

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Aslam (2005) melakukan penelitian tentang CNG sebagai bahan bakar alternatif untuk mobil berbahan bakar bensin pada kondisi standar tanpa modifikasi. Hasil penelitian adalah CNG menghasilkan nilai konsumsi bahan bakar spesifik yang menjadi daya, tekanan efektif rata-rata dan nilai emisi gas buang (CO, CO₂ dan HC) yang lebih rendah daripada bahan bakar bensin. Sedangkan untuk nilai efisiensi dan emisi NO_x yang lebih tinggi dari bahan bakar bensin.

Jahirul (2010) meneliti tentang perbandingan unjuk kerja dan emisi dari bahan bakar CNG dengan bensin pada mesin otto. Hasil dari penelitiannya adalah bahwa penggunaan bahan bakar CNG mempunyai nilai efisiensi panas, emisi NO_x dan suhu gas buang yang lebih tinggi daripada bahan bakar bensin. Emisi gas buang (CO, CO₂, O₂, dan HC) yang dihasilkan oleh CNG lebih rendah daripada bensin.

Putrasari (2015) melakukan studi eksperimental untuk mengevaluasi kinerja dan emisi mesin berbahan bakar CNG dengan di kondisi beban rendah dan tinggi. Penelitian ini menggunakan Unit kontrol elektronik dengan variasi tiga sistem bahan bakar yang berbeda, yaitu bensin, Konversi kit CNG yang dijual di pasaran, dan CNG kit konversi yang dirancang sendiri. Didapat bahwa emisi CO dan HC pada posisi pembukaan *throttle* 80% lebih rendah dari pada posisi pembukaan *throttle* 25%. Untuk kadar HC pada bahan bakar bensin konstan seiring dengan bertambahnya putaran, namun untuk CNG memiliki kecenderungan awal yang cukup tinggi kemudian turun dan setelah itu naik lagi. Untuk kadar CO, bahan bakar CNG turun sedangkan bahan bakar bensin naik seiring dengan bertambahnya putaran.

2.2 Massa Alir

Massa alir adalah Jumlah massa yang mengalir melalui suatu penampang dalam suatu waktu tertentu, biasanya massa alir sering dilambangkan dengan \dot{m} . Massa alir dapat dihitung dari data perbedaan tekanan aliran (ΔP) ataupun

kecepatan aliran (v). Massa alir fluida dapat dihitung menggunakan persamaan 2-1 (Cengel, 2006).

$$\dot{m} = \rho \cdot Q = \rho \cdot A \cdot v \quad (2-1)$$

Keterangan:

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

Q = debit gas [m³/s]

ρ = massa jenis gas [kg/m³]

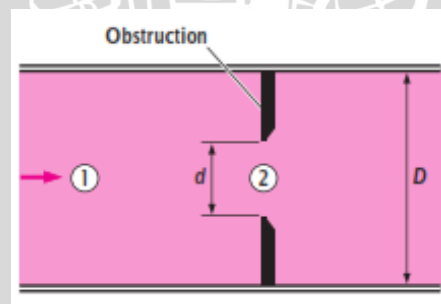
$\rho_{\text{Metana}} = 0.6604 \text{ kg/m}^3$ (Cengel, 2006)

$\rho_{\text{Udara}} = 1.176 \text{ kg/m}^3$ (Cengel, 2006)

2.3 Orifice Meter

Orifice adalah salah satu alat untuk mengukur aliran udara (*Incompressible Steady Flow*) didalam suatu pipa horisontal dengan prinsip perbedaan tekanan didalam pipa tertutup tersebut. Orifice menggunakan penampang rintangan (*obstruction*) pada di dalam pipa. Orifice sering digunakan karena geometri yang sederhana dan biaya pembuatan yang cukup mudah.

Hukum kesetimbangan massa dan persamaan Bernoulli berlaku untuk sebelum titik penampang rintang (1) dan pada titik penampang rintang (2). Cengel (2006) menjelaskan hubungan kedua hukum tersebut dapat di hitung dengan menggunakan persamaan 2-2 hingga persamaan 2-5.



Gambar 2.1 Orifice meter
Sumber : Cengel (2006:336)

- Hukum kekekalan massa:

$$\dot{V} = A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad \rightarrow \quad v_1 = \left(\frac{A_2}{A_1}\right) \cdot v_2 = \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cdot v_2 \quad (2-2)$$

- Persamaan Bernoulli ($Z_1 = Z_2$):

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2-3)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2-2) dan persamaan (2-3), maka:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(1 - \beta^4)}} \rightarrow \beta = d/D \quad (2-4)$$

Sehingga didapat persamaan massa alir:

$$\dot{m} = A_2 \cdot v_2 \cdot \rho = \left(\pi \cdot \frac{d^2}{4} \right) \cdot \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(1 - \beta^4)}} \quad (2-5)$$

Dimana :

\dot{V}	= Volum alir (m ³ /s)
v_1	= Kecepatan aliran di daerah pipa sebelum <i>orifice</i> (m/s)
v_2	= Kecepatan aliran di daerah <i>orifice</i> (m/s)
d	= Diameter penampang pipa (m ²)
D	= Diameter penampang <i>Obstruction</i> (m ²)
P_2	= Tekanan fluida di daerah <i>orifice</i> (N/m ²)
P_1	= Tekanan fluida pada pipa sebelum <i>orifice</i> (N/m ²)
g	= Percepatan gravitasi bumi

2.4 Motor Bensin

Motor bensin adalah salah suatu mesin pembakaran dalam (*Internal Combustion Engine*) yang memiliki prinsip mengubah energi kimia dari bahan bakar bensin 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 bensin yang terjadi di ruang bakar (*Combustion Chamber*) dengan bantuan percikan api yang berasal dari busi untuk menghasilkan gas pembakaran.

