

**PENGARUH VARIASI PENAMBAHAN GAS HIDROGEN TERHADAP  
UNJUK KERJA MOTOR BENSIN 4 LANGKAH**

**SKRIPSI  
KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**



Disusun oleh:

**OKSY EKA ROZY  
NIM. 0410620075-62**

**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
MALANG  
2010**

**LEMBAR PERSETUJUAN**

**PENGARUH VARIASI PENAMBAHAN GAS HIDROGEN TERHADAP  
UNJUK KERJA MOTOR BENSIN 4 LANGKAH**

**SKRIPSI  
KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**



Disusun oleh:

**OKSY EKA ROZY  
NIM. 0410620075-62**

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

**Dosen Pembimbing**

**Prof.Ir.I.N.G. Wardana, M.Eng.,Ph.D.**  
**NIP. 19590703 198303 1 002**



**LEMBAR PENGESAHAN**

**PENGARUH VARIASI PENAMBAHAN GAS HIDROGEN TERHADAP  
UNJUK KERJA MOTOR BENSIN 4 LANGKAH**

**SKRIPSI  
KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:

**OKSY EKA ROZY  
NIM. 0410620075-62**

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada  
tanggal 6 Januari 2010

Skripsi 1

Skripsi 2

Prof.Dr.Ir. Rudy Soenoko, M.Eng.Sc  
NIP. 19490911 198403 1 001

Ir. Winarno Yahdi Atmodjo, MT  
NIP. 19460804 198303 1 001

Komprehensif

Ir. Erwin Sulisty, MT.  
NIP. 19661213 199802 1 001

Mengetahui  
Ketua Jurusan Teknik Mesin

Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT.  
NIP. 19720903 199702 1 001

## KATA PENGANTAR

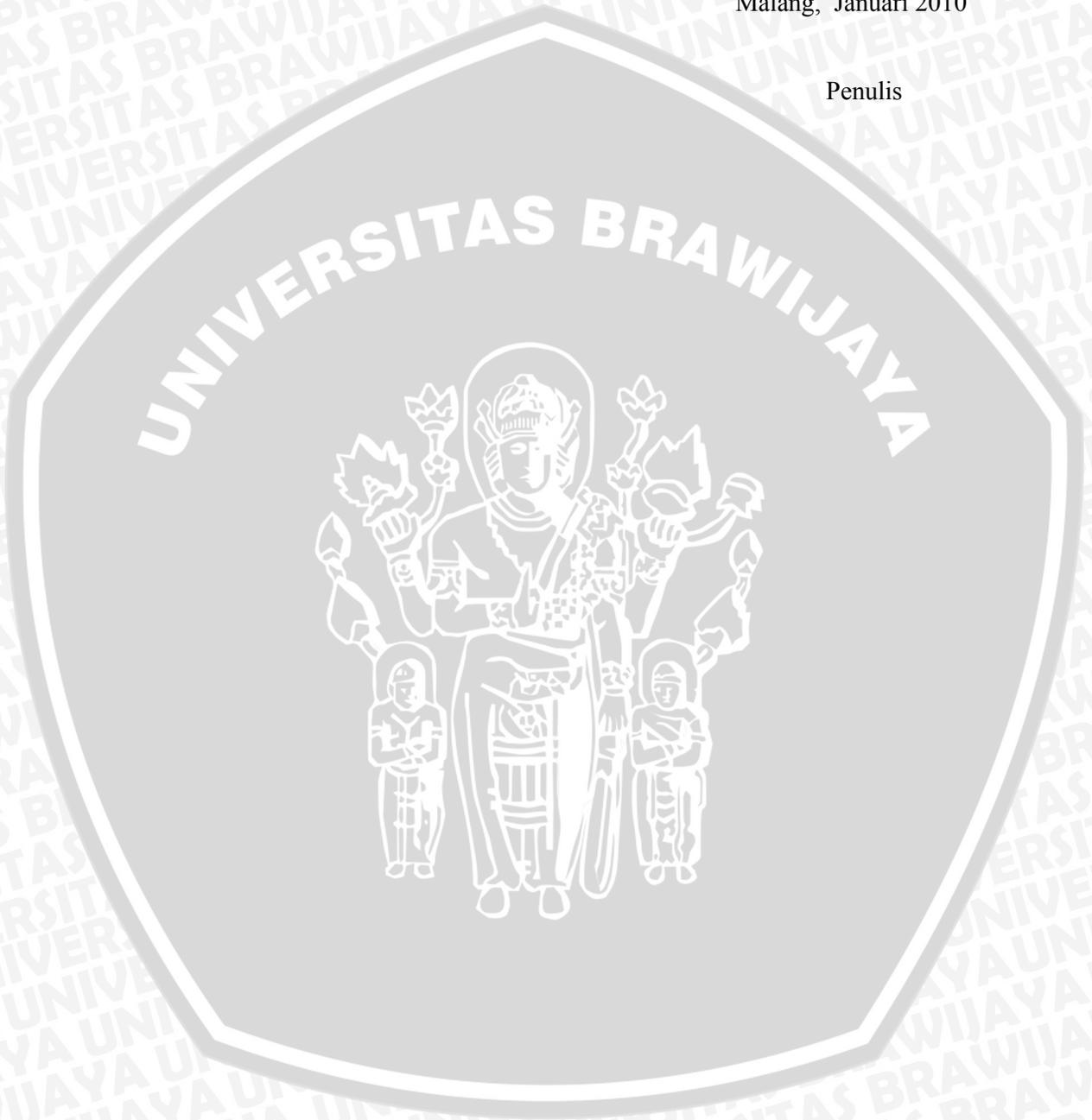
Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala limpahan nikmat, rahmat dan karunia yang telah diberikan, juga sholawat dan salam penulis tujukan kepada Nabi Besar Muhammad SAW atas Islam yang telah disampaikan. Tak lupa penulis haturkan ribuan terimakasih atas bantuannya baik secara langsung maupun tidak langsung sehingga dapat menyelesaikan skripsi berjudul **“Pengaruh Variasi Penambahan Gas Hidrogen Terhadap Unjuk Kerja Motor Bensin 4 Langkah”** pada:

1. Bapak Prof.Ir.I.N.G. Wardana, M.Eng.,Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan arahan dan masukan selama penulis masih menjadi mahasiswa. Penulis sangat mengagumi beliau selaku dosen teknik yang punya andil dan dedikasi yang besar dalam kemajuan fakultas teknik dan jurusan mesin khususnya. Semoga penulis dapat membalas jasa beliau.
2. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT. selaku Ketua Jurusan Mesin.
3. Bapak Dr.Eng. Anindito Purnowidodo, ST.,M.Eng selaku Sekretaris Jurusan Mesin.
4. Bapak Ir. I Made Gunadiarta, MT selaku Ketua Kelompok Pengajar Konsentrasi Konversi Energi Jurusan Mesin.
5. Bapak Prof.Dr.Ir. Rudy Soenoko, M.Eng.Sc selaku Dosen penguji skripsi 1.
6. Bapak Ir. Winarno Yahdi Atmodjo, MT selaku Dosen penguji skripsi 2.
7. Bapak Ir. Erwin Sulistyio.MT selaku Dosen Penguji Komprehensif.
8. Asisten Lab.Motor Bakar dan karyawan mas Eko.
9. Ayah dan Ibu tercinta, juga Adek dan keponakanku Agies atas dukungan moril materiilnya.
10. Indra Bayu atas data Gas Hidrogennya, serta teman-teman angkatan M'04.
11. Sobat satu kontrakan : Yudi, Sasmito, Abhi, Adi Candra (Kiyep), Epan, Agung, Ubed, Anya dan Febi. Terimakasih atas semua waktu yang kita lewati, terimakasih juga atas segala hal yang berguna dan juga sia-sia yang kalian berikan yang sedikit banyak telah membentuk sikapku sekarang ini.
12. Sobat satu SMA: Hendra, Beni, Tono, Hasim, dll. Semoga aku punya waktu buat ngopi n kemping bareng lagi.
13. Semua pihak yang telah memberikan andil dalam penyelesaian skripsi ini yang penulis tidak dapat sebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa ilmu yang dimiliki masih jauh dari kesempurnaan, begitu pula dengan skripsi ini. Oleh sebab itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun guna penyusunan karya ilmiah yang lebih baik lagi.

Malang, Januari 2010

Penulis



**DAFTAR ISI**

<b>KATA PENGANTAR</b> .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	v
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	vi
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	vii
<b>RINGKASAN</b> .....	viii
<b>BAB IPENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	4
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	4
2.2 Hidrogen.....	6
2.2.1 Reaktivitas.....	7
2.2.2 Produk Akhir dari Reaksi Bahan Bakar.....	7
2.2.3 Energi.....	8
2.2.4 <i>Flammability</i> .....	10
2.3 Unjuk Kerja Motor Bensin.....	15
2.4 Perbandingan LHV Antara Penggunaan Bahan Bakar Bensin dengan Campuran Bensin dan Gas Hidrogen.....	19
2.5 Hipotesis.....	20
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	21
3.1 Metode Penelitian.....	21
3.2 Variabel Penelitian.....	21
3.3 Alat – Alat yang digunakan.....	22
3.3.1 Alat Utama.....	22
3.3.2 Peralatan Bantu.....	22
3.4 Tempat Penelitian.....	23
3.5 Pelaksanaan Penelitian.....	23
3.5.1 Penyusunan Alat Penelitian.....	23

3.5.2	Prosedur Penelitian.....	24
3.6	Diagram Alir Penelitian.....	26
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>		<b>27</b>
4.1	Hasil Penelitian.....	27
4.1.1	Data Hasil Penelitian.....	27
4.1.2	Grafik Hasil Penelitian.....	32
4.2	Pembahasan.....	36
4.2.1	Pembahasan Grafik Hubungan Antara Torsi dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen.....	36
4.2.2	Pembahasan Grafik Hubungan Antara Daya Efektif dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen.....	37
4.2.3	Pembahasan Grafik Hubungan Antara Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Efektif dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen.....	38
4.2.4	Pembahasan Grafik Hubungan Antara Efisiensi Termal Efektif ( $\eta_e$ ) dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen.....	39
4.2.5	Pembahasan Grafik Hubungan Antara Emisi Gas Buang CO dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen.....	41
4.2.6	Pembahasan Grafik Hubungan Antara Emisi Partikel HC dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen.....	42
4.2.7	Pembahasan Grafik Hubungan Antara Emisi Gas Buang CO <sub>2</sub> dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen.....	42
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>		<b>44</b>
5.1	Kesimpulan.....	44
5.2	Saran.....	44
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>		<b>45</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>		<b>46</b>

## DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1.	Harga Panas ( <i>Heating Value</i> ) Beberapa Bahan Bakar.....	9
Tabel 2.2.	Kerapatan Energi Pada Beberapa Bahan Bakar.....	10
Tabel 2.3.	Flashpoint Pada Beberapa Bahan Bakar.....	11
Tabel 2.4.	<i>Autoignition Temperature</i> dari Beberapa Bahan Bakar.....	13
Tabel 2.5.	Nomor Oktan dari Beberapa Bahan Bakar.....	13
Tabel 2.6.	Energi Penyalaan Minimum dari Beberapa Bahan Bakar.....	14
Tabel 3.1.	Kemampuan Pengukuran <i>Exhaust Gas Analyzer</i> .....	23
Tabel 4.1.	Gaya Pengereman (F) Pada Pengujian Motor Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen.....	29
Tabel 4.2.	Konsumsi Bahan Bakar (FC) Pada Pengujian Motor Bensin Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen.....	29
Tabel 4.3.	Kandungan Gas Buang CO pada Pengujian Motor Bensin Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen.....	29
Tabel 4.4.	Kandungan HC (Hidrokarbon) pada Pengujian Motor Bensin Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen.....	30
Tabel 4.5.	Kandungan Gas Buang CO <sub>2</sub> pada Pengujian Motor Bensin Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen.....	30
Tabel 4.6.	Torsi (T) Pada Pengujian Motor Bensin Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen.....	32
Tabel 4.7.	Daya Efektif (Ne) Pada Pengujian Motor Bensin Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen.....	32
Tabel 4.8.	Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Efektif (SFCe) Pada Pengujian Motor Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen.....	32
Tabel 4.9.	Efisiensi Termal Efektif ( $\eta_e$ ) Pada Pengujian Motor Bensin Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen.....	33

## DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1.	Keadaan energi kimia hidrogen.....	7
Gambar 2.2.	<i>Flammability range</i> dari beberapa bahan bakar pada temperatur Atmosfer.....	12
Gambar 2.3.	Simulasi Kebocoran Pada Beberapa Bahan Bakar.....	15
Gambar 4.1.	Grafik Hubungan Antara Torsi dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen.....	33
Gambar 4.2.	Grafik Hubungan Antara Daya Efektif ( $N_e$ ) dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen.....	34
Gambar 4.3.	Grafik Hubungan Antara Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Efektif (SFCe) dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen.....	34
Gambar 4.4.	Grafik Hubungan Antara Efisiensi Termal Efektif ( $\eta_e$ ) dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen.....	35
Gambar 4.5.	Grafik Hubungan Antara Emisi Gas Buang CO dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen.....	35
Gambar 4.6.	Grafik Hubungan Antara Emisi Partikel HC dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen.....	36
Gambar 4.7.	Grafik Hubungan Antara Emisi Gas Buang CO <sub>2</sub> dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen.....	36

DAFTAR LAMPIRAN

No	Judul	Halaman
Lampiran 1.	Tabel Volume Bahan Bakar Tiap Satuan Waktu (b/t) Pada Pengujian Motor Bensin 4 Langkah 125 cc.....	46
Lampiran 2.	Tabel Gaya Pengereman (F) Pada Pengujian Motor Bensin 4 Langkah 125 cc.....	47
Lampiran 3.	Tabel Emisi Gas Buang CO Pada Pengujian Motor Bensin 4 Langkah 125 cc.....	48
Lampiran 4.	Tabel Emisi Partikel HC Pada Pengujian Motor Bensin 4 Langkah 125 cc.....	49
Lampiran 5.	Tabel Emisi Gas Buang CO <sub>2</sub> Pada Pengujian Motor Bensin 4 Langkah 125 cc.....	50



## RINGKASAN

**Oksy Eka Rozy**, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Januari 2010, *Pengaruh Variasi Penambahan Gas Hidrogen Terhadap Unjuk kerja Motor Bensin 4 langkah*. Dosen Pembimbing: Prof.Ir.I.N.G. Wardana, M.Eng.,Ph.D.

Bahan bakar minyak (BBM) merupakan sumber energi yang tidak dapat diperbaharui. Karena itu cadangan semakin menipis seiring penggunaannya dalam segala sisi kehidupan manusia yang semakin kompleks. Selain tidak dapat diperbaharui, gas buang dari proses pembakaran juga merugikan manusia karena memberikan efek negatif terhadap manusia dan lingkungannya.

Bahan bakar alternatif yang kini banyak dikembangkan untuk dapat diproduksi secara massal adalah gas hidrogen. Alasannya adalah gas hidrogen memiliki karakteristik melebihi karakteristik yang dimiliki oleh BBM. Hanya saja aplikasi untuk kendaraan bermotor masih sebatas penambah BBM, yang dipasang pada *intake manifold* dan dihasilkan dari proses elektrolisa air, agar karakteristik BBM meningkat yang akhirnya juga diikuti oleh peningkatan unjuk kerja motor bensin.

Pada penelitian kali ini motor yang digunakan adalah motor bensin 4 langkah 125 cc. Variasi penambahan gas hidrogen adalah sebesar (0,01 ; 0,02 ; 0,03) ml/detik. Variabel yang dipakai dalam penelitian kali ini adalah variabel bebas yaitu putaran mesin (rpm), variabel terikat yaitu unjuk kerja motor bensin diantaranya torsi, daya efektif, konsumsi bahan bakar spesifik efektif, efisiensi termal efektif, dan kadar emisi gas buang (CO, HC dan CO<sub>2</sub>). Variabel terkontrol adalah variasi penambahan gas hidrogen. Hasil yang didapat adalah terjadi perbaikan unjuk kerja dengan adanya penambahan gas hidrogen, juga terjadi pengurangan kada emisi gas buangnya. Torsi tertinggi yaitu 1,31 kg.m pada putaran 3500 rpm dan penambahan gas hidrogen 0,03 ml/detik. Daya efektif tertinggi yaitu 6,758 PS pada putaran 4000 rpm dan variasi gas hidrogen 0,03 ml/detik. Konsumsi bahan bakar spesifik efektif terendah sebesar 0,175 kg/(PS.jam) pada 3500 rpm dan gas hidrogen 0,03 ml/detik. Efisiensi terbesar yaitu 29,4 % pada 3500 rpm dan 0,03 ml/detik penambahan gas hidrogen. Untuk kadar emisi gas buang mengalami penurunan diantaranya: gas CO terendah yaitu 1,86 % volume pada 2000 rpm dan 0,03 ml/detik. Untuk kadar HC terendah yaitu 867 ppm volume pada putaran 4000 rpm dan 0,03 ml/detik penambahan gas hidrogen. Sedangkan nilai CO<sub>2</sub> terendah adalah 7,5 % volume pada 2000 rpm dan penambahan gas hidrogen sebesar 0,03 ml/detik.

**Kata Kunci :** Gas Hidrogen, Motor Bensin 4 Langkah, Unjuk Kerja, Emisi Gas Buang

## SUMMARY

**Oksy Eka Rozy**, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, January 2010, *Effect of Hydrogen Addition in Characteristic of Performance of 4-Stroke Engine*, Academic Supervisor: Prof.Ir.I.N.G. Wardana, M.Eng.,Ph.D.

