

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Pengertian Umum Mesin Bensin

Motor bakar adalah jenis mesin kalor yang termasuk Mesin Pembakaran Dalam (*Internal Combustion Engine*). Internal Combustion Engine (I.C. Engine) adalah mesin kalor yang mengubah energi kimia bahan bakar menjadi kerja mekanis, yaitu dalam bentuk putaran poros. Energi kimia bahan bakar pertama diubah menjadi energi panas melalui proses pembakaran atau oksidasi dengan udara dalam mesin. Energi panas ini meningkatkan temperatur dan tekanan gas pada ruang bakar. Gas bertekanan tinggi ini kemudian berekspansi melawan mekanisme mekanik mesin. Ekspansi ini diubah oleh mekanisme link menjadi putaran crankshaft, yang merupakan output dari mesin tersebut. Crankshaft selanjutnya dihubungkan ke sistem transmisi oleh sebuah poros untuk mentransmisikan daya atau energi putaran mekanis yang selanjutnya energi ini dimanfaatkan sesuai dengan keperluan.[Ref.3]

Siklus Otto pada mesin bensin disebut juga dengan siklus volume konstan, dimana pembakaran terjadi pada saat volume konstan. Pada mesin bensin dengan siklus Otto dikenal dua jenis mesin, yaitu mesin 4 langkah (*four stroke*) dan 2 langkah (*two stroke*). Untuk mesin 4 langkah terdapat 4 kali gerakan piston atau 2 kali putaran poros engkol (*crank shaft*) untuk tiap siklus pembakaran, sedangkan untuk mesin 2 langkah terdapat 2 kali gerakan piston atau 1 kali putaran poros engkol untuk tiap siklus pembakaran. Sementara yang dimaksud langkah adalah gerakan piston dari TMA (Titik Mati Atas) atau *TDC (Top Death Center)* sampai TMB (Titik Mati Bawah) atau *BDC (Bottom Death Center)* maupun sebaliknya dari TMB ke TMA.

2.1.1 Prinsip Kerja Mesin Empat Langkah

Mesin empat langkah mempunyai empat gerakan piston yaitu [Ref.2]:

1. Langkah hisap (*suction stroke*)

Pada langkah ini bahan bakar yang telah bercampur dengan udara dihisap oleh mesin. Pada langkah ini katup hisap (*intake valve*) membuka sedang katup buang (*exhaust valve*) tertutup, sedangkan piston bergerak menuju TMB sehingga tekanan dalam

silinder lebih rendah dari tekanan atmosfer. Dengan demikian maka campuran udara dan bahan bakar akan terhisap ke dalam silinder.

2. Langkah Kompresi (*compression stroke*)

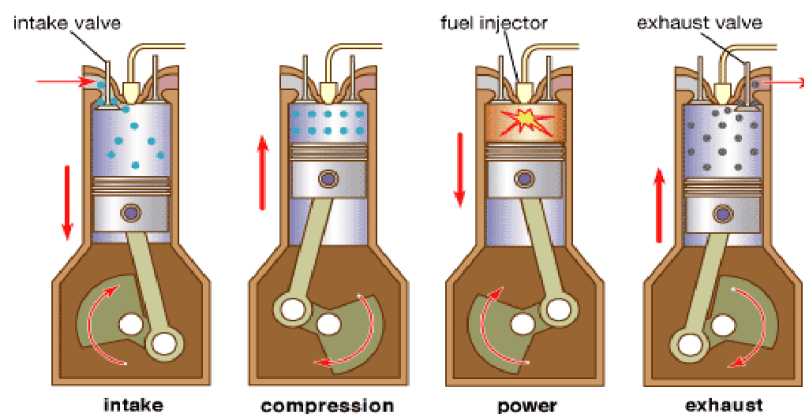
Pada langkah ini kedua katup baik *intake* maupun *exhaust* tertutup dan piston bergerak dari TMB ke TMA. Karena itulah maka campuran udara dan bahan bakar akan terkompresi, sehingga tekanan dan suhunya akan meningkat. Beberapa saat sebelum piston mencapai TMA terjadi proses penyalaan campuran udara dan bahan bakar yang telah terkompresi oleh busi (*spark plug*). Pada proses pembakaran ini terjadi perubahan energi dari energi kimia menjadi energi panas dan gerak.

3. Langkah Ekspansi (*expansion stroke*)

Karena terjadi perubahan energi dari energi kimia menjadi energi gerak dan panas menimbulkan langkah ekspansi yang menyebabkan piston bergerak dari TMA ke TMB. Gerakan piston ini akan mengakibatkan berputarnya poros engkol sehingga menghasilkan tenaga. Pada saat langkah ini kedua katup dalam kondisi tertutup.

4. Langkah Buang (*exhaust stroke*)

Pada langkah ini piston bergerak dari TMB ke TMA, sedangkan katup buang terbuka dan katup isap tertutup, sehingga gas sisa pembakaran akan terdorong keluar melalui saluran buang (*exhaust manifold*) menuju udara luar. Seperti terlihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Siklus motor bakar pada mesin 4 langkah [Ref.16]

2.2 Siklus Ideal

Proses termodinamika dan kimia yang terjadi dalam motor bakar torak sangat kompleks untuk dianalisa menurut teori. Untuk memudahkan menganalisanya perlu membayangkan suatu keadaan yang ideal. Makin ideal suatu keadaan makin mudah untuk dianalisa, akan tetapi dengan sendirinya semakin jauh menyimpang dari keadaan sebenarnya.

Pada umumnya untuk menganalisa motor bakar torak dipergunakan siklus udara sebagai siklus yang ideal. Siklus udara menggunakan beberapa keadaan yang sama dengan siklus sebenarnya dalam hal sebagai berikut [Ref.2]:

- a. Urutan proses
- b. Perbandingan kompresi
- c. Pemilihan temperatur dan tekanan pada suatu keadaan
- d. Penambahan kalor yang sama per satuan berat udara

Di dalam analisis udara, khususnya motor bakar torak akan dibahas:

1. Siklus udara volume konstan (siklus otto)
2. Siklus udara tekanan konstan (siklus diesel)
3. Siklus udara tekanan terbatas (siklus gabungan)

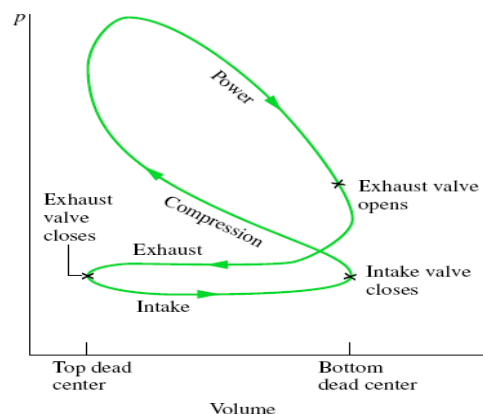
2.2.1 Siklus Aktual Motor Bensin

Siklus udara volume konstan atau siklus otto adalah proses yang ideal. Dalam kenyataannya baik siklus volume konstan, siklus tekanan konstan dan siklus gabungan tidak mungkin dilaksanakan, karena adanya beberapa hal sebagai berikut [Ref.2]:

1. Fluida kerja bukanlah udara yang bisa dianggap sebagai gas ideal, karena fluida kerja di sini adalah campuran bahan bakar (premium) dan udara, sehingga tentu saja sifatnya pun berbeda dengan sifat gas ideal.
2. Kebocoran fluida kerja pada katup (valve), baik katup masuk maupun katup buang, juga kebocoran pada piston dan dinding silinder, yang menyebabkan tidak optimalnya proses.
3. Baik katup masuk maupun katup buang tidak dibuka dan ditutup tepat pada saat piston berada pada posisi TMA dan atau TMB, karena pertimbangan dinamika mekanisme katup dan kelembaman fluida kerja. Kerugian ini

dapat diperkecil bila saat pembukaan dan penutupan katup disesuaikan dengan besarnya beban dan kecepatan torak.

