5} \cdot (-11653,26))^{0,5}}{2 \cdot 0,000696} \\ &= \frac{-7,23 \pm \sqrt{84,74}}{0,0013} \\ &= \frac{-7,23 \pm 9,21}{0,0013} \\ &= \frac{-7,23 + 9,25}{0,0013} = 1519,91 \text{ } ^0K\end{aligned}$$

11. Tekanan akhir pembakaran (P_z)

$$\begin{aligned} P_z &= P_c \cdot \mu \cdot \frac{T_z}{T_c} \\ &= 19 \cdot 1,01 \cdot \frac{1519,91}{341,21} \\ &= 85,82 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

12. Perbandingan tekanan di dalam silinder selama pembakaran (λ)

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{P_z}{P_c} \\ &= \frac{85,82}{19} \\ &= 4,52 \end{aligned}$$

13. Perbandingan ekspansi (ρ)

Rasio yang menunjukkan perubahan yang terjadi pada gas hasil

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{\mu \cdot T_z}{\lambda \cdot T_c} \\ &= \frac{1,01 \cdot 1519,91}{4,52 \cdot 341,21} \\ &= 1 \end{aligned}$$

14. Perbandingan ekspansi selanjutnya (δ)

Adalah ratio yang menunjukkan perubahan pada gas hasil pembakaran selama langkah ekspansi.

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\varepsilon}{\rho} \\ &= \frac{20}{1} \\ &= 20 \end{aligned}$$

15. Tekanan gas pada akhir ekspansi (P_b)

$$\begin{aligned} P_b &= \frac{P_z}{\delta^{n2}} \\ &= \frac{85,82}{20^{1,3}} \\ &= 1,75 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

16. Temperatur gas pada akhir ekspansi (T_b)

$$\begin{aligned} T_b &= \frac{T_z}{\delta^{n1-1}} \\ &= \frac{1519,91}{20^{-0,000013-1}} \\ &= 1520,49 \text{ } ^0\text{K} \end{aligned}$$

17. Tekanan indikator rata-rata teoritis (P_{it})

Adalah besar tekanan rata-rata yang dihasilkan oleh pembakaran campuran udara dan bahan bakar yang bekerja pada torak sesuai perhitungan :

$$\begin{aligned} P_{it} &= \frac{P_c}{\varepsilon - 1} \left[\lambda \left(1 - \frac{1}{\delta^{n2-1}} \right) \frac{1}{n2-1} - \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n1-1}} \right) \frac{1}{n1-1} \right] \\ &= \frac{19}{20-1} \left[4,52 \cdot \left(1 - \frac{1}{20^{1,3-1}} \right) \frac{1}{1,3-1} - \left(1 - \frac{1}{20^{-0,99987-1}} \right) \frac{1}{-0,99987-1} \right] \\ &= 1 \cdot 5,93 \\ &= 5,93 \text{ Kg/cm}^2 \end{aligned}$$

18. Tekanan indikator rata-rata (P_i)

Adalah besarnya tekanan rata-rata yang dihasilkan oleh pembakaran campuran udara dan bahan bakar.

$$\begin{aligned} P_i &= \phi \cdot P_{it} \\ &= 0,97 \cdot 5,93 = 5,75 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

19. Tekanan efektif rata-rata (P_e)

$$\begin{aligned} P_e &= \eta_m \cdot P_i \\ &= 0,87 \cdot 5,75 \\ &= 5,01 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

2.9.4 Perhitungan putaran tinggi

a. Daya indikator (N_i)

Daya indikator adalah daya motor yang bersifat teoritis, yang belum dipengaruhi oleh kerugian-kerugian dalam mesin. Diketahui putaran motor menurut spesifikasi sebesar 2000 rpm

$$N_i = P_i \cdot VL \cdot z \cdot n \cdot a \cdot \frac{1}{450000}$$

Keterangan :

N_i = Daya indikator (PS)

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

VL = Volume Langkah (cm^3)

n = Putaran poros engkol = 2200 rpm

z = Jumlah silinder 1

a = Jumlah putaran poros engkol tiap siklus, untuk motor 4 langkah = 0,5

1 PS = 0,736 kWh

$$\begin{aligned} N_i &= P_i \cdot VL \cdot Z \cdot n \cdot a \cdot \frac{1}{450000} \\ &= 5,75 \cdot 814,73 \cdot 1 \cdot 2200 \cdot 0,5 \cdot \frac{1}{450000} \\ &= \mathbf{11,23 \text{ HP}} \end{aligned}$$

b. Daya Efektif (N_e)

$$\begin{aligned} N_e &= N_i \cdot \eta_m \\ &= 11,23 \cdot 0,87 = \mathbf{9,77 \text{ HP}} = \mathbf{7,19 \text{ kWh}} \end{aligned}$$

2.9.5 Pemakaian konsumsi bahan bakar

Pemakaian konsumsi bahan bakar dapat dihitung berdasarkan volume bahan bakar dengan waktu pemakaian.

$$\begin{aligned}
 B &= v \cdot \frac{\rho}{t} \cdot 3600 \\
 &= \dots \text{gr/h}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

dimana :

B = Pemakaian konsumsi bahan bakar per jam (gr/h)

v = Volume bahan bakar yang digunakan (ml)

t = Waktu pemakaian bahan bakar (s)

ρ = Berat jenis bahan bakar (gr/cm³)

2.9.6 Penggunaan bahan bakar

Penggunaan bahan bakar dapat diartikan banyaknya bahan bakar yang dibutuhkan untuk setiap satu-satuan daya yang dihasilkan.

$$\begin{aligned}
 be &= \frac{B}{Ni} \\
 &= \dots \text{gr/kWh}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

dimana :

be = Penggunaan bahan bakar (gr/kWh)

Ne = Daya motor (kWh)

B = pemakaian konsumsi bahan bakar (g/h)

¹⁰Nakoela Soenarta, Motor Serba Guna, Hal 19

¹¹Ibid, Hal 19

2.9.7 Efisiensi Energi (η_c)

Efisiensi bahan bakar untuk 1 kWh dalam satu jam

$$\eta_c = \frac{623,5}{be \times h} \times 10^3$$

$$= \dots \quad (12)$$

dimana :

η_c = Efisiensi bahan bakar

be = Penggunaan bahan bakar (gr/kWh)

H = Nilai kalori bahan bakar (kcal/ltr)

¹²Ibid, Hal 19

