BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Yunianto (2013) melakukan penelitian tentang pengaruh perubahan saat penyalaan (*ignition timing*) terhadap prestasi mesin pada sepeda motor 4 langkah dengan bahan bakar lpg. Dari hasil penelitiannya didapat bahwa penggunaan bahan bakar gas atau LPG pada motor *Otto* dapat menurunkan peforma dari motor, Penurunan ini terjadi dikarenakan karakteristik sifat bahan bakar bensin berbeda dengan LPG sehingga menurunkan efisiensi volumetrik dari motor tersebut. Kemudian peneliti melakukan percobaan dengan merubah waktu penyalaan pada motor tersebut dan hasil yang didapat adalah bahwa dengan pengaturan saat penyalaan 11° sebelum TMA, menghasilkan prestasi (Torsi dan Daya) yang dekat dengan prestasi motor *Otto* yaitu hanya selisih 3 %. Prestasi terbaik pada mesin bahan bakar bensin ataupun LPG berkisar pada putaran 4000 s.d 5000 rpm.

Utama dan Setiyawan (2012) melakukan studi simulasi konversi motor bakar *Otto* menggunakn bahan bakar CNG dengan variasi *air fuel ratio* dan *ignition timing*. Dari hasil simulasi yang dilakukan menyimpulkan bahwa untuk mengganti bahan bakar gas pada mesin yang awalnya menggunakan bahan bakar minyak diperlukan penyesuain parameter operasional mesin seperti *air fuel ratio* dan *ignition time.* Pada penelitian ini bahan bakar yang digunakan yaitu gasoline milik Pertamina (premium) dan *Compressed Natural Gas* (CNG). Beberapa hasil yang didapatkan penelitian ini adalah dengan CNG terjadi peningkatan *brake torque* dan *brake power* masing-masing sebesar 12,13% dan 12,2% ketika motor beroperasi pada *Air Fuel Ratio* (AFR) stokiometri dan MBT (*Minimum Advanced for the best Torque*) dibandingkan CNG yang beroperasi dengan setting *gasoline*. Pada konsisi yang sama, emisi CO dan HC menurun masing-masing sebesar -98,41% dan -10,19%.

2.2 Mesin *Otto*

Mesin *Otto* adalah suatu mesin tipe pembakaran dalam (*Internal Combustion Engine*) yang merubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi panas dengan proses pembakaran menjadi energi mekanik berupa daya poros pada putaran poros engkol. Energi panas didapat dari pembakaran udara dengan bahan bakar yang terjadi di

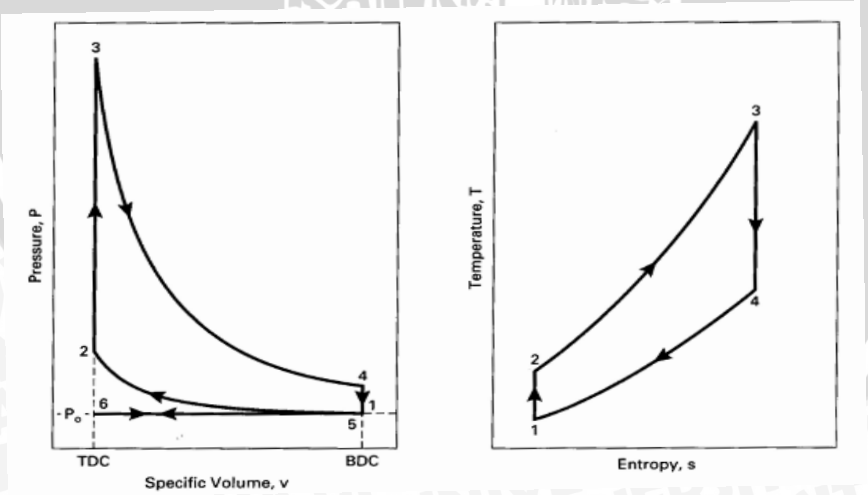
ruang bakar (*Combustion Chamber*) dengan bantuan percikan api yang berasal dari busi untuk menghasilkan gas pembakaran.

2.2.1 Siklus Termodinamika Mesin Otto

Siklus termodinamika adalah serangkaian proses termodinamika yang menggambarkan transfer panas dan kerja dalam berbagai keadaan, biasanya disajikan dengan bantuan diagram P-*v* dan T-s. Siklus aktual dari proses kerja motor bakar sangat komplek untuk digambarkan, karena itu pada umumnya siklus motor bakar menggunakan pendekatan dalam bentuk siklus udara standar (*air standar cycle*). Dalam *air standar cycle* fluida kerja menggunakan udara, dan pembakaran bahan bakar diganti dengan pemasukan panas dari luar sistem. Pendinginan dilakukan untuk mengembalikan fluida kerja pada kondisi awal. Semua proses pembentuk siklus udara standar dalam motor bakar adalah proses ideal, yaitu proses reversibel *internal*.