4. Pada motor bakar torak yang sebenarnya, saat torak berada di TMA tidak terdapat proses pemasukan kalor seperti pada siklus udara. Kenaikan tekanan dan temperatur fluida kerja disebabkan oleh proses pembakaran campuran udara dan bahan bakar dalam silinder.
5. Proses pembakaran memerlukan waktu untuk perambatan nyala apinya, akibatnya proses pembakaran berlangsung pada kondisi volume ruang yang berubah-ubah sesuai gerakan piston. Dengan demikian proses pembakaran harus dimulai beberapa derajat sudut engkol sebelum torak mencapai TMA dan berakhir beberapa derajat sudut engkol sesudah TMA menuju TMB. Jadi proses pembakaran tidak dapat berlangsung pada volume atau tekanan yang konstan.
6. Terdapat kerugian akibat perpindahan kalor dari fluida kerja ke fluida pendingin, misalnya oli, terutama saat proses kompresi, ekspansi dan waktu gas buang meninggalkan silinder. Perpindahan kalor tersebut terjadi karena ada perbedaan temperatur antara fluida kerja dan fluida pendingin.
7. Adanya kerugian energi akibat adanya gesekan antara fluida kerja dengan dinding silinder dan mesin.
8. Terdapat kerugian energi kalor yang dibawa oleh gas buang dari dalam silinder ke atmosfer sekitarnya. Energi tersebut tidak dapat dimanfaatkan untuk kerja mekanik. Siklus aktual motor bensin ditunjukkan pada Gambar 2.2

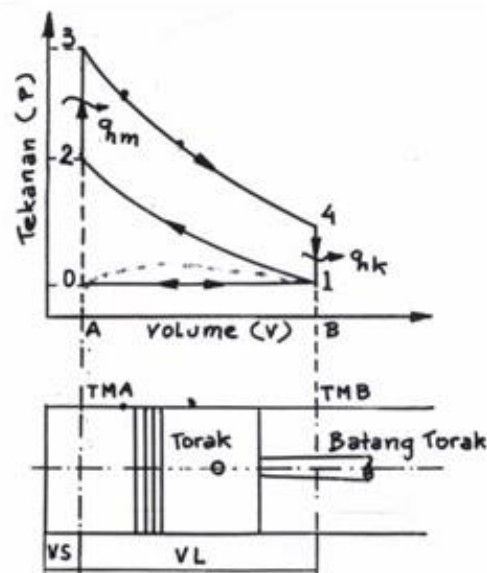


Gambar 2.2 Diagram P – V Siklus Aktual Motor Bensin. [Ref.10]

Berdasarkan kondisi seperti tersebut di atas, maka grafik tekanan (P) vs volume (V) mempunyai bentuk yang sedikit berbeda dengan grafik P-V siklus ideal.

2.2.2 Siklus Udara Volume Konstan (Siklus Otto)

Motor bensin adalah jenis motor bakar torak yang bekerja berdasarkan siklus volume konstan, karena saat pemasukan kalor (langkah pembakaran) dan pengeluaran kalor terjadi pada volume konstan. Siklus ini adalah siklus yang ideal. Seperti yang terlihat di diagram P – V Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Diagram P – V Siklus Otto (siklus Volume Konstan). [Ref.10]

Adapun siklus ini adalah sebagai berikut [Ref.2]:

1. Langkah 0 – 1 adalah langkah hisap, yang terjadi pada tekanan (P) konstan.
2. Langkah 1 – 2 adalah langkah kompresi, pada kondisi isentropik.
3. Langkah 2 – 3 adalah dianggap sebagai proses pemasukan kalor pada volume konstan.
4. Langkah 3 – 4 adalah proses ekspansi, yang terjadi secara isentropik.
5. Langkah 4 – 1 adalah langkah pengeluaran kalor pada volume konstan.
6. Langkah 1 – 0 adalah proses tekanan konstan.

2.3 Bahan Bakar

Bahan bakar pada umumnya merupakan suatu senyawa yang mengandung unsur hidrokarbon. Hampir semua jenis bahan bakar yang beredar di pasaran berasal dari minyak bumi beserta turunannya yang kemudian diolah menjadi berbagai macam dan jenis bahan bakar. Bahan itu sendiri sangat diperlukan dalam proses pembakaran yang terjadi di ruang bakar. Bahan bakar yang digunakan motor bakar harus memenuhi kriteria sifat fisik dan sifat kimia, antara lain :

- a. nilai bakar bahan bakar itu sendiri
- b. densitas energi yang tinggi
- c. tidak beracun
- d. stabilitas panas
- e. rendah polusi
- f. mudah dipakai dan disimpan

Sedangkan sifat alamiah dari bahan bakar itu sendiri:

- a. *Volatility* (Penguapan) adalah kemampuan menguap dari bahan bakar pada temperatur tertentu dalam proses destilasi.
- b. Titik nyala adalah temperatur tertentu dimana bahan bakar dapat terbakar dengan sendirinya tanpa bantuan percikan api.
- c. Gravitasi spesifik, merupakan perbandingan berat jenis bahan bakar terhadap acuan tertentu (terhadap berat jenis udara ataupun air).
- d. Nilai bakar, merupakan jumlah energi yang terkandung dalam bahan bakar.

Bahan bakar yang digunakan dalam motor bakar dapat dibedakan menurut wujudnya menjadi 3 kelompok, yaitu gas, cair, dan padat. Bahan bakar gas pada saat ini biasanya berasal dari gas alam, sedangkan bahan bakar cair berasal dari hasil penyulingan minyak bumi. Bahan bakar padat biasanya berupa batu bara. Adapun kriteria utama yang harus dipenuhi bahan bakar yang akan digunakan dalam motor bakar adalah sebagai berikut [Ref.7]:

- a. Proses pembakaran bahan bakar dalam silinder harus secepat mungkin dan panas yang dihasilkan harus tinggi.

- b. Bahan bakar yang digunakan harus tidak meninggalkan endapan atau deposit setelah proses pembakaran, karena akan menyebabkan kerusakan pada dinding silinder.
- c. Gas sisa pembakaran harus tidak berbahaya pada saat dilepaskan ke atmosfer.

2.3.1 Premium

Pada bahan bakar kita mengenal angka oktan. Bilangan oktan suatu bahan bakar diukur dengan mesin CFR (*Coordinating Fuel Research*), yaitu sebuah mesin penguji yang perbandingan kompresinya dapat diubah-ubah. Di dalam pengukuran itu ditetapkan kondisi standar operasinya (putaran, temperatur, tekanan, kelembaban udara masuk, dan sebagainya).