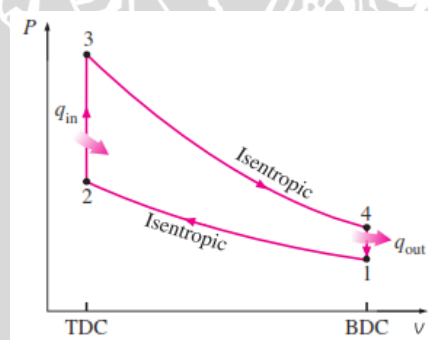
2.4.1 Siklus Termodinamika Motor Bensin

Siklus termodinamika adalah serangkaian proses termodinamika yang menggambarkan transfer panas dan kerja dalam berbagai keadaan (tekanan,

temperatur, dan keadaan lainnya). Siklus aktual dari proses kerja motor bakar sangat kompleks untuk digambarkan, karena itu pada umumnya siklus motor bakar didekati dalam bentuk siklus udara standar (*air standar cycle*). Dalam *air standar cycle* fluida kerja menggunakan udara, dan pembakaran bahan bakar diganti dengan pemberian panas dari luar. 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.

2.4.2 Siklus Otto

Siklus standar udara pada motor bensin disebut Siklus Otto, Pemberian nama siklus tersebut berasal dari nama penemunya, yaitu Nicolaus August Otto seorang ilmuwan Jerman 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.

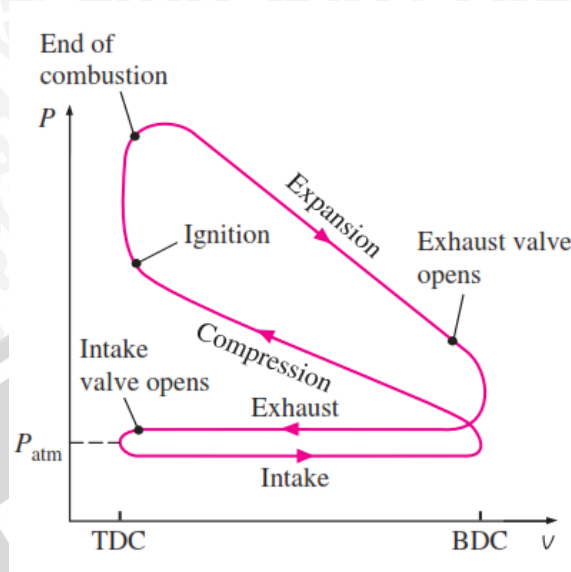


Gambar 2.2 Siklus Ideal Otto
Sumber : Cengel (1994:494)

Langkah dari Siklus Otto terdiri dari :

1. Proses 1-2 adalah langkah kompresi pada keadaan entropi konstan (*Isentropic*).
2. Proses 2-3 adalah proses pemasukan kalor pada volume konstan (*Isochoric*).
3. Proses 3-4 adalah langkah ekspansi pada keadaan entropi konstan (*Isentropic*).
4. Proses 4-1 adalah proses pembuangan panas pada volume konstan (*Isochoric*).

Siklus otto aktual dapat dilihat pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.3 Siklus Aktual Otto
Sumber : Cengel (1994:494)

2.4.3 Prinsip Kerja Motor Bensin 4 Langkah

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

a. Langkah Isap (*Suction Stroke*)

Piston 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 piston tersebut sehingga campuran udara dan bahan bakar pada motor bensin dapat masuk ke ruang bakar

b. Langkah Kompresi (*Compression Stroke*)

Piston bergerak dari posisi TMB ke TMA dengan KI dan KB tertutup. Karena gerakan piston tersebut sehingga terjadi proses kompresi yang mengakibatkan tekanan dan temperatur di silinder naik.

