

# TEKNOLOGI KENDARAAN BERBAHAN BAKAR LPG

Dr. Muji Setiyo, S.T., M.T.  
Prof. Dr. techn. Suyitno, S.T., M.T.



## UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

### **Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4**

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

### **Pembatasan Pelindungan Pasal 26**

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

### **Sanksi Pelanggaran Pasal 113**

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

# TEKNOLOGI KENDARAAN BERBAHAN BAKAR LPG

Dr. Muji Setiyo, ST., MT.  
Prof. Dr. techn. Suyitno, ST., MT.



**TEKNOLOGI KENDARAAN BERBAHAN BAKAR LPG**

**Muji Setiyo  
Suyitno**

Editor:  
**Dr. Budi Waluyo, ST., MT.**

Desain Cover:  
**Penulis**

Sumber:  
**Penulis**

Tata Letak:  
**Amira Dzatin Nabila**

Proofreader:  
**Amira Dzatin Nabila**

Ukuran:  
**xiv, 198 hlm, Uk: 15.5x23 cm**

ISBN:  
**978-623-209-731-5**

Cetakan Pertama:  
**Mei 2019**

Hak Cipta 2019, Pada Penulis

---

Isi diluar tanggung jawab percetakan

---

**Copyright © 2019 by Deepublish Publisher**  
All Right Reserved

Hak cipta dilindungi undang-undang  
Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau  
memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini  
tanpa izin tertulis dari Penerbit.

**PENERBIT DEEPUBLISH**  
**(Grup Penerbitan CV BUDI UTAMA)**

Anggota IKAPI (076/DIY/2012)  
Jl.Rajawali, G. Elang 6, No 3, Drono, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman  
Jl.Kaliurang Km.9,3 – Yogyakarta 55581  
Telp/Faks: (0274) 4533427  
Website: [www.deepublish.co.id](http://www.deepublish.co.id)  
[www.penerbitdeepublish.com](http://www.penerbitdeepublish.com)  
E-mail: [cs@deepublish.co.id](mailto:cs@deepublish.co.id)

# Pengantar



**Dr. Sadjuga, M.Sc** - Mobilitas adalah tanda kehidupan. Sejak dahulu kala orang berpindah dari satu tempat satu ke tempat lainnya untuk mempertahankan hidup. Setelah tahu roda dapat digunakan untuk mempermudah gerak kereta, mobilitas orang menjadi lebih cepat. Kereta yang semula ditarik oleh kuda dapat berjalan kencang dengan kecepatan beberapa kali kecepatan kuda setelah kuda digantikan dengan mesin. Sumber tenaga baru yang berupa mesin dapat menghasilkan tenaga beberapa kali lipat kekuatan kuda. Pada waktu itu, kereta tanpa kuda menjadi paradigma baru dalam mobilitas manusia. Di era modern, mobilitas manusia menjadi semakin cepat dengan makin sempurnanya mesin penggerak kereta tanpa kuda.

Mobil pertama bermesin uap dibuat oleh Nicolas-Joseph Cugnot pada tahun 1769. Namun baru pada tahun 1808 François Isaac de Rivaz untuk pertama kalinya membuat mobil dengan mesin pembakaran dalam berbahan bakar hidrogen. Pada tahun 1870, Siegfried Marcus membuat mobil yang digerakkan dengan mesin pembakaran dalam yang memanfaatkan bahan bakar minyak bumi (bensin). Hingga saat ini mobil dengan bahan bakar minyak bumi baik yang berupa bensin maupun minyak solar/diesel masih dominan. Mobil berbahan bakar minyak menimbulkan ketergantungan terhadap minyak bumi yang pada suatu saat akan habis. Disamping itu, pembakaran bahan bakar minyak menyebabkan polusi udara. Bahan bakar yang lebih ramah lingkungan adalah bahan bakar gas. Oleh sebab itu konversi penggunaan bahan bakar minyak menjadi penggunaan bahan bakar gas adalah pilihan yang paling baik. Dengan cara konversi ini mesin mobil konvensional masih tetap dapat digunakan dengan hanya menambahkan alat konverter.

Buku dengan judul Teknologi Otomotif Modern: Kendaraan Berbahan Bakar LPG merupakan buku yang komprehensif tentang kendaraan berbahan bakar gas petroleum cair (LPG, *liquid petroleum gas*). Buku ini didahului dengan tulisan tentang konsep kendaraan modern dan tantangan sistem energi dan dilengkapi dengan *overview* tentang sistem propulsi otomotif serta *overview* tentang bahan bakar.

LPG adalah gas hasil *cracking* (pemecahan) dan penyulingan minyak bumi yang terdiri atas propana ( $C_3H_8$ ) dan butana ( $C_4H_{10}$ ). Dengan membaca buku ini, pembaca dengan mudah memahami mengapa penggunaan bahan bakar LPG sangat baik untuk masa sekarang dan masa depan Indonesia.

Kebutuhan kendaraan berupa mobil di Indonesia meningkat seiring dengan peningkatan kemakmuran dan kesejahteraan rakyat. Saat ini jumlah mobil per seribu penduduk di Indonesia lebih kecil dari pada jumlah mobil per seribu penduduk di Thailand, di Malaysia, di Singapura atau di Brunei. Peningkatan jumlah mobil harus diimbangi dengan kualitas bahan bakar yang baik yang tingkat polusinya lebih kecil. Bahan bakar gas lebih ramah lingkungan dari padabahan bakar minyak bumi.

Setelah buku Teknologi Kendaraan Berbahan Bakar LPG terbit, saya berharap akan segera terbit buku otomotif modern seri berikutnya yang membahas *trend* perkembangan mobil di masa yang akan datang yaitu mobil listrik yang otonom. Perlu juga dibahas era peralihan sebelum Indonesia memasuki era 100% mobil listrik. Dalam acara yang seminar GAIKINDO pada bulan Agustus 2018 dibahas tentang perlunya mobil *hybrid* di kembangkan di Indonesia. Mobil *hybrid* ini sebagai mobil masa transisi Indonesia menuju mobil listrik. Apabila tanpa masa transisi maka Indonesia hanya akan menjadi penonton dalam era industri mobil listrik. Industri mobil di Indonesia dan infrastruktur di Indonesia harus dikembangkan secara bertahap untuk memasuki era 100% mobil listrik. Hal ini penting dilakukan untuk menjaga agar industri mobil yang ada di Indonesia saat ini tidak ambruk dan agar dapat menyelematkan ratusan ribu tenaga kerja yang menggantungkan kehidupannya pada rantai industri mobil berbahan bakar minyak bumi.

Mobil pada masa yang akan datang akan didominasi oleh mobil listrik nir-pengemudi. Pada era ini orang akan memanfaatkan mobil secara berbagi (*sharing*). Sistem *sharing* ini telah dimulai dengan adanya taksi *on-line*. Saat ini mobil taksi *on-line* dikemudikan oleh seorang pengemudi; pada waktu yang akan datang pengemudi digantikan oleh sistem otomatis. Mobil listrik akan dilengkapi dengan sistem teknologi informasi yang canggih yang harus dimutakhirkan setiap saat sesuai dengan kebutuhan pengguna dan perkembangan teknologi informasi itu sendiri. Usia mobil dapat mencapai 5 tahun atau lebih namun umur perangkat lunak pendukungnya pendek karena *life cycle* teknologi informasi memang sangat pendek sebagai akibat cepatnya inovasi.

Akhirnya saya mengucapkan selamat atas terbitnya buku dengan judul Teknologi Kendaraan Berbahan Bakar LPG. Selamat menikmati.

Jakarta, 17 Oktober 2018

Dr. Sadjuga, M.Sc.  
Direktur Pengelolaan Kekayaan Intelektual  
Kemenristekdikti

# Prakata

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dengan menyebut nama Allah SWT, penulis menyampaikan rasa syukur yang mendalam bahwa buku ini selesai disusun sebagai bentuk *sharing* pengalaman penulis kepada mahasiswa, peneliti dan praktisi otomotif.

Buku ini terdiri dari 6 (enam) bab yang saling berkaitan, dengan *brief summary* sebagai berikut:

**Bab 1** membahas tentang tuntutan kendaraan modern, dimulai dengan paparan tentang perubahan sistem kontrol emisi sampai dengan tantangan riset dan pengembangan energi sektor otomotif. Kemudian dilanjutkan dengan review sistem propulsi otomotif saat ini dan masa mendatang. Mesin pembakaran dalam dibahas secara umum, dilanjutkan dengan konsep *electric vehicle* dan kendaraan dengan sistem propulsi *fuel cell*. Pada bagian akhir bab 1 membahas overview tentang bahan bakar fosil dan non-fosil. Sebuah analisis sederhana disajikan untuk membandingkan ketangguhan dan ketersediaan beberapa jenis bahan bakar yang ada saat ini.

**Bab 2** membahas properti dan karakteristik LPG. Dalam bab ini juga disajikan sebuah analisis dari tinjauan kasus tentang *interchangibly fuel* yang dianalisis dengan *Wobbe indeks* ( $I_w$ ) dan sebuah *overview* tentang efisiensi volumetris pada kendaraan LPG.

**Bab 3** menyajikan perkembangan dan teknologi kendaraan LPG. Kebijakan peralihan bahan bakar, terobosan awal, pertimbangan praktis untuk mengkonversi BBM ke LPG dibahas dengan tuntas berdasarkan data-data dari *WLPGA Annual report*.

**Bab 4** membahas tentang bagaimana mengkonversi kendaraan dari bahan bakar konvensional (BBM) ke LPG. Semua pekerjaan dari perencanaan, inspeksi awal, keselamatan kerja, prosedur konversi, dan pengujian hasil dibahas secara detail. Bab ini juga menyajikan

tinjauan kasus pengaruh ukuran mixer, jenis vaporizer, dan potensi *recovery* energi pendinginan yang ditulis dari pengalaman penelitian penulis.

**Bab 5** membahas tentang penyesuaian waktu pengapian (*ignition timing*) dan pengembangan sistem kontrol untuk perbaikan performa dan emisi. Sebuah sirkuit kontrol pengubah pengapian dan sebuah kontrol AFR dengan FLC dibahas dalam bab ini.

**Bab 6** membahas tentang analisis tekno-ekonomi. Pembahasan dimulai dengan gambaran investasi dan operasional kendaraan LPG skala global, kemudian sebuah simulasi praktek di Indonesia disajikan dengan data-data yang ada. Bab ini sangat penting sebagai pertimbangan konsumen dan pengambil kebijakan untuk konversi kendaraan dari BBM ke LPG.

Kami menyadari, buku ini masih terdapat kekurangan hampir pada semua bagian karena keterbatasan pengetahuan dan pengalaman kami. Untuk itu, saran dan masukan sangat diharapkan. Akhirnya, kami berharap semoga buku ini bermanfaat bagi pembaca, terutama bagi mahasiswa, peneliti, dan praktisi otomotif.

Kami juga mohon doa dari para pembaca agar seri berikutnya dari buku ini (tentang bahan bakar alternative lainnya) bisa diselesaikan dalam waktu yang tidak terlalu lama.

Magelang, Mei 2019

Muji Setiyo & Suyitno

# Acknowledgement

Sebagian isi buku ini ditulis dari pengalaman penelitian dan publikasi penulis sebagai *principal investigator* selama periode tahun 2011-2018, oleh karena itu diucapkan terimakasih kepada para *co-investigator* dan para *co-author*.

Prof. Ir. Sudjito Soeparman, Ph.D  
*Universitas Brawijaya – Malang*

Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, M.Eng  
*Universitas Brawijaya – Malang*

Dr. Slamet Wahyudi, MT  
*Universitas Brawijaya – Malang*

Prof. Ir. Djoko Wahyu Karmiadji, MSME, Ph.D, APU  
*Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi – Serpong*

Prof. Dr. Ir. Prawoto, MSAE  
*Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi –  
Serpong*

Budi Waluyo, ST, MT  
*Universitas Muhammadiyah Magelang*

Suroto Munahar, MT  
*Universitas Muhammadiyah Magelang*

Bagiyo Condro Purnomo, ST, M.Eng  
*Universitas Muhammadiyah Magelang*

Joga Dharma Setiawan, B.Sc., M.Sc., Ph.D  
*Universitas Diponegoro*

Dr. Aris Triwiyatno, ST, MT  
*Universitas Diponegoro*

Dr. Willyanto Anggono, S.T., M.Sc  
*UK PETRA - Surabaya*

Mohammad Husni, MT  
*Vocational Education Development Center – Malang*

Ucapan terimakasih juga disampaikan kepada Direktorat Pengelolaan Kekayaan Intelektual, Kementerian Riset Teknologi dan Pendidikan Tinggi, Republik Indonesia atas Hibah yang diberikan.

# Daftar Isi

Pengantar.....	v
Prakata.....	viii
<i>Acknowledgement</i> .....	x
Daftar Isi.....	xii
<b>BAB 1. KONSEP KENDARAAN MODERN DAN REVIEW TEKNOLOGI.....</b>	<b>1</b>
1.1. Konsep Kendaraan Modern .....	2
1.2. Sejarah <i>On Board Diagnostics</i> (OBD) .....	3
1.3. Status dan Tantangan Riset .....	4
1.4. Review Sistem Propulsi Otomotif.....	8
1.5. Review Bahan Bakar Fosil .....	25
1.6. Review Bahan Bakar Non-Fosil .....	29
1.7. Properti Penting Bahan Bakar .....	35
1.8. Peluang Pengembangan.....	38
<b>BAB 2. PROPERTI LPG.....</b>	<b>41</b>
2.1. Sekilas Tentang LPG.....	42
2.2. Distribusi.....	43
2.3. Struktur Kimia .....	44
2.4. Komposisi LPG Komersial.....	45
2.5. Kandungan Energi .....	45
2.6. Fasa .....	46
2.7. Efek Terhadap Material .....	47
2.8. Properti Fisik.....	48
2.9. Tinjauan Pembakaran.....	55
2.10. Tinjauan Kasus 2.1: <i>Interchangability Fuel</i> [41].....	58
2.11. Tinjauan Kasus 2.2: Efisiensi Volumetrik [43] .....	64

BAB 3. PERKEMBANGAN KENDARAAN LPG .....	69
3.1. Kebijakan Bahan Bakar Alternatif.....	72
3.2. Terobosan Awal .....	75
3.3. Pertimbangan Praktis .....	77
3.4. Tantangan .....	78
3.5. Perkembangan Teknologi <i>Converter Kits</i> .....	80
BAB 4. INSTALASI CONVERTER KITS .....	82
4.1. Perencanaan.....	83
4.2. Keselamatan Kerja .....	91
4.3. Bagian 1: Inspeksi/Validasi Sebelum Konversi .....	92
4.4. Bagian 2: Memasang <i>Fuel Tank</i> dan <i>Fuel Line</i> .....	98
4.5. Bagian 3: Memasang <i>Vaporizer</i> .....	107
4.6. Pengoperasian dan Penyetelan .....	111
4.7. Pengujian.....	113
4.8. Tinjauan Kasus 4.1: Pengaruh Ukuran <i>Mixer</i> [48] .....	114
4.9. Tinjauan Kasus 4.2: Uji Coba Berbagai <i>Vaporizer</i> [60].....	125
4.10. Tinjauan Kasus 4.3: Penyerapan Kalor [61] .....	131
BAB 5. PENYESUAIAN SISTEM PENGAPIAN DAN KONTROL ELEKTRONIK .....	142
5.2. Proses Pembakaran dan Waktu Penyalaan .....	143
5.3. Temperatur Ruang Bakar .....	144
5.4. Tegangan Pengapian .....	144
5.5. Pemeriksaan dan Penyetelan Waktu Pengapian .....	146
5.6. Penyesuaian Nilai Panas Busi ( <i>Heat Range</i> ) .....	146
5.7. Penyesuaian Celah Busi ( <i>Spark Gap</i> ).....	148
5.8. Memasang Busi dengan <i>Torque Wrench</i> .....	149
5.9. Memasang Busi Tanpa <i>Torque Wrench</i> .....	150
5.10. Memasang Tutup Busi .....	151

5.11. Inspeksi Kabel Busi ( <i>Ignition Lead</i> ).....	152
5.12. Tinjauan Kasus 5.1: <i>Simple Electronic Spark Advance Module</i> [63].....	152
5.13. Tinjauan Kasus 5.2: <i>Deceleration Fuel Cut-Off</i> [64] .....	159
BAB 6. ANALISIS TEKNO-EKONOMI .....	170
6.1. Studi Kasus 6.1: Analisis Tekno Ekonomi [65] .....	171
6.2. Masalah Subsidi Bahan Bakar [69] .....	183
6.3. Laporan Beberapa Media Terkait Penggunaan Vigas .....	185
Referensi .....	188
Glosarium.....	194
Profil Penulis .....	198

# BAB 1.

## KONSEP KENDARAAN MODERN DAN REVIEW TEKNOLOGI



Hari ini, peradaban global memasuki paradigma baru dengan munculnya masyarakat modern, gaya hidup yang berubah dengan cepat dengan sistem cerdas, jaringan, dan bahkan sistem kontrol nirkabel [1]. Perkembangan teknologi dan industri tidak lagi mengandalkan sumber energi fosil berupa minyak cair dan bahan padat seperti batu bara. Kecepatan perpindahan manusia telah mencapai lebih dari 300 km/jam di darat dan kecepatan supersonic di udara.