Hydrocarbon fuel is a non renewable energy that cannot be produced. So that its reserve become decrease together along with human needed that become more complex. Besides, exhaust gas from combustion process also gives a negative effect for human and environment.

The alternative fuel that developed to produce in great quantity is hydrogen. The reason is the characteristic owned hydrogen is much better than hydrocarbon fuel. And this research just only hydrogen as a hydrocarbon fuel addition installed at intake manifold at motorcycle engine and produced by electrolyzing process. The purpose that want to reach is to improve hydrocarbon fuel characteristic, that finally improving characteristic of performance of motorcycle engine.

4-stroke motorcycle engine used in this research. Variation of hydrogen addition are (0.01 ; 0.02 ; 0.03) ml/sec. Result show that add hydrogen in engine increase the characteristic of performance of motorcycle, also decrease the exhaust gas emission. The more hydrogen give at engine, the more characteristic of performance resulted, and the less the content of exhaust gas produced. The highest torque (T) reached at 3500 rpm is 1.31 kg.m, the highest NE at 4000 rpm is 6.758 PS, the lowest SFCe at 3500 rpm is 0.175 kg/(PS.hour), the highest thermal efficiency at 3500 rpm is 29.4 %. And the result for emission content reached the lowest rate for CO at 2000 rpm is 1.86 %, HC at 4000 rpm is 867 ppm, and CO<sub>2</sub> at 2000 rpm is 7.5 %.

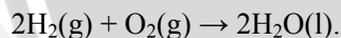
**Key words** : hydrogen, 4-stroke motorcycle, characteristic of performance, exhaust gas emission.

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

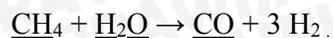
Saat ini jumlah kendaraan yang terdapat di Indonesia semakin lama semakin banyak. Sedangkan pada kenyataannya ketersediaan bahan bakar minyak (BBM) semakin sedikit karena minyak bumi merupakan sumber daya alam (SDA) yang tidak dapat diperbaharui. Karena minyak bumi merupakan SDA yang tidak dapat diperbaharui, maka harganya terus meningkat sehingga pernah menembus kisaran 135 USD perbarell pada Mei 2008. Meskipun saat ini harga minyak merosot tajam, tetapi keinginan untuk mencari alternatif bahan bakar terbarukan masih tetap terus diupayakan. Penelitian mengacu pada alternatif bahan bakar pengganti minyak bumi yang memiliki ketersediaan yang melimpah di alam tetapi juga terbaharukan. Misalnya Hidrogen. Hidrogen merupakan salah satu unsur yang terbanyak di bumi yang kita tempati ini yaitu sekitar 75%, diantaranya terdapat pada minyak bumi dalam bentuk hidrokarbon, juga terdapat pada senyawa air ( $H_2O$ ).

Syarat utama bahan bakar adalah dapat terbakar. Hidrogen merupakan unsur yang dalam bentuk molekul  $H_2$  mudah terbakar. Molekul gas diatomik  $H_2$  dapat dengan mudah terbakar meskipun dengan konsentrasi 4% di udara. Bahkan gas hidrogen lebih mudah terbakar dibanding dengan bensin sehingga jika digunakan sebagai bahan bakar akan lebih baik. Reaksi pembakaran yaitu:



Reaksi menghasilkan air ( $H_2O$ ), berarti bahan bakar hidrogen bersih dari polutan. Dengan hasil yang bersih dari polutan maka hidrogen dapat dijadikan salah satu bahan bakar masa depan yang ramah lingkungan.

Hidrogen dalam bentuk gas diatomik ( $H_2$ ) merupakan molekul yang tidak terdapat di alam secara alami. Cara pembuatan hidrogen sampai sekarang terus dikembangkan agar menghasilkan gas hidrogen lebih banyak dengan biaya yang lebih efisien. Beberapa cara tersebut diantaranya elektrolisis air yang menghasilkan gas hidrogen ( $H_2$ ) dan oksigen ( $O_2$ ), dan untuk skala besar adalah pembuatan gas hidrogen dari gas alami (Metana) direaksikan dengan uap air panas sebagai berikut :



Beberapa proses pembuatan gas hidrogen yang baru saja ditemukan dan masih dalam tahap pengembangan adalah diantaranya:

1. Menggunakan cangkang telur. Prosesnya secara umum yaitu cangkang telur berfungsi sebagai pemisah gas  $H_2$  dengan  $CO_2$ . Gas tersebut hasil dari reaksi antara CO dengan air ([www.energiterbarukan.com](http://www.energiterbarukan.com)).
2. Rekayasa tumbuhan alga. Alga secara alami menghasilkan hidrogen selain  $CO_2$ . Zat klorofil direkayasa sehingga alga memiliki klorofil yang sedikit, menyebabkan proses fotosintesis berlangsung rata tidak hanya pada permukaan pada wadah saja ([www.EnergiPortal.com](http://www.EnergiPortal.com)).
3. Elektrolisis air panas yang memanfaatkan panas gunung berapi sehingga proses elektrolisa hanya membutuhkan energi yang lebih sedikit. ([www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)).

Pada penelitian kali ini gas hidrogen digunakan sebagai penambah (*additive*) AFR (*air fuel ratio*) bukan sebagai bahan bakar sepenuhnya karena akan memerlukan penelitian lebih lanjut dan mendalam tentang konstruksi mesin khusus bahan bakar gas hidrogen. Dari hasil penelitian tentunya ada harapan akan alternatif bahan bakar pengganti minyak bumi sehingga kecemasan akan ketersediaan minyak bumi yang semakin berkurang tidak terjadi lagi.

### 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah tersebut diatas, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah: Bagaimana Pengaruh Variasi Penambahan Gas Hidrogen terhadap Unjuk Kerja Motor Bensin 4 Langkah.

### 1.3 Batasan Masalah

Untuk menghindari meluasnya permasalahan yang ada, maka dalam penelitian ini diberikan beberapa batasan masalah sebagai berikut :

- 1 Mesin yang digunakan adalah mesin honda Karisma 125 cc, empat langkah, satu silinder berpendingin udara.
- 2 Mesin diuji dalam keadaan stasioner.
- 3 Kondisi elektroliser pada saat pengujian dianggap baik, sehingga kebocoran gas hasil elektrolisa diabaikan.
- 4 Buka *throttle* motor bensin yaitu konstan.
- 5 Variasi penambahan gas hidrogen dengan tingkat variasi sebesar (0,01; 0,02 ; 0,03) ml/detik.

- 6 Bahan bakar yang digunakan adalah bensin Pertamina Plus yang dijual di SPBU.
- 7 Kondisi udara atmosfer dianggap konstan, sehingga perubahan yang mungkin terjadi diabaikan.

#### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini adalah mengetahui pengaruh variasi penambahan gas hidrogen terhadap unjuk kerja motor bensin 4 langkah yang meliputi daya efektif, torsi, efisiensi termal efektif, konsumsi bahan bakar spesifik efektif, dan kadar emisi gas buang.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan informasi kepada masyarakat mengenai pengaruh variasi penambahan gas hidrogen pada motor bensin 4 langkah terhadap konsumsi bahan bakar, daya, torsi, dan kadar emisi gas buang.
2. Upaya menuju ke arah penyediaan bahan bakar alternatif selain bahan bakar fosil.
3. Sebagai dasar ataupun literatur dalam penelitian selanjutnya khususnya tentang penggunaan gas hidrogen sebagai pengganti bahan bakar fosil.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Hidrogen Sebelumnya

##### Penemuan Hidrogen Pertama Kali

Gas hidrogen,  $H_2$ , pertama kali dihasilkan secara artifisial oleh T. Von Hohenheim (dikenal juga sebagai Paracelsus, 1493–1541) melalui pencampuran logam dengan asam kuat. Dia tidak menyadari bahwa gas mudah terbakar yang dihasilkan oleh reaksi kimia ini adalah unsur kimia yang baru. Pada tahun, Robert Boyle menemukan kembali dan mendeskripsikan reaksi antara besi dan asam yang menghasilkan gas hidrogen. Pada tahun 1766, Henry Cavendish adalah orang yang pertama mengenali gas hidrogen sebagai zat diskret (zat tersendiri atau berbeda dengan lainnya) dengan mengidentifikasi gas tersebut dari reaksi logam-asam sebagai “udara yang mudah terbakar”. Pada tahun 1781 dia lebih lanjut menemukan bahwa gas ini menghasilkan air ketika dibakar. Pada tahun 1783, Antoine Lavoisier memberikan unsur ini dengan nama hidrogen (dari Bahasa Yunani hydro yang artinya air dan genes yang artinya membentuk) ketika dia dan Laplace mengulang kembali penemuan Cavendish yang mengatakan pembakaran hidrogen menghasilkan air. Hidrogen pertama kali dicairkan oleh James Dewar pada tahun 1898 dengan menggunakan penemuannya, guci hampa. Dia kemudian menghasilkan hidrogen padat setahun kemudian ([www.Chem-istry.com/hidrogen.doc](http://www.Chem-istry.com/hidrogen.doc)).

##### Yull Brown

Yull Brown yang berasal dari Sydney Australia pada tahun 1974 berhasil mengembangkan BBA untuk menggerakkan mesin. Yull Brown sendiri sebenarnya mengembangkan penelitian dari Stanley Meyer. Bahan bakar air ini sebenarnya merupakan campuran gas hidrogen-hidrogen-oksigen yang dihasilkan dari elektrolisa air. Dalam tabung elektrolisa dipasang kumparan magnetik untuk memecahkan campuran air destilasi dan soda kue hingga menjadi campuran gas hidrogen-hidrogen-oksigen (HHO). Hidrogen bersifat eksplosif dan oksigen mendukung pembakaran, gas ini ditampung dalam tabung elektrolisa yang dialirkan kedalam ruang pembakaran mesin dan akan bercampur dengan gas hidrokarbon dari bahan bakar minyak, sehingga

terjadi penghematan dalam tingkat yang signifikan. ([www.gudangilmu.org/water-as-fuel?.mht](http://www.gudangilmu.org/water-as-fuel?.mht)).

### **Poempida Hidayatullah dan Futung Mustari**

Kedua orang Indonesia tersebut telah melakukan rekayasa sistem dan mengembangkan sejak empat tahun lalu, dengan melakukan elektrolisa larutan KOH dengan alasan mudah didapat dan harganya lebih murah serta lebih ramah lingkungan. Uji coba dilakukan dengan 30 kendaraan bermotor roda empat dari berbagai jenis baik yang berbahan bakar bensin maupun solar, pada kendaraan tersebut dipasang alat elektrolisa dan hasilnya dimasukkan ke ruang pembakaran hasilnya BBM dapat mencapai rasio jarak tempuh rata-rata 1 : 25 atau 25 km untuk setiap 1 Liter bahan bakar, dengan cara ini bahan bakar minyak (BBM) dapat dihemat sampai 59 persen. Salah satu uji coba yang dilakukan dengan menggunakan Toyota Avanza pada bulan Mei lalu, menunjukkan hasil efisiensi bahan bakar samapai 40 persen atau 1 liter untuk 18 km. Pada Mitsubishi L300 penghematan sampai 94 persen atau 1 liter dapat mencapai 23,3 km ([www.bbmain.blogspot.com/BAHAN\\_BAKAR\\_DARI\\_AIR : PENGHEMATAN DARI GAS HIDROGEN.htm](http://www.bbmain.blogspot.com/BAHAN_BAKAR_DARI_AIR_PENGHEMATAN_DARI_GAS_HIDROGEN.htm)).

### **Djoko Sutrisno**

Rekayasa yang dilakukan Djoko Sutrisno di Yogyakarta pada tahun 2005 dapat mencapai efisiensi hingga 80 persen dengan menggunakan prinsip ledakan Hidrogen yang terpatik pada api busi untuk menambah hasil pembakaran BBM. Alat yang dipasang pada kendaraan bermotor, menggunakan tabung plastik sebagai tempat elektrolisa larutan KOH dalam air suling dengan dipasang elektroda yang dihubungkan dengan arus listrik dari aki dan dipasang diode penyearah arus, gas hasil elektrolisa dialirkan ke dalam ruang pembakaran melalui manipol bersama bahan bakar atau bensin masuk ke ruang pembakaran sehingga memperkuat pembakaran sehingga terjadi penghematan bahan bakar. Di Yogyakarta telah terpasang alat ini pada 25 mobil dan sekitar 50 sepeda motor ([www.bbmain.blogspot.com/BAHAN\\_BAKAR\\_DARI\\_AIR : PENGHEMATAN DARI GAS HIDROGEN.htm](http://www.bbmain.blogspot.com/BAHAN_BAKAR_DARI_AIR_PENGHEMATAN_DARI_GAS_HIDROGEN.htm)).

### **Chandra Himawan**

Chandra Himawan (2008) meneliti tentang *Pengaruh Variasi Arus Listrik DC pada Elektroliser Terhadap Karakteristik Kinerja Motor Bensin 4 Langkah*. Hasilnya

adalah bahwa penggunaan elektroliser sebagai alat untuk menghasilkan gas hidrogen secara umum meningkatkan karakteristik kinerja motor bakar. Dan penggunaan arus DC yang secara umum meningkatkan performa adalah sebesar 5 ampere.

## 2.2 Hidrogen

(Yunani *hydro*=air, dan *genes*=pembentukan). Hidrogen telah digunakan bertahun-tahun sebelum akhirnya dinyatakan sebagai unsur yang unik oleh Cavendish di tahun 1776. Dinamakan hidrogen oleh Lavoisier, hidrogen adalah unsur yang terbanyak dari semua unsur di alam semesta. Elemen-elemen yang berat pada awalnya dibentuk dari atom-atom hidrogen atau dari elemen-elemen yang mulanya terbuat dari atom-atom hidrogen. Unsur ini ditemukan di bintang-bintang dan memainkan peranan yang penting dalam memberikan sumber energi jagat raya melalui reaksi proton-proton dan siklus karbon-nitrogen. Proses fusi atom-atom hidrogen menjadi helium di matahari menghasilkan jumlah energi yang sangat besar.

Walau hidrogen adalah benda gas, kita sangat jarang menemukannya di atmosfer bumi. Gas hidrogen yang sangat ringan, jika tidak terkombinasi dengan unsur lain, akan berbenturan dengan unsur lain dan dikeluarkan dari lapisan atmosfer. Di bumi hidrogen banyak ditemukan sebagai senyawa (air) di mana atom-atomnya bertaut dengan atom-atom oksigen. Atom-atom hidrogen juga dapat ditemukan di tetumbuhan, petroleum, arang, dan lain-lain. Sebagai unsur yang independen, konsentrasinya di atmosfer sangat kecil (1 *ppm by volume*). Sebagai gas yang paling ringan, hidrogen berkombinasi dengan elemen-elemen lain kadang-kadang secara eksplosif untuk membentuk berbagai senyawa.

Unsur hidrogen terdapat di alam paling besar jumlahnya kira-kira 90% ([chemistry.org/hydrogen](http://chemistry.org/hydrogen)). Di bumi, unsur hidrogen terdapat paling banyak dalam senyawa seperti air, minyak jaringan tanaman dan binatang. Pada temperatur kamar molekul hidrogen berupa gas tidak berbau, tidak berasa dan tidak berwarna serta amat sedikit larut dalam air. Hidrogen larut secara mudah dalam beberapa logam, biasanya sebagai atom-atomnya daripada sebagai molekul diatomiknya. Oleh karena atom H lebih reaktif daripada H<sub>2</sub> maka logam, sebagai pelarut, ini dapat bertindak sebagai katalis pada reaksi hidrogen pada senyawa lain.

Saat ini banyak sekali penelitian tentang pembuatan gas hidrogen. Penelitian ini untuk mendapatkan volume gas hidrogen yang banyak dengan penggunaan energi yang

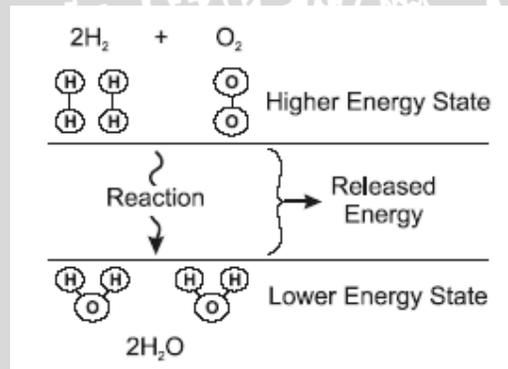
dapat ditekan seminimal mungkin. Pembuatan gas hidrogen ini (gas hidrogen sintetis) dikarenakan saat ini gas hidrogen alami yang berasal dari perut bumi cadangannya mulai menipis.

Beberapa propertis yang menunjukkan kualitas bahan bakar gas hidrogen diantaranya adalah sebagai berikut :

### 2.2.1 Reaktifitas

Reaktifitas adalah ciri-ciri bahan bakar. Reaksi kimia terjadi saat molekul bahan bakar membentuk ikatan dengan oksigen (dari udara) sehingga akhirnya molekul yang bereaksi berada level energi lebih rendah dari kondisi awal.

Energi yang dibebaskan setelah bahan bakar bereaksi dengan oksigen tersebut dapat dimanfaatkan untuk kerja. Hal ini berlaku pada dua jenis reaksi yaitu reaksi pembakaran (*internal combustion engine* dimana energi yang dibebaskan dalam bentuk panas) dan reaksi elektrokimia (sel bahan bakar dimana energi yang dibebaskan dalam bentuk potensial listrik dan panas).