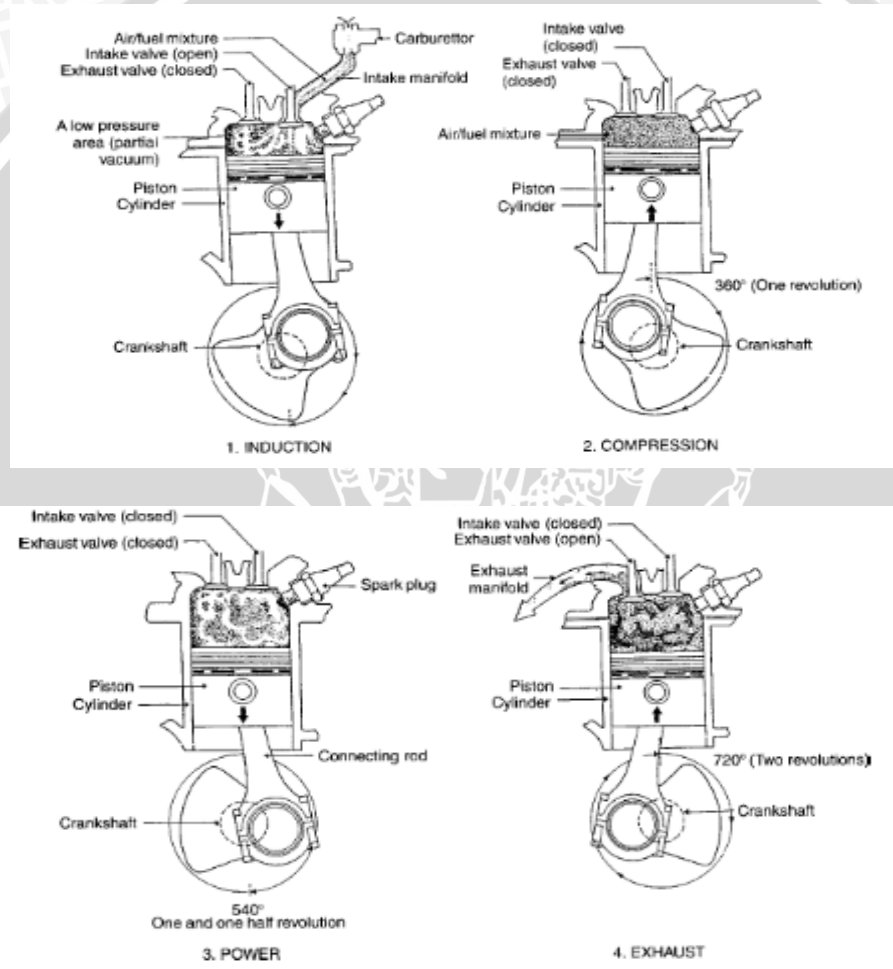
c. Langkah Ekspansi (*Expansion Stroke*)

Sebelum posisi piston mencapai TMA pada langkah kompresi, busi akan memercik api, sehingga terjadi proses pembakaran. Akibatnya tekanan dan temperatur di ruang bakar naik lebih tinggi. Sehingga piston mampu melakukan langkah ekspansi atau langkah kerja. Langkah kerja dimulai dari posisi piston

pada TMA dan berakhir pada posisi TMB saat KB mulai terbuka pada langkah buang.

d. Langkah Buang (*Exhaust Stroke*)

Piston 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 piston di dalam silinder motor bakar 4 langkah tersebut ditunjukkan dalam gambar dibawah ini :



Gambar 2.4 Skema Langkah Kerja Motor Bakar 4 Langkah
Sumber : Bonick (2011:10)

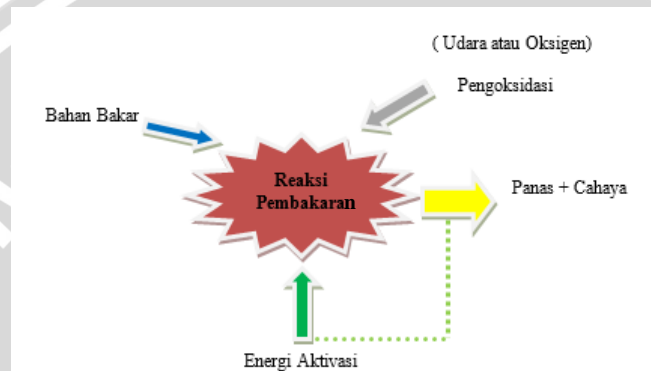
2.4.4 Pembakaran Pada Motor Bensin

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, 2008). Syarat terjadinya pembakaran ada 3, yaitu :

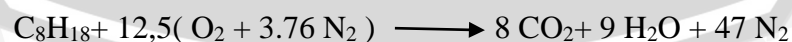
1. Bahan bakar
2. Pengoksidasi (oksigen atau udara)
3. Energi aktivasi

Dapat dilihat pada gambar 2.5, jika salah satu dari ke 3 unsur tersebut dihilangkan atau ke 3 unsur bergabung dalam komposisi yang tidak tepat maka pembakaran tidak akan terjadi.



Gambar 2.5 Ilustrasi Proses Pembakaran
Sumber : Wardana (2008:1)

Pembakaran pada motor bensin 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 dibawah ini (Wardana, 2008) :



