

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Aslam, dkk (2005) meneliti tentang Bahan bakar CNG sebagai alternatif bahan bakar untuk kendaraan mesin bensin. Berdasarkan penelitian tersebut bahan bakar CNG menghasilkan nilai konsumsi bahan bakar spesifik yang menjadi daya, tekanan efektif rata-rata dan nilai emisi gas buang (CO, CO<sub>2</sub> dan HC) yang lebih rendah daripada bahan bakar bensin. Sedangkan untuk nilai efisiensi dan emisi NO<sub>x</sub> yang lebih tinggi dari bahan bakar bensin.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Jahirul, dkk (2010) meneliti tentang perbandingan unjuk kerja dan emisi dari bahan bakar CNG dengan bensin pada mesin otto. Hasil dari penelitiannya adalah bahwa bahan bakar mesin dengan bahan bakar CNG mempunyai nilai efisiensi panas, emisi NO<sub>x</sub> dan suhu gas buang yang lebih tinggi daripada bahan bakar bensin. Sedangkan untuk nilai daya, konsumsi bahan bakar spesifik yang menjadi daya, Emisi gas buang (CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, dan HC) yang dihasilkan oleh CNG lebih rendah daripada bensin.

#### 2.2 Motor Bensin

Motor bensin adalah suatu mesin tipe pembakaran dalam (*Internal Combustion Engine*) yang dapat mengubah 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.

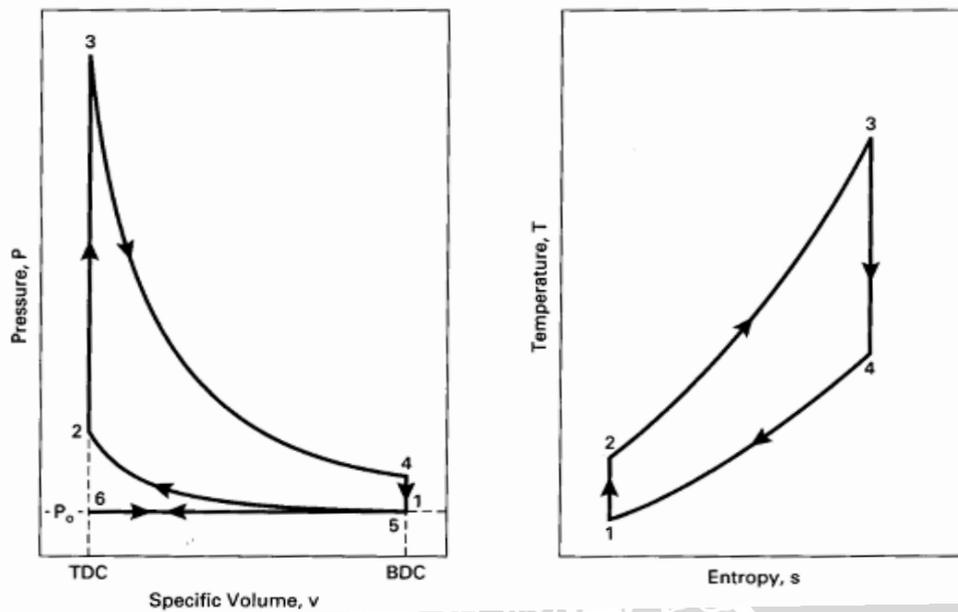
##### 2.2.1 Siklus Termodinamika Motor Bakar

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.

### 2.2.2 Siklus Otto

Siklus standar udara pada motor bensin disebut Siklus Otto, berasal dari nama penemunya, yaitu Nikolaus August Otto seorang ilmuwan 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 :

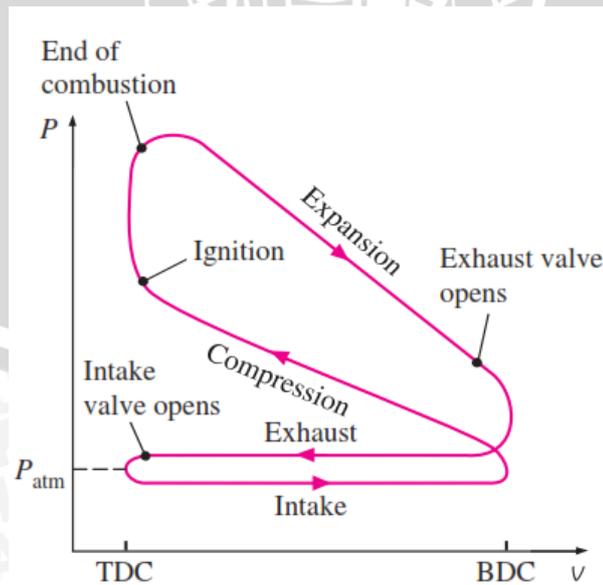
1. Proses 6-1 adalah langkah hisap yang terjadi pada tekanan konstan (*Isobaric*) dan temperatur konstan (*Isotermic*).
2. Proses 1-2 adalah langkah kompresi pada keadaan entropi konstan (*Isentropic*).
3. Proses 2-3 adalah proses pemasukan kalor pada volume konstan (*Isokhorik*).
4. Proses 3-4 adalah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