Untuk motor bensin ditetapkan heptana normal dan isooktana sebagai bahan bakar pembanding. Heptana normal (C_7H_{16}) adalah bahan bakar yang mudah berdetonasi di dalam motor bakar oleh karena itu dinyatakan sebagai bahan bakar dengan bilangan oktan *nol*. Iso-oktana (*2,2,4-trimethylpentane*) adalah bahan bakar hidrokarbon yang tidak mudah berdetonasi dan dinyatakan dengan bilangan oktan 100.

Bensin yang dihasilkan dari penyulingan minyak bumi, terkadang kurang memuaskan secara mutu untuk penggunaan pada motor bakar. Biasanya sebelum digunakan, bensin ditambah dengan suatu aditif yang dapat memperbaiki kualitas dari bensin itu sendiri. Aditif tersebut antara lain adalah *TEL* (*Tetra Ethyl Lead* / $(C_2H_5)_4Pb$) atau *TML* (*Tetra Methyl Lead* / $(CH_3)_4Pb$). Aditif ini berfungsi sebagai zat anti knocking karena dengan penambahan zat ini pada bahan bakar bensin dapat meningkatkan angka oktan sehingga ketika dikompresikan dalam ruang ruang bakar tidak menimbulkan knocking atau detonasi. Angka oktan bensin semula berkisar antara 75 sampai 85, sedangkan setelah penambahan zat aditif ini angka oktan bensin dapat meningkat menjadi 90 sampai 95. TEL mempunyai sifat larut dalam bensin dan mendidih pada temperatur $200^0 C$, serta mempunyai berat sekitar 1,7 kg/liter. Kandungan utama dari TEL adalah timbal dimana timbal merupakan partikel berat yang sangat berbahaya bagi umat manusia.

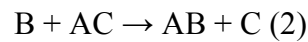
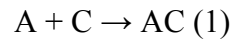
Bahan bakar bensin adalah senyawa hidrokarbon yang kandungan oktana atau isooktananya tinggi. Senyawa oktana adalah senyawa hidrokarbon yang digunakan sebagai patokan untuk menentukan kualitas bahan bakar bensin yang dikenal dengan istilah angka oktana. Dalam pengertian ini bahan bakar bensin dibandingkan dengan campuran isooktana atau 2,3,4 trimetilpentana dengan heptana. Isooktana dianggap sebagai bahan bakar paling baik karena hanya pada kompresi tinggi saja isooktana memberikan bunyi ketukan (detonasi) pada mesin. Sebaliknya, heptana dianggap sebagai bahan bakar paling buruk. Angka oktana 100, artinya bahan bakar bensin tersebut setara dengan isooktana murni. Angka oktana 80, artinya bensin tersebut merupakan campuran 80% isooktana dan 20% heptana.[Ref.11]

2.4 Katalis

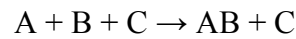
Katalis adalah suatu zat yang mempercepat laju reaksi pada suhu tertentu, tanpa mengalami perubahan atau terpakai oleh reaksi itu sendiri. Suatu katalis berperan dalam reaksi tapi bukan sebagai pereaksi ataupun produk. Katalis memungkinkan reaksi berlangsung lebih cepat atau memungkinkan reaksi pada suhu lebih rendah akibat perubahan yang dipicunya terhadap pereaksi. Katalis menyediakan suatu jalur pilihan dengan energi aktivasi yang lebih rendah. Katalis mengurangi energi yang dibutuhkan untuk berlangsungnya reaksi [Ref.9]

Katalis dapat dibedakan ke dalam dua golongan utama: katalis homogen dan katalis heterogen. Katalis heterogen adalah katalis yang ada dalam fase berbeda dengan pereaksi dalam reaksi yang dikatalisinya, sedangkan katalis homogen berada dalam fase yang sama. Satu contoh sederhana untuk katalisis heterogen yaitu bahwa katalis menyediakan suatu permukaan di mana pereaksi-pereaksi atau substrat untuk sementara terjerap. Ikatan dalam substrat-substrat menjadi lemah sedemikian sehingga memadai terbentuknya produk baru. Ikatan antara produk dan katalis lebih lemah, sehingga akhirnya terlepas.

Katalis homogen umumnya bereaksi dengan satu atau lebih pereaksi untuk membentuk suatu perantara kimia yang selanjutnya bereaksi membentuk produk akhir reaksi, dalam suatu proses yang memulihkan katalisnya. Berikut ini merupakan skema umum reaksi katalitik, di mana C melambangkan katalisnya:

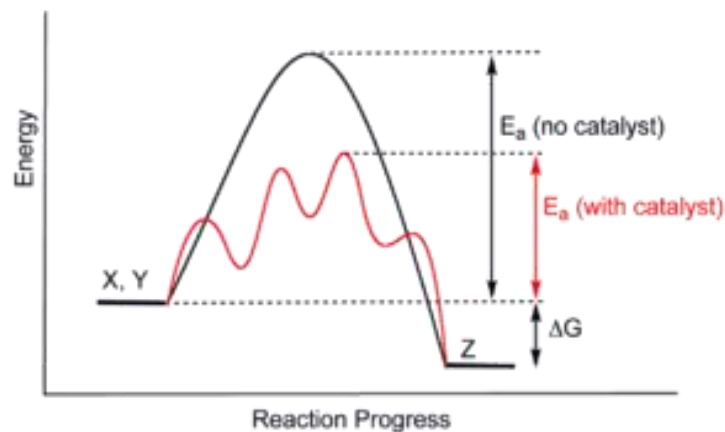


Meskipun katalis (C) termakan oleh reaksi 1, namun selanjutnya dihasilkan kembali oleh reaksi 2, sehingga untuk reaksi keseluruhannya menjadi,



2.4.1 Tipe – Tipe Katalis

Ada dua macam katalis, yaitu katalis positif (katalisator) yang berfungsi mempercepat reaksi, dan katalis negatif (inhibitor) yang berfungsi memperlambat laju reaksi. Katalis positif berperan menurunkan energi pengaktifan, dan membuat orientasi molekul sesuai untuk terjadinya tumbukan. Energi pengaktifan reaksi suatu zat tanpa dan dengan katalis ditunjukkan dalam Gambar 2.4.

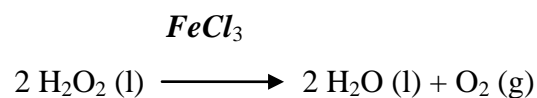


Gambar 2.4 Grafik Pengaruh Penggunaan Katalis terhadap Energi Pengaktifan Reaksi [Ref.15].

Katalisator dibedakan menjadi dua, yaitu katalisator homogen dan katalisator heterogen :

a. Katalisator homogen

Katalisator homogen adalah katalisator yang mempunyai fasa sama dengan zat yang dikatalisis. Contohnya adalah besi (III) klorida pada reaksi penguraian hidrogen peroksida menjadi air dan gas oksigen menurut persamaan:



b. Katalisator heterogen

Katalisator heterogen adalah katalisator yang mempunyai fasa tidak sama dengan zat yang dikatalisis. Umumnya katalisator heterogen berupa zat padat. Banyak proses industri yang menggunakan katalisator heterogen, sehingga proses dapat berlangsung lebih cepat dan biayaproduksi dapat dikurangi. Banyak logam yang dapat mengikat cukup banyak molekul-molekul gas pada permukannya, misalnya Ni, Pt, Pd dan V. Gaya tarik menarik antara atom logam dengan molekul gas dapat memperlemah ikatan kovalen pada molekul gas, dan bahkan dapat memutuskan ikatan itu. Akibatnya molekul gas yang terabsorpsi pada permukaan logam ini menjadi lebih reaktif daripada molekul gas yang tidak terabsorpsi. Prinsip ini adalah kerja dari katalis heterogen, yang banyak dimanfaatkan untuk mengkatalisis reaksi-reaksi gas [Ref.15].