2.2.2 Siklus Otto

Siklus standar udara pada *mesin Otto* disebut Siklus Otto, berasal dari nama penemunya, yaitu *Nikolaus August Otto* seorang ilmuan Jerman yang ditemukan pada tahun 1876. Siklus ini menerima tambahan panas yang terjadi secara konstan ketika piston dalam posisi titik mati atas (TMA). Siklus udara volume konstan dapat digambarkan dalam diagram P – V dan diagram T – s pada gambar dibawah ini



Gambar 2.1 Siklus Ideal Otto
Sumber : Pulkrabek (1997 : 75)

Langkah dari Siklus Otto terdiri dari :

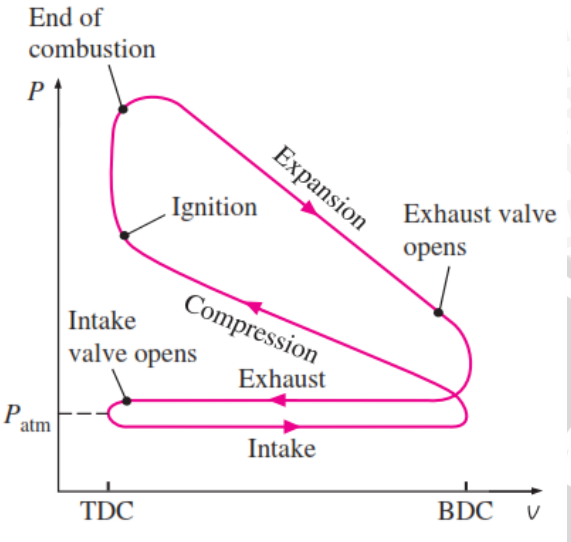
1. Proses 6-1 adalah langkah hisap yang terjadi pada tekanan konstan (*Isobaric*) dan temperatur konstan (*Isotermic*).
2. Proses 1-2 adalah langkah kompresi pada keadaan entropi konstan (*Isentropic*).
3. Proses 2-3 adalah proses pemasukan kalor pada volume konstan (*Isokhorik*).
4. Proses 3-4 adalah langkah ekspansi pada keadaan entropi konstan (*Isentropic*).
5. Proses 4-5 adalah proses pembuangan panas pada volume konstan (*Isokhorik*).
6. Proses 5-6 adalah proses pembuangan sisa kalor (langkah buang) pada tekanan konstan (*Isobaric*) dan temperatur konstan (*Isotermic*).

Dalam kenyataannya baik siklus volume konstan, siklus tekanan konstan dan siklus gabungan tidak mungkin dilaksanakan, karena adanya beberapa hal sebagai berikut :

a. Kebocoran fluida kerja karena penyekatan pada cincin torak dan katup tidak dapat terjadi secara sempurna.
b. Katup tidak terbuka dan tertutup tepat pada saat TMA dan TMB dikarenakan pertimbangan dinamika mekanisme katup.
c. Fluida kerja bukanlah udara yang dapat dianggap gas ideal dengan kalor spesifik yang konstan selam proses berlangsung.
d. Pada waktu torak berada di TMA, tidak terjadi proses pemasukan panas seperti pada siklus udara standar. Kenaikan udara dan temperatur disebabkan oleh proses pembkaran yang terjadi didalam silinder.
e. Proses pembakaran memerlukan waktu hingga tidak dapat berlangsung secara sekaligus, sehingga pembakaran tidak dapat terjadi pada kondisi volume konstan.
f. Percampuran antara udara dan bahan bakar tidak dapat terjadi secara sempurna pada temperatur yang tinggi sehinga pembakaran menghasilkan CO, H_2, HC, dan O_2. Tidak sempurnanya proses pembakaran mengakibatkan daya dan efisiensi yang dihasilkan lebih rendah daripada siklus udara standar.
g. Terjadi kerugian kalor yang disebabkan perpindahan kalor dari fluida kerja ke fluida pendingin, katup buang yang terbuka sebelum piston mencapai TMB sehingga ada panas yang ikut terbawa oleh gas buang, dan kerugian yang diakibatkan oleh gesekan yang terjadi antara torak dan dinding silinder.

Berdasarkan hal-hal tersebut, bentuk diagram P-v dari siklus aktual tidak sama dengan siklus ideal. Karena penyimpangan antara siklus ideal dan aktual menimbulkan

kerugian energi, maka siklus aktual selalu diusahakan mendekati dengan siklus idealnya. Siklus *Otto* aktual dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Siklus Aktual Otto
Sumber : Cengel (2006 : 494)

2.2.3 Prinsip Kerja Mesin *Otto* 4 Langkah

Pada motor bakar 4 langkah, dalam 1 siklus kerja memerlukan 4 kali langkah torak atau 2 kali putaran poros engkol, yang dijelaskan dibawah ini :

a. Langkah Isap (*Suction Stroke*)

Torak bergerak dari posisi TMA (Titik Mati Atas) ke TMB (Titik Mati Bawah), dengan katup KI (Katup Isap) terbuka dan katup KB (Katup Buang) tertutup. Karena gerakan torak tersebut maka campuran bahan bakar dengan udara pada *mesin Otto* dapat masuk ke ruang bakar

b. Langkah Kompresi (*Compression Stroke*)

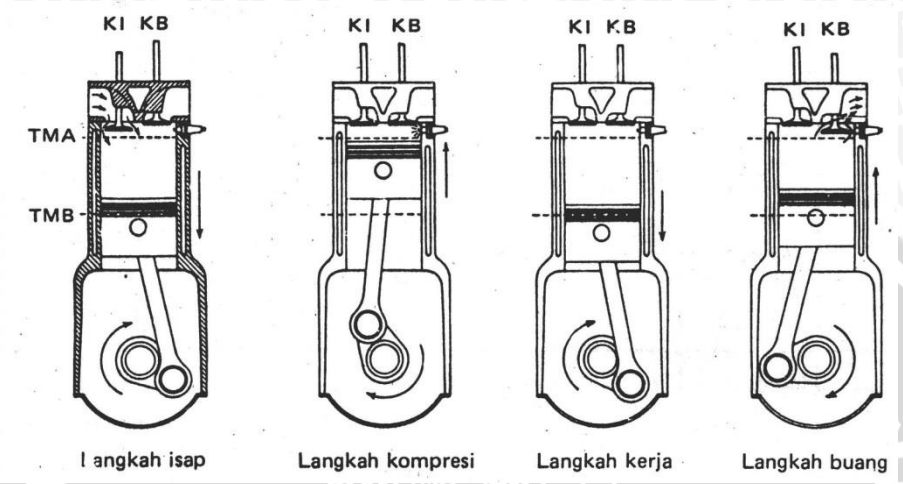
Torak bergerak dari posisi TMB ke TMA dengan KI dan KB tertutup. Karena gerakan torak tersebut maka terjadi proses kompresi campuran udara dan bahan bakar yang mengakibatkan tekanan dan temperatur di silinder naik.