Menurut Arismunandar W. (1988) dalam kenyataanya baik siklus volume konstan, tekanan konstan dan gabungan tidak mungkin dapat dilaksanakan, karena

adanya beberapa hal sebagai berikut :

- Fluida kerja bukanlah udara yang bisa dianggap sebagai gas ideal, karena fluida kerja disini adalah campuran bahan bakar (*premium*) dan udara.
- Kebocoran fluida kerja pada katup (*valve*), baik katup masuk maupun katup buang, juga kebocoran pada piston dan dinding silinder.
- Baik katup masuk maupun katup buang tidak dibuka dan ditutup tepat pada saat piston berada pada posisi TMA dan atau TMB, karena dinamika mekanisme katup.
- Pada motor bakar torak yang sebenarnya, pada saat torak di TMA tidak terjadi proses pemasukan kalor seperti pada siklus udara. Kenaikan tekanan dan temperature fluida kerja disebabkan proses pembakaran campuran udara dan bahan bakar dalam silinder.
- Proses pembakaran memerlukan waktu untuk perambatan nyala apinya. 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 pembakaran tidak berlangsung pada volume atau tekanan konstan.
- Terdapat kerugian akibat perpindahan kalor dari fluida kerja ke fluida pendingin, terutama saat proses kompresi, ekspansi dan langkah buang meninggalkan silinder.
- Adanya kerugian energi akibat adanya gesekan antara fluida kerja dengan dinding silinder dan mesin.
- Terdapat kerugian energi kalor yang dibawa oleh gas buang dari dalam silinder ke atmosfer sekitarnya.

Siklus otto aktual dapat dilihat pada gambar 2.2 di bawah ini :



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

### 2.2.3 Prinsip Kerja Motor Bensin 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 Titik Mati Atas (TMA) ke Titik Mati Bawah (TMB), dengan katup Katup Isap (KI) terbuka dan katup Katup Buang (KB) tertutup. Karena gerakan torak tersebut maka campuran bahan bakar dengan udara pada motor bensin 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 yang mengakibatkan tekanan dan temperatur di silinder naik.

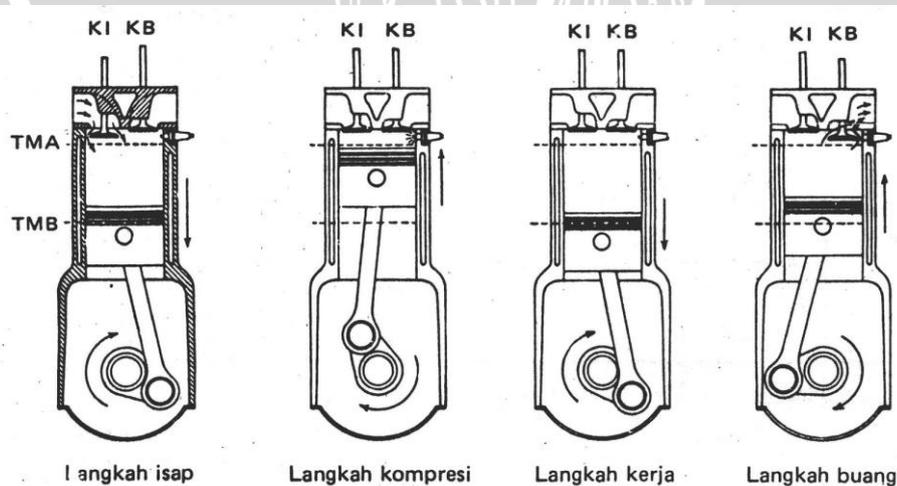
#### c. Langkah Ekspansi (*Expansion Stroke*)

Sebelum posisi torak mencapai TMA pada langkah kompresi, pada motor bensin 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 2.3 dibawah ini :



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

### 2.2.4 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

Secara umum persamaan reaksi pembakaran dapat dituliskan sebagai berikut:



Dapat dilihat pada gambar 2.4, jika salah satu dari ke 3 unsur tersebut dihilangkan atau ke 3 unsur bergabung dalam komposisi yang tidak tepat maka pembakaran tidak akan terjadi atau api tidak akan muncul.