Gambar 2.1 Keadaan energi kimia Hidrogen  
Sumber: Lanz (2001:12)

Jika sejumlah kecil energi dalam bentuk letikan bunga api (*spark*) digunakan untuk campuran hidrogen dan oksigen (*fuel-air mixture*), molekul akan bereaksi dengan sangat kuat membebaskan sejumlah besar panas dengan air sebagai produk akhirnya. Reaksi pembentukan air dari hidrogen dan oksigen adalah bersifat reversibel (bolak balik), sehingga memungkinkan untuk mengkonversi air pada kondisi energi rendah menjadi hidrogen dan oksigen pada kondisi energi tinggi.

### 2.2.2 Produk Akhir dari Reaksi Bahan Bakar

Bahan bakar hidrokarbon dalam reaksinya dapat menghasilkan beberapa komponen kimia yang berupa asap yang dapat mempengaruhi kesehatan manusia dan juga lingkungan.

- Oksigen bereaksi dengan karbon membentuk karbonmonoksida (CO) dan karbondioksida (CO<sub>2</sub>). CO<sub>2</sub> merupakan penyebab efek rumah kaca yang mengakibatkan pemanasan global. CO beracun bagi manusia dan menyebabkan melemahnya kemampuan darah dalam mengedarkan oksigen ke seluruh tubuh. CO terbentuk oleh karena kurangnya pasokan udara selama pembakaran sehingga mesin bekerja pada pembakaran miskin. Reduksi CO menyebabkan peningkatan pembentukan CO<sub>2</sub>.
- Oksigen bereaksi dengan nitrogen membentuk NOx (oksida dari nitrogen). NOx merusak jaringan paru-paru dan juga penyebab rusaknya ozon. Pembentukan NOx yaitu pada temperatur pembakaran tinggi (1480<sup>0</sup>C), sehingga pengapian dengan tegangan yang tinggi dan peningkatan rasio tekanan akan menghasilkan NOx pada gas buangnya.
- Oksigen bereaksi dengan sulfur membentuk oksida dari sulfur (SOx). Sox adalah partikel dalam bentuk jelaga atau arang. Partikel jelaga tersebut bila ukurannya sangat kecil (<2,5 mikron) dapat menyebabkan kanker paru-paru.

Hidrogen (H<sub>2</sub>) lebih baik dari bahan bakar hidrokarbon dan dapat dikatakan sebagai bahan bakar ideal dalam kaitannya dengan produksi gas buang. Hidrogen tidak mengandung karbon atau sulfur sehingga tidak mengandung polutan CO, CO<sub>2</sub>, dan Sox atau partikel jelaga seperti yang dihasilkan pada pembakaran hidrokarbon. Hidrogen dapat terbakar pada pembakaran miskin, menghasilkan temperatur pembakaran yang lebih rendah dan menghasilkan emisi NOx yang sangat rendah.

### 2.2.3 Energi

#### 1. Kandungan Energi (*Energy Content*)

Setiap bahan bakar dapat melepaskan sejumlah energi saat bereaksi dengan oksigen untuk membentuk air. Kandungan energi ini diukur secara eksperimen dan diukur oleh HHV (*Higher Heating Value*) bahan bakar dan LHV (*Lower Heating Value*). Perbedaan HHV dengan LHV adalah panas penguapan dan menggambarkan jumlah energi yang dibutuhkan untuk menguapkan bahan bakar cair menjadi bahan

bakar gas, seperti energi yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap. LHV juga menggambarkan sejumlah energi yang tersedia untuk melakukan kerja. Sehingga dapat diartikan bahwa *Heating value* atau nilai kalor adalah panas yang dihasilkan dari reaksi kimia pembakaran 1 Kg bahan bakar dan oksigen yang terbakar sempurna

Tabel 2.1 Harga Panas (*Heating Value*) Beberapa Bahan Bakar

Fuel	Higher Heating Value (at 25 <sup>0</sup> C and 1 atm)	Lower Heating Value (at 25 <sup>0</sup> C and 1 atm)
Hydrogen	61,000 Btu/lb (141.86 kJ/g)	51,500 Btu/lb (119.93 kJ/g)
Methane	24,000 Btu/lb (55.53 kJ/g)	21,500 Btu/lb (50.02 kJ/g)
Propane	21,650 Btu/lb (50.36 kJ/g)	19,600 Btu/lb (45.6 kJ/g)
Gasoline	20,360 Btu/lb (47.5 kJ/g)	19,000 Btu/lb (44.5 kJ/g)
Diesel	19,240 Btu/lb (44.8 kJ/g)	18,250 Btu/lb (42.5 kJ/g)
Methanol	8,580 Btu/lb (19.96 kJ/g)	7,760 (18.05 kJ/g)

Sumber : Lanz (2001:15)

Bahan bakar gas sudah berbentuk uap sehingga tidak diperlukan energi untuk mengubahnya menjadi gas. Baik HHV atau LHV menunjukkan jumlah energi yang dikandung untuk setiap satuan berat bahan bakar. Terlihat pada tabel bahwa energi gas hidrogen yang dimiliki tiap satuan berat paling tinggi dibanding bahan bakar lain. Selain energi yang besar tersebut, hidrogen juga tidak mengandung karbon (C) sehingga sangat ringan. Hal tersebut menjadi alasan mengapa pesawat ruang angkasa menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar.

Berdasar tabel diatas, jumlah energi yang dibebaskan selama reaksi dari hidrogen adalah sekitar 2,5 kali lebih besar dibanding bahan bakar hidrokarbon (metana, propane, dll), sehingga ledakan yang ditimbulkan lebih besar dan kuat. Tetapi durasi atau waktu ledakan berbanding terbalik dengan energi ledakannya. Jadi api hidrogen lebih singkat dari api hidrokarbon.

## 2 Kerapatan Energi (*Energy Density*)

Bila kandungan energi menunjukkan jumlah energi untuk tiap satu satuan massa bahan bakar, maka kerapatan energi menunjukkan jumlah energi yang terkandung untuk tiap satu satuan volume bahan bakar.

Kerapatan energi mengukur bagaimana atom hidrogen terkandung dalam bahan bakar. Hal diatas dapat pula disangkutpautkan pada hidrokarbon yang jika terdapat

peningkatan jumlah atom hidrogen permolekul, juga meningkatkan kerapatan energi. Disaat peningkatan atom hidrogen, atom karbon juga meningkat sehingga hidrokarbon tersebut bertambah berat. Pada dasarnya, kerapatan energi pada hidrogen bernilai kecil meskipun energi persatuan massanya adalah yang terbesar dibanding hidrokarbon.

Tabel 2.2. Kerapatan Energi Pada Beberapa Bahan Bakar

Fuel	Energy Density (LHV)
Hydrogen	270 Btu/ft <sup>3</sup> (10,050 kJ/m <sup>3</sup> ); gas at 1 atm and 60 <sup>0</sup> F (15 <sup>0</sup> C)
	48,900 Btu/ft <sup>3</sup> (1,825,000 kJ/m <sup>3</sup> ); gas at 3,000 psi (200 bar) and 60 <sup>0</sup> F (15 <sup>0</sup> C)
	121,000 Btu/ft <sup>3</sup> (4,500,000 kJ/m <sup>3</sup> ); gas at 10,000 psi (690 bar) and 60 <sup>0</sup> F (15 <sup>0</sup> C)
	227,850 Btu/ft <sup>3</sup> (8,491,000 kJ/m <sup>3</sup> ); liquid
Methane	875 Btu/ft <sup>3</sup> (32,560 kJ/m <sup>3</sup> ); gas at 1 atm and 60 <sup>0</sup> F (15 <sup>0</sup> C)
	184,100 Btu/ft <sup>3</sup> (6,860,300 kJ/m <sup>3</sup> ); gas at 3,000 psi (200 bar) and 60 <sup>0</sup> F (15 <sup>0</sup> C)
	561,500 Btu/ft <sup>3</sup> (20,920,400 kJ/m <sup>3</sup> ); liquid
Propane	2,325 Btu/ft <sup>3</sup> (86,670 kJ/m <sup>3</sup> ); gas at 1 atm and 60 <sup>0</sup> F (15 <sup>0</sup> C)
	630,400 Btu/ft <sup>3</sup> (23,488,800 kJ/m <sup>3</sup> ); liquid
Gasoline	836,000 Btu/ft <sup>3</sup> (31,150,000 kJ/m <sup>3</sup> ); liquid
Diesel	843,700 Btu/ft <sup>3</sup> (31,435,800 kJ/m <sup>3</sup> ) minimum; liquid
Methanol	424,100 Btu/ft <sup>3</sup> (15,800,100 kJ/m <sup>3</sup> ); liquid

Sumber : Lanz (2001:16)

#### 2.2.4 Flammability

*Flammability* adalah kemampuan suatu bahan bakar untuk dapat terbakar. Sebagian dari kita menyadari bahwa beberapa bahan bakar akan lebih mudah terbakar atau menyala daripada bahan yang lain. Beberapa bahan hanya cukup memerlukan letika api yang kecil saja untuk dapat terbakar seperti gas hidrogen, sedangkan bahan yang lain contohnya graphite tidak akan menyala meskipun menggunakan api las.

Pengukuran *Flammability* dari suatu bahan sebagian besar dilakukan dengan cara mengukur hal-hal berikut :

##### 1. Flashpoint

*Flash Point* atau titik nyala adalah temperatur terendah dari uap campuran bahan bakar dan udara untuk menyala dan terbakar sesaat ketika disinggung dengan

suatu sumber nyala api. Jika suatu temperatur bahan bakar berada dibawah *flashpoint* nya, maka bahan bakar tersebut tidak dapat dibakar. Tetapi jika diatas *flashpoint*, maka pembakaran dapat berlangsung.

Tabel 2.3. Flashpoint Pada Beberapa Bahan Bakar

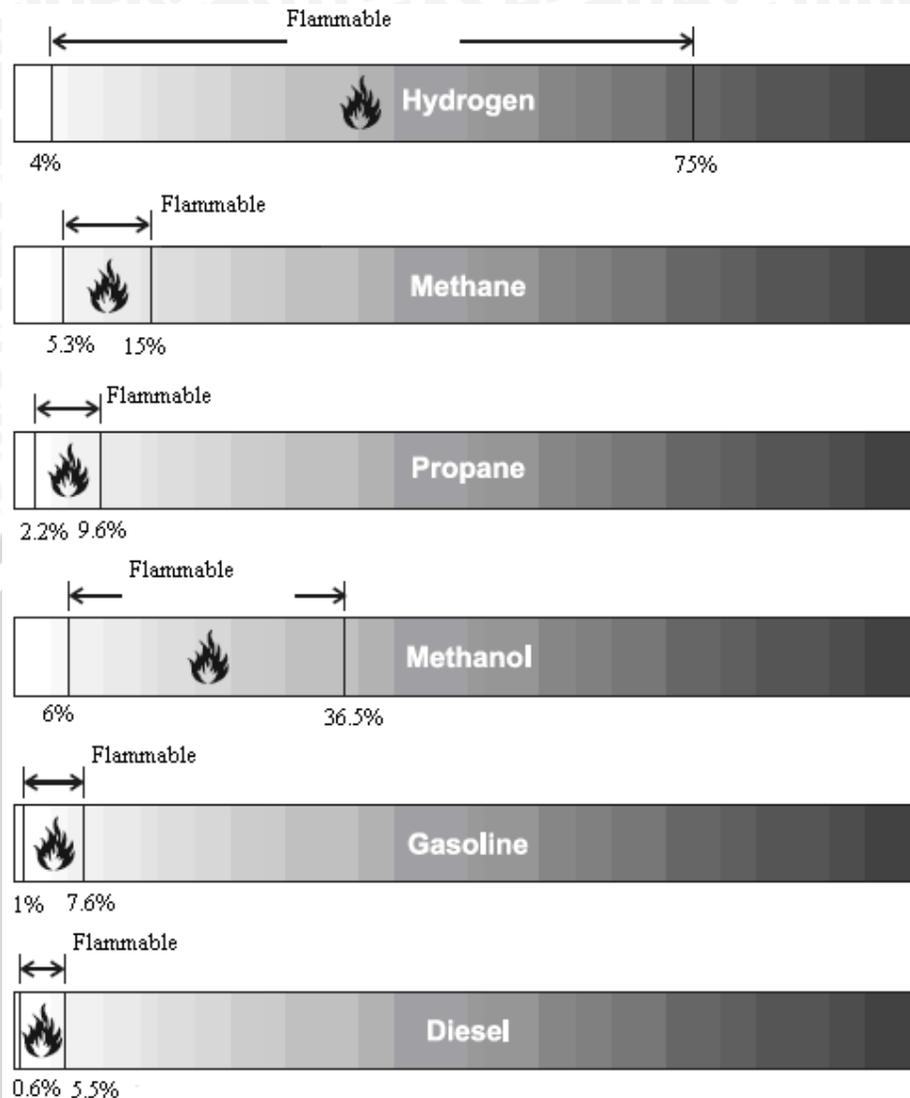
Fuel	Flashpoint
Hidrogen	<-423 <sup>0</sup> F (<-253 <sup>0</sup> C; 20 K)
Methane	-306 <sup>0</sup> F (-188 <sup>0</sup> C; 85 K)
Propane	-156 <sup>0</sup> F (-104 <sup>0</sup> C; 169 K)
Gasoline	-45 <sup>0</sup> F (-43 <sup>0</sup> C; 230 K)
Methanol	52 <sup>0</sup> F (11 <sup>0</sup> C; 284 K)

Sumber : Lanz (2001:18)

## 2. *Flammability Range*

*Flammability range* yaitu memiliki jarak dari *Lower Flammability Limit* (LFL) hingga *Upper Flammability Limit* (UFL). LFL adalah konsentrasi gas terendah yang dapat terbakar jika bercampur dengan udara dan diberikan letikan. Sedang UFL adalah batas konsentrasi tertingginya. Jika suatu bahan bakar memiliki konsentrasi dibawah LFL tidak dapat terbakar karena konsentrasi bahan bakar terlalu miskin. Demikian juga jika diatas UFL tidak dapat terbakar karena konsentrasi bahan bakar terlalu kaya.

Campuran stoikiometrik terjadi saat molekul oksigen dan hidrogen berada pada rasio yang tepat yang dibutuhkan untuk menyempurnakan reaksi pembakaran. Jika konsentrasi hidrogen lebih banyak dari oksigen, disebut campuran kaya sehingga ada bahan bakar yang tidak terbakar meskipun seluruh oksigen sudah terpakai. Jika campuran miskin maka seluruh bahan bakar dapat terbakar tetapi akan menyisakan oksigen. Gas hidrogen memiliki *flammability range* yang luas (4-75%).



Gambar 2.2. *Flammability range* dari beberapa bahan bakar pada temperatur Atmosfer

Sumber : Lanz (2001: 20)

### 3. *Autoignition Temperature (Temperatur Penyalaan Sendiri)*

*Autoignition Temperature* adalah temperatur minimal yang dibutuhkan suatu bahan bakar untuk mengawali pembakaran sendiri setelah sebelumnya sudah dalam bentuk campuran bahan bakar-udara tanpa adanya sumber penyalaan. Sederhananya jika bahan bakar dipanasi hingga menyala tanpa diberikan sumber penyalaan.

Setiap bahan bakar memiliki *Autoignition Temperature* yang berbeda. Misalnya gas hidrogen memiliki temperatur relatif tinggi yaitu  $585^{\circ}\text{C}$  sehingga sulit untuk menyalakan campuran hidrogen-udara tanpa adanya sumber nyala.

Tabel 2.4. *Autoignition Temperature* dari Beberapa Bahan Bakar

Fuel	Autoignition Temperature
Hydrogen	1085 °F (585 °C)
Methane	1003 °F (540 °C)
Propane	914 °F (490 °C)
Methanol	725 °F (385 °C)
Gasoline	450 to 900 °F (230 to 480 °C)

Sumber : Lanz (2001: 21)

#### 4. Octane Number (Bilangan Oktan)

*Octane number* (bilangan oktan) adalah suatu bilangan yang menunjukkan tingkat ketangguhan bahan bakar terhadap detonasi atau *knocking*. Sedangkan definisi detonasi/*knocking* adalah terjadinya *auto ignite* atau ledakan otomatis yang terjadi diruang bakar kendaraan sebelum saatnya. Maksudnya adalah campuran bahan bakar dan udara yang dikompresi akan mengalami tekanan yang menyebabkan temperatur dalam ruang bakar sangat tinggi, sehingga campuran bahan bakar dan udara ini dapat meledak sendiri meskipun busi belum menyala/memercikkan api. Jadi semakin tinggi angka oktan ini maka semakin susah terjadi *knocking*/detonasi, dan semakin baik bahan bakar itu.

Tabel 2.5. Nomor Oktan dari Beberapa Bahan Bakar

Fuel	Octane Number
Hydrogen	130+
Methane	125
Propane	105
Octane	100
Gasoline	87
Diesel	30

Sumber: Lanz (2001: 21)

#### 5. Energi Penyalaan

Energi penyalaan adalah jumlah energi eksternal yang digunakan dalam rangka untuk menyalakan campuran bahan bakar-udara. Energi penyalaan harus lebih tinggi daripada temperatur penyalaan sendiri (*autoignition temperature*) dan harus memiliki

durasi yang cukup untuk memanaskan uap bahan bakar hingga mencapai temperatur penyalanya.

Meskipun hidrogen memiliki *autoignition temperature* yang lebih tinggi dari bahan bakar hidrokarbon, tetapi memiliki energi penyalan yang kecil yaitu sekitar 0,02mJ. Artinya hidrogen mudah untuk dinyalakan. Meskipun dengan listrik statik yang dihasilkan dari tubuh manusia sudah cukup untuk membuat gas hidrogen terbakar.