c. Langkah Ekspansi (*Expansion Stroke*)

Sebelum posisi torak mencapai TMA pada langkah kompresi, pada *mesin Otto* busi dinyalakan, sehingga terjadi proses pembakaran. Akibatnya tekanan dan temperatur di ruang bakar naik lebih tinggi. Sehingga torak mampu melakukan langkah ekspansi atau langkah kerja. Langkah kerja dimulai dari posisi torak pada TMA dan berakhir pada posisi TMB saat KB mulai terbuka pada langkah buang.

d. Langkah Buang (*Exhaust Stroke*)

Torak bergerak dari posisi TMB ke TMA dengan KI tertutup dan KB terbuka. Karena gerakan torak tersebut gas hasil pembakaran terbuang ke atmosfer. Skema dari langkah gerakan torak di dalam silinder motor bakar 4 langkah tersebut ditunjukkan dalam gambar dibawah ini :



Gambar 2.3 : Skema Langkah Kerja Motor Bakar 4 Langkah
Sumber : Arismunandar (2002 : 8)

2.2.4 Pembakaran Pada *Mesin Otto*

Pembakaran adalah proses lepasnya ikatan-ikatan kimia lemah bahan bakar akibat pemberian energi tertentu dari luar menjadi atom-atom yang bermuatan dan aktif sehingga mampu bereaksi dengan oksigen lalu membentuk ikatan molekul-molekul yang kuat yang mampu menghasilkan cahaya dan panas dalam jumlah yang besar (Wardana). Syarat terjadinya pembakaran ada 3, yaitu :

1. Bahan bakar
2. Pengoksidasi (oksigen atau udara)
3. Energi aktivasi

Secara umum persamaan reaksi pembakaran dapat dituliskan sebagai berikut :

Bahan bakar + Oksidator (O_2) $\longrightarrow$ Produk Pembakaran
(reaktan)

Pada gambar 2.4, jika salah satu dari bahan bakar, oksidator atau energi aktivasi dihilangkan atau bergabung dalam komposisi yang tidak tepat maka pembakaran tidak akan terjadi atau api tidak akan muncul.

Gambar 2.4 Ilustrasi Proses Pembakaran
Sumber : Wardana (2008 : 1)

Pembakaran pada *mesin Otto* diawali oleh energi aktivasi berupa percikan listrik dari busi yang terjadi pada saat beberapa derajat poros engkol (*crankshaft*) sebelum torak mencapai titik mati atas, membakar campuran antara udara dan bahan bakar yang telah dikompresikan oleh gerakan piston dari titik mati bawah menuju titik mati atas. Dalam proses pembakaran, energi kimia diubah menjadi energi panas dimana pada setiap pembakaran selalu dihasilkan gas sisa hasil dari proses pembakaran yang dinamakan emisi gas buang

Proses pembakaran secara teoritis bahan bakar bensin (isooktan) dapat dilihat pada reaksi berikut :

$$C_8H_{18} + 12{,}5(O_2 + 3.76\ N_2) \longrightarrow 8\ CO_2 + 9\ H_2O + 47\ N_2$$

Sedangkan untuk proses pembakaran secara teoritis bahan bakar metana (CH_4) dapat dilihat pada reaksi dibawah ini :

$$CH_4 + 2(O_2 + 3.76\ N_2) \longrightarrow CO_2 + 2H_2O + 7.52\ N_2$$

Sedangkan agar kinerja mesin optimal pembakaran sangatlah berpengaruh, semakin sempurna pembakaran semakin optimal pula kinerja mesin dan polutan hasil pembakaran juga semakin sedikit. Sempurna atau tidaknya pembakaran bisa kita lihat pada salah kandungan gas yang ada pada gas buang yaitu kandungan Hidrokarbon(HC). Hidrokarbon sendiri merupakan ikatan unsur dari hidrogen dan karbon (bahan bakar) yang tidak terbakar pada saat proses pembakaran tidak sempurna terjadi di ruang bakar. Jadi apabila semakin sedikit kandungan Hidrokarbon pada gas buang maka pembakaran yang terjadi diruang bakar semakin mendekati sempurna dan kinerja mesin akan semakin optimal juga.

Pada proses pembakaran, ada syarat yang harus dipenuhi agar terjadi pembakaran yang sempurna, yaitu :

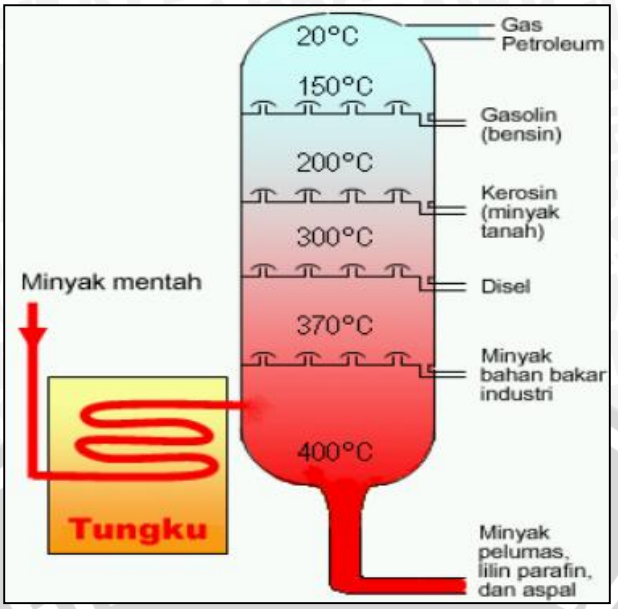
1. Bahan bakar menguap secara cepat dan sempurna
2. Penggunaan udara pembakaran yang cukup
3. Campuran udara pembakaran yang cukup
4. Campuran udara dan bahan bakar yang homogen
5. Temperatur pembakaran harus cukup tinggi

