

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Hidrogen

Hidrogen adalah unsur kimia terkecil karena hanya terdiri dari satu proton dalam intinya. Simbol hidrogen adalah H, dan nomor atom hidrogen adalah 1. Memiliki berat atom rata-rata 1,0079 amu, sehingga menjadikannya gas paling ringan diantara gas lainnya.

Hidrogen adalah zat kimia yang paling berlimpah di alam semesta, terutama di bintang-bintang dan planet-planet gas raksasa. Namun, hidrogen merupakan elemen monoatomik, hidrogen jarang terdapat di bumi karena kecenderungan untuk membentuk ikatan kovalen dengan kebanyakan unsur.

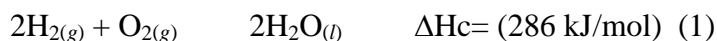
Tabel 1. Sifat Fisik Hidrogen dibandingkan dengan Metana dan Iso-Oktan (300 K, 1 atm)

	<b>Hidrogen</b>	<b>Metana</b>	<b>Iso-Oktan</b>
Berat Molekul (g/mol)	2.016	16.043	114.236
Densitas (kg/m <sup>3</sup> )	0.08	0.65	692
Energi pengapian minimum (mJ)	0.02	0.28	0.28
<i>Lower Heating Value</i> (MJ/kg)	120	50	44.3
<i>Higher Heating Value</i> (MJ/kg)	142	55.5	47.8
Rasio udara-bahan bakar stoikiometrik (kg/kg)	34.2	17.1	15.0
Rasio udara-bahan bakar stoikiometrik (kmol/kmol)	2.387	9.547	59.666

Sumber : Chitragar, et al, Use of Hydrogen in Internal Combustion Engines: A Comprehensive Study, 2014

Pada suhu dan tekanan standar, hidrogen adalah beracun, bukan logam, tidak berbau, tidak berasa, tidak berwarna, dan sangat mudah terbakar. Hidrogen adalah gas diatomik dengan rumus molekul H<sub>2</sub>. Hidrogen juga lazim di bumi dalam bentuk senyawa kimia seperti hidrokarbon dan air.

Hidrogen memiliki titik leleh  $-259,14^{\circ}\text{C}$  dan titik didih  $-252,87^{\circ}\text{C}$ . Hidrogen memiliki kepadatan  $0,08988\text{ g/L}$ , sehingga kurang padat daripada udara. Gas hidrogen ( $\text{H}_2$ ) sangat mudah terbakar dan akan terbakar di udara pada rentang yang sangat luas dari konsentrasi antara volume 4 persen dan 75 persen. Entalpi pembakaran hidrogen adalah  $-286\text{ kJ/mol}$ , dan dijelaskan oleh persamaan:



Gas hidrogen juga dapat meledak dalam campuran klorin (5-95 persen). Campuran ini dapat meledak dalam menanggapi percikan, panas, atau bahkan sinar matahari. Titik nyala hidrogen (suhu di mana pembakaran spontan akan terjadi) adalah  $500^{\circ}\text{C}$ . Api murni hidrogen-oksigen memancarkan cahaya ultraviolet dan tidak terlihat dengan mata telanjang. Dengan demikian, deteksi dari kebocoran hidrogen yang terbakar berbahaya dan membutuhkan detektor api. Karena hidrogen mengapung di udara, api hidrogen cepat hilang dan tidak menyebabkan kerusakan yang lebih parah dari kebakaran hidrokarbon.  $\text{H}_2$  bereaksi dengan oksigen, yang pada gilirannya bereaksi secara spontan dan keras dengan klorin dan fluorin untuk membentuk hidrogen halida yang sesuai.