2.4.2 MPG-Caps

MPG Caps (*Mileages Per Gallon Capsule*) adalah suatu produk berbentuk kapsul yang ditujukan untuk perawatan mesin yang diproduksi oleh *Fuel Freedom International* di Amerika Serikat dan terbuat dari 100% bahan organik aktif yang tidak mengandung diluen atau filter. MPG Caps dapat digunakan untuk semua jenis bahan bakar seperti: bensin, solar, dan biodiesel. Tentunya untuk semua merek bahan bakar seperti: Pertamina, Shell, dan sebagainya.

MPG Caps berfungsi untuk meningkatkan *mileage per gallon* (kilometer per liter) kendaraan, meningkatkan umur *valve* (klep mesin) dan *spark plugs* (busi mesin), mencegah pembentukan limbah sisa-sisa pembakaran yang tidak diinginkan dalam mesin, mengurangi peningkatan karbondioksida setelah mesin bekerja. [Ref.16].



Gambar 2.5 MPG-Caps

2.4.3 Cara Kerja MPG-Caps

- a. MPG-CAPS™ terbawa masuk ke dalam ruang pembakaran bersama BBM, namun tidak bereaksi dengan BBM tersebut.
- b. Pada kondisi tekanan dan temperatur tinggi di ruang pembakaran, MPG-caps bekerja sebagai katalisator dan membuat H₂ meningkat 5%, sehingga membuat reaksi pembakaran HC dengan O₂ berlangsung lebih cepat. Artinya prosentase HC yang terbakar lebih besar dari pada sebelumnya (tanpa MPG-caps).
- c. Pada saat bersamaan, MPG-CAPS™ juga membentuk lapisan yang sangat tipis yang melapisi seluruh permukaan ruang pembakaran (cylinder, cylinder head, klep, busi, piston). Lapisan tipis ini berfungsi untuk mencegah terjadi hambatan gerakan molekul BBM, sehingga memperbanyak molekul BBM yang terbakar. Disamping itu lapisan tipis tersebut juga berfungsi sebagai isolator panas, sehingga tingginya temperatur ruang pembakaran dari "hampir sempurna" reaksi pembakaran tidak membuat naiknya temperatur komponen mesin maupun temperatur gas buang. Hal ini membuat energi panas yang dapat dirubah menjadi energi mesin semakin besar. lapisan tipis ini juga sebagai pelumas ekstra terhadap gesekan antara silinder dengan ring piston, sehingga menghambat keausan komponen tersebut serta menurunkan getaran mesin

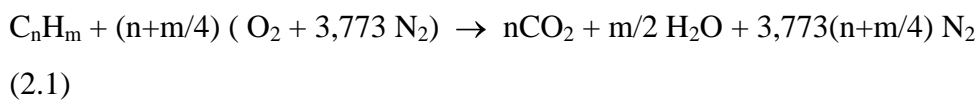
2.5 Sistem dan Proses Pembakaran

Pembakaran pada motor bakar torak adalah proses reaksi kimia antara bahan bakar dan oksigen yang terjadi dalam ruang bakar, yang menghasilkan energi kalor. Oksigen ini diperoleh dari campuran bahan bakar dengan udara yang masuk ke dalam mesin. Komposisi dari udara tersebut sebagian besar mengandung Oksigen dan Nitrogen serta sebagian kecil dari udara tersebut mengandung gas yang lain. Seperti terlihat pada Tabel 2.1 berikut:

Tabel 2.1 Komposisi Udara [Ref.7].

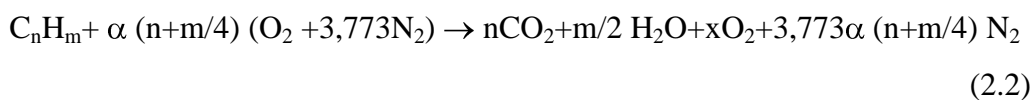
Nama	Simbol	Mol Berat	Analisa persen, %		Relatif terhadap O ₂		Mol berat per Mol Udara
			Volume	Berat	Volume	Berat	
Oksigen	O ₂	32,0	20,99	23,2	1	1	6,717
Nitrogen	N ₂	28,02	78,03				21,848
Argon	A	40,0	0,94		3,76	3,31	0,376
Karbon dioksida	CO ₂	44,0	0,03	76,8			0,013
Gas Lain	-	-	0,01				-
Total Udara	-	28,95	100,00	100,0	4,76	4,311	28,95

Bahan bakar yang lazim digunakan pada mesin sepeda motor adalah bensin (premium). Rumus kimia dari bensin adalah C_nH_m, dengan perbandingan atom hidrogen dan karbon $1.6 < H/C < 2.1$. Adapun reaksi pembakaran bahan bakar hidrokarbon secara umum adalah:



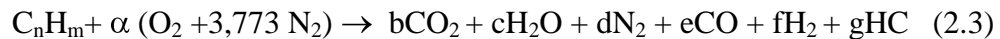
Persamaan reaksi kimia di atas menunjukkan reaksi pembakaran yang sempurna dari 1 mol bahan bakar. Selama proses pembakaran, senyawa hidrokarbon terurai menjadi senyawa-senyawa hidrogen dan karbon yang masing-masing bereaksi dengan oksigen membentuk CO₂ dan H₂O.

Pada saat proses pembakaran dimana terdapat kelebihan udara, $\alpha > 1$, gas hasil pembakaran akan mengandung O₂. maka reaksi pembakaran di atas akan berubah menjadi:



Dimana: α = koefisien kelebihan udara
 x = jumlah mol pada sisa oksigen
 $= 0,5 [2\alpha (n+m/4) - (2n + m/2)]$

Untuk komposisi campuran bahan bakar dan udara dimana $\alpha < 1$, maka akan terjadi kekurangan O_2 untuk proses pembakaran. Sehingga membuat reaksi pembakaran berlangsung tidak sempurna. Akibat kekurangan ini, akan terbentuk gas CO serta terdapat sisa gas H_2 dan hidrokarbon HC yang belum sempat terbakar. Reaksi ini dapat dinyatakan dengan persamaan reaksi sebagai berikut:



Jumlah mol dari masing-masing gas buang tersebut dapat diketahui melalui pengukuran dan analisa gas buang.

Nitrogen tidak berperan pada proses pembakaran, namun pada temperatur yang tinggi nitrogen akan bereaksi membentuk senyawa NO. setelah proses pembakaran, NO ini masih bereaksi dengan oksigen membentuk NO_2 , yang merupakan gas berbahaya bagi kesehatan.