Pembakaran dalam ruang bakar terjadi dengan sangat cepat, tetapi ada jeda waktu sesaat awal penyalaan api oleh busi sampai campuran bahan bakar dan udara terbakar habis. Setelah busi menyala, nyala api akan merambat kesegala arah dengan kecepatan yang tinggi berkisar 20-50 m/s (Arismunandar).

Apabila pembakaran terjadi lebih awal, maka sisa gas dan bahan bakar yang baru akan terbakar sehingga meningkatkan temperatur pada ruang bakar, hal ini menyebabkan proses kompresi kurang maksimal karena prosesnya berlangsung ketika torak bergerak menuju TMA. Akibatnya gerakan torak akan terhambat oleh gas sehingga mengurangi tenaga mesin. Jika penyalaan pembakaran terlambat menyebabkan tekanan turun karena saat terjadi pembakaran posisi torak sedang bergerak menuju TMB. Peningkatan tekanan dan temperatur gas hasil pembakaran akan menurun. Gas hasil pembakaran yang masih bertekanan tinggi akan keluar melalui katup buang, sehingga energi yang bisa dimanfaatkan juga berkurang atau tidak optimal.

2.3 Bahan Bakar Mesin *Otto*

Bahan bakar adalah suatu materi yang akan diubah menjadi energi oleh reaksi eksotermal pada proses pembakaran. Pada mesin *Otto* terdapat dua jenis bahan bakar yang dapat digunakan yaitu bahan bakar minyak dan gas. Kandungan utama dalam bahan bakar adalah karbon (C) dan hidrogen (H). Sedangkan kandungan minoritas bahan bakar adalah nitrogen (N), Sulphur (S), oksigen (O_2), karbondioksida (CO_2), dan air (H_2O) (Wardana). Bahan Bakar mesin *Otto* saat ini banyak di hasilkan dari proses destilasi minyak bumi yang bersumber dari cadangan alam yang tidak dapat diperbaharui, sehingga semakin hari cadangannya semakin menipis sejalan dengan tuntutan kebutuhan energi dunia yang semakin meningkat. Bensin yang biasanya digunakan sebagai bahan bakar di dapatkan dari proses destilasi bertingkat dari minyak bumi.



Gambar 2.5 Destilasi Bertingkat Minyak Bumi
Sumber : Fatimah (1994)

2.3.1 Bahan Bakar Minyak

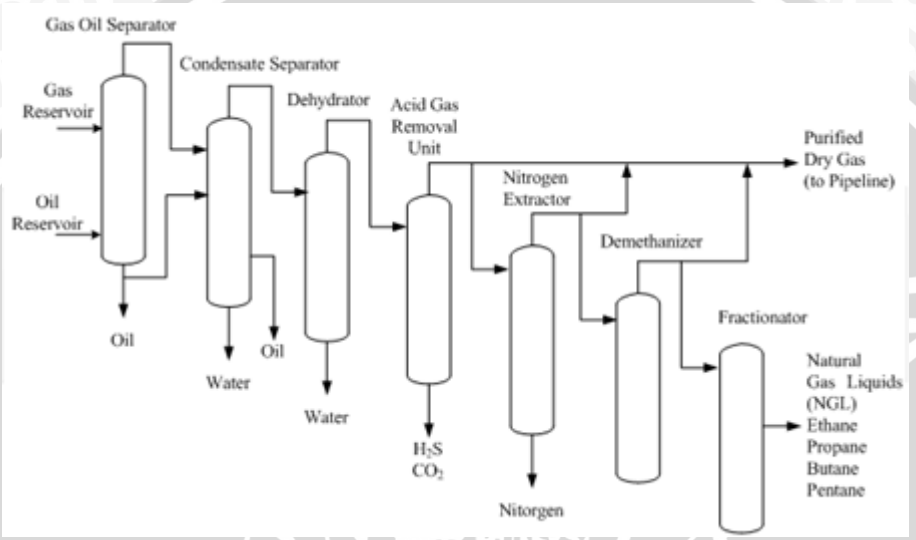
Bahan bakar minyak (*petroleum*) berasal dari kata-kata : Petro = *rock* (batu) dan leaum = oil (minyak) adalah sumber daya alam yang terdiri dari campuran molekul karbon dan hidrogen berbentuk mineral cair yang didapatkan dari hasil tambang pengeboran sumur-sumur minyak mentah. Hasil dari pengolahan minyak mentah ini akan menghasilkan berbagai jenis bahan bakar dengan kualitas berbeda-beda. Minyak dan gas terbentuk dari siklus alami yang dimulai dari sedimentasi sisa-sisa tumbuhan dan binatang yang terperangkap selama jutaan tahun. Pada umumnya terjadi jauh dibawah dasar lautan. Material-material organik tersebut berubah menjadi minyak dan gas akibat efek combinasi temperatur dan tekanan di dalam kerak bumi. Kumpulan dari minyak dan gas tersebut membentuk reservoir-reservoir minyak dan gas.