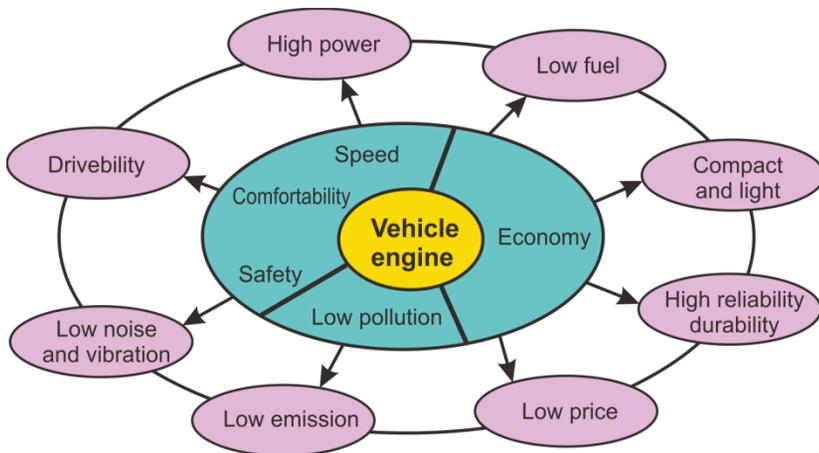
Di saat yang sama, ancaman terhadap ketersediaan bahan bakar konvensional memaksa teknologi untuk beralih ke beberapa energi alternatif. Bahaya lain berupa isu pemanasan global, perubahan iklim dunia, dan penurunan kualitas lingkungan hidup yang mengancam keselamatan makhluk hidup, terutama di Kota-kota dan kawasan industri. Untuk itu, diperlukan lompatan cerdas dan realistis untuk melanjutkan mobilitas dengan mempertimbangkan aspek lingkungan dan keberlanjutan (*sustainability*).

Mobil juga telah berkembang menjadi cerdas, mampu mengenali kesalahan pada sistem secara mandiri, menampilkan stabilitas yang lebih baik, dan menghasilkan efisiensi yang tinggi. Teknologi berkembang dari pemanfaatan bahan bakar konvensional ke sistem bahan bakar alternatif dan bahkan sistem penggerak alternatif melalui pengendalian elektronik, tidak lagi memerlukan pengendalian secara mekanis.

### **1.1. Konsep Kendaraan Modern**

Tingkat keselamatan, kenyamanan, ekonomis, dan produk ramah lingkungan secara bertahap menjadi suatu syarat bagi terpenuhinya regulasi sekaligus tuntutan pengemudi dan masyarakat yang harus dipenuhi. Hal tersebut nyatanya adalah masalah sosial yang makin meningkat, termasuk tingginya tingkat polusi lingkungan terutama di kota-kota besar dan sepanjang jalur transportasi, pemakaian konsumsi bahan bakar yang meningkat, dan bahkan kecelakaan lalu lintas yang diakibatkan oleh kendaraan juga meningkat.

Tuntutan-tuntutan tersebut memacu produsen mobil untuk mengembangkan teknologi canggih. Beberapa produk telah beralih atau menggabungkan beberapa mode operasi bahan bakar. Teknologi elektronik maju juga diterapkan pada komponen kendaraan untuk memenuhi tuntutan dalam hal operasi yang akurat dan berkecepatan tinggi. Mesin kendaraan harus mampu memenuhi kriteria antara lain performa tinggi (optimal), hemat dalam pemakaian bahan bakar, emisi gas buang yang rendah/ tanpa emisi, noise dan getaran mesin rendah, dan handal dan mudah dioperasikan. Lebih terperinci disajikan dalam Gambar 1.1. sebagai berikut [2].



**Gambar 1.1 Konsep Kendaraan Modern**

## 1.2. Sejarah *On Board Diagnostics* (OBD)

Salah satu aplikasi sistem cerdas pada mobil yang pertama adalah *self-diagnostic* untuk mengenali problem kesalahan pada mesin dan komponen mesin. Sistem yang ada sekarang harus dapat memonitor emisi dan sistem kontrol yang kompleks secara interaktif dan menyediakan serial data yang cukup untuk teknisi sehingga dapat mengarahkan pada sumber kerusakan.

Tugas komputer dalam masalah pengontrolan emisi pada *self-diagnostic* menjadi sangat penting karena sudah menjadi kebijakan di

banyak negara. Perintah penggunaan *On Board Diagnostics* (OBD) pertama kali berasal dari suatu badan di Amerika yaitu *California Air Resources Board* (CARB) di tahun 1988. CARB mewajibkan penggunaan *on board diagnostic system* untuk semua kendaraan yang dijual di USA, melalui peraturan amandemen *Clean Air Act* tahun 1990 dan juga perintah pelaksanaan di tahun 1996.

Aturan dari sistem generasi pertama ini selanjutnya disebut OBD I yang masih relatif sederhana. CARB mengusulkan sekaligus mengharuskan penggunaan *on board diagnostic system* untuk model kendaraan yang dibuat setelah tahun 1996. Aturan ini kemudian disebut dengan OBD-II (sistem generasi kedua). U.S. *Environmental Protection Agency* (USEPA) membuat peraturan yang menyerupai dengan aturan California OBD-II. USEPA setuju untuk menyamakan dengan California OBD-II paling tidak mulai model tahun 1998. Oleh karena itu, semua kendaraan yang dijual di Amerika harus memenuhi persyaratan CARB OBD-II. Sekarang, seluruh kendaraan komersial yang diproduksi diseluruh dunia mengaplikasikan sistem OBD, sebagai tuntutan lolos emisi dan efisiensi [3].

### **1.3. Status dan Tantangan Riset**

#### **1.3.1. Pemenuhan Konsep Kendaraan Modern**

Sampai saat ini, upaya untuk mengurangi konsumsi bahan bakar berbasis minyak bumi dan mengurangi emisi memerlukan usaha penelitian multidisiplin yang mencakup analisis, pemodelan, eksperimen dan pengujian laboratorium. Kegiatan tersebut harus didukung dengan fasilitas penelitian yang canggih, tim ilmuwan dan insinyur multidisiplin yang saling bersinergi. Hampir semua lembaga riset otomotif sedang berupaya memecahkan tantangan besar dan kecil yang terkait dengan pengembangan desain *drivetrain* kendaraan yang lebih baik, material baru, bahan bakar yang lebih baik, dan proses yang lebih baik untuk mendukung transisi teknologi transportasi menuju lingkungan yang lebih bersih dan lebih berkelanjutan [4].

### **1.3.2. Analisis Sistem Energi dan Pengambilan Keputusan Terintegrasi**

Sistem energi dan tenaga listrik mengalami periode perubahan yang cepat. Proses transformasi ini ditandai dengan restrukturisasi pasar energi dan listrik, pengembangan dalam skala besar sumber energi terbarukan seperti *wind energy* dan *solar PV*, pengenalan dan penerapan teknologi komunikasi baru (misalnya *smart grid*). Proses transformasi juga ditandai dengan saling ketergantungan yang lebih besar diantara berbagai infrastruktur energi dan komunikasi. Dengan penetrasi yang lebih tinggi dari sumber energi rendah karbon, *smart grid*, kendaraan listrik, dan sistem teknologi baru lainnya yang muncul pada abad ke-21, mendukung sumber daya yang memberikan fleksibilitas sistem yang lebih besar (misalnya penyimpanan energi), dan berkontribusi terhadap efisiensi, keandalan, dan ketahanan sistem. Integrasi dan optimalisasi berbagai bagian sistem energi akan dibutuhkan untuk menurunkan biaya, memperbaiki kinerja sistem, dan mengurangi dampak lingkungan [5]. Pada sisi lain, keputusan penerapan sistem energi baru juga mempertimbangkan perilaku konsumen, kondisi ekonomi, dan kekuatan pasar. Semua variabel tersebut berinteraksi pada banyak tingkatan untuk mempengaruhi penerimaan teknologi baru dan potensi dampaknya terhadap efisiensi energi dan lingkungan.

### **1.3.3. Mesin dan Bahan Bakar**

Lembaga – lembaga riset dunia berfokus pada interaksi antara bahan bakar dan mesin untuk memaksimalkan manfaat yang ada melalui pengoptimalan sistem serta performansi multi-bahan bakar dalam sebuah kendaraan. Para ilmuwan sedang berupaya menerapkan keahlian mereka di bidang kimia pembakaran, karakterisasi semprotan bahan bakar, perancangan sistem pembakaran, kontrol, dan penginderaan di dalam silinder serta pengendalian emisi. Tim ahli yang mencakup berbagai disiplin ilmu bidang mekanik, fisika, ahli kimia, dan ilmuwan komputer berkolaborasi dalam pengembangan bersama konsep mesin pembakaran dalam (*Internal Combustion Engine, ICE*) yang inovatif dengan penggunaan bahan

bakar alternatif. Untuk itu, kemampuan uji coba dan simulasi laboratorium yang canggih akan berpengaruh terhadap kecepatan pemenuhan target riset [6].

#### **1.3.4. Teknologi Pelumasan**

Kerugian-kerugian energi akibat gesekan (*frictional losses*) pada sebuah mesin umumnya mencapai angka 10-20% dari total energi yang disuplai bahan bakar ke mesin, tergantung pada faktor-faktor seperti ukuran mesin, tipe, kondisi mengemudi dan cuaca. Mengurangi kerugian gesekan ini dapat mengurangi konsumsi bahan bakar dan mengurangi emisi karbon dioksida sebesar pada angka yang signifikan. Periset dan Perekayasa berusaha mengembangkan solusi lanjutan untuk mengatasi masalah ini yang mengintegrasikan pelumas hemat bahan bakar, material rendah gesekan, dan teknologi pelapisan permukaan material untuk memperbaiki ekonomi bahan bakar kendaraan dengan tetap mempertahankan atau meningkatkan karakteristik ketahanan, keandalan dan emisi kendaraan. Fokus pengembangan bidang ini antara lain: 1). mengembangkan aditif pelumas canggih dan *basefluids*, bahan penguat pelumas, dan pelapis; 2). pengembangan tribofilm; dan 3). melakukan studi terus menerus tentang hubungan kinerja pelumas dengan kinerja motor bakar/kendaraan [7].

#### **1.3.5. Teknologi Thermal-Mekanikal**

Manajemen Thermal memainkan peran penting dalam hampir semua aplikasi yang berhubungan dengan energi, termasuk pada mesin pembakaran dalam. Topik penelitian di bidang ini meliputi cairan yang melakukan fungsi pendinginan di mesin, bahan yang mentransmisikan energi, sensor yang memantau kondisi lingkungan dan bahan, proses, dan sistem untuk mengelola panas. Ini adalah bagian dari bidang yang lebih besar yang disebut penelitian thermal-mechanical. Ragam penelitian termo-mekanika antara lain meliputi: perpindahan panas satu dan dua fasa, sintesis nanomaterial, fluida kerja perpindahan panas, *electronic cooling*, penyimpanan energi termal, *nano-electrofuel*, sensor elektrokimia, bahan propulsi, dan struktur [8].

### 1.3.6. Pemodelan Energi untuk Kendaraan dan Sistem Transportasi

Selama beberapa dekade terakhir, ilmuwan dan peneliti berfokus pada sistem transportasi hemat energi. Dalam beberapa tahun terakhir, teknologi kendaraan menjadi semakin kompleks dengan diperkenalkannya konfigurasi *powertrain* baru (seperti kendaraan listrik), teknologi komponen baru (seperti transmisi dan mesin canggih) dan strategi pengendalian (*eco-routing*). Selain itu, dengan meningkatnya fokus pada konektivitas dan otomasi, orang tidak hanya dapat menganggap kendaraan sebagai elemen yang berdiri sendiri namun lebih fokus pada keseluruhan sistem transportasi karena banyaknya interaksi dengan kendaraan dan lingkungannya. Pemodelan sistem dan kelompok kontrol telah mengembangkan serangkaian alat dan proses terpadu untuk mengevaluasi secara cepat dan efisien dampak teknologi kendaraan dan transportasi maju dari sudut pandang mobilitas dan energi [9].

### 1.3.7. Interoperabilitas *Grid-Vehicle*

Kedepan, pengisian energi kendaraan salah satunya menggunakan stasiun pengisian bertenaga surya. Sebagai layanan kendaraan listrik *plug-in* (EVs), tantangan untuk mengelola interaksi transportasi-energi adalah dengan peningkatan jaringan listrik. Peneliti, laboratorium, industri, dan pemegang kebijakan berusaha memberikan dukungan untuk pengembangan teknologi baru dalam konektivitas grid, menjembatani kebutuhan produsen EV, dan perusahaan utilitas yang memasok listrik. Upaya penelitian dan pengembangan ini berfokus pada aplikasi praktis yang akan meningkatkan penerimaan pasar kendaraan *plug-in*, dan infrastruktur pengisian daya. Harapannya, tercapai harmonisasi global dan standar teknologi untuk *interface EV-grid* serta pengisian interoperabilitas untuk memastikan kendaraan listrik masa depan dan stasiun pengisian di seluruh dunia bekerja sama tanpa hambatan [10]. Gambar 1.2 berikut menyajikan beberapa aktivitas riset dan pengujian di *Argonne National Laboratory* yang diambil dari <http://www.anl.gov/>.