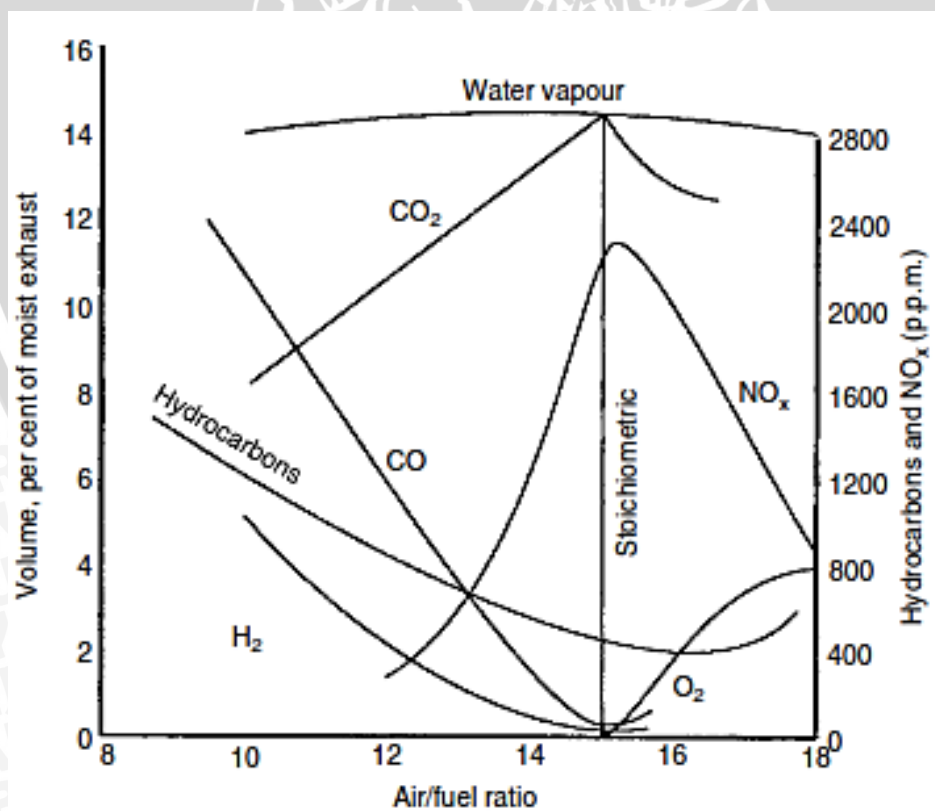
2.4.5 AFR (*Air Fuel Ratio*)

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 (Wardana, 2008):

$$AFR = \left(\frac{\text{Mol udara}}{\text{Mol bahan bakar}} \right) \quad (2-6)$$

$$AFR = \left(\frac{\text{Massa udara}}{\text{Massa bahan bakar}} \right) \quad (2-7)$$

AFR juga dapat dinyatakan dalam perbandingan *volume* karena sebanding dengan perbandingan mol. Perbandingan *volume* ini sering digunakan untuk bahan bakar gas. Nilai AFR stokiometri dari bahan bakar bensin adalah 14.6, sedangkan untuk metana adalah 17.2. Nilai AFR sangat mempengaruhi volume dari gas buang, dapat dilihat di gambar 2.6 bahwa saat AFR semakin kecil terhadap nilai stokiometri emisi CO dan HC mengalami kenaikan sedangkan CO₂ mengalami penurunan, hal ini dikarenakan pembakaran tersebut berlangsung pada saat keadaan terlalu banyak bahan bakar dibandingkan udara. Dapat dilihat juga semakin tinggi nilai AFR dari garis stokiometri maka volume dari O₂ semakin naik sedangkan CO₂ menurun, ini dikarenakan pembakaran tersebut berlangsung pada saat keadaan terlalu banyak udara dibandingkan bahan bakarnya. Untuk kadar emisi HC dan CO saat keadaan lebih besar nilai AFR stokiometri mengalami sedikit kenaikan dikarenakan kegagalan dalam pembakaran dan suhu pembakaran yang rendah.



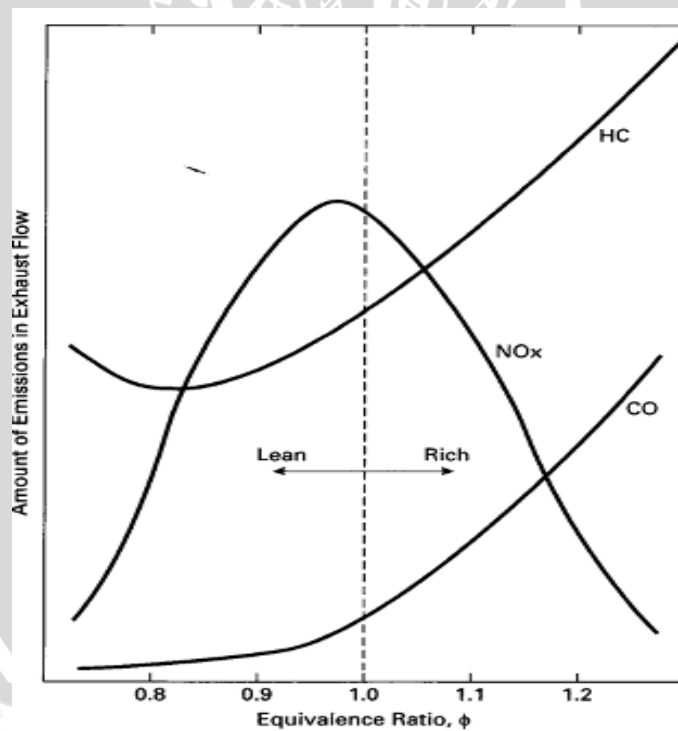
Gambar 2.6 Grafik hubungan antara volume emisi gas buang terhadap AFR
 Sumber : Martyr (2007:327)