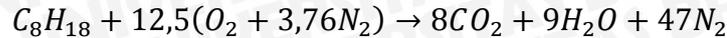


Gambar 2.4 Ilustrasi Proses Pembakaran

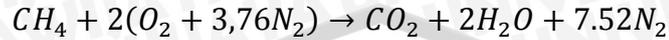
Sumber : Wardana (2008 : 1)

Pembakaran pada 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 berikut :



Sedangkan untuk proses pembakaran secara teoritis bahan bakar metana (CH<sub>4</sub>) dapat dilihat pada reaksi berikut :



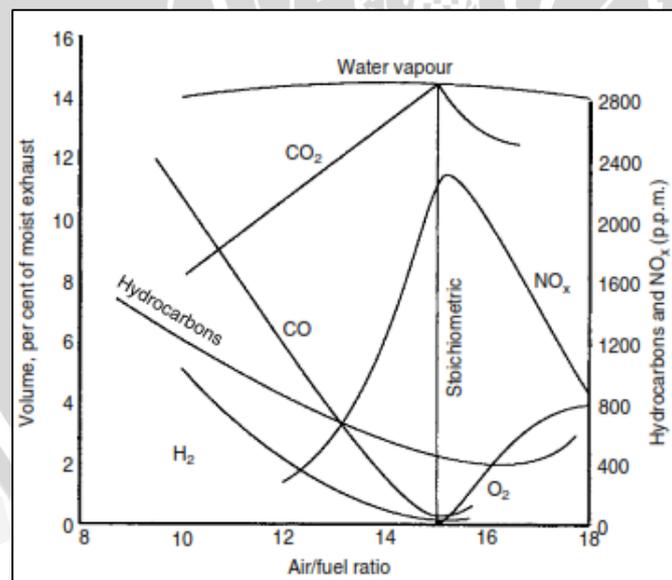
### 2.2.5 AFR (Air Fuel Ratio)

*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:

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

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

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.



Gambar 2.5 Grafik hubungan antara volume emisi gas buang terhadap AFR  
Sumber : Martyr (2007 : 327)

Nilai AFR sangat mempengaruhi volume dari gas buang, dapat dilihat pada Gambar 2.5 bahwa jika AFR semakin kecil emisi CO, O<sub>2</sub> dan HC mengalami penurunan, sedangkan CO<sub>2</sub> mengalami kenaikan, hal ini dikarenakan pembakaran pada sisi sebelah

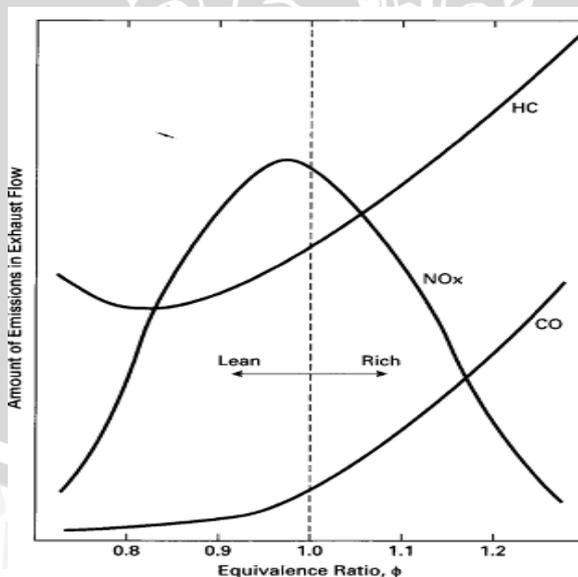
kanan garis stoikhiometri berlangsung pada saat keadaan terlalu banyak udara dibandingkan bahan bakar yang bisa menyebabkan kegagalan pembakaran. Dapat dilihat juga semakin rendah nilai AFR ditunjukkan daerah sebelah kiri garis stokiometri maka volume dari CO<sub>2</sub> menurun, sedangkan nilai HC dan CO meningkat, hal ini dikarenakan pembakaran tersebut berlangsung pada saat keadaan terlalu banyak bahan bakar dibandingkan udara.

### 2.2.6 Rasio Ekuivalen (*Equivalent Ratio*, $\Phi$ )

*Equivalent ratio* ( $\Phi$ ) adalah perbandingan antara AFR teoritis dengan AFR aktual, dengan rumus sebagai berikut:

$$\Phi = \frac{\text{AFR stoik}}{\text{AFR aktual}} \quad (2-3)$$

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. Cara mengetahuinya dengan melihat nilai *Equivalent ratio* ( $\Phi$ ) nya, jika  $\Phi > 1$ , maka campuran tersebut termasuk campuran kaya. Jika  $\Phi < 1$  maka campuran tersebut termasuk campuran miskin. Campuran tersebut dikatakan stoikhiometri apabila  $\Phi = 1$ .



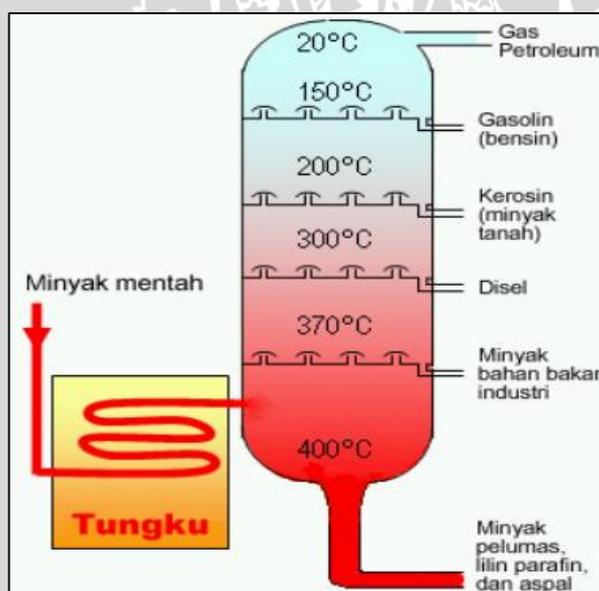
Gambar 2.6 Grafik hubungan emisi gas buang terhadap *Equivalent ratio*  
Sumber : Pulkrabek (1997 : 279)