**Gambar 1.2 Aktivitas riset energi dan kendaraan masa depan**  
(Sumber: *Argonne National Laboratory*)

## 1.4. Review Sistem Propulsi Otomotif

### 1.4.1. Mesin Pembakaran Dalam

Mesin pembakaran dalam/ *Internal Combustion Engine* (ICE) adalah suatu motor penggerak mula yang mengubah energi primer (kimia bahan bakar) menjadi energi mekanik melalui siklus pembakaran. ICE adalah sistem propulsi yang paling populer untuk kendaraan bermotor. Bahkan, dalam beberapa masa mendatang, dimana kendaraan hybrid menjadi konsentrasi utama pengembangan kendaraan oleh hampir seluruh produsen, ICE masih menjadi sumber daya utama (primer) untuk dikombinasikan dengan sistem motor listrik (sekunder).

#### ***A. Spark Ignition (SI) Engine***

*Spark Ignition (SI) Engine*, dikenal juga dengan mesin *Otto* atau motor bensin. Proses pembakaran dimulai dari percikan api dari busi. Percikan api tersebut membakar campuran bahan bakar dan udara yang dikompresi dalam silinder (*pre-mixed combustion*). Pencampuran

bahan bakar dan udara dapat terjadi di luar silinder atau di dalam silinder (*Gasoline Direct Injection*).

Awalnya, *Spark Ignition (SI) Engine* disebut sebagai "mesin bensin". Namun, istilah ini kemudian menjadi kurang relevan, karena *SI engine* dapat dijalankan pada bahan bakar selain bensin, seperti autogas (LPG), methanol, ethanol, bioethanol, gas alam terkompresi (CNG), hidrogen, dan nitromethane (untuk *drag racing*).

Mesin SI memerlukan listrik yang dikendalikan oleh perangkat sistem pengapian untuk menghasilkan percikan yang memadai dan waktu yang tepat dan terkontrol. Pada mesin SI modern, manajemen sistem pengapian terintegrasi dengan sistem manajemen mesin atau *Engine Management System (EMS)*, yang memungkinkan untuk melakukan pengontrolan waktu penyalaan berdasarkan informasi dari sensor-sensor. Menurut Ricardo, ada tiga tahap pembakaran di SI Engine, yaitu:

1. Tahap penundaan pengapian (*Ignition lag stage*)
2. Tahap propagasi nyala (*Flame propagation stage*)
3. Tahap setelah pembakaran (*After burning stage*)

### **1. Tahap penundaan pengapian (*Ignition lag stage*)**

Kenyataannya, meskipun busi telah meletikkan bunga api, ada selang waktu tertentu antara percikan api busi dan proses terjadinya penyalaan, dimana ada kenaikan tekanan yang nyata akibat pembakaran. Selang waktu ini disebut "*ignition lag*".

*Ignition lag* adalah interval waktu dalam proses reaksi kimia selama molekul dipanaskan hingga suhu penyalaan sendiri (*self ignition temperature*) dan menghasilkan inti nyala yang menyebar sendiri. *Ignition lag* umumnya dinyatakan dalam sudut engkol ( $\theta$ ). Pada Gambar 2.1, periode *ignition lag* ditunjukkan pada titik (1) ke titik (2). *Ignition lag* sangat kecil dan terletak di antara 0,00015 hingga 0,0002 detik. *Ignition lag* 0,002 detik setara dengan rotasi engkol 35 derajat engkol ketika mesin berputar pada 3000 rpm. Sudut pemajuan pengapian akan meningkat sesuai dengan

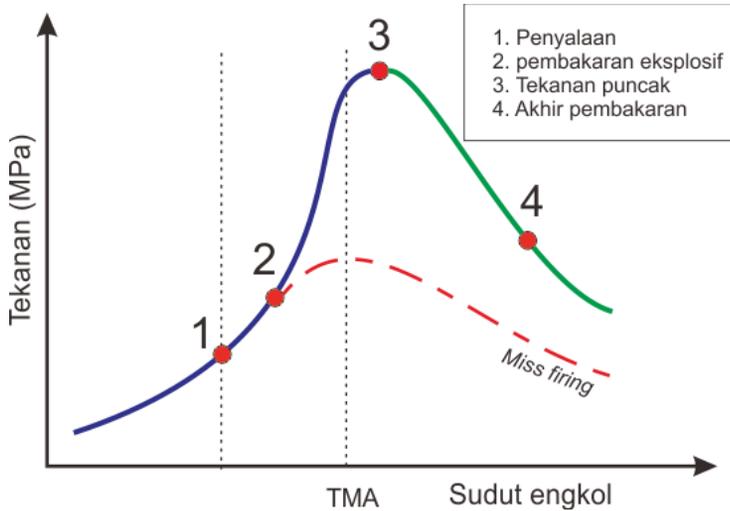
kenaikan putaran mesin. Ini adalah proses kimia yang tergantung pada sifat bahan bakar, suhu dan tekanan, proporsi gas buang dan laju oksidasi.

## **2. Tahap propagasi nyala (*Flame propagation stage*)**

Begitu nyala terbentuk pada titik (2), pembakaran harus terjadi secara mandiri dan harus dapat menyebar melalui campuran. Hal ini dimungkinkan ketika laju panas yang dihasilkan oleh pembakaran lebih besar daripada panas yang hilang oleh api ke sekitarnya. Setelah titik (2), propagasi nyala secara abnormal rendah pada awal pembakaran ketika panas yang hilang lebih tinggi dari panas yang dihasilkan. Kenaikan tekanan juga lambat karena massa campuran yang dibakar kecil. Oleh karena itu, awal pengapian dibuat hingga 35 derajat sebelum TMA, jika tekanan puncak dikehendaki dicapai pada 5-10 derajat setelah TMA.

## **3. Tahap setelah pembakaran (*After burning stage*)**

Pembakaran tidak akan berhenti pada titik (3) tetapi berlanjut setelah mencapai tekanan puncak. Pembakaran ini dikenal sebagai *after burning stage*. Ini biasanya terjadi ketika campuran kaya dipasok ke mesin. Gambar 1.3 berikut menyajikan proses pembakaran pada mesin SI, sedangkan Gambar 1.4 menyajikan ilustrasi penyebaran api di dalam silinder.



**Gambar 1.3 Siklus pembakaran mesin bensin**



**Gambar 1.4 Penyebaran api pada mesin SI (*premixed flame*)**

### **Peran-Fungsi EMS dalam mesin SI**

Sistem pengontrolan secara elektronik untuk sistem injeksi bahan bakar (D-Jetronic dan L-Jetronic) sudah diperkenalkan untuk menggantikan sistem konvensional karburator atau injeksi mekanis yang kurang efisien [11], [12]. Selanjutnya, teknologi pengaturan

secara elektronik untuk aplikasi mesin dan keseluruhan sistem pada kendaraan berkembang dengan pesat. Beberapa perangkat pengendali mekanis telah digantikan dengan beberapa *actuator* yang dikoneksikan secara elektrik dan beberapa sistem telah beroperasi secara nirkabel/*wireless* yang mampu untuk pengendalian jarak jauh.

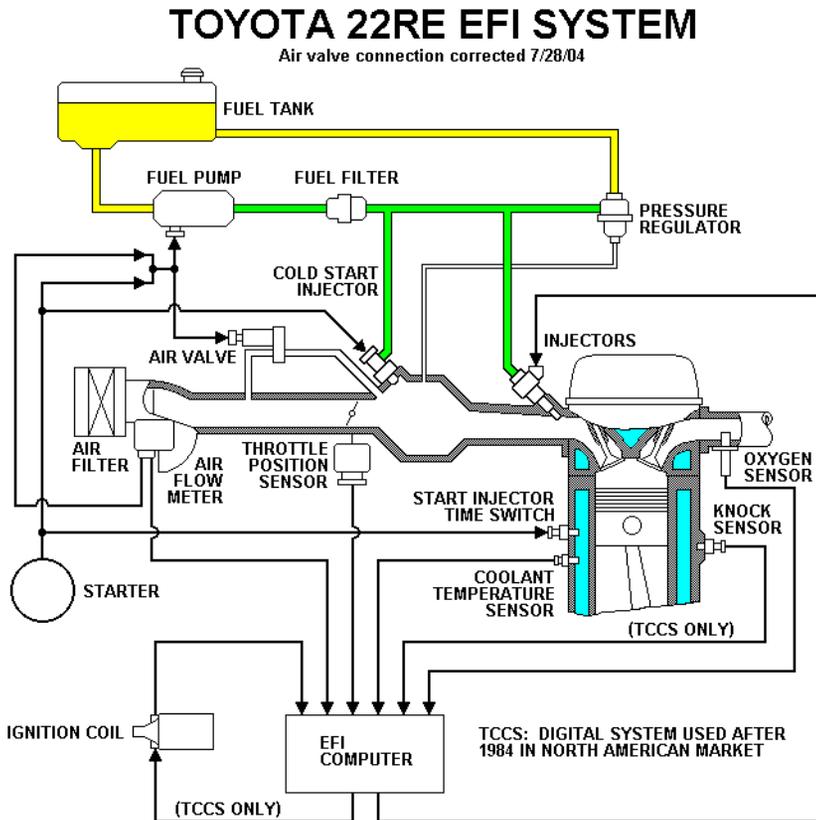
Penggunaan teknologi pengaturan secara elektronik memungkinkan sistem pengontrolan berjalan secara akurat dan tahan lama. Implikasinya dapat mengurangi polusi lingkungan karena emisinya lebih baik, hemat bahan bakar, meningkatkan stabilitas dan kontrol sistem juga menjadi lebih baik. Perkembangan teknologi elektronika yang sangat pesat, termasuk di dalamnya *semiconductor* dan komputer juga berperan dalam meningkatkan tingkat kestabilan kendaraan.

Sistem kontrol elektronik pada mesin SI modern mengatur pemasukan bahan bakar, pasokan udara, dan waktu pengapian secara terintegrasi. Sistem kontrol elektronik injeksi bahan bakar mengatur kebutuhan bahan bakar secara akurat berdasarkan kondisi kerja mesin. Secara otomatis, sistem akan menambah atau mengurangi jumlah pasokan bahan bakar, bahkan menghentikan sementara aliran bahan bakar pada kondisi mesin tidak memerlukannya seperti pada saat deselerasi.

Sistem kontrol bahan bakar bekerja berdasarkan informasi yang dikirim oleh sensor-sensor yang terpasang pada mesin dan panel kendaraan. Informasi dari sensor ini dapat berupa sinyal analog maupun sinyal digital. Beberapa kondisi yang direkam sensor diantaranya temperatur, tekanan, posisi, rotasi, aliran, torsi, gas buang (*exhaust*), getaran (*knock*), dan kondisi kerja kendaraan lainnya.

Informasi dari sensor ini kemudian diolah oleh *Electronic Control Unit* (ECU) atau *Electronic Control Module* (ECM). ECU/ECM mengolah data analog dan digital beserta beberapa kendala (*constraint*) untuk mengatur sistem bahan bakar dan sistem pengapian, termasuk sistem keamanan kendaraan. Keputusan yang diambil oleh ECU/ECM kemudian diterjemahkan dalam bentuk perintah yang dikirim ke beberapa *actuator* (*injector*, *ignition coil*, MIL, ISC, dan

lainnya) [2]. Sebagai ilustrasi, skema *Engine Management System* (EMS) disajikan dalam Gambar 1.5 sebagai berikut.

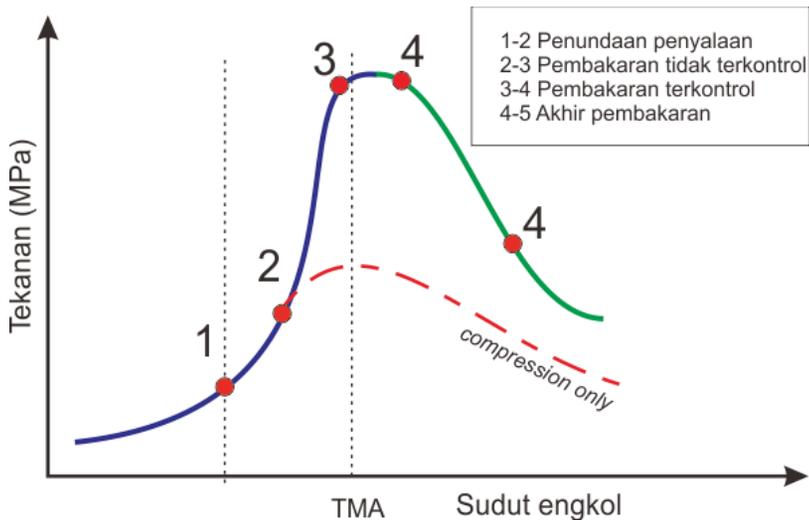


**Gambar 1.5 Diagram sistem EFI**

### ***B. Compression Ignition (CI) Engine***

*Compression Ignition (CI) engine* disebut juga dengan motor diesel. Prinsip kerjanya dengan cara memampatkan udara dalam silinder sampai temperatur di dalam ruang bakar melebihi temperatur *auto-ignition* bahan bakar yang digunakan. Pada saat akhir langkah kompresi, bahan bakar diinjeksikan dalam butiran-butiran yang sangat halus.

Proses pembakaran pada motor diesel dikendalikan dengan mengatur waktu dan kuantitas injeksi oleh pompa injeksi. Pembakaran terjadi setelah bahan bakar yang dikabutkan membentuk campuran yang mudah terbakar dengan udara yang dikompresikan (*diffusion flame*). Pembakaran dimulai pada sejumlah titik secara bersamaan, kemudian menyebar pada seluruh campuran. Ilustrasi pembakaran pada mesin diesel disajikan pada Gambar 1.6 sebagai berikut.



**Gambar 1.6** Siklus pembakaran mesin CI

Mesin diesel umumnya menghasilkan noise dan getaran yang lebih besar dari mesin SI. Namun demikian, karakteristik torsi yang besar dan hemat bahan bakar menjadi pertimbangan yang menjanjikan untuk kendaraan niaga. Dalam beberapa dekade terakhir, dengan teknologi yang lebih baik, sistem peredam suara dan getaran yang lebih baik, mesin diesel telah banyak diaplikasikan untuk sedan mewah dan mampu berputar dalam kecepatan tinggi. Ilustrasi penyebaran api pada pembakaran mesin diesel (*diffusion flame*) disajikan dalam Gambar 1.7 sebagai berikut.



**Gambar 1.7 Penyebaran api pada mesin CI (*diffusion flame*)**

Mesin diesel memiliki salah satu dari dua jenis injeksi bahan bakar yaitu sistem injeksi langsung/ *direct injection* (DI) dan injeksi tidak langsung/ *indirect injection* (IDI). Mesin DI menginjeksikan bahan bakar langsung ke silinder dan langsung terjadi pembakaran. Pada mesin IDI, pembakaran dimulai pada ruangan sebelum ruang bakar utama yang disebut kamar pusar.