2.4.6 Rasio Ekuivalen (*Equivalent Ratio*, Φ)

Equivalent ratio (Φ) adalah perbandingan antara AFR teoritis dengan AFR aktual, dengan rumus sebagai berikut (Wardana, 2008):

$$\Phi = \frac{\text{AFR stoikhiometri}}{\text{AFR aktual}} \quad (2-8)$$

Biasanya metode ini digunakan untuk mengetahui pada suatu proses pembakaran campuran udara dan bahan bakar merupakan campuran kaya, miskin, atau stoikhiometri. Campuran kaya (*fuel-rich mixture*) adalah campuran lebih banyak mengandung bahan bakar dibanding udara. Campuran miskin (*fuel-lean mixture*) adalah sebaliknya. Sedangkan campuran stoikhiometri adalah keadaan dimana campuran tepat pada takaran / porsi nya. Cara mengetahuinya dengan melihat nilai *Equivalent ratio* (Φ) nya, jika $\Phi > 1$, maka campuran tersebut termasuk campuran kaya. Jika $\Phi < 1$ maka campuran tersebut termasuk campuran miskin. Campuran tersebut dikatakan campuran stoikhiometri apabila $\Phi = 1$.



Gambar 2.7 Grafik hubungan emisi gas buang terhadap *Equivalent ratio*
Sumber : Pulkrabek (1997:279)

Equivalent ratio (Φ) sangat berpengaruh terhadap emisi pada suatu pembakaran. Dapat dilihat pada gambar 2.6 bahwa $\Phi > 1$ maka oksigen tidak cukup

bereaksi dengan karbon dan hidrogen sehingga akan meningkatkan emisi HC dan CO. Pada saat $\Phi < 1$ grafik HC mengalami sedikit kenaikan dikarenakan pembakaran miskin bahan bakar.

2.5 Bahan Bakar Motor Bensin

Bahan bakar adalah suatu materi yang akan diubah menjadi energi oleh reaksi eksotermal pada proses pembakaran. 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, 2008). Pada motor bensin terdapat dua jenis bahan bakar yang dapat digunakan yaitu bahan bakar minyak dan gas. Bahan bakar motor bensin yang umum digunakan saat ini adalah bahan bakar minyak. Bensin yang biasanya digunakan sebagai bahan bakar di dapatkan dari proses destilasi bertingkat dari minyak bumi yang dirubah menjadi berbagai jenis bahan bakar seperti bensin, solar, kerosin, minyak diesel, dll. Bilangan oktan suatu bahan bakar diukur dengan mesin CFR (*Coordinating Fuel Research*), yaitu sebuah mesin pengujian 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*. Senyawa oktana adalah senyawa hidrokarbon yang digunakan sebagai patokan untuk menentukan kualitas bahan bakar bensin yang dikenal dengan istilah angka oktana.

2.5.1 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.

2.5.2 Bahan Bakar Gas

Gas alam juga diperoleh dari bahan bakar fosil, yang hampir sama dengan bahan bakar minyak. Akan tetapi, gas alam dapat dianggap sebagai energi terbarukan karena daur ulang gas metana. Sayangnya, kekuatan yang dihasilkan dari bahan bakar gas alam tidak setinggi kekuatan yang dihasilkan oleh bahan bakar minyak (Tahir dkk, 2015). Adapun kandungan dalam bahan bakar gas dapat dilihat pada Tabel 2.1. Sementara itu, perbandingan sifat fisis antara bahan bakar gas dengan bahan bakar cair dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.1. Kandungan dalam bahan bakar gas

Constituent	Volume (%)
Methane	95.3
Ethane	2.16
Propane	0.19
N-Butane	0.02
Iso-Butane	0.02
N-Pentane	0.00
Iso-Pentane	0.01
Hexanes plus	0.00
Nitrogen	1.86
Carbon Dioxide	0.44
Oxygen	0.00
Hydrogen	0.00

Sumber: (Tahir dkk, 2015)

Tabel 2.2 Perbandingan sifat fisis antara bahan bakar gas dengan bahan bakar cair

Properties	Liquid fuel	Natural gas
Density(kg/cm ³)	750	0.725
Lower heating value (Mj/kg)	44	45
Octane number	95	120
Auto ignition temp. (oC)	280	650

Sumber: (Tahir dkk, 2015)