*Equivalent ratio* ( $\Phi$ ) 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 kenaikan dikarenakan kegagalan dan miskinnya pembakaran.

### 2.3 Bahan Bakar Motor Bensin

Bahan bakar adalah suatu materi yang akan diubah menjadi energi oleh reaksi eksotermal pada proses pembakaran. Pada motor bensin 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<sub>2</sub>), karbondioksida (CO<sub>2</sub>), dan air (H<sub>2</sub>O) (Wardana, 2008). Bahan Bakar motor bensin 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 yang dirubah menjadi berbagi jenis bahan bakar seperti bensin, solar, kerosin, minyak diesel, dll.



Gambar 2.7 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

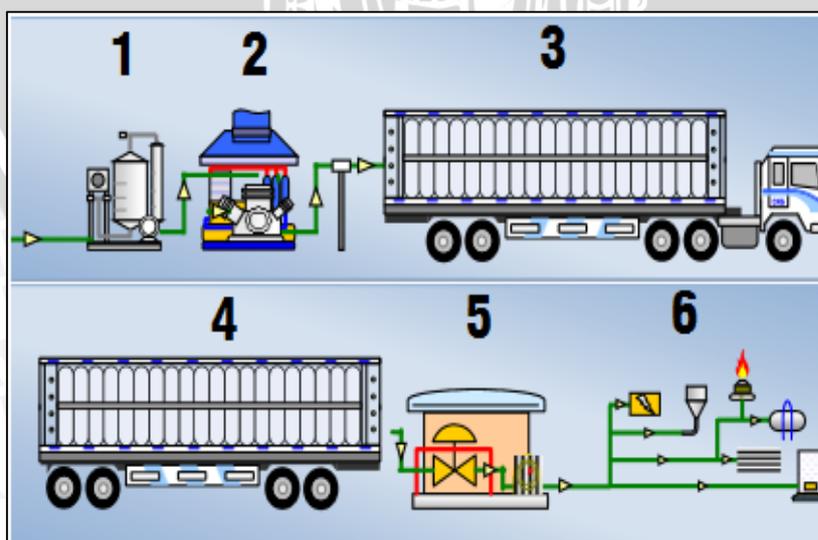
menghasilkan berbagai jenis bahan bakar dengan kualitas berbeda-beda. Minyak dan gas terbentuk dari siklus alami yang dimulai dari sedimentasi sisa-sisa tumbuhan dan binatang yang terperangkap selama jutaan tahun. Pada umumnya terjadi jauh dibawah dasar lautan. Material-material organik tersebut berubah menjadi minyak dan gas akibat efek kombinasi 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

Bahan bakar gas adalah gas bumi yang transparan, tidak berwarna yang berasal dari sumur-sumur pengeboran minyak dan batu bara secara alami maupun gasifikasi. Bahan bakar gas dapat diklasifikasikan menjadi 2, yaitu gas alam (natural gas) dan *manufacturer gas*. Contoh dari gas alam adalah Metana, sedangkan contoh dari *manufacturer gas* adalah LPG. Kandungan bahan bakar gas yang mudah terbakar adalah senyawa  $\text{CH}_4$  dan  $\text{H}_2$  dengan komposisi yang berbeda-beda sesuai dengan jenis bahan bakarnya (Wardana, 2008).

### 2.4 CNG

*Compressed Natural Gas* disingkat CNG atau dalam bahasa indonesia diartikan gas alam terkompresi yang dibuat dari metana ( $\text{CH}_4$ ) yang dikompresi dalam bejana silinder untuk penyimpanan dan distribusi hingga tekanan 200 – 250 bar (2900 – 3600 psi) dengan menggunakan pipa maupun berbagai jenis alat transportasi. Pada gambar 2.8 adalah gambaran mengenai konsep distribusi CNG.