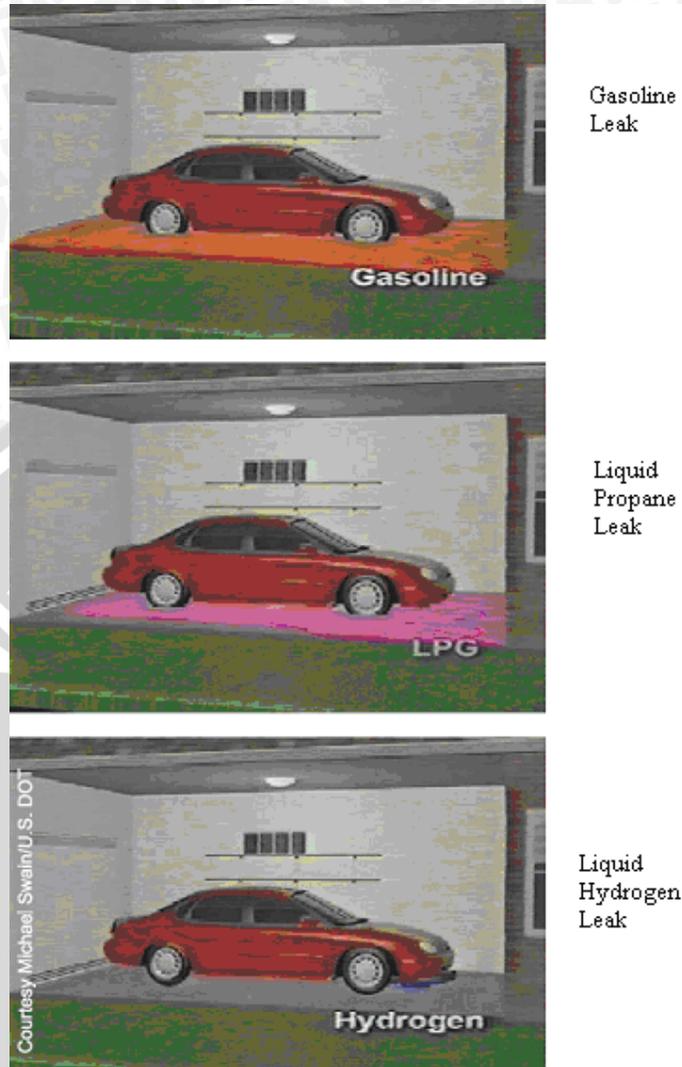
Tabel 2.6 Energi Penyalan Minimum dari Beberapa Bahan Bakar

	Hydrogen	Methane	Propane	Gasoline
Chemical formula	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
Minimum ignition energy (mJ)	0.02	0.29	0.26	0.24
Flame speed (cm/s)	237	42	46	41.5
Molecular weight	2.02	16.04	44.1	107

Sumber: Wall (2008: 9)

## 6. Karakteristik Nyala Api

Warna nyala api hidrogen biru pucat dan hampir tidak terlihat pada siang hari dikarenakan juga tidak menghasilkan jelaga. nyala api akan kelihatan jika terdapat kelembaban atau kotoran (seperti sulfur) di udara. Nyala api hidrogen lebih aman dari nyala bahan bakar hidrokarbon. Gas hidrogen akan naik ke atas dengan cepat dikarenakan daya apung dan sifat penyebarannya yang tinggi ( hidrogen adalah unsur yang paling ringan). Sehingga api dari sumber gas hidrogen akan menyala mengarah ke atas (vertikal). Berbeda dengan hidrokarbon, semisal bensin akan menyebar rata pada permukaan, sehingga mencakup area yang luas. Hal tersebut akan berbahaya jika terdapat kebocoran pada tangki kendaraan bermotor yang dapat menghanguskan kendaraan tersebut.



Gambar 2.3. Simulasi Kebocoran Pada Beberapa Bahan Bakar.  
Sumber : Lanz (2001: 11)

### 2.3 Unjuk Kerja Motor Bensin

Yang dimaksud dengan unjuk kerja motor bensin adalah karakteristik atau bentuk hubungan antara indikator kinerja sebagai variabel terikat dengan indikator operasionalnya sebagai variabel bebas. Dengan adanya bentuk hubungan antara kedua indikator tersebut maka dapat diketahui kondisi optimum suatu motor bakar harus dioperasikan, atau apakah kondisi suatu motor masih baik dan layak untuk dioperasikan.

Pengujian dari suatu motor bakar adalah untuk mengetahui kinerja dari motor bakar itu sendiri. Parameter- parameter yang akan dibahas untuk mengetahui kinerja mesin dalam penelitian motor bensin 4 langkah ini meliputi :

- 1) Torsi (T),
- 2) Daya efektif (Ne)
- 3) Konsumsi bahan bakar spesifik efektif(SFCe).
- 4) Efisiensi Termal Efektif ( $\eta_e$ )
- 5) Emisi gas buang

### 1) Torsi (T)

Torsi merupakan gaya putar yang dihasilkan oleh poros mesin. Besarnya torsi suatu mesin dapat diukur dengan menggunakan alat yang disebut *dynamometer*, yang akan menunjukkan besarnya gaya atau beban pengereman pada poros dan dinyatakan dalam satuan kgf (kg *force* atau kg gaya). Digunakan satuan kgf bukan kgm (kg massa) dikarenakan beban pengereman merupakan bentuk dari gaya. Harga torsi dapat dicari dari hubungan antara perkalian besarnya beban pengereman dengan panjang lengan yang menghubungkan timbangan dengan poros. Persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$T = F \cdot L \text{ [Kgf.m]} \quad \text{atau} \quad T = \frac{N_e}{n} \cdot 716,2 \text{ [Kgf.m]} \quad (2-1)$$

dengan :

$N_e$  = daya efektif (PS)

$n$  = putaran mesin (rpm)

$T$  = torsi yang dihasilkan [Kgf.m]

$F$  = besarnya beban pengereman (Kgf)

$L$  = panjang lengan dinamometer = 0,358 (m)

### 2) Daya Efektif (Ne)

Daya efektif merupakan daya yang dihasilkan oleh poros engkol untuk menggerakkan beban. Daya poros itu sendiri dibangkitkan oleh daya indikator yang merupakan daya gas pembakaran yang menggerakkan torak. Sebagian daya indikator dibutuhkan untuk mengatasi gesekan mekanis, misalnya gesekan antara torak dan dinding silinder, gesekan antara poros dan bantalan, untuk menggerakkan peralatan Bantu ( pendingin, kipas radiator, dsb ), dan lainnya.

Untuk mendapat daya efektif dapat dicari dengan mengalikan torsi (T) dengan kecepatan anguler poros ( $\omega$ ). Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$Ne = T \cdot \omega = \frac{T \cdot 2 \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot 75} = \frac{T \cdot n}{716.2} \text{ [PS]} \quad (2-2)$$

dengan:

Ne = daya efektif [PS]

T = torsi (kgf.m)

$\omega$  = kecepatan anguler poros (rad/det)

N = putaran mesin (rpm)

### 3) Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Efektif (SFCE)

Konsumsi bahan bakar spesifik efektif adalah banyaknya bahan bakar yang diperlukan untuk menghasilkan daya efektif sebesar 1PS selama 1 jam. Konsumsi bahan bakar ini dapat diukur dengan menggunakan meter alir (*flow meter*) yaitu berupa tabung ukur yang telah diketahui volumenya. Bahan bakar akan dialirkan melalui tabung ukur ini kemudian diamati waktu yang diperlukan untuk menghabiskan bahan bakar sebesar volume tersebut pada saat mesin bekerja. Konsumsi bahan bakar tersebut dalam satuan waktu per satuan volum sehingga perlu dikonversikan dalam satuan kg/jam, maka akan diperoleh rumusan :

$$Fc = \frac{b}{t} \cdot \gamma_f \cdot \frac{3600}{1000} \text{ [kg} \cdot \text{jam}^{-1}] \quad (2-3)$$

dengan:

Fc = konsumsi bahan bakar [kg . jam<sup>-1</sup>]

b = volume bahan bakar selama t detik (ml)

t = waktu untuk menghabiskan bahan bakar sebanyak b ml (dt)

$\gamma_f$  = berat spesifik bahan bakar (kg . lt<sup>-1</sup>)

Dari nilai konsumsi bahan bakar (Fc) didapat *specific fuel consumption efective* (SFCE) dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{SFCE} = \frac{Fc}{Ne} \text{ [Kg} \cdot \text{PS}^{-1} \cdot \text{jam}^{-1}] \quad (2-4)$$

dengan:

SFCE = konsumsi bahan bakar spesifik efektif [Kg . PS<sup>-1</sup> . jam<sup>-1</sup>]

Fc = konsumsi bahan bakar (kg . jam<sup>-1</sup>)

Ne = daya efektif (PS)

Konsumsi bahan bakar spesifik efektif dapat dijadikan ukuran ekonomis dan tidaknya pemakaian bahan bakar. Konsumsi bahan bakar spesifik efektif yang rendah menunjukkan efisiensi termal efektif yang tinggi karena efisiensi termal efektif berbanding terbalik dengan nilai konsumsi bahan bakar spesifik efektif.

#### 4) Efisiensi Termal Efektif ( $\eta_e$ )

Efisiensi termal efektif merupakan perbandingan antara banyaknya kalor yang dihasilkan oleh bahan bakar dengan daya efektif yang dihasilkan oleh mesin. Efisiensi termal efektif merupakan suatu ukuran untuk mengetahui ekonomis atau tidaknya dalam pemakaian bahan bakar, karena nilai dari efisiensi termal efektif berbanding terbalik dengan nilai konsumsi bahan bakar spesifik. Jadi jika konsumsi bahan bakar spesifik efektif semakin turun, maka efisiensi termal efektif akan meningkat. Biasanya efisiensi termal efektif dihitung dengan rumus :

$$\eta_e = \frac{Q_e}{Q_b} = \frac{N_e}{F_c \cdot LHV_{bb}} \cdot \frac{3600.75}{427} = \frac{632}{SFC_e \cdot LHV_{bb}} \quad [\%] \quad (2-5)$$

dengan:

$\eta_e$  = efisiensi termal efektif [%]

$Q_e$  = jumlah kalor yang digunakan untuk daya efektif (kkal . kg<sup>-1</sup>)

$Q_b$  = jumlah kalor dari pembakaran bahan bakar dan udara (kkal . kg<sup>-1</sup>)

$LHV_{bb}$  = nilai kalor rendah bahan bakar (kkal . kg<sup>-1</sup>)

#### 5) Emisi Gas Buang

Emisi gas buang merupakan komposisi atau kandungan yang terdapat pada gas sisa hasil pembakaran. Emisi gas buang dapat dijadikan indikasi apakah proses pembakaran yang terjadi sempurna atau tidak, sedangkan proses pembakaran juga dipengaruhi oleh bahan bakar yang digunakan.

Emisi telah memainkan peranan penting dalam pengembangan industri otomotif pada beberapa dekade terakhir ini. Saat ini emisi gas buang tidak dapat dihindari oleh industri otomotif . emisi gas buang utama yaitu hidrokarbon (HC), karbon monoksida (CO), dan oksida dari nitrogen (NO<sub>x</sub>). HC dan NO<sub>x</sub> yang dihasilkan dari pembakaran gas hidrogen sangat rendah. HC terutama dihasilkan dari bahan bakar yang tidak terbakar dan keluar sebagai gas buang. Sedangkan CO terbentuk dari pembakaran yang tidak sempurna. Jika terjadi pembakaran yang sempurna maka dihasilkan gas CO<sub>2</sub>.

HC dan CO juga dihasilkan dari pelumas mesin yang ikut terbakar. Hal tersebut dapat terjadi karena ring piston telah aus, kebocoran pada *intake valve* (katup/klep masuk). Beberapa solusi untuk meminimalisasi hal diatas adalah : mempersempit *piston ring gap* (celah ring piston), pemakaian ring piston yang tahan terhadap tekanan tinggi, *intake valve* diperbaiki kualitasnya dan lain-lain.

Alat yang digunakan untuk mengukur dan menganalisa komposisi gas buang yang diantaranya gas CO<sub>2</sub>, CO, danHC adalah *Exhaust Gas Analyzer*.

#### 2.4 Perbandingan LHV Antara Penggunaan Bahan Bakar Bensin dengan Campuran Bensin dan Gas Hidrogen

Kita memprediksikan bahwa dengan pemakaian campuran antara bahan bakar bensin (*gasoline*) dengan gas hidrogen akan meningkatkan daya motor adalah dengan melihat nilai panas (*Heating Value*). Nilai panas yang di gunakan untuk mengindikasikan peningkatan daya adalah nilai panas bawah (*Lower Heating Value*). LHV digunakan karena pembakaran terjadi pada fase gas.

Persamaan :

$$\text{LHV} = H_p - H_R \text{ [kJ/kmol]} \quad (2-6)$$

dengan :

$$\text{LHV} = \text{Lower Heating Value [kJ/kmol]}$$

$$H_p = \text{entalpi produk (kJ/kmol)}$$

$$H_R = \text{entalpi reaktan (kJ/kmol)}$$

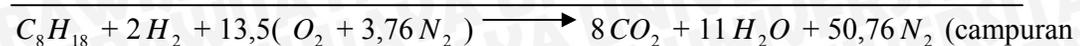
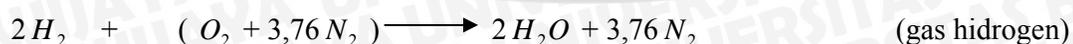
$$H = \sum(N_i \cdot \bar{h}_f) \quad (2-7)$$

dengan :

N = mol bahan bakar

$\bar{h}_f$  = entalpi formasi (kJ/kmol),  $\bar{h}_f$  didapat dari Cengel tabel A26 halaman 863.

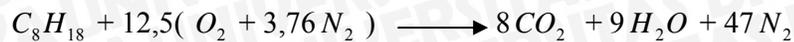
Reaksi pembakaran :



bensin dengan gas hidrogen).

(Nakula Sunarta, 2002: 8)

- Bensin



$$\begin{aligned} LHV &= H_P - H_R = [(N \cdot \bar{h}_f)CO_2 + (N \cdot \bar{h}_f)H_2O] - (N \cdot \bar{h}_f)C_8H_{18} \\ &= [(8)(-393.520 \text{ kJ/kmol}) + (9)(-285.830 \text{ kJ/kmol})] - (1)(-249.950 \text{ kJ/kmol}) \\ &= -5.471.000 \text{ kJ/kmol} \text{ atau } \frac{-5.471.000 \text{ kJ/kmol}}{114 \text{ kg/kmol}} = -47.991 \text{ kJ/kg } C_8H_{18} \end{aligned}$$

- Campuran bensin dengan hidrogen



$$\begin{aligned} LHV &= H_P - H_R = [(N \cdot \bar{h}_f)CO_2 + (N \cdot \bar{h}_f)H_2O] - [(N \cdot \bar{h}_f)C_8H_{18} + (N \cdot \bar{h}_f)H_2] \\ &= [(8)(-393.520 \text{ kJ/kmol}) + (11)(-285.830 \text{ kJ/kmol})] - \\ &\quad [(1)(-249.950 \text{ kJ/kmol}) + (2)(0 \text{ kJ/kmol})] \\ &= -6.042.340 \text{ kJ/kmol} \text{ atau } \frac{-6.042.340 \text{ kJ/kmol}}{(114 + 4) \text{ kg/kmol}} = -51.206 \text{ kJ/kg LHV} \text{ yang} \\ &\quad \text{dihasilkan dari campuran bensin dengan hidrogen.} \end{aligned}$$

Dengan membandingkan antara LHV pembakaran bensin dengan LHV pembakaran campuran bensin dan hidrogen maka dapat disimpulkan bahwa penambahan gas hidrogen dapat meningkatkan nilai panas, yang juga berarti meningkatkan daya dari motor bakar tersebut.

## 2.5 Hipotesis

Dengan penambahan gas hidrogen yang diperoleh dari proses elektrolisis pada motor bensin 4 langkah, maka nilai panas (LHV) bahan bakar akan meningkat, yang juga meningkatkan temperatur pembakaran, sehingga tekanan pada ruang bakar juga meningkat, menyebabkan naiknya unjuk kerja pada motor bakar.

## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah metode penelitian experimental semu dimana mesin diuji dalam kondisi tidak berpindah tempat. Hal ini dipergunakan untuk mengetahui pengaruh variasi putaran mesin dan pengaruh penggunaan elektroliser dengan berbagai variasi penambahan gas hidrogen pada *intake manifold* terhadap karakteristik kinerja dan emisi gas buang motor bensin empat langkah satu silinder.

#### 3.2 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini ada tiga macam variabel yang digunakan, yaitu :

##### a) Variabel bebas

Variabel bebas ialah variabel yang besarnya kita tentukan dan tidak dipengaruhi oleh variabel lain, berfungsi sebagai sebab dalam penelitian. Adapun yang merupakan variabel bebas dalam penelitian ini adalah:

- Putaran motor bensin 2000-4000 rpm.

##### b) Variabel terikat

Variabel terikat adalah variabel yang besarnya tergantung dari variabel bebas dan besarnya dapat diketahui setelah penelitian dilakukan. Adapun variabel terikat dalam pengujian ini yaitu:

- Torsi
- Daya efektif
- Konsumsi bahan bakar spesifik efektif
- Efisiensi termal efektif
- Emisi gas buang

##### c) Variabel terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang besarnya telah ditentukan selama penelitian dan bersifat konstan. Adapun yang termasuk dalam variabel terkontrol dalam penelitian ini, yaitu: variasi penambahan gas hidrogen sebesar (0,01; 0,02; 0,03) ml/detik.