2.3.2 Bahan Bakar Gas

Gas alam adalah sumber energi hidrokarbon yang paling bersih dan paling kaya hidrogen dan memiliki tingkat efisiensi konversi energi yang baik. Seperti bahan bakar fosil non-terbarukan lainnya, gas alam pada dasarnya terbentuk dari dekomposisi makhluk hidup seperti tanaman, hewan dan mikro-organisme yang hidup selama jutaan tahun yang lalu dan menjadi gas. Meskipun ada berbagai teori tentang asal-usul bahan bakar fosil, teori yang paling banyak diterima menyatakan bahwa bahan bakar fosil

biasanya terbentuk dari bahan organik yang membusuk dan dikompresi di bawah kerak bumi pada tekanan tinggi dan untuk waktu yang sangat lama.

Pengolahan gas alam sangat kompleks dan biasanya melibatkan beberapa proses. Umumnya, jumlah langkah pengolahan gas dan jenis teknik yang digunakan dalam proses pembuatan gas alam berkualitas tergantung pada sumber dari gas itu sendiri. Proses pengolahan gas alam secara sederhana ditampilkan dalam gambar 2 yang terdiri dari proses berikut (Tobin J., dkk, 2006):



Gambar 2.6 Skema pengolahan gas alam
Sumber:(Tobin J., dkk, 2006)

- *Gas-oil separators*: digunakan untuk memisahkan aliran gas dan minyak mentah di bagian atas dan bagian bawah dari shell silinder masing-masing berdasarkan tekanan di kepala sumur di mana gravitasi memisahkan hidrokarbon gas dari minyak yang lebih berat.
- *Condensate separators*: digunakan untuk menghapus kondensasi dari aliran gas dengan pemisah mekanik di kepala sumur. Pada bagian pengolahan kondensat, dua operasi utama, yaitu pemisahan air dan stabilisasi kondensat.
- *Dehydrators*: digunakan untuk menghilangkan uap air dengan menggunakan proses dehidrasi sehingga gas alam akan bebas dari pembentukan hidrat, masalah korosi dan titik embun. Dalam proses ini, proses penyerapan menggunakan etilen glikol untuk menghilangkan air dan partikel lainnya dari aliran umpan.

- *Acid gas removal units*: digunakan untuk menghilangkan kontaminan dalam gas kering seperti CO_2, H_2S, uap air yang tersisa, gas inert seperti helium, dan oksigen.
- *Nitrogen extractor* atau *Nitrogen rejection unit*: digunakan untuk menghilangkan kandungan nitrogen dari aliran. Biasa digunakan dua metode. Pada metode pertama, nitrogen dipisahkan dari aliran gas berdasarkan perbedaan titik didihnya. Pada metode kedua, pemisahan metana dari nitrogen berlangsung menggunakan proses penyerapan fisik. Biasanya regenerasi dilakukan dengan mengurangi tekanan.
- *Demethanizer*: digunakan untuk memisahkan metana dari NGL menggunakan teknik cryogenic maupun teknik absorbsi. Proses demethanization dapat berlangsung di pabrik atau sebagai proses ekstraksi nitrogen. Dibandingkan dengan metode penyerapan, metode cryogenic lebih efisien memisahkan cairan yang lebih ringan seperti etana
- *Fractionators*: digunakan untuk memisahkan NGL dalam aliran gas dengan memvariasikan volatilitas hidrokarbon yang berada di dalam aliran. Dalam fraksinasi NGL setelah demethanizer aliran gas dibawa menuju menara dan dipanaskan untuk meningkatkan suhu aliran gas secara bertahap, membantu perubahan fasa uap dan fasa cair secara menyeluruh, memungkinkan komponen gas untuk menguap dan terkondensasi sehingga dapat dengan mudah dipisahkan menuju tempat penyimpanan secara spesifik.

Tergantung di mana dan dari jenis gas alam yang dihasilkan, komposisi gas alam dapat bervariasi. Kandungan bahan bakar gas yang mudah terbakar adalah senyawa CH_4, CO, dan H_2 dengan komposisi yang berbeda-beda sesuai dengan jenis bahan bakarnya (Wardana, 2008). Umumnya, mengandung metana (CH_4) dan sejumlah hidrokarbon lain dalam jumlah kecil seperti etana (C_2H_6), propana (C_3H_8), butana (C_4H_{10}), dan pentana (C_5H_{12}). Beberapa campuran gas alam juga dapat berupa gas non hidrokarbon seperti karbon dioksida (CO_2), oksigen (O_2), nitrogen (N_2), hidrogen sulfida (H_2S), dan gas mulia (Ar, Dia, Ne, Xe) dalam jumlah yang sangat sedikit. Gas alam pada kondisi STP memiliki densitas rendah dan karena itu memerlukan volume penyimpanan yang lebih besar jika dibandingkan dengan bahan bakar cair, sehingga harus dikompresi atau dicairkan untuk membuat praktis untuk aplikasi transportasi.

2.4 CNG

Kandungan utama dari CNG adalah metana (CH_4) yang merupakan salah satu hidrokarbon dengan rantai terpendek, berikut ini adalah karateristik lain dari metana yang dibandingkan dengan bahan bakar mesin pembakaran dalam lainya disajikan dalam tabel 2.1

Tabel 2.1 Perbandingan karakteristik berbagai jenis bahan bakar

Property	Gasoline	Diesel	Methanol	Ethanol	Propane (LPG)	Methane (CNG)
H/C ratio	1.9	1.88	4.0	3.0	2.7	4.0
Energy Content (LHV) (Mj/kg)	44.0	42.5	20.0	26.9	46.4	50.0
Liquid Density (kg/*l*)	0.72-0.78	0.84-0.88	0.792	0.785	0.51	0.422
Liquid Energy Density (Mj/*l*)	33.00	36.55	15.84	21.12	23.66	21.13
Boiling Point (°C)	37-205	140-360	65	79	-42.15	-161.6
Research Octane Number	92-98	-25	106	107	112	120
Motor Octane Motor	80-90	-	92	89	97	120
Cetane Number	0-5	45-55	5	5	-2	0
Stoichiometric air-fuel ratio	14.7	14.6	6.5	9.0	15.7	17.2
Reid Vapor Pressure (psi)	8-15	0.2	4.6	2.3	208	2400