Mesin IDI kurang efisien tetapi memungkinkan operasi pada kecepatan yang lebih tinggi, menghasilkan lebih sedikit noise dan peralatan injeksi yang lebih murah. Sebaliknya, mesin DI menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi, noise tinggi, dan membutuhkan perangkat injeksi yang lebih tangguh.

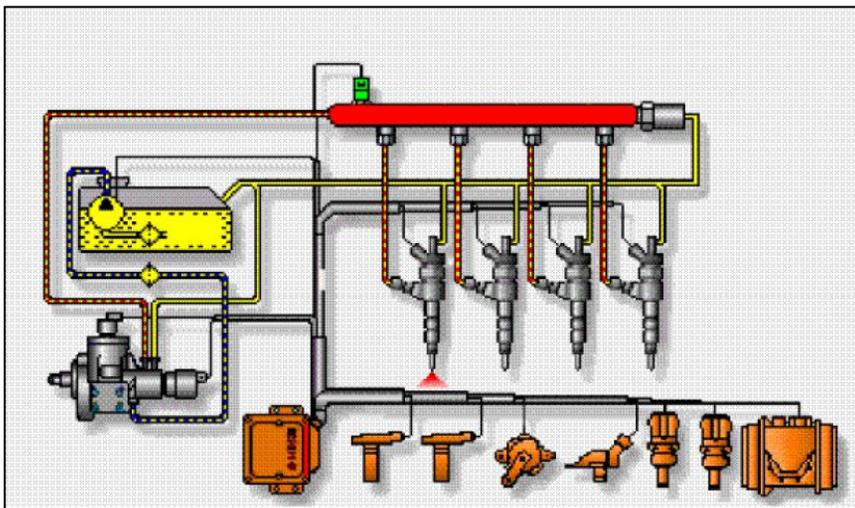
Campuran bahan bakar dan udara dalam motor diesel memiliki batas bawah temperatur *auto-ignition* (*minimum auto-ignition temperature*). Pada mesin IDI, saat mesin dingin tidak akan terjadi pembakaran jika proses kompresi tidak dapat mencapai *minimum auto-ignition temperature*. Dalam kondisi ini, dibutuhkan *glow plug* untuk menaikkan temperatur sebelum mesin distart. *Glow plug* pada motor diesel dikendalikan oleh perangkat sistem pemanas mula (*initial heating system*).

Motor diesel modern memiliki sistem injeksi yang sangat teliti (*Diesel Common Rail System*). *Common Rail System* adalah mesin diesel

yang sistem bahan bakarnya dikontrol secara elektrikal. Pada saat mesin bekerja, tekanan bahan bakar pada fuel rail dijaga pada tekanan yang cukup tinggi. Kontrol tekanan tinggi tersebut diatur secara independen pada setiap injector [13].

*Common Rail System* dirancang untuk mesin-mesin *high speed direct injection*. Parameter injeksi seperti waktu penginjeksian, jumlah injeksi dan tekanan dikontrol oleh *Electronic Control Module (ECM)*. Pada mesin diesel konvensional, pompa digerakkan oleh mesin dan fungsinya untuk memastikan jumlah bahan bakar yang sesuai, mendistribusikan bahan bakar ke setiap injektor dan mengatur bukaannya. Pada *Common Rail System*, pompa hanya bertugas untuk mensuplai bahan bakar pada tekanan yang sangat tinggi di dalam jalur pengumpan (*common feeding line*).

Sistem pembukaan dan penutupan injektor dikontrol oleh *Electronic Control Module (ECM)* yang menerima informasi dari sensor-sensor seperti pada sistem EMS motor bensin. *Common Rail System* meningkatkan performa dan mengurangi noise serta menurunkan tingkat emisi gas buang. Gambar 1.8 menyajikan skema sederhana dari bagian-bagian utama sistem *common rail*.

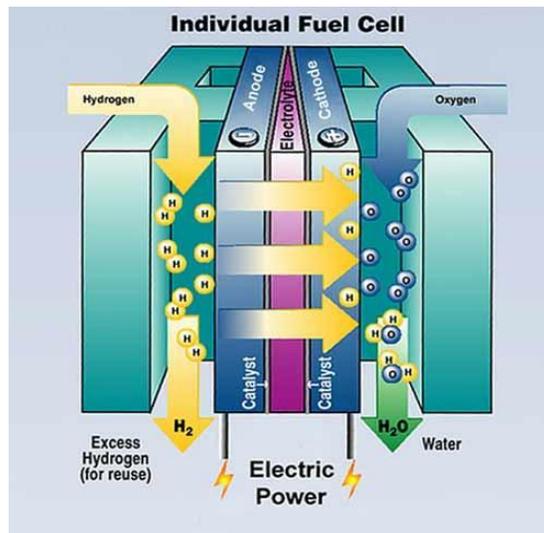


**Gambar 1.8 Diagram *Common Rail System***  
(Sumber : Hyundai, Training Material & Publication)

### 1.4.2. Sel Bahan Bakar (*Fuel Cell*)

Teknologi sel bahan bakar (*fuel cell*) menawarkan tenaga listrik yang bersih, efisien, andal untuk hampir semua perangkat yang membutuhkan tenaga listrik. *Fuel cell* digunakan dalam berbagai aplikasi portabel, stasioner, dan transportasi, mulai dari pengisi baterai, pemanas rumah, dan listrik mobil. *Fuel cell* merupakan peralatan konversi energi (mesin) yang cocok diterapkan sebagai energi alternatif untuk kendaraan modern sebagai teknologi hijau. Berbeda dengan mesin berbasis minyak dan gas alam, *fuel cell* dengan hydrogen tidak menghasilkan emisi carbon. Pengembangan kendaraan *fuel cell* menjadi konsentrasi produsen otomotif untuk mendorongnya sebagai kendaraan komersial [14].

*Fuel cell* adalah suatu perangkat konversi energi yang bekerja seperti baterai, dimana keduanya menghasilkan listrik dari proses reaksi elektrokimia. Baik *fuel cell* maupun baterai mengubah energi kimia menjadi energi listrik. Selama proses reaksi berlangsung juga menghasilkan energi lain dalam bentuk kalor. Contoh susunan *fuel cell* disajikan dalam Gambar 1.9, dimana hydrogen akan bereaksi dengan oksigen dengan bantuan katalis untuk menghasilkan muatan listrik.



Gambar 1.9 Konsep dasar *fuel cell*

Baterai menyediakan listrik dalam kapasitas tertentu dan ketika muatan listrik habis atau berkurang dapat dilakukan pengisian (*re-charging*) melalui sumber listrik eksternal untuk mendorong reaksi elektrokimia dalam arah sebaliknya. Di sisi lain, *fuel cell* hanya dapat bekerja jika ada suplai energi kimia dari luar dan dapat bekerja tanpa batas jika suplai energi kimia tidak diputus.

Hidrogen ( $H_2$ ) dan Oksigen ( $O_2$ ) adalah dua jenis sumber kimia sebagai energi pemasok pada *fuel cell*. Hidrogen umumnya disebut sebagai bahan bakar, meskipun tidak ada reaksi pembakaran yang terjadi ketika tidak ada oksigen. Selama oksidasi, atom hidrogen bereaksi dengan atom oksigen untuk membentuk air dengan sangat efisien. Selama proses, elektron dilepaskan dan mengalir melalui sirkuit eksternal dan menghasilkan arus listrik.

*Fuel cell* memiliki variasi model dan sistem kerja yang beragam, mulai dari perangkat kecil yang memproduksi listrik hanya beberapa watt, sampai ke pembangkit listrik besar yang mampu memproduksi listrik dalam kapasitas megawatt. Namun demikian, semua *fuel cell* tetap berbasis pada desain dasar, yaitu proses elektrokimia menggunakan dua buah elektroda yang dipisahkan oleh elektrolit yang membawa partikel bermuatan listrik. Untuk mempercepat reaksi pada kedua elektroda, pada *fuel cell* ditambahkan dengan katalis.

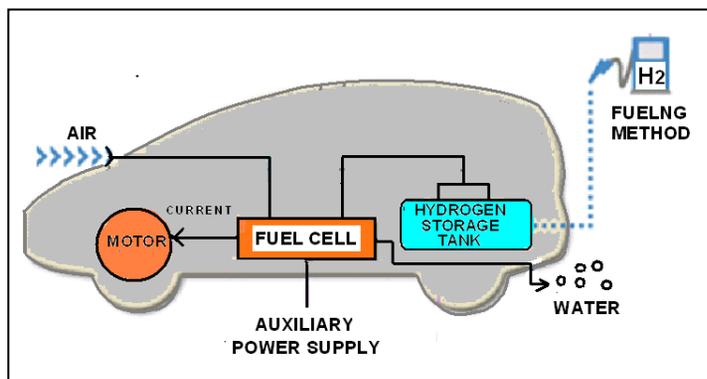
#### **A. Mekanisme Kendaraan *Fuel Cell***

Kendaraan *fuel cell* (FCV) mengambil energi dari sel bahan bakar yang menghasilkan energi listrik melalui reaksi kimia antara hidrogen (salah satunya) dan oksigen. Listrik yang dihasilkan disuplai ke motor listrik untuk menggerakkan kendaraan. Hidrogen yang digunakan diambil dari tabung yang dipasok dari stasiun pengisian layaknya stasiun bensin, CNG, atau LPG (Lihat Gambar 1.10).

*Fuel cell* untuk *Light Duty Vehicle* (LDV) sejauh ini telah digunakan meskipun dalam skala terbatas dan sebagian besar produsen otomotif telah menargetkan untuk penjualan komersial. Kendaraan *fuel cell* kemungkinan besar akan berkonsentrasi di wilayah yang telah siap dengan infrastruktur pengisian bahan bakar hidrogen seperti di Jepang, Jerman dan Amerika Serikat, dan kemudian akan

menyebar ke beberapa negara. Bus kota yang digerakkan dengan *fuel cell* menunjukkan pertumbuhan dari tahun ke tahun, dengan lebih banyak prototipe yang diperkenalkan, salah satunya ditunjukkan dalam Gambar 1.11.

Keberhasilan promosi kendaraan *fuel cell* telah terjadi di Eropa, Jepang, Kanada dan Amerika Serikat namun biaya modal yang tinggi masih merupakan penghalang untuk adopsi secara meluas. Namun demikian, diharapkan segera setelah harga *fuel cell* mampu setara dengan harga bus diesel-hybrid, teknologi ini akan lebih banyak dipromosikan karena alasan lingkungan.



**Gambar 1.10 Perangkat Utama FCV**



**Gambar 1.11 Prototipe bus dengan propulsi *fuel cell***  
(<https://www.japantimes.co.jp>)

## B. Metode Pemasukan Bahan Bakar

Secara umum, ada dua jenis metode pemasukan bahan bakar (*fueling method*) pada FCV. Metode pertama, disebut dengan sistem pengisian langsung (*direct fueling system*). Tangki hidrogen yang terpasang pada FCV diisi dari stasiun hidrogen. Hidrogen dari tangki kemudian disuplai ke *fuel cell* untuk proses elektrokimia.

Metode kedua, disebut sistem pengisian tak langsung (*On-board reforming system*). Pada sistem ini, bahan bakar lain (bukan hidrogen) dipasok ke reformer yang dipasang pada FCV. Reformer memproduksi hidrogen yang kemudian disuplai ke *fuel cell*. Sistem pengisian langsung lebih unggul dalam hal efisiensi energi dan pengurangan emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dibandingkan dengan sistem *on-board reforming*.

## C. Fitur Utama FCV

FCV dengan bahan bakar berupa hidrogen murni hanya menghasilkan uap air. FCV tidak melepaskan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), hidrokarbon (HC), karbon monoksida (CO) atau partikulat (PM) sama sekali. FCV juga tidak melepaskan polutan udara berbahaya seperti benzena, aldehida, dan lainnya. Saat ini, FCV memberikan efisiensi energi yang sangat tinggi (lebih dari 30%). Ini berarti hampir dua kali dari mesin bensin (15% sampai 20%). FCV juga mampu mempertahankan efisiensi yang tinggi dalam rentang output mesin yang rendah.

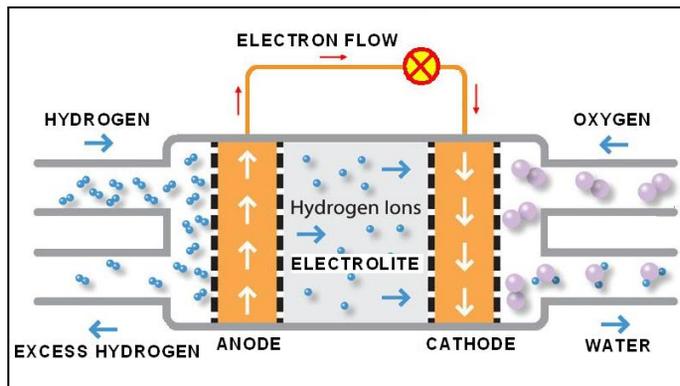
Gas alam, ethanol, dan berbagai jenis bahan bakar lain yang berasal bukan dari minyak dapat digunakan untuk FCV. Hal ini menandakan bahwa *fuel cell* tetap bisa beroperasi saat cadangan minyak habis di masa mendatang. Selain itu, hidrogen dapat diproduksi melalui proses tenaga surya, biomassa, dan sumber-sumber energi bersih dan terbarukan lainnya untuk mengurangi efek lingkungan.

*Fuel cell* menghasilkan listrik dengan reaksi elektrokimia. Dengan demikian, *fuel cell* menghasilkan tingkat noise yang jauh lebih rendah daripada mobil dengan mesin bensin. Kendaraan *fuel cell* memberikan kenyamanan dan mengurangi kebisingan kota. Mobil listrik perlu memakan waktu yang relatif lama untuk pengisian

baterai. Di sisi lain, kendaraan kendaraan *fuel cell* dapat dilakukan pengisian hidrogen dalam waktu yang relatif singkat, seperti halnya mobil bensin. Kendaraan *fuel cell* dapat menempuh jarak tempuh yang lebih jauh dengan satu pengisian bahan bakar dibandingkan mobil listrik. Jarak tempuh ini diharapkan menjadi sebanding dengan mobil bensin.

#### D. Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC)

*Proton Exchange Membrane Fuel Cells* (PEMFC) adalah salah satu jenis sel bahan bakar yang dikembangkan untuk aplikasi transportasi dan aplikasi sel bahan bakar portabel. Fitur pembeda PEMFC dari jenis lain terutama pada rentang temperatur/ tekanan yang lebih rendah (50 hingga 100 °C). PEMFC menghasilkan listrik dan beroperasi pada prinsip yang berlawanan dengan elektrolisis PEM, yang mengkonsumsi listrik. Ilustrasi PEMFC disajikan dalam Gambar 1.12 sebagai berikut.



**Gambar 1.12 Proton Exchange Fuel Cell**

(sumber : fuelcelltoday)

Spesifikasi dan karakteristik PEMFC:

- Cairan elektrolit yang digunakan berbasis air (asam membran polimer)
- Menggunakan katalis berbasis platinum pada kedua elektroda (anoda dan katoda).