### 3.3 Alat - alat yang digunakan

#### 3.3.1 Alat utama

Peralatan yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Motor bensin empat langkah dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Siklus : 4 Langkah
- Jumlah silinder : 1 buah, SOHC
- Diameter X langkah : 52,4 mm x 57,9 mm
- Pendingin : Udara
- Perbandingan Kompresi : 9,0 : 1
- Daya maksimum/putaran : 9,3 PS/ 7500 rpm
- Torsi maksimum : 1,03 kgf.m/ 4000 rpm
- Sistem pengapian : CDI elektronik, magneto
- Volume oli : 700 ml
- Bahan bakar : Bensin Pertamina Plus

2. Elektroliser

Merupakan alat penghasil gas hidrogen berasal dari air yang diberikan proses elektrolisa, dipasang pada ujung *intake manifold* setelah karburator.

#### 3.3.2 Peralatan bantu

1. *Flow meter* (meter alir)

Berupa tabung pengukur berisi sejumlah bahan bakar dengan volume tertentu. Digunakan untuk mengukur konsumsi bahan bakar yang dipakai selama pengujian.

2. *Tachometer*

Digunakan untuk mengukur kecepatan putaran poros mesin. Satuan yang digunakan adalah rpm ( *rotation per minute*).

3. Dinamometer

Digunakan untuk mengukur gaya pengereman pada poros *output*.

4. *Stop watch*

Digunakan untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan motor bensin untuk menghabiskan bahan bakar dengan volume tertentu. Selain itu juga digunakan untuk menghitung waktu produksi gas hidrogen.

5. *Exhaust Gas Analyzer*

Digunakan untuk mengukur dan menganalisa komposisi gas buang. Merk yang dipakai adalah Stargas Mod 898, dapat menganalisa emisi gas buang diantaranya

CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HC, dan NO. Kemampuan mengukur gas buang adalah seperti pada tabel dibawah :

Tabel 3.1 Kemampuan Pengukuran *Exhaust Gas Analyzer*

<i>Emisi Gas Buang</i>	<i>Kemampuan Pengukuran</i>	<i>Satuan</i>
CO	0 – 15,000	% vol
CO <sub>2</sub>	0 – 20,00	% vol
HC	0 – 30000	ppm vol
O <sub>2</sub>	0 – 25,00	% vol
NO	0 - 5000	ppm vol

Sumber : Buku Petunjuk Penggunaan Gas Analyzer (2005: 56)

#### 6. Avometer digital

Avometer atau disebut juga multimeter alat ini digunakan antara lain sebagai;

- Mengukur tegangan arus DC
- Mengukur kuat arus listrik
- Mengetes komponen-komponen

#### 7. Sumber Tegangan

Sumber tegangan yang digunakan adalah accu DC 12 volt

#### 8. Timbangan Digital

Digunakan untuk mengukur katalis (KOH) yang digunakan

### 3.4 Tempat Penelitian

Ada 2 tempat penelitian dan pengambilan data. Tempat penelitian dan pengambilan data tentang debit gas hidrogen yang dihasilkan berada dirumah peneliti, sedangkan penelitian tentang penggunaan elektroliser dengan variasi penambahan gas hidrogen terhadap unjuk kerja motor bensin empat langkah ini dilakukan di laboratorium Motor Bakar Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

### 3.5 Pelaksanaan Penelitian

#### 3.5.1 Penyusunan Alat Penelitian

Sebelum penelitian dilaksanakan dilakukan persiapan penyusunan alat- alat penelitian. Mempersiapkan instalasi utama yang dirangkai menjadi satu kesatuan.

Kemudian dilakukan persiapan peralatan pengujian serta penyetingan mesin dalam kondisi baik.

### 3.5.2 Prosedur Penelitian

Langkah- langkah yang dilakukan untuk setiap pengujian adalah sebagai berikut:

#### 1. Tahap Pertama

Mencari volume alir gas hidrogen yang sesuai dengan perencanaan variasi yaitu sebesar (0,01; 0,02; 0,03) ml/detik, caranya adalah :

- memvariasikan konsentrasi KOH sebagai katalis pada proses elektrolisa,
- memvariasikan jarak elektroda (katoda dan anoda), dan
- memvariasikan tinggi air yang dimasukkan kedalam elektroliser.

Data yang diperoleh nantinya tidak dapat langsung digunakan dalam pengambilan data, karena karena data volume alir yang didapat masih dalam campuran antara gas  $H_2$  dan  $O_2$ . Sesuai dengan persamaan stoikiometri :



$$\text{maka volume alir gas } H_2 = (\text{Volume alir yang didapat}) \times \frac{\text{Massa atom relatif } H_2}{\text{Total massa atom produk}}$$

$$(\text{Volume alir yang didapat}) \times \frac{2}{18}$$

Setelah semua data dikalikan dengan persamaan diatas, maka volume alir gas hidrogen telah diketahui. Setelah itu diambil data yang sesuai atau mendekati dengan perencanaan variasi.

#### 2. Tahap Kedua

Pengambilan data dilakukan pada peralatan utama yang telah dilengkapi dengan peralatan bantu tanpa dipasang *electrolyzer* pada *intake manifold*. Pengambilan data dilakukan dengan :

- Atur bukaan throttle pada bukaan yang diinginkan (40 %) dengan membaca *throttle valve indicator (%)*. Bukaan *throttle* harus memberikan putaran mesin lebih dari 4000 rpm, karena putaran mesin maksimal dalam pengujian adalah 4000 rpm.
- Atur putaran mesin (rpm) mulai dari putaran 2000 rpm sampai dengan 4000 rpm dengan interval kenaikan sebesar 500 rpm. Caranya adalah dengan memberikan beban pengereman. Untuk pengambilan data pertama beban pengereman diberikan sampai putaran mencapai 2000 rpm. Selanjutnya naik tiap 500 rpm Untuk

- memperoleh data yang lebih teliti dilakukan pengulangan sebanyak 5 kali untuk setiap putaran.
- Tunggu kondisi mesin stabil kemudian lakukan pengambilan data untuk semua data yang diperlukan.

### 3. Tahap Ketiga

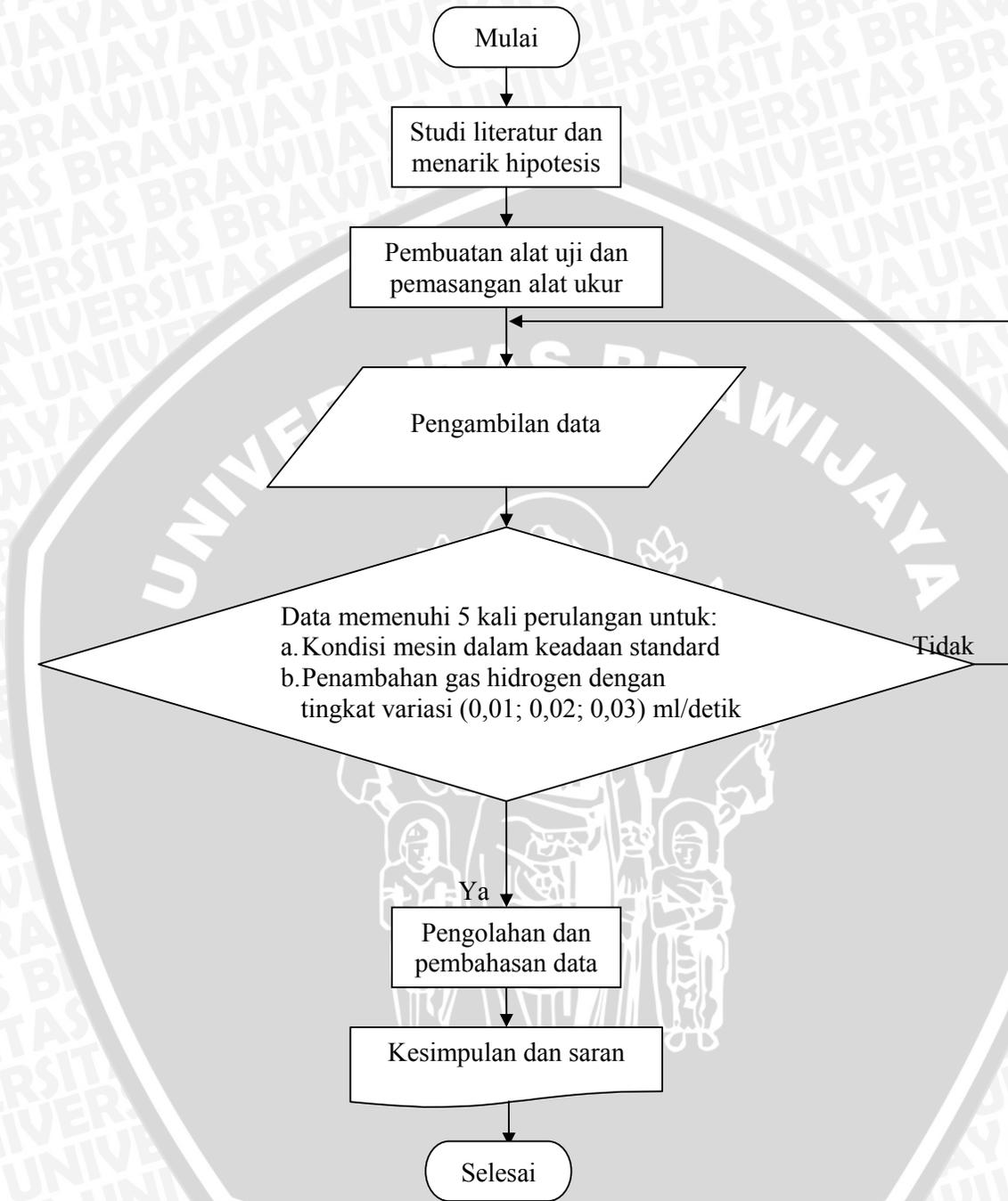
Analogi dengan tahap pertama, akan tetapi dipasang elektroliser pada *intake manifold* ke ruang bakar dengan variasi penambahan gas hidrogen sebesar (0,01; 0,02; 0,03) ml/detik.

### 4. Data yang dicatat meliputi

- Besarnya putaran (rpm)
- Gaya pengereman (kg)
- Konsumsi bahan bakar (ml/det)
- Komposisi gas buang meliputi gas CO<sub>2</sub> (% vol), CO (% vol), dan HC (ppm vol).



3.6 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Hasil Penelitian

Jenis data yang diambil langsung dari penelitian ini adalah data awal, karena tidak dapat digunakan secara langsung untuk menemukan nilai dari unjuk kerja berupa torsi, daya efektif, konsumsi bahan bakar spesifik efektif, dan efisiensi termal efektif. Sedangkan data untuk kandungan gas buang dapat langsung digunakan.

##### 4.1.1 Data Hasil Penelitian

Data awal yang diambil pada penelitian ini adalah gaya pengereman, konsumsi bahan bakar dan emisi gas buang yaitu CO, HC, dan CO<sub>2</sub>. Data yang ditampilkan sudah dalam bentuk nilai rata-rata. Untuk data dalam 5 kali pengulangan dapat dilihat dalam halaman lampiran.

Sedangkan kondisi pada waktu pengujian motor bakar 4 langkah adalah sebagai berikut :

1. Tipe motor : Honda Karisma 125 cc
2. Putaran : 2000 rpm – 4000 rpm
3. Bukaian *Throttle* : 40 %
4. Kelembaban relatif : 62 %
5. Temperatur : 28 °C
6. Tekanan : 951 hPa = 95,1 kPa

Tabel 4.1 Gaya Pengereman (F) Pada Pengujian Motor Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen

rpm	0 ml/detik (kg)	0,01 ml/det (kg)	0,02 ml/det (kg)	0,03 ml/det (kg)
2000	2,22	2,39	2,34	2,4
2500	2,3	2,61	2,86	3
3000	2,44	2,7	3,23	3,26
3500	2,56	2,81	3,36	3,66
4000	2,28	2,4	2,87	3,38

Tabel 4.2 Konsumsi Bahan Bakar (Fc) Pada Pengujian Motor Bensin Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen

rpm	0 ml/detik (kg/jam)	0,01 ml/det (kg/jam)	0,02 ml/det (kg/jam)	0,03 ml/det (kg/jam)
2000	0,67	0,65	0,63	0,58
2500	0,81	0,85	0,87	0,87
3000	0,96	0,98	1,08	0,98
3500	1,03	1,05	1,19	1,12
4000	1,15	1,17	1,31	1,31

Untuk kandungan gas buang yaitu CO, HC, dan CO<sub>2</sub> dapat dilihat pada tabel dibawah :

Tabel 4.3 Kandungan Gas Buang CO pada Pengujian Motor Bensin Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen

rpm	0 ml/detik (%vol)	0,01 ml/det (% vol)	0,02 ml/det (% vol)	0,03 ml/det (% vol)
2000	3,22	2,38	2,16	1,86
2500	3,54	3,06	2,92	2,34
3000	5,04	4,12	3,42	3,24
3500	5,36	4,38	4,22	3,56
4000	6,7	5,12	4,58	4,24

Tabel 4.4 Kandungan HC (Hidrokarbon) pada Pengujian Motor Bensin Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen

rpm	0 ml/detik (ppm vol)	0,01 ml/det (ppm vol)	0,02 ml/det (ppm vol)	0,03 ml/det (ppm vol)
2000	2550	1702	1578	1391
2500	2050	1645	1398	1275
3000	1925	1520	1310	1059
3500	1702	1305	1238	909
4000	1685	1266	993	867

Tabel 4.5 Kandungan Gas Buang CO<sub>2</sub> pada Pengujian Motor Bensin Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen

rpm	0 ml/detik (% vol)	0,01 ml/det (% vol)	0,02 ml/det (% vol)	0,03 ml/det (% vol)
2000	8,34	7,8	7,68	7,5
2500	8,68	8,12	7,9	7,76
3000	8,7	8,18	8,06	7,84
3500	9,46	8,72	8,52	8,4
4000	9,54	8,98	8,74	8,66

Data-data yang tertera diatas merupakan data awal atau mentah, sehingga belum dapat ditampilkan dalam bentuk grafik. Untuk data awal yang langsung dapat ditampilkan dalam bentuk grafik adalah emisi gas buang. Untuk dapat dibuat grafik maka digunakan rumus-rumus yang terdapat pada Bab II, yaitu rumus unjuk kerja motor bakar diantaranya torsi (T), daya efektif (Ne), Konsumsi bahan bakar spesifik efektif (SFCe) dan efisiensi termal efektif ( $\eta_e$ ).

Berikut contoh perhitungan rumusnya :

## 1. Torsi (T)

$$\begin{aligned} T &= F \cdot L \text{ [kgf.m]} \\ &= 2,22 \cdot 0,358 \text{ [kgf.m]} \\ &= 0,795 \text{ kgf.m} \end{aligned}$$

## 2. Daya Efektif (Ne)

$$\begin{aligned} Ne &= \frac{T \cdot n}{716,2} \text{ [PS]} \\ &= \frac{0,795 \cdot 2000}{716,2} \text{ [PS]} \\ &= 2,22 \text{ PS} \end{aligned}$$

## 3. Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Efektif (SFCe)

$$\begin{aligned} FC &= \frac{b}{t} \cdot \gamma_f \cdot \frac{3600}{1000} \\ FC &= \frac{6}{25} \cdot 0,7735 \cdot \frac{3600}{1000} \\ FC &= 0,67 \text{ [kg/jam]} \end{aligned}$$

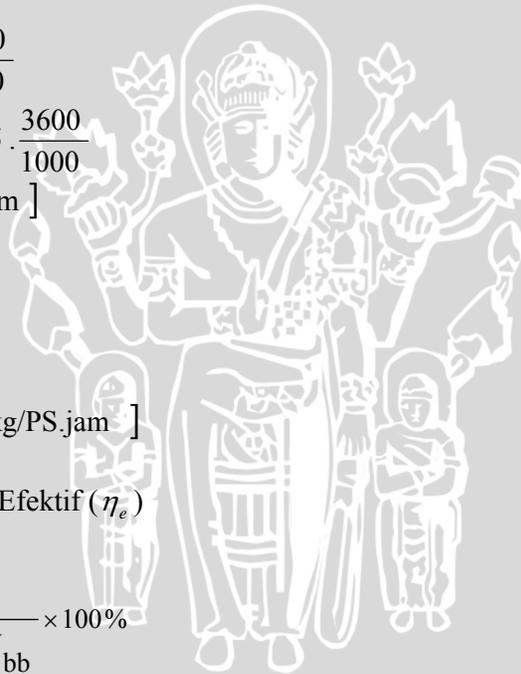
$$\begin{aligned} \text{SFCe} &= \frac{FC}{Ne} \\ \text{SFCe} &= \frac{0,67}{2,22} \\ \text{SFCe} &= 0,302 \text{ [kg/PS.jam]} \end{aligned}$$

4. Efisiensi Termal Efektif ( $\eta_e$ )

$$\eta_{te} = \frac{632}{\text{SFCe} \times \text{LHV}_{bb}} \times 100\%$$

$$\eta_{te} = \frac{632}{0,302 \times 11517,84} \times 100\%$$

$$\eta_{te} = 18,17\%$$



Dengan menggunakan rumus diatas maka data yang didapat seperti dibawah :