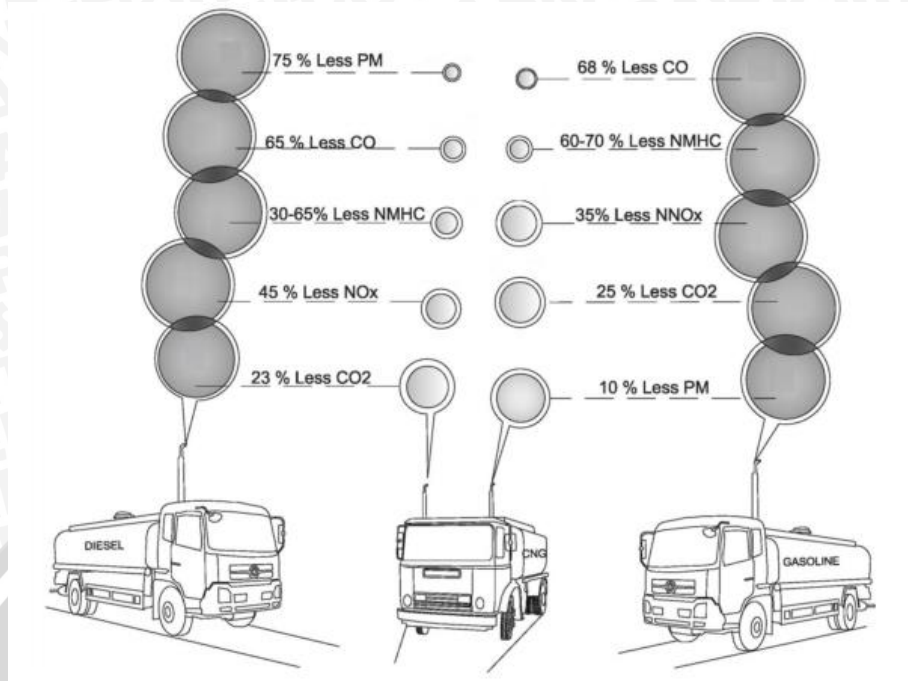
Biasanya di pasaran, gas alam dapat dijual dan didistribusikan dalam dua macam yaitu LNG (*Liquid Natural Gas*) dan CNG (*Compressed Natural Gas*), kedua gas tersebut kandungan utamanya adalah metana (Pourkhesalian, 2010). LNG dibentuk dari pendinginan gas alam kemudian dikondensasi menjadi bentuk cair yang memiliki massa jenis lebih besar daripada CNG yang berbentuk gas.

Biasanya LNG digunakan untuk bahan bakar kendaraan besar untuk jarak jauh dan CNG untuk kendaraan kecil yang dijalankan di kota (Hasan, 2013).

2.6 *Compressed Natural Gas (CNG)*

CNG merupakan bahan bakar alternatif yang menarik untuk digunakan pada kendaraan. Hal tersebut dikarenakan CNG merupakan bahan bakar yang relatif bersih dibandingkan dengan bensin. Kandungan CNG pada umumnya terdiri dari 85-95% metana (CH_4) yang merupakan molekul hidrokarbon terpendek dan teringan. Sementara itu 5-10% kandungan CNG terdiri dari gas hidrokarbon yang lebih berat, seperti etana (C_2H_6), propana (C_3H_8), butana (C_4H_{10}) serta gas-gas lainnya dalam jumlah yang bervariasi (Gosal dkk, 2013).

CNG telah digunakan dan diteliti sebagai bahan bakar mesin dengan berbagai alasan. Alasan pertama adalah komposisi CNG sebagian besar tersusun atas metana yang memiliki rasio H/C tinggi sehingga dapat emisi gas berbahaya yang dihasilkan dari proses pembakaran. Kedua, densitas CNG lebih rendah daripada udara segar, sehingga apabila terjadi kebocoran baik di tangki maupun di sistem saluran bahan bakar maka CNG akan menguap ke atas udara dengan cepat. Ketiga, karena CNG berwujud gas, sehingga tidak perlu diuapkan terlebih dahulu seperti pada bensin. Selain itu, nilai oktan CNG juga lebih tinggi daripada bensin yaitu sekitar 120 sampai 130. Karena properti ini, pengurangan detonasi akan terjadi di mesin bensin dengan rasio kompresi yang lebih tinggi. Keuntungan penggunaan CNG pada proses pembakaran adalah pembakaran sempurna akan lebih mudah dihasilkan karena CNG memiliki rasio H/C tinggi. Selain itu, CNG merupakan fase gas yang mudah dicampur dengan udara segar, sehingga fraksi O akan juga mudah bereaksi dengan fraksi H maka hasil reaksi pembakaran adalah CO_2 bukan CO. Selain itu, karena jumlah atom atom karbon dalam molekul CNG lebih rendah dari bensin, maka CO yang dihasilkan dari proses pembakaran akan lebih rendah (Putrasari dkk, 2015). Kendaraan berbahan bakar CNG akan menghasilkan efek gas rumah kaca lebih sedikit dibandingkan dengan kendaraan berbahan bakar bensin maupun diesel (Khan dkk, 2015), seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.8.



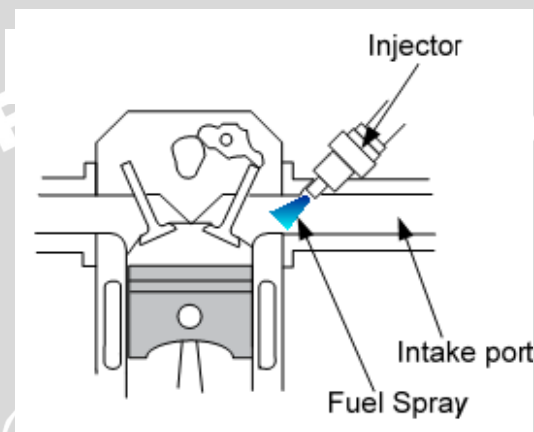
Gambar 2.8 Ilustrasi perbandingan emisi gas buang dari kendaraan yang menggunakan bahan bakar diesel (kiri), CNG (tengah), dan bensin (kanan)
Sumber: (Khan dkk, 2015)

2.7 Sistem Injeksi Bahan Bakar

Dalam mesin pembakaran dalam, 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. Sistem injeksi bahan bakar memiliki fungsi menyalurkan bahan bakar menuju silinder ruang bakar yang berasal dari tekanan dari pompa bahan bakar. Sistem injeksi bahan bakar biasa digunakan pada mesin diesel yang memiliki viskositas bahan bakar yang tinggi dan membutuhkan tekanan tinggi untuk mengkompresi udara dalam silinder ruang bakar. Pada injektor bahan bakar mesin diesel bersifat *intermittent*. Injektor ditentukan oleh parameter waktu penyemprotan dan kapasitas bahan bakar yang masuk ke dalam ruang bakar.