2.5.1 Konsep Reaksi Pembakaran

Reaksi pembakaran adalah reaksi kimia bahan bakar dan oksigen yang diperoleh dari udara yang akan menghasilkan panas dan gas sisa pembakaran yang berlangsung dalam waktu yang sangat cepat. Reaksi pembakaran tersebut akan menghasilkan produk hasil pembakaran yang komposisinya tergantung dari kualitas pembakaran yang terjadi. Dalam pembakaran proses yang terjadi adalah oksidasi dengan reaksi sebagai berikut :

Karbon + Oksigen = Karbon dioksida + panas

Hidrogen + Oksigen = uap air + panas

Sulfur + oksigen + sulphur dioksida + panas

Pembakaran akan dikatakan sempurna apabila campuran bahan baker dan oksigen (dari udara) mempunyai perbandingan yang tepat (*stoichiometric*), hingga tidak diperoleh sisa. Bila oksigen terlalu banyak, dikatakan campuran kurus dan hasil pembakarannya menghasilkan api oksidasi. Sebaliknya, bila bahan bakarnya terlalu banyak (tidak cukup oksigen), dikatakan campuran kaya (*rich*) sehingga pembakaran ini menghasilkan api reduksi. Pada motor bensin, campuran udara dan bahan bakar tersebut dinyalakan dalam silinder oleh bunga api dari busi pada akhir langkah kompresi dengan suhu pembakaran berkisar antara $2100^\circ K$ sampai $2500^\circ K$. waktu pembakaran yang teratur lamanya kira-kira 3mili detik (0,003 s) [Ref.1].

Oleh karena reaksi pembakaran yang sangat cepat akan mengakibatkan terjadinya gangguan dalam system pembakaran, antara lain terjadi pembakaran sendiri (*self ignition*) oleh karena adanya sisa bahan bakar yang tidak terbakar. Hal ini disebabkan oleh hal-hal sebagai berikut :

- angka oktan yang terlalu rendah
- penyetelan sudut pengapian yang tidak tepat
- busi terlalu panas
- pendinginan terlalu miskin
- terbakarnya sisa pembakaran sebelumnya
- bentuk ruang bakar yang tidak sesuai

Gangguan-gangguan pada pembakaran ini akan sangat merugikan efektivitas mesin maka mendapatkan untuk pembakaran yang baik maka diperlukan syarat syarat sebagai berikut [Ref.1]:

- jumlah udara yang sesuai
- temperatur yang sesuai dengan penyalaan bahan bakar
- waktu pembakaran yang cukup
- kerapatan yang cukup untuk merambatkan api dalam silinder.

Reaksi pembakaran baik bahan bakar bensin maupun bahan bakar gas merupakan reaksi oksidasi antara senyawa hidrokarbon dengan oksigen sehingga dihasilkan produk berupa karbon dioksida, uap air, oksida nitrogen atau produk lainnya tergantung pada kualitas pembakaran.

2.5.2 Persamaan Reaksi Pembakaran

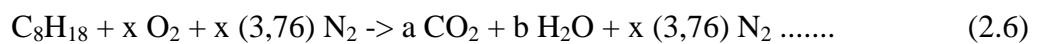
Persamaan reaksi pembakaran teoritis antara hidrokarbon dengan udara adalah sebagai berikut:



Persamaan diatas menyatakan perbandingan stokiometris dari udara-bahan bakar yang tersedia cukup oksigen untuk mengubah seluruh bahan bakar menjadi produk yang bereaksi sempurna AFR stoikometris tergantung komposisi kimia bahan bakar [Ref.5].



Bahan bakar yang digunakan pada mesin yang di uji adalah premium dan alkohol. Rumus kimia premium adalah C_8H_{18} dimana $y = m/n$. Reaksi pembakaran bahan bakar premium adalah sama dengan persamaan reaksi pembakaran teoritis antara hidrokarbon dengan udara, hal ini disebabkan karena premium merupakan senyawa dari hidrokarbon. Adapun persamaan adalah sebagai berikut :



Angka 3,76 adalah harga perbandingan nitrogen dan oksigen di udara. Berdasarkan kesetimbangan reaksi, harga x, n, dan m dapat dihitung, hasilnya adalah :

$x = 12,5$, $n = 8$, $m = 9$; sehingga reaksi tersebut secara lengkap adalah :



Bila reaksi yang terjadi seperti di atas, maka reaksi pembakarannya disebut proses pembakaran stoikiometris dimana semua atom oksigen bereaksi sempurna dengan bahan bakar. Komposisi produk hasil pembakaran akan berbeda untuk campuran udara-bahan bakar kaya dengan campuran udara bakar miskin dan nilai AFR stoikiometris tergantung komposisi bahan bakar, oleh karena itu parameter yang dipakai untuk menyatakan komposisi campuran yaitu rasio antara AFR actual atau sebenarnya terhadap AFR stoikiometris yang disebut AFR relative (λ) [Ref.2] .

$$\text{---}$$
(2.8)

untuk campuran miskin $\lambda > 1$

untuk campuran stoikiometris $\lambda = 1$

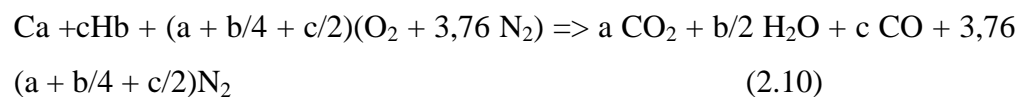
untuk campuran kaya $\lambda < 1$

Dalam motor bakar AFR dapat dihitung dari analisa gas buang. Dari analisa prosentase gas yang meliputi CO_2 , O_2 , dan N_2 sedangkan H_2O terkondensasi sehingga

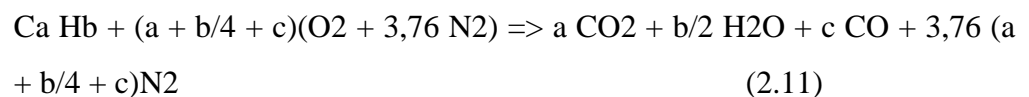
tidak ada dalam analisa volumetrik. Sedangkan AFR aktual dihitung dengan mengukur kebutuhan udara dan bahan bakar yang dirumuskan :

(2.9)

Apabila reaksi pembakaran tersebut berlangsung pada temperatur yang rendah, maka nitrogen dalam udara tidak akan ikut teroksidasi sehingga tidak akan terbentuk produk berupa oksida nitrogen (NO_x). Pada reaksi pembakaran komposisi campuran udara-bahan bakar sangat menentukan komposisi produk hasil pembakaran. Bila jumlah udara dalam campuran kurang dari yang dibutuhkan, maka karbon yang ada tidak akan terbakar seluruhnya menjadi CO₂, tetapi akan terjadi reaksi yang menghasilkan CO menurut reaksi berikut :



Untuk reaksi pembakaran aktual diusahakan untuk mencegah terbentuknya CO, karena gas tersebut bersifat racun. Untuk itu udara pembakar diusahakan sedikit melebihi standar, sehingga karbon akan terbakar menjadi CO, tetapi akan terdapat sisa O₂, pada produk hasil pembakaran menurut reaksi :



2.6 Fenomena Pembakaran

Fenomena pembakaran yang terjadi selama proses pembakaran terbagi menjadi dua macam, yaitu pembakaran normal dan pembakaran tidak normal.