Hidrogen dapat dihasilkan dari berbagai sumber, seperti air, bahan bakar fosil, dan biomassa. Saat ini sekitar 95% hidrogen yang dihasilkan dari bahan baku berbasis fosil-yaitu *steam-reforming* gas alam. Belakangan ini, terdapat metode untuk menghasilkan gas hidrogen yang berasal dari reaksi aluminium dengan air elektrolit (Petrovic, 2008)

## 2.2 Motor Bakar

Motor bakar adalah salah satu jenis dari mesin kalor, yaitu mesin yang mengubah energi termal untuk melakukan kerja mekanik atau mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi mekanis. Energi termal tersebut diperoleh dari hasil proses pembakaran bahan bakar di dalam mesin itu sendiri. Cara memperoleh energi termal tersebut dari hasil proses pembakaran bahan bakar di dalam mesin itu sendiri, maka dapat dibagi menjadi 2 bagian dengan kelebihan masing-masing, yaitu:

1. Mesin Pembakaran Luar (*External combustion engine*), contohnya :
  - a. *Steam engine* (mesin uap torak), panas pembakaran di dalam ruang

bakar akan memanasi air yang kemudian menjadi uap sehingga uap tersebut akan menggerakkan torak.

b. Turbin gas dan turbin uap

Kelebihannya:

1. Dapat digunakan bahan bakar berkualitas rendah baik bahan bakar padat, cair maupun gas.
  2. Kapasitas besar, seperti : pusat pembangkit tenaga listrik, pusat pembangkit tenaga uap, dalam hal ini untuk penggerak turbin dan proses produksi.
  3. Pada umumnya tidak terdapat bagian yang bergerak translasi bolak- balik sehingga getaran yang terjadi kecil.
2. Mesin Pembakaran Dalam (*Internal combustion engine*), contohnya :
- a. Motor bakar torak : Internal combustion engine dengan penyalaan loncatan bunga api, mesin diesel dengan penyalaan kompresi, mesin wankel dengan gerak torak berputar (*rotary*).

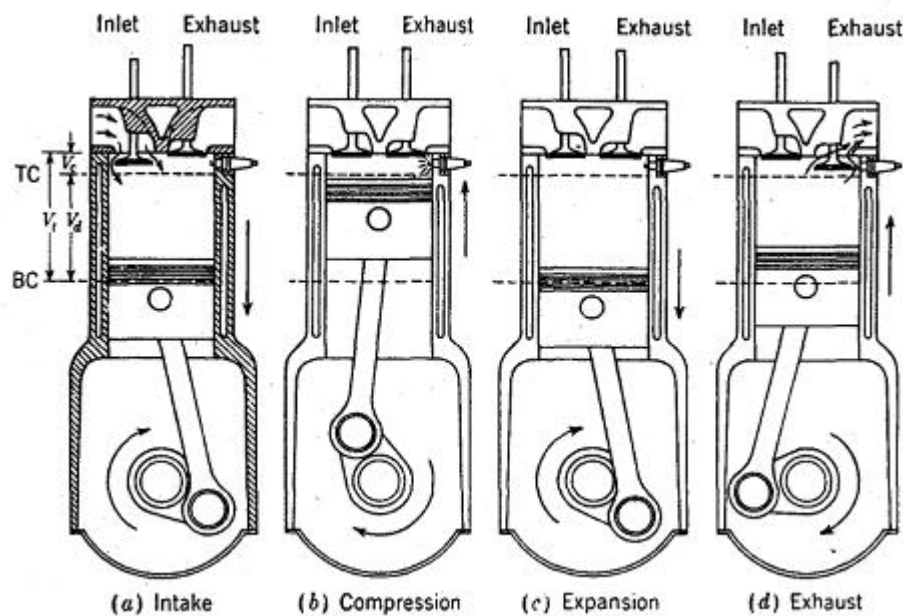
Kelebihannya:

1. Sederhana/simpel
2. Bahan bakar lebih irit.
3. Investasi awal lebih kecil.
4. Cocok untuk tenaga penggerak pada kendaraan.

### 2.3 *Internal combustion engine*

Sistem kerja *Internal combustion engine* dibedakan atas *Internal combustion engine* dua langkah (*two stroke*) dan empat langkah (*four stroke*). *Internal combustion engine* mempergunakan beberapa silinder yang didalamnya terdapat torak yang bergerak translasi (bolak-balik). Di dalam silinder itulah terjadi pembakaran antara bahan bakar dengan oksigen dari udara. Gas pembakaran yang dihasilkan oleh proses tersebut mampu menggerakkan torak yang oleh batang penghubung (batang penggerak) dihubungkan dengan poros engkol. Gerak translasi torak tersebut menyebabkan gerak rotasi pada poros engkol dan sebaliknya gerak rotasi poros engkol menimbulkan gerak translasi pada torak. *Internal combustion engine* juga dilengkapi dengan busi dan karbuator (Beni, 2014). Busi berfungsi sebagai penghasil percikan bunga api yang akan menyalakan campuran udara