Sekarang sistem injeksi bahan bakar digunakan pada mesin bensin sebagai pengganti karburator. Pada mesin bensin yang masih menggunakan karburator, bahan bakar akan tercampur dengan udara sebelum masuk *intake manifold* menggunakan prinsip mekanis venturi. Sedangkan mesin bensin yang menggunakan sistem injeksi bahan bakar, bahan bakar akan disemprotkan saat

udara mengalir dekat *intake valve*. Cara kerjanya adalah dengan menentukan jumlah campuran bahan bakar dan udara yang ideal untuk dimasukkan ke dalam ruang bakar melalui saluran masuk yang jumlahnya diukur oleh sensor aliran udara (*mass air flow sensor*) terhubung dengan ECU (Elektronik Control Unit) yang kemudian diproses oleh ECM (*Electronic Control Module*) sehingga dapat ditentukan jumlah bahan bakar yang dapat disemprotkan oleh injektor. Idealnya untuk setiap 14,7 gram udara masuk diinjeksikan 1 gram bensin dan disesuaikan dengan kondisi panas mesin dan udara sekitar serta beban kendaraan.



Gambar 2.9 Sistem Injeksi Tidak Langsung
Sumber : Celik (2011 : 8)

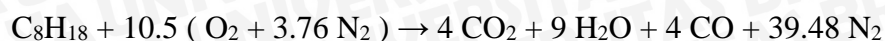
2.8 Emisi Gas Buang

Emisi gas buang adalah sisa hasil pembakaran kendaraan bermotor adalah karbon dioksida (CO_2), Nitrogen (N_2), karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), partikulat (PM) dan non-metana hidrokarbon (NMHC) (Khan dkk, 2015).

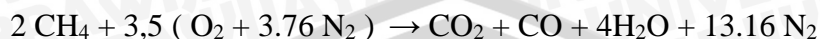
2.8.1 Karbonmonoksida (CO)

Karbon monoksida merupakan gas yang tidak berwarna, tidak berbau, dan diproduksi terutama sebagai hasil pembakaran tidak sempurna dari bahan bakar fosil. Ketika karbon monoksida bereaksi dengan O_3 di bagian atas atmosfer, maka akan dihasilkan CO_2 yang dapat merusak lapisan ozon. Karbon monoksida dibentuk oleh pembakaran yang tidak sempurna, yang terjadi ketika adanya kekurangan suplai oksigen di dekat bahan bakar (hidrokarbon) untuk pembakaran sempurna atau ketika pembakaran padam di dekat permukaan yang dingin di dalam silinder

(Khan dkk, 2015). Reaksi terbentuknya gas CO pada ruang bakar di dalam motor berbahan bakar bensin sebagai berikut (Syahrani, 2006):

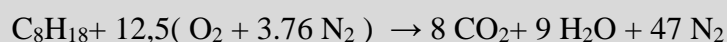


Reaksi terbentuknya gas CO jika menggunakan bahan bakar metana adalah sebagai berikut :



2.8.2 Karbondioksida (CO₂)

Karbondioksida adalah senyawa yang berbentuk gas pada suhu kamar (25⁰C), tak berbau dan tak menyala (jkl);.Karbon dioksida adalah sumber utama emisi kendaraan bermotor, karena merupakan hasil alamiah dari pembakaran bahan bakar berbasis karbon seperti diesel dan bensin. Konsentrasi CO₂ menunjukkan secara langsung status proses pembakaran di ruang bakar, semakin tinggi maka semakin baik (Bachri, 2009). Emisi dari pembakaran bahan bakar sangat tergantung pada rasio hidrogen terhadap karbon (H/C) dari bahan bakar. Semakin tinggi rasio hidrogen terhadap karbon (H/C) dari bahan bakar, maka jumlah CO dan CO₂ yang dihasilkan akan lebih rendah (Khan dkk, 2015). CNG memiliki rasio hidrogen terhadap karbon (H/C) tertinggi (hampir 4: 1) dibandingkan dengan bensin (2,3 : 1) maupun bahan bakar diesel (1,95 : 1). Hal ini menyebabkan emisi CO₂ dari bahan bakar CNG lebih rendah daripada bensin atau solar (Mctaggart dkk, 2008). Emisi CO₂ dari mesin yang menggunakan bahan bakar CNG dapat menurun lebih dari 20% dibandingkan dengan mesin bensin yang beroperasi pada kondisi yang sama (Kato dkk, 2001). Reaksi terbentuknya gas CO₂ pada ruang bakar di dalam motor berbahan bakar bensin sebagai berikut (Syahrani, 2006):