Sumber : Faiz (1996;195)

CNG juga memiliki keunggulan lain diantaranya :

- Tingkat keamanan yang lebih jika dibandingkan bahan bakar lainya karena CNG lebih mudah hilang keudara.
- Memerlukan tangki penyimpanan yang kecil karena bersifat dapat dimampatkan
- Penggunaan metana dapat mengurangi efek rumah kaca pada atmosfer
- Lebih murah jika dibandingkan dengan bahan bakar minyak

2.5 AFR (*Air Fuel Ratio)*

Air-Fuel Ratio (AFR) adalah perbandingan jumlah massa atau mol udara dan bahan bakar yang menjadi salah satu parameter penting pada suatu proses pembakaran. AFR dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{AFR} = \left(\frac{mol_{udara}}{mol_{bahan\ bakar}}\right) \quad \textbf{(2-1)}$$

$$\text{AFR} = \left(\frac{Massa_{udara}}{Massa_{bahan\ bakar}}\right) \quad \textbf{(2-2)}$$

AFR juga dapat dinyatakan dalam perbandingan *volume* karena sebanding dengan perbandingan mol. Perbandingan *volume* ini sering digunakan untuk bahan bakar gas. Campuran udara dan bahan bakar dengan komposisi yang tepat untuk menghasilkan pembakaran sempurna yang disebut campuran stokiometri. Jika perbandingan udara dan bahan bakar berada diatas nilai stokiometrinya maka akan disebut sebagai campuran miskin (*lean mixture*), dan jika berada dibawah nilai stokiometrinya maka disebut campuran kaya (*rich mixture*). Nilai AFR stokiometri dari bahan bakar bensin adalah 14.6, sedangkan untuk metana adalah 17.2.

2.6 Massa Alir Gas

Massa alir gas adalah banyaknya massa gas yang mengalir setiap satuan waktu. Massa alir gas berhubungan dengan massa jenis dan debit gas tersebut seperti pada persamaan dibawah ini :

$$\dot{m} = Q \cdot \rho \qquad \textbf{(2-3)}$$

Dimana:

$\dot{m}$ = massa alir gas [kg/s]

Q = debit gas [m^3/s]

ρ = massa jenis gas [kg/m^3]

ρ_{Metana} = 0.6604 kg/m^3

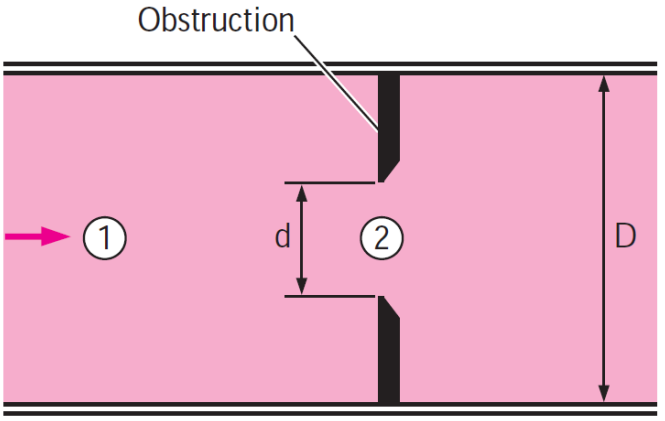
Sumber : Cengel (2006 : 895)

ρ_{Udara} = 1.176 kg/m^3

Sumber : Cengel (2006 : 894)

2.7 *Orifice*

Orifice adalah salah satu komponen yang digunakan untuk mengukur laju aliran fluida berdasarkan prinsip beda tekanan di dalam saluran yang tertutup. *Orifice* termasuk alat ukur laju aliran menggunakan metode rintangan *(Obstruction Device).* Orifice memiliki geometri sederhana sehingga biaya untuk pembuatnya murah dan mudah dipasang atau diganti.



Gambar 2.7 Aliran fluida yang melewati *orifice*
Sumber : Cengel Cimbala (2006 : 366)

Fluida yang mengalir melalui pada *orifice* akan dipaksa melewati lubang pada *orifice*. Hal itu menyebabkan terjadinya perubahan kecepatan dan tekanan. Titik dimana terjadi kecepatan maksimum dan tekanan minimum disebut *vena contracta*. Dengan mengetahui perbedaan tekanan pada pipa normal dan tekanan pada *vena contracta*, laju aliran volume dan laju aliran massa dapat diperoleh dengan mensubstitusikan beberapa persamaan berikut :

Kesetimbangan Massa :

$$\dot{V} = A_1 v_1 = A_2 v_2 \rightarrow v_1 = \left(\frac{A_2}{A_1}\right) v_2 = (\mathrm{d}/\mathrm{D})^2 \, v_2 \qquad \textbf{(2-4)}$$

Persamaan Bernoulli ($z_1 = z_2$) :