dengan bahan bakar, maka *Internal combustion engine* disebut juga sebagai *Spark Ignition Engine*. Sedangkan karburator merupakan tempat pencampuran udara dan bahan bakar. Mesin bensin memiliki perbandingan kompresi sekitar 8 : 1 sampai 11 : 1 jauh lebih rendah dibandingkan dengan mesin diesel yang memiliki perbandingan kompresi sekitar 12 : 1 hingga 24 : 1 (Beni, 2014). Mesin empat langkah adalah mesin pembakaran dalam yang dalam satu siklus pembakaran terjadi empat langkah piston. Empat langkah tersebut meliputi, langkah hisap (pemasukan), kompresi, tenaga dan langkah buang yang secara keseluruhan memerlukan dua putaran poros engkol (*crankshaft*) per satu siklus pada *Internal combustion engine*.



Gambar 1. Siklus kerja *Internal combustion engine* 4-langkah  
Sumber: Heywood, John B., *Internal combustion engine Fundamentals*, 1988

Prinsip kerja *Internal combustion engine* adalah sebagai berikut :

#### 1. Langkah Hisap

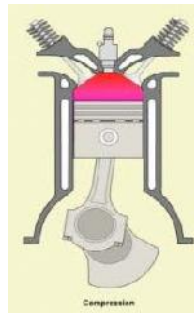
Dalam langkah ini, campuran bahan bakar dan udara di hisap ke dalam ruang bakar, Katup hisap membuka sedangkan katup buang tertutup. Waktu torak bergerak dari titik mati atas (TMA) ke titik mati bawah (TMB), menyebabkan ruang silinder menjadi vakum dan menyebabkan masuknya campuran udara dan bahan bakar ke dalam silinder yang disebabkan adanya tekanan udara luar.



Gambar 2. Langkah hisap *Internal combustion engine* 4 langkah  
 Sumber: Heywood, John B., *Internal combustion engine Fundamentals*, 1988

## 2. Langkah Kompresi

Dalam langkah ini, campuran udara dan bahan bakar dikompresikan. Katup hisap dan katup buang tertutup. Waktu torak naik dari titik mati bawah (TMB) ke titik mati atas (TMA), campuran yang dihisap tadi dikompresikan. Akibatnya tekanan dan temperaturnya akan naik, sehingga akan mudah terbakar. Saat inilah percikan api dari busi terjadi. Poros engkol berputar satu kali ketika torak mencapai titik mati atas (TMA).



Gambar 3. Langkah kompresi *Internal combustion engine* 4 langkah  
 Sumber: Heywood, John B., *Internal combustion engine Fundamentals*, 1988

## 3. Langkah Usaha

Pada langkah ini, mesin menghasilkan tenaga dimana gerak translasi piston diubah menjadi gerak rotasi oleh poros engkol dan selanjutnya akan menggerakkan kendaraan. Saat torak mencapai titik mati atas (TMA) pada saat langkah kompresi, busi memberikan loncatan bunga api pada campuran udara dan bahan bakar yang telah dikompresikan. Dengan adanya pembakaran, kekuatan dari tekanan gas pembakaran yang tinggi mendorong torak ke bawah. Usaha ini yang menjadi tenaga mesin.



Gambar 4. Langkah usaha *Internal combustion engine* 4 langkah  
 Sumber: Heywood, John B., *Internal combustion engine Fundamentals*, 1988

#### 4. Langkah Buang

Dalam langkah ini, gas yang sudah terbakar, akan dibuang ke luar silinder. Katup buang membuka sedangkan katup hisap tertutup. Waktu torak bergerak dari titik mati bawah (TMB) ke titik mati atas (TMA), mendorong gas bekas keluar dari silinder. Pada saat akhir langkah buang dan awal langkah hisap kedua katup akan membuka sedikit (*valve overlap*) yang berfungsi sebagai langkah pembilasan (campuran udara dan bahan bakar baru mendorong gas sisa hasil pembakaran). Ketika torak mencapai TMA, akan mulai bergerak lagi untuk persiapan langkah berikutnya, yaitu langkah hisap. Poros engkol telah melakukan 2 putaran penuh dalam satu siklus yang terdiri dari empat langkah yaitu, 1 langkah hisap, 1 langkah kompresi, 1 langkah usaha, 1 langkah buang yang merupakan dasar kerja dari pada mesin empat langkah.