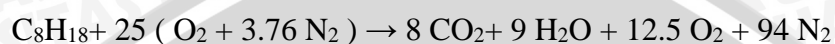
Reaksi terbentuknya gas CO₂ jika menggunakan bahan bakar metana adalah sebagai berikut



2.8.3 Oksigen (O₂)

Oksigen atau zat asam adalah unsur kimia dalam sistem tabel periodik yang mempunyai lambang O dan nomor atom 8 yang tidak berwarna, tidak berasa, dan tidak berbau. Pada temperatur dan tekanan standar, dua atom unsur ini berikatan

menjadi dioksigen, yaitu senyawa gas diatomik dengan rumus O_2 . Konsentrasi dari oksigen di gas buang kendaraan berbanding terbalik dengan konsentrasi CO_2 . Untuk mendapatkan proses pembakaran yang sempurna, maka kadar oksigen yang masuk ke ruang bakar harus mencukupi untuk setiap molekul hidrokarbon, jika tidak maka mesin akan menyisakan oksigen keudara. Reaksi terbentuknya gas O_2 pada ruang bakar di dalam motor berbahan bakar bensin sebagai berikut (Syahrani, 2006):



Reaksi terbentuknya gas O_2 jika menggunakan bahan bakar metana adalah sebagai berikut



2.8.4 Hidratkarbon (HC)

Emisi HC sangat dipengaruhi oleh kualitas proses pembakaran di dalam silinder mesin (Spree, 2014). Hidratkarbon (HC) adalah ikatan unsur dari hidrogen dan karbon yang tidak terbakar pada saat proses pembakaran tidak sempurna di ruang bakar dimana hanya sebagian bahan bakar bereaksi dengan oksigen terutama di dekat dinding silinder antara silinder dan torak, hal ini pada umumnya disebabkan karena rendahnya temperatur pembakaran. Hidratkarbon dapat keluar tidak hanya kalau campuran udara bahan bakarnya gemuk, tetapi bisa saja kalau campurannya kurus. Sumber emisi HC dapat disebabkan juga oleh bahan bakar yang terpecah karena reaksi panas berubah menjadi gugusan HC lain yang keluar bersama gas buang. Reaksinya sebagai berikut (Syahrani, 2006) :



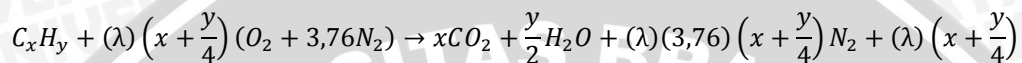
Dampak dari emisi hidratkarbon diantaranya dapat menyebabkan berbagai macam penyakit hingga kematian pada manusia jika terhirup terus-menerus, selain itu dapat juga merusak sel dari tanaman dan perubahan gen pada hewan. Jika suhu pembakaran rendah dan perambatan nyala api lemah serta luasan dinding ruang bakarnya yang bersuhu rendah agak besar, kondisi ini terutama dijumpai pada saat motor baru dihidupkan atau pada putaran bebas (*idle*) maka secara alamiah motor akan banyak menghasilkan emisi hidratkarbon (Kristanto, 1999).

2.8.5 Excess Air (λ)

Udara berlebih (*excess air*) adalah penambahan jumlah udara pada proses pembakaran dengan tujuan menambah kemungkinan agar terjadi proses pembakaran sempurna. Persentase udara berlebih (*excess air*) dilambangkan dengan λ . Udara berlebih (*excess air*) dirumuskan sebagai berikut (Wardana, 2008):

$$\lambda = \frac{AFR_{Actual} - AFR_{stoik}}{AFR_{stoik}} \times 100\% \quad (2-9)$$

Sehingga persamaan reaksi dapat ditulis sebagai berikut:



Dalam hal ini baik AFR_{actual} maupun $AFR_{stoikiometri}$ bisa dalam perbandingan mol atau perbandingan berat. Jumlah minimum udara yang dibutuhkan untuk pembakaran sempurna dari suatu bahan bakar yang disebut dengan *theoretical air* atau udara teoritis. Tetapi kenyataannya sulit untuk mencapai pembakaran sempurna dengan udara teoritis hal ini dipengaruhi lingkungan maupun konstruksi peralatan pembakaran seperti ruang bakar mesin bensin. Sehingga kebanyakan suatu proses pembakaran disuplai dengan *excess air* atau udara lebih agar semua bahan bakar bereaksi sempurna dengan udara. Hubungan antara udara teoritis dan persen udara lebih sebagai berikut:

$$\text{Udara teoritis} = 100\% + \text{excess air}$$

$$\text{Udara teoritis} = (100\% + \lambda)\%$$

$$\lambda = \text{udara teoritis} - 100\%$$

2.9 Hipotesis

Semakin besar *equivalent ratio* pada motor bensin 4 langkah dengan sistem injeksi akan menghasilkan tingkat emisi CO dan HC yang semakin rendah, sedangkan nilai emisi CO₂ yang semakin naik hingga titik stoikhiometri kemudian turun kembali, untuk gas O₂ dan excess air mengalami penurunan. Hal tersebut terjadi dikarenakan pembakaran tidak sempurna akibat campuran kaya bahan bakar akibat penambahan *equivalent ratio*.