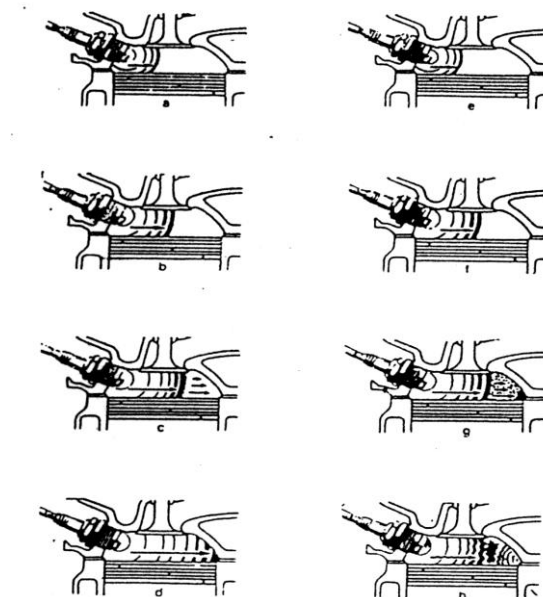
2.6.1 Pembakaran Normal

Proses ini terjadi bilamana penyalaan campuran udara bahan bakar semata-mata diakibatkan oleh percikan bunga api yang berasal dari busi. Adapun nyala api akan menyebar secara merata dalam ruang bakar dengan kecepatan normal sehingga campuran udara bahan bakar terbakar pada suatu periode yang sama [Ref.14].

Tekanan gas yang diakibatkan oleh proses ini akan merata (tanpa fluktuasi tekanan) dalam ruang bakar. Pembakaran dimulai sebelum akhir langkah kompresi dan diakhiri sesaat setelah melewati titik mati atas. Suhu dalam ruang bakar akan mencapai kisaran 2100K–2500K (1800-2200⁰C) [Ref.1].

2.6.2 Pembakaran Tidak Normal

Terjadi karena sebagian campuran bahan bakar mengalami penyalan sendiri yang biasanya tidak disebabkan oleh percikan bunga api dari busi. Hal ini dikarenakan temperatur campuran bahan bakar udara terlalu tinggi yang salah satunya disebabkan hasil dari langkah kompresi, hingga mencapai titik nyalanya, sehingga menyebabkan campuran tersebut akan menyala dengan sendirinya. Ataupun titik panas pada permukaan ruang bakar yang menimbulkan percikan api dengan sendirinya baik sebelum ataupun sesudah penyalan. Peristiwa ini biasa disebut dengan *detonasi*. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Proses pembakaran normal dan pembakaran sendiri [Ref.1].

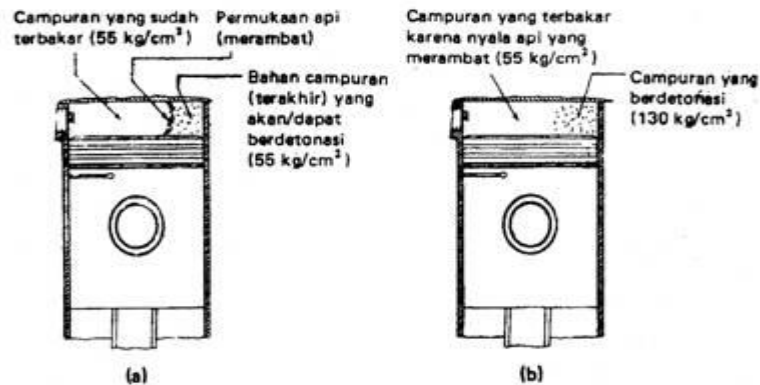
Detonasi dapat terjadi pada semua jenis motor bakar torak. Sifat dari timbulnya detonasi ini sangat merugikan karena [Ref.2]:

- a. Mengurangi rendemen motor bakar torak, sebab panas yang dihasilkan lebih banyak diserap oleh dinding silinder ruang bakar daripada yang diubah menjadi tenaga mekanis.
- b. Proses detonasi ini bisa menyebabkan kerusakan komponen mesin seperti: keretakan pada piston dan setang piston.
- c. Menyebabkan proses pembakaran berjalan tidak sesuai dengan *timing* (waktu) yang telah ditentukan, yakni pembakaran berlangsung terlalu dini.

Pada motor bakar bensin dikenal dua macam detonasi, sebagai berikut:

- a. Detonasi karena campuran bahan bakar menyala sebelum busi mengeluarkan nyala api. Hal ini disebabkan karena adanya kotoran-kotoran arang yang tertimbun pada dinding silinder dan kepala piston yang menyala terus menerus. Disamping itu juga bisa disebabkan oleh adanya tekanan kompresi yang terlalu besar, sehingga menyebabkan kenaikan temperatur yang mencapai titik nyala campuran bahan bakar dan udara tersebut.
- b. Detonasi yang disebabkan karena kecepatan pembakaran disekitar busi yang terlalu tinggi, hingga pada proses ekspansi, sisa bahan bakar yang belum terbakar akan termampatkan, temperaturnya sangat tinggi sampai sisa tersebut seluruhnya terbakar dengan sendirinya.

Akibat dari detonasi ini maka massa gas dalam silinder akan bergetar hingga terjadi tekanan-tekanan setempat yang lebih tinggi dari biasanya. Hal ini terjadi karena proses pembakaran yang tidak normal menimbulkan gelombang tekanan yang berbenturan dengan gelombang tekanan yang terjadi akibat pembakaran yang berjalan normal (akibat percikan api dari busi semata). Kejadian ini terjadi disertai dengan suara pukulan pada dinding ruang bakar, hingga terdengar suara ketukan logam (*knocking*). *Knocking* yang berat akan menyebabkan kerusakan pada komponen mesin, terutama pada kepala piston. Gambar 2.8 menunjukkan terjadinya peristiwa detonasi di dalam silinder.



Gambar 2.7 Keadaan dalam ruang bakar sebelum dan sesudah detonasi [Ref.2]

Faktor-faktor yang menyebabkan terlalu tingginya temperatur campuran bahan bakar dan udara, sehingga menimbulkan detonasi tersebut adalah sebagai berikut [Ref.8]:

- a. Nilai oktan (*octane number*) dari bahan bakar yang terlalu rendah.
 Nilai oktan adalah bilangan yang menyatakan prosentase kandungan iso-oktana (C_8H_{18}) pada campuran iso-oktana dengan heptana (C_7H_{16}) dalam bahan bakar. Pada iso-oktana bebas dari *knocking*, sedang heptana mempunyai nilai *knocking* yang buruk. Semakin tinggi nilai oktan maka semakin bagus anti *knocking* bahan bakar tersebut.
- b. Waktu pengapian yang terlalu cepat.
 Waktu pengapian yang terlalu cepat menyebabkan timbulnya sebagian dari bahan bakar yang belum sempat terbakar. Sampai proses ekspansi sisa bahan bakar tersebut akan termampatkan, sampai temperaturnya tinggi hingga menyebabkan timbulnya (*self ignition*).
- c. Busi terlalu panas.
 Busi yang terlalu panas akan menyebabkan suhu disekitarnya tidak merata, sehingga ketika busi menyala terdapat daerah-daerah dengan suhu yang berbeda yang menyebabkan pembakaran bahan bakar berjalan tidak merata.
- d. Temperatur nyala bahan bakar

Bahan bakar dengan temperatur nyala yang tinggi akan menyebabkan sulit untuk berdetonasi, dengan kata lain pada bahan bakar dengan temperatur nyala yang tinggi akan sulit untuk terbakar dengan sendiri.

- e. Sistem pendinginan dinding silinder ruang bakar kurang baik
Fungsi dari sistem pendinginan adalah untuk mendinginkan mesin saat terjadinya pembakaran dalam silinder. Jika pendinginannya tidak merata, maka dimungkinkan akan menyebabkan proses pembakaran dalam ruang bakar tidak merata pada seluruh ruang.
- f. Terjadinya pembesaran perbandingan kompresi
Perbandingan kompresi merupakan perbandingan volume silinder terbesar dengan volume terkecil. Dengan kenaikan perbandingan kompresi ini akan mengakibatkan tekanan kompresi menjadi naik, sehingga bila sampai mencapai tekanan nyala bahan bakar, maka akan menyebabkan terjadinya pembakaran sendiri tanpa pemicu dari busi.