Tabel 4.6 Torsi (T) Pada Pengujian Motor Bensin 4 Langkah Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen

rpm	0 ml/detik (kgf.m)	0,01 ml/det (kgf.m)	0,02 ml/det (kgf.m)	0,03 ml/det (kgf.m)
2000	0,795	0,856	0,838	0,859
2500	0,823	0,934	1,023	1,074
3000	0,874	0,967	1,155	1,167
3500	0,916	1,006	1,203	1,31
4000	0,816	0,859	1,028	1,21

Tabel 4.7 Daya Efektif (Ne) Pada Pengujian Motor Bensin 4 Langkah Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen

rpm	0 ml/detik (PS)	0,01 ml/det (PS)	0,02 ml/det (PS)	0,03 ml/det (PS)
2000	2,22	2,39	2,34	2,399
2500	2,873	3,26	3,571	3,749
3000	3,661	4,051	4,838	4,888
3500	4,476	4,916	5,879	6,402
4000	4,557	4,797	5,741	6,758

Tabel 4.8 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Efektif (SFCE) Pada Pengujian Motor Bensin 4 Langkah Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen

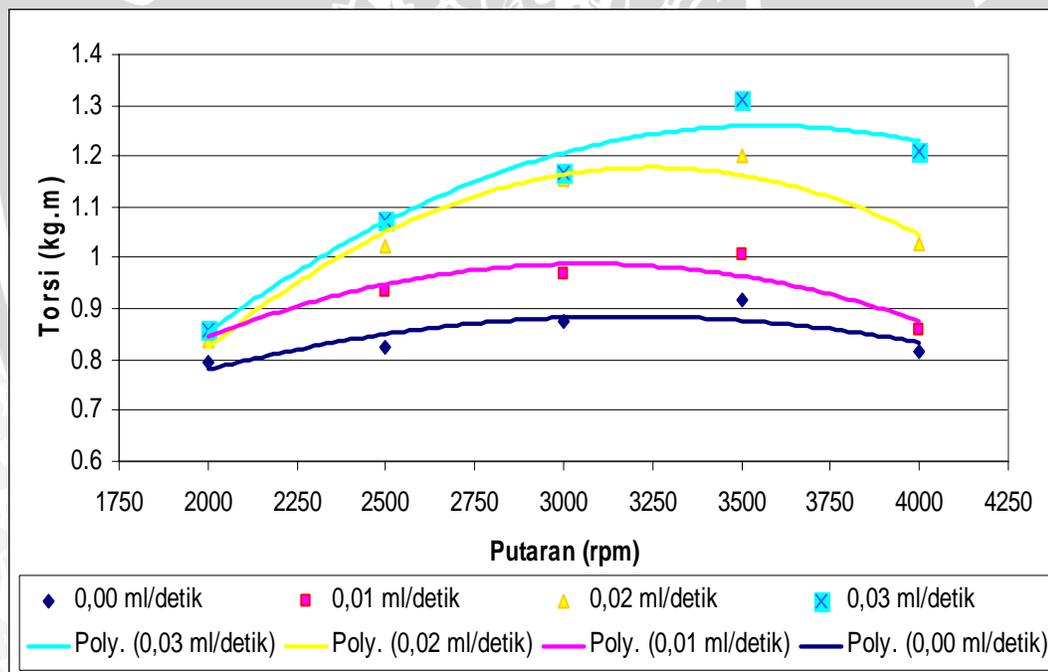
rpm	0 ml/detik (Kg . PS <sup>-1</sup> . jam <sup>-1</sup> )	0,01 ml/det (Kg . PS <sup>-1</sup> . jam <sup>-1</sup> )	0,02 ml/det (Kg . PS <sup>-1</sup> . jam <sup>-1</sup> )	0,03 ml/det (Kg . PS <sup>-1</sup> . jam <sup>-1</sup> )
2000	0,302	0,272	0,269	0,242
2500	0,282	0,261	0,244	0,232
3000	0,262	0,242	0,223	0,2
3500	0,23	0,214	0,202	0,175
4000	0,252	0,244	0,228	0,194

Tabel 4.9 Efisiensi Termal Efektif ( $\eta_e$ ) Pada Pengujian Motor Bensin 4 Langkah Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen

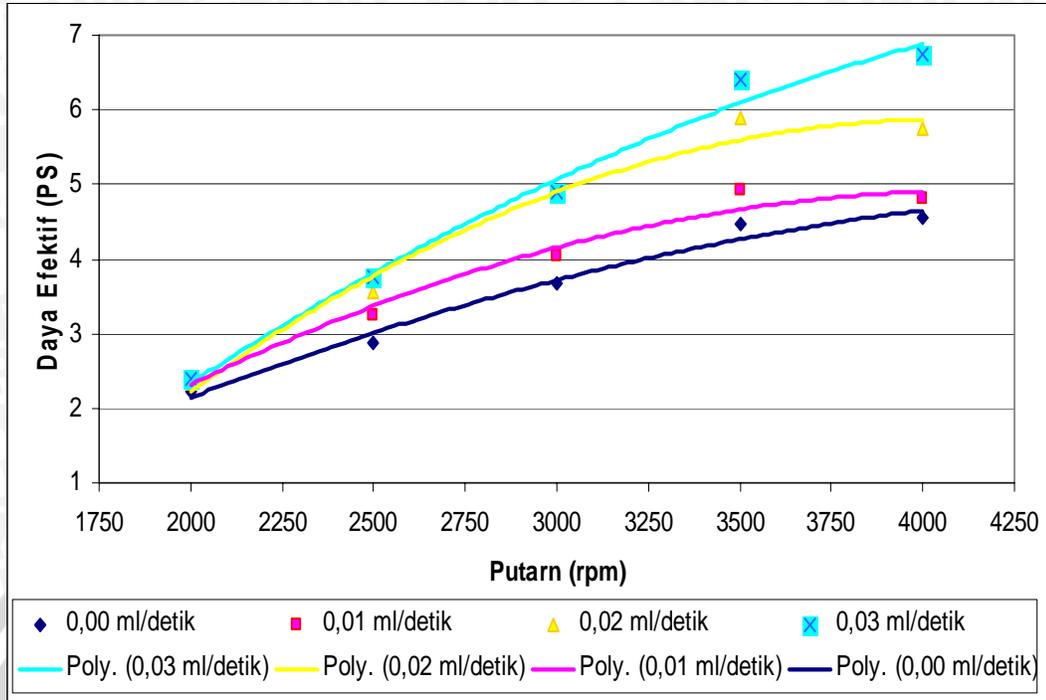
rpm	0 ml/detik (%)	0,01 ml/det (%)	0,02 ml/det (%)	0,03 ml/det (%)
2000	18,2	18,9	19,1	21,3
2500	19,5	19,7	21,1	22,2
3000	20,9	21,3	23,1	25,7
3500	23,9	24	25,5	29,4
4000	21,8	21,1	22,6	26,5

#### 4.1.2 Grafik Hasil Penelitian

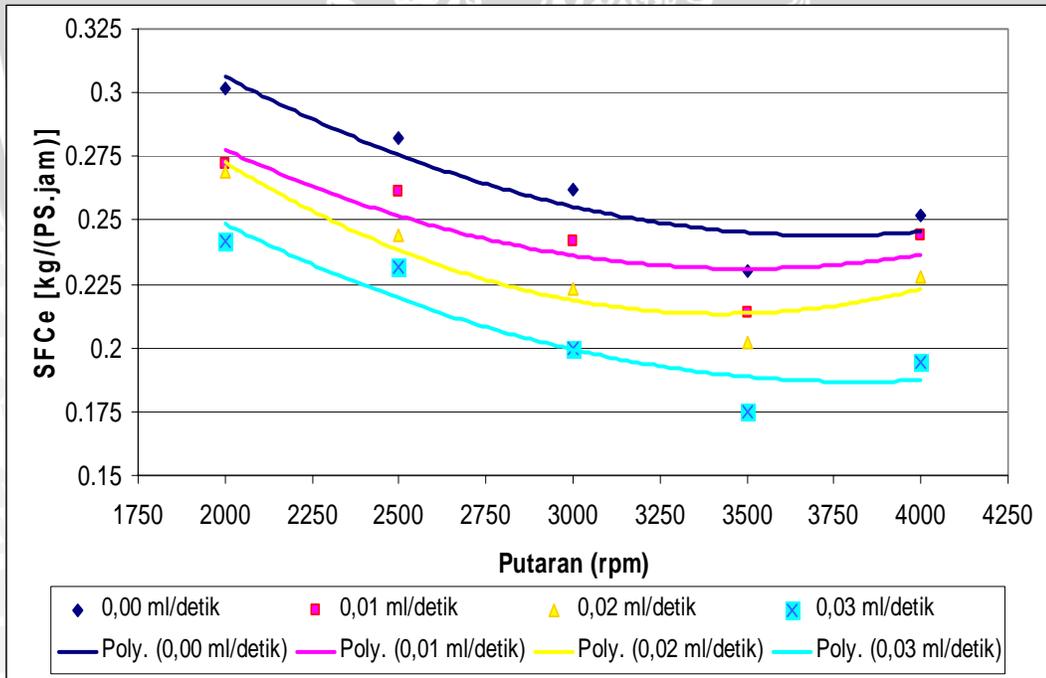
Agar hasil lebih mudah dianalisa dan dibahas maka data yang telah diolah pada tabel 4.3 , 4.4 , 4.5 , 4.6 , 4.7 , 4.8 , dan tabel 4.9 diwujudkan dalam bentuk grafik seperti yang tertera pada grafik 4.1 sampai dengan 4.8 dibawah ini :



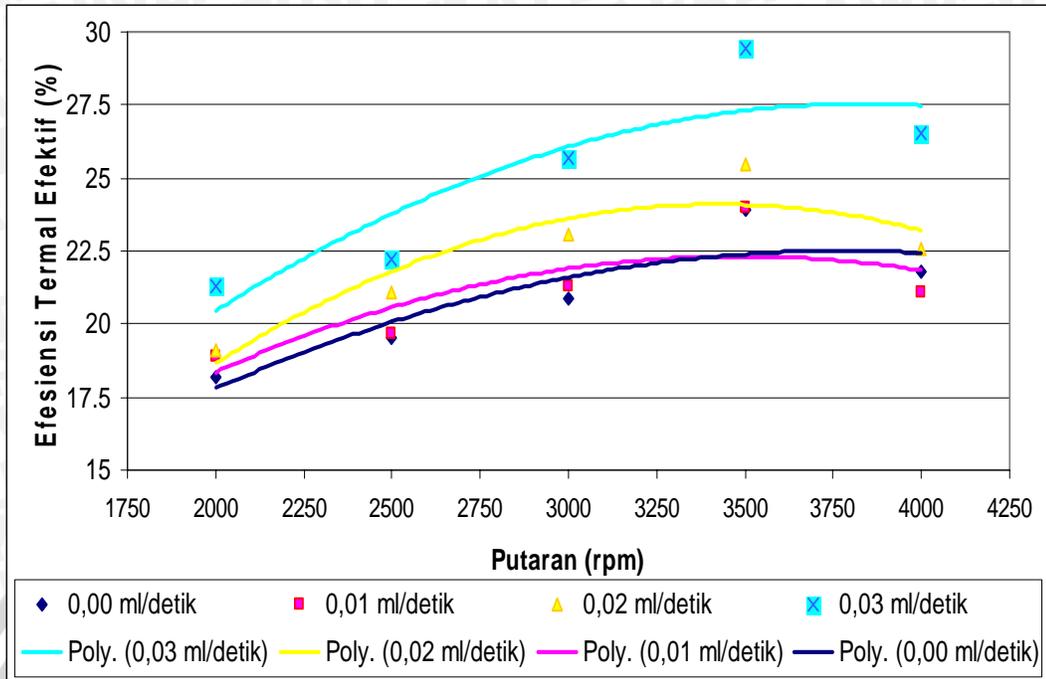
Gambar 4.1 Grafik Hubungan Antara Torsi dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen



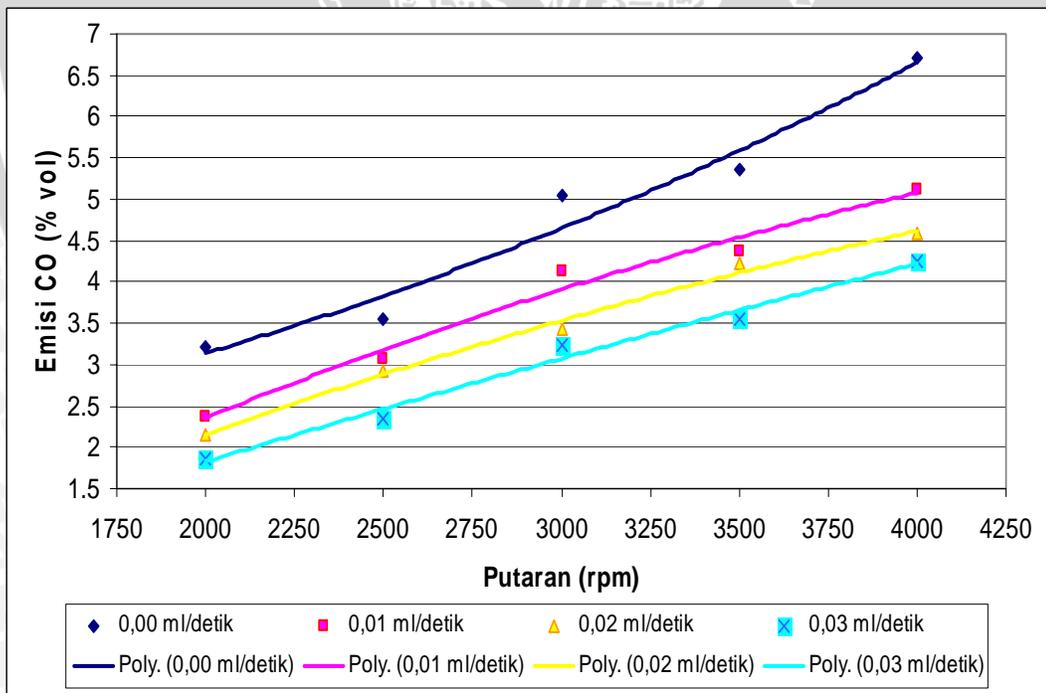
Gambar 4.2 Grafik Hubungan Antara Daya Efektif (Ne) dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen



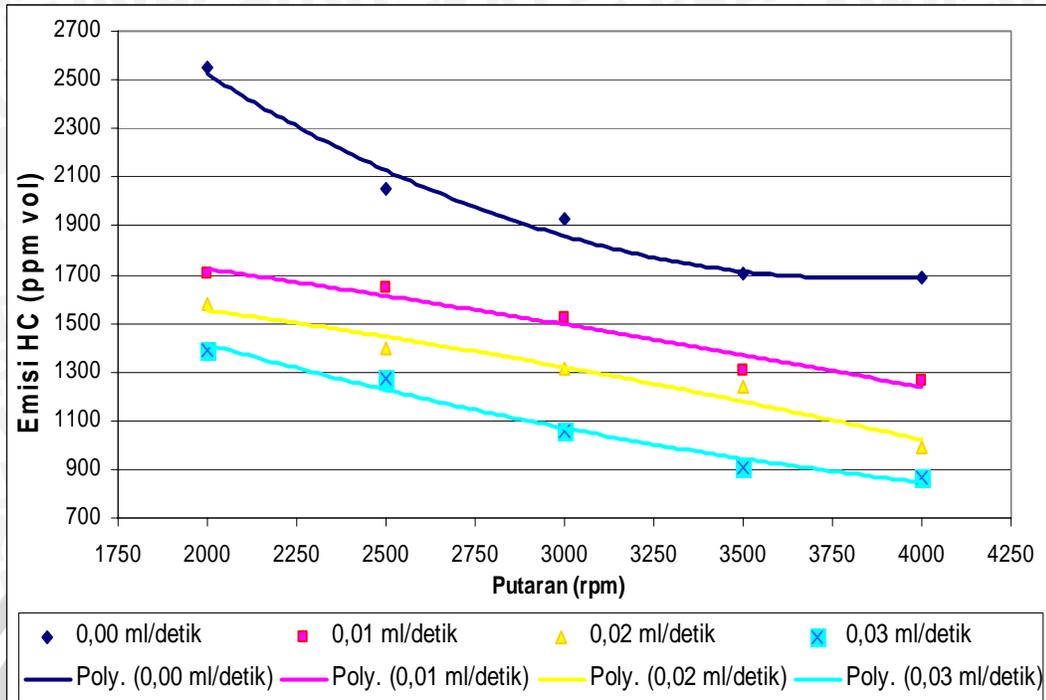
Gambar 4.3 Grafik Hubungan Antara Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Efektif (SFCe) dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen



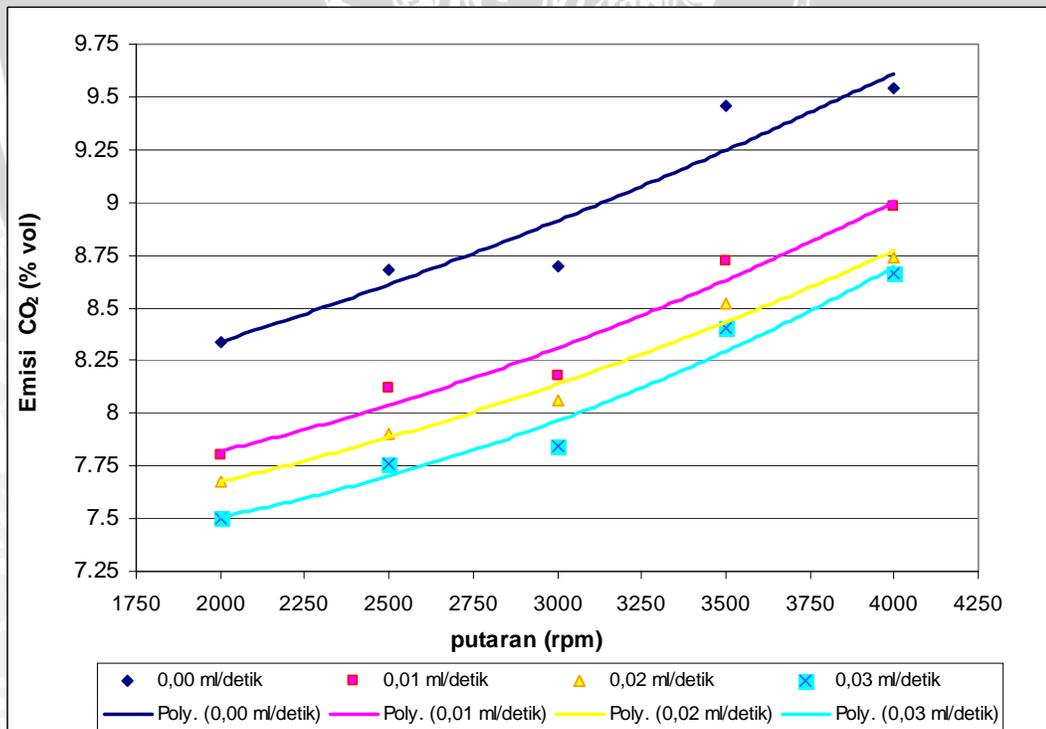
Gambar 4.4 Grafik Hubungan Antara Efisiensi Termal Efektif ( $\eta_e$ ) dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen



Gambar 4.5 Grafik Hubungan Antara Emisi Gas Buang CO dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen



Gambar 4.6 Grafik Hubungan Antara Emisi Partikel HC dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen



Gambar 4.7 Grafik Hubungan Antara Emisi Gas Buang CO<sub>2</sub> dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen

## 4.2 Pembahasan

Pada semua diagram hasil dari tabel pengolahan data terlihat bahwa putaran mempengaruhi unjuk kerja yang meliputi torsi, daya efektif, konsumsi bahan bakar spesifik efektif, efisiensi termal efektif, emisi gas buang CO, HC, dan CO<sub>2</sub> pada variasi penambahan gas hidrogen.