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \qquad \textbf{(2-5)}$$

Menggabungkan persamaan 2-2 dan 2-3 maka didapatkan nilai kecepatan :

$$v_2 = \sqrt{\frac{2\,(P_1 - P_2)}{\rho\,(1-\beta^4)}} \qquad \textbf{(2-6)}$$

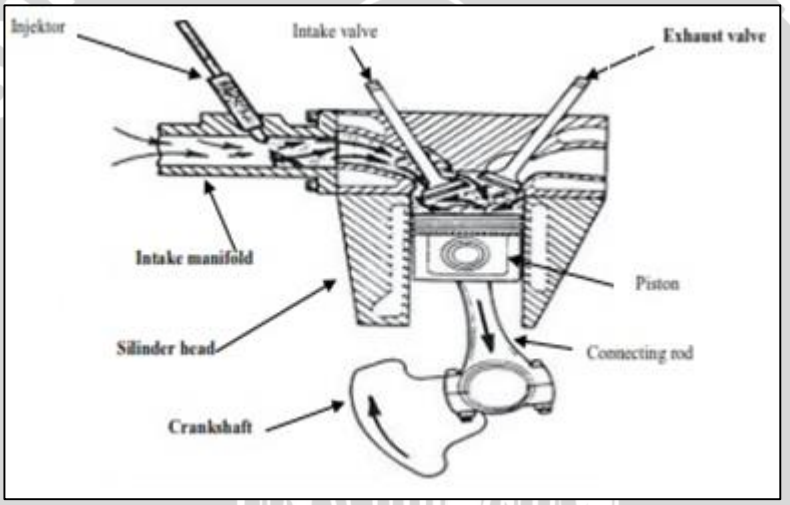
Dimana β = d/D atau diameter rasio. Setelah v_2 nilai volume alir dapat diketahui sesuai dengan persamaan 2- 4.

2.8 Sistem Injeksi Bahan Bakar

Injeksi bahan bakar adalah suatu teknologi yang digunakan pada mesin pembakaran dalam untuk menyuplai bahan bakar dalam proses pencampuran bahan bakar dengan udara sebelum dibakar. Cara kerjanya adalah dengan menentukan jumlah campuran bahan bakar dan udara se-ideal mungkin untuk dimasukkan ke dalam ruang bakar melalui saluran masuk yang jumlahnya diukur oleh sensor aliran udara (*air flow*

sensor) yang kemudian diproses oleh ECM (*Electronic Control Module*) sehingga dapat ditentukan jumlah bahan bakar yang dapat disemprotkan oleh injektor. bahan bakar yang harus masuk ke dalam silinder mesin. Idealnya untuk setiap 14,7 gram udara masuk diinjeksikan 1 gram bensin dan disesuaikan dengan kondisi panas mesin dan udara sekitar serta beban kendaraan. Bahan bakar bertekanan (2-4 kali tekanan dalam sistem karburator) telah dinaikan tekanannnya oleh pompa bahan bakar elektrik dalam sistem dan siap diinjeksikan melalui *injector* elektronik. (Kustoro, 2012)

Ada 2 jenis injeksi bahan bakar yang digunakan dalam kendaraan bermotor, yaitu injeksi langsung ke ruang bakar (*Direct* Injection) dan Injeksi tidak langsung ke ruang bakar (*Indirect Injection*). Penggunaan jenis injeksi bahan bakar dapat dilihat berdasarkan bahan bakarnya, pada bahan bakar bensin yang digunakan adalah tipe injeksi tidak langsung.



Gambar 2.7 : Sistem Injeksi Tidak Langsung
Sumber : Kustoro (2012 : 8)

2.9 Karakteristik Motor Bakar

Bentuk hubungan antar masing-masing variabel indikator kinerja terhadap variabel, indikator operasional suatu motor bakar didapatkan dengan cara pengujian laboratorium dari mesin yang bersangkutan. Data yang digunakan untuk menggambarkan bentuk hubungan antara variabel tersebut dapat berasal dari pengukuran langsung selama pengujian, atau harus dihitung dari data yang diukur. Data seperti putaran mesin dan temperatur dapat diukur langsung, tetapi daya, torsi dan efisiensi dihitung berdasarkan pengukuran terhadap parameter pembentuknya.

Pada pengujian dengan putaran mesin sebagai variabel bebas, jenis karakteristik kinerja yang sering diperlukan adalah :

1) Putaran terhadap daya indikatif (Ni), daya efektif (Ne), dan daya mekanik (Nf)
2) Putaran terhadap torsi (T)
3) Putaran terhadap *MeanEffectivePressure* (MEP)
4) Putaran terhadap *spesific fuel consumption* (SFC)
5) Putaran terhadap efisiensi (ηi , ηe , ηm , ηv)
6) Putaran terhadap komposisi CO , CO_2 ,O_2 H_2O , dan N_2 dalam gas buang
7) Putaran terhadap keseimbangan panas

2.9.1 Torsi

Hasil pembakaran di dalam silinder menghasilkan tekanan yang dapat menekan torak melalui langkah ekspansi atau kerja. Tekanan tersebut diolah menjadi gaya oleh torak yang selanjutnya diteruskan oleh batang torak, kemudian akn menyebabkan berputarnya poros engkol. Berputarnya poros engkol ini menimbulkan momen putar yang disebut torsi. Besarnya torsi suatu mesin dapat diukur dengan menggunakan dynamometer. Dynamometer akan menunjukkan besarnya gaya atau beban pengereman pada poros.