Berikut ini adalah beberapa cara untuk mencegah timbulnya detonasi:

- a. Mengurangi tekanan dan temperatur campuran bahan bakar dan udara yang masuk silinder.
- b. Mengurangi perbandingan kompresi.
- c. Memperlambat saat penyalaan.
- d. Memperkaya (menaikkan perbandingan) campuran bahan bakar-udara atau mempermiskin (menurunkan perbandingan) bahan bakar-udara dari suatu harga perbandingan campuran yang sangat mudah berdetonasi.
- e. Menaikkan kecepatan torak (putaran poros engkol), untuk memperoleh arus turbulen pada campuran di dalam silinder yang mempercepat rambatan nyala api.
- f. Memperkecil diameter torak untuk memperpendek jarak yang ditempuh oleh nyala api dari busi ke bagian yang terjauh. Hal ini bisa juga diatasi dengan menggunakan busi lebih dari satu.
- g. Mempergunakan bahan bakar dengan bilangan oktana yang lebih tinggi.

Hasil atau produk yang didapat dari reaksi pembakaran dapat dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan jenis pembakarannya, yaitu :

a. Pembakaran sempurna (ideal)

Setiap pembakaran sempurna pasti akan menghasilkan karbondioksida dan air. Reaksi pembakaran sempurna ini hanya dapat berlangsung jika campuran udara-bahan bakar sesuai dengan kebutuhan atau campuran stoikiometris dan cukup waktu untuk pembakaran campuran udara-bahan bakar.

b. Pembakaran tak sempurna

Proses pembakaran tak sempurna terjadi bila kebutuhan oksigen untuk pembakaran tidak cukup terpenuhi. Produk yang dihasilkan dari proses pembakaran tak sempurna adalah hidrokarbon tak terbakar (HC), dan bila hanya sebagian dari hidrokarbon yang terbakar, maka aldehide, ketone, asam karbosiklis, dan karbon monoksida akan menjadi polutan dalam gas buang.

c. Pembakaran dengan udara berlebih

Pada kondisi temperatur yang tinggi, nitrogen dan oksigen yang terdapat dalam udara pembakaran akan bereaksi dan akan membentuk oksida nitrogen (NO dan NO₂).

Disamping itu produk yang dihasilkan dari proses pembakaran dapat berupa oksida timah, oksida halogenida, oksida sulfur, serta emisi evaporatif seperti hidrokarbon ringan yang teremisi dari sistem bahan bakar.

2.7 Parameter Performa Mesin Bensin

Perfoma suatu mesin pada umumnya dapat dilihat dari tingkat torsi, daya, konsumsi bahan bakar, dan efisiensi. Pada umumnya untuk mengetahui performa suatu mesin dapat diketahui dari spesifikasi mesin dari produsen pembuat mesin tersebut. Data dan spesifikasi dari produsen tersebut dapat dijadikan suatu acuan awal besarnya performa suatu mesin atau dapat disebut juga karakter mesin bensin tersebut.

Secara umum daya berbanding lurus dengan luas piston sedang torsi berbanding lurus dengan volume langkah. Parameter tersebut relatif penting digunakan pada mesin yang berkemampuan kerja dengan variasi kecepatan operasi dan tingkat pembebanan. Daya maksimum didefinisikan sebagai kemampuan maksimum yang bisa dihasilkan oleh suatu mesin. Adapun torsi poros pada kecepatan tertentu mengindikasikan kemampuan untuk memperoleh aliran udara dan juga bahan bakar yang tinggi ke dalam mesin pada kecepatan tersebut. Sementara suatu mesin dioperasikan pada waktu yang cukup lama, maka konsumsi bahan bakar serta efisiensi mesinnya menjadi hal yang sangat penting.

2.7.1 Torsi dan Daya

Dinamometer digunakan untuk mengukur torsi sebuah mesin. Pada dasarnya ada tiga jenis alat pengukur daya atau torsi, yaitu dinamometer penggerak, dynamometer transmisi dan dinamometer absorpsi. Dinamometer penggerak digunakan untuk mengukur beberapa peralatan seperti turbin dan pompa serta mensuplai energi untuk menggerakkan peralatan yang akan diukur. Dinamometer transmisi adalah peralatan pasif yang ditempatkan di lokasi tertentu pada suatu mesin dengan tujuan untuk mengukur torsi pada lokasi tertentu. Dinamometer absorpsi mengubah energi mekanik sebagai torsi yang diukur, sehingga sangat berguna untuk mengukur daya atau torsi yang dihasilkan sumber daya seperti motor bakar atau motor listrik.

Dinamometer yang digunakan dalam penelitian ini adalah dinamometer jenis hidraulik yang termasuk dinamometer jenis absorpsi. Dinamometer hidraulik adalah dinamometer yang menggunakan system hidrolis atau fluida untuk menyerap energi mekanis yang dikeluarkan mesin. Fluida yang digunakan adalah air, dimana air berfungsi sebagai media pendingin dan media gesek perantara. Dinamometer hidraulik ini memiliki dua komponen penting yaitu sudu gerak (rotor) dan sudu tetap (stator). Rotor terhubung dengan poros dai mesin yang akan diukur, dimana putaran dai mesin tersebut memutar rotor dinamometer. Rotor akan mendorong air didalam dinamometer, sehingga air akan terlempar menghasilkan tahanan terhadap putaran mesin dan menghasilkan panas. Aliran air secara kontinyu melalui rumah (casing) sangat penting untuk menurunkan temperature dan juga untuk melumasi *seal* pada poros.

Sedangkan pada stator terletak berhadapan dengan rotor dan terhubung tetap pada *casing*. Pada *casing* dipasang lengan, dimana pada ujung lengan terdapat alat ukur pembebanan sehingga torsi yang terjadi dapat diukur.

Pada saat dinamometer ini dijalankan, mesin dihidupkan dan putaran mesin diatur pada putaran tertentu. Air masuk ke dalam *casing* melalui selang dari penampungan air sehingga rongga antara rotor dan stator selalu terisi air. Air yang masuk ke dalam *casing* berfungsi sebagai media gesek perantara dan sebagai pendingin karena proses yang terjadi menimbulkan panas. Air yang keluar dari dinamometer tidak boleh melebihi 80°C, jika sudah mendekati temperature tersebut dibuka katup keluar yang lebih besar dari penampungan air. Agar air yang dialirkan oleh pompa lebih banyak. Suplai air harus bersih, dingin, dan konstan.

Keuntungan dinamometer hidraulik adalah:

1. Tidak membutuhkan instalasi yang permanen
2. Mudah dipindahkan dari satu mesin ke mesin yang lain
3. Mudah dioperasikan oleh satu orang
4. Dapat bekerja pada mesin yang besar atau memiliki kecepatan putar yang tinggi.

Kedudukan alat ukur harus menunjukkan angka nol (dinamometer dalam keadaan seimbang) pada waktu berhenti dan pada waktu air mengalir masuk stator tetapi mesin belum bekerja. Pengukuran kecepatan putar poros perlu dilakukan untuk mendapatkan perhitungan daya dan juga untuk menghindari kelebihan kecepatan putar yang dapat mengakibatkan kerusakan pada dinamometer.