- Bahan bakar yang digunakan hydrogen ( $H_2$ ).
- Beroperasi pada temperatur kerja yang relatif rendah (dibawah 100 °C)
- Varian yang bekerja pada temperatur yang relatif tinggi menggunakan asam berbasis elektrolit mineral (dapat beroperasi sampai 200 °C).
- Besar kecilnya output listrik yang dihasilkan dapat bervariasi tergantung konstruksi dan kapasitasnya.
- *Fuel cell* jenis PEMFC cocok untuk kendaraan, baik dengan sistem tunggal (*fuel cell* saja) atau dengan sistem hybrid (*fuel cell-gasoline*, atau model lain).

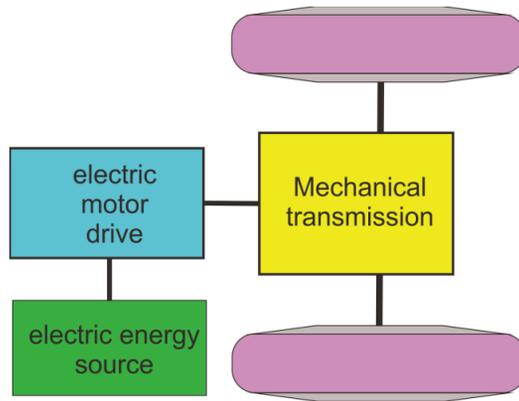
Selain PEMFC, model lain dari *fuel cell* antara lain *Direct Methanol Fuel Cells* (DMFC), *Phosphoric Acid Fuel Cells* (PAFC), *Alkaline Fuel Cells* (AFC), *Solid Oxide Fuel Cells* (SOFC), dan *Molten Carbonate Fuel Cells* (MCFC). Setiap jenis *fuel cell* memiliki karakteristik dan peruntukan yang berbeda seperti untuk kepentingan pembangkit listrik skala kecil dan bersifat portable ((DMFC), sistem pembangkit listrik stasioner skala besar (PAFC, SOFC, MCFC), dan pendukung perangkat luar angkasa (AFC) [14].

#### 1.4.3. Kendaraan Listrik (*Electric Vehicle*)

Kendaraan listrik/ *Electric vehicle* (EV) menggunakan motor listrik sebagai tenaga pemutar poros (traksi). Sumber energi untuk motor listrik dapat disuplai dari baterai, sel bahan bakar (*fuel cell*), ultracapacitors, atau dari sumber energi yang lain. Kendaraan listrik memiliki banyak keuntungan dibandingkan dengan kendaraan konvensional dengan mesin pembakaran dalam (ICE). Keuntungan ini seperti tidak adanya emisi, efisiensi tinggi, bebas dari ketergantungan minyak, rendah getaran, dan mudah dioperasikan. Namun demikian, seperti halnya *fuel cell*, keterbatasan jarak tempuh dan biaya kepemilikan yang relatif tinggi, membuat komersialisasi mobil listrik masih terkendala [15].

Prinsip-prinsip operasional dan mendasar dalam EV dan mesin pembakaran dalam memiliki beberapa kemiripan, yaitu

mengubah sebuah bentuk energi kimia menjadi energi mekanik. Namun demikian, beberapa perbedaan sangat nampak seperti penggunaan tangki bahan bakar pada kendaraan konvensional yang digantikan dengan peran baterai pada EV. Penggerak mula pada kendaraan konvensional menggunakan ICE sedangkan pada EV menggunakan motor listrik. Perbedaan lain adalah konsep dan persyaratan pada mekanisme sistem pemindah daya dan sistem transmisinya [16]. Gambar 1.13 berikut menyajikan sebuah diagram propulsi EV, dimana sumber energi memasok listrik ke motor penggerak, kemudian motor penggerak memutar roda kendaraan melalui penguat mekanikal.



**Gambar 1.13 Konsep dasar Kendaraan Listrik**

#### 1.4.4. Kendaraan Listrik Hybrid

Kendaraan konvensional dengan mesin pembakaran dalam (ICE) menghasilkan kinerja yang baik dan jangkauan operasi yang relatif panjang. Keuntungan ini diperoleh dari karakteristik bahan bakar minyak bumi yang memiliki kepadatan energi yang tinggi. Namun demikian, kendaraan konvensional memiliki kelemahan, diantaranya konsumsi bahan bakar yang tinggi, efisiensinya rendah, dan pencemaran lingkungan.

Kendaraan listrik (EV) bertenaga baterai memiliki beberapa keunggulan dibandingkan kendaraan konvensional, seperti efisiensi energi yang tinggi dan tidak menyebabkan polusi lingkungan. Namun,

kinerja utama, terutama jangkauan operasi per pengisian baterai, jauh lebih rendah daripada kendaraan ICE. Hal ini karena kandungan energi baterai yang lebih rendah dari dari kandungan energi bensin.

Kendaraan listrik hybrid (HEV) menggunakan dua sumber daya (primer dan sekunder). Konsep ini memiliki keuntungan dari kedua kendaraan ICE dan EV, sekaligus mengatasi kelemahan (*disadvantages*) dari keduanya. Sistem pemindah daya pada kendaraan hybrid memiliki desain khusus untuk dapat mengakomodasi sumber daya primer dan sekunder. Sebuah contoh tampilan LDV Hybrid disajikan pada Gambar 1.14 sebagai berikut.



**Gambar 1.14 Contoh kendaraan HEV**

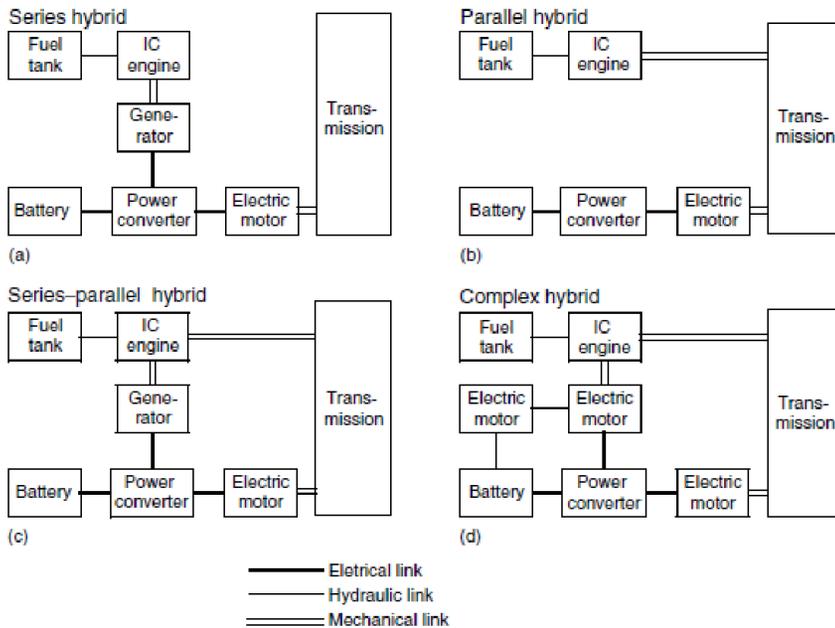
(<https://www.statisticbrain.com/hybrid-electric-vehicle-statistics/>)

Secara umum, kendaraan dapat memiliki lebih dari satu sumber energi dan mesin pengkonversi energi, seperti bensin (atau solar)-ICE, *hydrogen-fuel cell*-motor listrik, baterai-motor listrik, dan sebagainya. Kendaraan yang memiliki dua atau lebih sumber energi dan converter energi disebut kendaraan hybrid. Sebuah kendaraan hybrid dengan *powertrain* listrik disebut *Hybrid Electric Vehicle* (HEV).

Sebuah kendaraan hybrid biasanya terdiri dari tidak lebih dari dua *powertrain system*. Lebih dari dua konfigurasi *powertrain* akan menyulitkan sistem. Untuk tujuan mendapatkan kembali bagian dari

energi pengereman yang didisipasikan dalam bentuk panas pada kendaraan konvensional ICE, sistem hybrid biasanya memiliki sumber energi dua arah.

Beberapa konsep konfigurasi sumber daya pada kendaraan hybrid disajikan dalam Gambar 2.15 berikut.



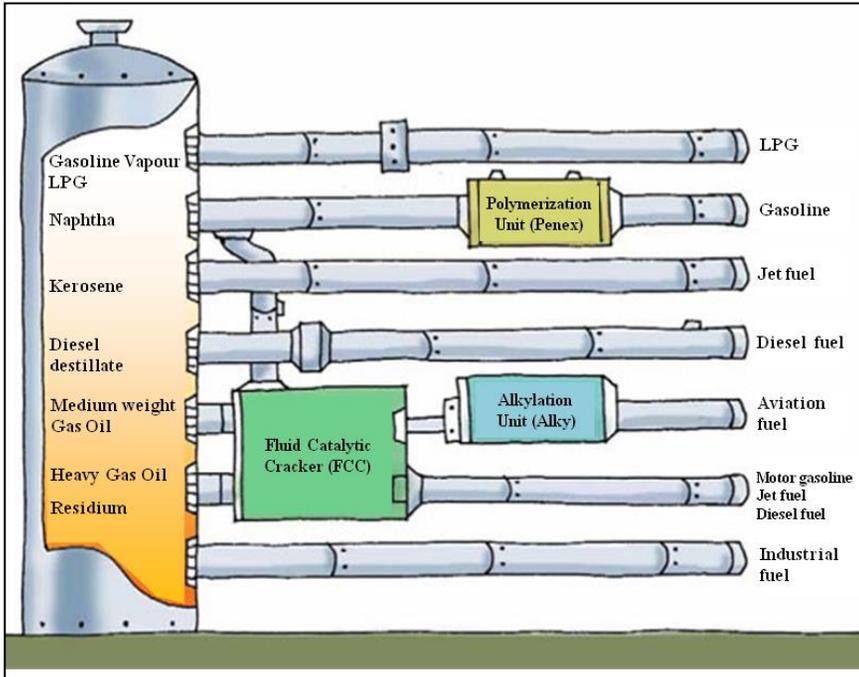
**Gambar 1.15 Konfigurasi *powertrain* pada HEV: (a) sistem seri, (b) Sistem paralel, (c) Kombinasi seri-paralel, dan (d) sistem kompleks**

### 1.5. Review Bahan Bakar Fosil

Bensin, diesel dan LPG adalah bahan bakar yang berasal dari minyak mentah (*crude oil*). Sebelum diolah melalui proses refinery, *crude oil* hampir tidak ada gunanya. Setelah proses ekstraksi di darat dan lepas pantai, gas dan air asin dipisahkan sebelum dikirim ke kilang. *Crude oil* disuling menjadi beberapa fraksi bahan bakar dan material lain.

Bensin dihasilkan dari proses reforming destilasi ringan (*light destility*), sedangkan minyak diesel berasal dari berbagai destilasi menengah (*Middle destility*). LPG, berdasarkan proses pembentukannya dibedakan dalam dua jenis, LPG lapangan (*field LPG*) dan LPG pabrik (*refinery LPG*). *Field LPG* dihasilkan dari campuran gas minyak bumi yang berbeda (propana dan butana) yang dilepaskan selama ekstraksi minyak mentah dan gas alam. Sedangkan *refinery LPG* merupakan produk sampingan dari proses penyulingan minyak mentah. Secara umum, proses destilasi atau *refinery crude oil* untuk menghasilkan varian bahan bakar disajikan dalam Gambar 1.16.

Penyulingan modern melibatkan sistem pemompaan minyak melalui pipa di tungku panas dan memisahkan molekul hidrokarbon ringan dari yang lebih berat di tower distilasi. Proses pemurnian dimulai saat minyak mentah disuling pada kolom distilasi. Selama proses destilasi ini, material yang paling ringan, seperti propana dan butana akan menguap dan naik ke puncak kolom atmosfer pertama. Material yang lebih berat berikutnya, termasuk bahan bakar bensin, jet dan diesel, mengembun di tengahnya. Material berat, yang disebut minyak gas, mengembun di bagian bawah kolom atmosfer. Terakhir, material terberat disebut residu, berada di bawah barrel. Proses distilasi ini diulang di banyak *refinery* lainnya untuk menghasilkan berbagai produk. Dalam beberapa kasus, kolom distilasi dioperasikan dibawah tekanan atmosfer (vakum) untuk menurunkan temperatur didih campuran hidrokarbon. *Vacum Destillation* (VDU) mengurangi kemungkinan dekomposisi thermal (*cracking*) akibat *over heating* dari campuran [17].



**Gambar 1.16 Proses refinery crude oil**  
(sumber : Chevron)

### 1.5.1. Bensin (*Gasoline*)

Bensin memegang kontribusi terbesar di antara konsumsi bahan bakar sektor transportasi yang lain dan digunakan selama lebih dari satu abad. Proses produksi dan infrastruktur distribusi bensin hampir merata diseluruh dunia. Penggunaan skala besar memungkinkan harga yang rendah dan kompetitif, sehingga menjadi referensi dalam pengembangan peralatan khusus seperti kilang, mesin kendaraan, katalis knalpot dan berbagai infrastruktur layanan. Kepadatan energi (*energy density*) yang relatif tinggi membuat bensin sangat cocok untuk Mesin SI, walaupun sebenarnya memiliki angka oktan yang lebih rendah daripada bahan bakar lain seperti LPG dan CNG. Nilai oktan yang rendah tersebut membatasi rasio kompresi, dengan demikian efisiensi energi mesin SI dengan bahan bakar bensin

relatif lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar beroktan tinggi yang lain.

### 1.5.2. Diesel

Minyak diesel menempati peringkat kedua dalam penggunaan bahan bakar sektor transportasi jalan raya, terutama untuk kendaraan beban berat (*heavy-duty vehicles*, HDV). Mesin CI umumnya memiliki efisiensi yang lebih tinggi dari mesin SI. Tangki bahan bakar diesel dapat sedikit lebih kecil daripada tangki bensin karena kandungan energi per liter yang lebih tinggi. Minyak diesel relatif lebih murah dan aman, dengan kepadatan energi yang lebih tinggi. Namun demikian, *cetane number*-nya berada di bawah bahan bakar lainnya yang cocok untuk mesin CI. Konsumsi bahan bakar minyak diesel merupakan yang terendah dari semua bahan bakar dan menghasilkan emisi CO dan HC relatif rendah, namun menghasilkan NO<sub>x</sub> dan *particular matter* (PM) yang relatif tinggi. Namun demikian, kerugian emisi ini memiliki potensi untuk diperbaiki. Pengurangan kandungan sulfur dapat mengurangi emisi SO<sub>2</sub> dan PM.

### 1.5.3. *Liquified Petroleum Gas* (LPG)

LPG merupakan bahan bakar alternatif yang paling umum untuk mesin SI, namun agregat rata-rata konsumsi energi sektor transportasinya secara umum masih rendah. Hanya di beberapa Negara seperti Belanda, LPG menyumbang sekitar 12% dari total energi yang digunakan sebagai bahan bakar mobil penumpang. Harga LPG umumnya masih rendah dibandingkan dengan bahan bakar konvensional yang tersedia saat ini. Angka oktan tinggi (khususnya propana) memungkinkan diterapkan pada mesin-mesin SI dengan perbandingan kompresi yang lebih tinggi, sehingga efisiensi thermalnya lebih tinggi.