Gambar 2.8 Distribusi CNG  
Sumber : Dokumentasi Pribadi

## Keterangan :

1. Gas alam dari sumur-sumur pengeboran minyak dan batubara secara alami maupun gasifikasi dialirkan pada jaringan pipa yang bertekanan rendah antara 1-20 bar kemudian masuk ke dalam *Dryer* untuk dihilangkan kandungan airnya agar dalam penyimpanan dalam tabung tidak menyebabkan karat yang dapat merusak tanki penyimpanan.
2. Dengan menggunakan kompresor, gas alam ditekan/dimampatkan hingga tekananya sebesar 200-250 bar, sehingga produk ini disebut CNG (*Compressed Natural Gas*). Kompresor untuk proses pemampatan ini dilengkapi dengan alat penukar panas (*heat exchanger*) untuk menurunkan suhu gas alam yang naik setelah dikompresi.
3. CNG ditempatkan kedalam tabung khusus CNG yang dinamakan *mobile cylinder* yang disambungkan satu sama lain dan didistribusikan dengan sistem transportasi
4. *Mobile cylinder* tersebut dialokasikan dalam tempat bongkar muat, dan jika CNG pada *mobile cylinder* habis maka akan digantikan oleh *mobile cylinder* lain yang masih terisi penuh.
5. *Mobile cylinder* disambungkan ke PRS (*Pressure Reducing Station*) yang berfungsi untuk menurunkan dan menjaga tekanan dari CNG. PRS juga dilengkapi dengan alat pengukur volume pemakaian.
6. Setelah CNG diturunkan tekananya sesuai dengan yang diinginkan, maka CNG dapat digunakan sebagai sumber energi untuk sektor industri, transportasi, dan rumah tangga

Kadungan utama dari CNG adalah metana ( $\text{CH}_4$ ) yang merupakan salah satu hidrokarbon denga rantai terpendek, berikut ini adalah karakteristik dari metana pada kondisi tekanan 1 atm dan suhu  $25^\circ\text{C}$ , yaitu:

- Massa molar : 16,043 kg/kmol
- Densitas / massa jenis pada suhu  $25^\circ\text{C}$  ( $\rho$ ) : 0,6604 kg/m<sup>3</sup>
- Kalor spesifik pada tekanan konstan ( $C_p$ ) : 1,7354 kJ/(kg.K)
- Kalor spesifik pada *volume* konstan ( $C_v$ ) : 2,2537 kJ/(kg.K)
- Konstanta gas (R) : 0,5182 kJ/(kg.K)
- *Low Heating Value* (LHV) : 7973,13 kkal/m<sup>3</sup>
- *High Heating Value* (HHV) : 8851,43 kkal/m<sup>3</sup>

berikut ini adalah karakteristik lain dari CNG yang dibandingkan dengan bahan bakar mesin pembakaran dalam lainnya :

Tabel 2.1 Karakteristik berbagai bahan bakar mesin pembakaran dalam

<i>Property</i>	<i>Gasoline</i>	<i>Diesel</i>	<i>Methanol</i>	<i>Etanol</i>	<i>Propane (LPG)</i>	<i>Methane (CNG)</i>
<i>H/C ratio</i>	1.9	1.88	4.0	3.0	2.7	40
<i>Energy Content (LHV) (Mj/kg)</i>	44.0	42.5	20.0	26.9	46.4	50.0
<i>Liquid Density (kg/l)</i>	0.72-0.78	0.84-0.88	0.792	0.785	0.51	0.422
<i>Liquid Density (Mj/kg)</i>	33.0	36.55	15.84	21.12	23.66	21.13
<i>Boiling point (°C)</i>	37-205	140-360	65	79	-42.14	-161.6
<i>Research Octane Number</i>	92-98	-25	106	107	112	120
<i>Motor Octane Number</i>	80-90	-	92	89	97	120
<i>Stoichiometric air-fuel ratio</i>	14.7	14.6	6.5	9.0	15.7	17.2
<i>Reid Vapor Pressure (psi)</i>	8-15	0.2	4.6	2.3	208	2400

Sumber : Faiz (1996 : 195)

CNG dapat digunakan untuk bahan bakar semua jenis mesin pembakaran dalam yang mulanya berbahan bakar cair seperti otto dan disel. Konversi bahan bakar minyak ke CNG saat ini telah banyak dilakukan di berbagai negara karena dengan semakin meningkatnya harga minyak dan pencemaran emisi racun ke lingkungan yang lebih rendah dari bahan bakar cair berikut ini.

Tabel 2.2 Emisi racun yang dihasilkan oleh mesin otto dalam mg/Km

<i>Compounded</i>	<i>Gasoline</i>	<i>CNG</i>
<i>Benzene</i>	7.95	0.242
<i>Toluene</i>	33.66	0.695
<i>M &amp; p Xylenes</i>	4.57	0.705
<i>o-Xylenes</i>	1.95	0.399
<i>1.3-Butadine</i>	0.19-0.50	0.093-0.404
<i>Formaldehyde</i>	4.78	2.712
<i>Accetaldehyde</i>	0.94	0.529

Sumber : Faiz (1996 : 194)

CNG juga memiliki keunggulan lain diantaranya :

- Tingkat keamanan yang lebih jika terjadi kebocoran
- Memerlukan tangki penyimpanan yang kecil karena bersifat *compressible*
- Lebih murah jika dibandingkan dengan bahan bakar minyak

## 2.5 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 :

$$\dot{m} = Q \cdot \rho \quad (2-4)$$

Dimana:

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

$Q$  = debit gas [m<sup>3</sup>/s]

$\rho$  = massa jenis gas [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho$  Metana = 0.6604 kg/m<sup>3</sup>

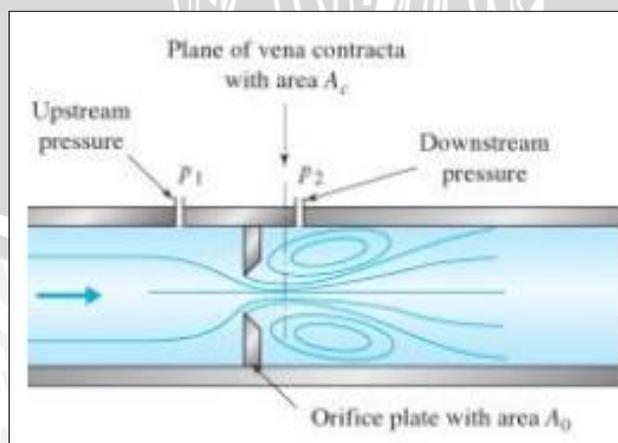
Sumber : Cengel (2006 : 895)

$\rho$  Udara = 1.176 kg/m<sup>3</sup>

Sumber : Cengel (2006 : 894)

## 2.6 Orifice

*Orifice* adalah salah satu komponen yang digunakan untuk mengukur laju aliran fluida dengan prinsip beda tekanan di dalam saluran yang tertutup. *Orifice* termasuk alat ukur laju aliran menggunakan metode rintangan (*Obstruction Device*).



Gambar 2.9 Aliran fluida yang melewati *orifice*

Sumber : Potter (2002 : 665)

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 :

- Persamaan Bernoulli :

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_{vc} + \frac{p_{vc}}{\gamma} + \frac{v_{vc}^2}{2g} \quad (2-5)$$

- Persamaan Kontinuitas untuk fluida :

$$V_1 \cdot A_1 = V_{vc} \cdot A_{vc} \quad (2-6)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.7 dan persamaan 2.8, maka:

$$V_{vc} = \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_{vc})}{1 - (A_{vc} / A_1)^2}} \text{ atau } V_{vc} = \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_{vc})}{(1 - (D_{vc} / D_1)^4)}} \quad (2-7)$$

Dengan :

$$h_1 = \frac{p_1}{\gamma} + z_1 ; h_{vc} = \frac{p_{vc}}{\gamma} + z_{vc} \quad (2-8)$$

Maka, dengan ini nilai debit ideal pada daerah *vena contracta* adalah :

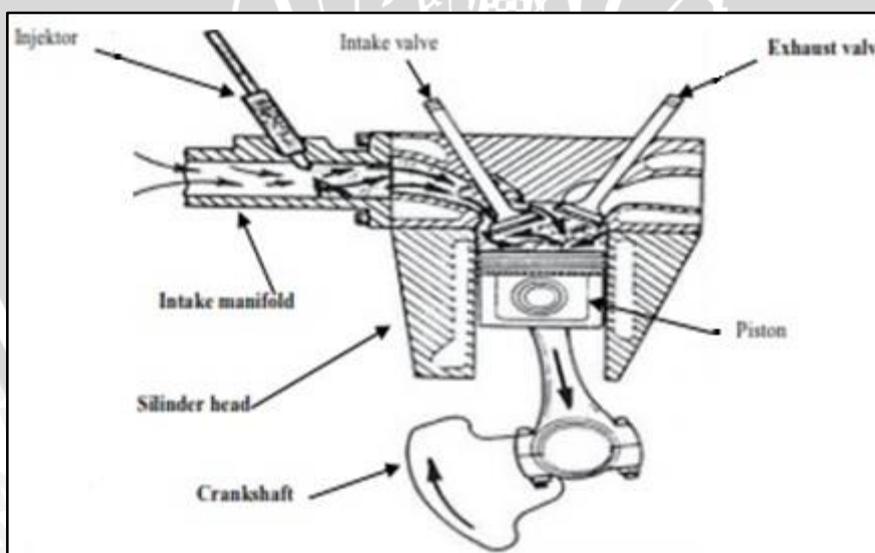
$$\begin{aligned} Q_i &= V_{vc} \cdot A_{vc} \\ &= \frac{A_{vc}}{\sqrt{1 - (D_{vc} / D_1)^4}} \sqrt{2g(\Delta h)} \end{aligned} \quad (2-9)$$