Gambar 5. Langkah buang *Internal combustion engine* 4 langkah  
 Sumber: Heywood, John B., *Internal combustion engine Fundamentals*, 1988

Proses Kerja adalah keseluruhan langkah yang berurutan untuk terjadinya satu siklus kerja dari motor. Proses kerja ini terjadi berurutan dan berulang-ulang. Piston motor bergerak bolak balik dari titik mati atas (TMA) ke titik mati bawah (TMB) dan dari titik mati bawah (TMB) ke titik mati atas (TMA) pada langkah selanjutnya.

Pada motor empat langkah, proses kerja motor diselesaikan dalam empat langkah piston.

- Langkah pertama yaitu piston bergerak dari TMA ke TMB, disebut langkah pengisian.
- Langkah kedua yaitu piston bergerak dari TMB ke TMA disebut langkah kompresi.
- Langkah ketiga piston bergerak dari TMA ke TMB disebut langkah usaha.

Pada langkah usaha ini terjadilah proses pembakaran bahan bakar (campuran udara dan bahan bakar) di dalam silinder motor/ruang pembakaran yang menghasilkan tenaga yang mendorong piston dari TMA ke TMB.

- Langkah keempat yaitu piston bergerak dari TMB ke TMA disebut langkah pembuangan. Gas hasil pembakaran didorong oleh piston keluar silinder motor. Jadi pada motor empat langkah proses kerja motor untuk menghasilkan satu langkah usaha (yang menghasilkan tenaga) diperlukan empat langkah piston. Empat langkah piston berarti sama dengan dua kali putaran poros engkol. Pada motor dua langkah proses kerja motornya untuk mendapatkan satu kali langkah usaha hanya diperlukan dua kali langkah piston. Motor dua langkah yang paling sederhana, pintu masuk atau lubang masuk dan lubang buang terlelelangkah berhadap-hadapan yaitu berada pada sisi bawah pada dinding silinder motor.

Proses kerjanya adalah sebagai berikut.:

- Piston berada TMB, kedua lubang (masuk dan buang) sama sama terbuka kemudian campuran udara dan bahan bakar dimasukkan kedalam silinder melalui lubang masuk.
- Gerakan piston dari TMB ke TMA, maka lubang masuk akan tertutup dan tertutup pula lubang buang, maka terjadilah langkah kompresi. Pada akhir langkah kompresi ini terjadilah pembakaran gas bahan bakar. Dengan terjadinya pembakaran gas bahan bakar maka dihasilkan tenaga pembakaran yang mendorong piston ke bawah dari TMA ke TMB.
- Langkah usaha terakhir terjadilah pembuangan gas bekas begitu terbuka lubang buang. Sesudah itu terbuka pula lubang masuk sehingga terjadi pemasukkan gas baru sekaligus mendorong mendorong gas bekas keluar melalui

lubang buang.

Dengan demikian pada motor dua langkah proses motor untuk menghasilkan satu kali langkah usaha/pembakaran gas dalam silinder, hanya diperlukan dua langkah piston. Dilihat dari putaran poros engkolnya diperlukan satu kali putaran poros engkol.

## 2.4 Daya

Besarnya torsi yang dihasilkan oleh suatu mesin dapat diukur menggunakan *dynamometer* yang dikopel dengan poros *output* mesin. Oleh karena itu, sifat *dynamometer* bertindak seolah-olah seperti sebuah rem dalam sebuah mesin, maka daya yang dihasilkan poros *output* ini sering disebut sebagai daya rem (*Brake Power*).