Konsumsi bahan bakar LPG lebih rendah dibawah bensin tetapi umumnya masih lebih tinggi dari diesel. Emisi NO<sub>x</sub> yang dihasilkan mesin LPG mendekati mesin bensin, namun untuk emisi yang lain (CO, HC) lebih rendah dari penggunaan bensin [18]. Ini merupakan salah satu keuntungan dari penggunaan LPG pada

kendaraan LDV (*Light Duty Vehicle*). Pada tekanan dan temperatur kamar (*ambient*), LPG disimpan dalam kondisi cair pada tekanan 6-12 bar. Pada kendaraan, tangki LPG lebih besar dari tangki bensin untuk kandungan energi yang sama. Ukurannya hampir dua kali dan beratnya lebih dari 1,5 kali dari tangki bensin untuk menampung jumlah energi yang setara dengan bensin.

Katup pelepas (*relief valve*) dipasang pada tangki sebagai pengaman jika tekanan LPG naik di atas 20 bar. Tangki LPG dalam kendaraan tidak boleh diisi lebih dari 80% sampai 85% dari kapasitasnya. Ruang sisa sebesar 15% sampai 20% ini digunakan untuk ruang kompensasi saat terjadi ekspansi bahan bakar akibat kenaikan temperatur dan tekanan.

LPG umumnya dianggap sebagai bahan bakar yang aman. LPG lebih berat daripada udara. Saat terjadi kebocoran, uap LPG cenderung untuk mendekati permukaan tanah. Untuk alasan ini, di beberapa Negara melarang mobil LPG parkir di fasilitas parkir bawah tanah (*lower basement*). LPG lebih mudah menyatu dengan udara dan lebih mudah terbakar daripada bensin dan solar. LPG lebih aman karena tangkinya dirancang sebagai bejana tekan (*pressure vessel*), sehingga saat kecelakaan hampir tidak akan terjadi tumpahan bahan bakar.

## **1.6. Review Bahan Bakar Non-Fosil**

Pengembangan bahan bakar non-fosil menjadi konsentrasi global untuk bersiap menghadapi menipisnya cadangan minyak bumi. Namun demikian, dengan harga produksi dan pembangunan infrastruktur yang rata-rata lebih tinggi dari bensin dan LPG, pengembangan bahan bakar alternatif non-fossil masih memegang peranan yang sangat kecil secara agregat. Ethanol, bahan bakar nabati yang menjanjikan, namun praktek produksi dalam skala besar akan bertentangan dengan ketersediaan lahan untuk memproduksi bahan pangan, terutama pada negara-negara yang memiliki keterbatasan lahan untuk memproduksi bahan baku ethanol. Saat ini, baru gas alam dalam bentuk *Compressed Natural Gas* (CNG) yang dapat berkembang dengan baik untuk sektor otomotif di beberapa Negara

[19]. Berikut akan dijelaskan secara sekilas tentang jenis-jenis bahan bakar alternatif non-fosil yang memungkinkan untuk diaplikasikan pada saat ini dan pada masa mendatang.

### 1.6.1. Natural gas

Gas alam terutama methane ( $\text{CH}_4$ ) merupakan satu-satunya bahan bakar yang hampir tidak memerlukan pengolahan signifikan untuk penggunaan otomotif. Methane terjadi secara alami di kerak bumi. Gas alam hanya membutuhkan pengeringan dan pemurnian berupa penghapusan hidrogen sulfida ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Gas alam diubah menjadi gas sintesis ("syngas") dan menjadi bahan baku untuk memproduksi methanol dan DiMetil Eter (DME) serta untuk *recovery* hidrogen. Italia, Argentina, Selandia Baru, Rusia dan Amerika Serikat memiliki armada kendaraan gas alam (*Natural Gas vehicle*, NGV) yang signifikan, tetapi belum merupakan bahan bakar kendaraan bermotor yang dominan.

Negara-negara yang sudah memiliki jalur distribusi gas alam dapat mempromosikan sebagai bahan bakar kendaraan yang relatif mudah. Namun demikian, untuk negara-negara yang belum memiliki infrastruktur yang handal, butuh investasi yang sangat mahal untuk membangun. Kendala ini menjadikan gas alam kurang menjadi pilihan untuk menyelesaikan permasalahan jangka pendek.

Seperti LPG, CNG memiliki angka oktan tinggi (120), yang memungkinkan diterapkan pada mesin dengan rasio kompresi lebih tinggi dan dapat meningkatkan efisiensi termal sekitar 10% dari penggunaan bensin. Efisiensi NGV umumnya lebih rendah dari penggunaan bensin (15% sampai 20%).

Dalam kondisi ambient, gas alam memiliki kandungan energi yang sangat rendah, tetapi dalam bentuk cair sama baiknya dengan LPG. Tekanan penyimpanan gas alam (CNG) mencapai 200-240 bar, sehingga membutuhkan peralatan dan infrastruktur yang jauh lebih mahal dari LPG.

### 1.6.2. Methanol

Methanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) adalah alkohol yang biasanya terbuat dari gas alam melalui beberapa proses lanjutan. Methanol juga dapat diproduksi dari biomassa (bahan selulosa, sebagian besar kayu) melalui proses pirolisis, tetapi secara komersial belum *feasible*. Methanol lebih mahal dari bensin dan memiliki kepadatan energi yang lebih rendah, tetapi memiliki angka oktan yang tinggi (106 RON). Dengan kepadatan energi yang lebih rendah, methanol yang disimpan seperti bensin membutuhkan tangki bahan bakar 75% lebih besar dan sekitar dua kali lebih berat dari tangki bensin untuk menghasilkan jarak tempuh yang sama. Sistem bahan bakar methanol memerlukan material yang tahan korosi dan tahan efek kimia. Mesin dengan bahan bakar methanol umumnya bermasalah saat start dalam temperatur rendah.

Di seluruh dunia, methanol hadir sebagai bahan bakar kendaraan yang bersih dan berkelanjutan di masa depan. Methanol menghasilkan lebih sedikit emisi penyebab asap seperti  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  dan partikulat mater, sehingga penggunaan methanol dapat memperbaiki kualitas udara dan masalah kesehatan manusia, terutama di perkotaan. Methanol dapat dicampur dengan bensin dalam jumlah rendah dan digunakan pada kendaraan yang ada, atau dapat digunakan dalam campuran dengan proporsi tinggi seperti M85-M100 dalam bahan bakar fleksibel atau kendaraan berbahan bakar methanol khusus [20].

### 1.6.3. Ethanol

Ethanol biasanya berasal dari biomassa/tanaman yang mengandung gula, pati atau bahan selulosa, dan bukan dari alam gas. Pembuatan ethanol melalui proses fermentasi menggunakan ragi. Ethanol dapat digunakan untuk mesin SI dan CI dengan beberapa modifikasi. Harga ethanol mencapai 5 kali lipat dari bensin sehingga untuk saat ini belum *feasible* untuk dijadikan bahan bakar alternatif non-campuran. Pemanfaatan berbagai tanaman pangan sebagai bahan baku ethanol akan menimbulkan masalah social ekonomi pada negara-negara yang belum siap.

Sebagai bahan bakar alternatif, ethanol memiliki keuntungan yaitu dapat diperbaharui dan memiliki nilai oktan lebih tinggi dari

bensin (107 RON). Hal ini dimungkinkan untuk menerapkan ethanol pada mesin dengan rasio kompresi tinggi (sampai 19,5) untuk meningkatkan efisiensi termal dan emisi gas buang. Sementara itu, untuk aplikasi ethanol dengan konsentrasi tinggi, modifikasi yang dibutuhkan tidak hanya di rasio kompresi tapi juga pada beberapa komponen mesin agar kendaraan bisa berjalan lancar dan mencegah kerusakan. Dalam sebuah penelitian, dengan sistem kontrol mesin yang kompleks dan sistem exhaust resirkulasi yang dioptimalkan, mobil berjalan pada E50 mampu menghasilkan efisiensi bahan bakar yang setara dengan mobil bensin [21]. Tabel 1.1 menyajikan komponen mesin kendaraan yang harus disesuaikan dalam penerapan ethanol dari konsentrasi rendah sampai tinggi [22].

**Tabel 1.1 Penyesuaian komponen mesin SI terhadap penggunaan ethanol**

Kadar ethanol	Carbu-retor	Iniec-tor	Fuel pump	Pressure regulator	Fuel filter	Igni-tion custom	Evapo-ration system	Fuel tank	Cata-litic Conv	Engine oil	Intake system	Exhaust System	Cold start custom
< 5%	Semua kendaraan												
E5-E10	Semua kendaraan kurang dari 20 tahun												
E10-E25	Kendaraan yang dirancang khusus untuk aplikasi ethanol												
E25-E85	Kendaraan yang dirancang khusus untuk aplikasi ethanol												
E85-E100	Kendaraan yang dirancang khusus untuk aplikasi ethanol												
	Tidak ada modifikasi yang diperlukan						Modifikasi mungkin diperlukan						

Namun demikian, ethanol mengandung unsur yang larut dan tidak larut [23]. Unsur yang mudah larut adalah ion klorida yang memiliki sifat korosif. Ion ini akan menyerang lapisan anti karat pada logam sehingga akan menimbulkan korosi dan meningkatkan konduktivitas bahan bakar. Elemen larut, seperti aluminium

hidroksida, akan menyumbat sistem bahan bakar. Ethanol bersifat higroskopik yang menyerap uap air secara langsung dari atmosfer. Kandungan air dalam ethanol akan menurunkan energi pembakaran dan menyebabkan *knocking* pada mesin. Untuk menghindari risiko tersebut, ethanol harus disegel selama penyimpanan. Namun, akan menjadi sulit karena di dalam tangki bahan bakar harus disediakan katup ventilasi untuk mencegah kevakuman.

Korosi akan merusak logam, termasuk tangki bahan bakar, komponen sistem bahan bakar yang terbuat dari plastik dan karet, injektor, dan deposit. Pada tahun 2001, beberapa model kendaraan yang menggunakan bahan bakar alkohol di Jepang dilaporkan mengalami kebocoran bahan bakar dan terbakar akibat korosi pada komponen sistem bahan bakar yang terbuat dari aluminium. Kemudian, investigasi dilakukan oleh tim. Untuk membuktikannya, uji perendaman dilakukan pada logam dan bahan lain yang digunakan pada sistem bahan bakar untuk menentukan ketahanan terhadap korosi pada ethanol yang terkandung dalam bahan bakar. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa konsentrasi ethanol yang tinggi menyebabkan korosi pada komponen sistem bahan bakar yang terbuat dari aluminium [24].

#### **1.6.4. Biodiesel**

Biodiesel dapat diproduksi dari berbagai tanaman yang mengandung minyak, kedelai, bunga matahari, dan kelapa. Dalam bahasa yang umum dikenal dengan "RME" (*Rapeseed Methyl Ester*). Esterifikasi merupakan cara murah untuk mengubah molekul minyak nabati menjadi molekul yang mirip dengan hidrokarbon minyak diesel, meskipun biaya biodiesel tersebut masih lebih tinggi dari minyak diesel. Dengan sifat yang sangat mirip dengan solar, biodiesel dapat langsung dipakai pada kendaraan diesel yang ada dan bercampur dengan diesel fosil dalam rasio berapapun. Biodiesel memiliki kandungan energi yang lebih rendah dari minyak diesel (sekitar 8%), tetapi memiliki kepadatan yang lebih tinggi dan menghasilkan kualitas pengapian yang lebih baik dengan *cetane number* yang lebih tinggi.

Biodiesel adalah bahan bakar *biodegradable* terbarukan yang juga bisa diproduksi dari minyak nabati, lemak hewani, atau lemak restoran daur ulang. Biodiesel merupakan pengganti pembakaran bahan bakar diesel yang lebih bersih. Biodiesel memenuhi sifat kunci sebagai bahan bakar mesin CI secara keseluruhan dari Standar Bahan Bakar Terbarukan. Kinerja biodiesel dalam cuaca dingin tergantung pada besarnya campuran biodiesel dan bahan baku untuk membuatnya. Secara umum, semakin kecil persentase biodiesel dalam campuran, semakin baik kinerjanya pada suhu dingin [25].

#### **1.6.5. Hidrogen**

Hidrogen adalah satu dari jenis bahan bakar gas dan bisa dihasilkan dari hampir semua bahan baku yang mengandung hidrogen. Hidrogen dapat diproduksi dengan cara elektrolisis air atau dengan cara gasifikasi dari bahan baku yang mengandung hidrogen. Gas alam merupakan bahan baku yang paling penting untuk produksi hidrogen melalui beberapa proses. Batu bara dan biomassa juga dapat dikonversi menjadi hidrogen melalui gasifikasi. Hidrogen memiliki kandungan energi per satuan massa yang tinggi, namun per satuan volume rendah, sehingga pada kendaraan perlu tangki yang lebih besar. Dengan angka oktan yang tinggi, mesin hidrogen menghasilkan efisiensi termal lebih baik.

Hidrogen dimanfaatkan dalam mesin SI seperti halnya bahan bakar gas lainnya. Dengan sistem *fuel cell*, energi kimia hidrogen diubah menjadi energi listrik. Kedua sistem tersebut dapat diterapkan sebagai bahan bakar rendah emisi, tetapi biayanya lebih mahal daripada bahan bakar alternatif yang lain.

#### **1.6.6. Dimetil Eter (DME)**

DME muncul baru-baru ini sebagai pilihan bahan bakar kendaraan bermotor. Teknik produksinya sangat mirip dengan produksi methanol, menggunakan gas alam atau biomassa sebagai bahan baku. Gas alam diubah menjadi syngas seperti methanol, kemudian membentuk DME dalam proses yang disebut sintesis oksigenat.

Penanganan dan penggunaan DME menyerupai LPG. DME berwujud gas pada kondisi ambient dan dapat disimpan dalam bentuk cairan pada tekanan 6 bar, dengan pengamanan yang hampir sama dengan LPG. Kepadatan energi DME hanya sekitar setengah dari kepadatan energi minyak diesel. Untuk itu, perlu tangki penyimpanan yang besar untuk jarak tempuh yang setara. DME memiliki *cetane number* yang lebih tinggi dari solar sehingga sangat cocok untuk mesin CI dan menghasilkan efisiensi mesin yang bersaing dengan bahan bakar diesel.

## **1.7. Properti Penting Bahan Bakar**

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

Kandungan energi adalah nilai kalor (*lower calorific value*), atau kapasitas panas pembakaran ketika suatu bahan bakar dibakar. Kandungan energi suatu bahan bakar digunakan sebagai dasar untuk menghitung efisiensi thermal mesin. Kandungan energi dapat dinyatakan dalam Mega Joule per kilogram (MJ/kg) atau per liter (MJ/l).