Dimana :	$V_{vc}$	= Kecepatan aliran di <i>vena contracta</i>	(m/s)
	$V_1$	= Kecepatan aliran di daerah sebelum <i>orifice</i>	(m/s)
	$A_{vc}$	= Luas penampang <i>vena contracta</i>	(m <sup>2</sup> )
	$A_1$	= Luas penampang pipa sebelum <i>orifice</i>	(m <sup>2</sup> )
	$Q_i$	= Debit ideal fluida	(m <sup>3</sup> /s)
	$p_{vc}$	= Tekanan fluida di <i>vena contracta</i>	(N/m <sup>2</sup> )
	$p_1$	= Tekanan fluida pada pipa sebelum <i>orifice</i>	(N/m <sup>2</sup> )
	$\gamma$	= Berat jenis fluida	(kg/m <sup>2</sup> .s <sup>2</sup> )
	$g$	= Percepatan gravitasi bumi	= 9,81 m/s <sup>2</sup>
	$z$	= Elevasi	(m)
	$\Delta h$	= Beda tekanan pada manometer	(mH <sub>2</sub> O)

## 2.7 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 tekanannya 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 2.10 Sistem Injeksi Tidak Langsung

Sumber : Kustoro (2012 : 8)

## 2.8 Emisi Gas Buang

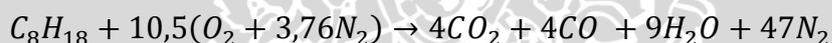
Emisi gas buang adalah sisa hasil pembakaran bahan bakar didalam mesin pembakaran dalam dan mesin pembakaran luar, yang dikeluarkan melalui sistem

pembuangan mesin Emisi kendaraan terdiri dari hidrokarbon (HC), karbonmonoksida (CO), oksida nitrogen (NO<sub>x</sub>), dan partikel-partikel yang keluar dari gas buang (Suyanto, 1989). Selain itu juga menghasilkan kandungan Karbonmonoksida (CO), Karbondioksida (CO<sub>2</sub>), Oksigen (O<sub>2</sub>), Nitrogen (N<sub>2</sub>), Uap Air (H<sub>2</sub>O), Sulfur Oksida (SO<sub>x</sub>), Zat debu timbal (Pb) yang disebabkan karena kurang tepatnya komposisi bahan bakar dengan udara dalam proses pembakaran.

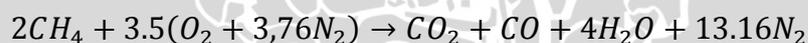
### 2.8.1 Karbonmonoksida (CO)

Karbonmonoksida (CO) adalah gas yang tidak berasa, tidak berbau, dan sukar larut dalam air. Gas ini akan dihasilkan bila karbon yang terdapat dalam bensin terbakar tidak sempurna karena kekurangan oksigen. Hal ini terjadi apabila campuran udara dan bahan bakar lebih gemuk dari campuran stoichiometric. Persentase CO meningkat dalam keadaan stasioner dan berkurang terhadap kecepatan. (Anton, 2013)

Reaksi terbentuknya gas CO pada ruang bakar di dalam motor berbahan bakar bensin sebagai berikut.



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



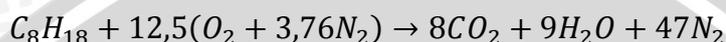
Reaksi diatas menunjukkan ada CO yang tidak ikut terbakar dan ikut keluar pada saluran pembuangan bersama gas buang, hal ini terjadi karena proses pembakaran kekurangan gas O<sub>2</sub> atau dapat dikatakan terlalu banyak bahan bakar dalam campurannya, emisi CO juga dapat muncul karena pembakaran yang tidak sempurna pada campuran miskin.

Gas ini bersifat racun bagi tubuh karena jika masuk ke dalam darah, Karbonmonoksida dapat bereaksi dengan Hemoglobin (Hb) yang akan membentuk karboksihemoglobin (COHb). Jika reaksi tersebut terjadi, maka kemampuan darah mengangkut O untuk kepentingan metabolisme dalam tubuh akan menjadi berkurang. Hal ini disebabkan kemampuan Hb untuk mengikat CO jauh lebih besar dibandingkan kemampuan Hb untuk mengikat O. Dampak lainnya juga dapat dilihat pada lingkungan yang mempengaruhi fiksasi nitrogen oleh bakteri bebas yang ada pada lingkungan terutama yang terdapat pada akar tanaman.

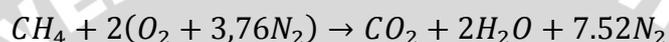
### 2.8.2 Karbondioksida (CO<sub>2</sub>)

Karbondioksida (CO<sub>2</sub>) adalah hasil emisi senyawa kimia yang terdiri dari dua atom oksigen yang terikat secara kovalen dengan sebuah atom karbon. Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) bersifat tidak berwarna, tidak berbau, tidak mudah terbakar, dan sedikit asam. CO<sub>2</sub> lebih berat daripada udara dan larut dalam air. Terdapatnya gas ini dihasil pembakaran mengindikasikan jika pembakaran yang terjadi tercukupi oksigen.

Reaksi terbentuknya gas CO<sub>2</sub> pada ruang bakar di dalam motor berbahan bakar bensin sebagai berikut.



Reaksi terbentuknya gas CO<sub>2</sub> jika menggunakan bahan bakar metana adalah sebagai berikut.