### 4.2.1 Pembahasan Grafik Hubungan Antara Torsi dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen

Pada gambar 4.1 dapat dilihat bahwa dengan bertambahnya putaran maka torsi yang diperoleh semakin meningkat sampai dengan putaran tertentu mencapai torsi maksimalnya yaitu pada 3500 rpm, selanjutnya secara berangsur torsi tersebut menurun. Kenaikan torsi pada putaran rendah hingga 3500 rpm tersebut terjadi karena gaya pengereman yang dihasilkan semakin meningkat. Hal tersebut sesuai dengan rumus yaitu gaya pengereman berbanding lurus dengan torsi :

$$T = F \cdot L \text{ [kgf.m]}$$

dengan:

$$T = \text{Torsi [kgf.m]}$$

$$F = \text{Gaya pengereman (kgf)}$$

$$L = \text{Panjang lengan dinamometer} = 0,358 \text{ (m)}$$

Peningkatan itu terjadi karena kerugian mekanis yang timbul disebabkan oleh gesekan antara piston dengan dinding piston masih kecil. Selain itu gerakan buka-tutup katup masuk juga masih baik karena pegas katup dalam menutup katup masih belum dipengaruhi kenaikan putaran. Hal tersebut berdampak positif terhadap massa bahan bakar udara, yaitu kecil kemungkinan bahan bakar kembali menuju *manifold*. Dengan semakin sempurnanya bahan bakar menuju ruang bakar, menyebabkan tekanan akhir kompresi membesar dan akhirnya torsi yang dihasilkan meningkat.

Selanjutnya torsi semakin menurun dimulai pada putaran 3500 rpm. Penurunan torsi tersebut meskipun tidak terlalu signifikan dapat disebabkan oleh beberapa hal yaitu menurunnya gaya pengereman. Pada pengujian kali ini variabel putaran dihasilkan dengan meningkatkan gaya pengereman. Semakin besar gaya pengereman maka semakin kecil putaran. Sehingga pada putaran 3500 keatas torsi menurun. Hal lainnya adalah semakin tinggi gesekan piston dengan dinding piston yang menyebabkan

kerugian mekanis. Selain itu gerakan katup juga sudah tidak tepat menutup sesuai dengan saatnya karena pegas katup sudah tidak sanggup melayani gerakan buka tutup katup pada putaran yang semakin tinggi.

Dengan melihat grafik yang tertera maka dapat dibandingkan antara torsi motor standard dengan yang sudah diberikan variasi penambahan gas hidrogen. Nilai torsi dengan penambahan gas hidrogen lebih besar daripada dalam keadaan standard. Hal tersebut dapat terjadi karena gas hidrogen memiliki LHV yang lebih besar daripada bahan bakar bensin yaitu sekitar 119,93 kJ/g dibandingkan dengan bensin 44,5 kJ/g. Torsi juga akan semakin meningkat dengan meningkatnya jumlah gas hidrogen yang dimasukkan kedalam ruang bakar, karena semakin banyak bahan bakar yang dibakar. Semakin besar juga perbandingan rasio LHV bahan bakar bensin – gas hidrogen, sehingga LHV campuran nilainya semakin tinggi.

#### 4.2.2 Pembahasan Grafik Hubungan Antara Daya Efektif dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen

Pada gambar 4.2 menunjukkan grafik hubungan antara daya efektif dengan putaran pada variasi penambahan gas hidrogen. Pada gambar tersebut terlihat bahwa secara umum daya efektif semakin meningkat seiring dengan peningkatan putaran yang diberikan. Hal itu terjadi karena daya efektif berbanding lurus dengan putaran mesin dan torsi. Sesuai dengan rumus :

$$Ne = \frac{T \cdot n}{716,2} \text{ [PS]}$$

dengan:

$Ne$  = daya efektif [PS]

$T$  = torsi (kgf.m)

$n$  = putaran mesin (rpm)

Pada gambar terlihat bahwa grafik terus mengalami peningkatan yang cukup signifikan. padahal torsi mulai pada putaran 3500 rpm mengalami penurunan, sedangkan pada rumus diatas torsi juga berbanding lurus dengan daya efektif. Kerugian mekanis dan pergerakan katup pun tidak mempengaruhi banyak terhadap peningkatan daya efektif. Hal tersebut disebabkan interval kenaikan putaran jauh lebih besar daripada interval penurunan torsi, sehingga tidak terlalu berpengaruh.

Pada grafik juga terlihat bahwa daya efektif pada kondisi mesin dengan penambahan gas hidrogen lebih tinggi dibandingkan pada keadaan standard. Hal tersebut disebabkan karena LHV gas hidrogen lebih tinggi daripada LHV bensin (Pertamax Plus). Nilai oktan pada kedua bahan bakar tersebut juga berbeda, dimana gas hidrogen memiliki nilai oktan  $>130$ , sedangkan bensin (Pertamax Plus)  $\pm 100$ . tingginya nilai oktan pada gas hidrogen tersebut mengakibatkan pembakaran semakin sempurna karena kecilnya gejala detonasi/*knocking*. Sedangkan definisi detonasi/*knocking* adalah terjadinya *auto ignite* atau ledakan otomatis yang terjadi diruang bakar kendaraan sebelum saatnya. Maksudnya adalah campuran bahan bakar dan udara yang dikompresi akan mengalami tekanan yang menyebabkan temperatur dalam ruang bakar sangat tinggi, sehingga campuran bahan bakar dan udara ini dapat meledak sendiri meskipun busi belum menyala/memercikkan api. Jadi semakin tinggi angka oktan ini maka semakin susah terjadi *knocking*/detonasi, dan semakin baik bahan bakar itu. Sedangkan semakin tinggi variasi penambahan gas hidrogen maka semakin tinggi pula daya efektifnya, karena semakin banyak gas hidrogen yang masuk keruang bakar.

#### 4.2.3 Pembahasan Grafik Hubungan Antara Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Efektif dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen

Grafik hubungan diatas dapat dilihat pada gambar 4.3, dimana meningkatnya putaran mesin menyebabkan menurunnya konsumsi bahan bakar spesifik efektifnya (SFCe) hingga pada rpm tertentu yaitu 3500 rpm, setelah itu berangsur naik. Hal tersebut dapat dijelaskan dengan rumus dibawah :

$$SFCe = \frac{FC}{Ne} [\text{Kg} \cdot \text{PS}^{-1} \cdot \text{jam}^{-1}]$$

dengan:

SFCe = konsumsi bahan bakar spesifik efektif [ $\text{Kg} \cdot \text{PS}^{-1} \cdot \text{jam}^{-1}$ ]

Fc = konsumsi bahan bakar ( $\text{kg} \cdot \text{jam}^{-1}$ )

Ne = daya efektif (PS)

Pada rumus diatas terlihat bahwa SFCe berbanding lurus dengan FC (konsumsi bahan bakar) dan berbanding terbalik dengan daya efektif. Penyebab turunnya SFCe seiring meningkatnya putaran adalah semakin kecilnya perbandingan antara FC dengan Ne. FC semakin meningkat begitu juga dengan Ne. Tetapi peningkatan Ne lebih tinggi

dibanding FC. FC meningkat dikarenakan volume bahan bakar yang dibutuhkan oleh motor juga meningkat. Sedangkan peningkatan  $N_e$  lebih disebabkan oleh pengaruh putaran, selain torsi. Karena itu rasio peningkatan  $N_e$  lebih tinggi daripada FC, mengakibatkan penurunan SFCE. Dan mulai putaran tertentu grafik SFCE mulai meningkat. Hal tersebut karena semakin tinggi putaran, maka peningkatan konsumsi bahan bakar juga semakin tinggi. Selain itu putaran yang tinggi juga menyebabkan kerugian mekanis dan juga kerugian panas yang besar. Kerugian mekanis dapat berupa gesekan, atau melemahnya kemampuan pegas katup. Kerugian panas dapat berupa panas yang hilang melalui sirip-sirip pendinginan mesin.

Dengan penambahan gas hidrogen pada motor bensin 4 langkah, mengakibatkan SFCE lebih rendah daripada dalam keadaan standard (tanpa penambahan gas hidrogen). Penurunan nilai SFCE tersebut timbul karena daya efektif pada awal putaran memang sudah lebih tinggi dibandingkan daya efektif standard. Tingginya daya efektif dengan penambahan gas hidrogen tersebut dikarenakan selain dipengaruhi oleh putaran dan torsi juga dipengaruhi oleh karakteristik gas hidrogen itu sendiri, yang memiliki nilai oktan yang lebih tinggi dan LHV yang nilainya hampir 3 x lipat nilai LHV bensin. Hal tersebut juga berlaku pada grafik antara variasi penambahan gas hidrogen, dimana nilai oktan campuran bensin dan hidrogen akan lebih tinggi jika penambahan gas hidrogen ditingkatkan. Begitu juga dengan LHV campuran akan lebih tinggi pada penambahan hidrogen 0,03 ml/ detik. Sehingga nilai SFCE lebih rendah lagi.

#### 4.2.4 Pembahasan Grafik Hubungan Antara Efisiensi Termal Efektif ( $\eta_e$ ) dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen

Hubungan antara efisiensi termal efektif ( $\eta_e$ ) dapat dilihat pada gambar 4.4. pada gambar tersebut terlihat bahwa semakin tinggi putaran maka semakin tinggi pula  $\eta_e$  yang dihasilkan. Tetapi sampai dengan putaran tertentu maka  $\eta_e$  nilainya akan turun, yaitu mulai pada putaran 3500 rpm. Hal tersebut dapat dijelaskan melalui rumus  $\eta_e$  :

$$\eta_e = \frac{Q_e}{Q_b} = \frac{632 \cdot N_e}{F_c \cdot LHV_{bb}} = \frac{632}{SFCE \cdot LHV_{bb}} \quad [\%]$$

dengan:

$\eta_e$  = efisiensi termal efektif [%]

$Q_e$  = jumlah kalor yang digunakan untuk daya efektif (kkal . kg<sup>-1</sup>)

$Q_b$  = jumlah kalor dari pembakaran bahan bakar dan udara (kkal . kg<sup>-1</sup>)

$LHV_{bb}$  = nilai kalor rendah bahan bakar ( $\text{kkal} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Pada rumus efisiensi termal diatas, terdapat 2 variabel yang mempengaruhi tinggi rendahnya nilai  $\eta_e$ , yaitu konsumsi bahan bakar spesifik efektif (SFCE) dan nilai kalor rendah bahan bakar  $LHV_{bb}$ . Tetapi dikarenakan nilai  $LHV_{bb}$  bersifat konstan, maka hanya SFCE yang berperan. Peningkatan  $\eta_e$  tersebut menandakan bahwa semakin tinggi putaran nilai SFCE semakin turun, seperti yang terlihat pada gambar sebelumnya. Penurunan SFCE tersebut sampai dengan putaran 3500 rpm, selanjutnya naik. Dan kenaikan SFCE membuat efisiensi termalnya menurun juga dimulai pada 3500 rpm. Faktor penyebab yang mempengaruhi nilai SFCE adalah konsumsi bahan bakar dan daya efektif. Pada penjelasan sebelumnya, peningkatan putaran mesin diikuti pula dengan peningkatan nilai FC dan NE. Tetapi interval kenaikan NE lebih tinggi dibanding FC menyebabkan SFCE turun, dan berakibat pada kenaikan grafik  $\eta_e$ . Untuk putaran 3500 keatas yang menyebabkan nilai  $\eta_e$  menurun adalah kenaikan SFCE mulai pada putaran yang sama. Kenaikan SFCE dipengaruhi oleh angka konsumsi bahan bakar (FC) yang naik akibat kerugian mekanis yang semakin tinggi sehingga menyebabkan kebutuhan bahan bakar untuk menjalankan satu siklus semakin tinggi pula.

Pada variasi penambahan gas hidrogen, diperoleh  $\eta_e$  yang lebih tinggi dibanding dengan dalam keadaan standard. Padahal seperti diketahui  $LHV_{bb}$  campuran antara gas hidrogen dengan bensin lebih tinggi daripada  $LHV_{bb}$  bensin itu sendiri.  $LHV_{bb}$  pada bahan bakar campuran berkisar 12289,44 kkal/kg. Sedangkan pada bensin 11517,84 kkal/kg. Dengan selisih nilai  $LHV_{bb}$  seharusnya efisiensi yang diperoleh dari variasi penambahan gas hidrogen lebih rendah dibanding dengan efisiensi dalam keadaan standard. Tetapi pada gambar menunjukkan bahwa efisiensi pada variasi penambahan gas hidrogen lebih tinggi daripada efisiensi keadaan standard. Hal tersebut terjadi karena adanya selisih nilai SFCE yang ada antara mesin standard dengan variasi penambahan gas hidrogen. Dengan adanya selisih tersebut maka efisiensi yang didapat menjadi berbeda, meskipun saat dibandingkan antara  $\eta_e$  standard dengan  $\eta_e$  variasi 0,01 ml/detik perbedaannya tidak besar. Sedangkan  $\eta_e$  antara variasi 0,01 sampai 0,03 ml/detik terlihat berbeda karena LHV nya sama.

#### 4.2.5 Pembahasan Grafik Hubungan Antara Emisi Gas Buang CO dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen

Pada gambar 4.5 emisi gas CO untuk mesin standard paling tinggi ada pada putaran 4000 rpm sekitar 6,3 % vol. Persentase tersebut terbilang rendah. Hal tersebut dikarenakan gas CO secara teori adalah tidak dihasilkan oleh gas buang. Karena kandungan yang terdapat dalam gas buang adalah  $CO_2$ ,  $H_2O$  dan  $N_2$  seperti pada persamaan reaksi dibawah :



Gas CO yang terdapat pada gas buang dikarenakan pembakaran yang terjadi tidak sempurna. Faktor yang mempengaruhinya adalah pasokan udara yang masuk dan berkarburasi dengan bahan bakar kurang mencukupi kebutuhan mesin. Semakin tinggi putaran udara yang masuk semakin tidak dapat mengimbangi kebutuhan mesin, sehingga gas CO yang dihasilkan semakin besar pula. Selain hal diatas, terdapatnya kandungan gas CO juga dikarenakan masuknya kotoran-kotoran seperti debu sehingga ikut dalam pembakaran menyebabkan pembakaran berlangsung tidak sempurna.

Pada grafik variasi penambahan gas hidrogen, emisi gas CO yang dihasilkan jauh lebih rendah dibanding grafik mesin standard . Adanya selisih yang cukup tinggi antara emisi gas CO pada mesin standard dengan mesin variasi penambahan gas hidrogen adalah dikarenakan pada pembakaran gas hidrogen tidak terdapat unsur karbon (CO), sehingga produk yang dihasilkan tidak terdapat gas CO. Dengan menambahkan gas hidrogen pada motor bensin, maka gas CO akan jauh berkurang karena persentase emisi gas buang (terdiri dari bermacam-macam gas seperti  $CO_2$  dan  $N_2$ ) bertambah sedangkan kandungan gas CO tetap.