Torsi yang dihasilkan mesin adalah [Ref.5]:

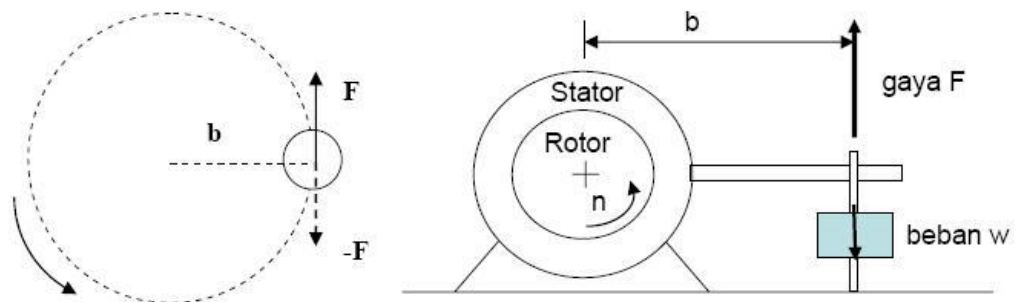
$$T = F \times b \quad (2.12)$$

dimana dalam satuan SI:

T = torsi (Nm)

F = gaya penyeimbangan (N)

b = jarak lengan torsi (m)



Gambar 2.8 Prinsip Kerja Dinamometer [Ref. 17].

Gambar 2.8 menunjukkan prinsip kerja Dinamometer. Adapun daya yang dihasilkan mesin atau diserap oleh dinamometer adalah hasil perkalian dari torsi dan kecepatan sudut.

$$— \quad (2.13)$$

dimana dalam satuan SI:

P = daya (kW)

T = torsi (Nm)

N = putaran kerja (rpm)

Sebagai catatan, torsi adalah ukuran dari kemampuan sebuah mesin melakukan kerja sedangkan daya adalah angka dari kerja telah dilakukan. Besarnya daya mesin yang diukur seperti dengan didiskripsikan di atas dinamakan dengan *brake power* (P_b). Daya disini adalah daya yang dihasilkan oleh mesin untuk mengatasi beban, dalam kasus ini adalah sebuah rem [Ref.4]

2.7.2 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik

Dalam pengujian mesin konsumsi bahan bakar diukur sebagai laju aliran massa bahan bakar per unit waktu (m_f). konsumsi bahan bakar spesifik/*specific fuel consumption*(*sfc*) adalah laju aliran bahan bakar per satuan daya. Pengukuran ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana efisiensi mesin dalam menggunakan bahan bakar untuk menghasilkan daya [Ref.5].

$$— \quad (2.14)$$

Dimana:

sfc = konsumsi bahan bakar spesifik (kg/kW jam)

m_f = massa bahan bakar (kg/jam)

P = daya (kW)

2.7.3 Perbandingan Udara-Bahan Bakar (Air/Fuel Ratio)

Dalam pengujian mesin, pengukuran juga dilakukan terhadap laju aliran massa udara (m_a) dan laju aliran massa bahan bakar (m_f). Perbandingan antara keduanya berguna dalam mengetahui kondisi operasi mesin [Ref.5].

$$\text{Air/Fuel Ratio (A/F)} = \frac{m_a}{m_f} \quad (2.15)$$

$$\text{Fuel/Air Ratio (F/A)} = \frac{m_f}{m_a} \quad (2.16)$$

Untuk *Relative Air Fuel Ratio* (γ) itu sendiri:

$$\lambda = \frac{\text{Actual Air/Fuel Ratio}}{\text{Stoichiometric Air/Fuel Ratio}} \quad (2.17)$$

Relative Air/Fuel Ratio ini memberikan parameter informasi yang lebih guna menetapkan komposisi campuran udara-bahan bakar yang baik.

Jika $\lambda > 1$: maka campuran itu miskin

$\lambda < 1$: maka campuran itu kaya

Jika oksigen yang dibutuhkan tercukupi, bahan bakar hidrokarbon dapat dioksidasi secara sempurna. Karbon didalam bahan bakar kemudian berubah menjadi karbon dioksida CO_2 dan hydrogen berubah menjadi uap air H_2O .

Jika jumlah udara yang diberikan kurang dari yang dibutuhkan secara stoikiometri maka akan terjadi campuran kaya akan bahan bakar. Produk dari campuran kaya akan bahan bakar adalah CO , CO_2 , H_2O , dan HC (Hidrokarbon tidak terbakar). Jika jumlah udara yang diberikan lebih besar dari kebutuhan maka akan terjadi campuran miskin bahan bakar.

2.7.4 Tekanan Efektif Rata-Rata (Brake Mean Effective Pressure)

Brake mean effective pressure (bmep) didefinisikan sebagai tekanan konstan teoritik yang dapat dibayangkan terjadi pada setiap langkah kerja dari mesin untuk menghasilkan output daya yang sama dengan *brake horsepower-BHP* (*effective horsepower*). BHP itu sendiri didefinisikan sebagai jumlah daya yang terdapat pada poros, sedangkan *indicated horsepower/ IHP* didefinisikan sebagai daya yang dikonsumsi oleh motor [Ref.17].

Unjuk kerja mesin relatif yang terukur, dapat diperoleh dari pembagian kerja per siklus dengan perpindahan volume silinder per siklus. Parameter ini merupakan gaya per satuan luas dan dinamakan dengan *mean effective pressure (mep)* [Ref.5].

$$\text{Kerja per siklus} = P n_R / N \quad (2.18)$$

dimana: n_R = jumlah putaran engkol untuk setiap langkah kerja
(2 untuk 4 siklus 4 langkah, 1 untuk siklus 2 langkah)

dalam satuan SI:

mep = tekanan efektif rata-rata (kPa)

V_d = Volume ruang bakar (dm^3)

Tekanan efektif rata-rata juga dapat dinyatakan dengan torsi

$$mep = \frac{\tau}{V_d} \quad (2.19)$$

2.7.5 Efisiensi

Efisiensi adalah perbandingan antara daya yang dihasilkan per siklus terhadap jumlah energi yang disuplai per siklus yang dapat dilepaskan selama pembakaran. Suplai energi yang dapat dilepas selama pembakaran adalah massa bahan bakar yang disuplai per siklus dikalikan dengan harga panas dari bahan bakar (Q_{HV}). Harga panas bahan bakar ditentukan dalam sebuah prosedur tes standar dimana diketahui massa bahan bakar yang terbakar sempurna dengan udara dan energi dilepas oleh proses pembakaran yang kemudian diserap dengan kalorimeter. pengukuran efisiensi riil dinamakan dengan *fuel conversion efficiency* (η_f) dan didefinisikan sebagai [Ref.5]:

$$\eta_f = \frac{P}{\dot{m}_f \cdot Q_{LHV}} \quad (2.20)$$

dimana \dot{m}_f adalah massa bahan bakar yang dimasukkan per siklus. Substitusi untuk P/\dot{m}_f didapatkan

$$\eta_f = \frac{Q_{HVF}}{Q_{LHV}} \quad (2.21)$$

dalam efisiensi ini besarnya Q_{HVF} merupakan harga panas rendah (Q_{LHV}) dari bahan bakar yang digunakan, dalam (Mj/kg).