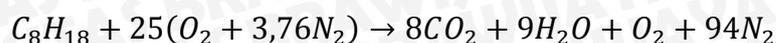


Karbondioksida adalah senyawa yang berbentuk gas pada suhu kamar (25<sup>0</sup>C), tak berbau dan tak menyala. Gas ini sangat dibutuhkan tumbuhan untuk proses fotosintesis dan digunakan dalam industri minuman berkarbonasi. Efek negatif dari CO<sub>2</sub> jika masuk ke dalam darah akan bereaksi dengan air (H<sub>2</sub>O) membentuk asam karbonat sehingga darah bersifat asam. Didalam atmosfer CO<sub>2</sub> berlebih mengakibatkan efek rumah kaca yang menyerap panas di stratosfer dan diradiasikan kembali ke bumi sehingga suhu atmosfer bumi meningkat. Konsentrasi CO<sub>2</sub> menunjukkan secara langsung status proses pembakaran di ruang bakar, semakin tinggi maka semakin baik (Bachri, 2009).

### 2.8.3 Oksigen (O<sub>2</sub>)

Oksigen atau zat asam adalah unsur kimia dalam sistem tabel periodik yang mempunyai lambang O dan nomor atom 8 yang tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berbau. Pada temperatur dan tekanan standar, dua atom unsur ini berikatan menjadi dioksigen, yaitu senyawa gas diatomik dengan rumus O<sub>2</sub>. Konsentrasi dari oksigen di gas buang kendaraan berbanding terbalik dengan konsentrasi CO<sub>2</sub>. 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<sub>2</sub> pada ruang bakar di dalam motor berbahan bakar bensin sebagai berikut.



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



#### 2.8.4 Hidrokarbon (HC)

Hidrokarbon (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. Hidrokarbon dapat keluar tidak hanya kalau campuran udara bahan bakarnya gemuk, tetapi bisa saja kalau campurannya miskin. Sumber emisi HC dapat disebabkan juga oleh bahan bakar yang terpecah karena reaksi panas berubah menjadi gugusan HC lain yang keluar bersama gas buang (Syahrani, 2006).

Reaksinya sebagai berikut.

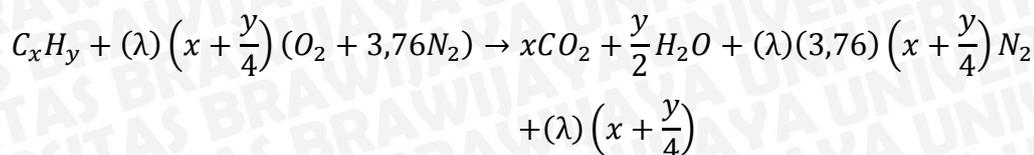


Dampak dari emisi hidrokarbon diantaranya dapat menyebabkan berbagai macam penyakit hingga kematian pada manusia jika terhirup terus-menerus, selain itu dapat juga merusak sel dari tanaman dan perubahan gen pada hewan. Jika suhu pembakaran rendah dan perambatan nyala api lemah serta luasan dinding ruang 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 hidrokarbon. (Kristanto, 1999).

#### 2.8.5 Excess Air ( $\lambda$ )

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  $\lambda$ . Udara berlebih (*excess air*) dirumuskan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{AFR_{\text{aktual}} - AFR_{\text{stoik}}}{AFR_{\text{stoik}}} \times 100 \% \quad (2-10)$$



Keterangan :

$\lambda$  = faktor kelebihan udara

$\lambda = 1$  apabila dipergunakan udara *stoichiometry*

$\lambda > 1$  apabila dipergunakan udara berlebih

$\lambda < 1$  apabila kekurangan udara

Nilai AFR dapat dihitung dalam perbandingan jumlah massa maupun perbandingan jumlah mol molekul. Seperti pengertian di atas, persen udara berlebih diberikan untuk menambah jumlah udara lebih besar dari jumlah yang dibutuhkan pada proses pembakaran. Oleh karena itu jumlah persen udara berlebih dengan jumlah persen udara yang dibutuhkan pada proses pembakaran disebut udara teoritis.

Udara teoritis = 100 % + persen udara lebih

$$= (100 + \lambda) \%$$

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

## 2.9 Hipotesis

Semakin besar massa alir bahan bakar CNG pada motor bensin 4 langkah dengan sistem injeksi akan memperkecil nilai AFR sehingga menghasilkan tingkat emisi CO, O<sub>2</sub> dan HC yang semakin rendah hingga titik stoikhiometri, sedangkan nilai emisi CO<sub>2</sub> yang semakin naik hingga titik stoikhiometri disebabkan karena dengan bertambahnya nilai massa alir bahan bakar dan tetapnya nilai massa alir udara akan membuat campuran antara bahan bakar dengan udara menjadi semakin ideal hingga titik stoikhiometri. Setelah melewati titik stoikhiometri nilai emisi CO dan HC akan naik, sedangkan nilai emisi CO<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> akan turun dikarenakan campuran bahan bakar dengan udara menjadi semakin kaya.