#### 4.2.6 Pembahasan Grafik Hubungan Antara Emisi Partikel HC dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen

Dari gambar 4.6 dapat dilihat bahwa peningkatan putaran ternyata mengakibatkan penurunan kadar emisi partikel HC dalam gas buang. Hal tersebut terjadi karena pada saat putaran rendah, bahan bakar bensin dengan udara kurang homogen. Lebih banyak udara dalam campuran tersebut sehingga campuran miskin yang terjadi. Dengan campuran miskin tersebut maka unsur H dalam bahan bakar

( $C_8H_{18}$ ) tidak banyak yang bereaksi dengan unsur membentuk  $H_2O$ , tetapi bereaksi dengan C sehingga membentuk HC. Dengan semakin meningkatnya putaran, maka udara dengan bahan bakar dapat bercampur dengan baik sehingga HC yang terdapat dalam gas buang menjadi berkurang.

Dengan penambahan gas hidrogen dalam pembakaran ternyata banyak mereduksi partikel HC dalam gas buang. Hal tersebut dikarenakan gas hydrogen sudah dalam bentuk gas sehingga udara lebih mudah bercampur dengan gas hydrogen menyebabkan campuran mendekati campuran homogen. Dengan campuran yang homogen tersebut maka unsur H dalam gas hidrogen bereaksi dengan baik dengan O membentuk  $H_2O$ . Pada grafik juga terlihat perbedaan antara variasi 0,01-0,03 ml/detik dimana pada variasi 0,03 ml/detik partikel HC semakin mengecil konsentrasinya dalam gas buang. Menurut penjelasan diatas, adalah semakin sempurnanya pembakaran karena campuran semakin homogen.

#### 4.2.7 Pembahasan Grafik Hubungan Antara Emisi Gas Buang $CO_2$ dan Putaran Dengan Variasi Penambahan Gas Hidrogen

Grafik pada gambar 4.7 memperlihatkan bahwa semakin tinggi putaran maka semakin tinggi pula kadar  $CO_2$ . Seperti diketahui bahwa  $CO_2$  memang terbentuk menjadi produk dalam persamaan reaksi pembakaran.



Saat putaran rendah, pembakaran berlangsung tidak sempurna karena bahan bakar dan udara tidak tercampur dengan baik. Selain itu jumlah bahan bakar dan udara yang dibutuhkan adalah rendah dalam menjalankan satu siklus pada putaran bawah. Semakin tinggi putaran maka kebutuhan bahan bakar dan udara semakin banyak. Selain itu semakin tinggi putaran juga membuat semakin baik campuran bahan bakar udara tersebut sehingga produksi gas  $CO_2$  meningkat.

Pada variasi penambahan gas hidrogen, kandungan emisi gas  $CO_2$  terlihat lebih rendah dibanding mesin kondisi standard. Hal tersebut berkaitan dengan gas hidrogen itu sendiri yang tidak terdapat unsur C, mengakibatkan kadar gas  $CO_2$  tetap sedangkan kadar gas buang lainnya meningkat sehingga kadar gas  $CO_2$  menurun. Maka dengan

meningkatkan variasi gas hidrogen, kandungan gas  $CO_2$  akan semakin menurun karena semakin tinggi perbandingan gas hidrogen – bensin menyebabkan semakin rendah kadar emisi gas buang  $CO_2$  nya.



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari analisis data dan pembahasan pengaruh variasi penambahan gas hidrogen terhadap unjuk kerja dan kadar emisi gas buang motor bensin 4 langkah, dapat diambil kesimpulan bahwa penambahan gas hidrogen yang dimasukkan melalui *manifold* mempengaruhi unjuk kerja dan kadar emisi gas buang pada motor bensin 4 langkah pada variasi putaran 2000-4000 rpm. Adapun pengaruh pada motor bensin 4 langkah adalah sebagai berikut :

1. Variasi penambahan gas hidrogen memperbaiki unjuk kerja pada motor bensin 4 langkah karena karakteristik gas hidrogen itu sendiri, diantaranya angka oktan dan LHV<sub>bb</sub> yang jauh lebih tinggi dibanding bensin (Petamax Plus)
2. Variasi penambahan gas hidrogen juga mengurangi kadar gas buang yang dihasilkan, karena gas hidrogen bukan merupakan senyawa hidrokarbon.
3. Unjuk kerja optimum didapatkan dari variasi penambahan gas hidrogen sebesar 0,03 ml/detik, dimana peningkatan torsi sebesar  $\pm 25\%$ , daya efektif  $\pm 27\%$ , penurunan SFCE sebesar  $\pm 28\%$ , dan peningkatan efisiensi termal efektif sebesar  $\pm 17\%$ .
4. Penurunan kadar emisi gas buang optimum juga didapat dari variasi penambahan gas hidrogen sebesar 0,03 ml/detik, dimana penurunan kadar emisi CO sebesar  $\pm 50\%$ , kadar emisi  $CO_2$  sebesar  $\pm 12\%$ , dan kadar HC sebesar  $\pm 75\%$

#### 5.2 Saran

Agar variasi penambahan gas hidrogen dapat optimal, maka perlu dilakukan penelitian dan penyempurnaan lebih lanjut tentang :

1. Penyempurnaan elektroliser agar produksi gas hidrogen dapat lebih banyak.
2. Perlu dilakukan variasi pada hal lain misalnya letak elektroliser pada manifold agar fungsi elektroliser lebih optimal dalam menghasilkan gas hidrogen.
3. Perlu dilakukan penelitian dengan kondisi mesin berjalan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar, Wiranto. 2002. *Penggerak Mula Motor Bakar Torak*. Bandung: ITB.
- Cengel, Yunus A dan Michael Boles. 2002. *Thermodynamic, Engineering Approach*. Boston: McGraw Hill.
- Daryus, Asyari. 2007. *Termodinamika Teknik 1. Diktat Kuliah Universitas Darma Persada*.
- Himawan, Chandra. 2008. *Pengaruh Variasi Arus Listrik DC pada Elektroliser Terhadap Karakteristik Kinerja Motor Bensin 4 Langkah*. Skripsi tidak dipublikasikan. Malang: Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
- Lanz, Walter. 2001. *Hydrogen Propertis. Jurnal Teknologi (Hydrogen Fuel Cell Engine)*.
- Petrovsky. 1979. *MarineInternal Combustion Engine*. Moskow: Mir Publishers.
- Reynold, William C dan Henry, C. Perkins.1987. *Termodinamika Teknik*. Terjemahan Filino Harahap. Jakarta: Erlangga.
- Sugiyarto, Kristian H. 2001. *Dasar-dasar Kimia Anorganik Non Logam*. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.
- Sukardjo, Prof. Dr. 1985. *Kimia Anorganik Dasar*. Jakarta: Rineka Cipta.
- Sunarta, Nakoela dan Soichi Furuhamu. 2002. *Motor Serba Guna*. Jakarta.
- Wahyudi, Slamet dan Agung S. Widodo. 2006. *Buku Panduan Praktikum Motor Bakar*. Malang: Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
- Wall, Jacob. 2008. *Effect of Hydrogen Enriched Hydrocarbon Combustion on Emission and performance. Jurnal Teknologi (Hydrogen Fuel Cell Engine)*.
- Wardana, I.N.G. 2008. *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*. Malang: Dinar Wijaya.
- <http://www.bbmair.blogspot.com/BAHAN BAKAR DARI AIR : PENGHEMATAN DARI GAS HIDROGEN.htm>.
- <http://www.Chem-is-try.com/hidrogen.doc>.
- [http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcell/tech\\_validation/pdfs/fcm01r0.pdf](http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcell/tech_validation/pdfs/fcm01r0.pdf)
- <http://www.energiportal.com/Energy News/ Membuat hidrogen dengan algae.mht>
- <http://www.energiterbarukan.net/Lintas Berita - Cangkang Telur untuk Produksi Hidrogen.mht>.
- <http://www.gudangilmu.org/water as fuel?.mht>.
- <http://www.puslit.petra.ac.id/journals/mechanical/>.
- [http://www.wikipedia.org/wiki/High-temperature\\_electrolysis](http://www.wikipedia.org/wiki/High-temperature_electrolysis)
- <http://www.hanscoy.blogspot.com/2009/12/hazardous-material.html>

LAMPIRAN

Lampiran 1. Tabel Volume Bahan Bakar Tiap Satuan Waktu (b/t) Pada Pengujian Motor Bensin 4 Langkah 125 cc

	2000	2500	3000	3500	4000
0,00 ml/detik	0.242	0.288	0.344	0.37	0.414
(ml/detik)	0.236	0.293	0.354	0.371	0.408
	0.244	0.291	0.342	0.369	0.412
	0.24	0.297	0.344	0.367	0.413
	0.239	0.286	0.347	0.368	0.418
<b>NILAI RATA2</b>	<b>0.2402</b>	<b>0.291</b>	<b>0.3462</b>	<b>0.369</b>	<b>0.413</b>
0,01 ml/detik	0.234	0.31	0.355	0.377	0.42
(ml/detik)	0.233	0.307	0.353	0.373	0.417
	0.239	0.301	0.351	0.379	0.422
	0.231	0.302	0.349	0.374	0.416
	0.233	0.304	0.356	0.376	0.419
<b>NILAI RATA2</b>	<b>0.234</b>	<b>0.3048</b>	<b>0.3528</b>	<b>0.3758</b>	<b>0.4188</b>
0,02 ml/detik	0.227	0.31	0.391	0.43	0.475
(ml/detik)	0.222	0.309	0.382	0.422	0.472
	0.229	0.316	0.386	0.436	0.471
	0.226	0.313	0.391	0.434	0.467
	0.226	0.316	0.389	0.428	0.469
<b>NILAI RATA2</b>	<b>0.226</b>	<b>0.3128</b>	<b>0.3878</b>	<b>0.43</b>	<b>0.4708</b>
0,03 ml/detik	0.215	0.311	0.351	0.404	0.473
(ml/detik)	0.209	0.314	0.347	0.4	0.468
	0.211	0.311	0.354	0.402	0.472
	0.204	0.315	0.351	0.407	0.467
	0.21	0.31	0.353	0.403	0.469
<b>NILAI RATA2</b>	<b>0.2098</b>	<b>0.3122</b>	<b>0.3512</b>	<b>0.4032</b>	<b>0.4698</b>

Lampiran 2. Tabel Gaya Pengereman (F) Pada Pengujian Motor Bensin 4 Langkah 125 cc

	2000	2500	3000	3500	4000
0,00 ml/detik	2	2.3	2.5	2.8	2.5
(kg)	3.3	2.4	2.8	2.5	2.3
	1.8	2.3	2.4	2.7	2.4
	2.3	2.5	2	2.3	2.3
	1.7	2	2.5	2.5	1.9
<b>NILAI RATA2</b>	<b>2.22</b>	<b>2.3</b>	<b>2.44</b>	<b>2.56</b>	<b>2.28</b>
0,01 ml/detik	2.4	2.7	2.7	2.5	2.5
(kg)	2.4	2.5	2.6	2.6	2.8
	2.5	2.6	2.7	2.8	2.3
	2.4	2.7	2.9	3.1	2.3
	2.2	2.5	2.6	3	2.1
<b>NILAI RATA2</b>	<b>2.38</b>	<b>2.6</b>	<b>2.7</b>	<b>2.8</b>	<b>2.4</b>
0,02 ml/detik	2.3	2.9	3.5	3.4	2.8
(kg)	2.9	2.7	3.2	3.1	3.1
	2	3	3	3.3	3
	2.3	2.9	3.1	3.6	2.5
	2.2	2.8	3.3	3.4	2.9
<b>NILAI RATA2</b>	<b>2.34</b>	<b>2.86</b>	<b>3.22</b>	<b>3.36</b>	<b>2.86</b>
0,03 ml/detik	2.3	3.2	3.2	3.7	3
(kg)	2.6	2.7	3.4	3.6	3.4
	2.4	3	3.3	3.7	3.5
	2.5	3	3.2	3.8	3.7
	2.2	3.1	3.2	3.5	3.3
<b>NILAI RATA2</b>	<b>2.4</b>	<b>3</b>	<b>3.26</b>	<b>3.66</b>	<b>3.38</b>



**Lampiran 3. Tabel Emisi Gas Buang CO Pada Pengujian Motor Bensin 4 Langkah 125 cc**

	2000	2500	3000	3500	4000
0,00 ml/detik	2.8	2.9	4.6	4.7	7.3
(% vol)	4.8	3.8	5.8	5.9	5.6
	3.3	3.7	5.5	5.9	6.8
	2.3	2.7	4.6	5.1	6.7
	2.9	4.6	4.7	5.2	7.1
<b>NILAI RATA2</b>	<b>3.22</b>	<b>3.54</b>	<b>5.04</b>	<b>5.36</b>	<b>6.7</b>
0,01 ml/detik	3	4.3	4.8	4.4	4.8
(% vol)	2.3	2.9	3.9	3.5	4.8
	2.5	2.8	3.5	4.1	6.7
	2.1	2.3	3.3	3.6	4.7
	2	3	5.1	6.3	4.6
<b>NILAI RATA2</b>	<b>2.38</b>	<b>3.06</b>	<b>4.12</b>	<b>4.38</b>	<b>5.12</b>
0,02 ml/detik	1.6	1.8	2.6	3.6	4.1
(% vol)	3.3	4.2	3.7	4.3	4.5
	2.2	3.1	4.1	4.9	5.2
	1.6	2.2	2.9	3.9	4.2
	2.1	3.3	3.8	4.4	4.9
<b>NILAI RATA2</b>	<b>2.16</b>	<b>2.92</b>	<b>3.42</b>	<b>4.22</b>	<b>4.58</b>
0,03 ml/detik	2.3	2.1	2.9	3.7	4.4
(% vol)	1.7	1.8	2.7	2.9	3.6
	1.2	2.2	3.5	3.6	4.3
	2.2	2.5	3.4	4.2	4.1
	1.9	3.1	3.7	3.4	4.8
<b>NILAI RATA2</b>	<b>1.86</b>	<b>2.34</b>	<b>3.24</b>	<b>3.56</b>	<b>4.24</b>



**Lampiran 4. Tabel Emisi Partikel HC Pada Pengujian Motor Bensin  
4 Langkah 125 cc**

	2000	2500	3000	3500	4000
0,00 ml/detik	2420	2201	2076	1657	1554
(ppm vol)	2765	2109	1780	1621	1738
	2604	2370	1804	1877	2011
	2488	1990	2388	1657	1634
	2472	1580	1579	1700	1487
<b>NILAI RATA2</b>	<b>2549.8</b>	<b>2050</b>	<b>1925.4</b>	<b>1702.4</b>	<b>1684.8</b>
0,01 ml/detik	2014	1774	1629	1377	1365
(ppm vol)	1698	1650	1546	1289	1243
	1402	1534	1465	1350	1483
	1809	1701	1611	1252	1098
	1589	1567	1350	1258	1140
<b>NILAI RATA2</b>	<b>1702.4</b>	<b>1645.2</b>	<b>1520.2</b>	<b>1305.2</b>	<b>1265.8</b>
0,02 ml/detik	1798	1765	1509	1479	775
(ppm vol)	1332	1357	1460	1222	1187
	1507	1109	1032	1015	1226
	1657	1483	1354	1377	876
	1598	1276	1232	1098	902
<b>NILAI RATA2</b>	<b>1578.4</b>	<b>1398</b>	<b>1317.4</b>	<b>1238.2</b>	<b>993.2</b>
0,03 ml/detik	1498	1350	1120	987	1020
(ppm vol)	1503	1232	968	799	789
	1209	1402	1355	781	761
	1288	1287	857	1002	955
	1456	1102	997	977	812
<b>NILAI RATA2</b>	<b>1390.8</b>	<b>1274.6</b>	<b>1059.4</b>	<b>909.2</b>	<b>867.4</b>



**Lampiran 5. Tabel Emisi Gas Buang CO<sub>2</sub> Pada Pengujian Motor Bensin 4 Langkah 125 cc**

	2000	2500	3000	3500	4000
0,00 ml/detik	7.6	6.9	8.6	9.3	9.7
(% vol)	8.4	8.7	9.2	9.6	9.4
	9.6	9.5	8.9	10	9.2
	9	9.1	8.1	9	9.3
	7.1	9.2	8.7	9.4	10.1
<b>NILAI RATA2</b>	<b>8.34</b>	<b>8.68</b>	<b>8.7</b>	<b>9.46</b>	<b>9.54</b>
0,01 ml/detik	8.6	8.9	9.1	9.2	10.2
(% vol)	7.1	8.5	8.2	8.8	9.2
	7.6	7.6	7.5	8.2	8.6
	8.2	7.6	8.2	8.5	7.8
	7.5	8	7.9	8.9	9.1
<b>NILAI RATA2</b>	<b>7.8</b>	<b>8.12</b>	<b>8.18</b>	<b>8.72</b>	<b>8.98</b>
0,02 ml/detik	6.9	7.4	7.3	8.1	8.3
(% vol)	7.8	8.1	8.5	8.7	8.9
	8.3	7	7.2	8.4	8.6
	8.1	8.6	8.8	8.2	8.5
	7.3	8.4	8.5	9.2	9.4
<b>NILAI RATA2</b>	<b>7.68</b>	<b>7.9</b>	<b>8.06</b>	<b>8.52</b>	<b>8.74</b>
0,03 ml/detik	7.7	8.1	8.3	7.9	8.5
(% vol)	7.3	7.6	7.7	8.5	8.3
	8.1	8.6	8.4	8.1	8.4
	6.9	7.2	7	7.9	8.1
	7.5	7.3	7.8	9.6	10
<b>NILAI RATA2</b>	<b>7.5</b>	<b>7.76</b>	<b>7.84</b>	<b>8.4</b>	<b>8.66</b>