### **1.7.2. Angka Oktan (*Octane Number*)**

Angka oktan merupakan sifat kunci dari bahan bakar yang digunakan dalam mesin *spark-ignition*. Angka oktan menunjukkan ketahanan bahan bakar terhadap *knocking*. *Knocking* adalah terbentuknya pembakaran yang tidak terkendali pada campuran udara-bahan bakar sebelum ada pengapian dari busi, dengan menghasilkan gelombang tekanan yang dapat menyebabkan kerusakan mesin.

Bahan bakar dengan angka oktan terlalu rendah, menyebabkan gejala *knocking* pada beban tinggi. Rasio kompresi maksimum tergantung pada ketahanan bahan bakar terhadap gejala *knocking*. Semakin tinggi angka oktan, ketahanan knocking-nya lebih baik dan efisiensi yang dihasilkan mesin lebih baik. Angka oktan sebuah bahan bakar menyatakan salah satu dari RON (*Research Octane Number*) atau MON (*Motor Octane Number*).

### 1.7.3. Angka Cetane (*Cetane Number*)

Dalam mesin CI, sifat karakteristik bahan bakar yang penting adalah kesiapan bahan bakar untuk menyala secara spontan. Angka cetane menunjukkan seberapa cepat bahan bakar mesin diesel yang diinjeksikan ke ruang bakar bisa terbakar secara spontan (setelah bercampur dengan udara).

Semakin cepat suatu bahan bakar mesin diesel terbakar setelah diinjeksikan ke dalam ruang bakar, semakin baik (tinggi) angka cetane bahan bakar tersebut. Cara pengukuran angka cetane yang umum digunakan adalah standard dari ASTM D613 atau ISO 5165. Pengukurannya menggunakan hexadecane ( $C_{16}H_{34}$ , yang memiliki nama lain cetane) sebagai patokan tertinggi (angka cetane, CN=100).

Angka cetane pada bahan bakar mesin diesel memiliki pengertian yang berkebalikan dengan angka oktan pada bahan bakar mesin bensin, karena angka oktan menunjukkan kemampuan campuran bensin-udara menunggu rambatan api dari busi (*spark ignition*). Angka cetane yang lebih tinggi memberikan sifat awal yang lebih baik dan periode penundaan pengapian (*ignition delay*) yang lebih pendek. Interval antara injeksi dan pengapian yang pendek menghasilkan pembakaran yang lebih halus dan noise yang rendah.

### 1.7.4. Bahan Bakar, Penggunaan, dan Prosesnya

Seperti dijelaskan sebelumnya, setiap jenis bahan bakar memiliki karakteristik yang sesuai untuk penggunaan mesin tertentu. Ada jenis bahan bakar yang hanya bisa diterapkan untuk mesin SI atau CI saja, namu ada juga yang bisa diapikasikan untuk keduanya. Tabel 1.2 berikut menyajikan jenis bahan bakar dan penggunaannya, sementara Tabel 1.3 menyajikan jenis bahan bakar, *resource*, dan properti kuncinya.

**Tabel 1.2 Jenis bahan bakar dan penggunaannya [19]**

Jenis bahan bakar	Tipe mesin	Sistem bahan bakar	Rasio kompresi
Bensin (Gasoline )	SI	mono	Maks 11
Solar (Diesel)	CI	mono	18 (DI), 22 (IDI)

LPG	SI	dual, mono	11-13
Natural gas	SI	dual. mono	11-13
Methanol	SI, CI, FC	FFV, mono	9 (FFV), Maks 19 (mono)
Ethanol	SI, CI	FFV, mono	9 (FFV), maks 18 (mono)
Biodiesel	CI	Mono, (FFV)	18 (DI), 22 (IDI)
Hydrogen	SI, FC	dual, mono	14-17
DME	CI	mono	18 (DI), 22 (IDI)

Keterangan :

CI = *Compression Ignition*; SI = *Spark Ignition*; FC = *Fuel Cell*; mono = kendaraan berjalan dengan hanya satu jenis bahan bakar; dual = kendaraan dengan dua sistem bahan bakar, dapat beroperasi secara bergantian; and FFV = *Flexible-fuelled vehicle*, dapat beroperasi dengan dua jenis bahan bakar atau dengan mencampurnya.

**Tabel 1.3 Bahan bakar, sumber, dan propertinya [19]**

Bahan bakar/ <i>Feedstock</i>	Metode konversi	Kandungan energi (MJ/l)	Angka oktan (RON)	Angka cetane
<b>Bensin (Gasoline)</b>	Dibuat dari minyak mentah	31.2	90-95 <sup>3</sup> 97-99 <sup>4</sup>	-
<b>Solar (Diesel)</b>	Dibuat dari minyak mentah	35.7	n.a.	48-50
<b>LPG</b>		24.2 <sup>1</sup> 23.4 <sup>2</sup>	107.5 <sup>1</sup> 112 <sup>2</sup>	-
Field	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Purifikasi gas alam, fraksinasi ke LPG.</li> </ul>			
Refinery	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produk sampingan crude oil, Fraksinasi ke LPG</li> </ul>			
<b>Natural Gas (gas alam)</b>	Tidak melalui konversi, hanya	23.3 <sup>5</sup>	120	-

	pengeringan dan pemurnian			
<b>Methanol</b> Natural Gas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reforming gas alam, konversi syngas ke methanol.</li> <li>• Gasifikasi bahan baku, konversi syngas ke methanol.</li> </ul>	15.6	110	5
Cellulose				
<b>Ethanol</b>	Hidrolisis biomassa, firolisis	21.2	109	8
<b>Biodiesel</b>	Ekstraksi minyak nabati, esterifikasi	32.8	-	51-58
<b>Hydrogen</b>	Elektrolisis	8.9	106	-
<b>DME</b>	Oxigenasi syngas dari gas alam	18.2-19.3	-	55-60

Keterangan :

<sup>1</sup>LPG 70/30 ( 70% propana dan 30% butana)

<sup>2</sup>Propana

<sup>3</sup>Regular

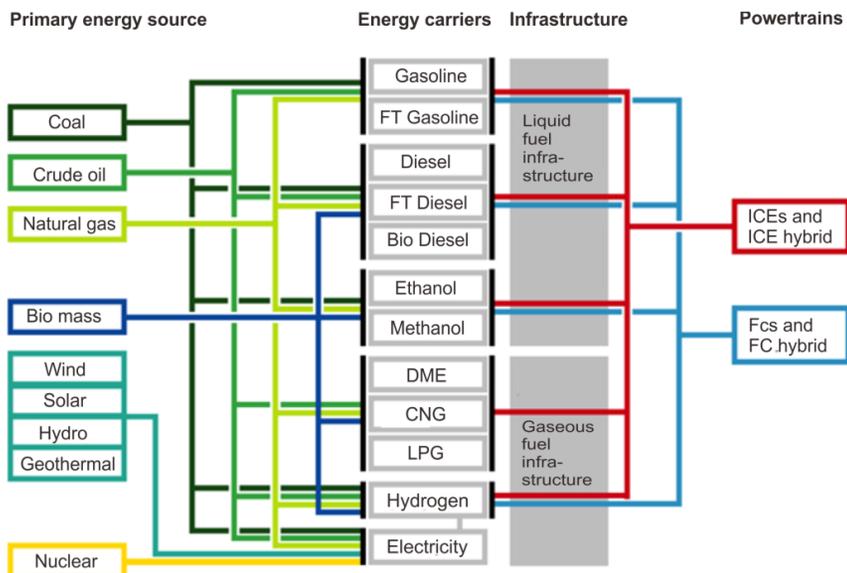
<sup>4</sup>Super

<sup>5</sup>LNG

## 1.8. Peluang Pengembangan

### 1.8.1. Bahan Bakar yang Mungkin Dikembangkan

Kedepan, akan ada beberapa perubahan *pathway* bahan bakar dari material dasar sampai bisa digunakan untuk kendaraan. Salah satu jalur sumber dan pemanfaatan bahan bakar disajikan dalam Gambar 1.17 berikut.

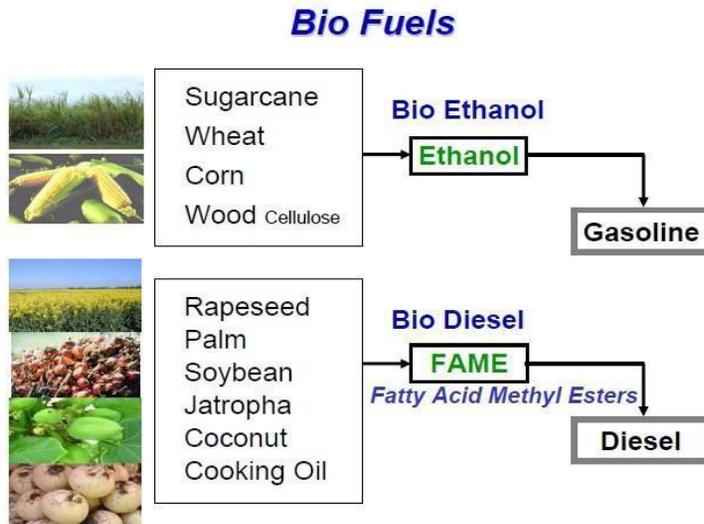


**Gambar 1.17 Jalur bahan bakar untuk kendaraan**

Dalam beberapa dekade terakhir, ketersediaan bahan bakar fosil telah menjadi perhatian banyak pemangku kepentingan [26], [27]. Produk minyak mentah dari ladang produksi saat ini mungkin telah melewati puncak produksinya. Masalah *peak oil* akan menyebabkan minyak menjadi langka, biaya produksi dan permintaan minyak akan meningkat, sementara pasokan terbatas [28]–[30]. Selain produksi minyak, isu krisis lain adalah perubahan iklim global yang disebabkan oleh pembakaran bahan bakar fosil. Jika tidak dikendalikan, biaya dan tantangan pengurangan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) akan meningkat seiring berjalannya waktu.

Untuk mengatasi perubahan iklim dan emisi gas rumah kaca tersebut, salah satu cara yang efektif adalah segera bertindak untuk mengganti bahan bakar fosil dengan bahan bakar terbarukan, seperti ethanol untuk mesin *Spark Ignition* (SI) dan mesin *Compression Ignition* (CI) [31]. Penerapan ethanol pada mesin SI relatif lebih mudah dan bisa diterima oleh semua jenis *Ligh Duty Vehicles* (LDVs). Namun, aplikasi pada mesin CI harus dengan beberapa modifikasi mesin dan penggunaan *enhancer cetane* [32]. Gambar 1.18 berikut menyajikan

beberapa contoh material untuk Bio Ethanol dan Bio Diesel sebagai bagian untuk upaya pengurangan emisi Gas Rumah Kaca.



**Gambar 1.18 Biofuel untuk pengurangan emisi Gas Rumah Kaca**

### 1.8.2. Fisibilitas Jangka Menengah

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, penggunaan ethanol dimulai dari kesadaran akan menipisnya cadangan minyak bumi. Di sisi lain, penggunaan ethanol adalah untuk meningkatkan kualitas udara, terutama di daerah perkotaan [33]. Dalam dekade terakhir, produksi ethanol untuk sektor kendaraan terus meningkat [34], yang berarti dampak positif pada ekonomi lokal dan regional. Namun, produksi skala besar akan terhambat oleh ketersediaan lahan untuk memproduksi pangan. Untuk itu, dalam jangka pendek dan jangka menengah, setidaknya dalam 25 tahun mendatang, LPG masih menjadi bahan bakar alternatif pengganti bensin. Ini karena lebih bersih, meskipun sebagian besar LPG merupakan produk *refinery*.

# BAB 2.

## PROPERTI LPG



## 2.1. Sekilas Tentang LPG

LPG telah menjadi salah satu bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar minyak yang paling penting di sektor otomotif dunia. Di Eropa dan beberapa negara, LPG yang secara khusus digunakan untuk bahan bakar kendaraan disebut dengan Autogas. Sementara, di beberapa negara lain dikenal dengan LP Gas dan GPL. Di Indonesia, LPG untuk sektor transportasi dikenal dengan *Liquified Gas Vehicle* (LGV) atau vigas. Contoh stasiun pengisian GPL disajikan dalam Gambar 2.1 sebagai berikut.



**Gambar 2.1 Stasiun Pengisian GPL/Autogas**

LPG adalah nama generik untuk campuran hidrokarbon yang berubah dari fasa gas ke cair ketika dikompresi pada tekanan sedang. Komposisi kimia LPG dapat bervariasi, tetapi biasanya terdiri dari sebagian besar propana ( $C_3H_8$ ) dan butana ( $C_4H_{10}$ ) (butana normal dan iso-butana) serta mengandung hidrokarbon ringan lain dalam jumlah kecil, misalnya etana ( $C_2H_6$ ) dan pentana ( $C_5H_{12}$ ).

Propana dan butana adalah dua gas yang sama-sama berasal dari minyak bumi. Propana dan butana terbakar pada temperatur yang sama. Jika keduanya dibakar dengan proses yang sempurna, akan menghasilkan produk pembakaran berupa uap air ( $H_2O$ ) dan karbon dioksida ( $CO_2$ ). Namun demikian, propana dan butana memiliki struktur kimia yang berbeda. Propana memiliki struktur

kimia  $C_3H_8$ , sedangkan butana  $C_4H_{10}$ . Tabel 2.1 berikut menyajikan beberapa parameter pembeda antara propada dan butana.

**Tabel 2.1 Perbandingan properti fisik propana dan butana**

Gas	Propana	Butana
Rumus kimia	$C_3H_8$	$C_4H_{10}$
Berat molekul	44	58
Berat spesifik	0,510 Kg/l	0,580 Kg/l
Titik didih	-43°C	-0.5°C
LHV	11.070 Kcal/Kg	10.920 Kcal/Kg
Titik nyala (°C)	510 di udara	490 di udara
Limit pengapian (% volume)	2.1 - 9.5	1.5 - 8.5
Kecepatan pembakaran (cm/s)	32 di udara	32 di udara

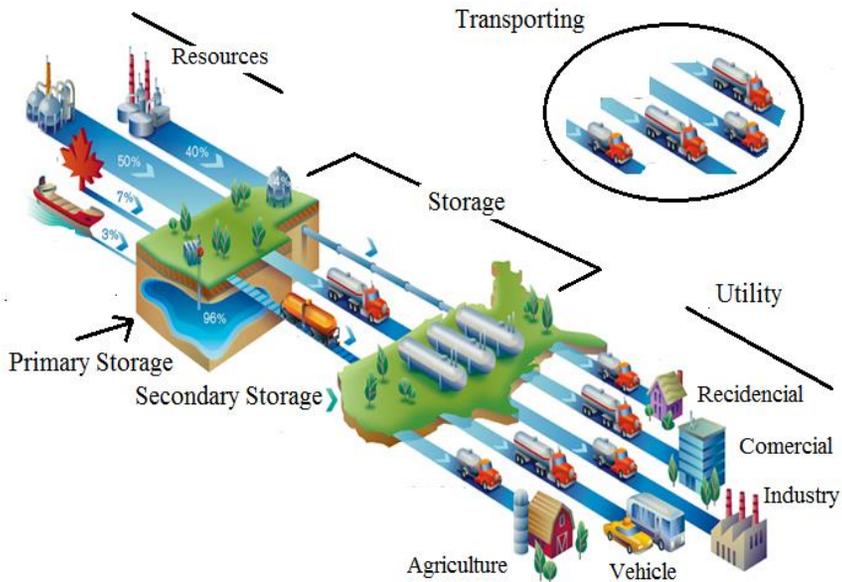
Sumber : *Lo-gas*

Meskipun mirip, keduanya (propana dan butana) memiliki keuntungan dan kerugian yang menjadi ciri spesifik terkait dengan sifat fisiknya. Butana menghasilkan pembakaran yang lebih bersih dan mengandung lebih banyak energi per satuan volume daripada propana. Namun demikian, propana menjadi pilihan yang lebih baik untuk digunakan pada temperatur dingin. Hal ini karena propana memiliki titik didih yang sangat rendah. Propana mampu menguap dengan alami pada temperature  $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sedangkan butana hanya pada temperature  $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

LPG merupakan gas yang tidak berbau, sehingga kebocoran kecil dalam sebuah sistem perpipaan, tabung, atau sambungan-sambungan sulit terdeteksi. Untuk hal tersebut, zat kimia jenis ethanethiol atau zat lain, dicampurkan pada LPG untuk memberikan efek bau. Tujuannya untuk membantu dalam menemukan sumber kebocoran dengan hanya menelusuri sumber bau tersebut.