Sehingga harga torsi didapatkan dari hasil perkalian besarnya beban pengereman dengan panjang lengan yang menghubungkan timbangan dengan poros. Persamaan dirumuskan sebagai berikut :

$$T = F \bullet L \text{ [kg.m]} \qquad \textbf{(2-7)}$$

Dimana :

T = Torsi (kg·m)

F = Besar gaya putar yang terbaca pada timbangan dynamometer (kg)

L = Panjang lengan dynamometer = 0,2 (m)

2.9.2 Daya Efektif

Daya efektif motor bakar adalah proporsional dengan perkalian torsi yang terjadi pada poros output (T) dengan putaran kerjanya (n). Karena putaran kerja poros sering berubah terutama pada mesin kendaraan bermotor, besar torsi pada poros yang dapat dijadikan sebagai indikator kinerja motor bakar. Daya ini dihasilkan oleh poros engkol yang merupakan perubahan kalor di ruang bakar menjadi kerja. Daya efektif dirumuskan sebagai berikut :

$$Ne = T \cdot n / 716{,}2 \ (PS) \quad \textbf{(2-8)}$$

dimana : Ne : Daya Efektif (Ps)

T : torsi (kg.m)

n : putaran (rpm)

2.9.3 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Efektif (SFCe)

Konsumsi bahan bakar spesifik efektif (*Spesific Fuel Consumption Effective*) adalah banyak nya bahan bakar yang diperlukan untuk menghasilkan daya efektif 1 PS selama 1 jam. Nilai konsumsi bahan bakar spesifik (SFCe) didapatkan dari nilai konsumsi bahan bakar dan daya efektif yang telah diperoleh. Nilai ini didapatkan dengan rumusan sebagai berikut:

$$FC = \dot{V} \cdot \rho \cdot \frac{3600}{1000} \quad \textbf{(2-9)}$$

$$\text{SFCe} = \frac{FC}{Ne} \quad \textbf{(2-10)}$$

Dimana : SFCe : konsumsi bahan bakar spesifik efektif (kg/PS.jam)

FC : penggunaan bahan bakar tiap jam (kg/jam)

Ne : daya efektif (PS)

$\dot{V}$: Volume Alir (m*l*/s)

ρ : Massa jenis (gr/m*l)*

2.9.4 Efisiensi Termal Efektif (η_e)

Efisiensi termal efektif merupakan perbandingan anatara kalor yang dirubah menjadi daya efektif dengan kalor yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar. Efisiensi termal efektif merupakan suatu ukuran untuk mengetahui ekonomis atau tidaknya dalam pemakaian bahan bakar. Seberapa efesien bahan bakar yang dapat dikonversi menjadi daya efektif poros. Nilai dari efisiensi termal efektif juga berbanding terbalik dengan nilai konsumsi bahan bakar spesifik efektif .jadi jika konsumsi bahan bakar spesifik efektif semakin turun, maka efisiensi termal efektif akan meningkat. Besarnya efisiensi termal efektif dihitung dengan rumus :

$$\eta_e = \frac{632.Ne}{FC.Q1} = \frac{632}{\frac{FC}{Ne}.Q1} = \frac{632}{SFCe.Q1} \quad \textbf{(2-11)}$$

Dimana : η_e: efisiensi termal efektif (%)

Q1 : nilai kalor bawah bahan bakar (LHV) (kkal/kg)

2.10 Performa Motor Bakar Bahan Bakar Gas

Bahan bakar gas dapat digunakan langsung untuk motor bakar karena BBG memiliki bilangan oktan kurang lebih 130, meskipun begitu, bagi motor bakar yang dirancang untuk menggunakan bahan bakar bensin apabila bahan bakarnya langsung diganti oleh bahan bakar gas akan menyebabkan penurunan performa yang meliputi torsi dan daya pada motor bakar tersebut. Hal ini disebabkan karena adanya pebedaan karakteristik pembakaran antara bahan bakar bensin dan gas yang menyebabkan terjadi penurunan efisiensi volumetrik pada motor bakar tersebut. (Arismunandar)

Yousufuddin dkk (2012), dalam penelitian mengungkapkan bahwa torsi yang dihasilkan oleh motor bakar sangat dipengaruhi oleh efisiensi volumetrik, dalam penelitiannya mereka membandingkan performa antara bahan bakar bensin dan *natural gas*. Dari penelitiannya didapatkan bahwa nilai torsi yang dihasilkan oleh *natural gas* lebih rendah dari pada torsi yang dihasilkan dengan bahan bakar bensin. Hal ini dikarenakan perbedaan karakteristik pembakaran antara bensin dan *natural gas*, jadi untuk motor bakar yang dirancang untuk menggunakan bahan bakar bensin apabila diganti dengan *natural gas* maka pembakaran yang terjadi didalam silinder terjadi tidak tepat waktu sehingga tenaga atau energi hasil pembakaran tidak tersalurkan dengan sempurna.

Sebab dari penurunan performa dari motor bakar yang menggunakan bahan bakar gas adalah karena waktu penyalaan busi yang awalnya di rancang untuk bahan bakar bensin tidak sesuai dengan bahan bakar gas. Sehingga pembakaran tidak terjadi tepat pada waktu piston berada pada titik mati atas, hal ini dapat mengakibatkan penyaluran tenaga hasil pembakaran melalui engkol menjadi lebih kecil dari semestinya. (Yunianto,2013)

Utama dan Setiyawan (2012) dalam penelitiannya mengemukakan dengan mengganti bahan bakar bensin menjadi CNG tanpa merubah parameter operasional motor dapat menurunkan peforma dari motor tersebut. Untuk nilai torsi yang dihasilkan bahan bakar CNG nilainya dibawah nilai torsi dari bahan bakar bensin, hal ini disebabkan waktu penyalaan motor bakar yang berbahan bakar bensin tidak cocok apabila bahan bakarnya langsung digantikan oleh CNG karena dapat menurunkan efisiensi volumetrik . Untuk nilai torsi tertinggi dari bahan bakar CNG didapatkan ketika *air fuel ratio* dalam kondisi stokiometri.

2.11 Hipotesa

Seiring dengan penambahan *air fuel ratio* dalam motor bakar *Otto* dengan bahan bakar CNG akan meningkatkan performa motor bakar hingga mencapai puncaknya pada kondisi yang mendekati sempurna hingga akhirnya performa motor bakar akan mengalami penurunan dikarenakan pembakaran yang semakin tidak sempurna dan efisiensi volumetrik yang semakin menurun.