Daya dapat dihitung dengan rumus :

$$W = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60 \text{ s}} \cdot \tau \quad (19)$$

Dimana:

W = Daya keluaran (Watt)

N = Putaran mesin (rpm)

= Torsi (N.m)

(Sumber :Heywood, John B, Internal Combustion Fundamentals,1988)

## 2.5 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik

Konsumsi bahan bakar spesifik (*specific fuel consumption, sfc*) adalah parameter unjuk kerja mesin yang berhubungan langsung dengan nilai ekonomis sebuah mesin, karena dengan mengetahui hal ini dapat dihitung jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan sejumlah daya dalam selang waktu tertentu. Bila daya rem dinyatakan dalam satuan kW dan laju aliran massa bahan bakar (*mf*) dalam satuan kg/jam, maka :

$$Sfc = \frac{m}{W} \quad (20)$$

dimana:

Sfc = Konsumsi bahan bakar spesifik (g/kW.h).

mf = Laju aliran massa bahan bakar (g/jam)

W = Kerja yang dilakukan mesin (kW)

(Sumber :Heywood, John B, Internal Combustion Fundamentals,1988)



Besarnya laju aliran massa bahan bakar ( $m_f$ ) dihitung dengan persamaan berikut:

$$m_f = \frac{\rho_f \times V_f}{t_f} \quad (21)$$

Dimana :

- $\rho_f$  = Massa jenis bahan bakar (g/ml)
- $V_f$  = Volume bahan bakar yang diuji (ml)
- $t_f$  = Waktu untuk menghabiskan bahan bakar sebanyak volume uji (detik).

(Sumber :Heywood, John B, Internal Combustion Fundamentals,1988)

## 2.6 Efisiensi Kerja

Kerja berguna yang dihasilkan selalu lebih kecil dari pada energi yang di bangkitkan piston karena sejumlah energi hilang akibat adanya kerugian mekanis (*mechanical losses*). Dengan alasan ekonomis perlu dicari kerja maksimum yang dapat dihasilkan dari pembakaran sejumlah bahan bakar. Efisiensi ini sering disebut sebagai efisiensi termal *brake* (*brake thermal efficiency*,  $\eta_b$ ) dengan rumus sebagai berikut :

$$\eta_b = \frac{W}{Q_{in}} \quad (22)$$

(Sumber :Heywood, John B, Internal Combustion Fundamentals,1988)

Laju panas yang masuk  $Q_{in}$ , dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$Q_{in} = m_f \times HHV \quad (23)$$

- $m_f$  = Laju alir bahan bakar (kg/s)
- HHV = Nilai kalor bahan bakar (kJ/kg)

(Sumber :Heywood, John B, Internal Combustion Fundamentals,1988)

## 2.7 Pembakaran Pada *Internal combustion engine*

Pembakaran didefinisikan sebagai reaksi kimia yang mana oksidan bereaksi cepat dengan bahan bakar untuk melepaskan energi panas. Pada aplikasinya, oksidan pada pembakaran adalah oksigen pada udara. Tiga unsur kimia utama dalam elemen mampu bakar (*combustible*) pada bahan bakar adalah karbon (C) dan hidrogen (H), elemen mampu bakar yang lain namun umumnya hanya sedikit

terkandung dalam bahan bakar adalah sulfur (S). Proses pembakaran dikatakan sempurna apabila semua karbon dibahan bakar terbakar menjadi karbon dioksida, hidrogen terbakar menjadi sulfur dioksida, jika kondisi teori pembakaran tidak memenuhi maka pembakaran tidak sempurna. Nitrogen adalah gas lembam dan tidak berpartisipasi dalam pembakaran. Selama proses pembakaran, butiran minyak bahan bakar dipisahkan menjadi elemen komponennya yaitu hidrogen dan karbon dan masing-masing bergabung dengan oksigen dari udara secara terpisah. Hidrogen bergabung dengan oksigen untuk membentuk air dan karbon bergabung dengan oksigen menjadi karbon dioksida. Jika oksigen yang tersedia tidak cukup, maka sebagian dari karbon akan bergabung dengan oksigen dalam bentuk karbon monoksida. Pembentukan karbon monoksida hanya menghasilkan 30% panas yang dibandingkan panas yang timbul oleh pembentukan karbon dioksida (Beni, 2014).