## 2.2. Distribusi

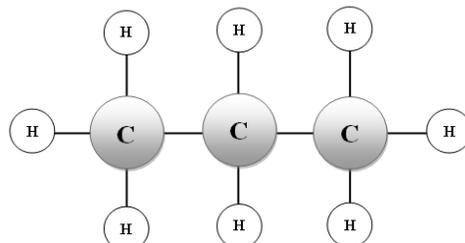
Distribusi LPG dari *crude oil* sampai ke konsumen dapat membentuk rantai panjang maupun pendek, tergantung pada lokasi sumber, konsumen, transportasi, kebijakan penyimpanan, dan infrastruktur yang tersedia. Di Amerika Serikat, rantai suplai dan distribusi LPG disajikan dalam Gambar 2.2 sebagai berikut [35].



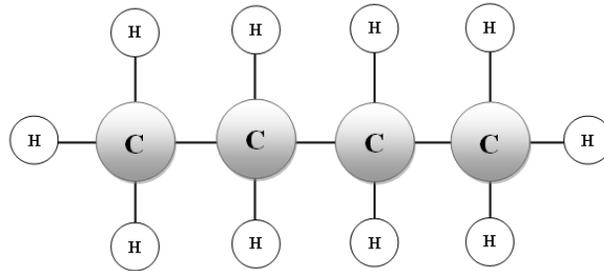
**Gambar 2.2 Rantai suplai dan distribusi LPG di US**

### 2.3. Struktur Kimia

Seperti halnya bensin dan solar, LPG (butana dan propana) masuk dalam rumpun hidrokarbon (HC). HC adalah zat dengan struktur molekul yang semata-mata terdiri dari hidrogen dan karbon. Butana dan propana memiliki struktur kimia yang berbeda. Butana memiliki kandungan carbon (*carbon content*) yang lebih besar dari propana. Butana terdiri dari sepuluh atom hidrogen dan empat atom karbon (Gambar 2.4), sedangkan propana hanya terdiri dari delapan atom hidrogen dan tiga atom karbon (Gambar 2.3).



**Gambar 2.3 Struktur Kimia Propana (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)**



**Gambar 2.4 Struktur Kimia Butana (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>)**

#### 2.4. Komposisi LPG Komersial

Konsentrasi propana pada LPG komersial umumnya berkisar dari 30% sampai 99%. Komposisi campuran ini tergantung pada keadaan lingkungan, termasuk kondisi temperaturnya. Faktor lain dalam penentuan komposisi adalah kebijakan energi suatu negara. Perbedaan komposisi ini juga menyangkut masalah ketersediaan dan proses produksi, mengingat LPG merupakan bahan bakar komersial yang bersifat domestik (*domestic fuel*) [36], [37].

#### 2.5. Kandungan Energi

Suatu parameter untuk memilih jenis bahan bakar adalah kandungan energi (*energy content*). Kandungan energi suatu bahan bakar diukur dengan membandingkan kapasitas panas pembakarannya per satuan volume atau per satuan massa. Semakin tinggi kandungan energinya, maka bahan bakar tersebut lebih menjanjikan untuk diaplikasikan dan dikembangkan.

LPG memiliki kandungan energi sebesar 46,23 MJ/kg dan 26 MJ/l, sedangkan bensin sebesar 44.4 MJ/kg dan 34,8 MJ/l. Dibandingkan dengan bensin, LPG memiliki kandungan energi per satuan massa (MJ/kg) relatif tinggi, tetapi kandungan energi per satuan volumenya (MJ/l) lebih rendah. Hal ini yang membuat volume LPG dalam fasa cair lebih besar dari bensin sekitar 15% sampai dengan 20%. Untuk membandingkan dalam satuan yang bisa mewakili keduanya (bensin dan LPG), biasanya LPG juga dinyatakan dalam satuan liter setara premium (LSP) [38].

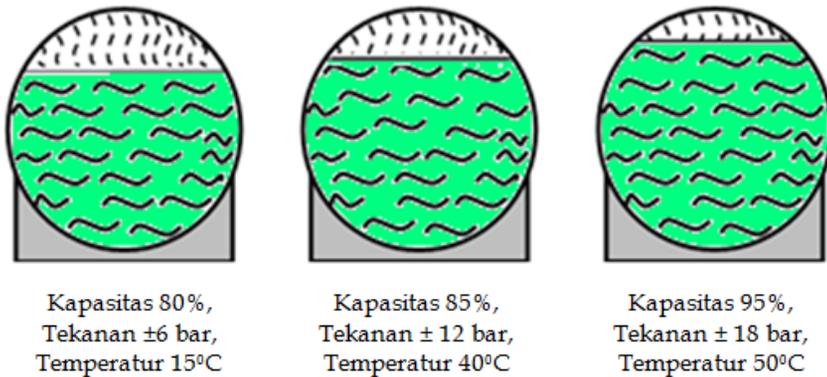
LPG bahkan memiliki kandungan energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan produk bahan bakar minyak lain. Karakteristik kunci (*key properties*) ini membuat LPG merupakan bahan bakar yang sangat populer dan digunakan secara komersial untuk sektor pariwisata, perhotelan, proses pertanian, rumah tangga, industri, bahan baku dalam industri petrokimia, dan meningkat tajam sebagai bahan bakar sektor otomotif [39].

## 2.6. Fasa

Dalam kondisi atmosfer, LPG akan berbentuk gas. Volume LPG dalam bentuk cair jauh lebih kecil dibandingkan dalam bentuk gas untuk ukuran massa yang sama. Dengan alasan ini, LPG dipasarkan dalam bentuk cair (*liquefied*) dalam tabung-tabung logam bertekanan. Hal ini bertujuan untuk efisiensi dalam hal penyimpanan dan mudah untuk ditransportasikan. Kedepan, dengan pertimbangan praktis memungkinkan dikemas dalam tabung komposit untuk mengurangi berat tabung.

Untuk memungkinkan terjadinya ekspansi panas (*thermal expansion*) dari cairan yang dikandungnya, tabung LPG tidak diisi secara penuh. Biasanya hanya diisi sekitar 80% sampai 85% dari kapasitas penuh sebuah tabung (*storage tank*). Volume sisa sebesar 15% sampai 20% ini berfungsi sebagai ruang kompensasi penambahan volume akibat dari kenaikan temperatur dan tekanan.

Rasio antara volume LPG dalam fasa uap (*vapour*) dengan LPG dalam keadaan cair bervariasi tergantung komposisi, tekanan dan temperatur, tetapi biasanya sekitar 250 ~ 270 : 1. Sebagai penjelasan, gambar berikut menyajikan bentuk *thermal expansion* pada tabung LPG saat terjadi peningkatan temperatur dan tekanan [40].



**Gambar 2.5 Fungsi ruang sisa pada tabung**

### 2.7. Efek Terhadap Material

LPG komersial hampir tidak berpengaruh signifikan terhadap material yang terbuat dari logam. Hampir seluruh komponen utama perangkat LPG dapat dibuat dari bahan logam ferrous maupun non-ferrous. Namun demikian, khusus untuk komponen vaporizer biasanya dipilih dari material aluminium paduan dengan alasan kemudahan dalam proses pembentukan, ringan dan alasan teknis lain.

Berbeda dengan pengaruhnya terhadap logam, LPG dapat mengubah sifat fisik untuk material berbahan dasar karet alam. Karet alam akan menjadi keras jika terjadi kontak langsung dengan LPG. Untuk alasan ini, karet alam atau bahan lain yang tidak tahan terhadap reaksi kimia LPG tidak boleh digunakan untuk komponen seperti selang LPG, gasket atau seal.

Bahan lain, terutama beberapa material dari plastik, juga bisa menjadi lembek atau bahkan rapuh jika terkena kontak dengan LPG. Komponen utama seperti selang LPG memang lebih disarankan untuk menggunakan material dari logam. Namun demikian, perkembangan teknologi komposit dan sintetis memberikan keleluasaan untuk memilih material non-logam.

LPG juga dapat melarutkan perekat dan sealer tradisional yang digunakan untuk merapatkan sambungan pada sistem perpipaan. Oleh karena itu penggunaan pita PTFE dan sealer khusus

yang tahan terhadap LPG lebih disarankan saat proses instalasi pada kendaraan.

## **2.8. Properti Fisik**

### **2.8.1. Tekanan Uap (*Vapour Pressure*)**

Salah satu karakteristik utama dari butana dan propana, dan sekaligus menjadi karakteristik yang menentukan penggunaannya adalah tekanan uap (*vapour pressure*). Tekanan uap adalah tekanan suatu uap pada kondisi kesetimbangan (*equilibrium*) dengan bentuk cairnya dalam lingkungan tertutup. Sebagai contoh, tekanan uap butana adalah 0,5 kPa pada 0 °C dan 80 kPa pada temperatur 15 °C, sedangkan tekanan uap propana adalah 400 kPa pada 0 °C dan 600-500 kPa pada temperatur 15 °C. Data ini merupakan perbedaan yang cukup besar dari variasi campuran butana dan propana.

Tekanan LPG dalam tabung meningkat dengan naiknya temperatur, dengan demikian akan dihasilkan variasi volume yang besar dalam fasa cair. Karena itu, jika tabung benar-benar dipenuhi dengan LPG dalam fasa cair, akan menciptakan situasi bahaya dan berpotensi terjadi ledakan. Kenaikan temperatur akan menghasilkan peningkatan tekanan yang pesat. Oleh karena itu, penting untuk membatasi pengisian LPG hanya 80 % atau maksimal 85 % dari total volume sebuah tabung.

### **2.8.2. Titik Didih (*Boiling Point*)**

Karakteristik penting lain yang membedakan butana dan propana adalah titik didihnya (*boiling point*). Titik didih adalah temperatur di mana suatu zat berubah fasa dari keadaan cair menjadi gas. Butana dan propana sebagai pembentuk LPG komersial memiliki titik didih yang sangat rendah, dan berbentuk uap dalam kondisi atmosfer. Propana akan mencair pada -43 °C, sedangkan butana akan mencair pada temperatur sedikit dibawah 0 °C.

Pada suatu wilayah dengan kondisi iklim dingin, LPG dengan proporsi campuran propana yang relatif tinggi akan mendukung sifat gasifikasinya. Perbedaan iklim yang besar dari suatu Negara dengan Negara yang lain menuntut LPG dicampur dalam proporsi yang

berbeda agar memberikan hasil pembakaran yang baik di segala kondisi yang mungkin.

Iklim tropis dengan perbedaan temperatur yang tidak terlalu signifikan dari setiap perubahan iklim lebih memberikan kestabilan dalam hal kebijakan proporsi pencampuran. Di Indonesia, terutama di daerah dataran rendah dan menengah hampir tidak pernah terjadi temperatur lingkungan yang mencapai boiling point LPG. Tabel 1.2 berikut menyajikan karakteristik molekular dari propana dan butana.

**Tabel 2.2 Berat molekul dan titik didih (propana dan butana)**

Kriteria	Propana	Butana	iso-Butana	Commercial Propana	Commercial Butana
Berat molekul	44,1	58,1	58,1	44	58
Titik didih, °C, 1 Atm	-42,1	-0,05	-11,7	-45	-2
Temp kritis, °C	96,8	152	135	95	150
Tekanan kritis, Atm	41,9	37,5	36	40	35

Sumber : National Gas

### 2.8.3. Panas Laten

Panas laten dari suatu jenis bahan bakar cair adalah jumlah panas yang dibutuhkan untuk memungkinkan terjadinya penguapan. Nilai panas latent merupakan data penting selama desain sistem vaporizer. Ketika LPG menguap secara alami, panas latent yang dibutuhkan diambil dari cairan itu sendiri dan lingkungan sekitarnya. Pada saat yang sama menyebabkan penurunan temperatur. Hal ini dikenal dengan istilah “*auto-refrigeration*”.

### 2.8.4. *Specific Gravity*

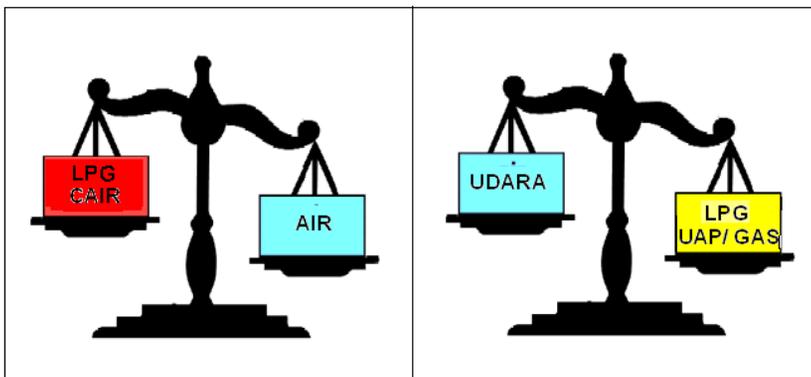
LPG dalam fasa cair lebih ringan dari air dan dalam fasa uap/ gas lebih berat dari udara. Karakteristik properti fisik ini dinyatakan sebagai *specific gravity*, yang didefinisikan sebagai berat cairan dalam volume tertentu dibandingkan dengan berat air dalam volume yang sama, diukur pada temperatur dan tekanan yang sama.

*Specific gravity* air didefinisikan pada 1,0. Sebuah cairan yang beratnya dua kali dari air memiliki *specific gravity* 2,0 dan cairan yang

beratnya setengah dari berat air dalam volume yang sama memiliki *specific gravity* 0,5. LPG cair memiliki *specific gravity* sekitar 0,504 (propana 0,5 – 0,51 dan butana 0,57 – 0,58). Ini berarti LPG cair beratnya sekitar setengah dari berat air dalam volume yang sama.

Demikian pula, *specific gravity* gas (uap) didefinisikan sebagai berat volume tertentu dari uap dibandingkan dengan berat udara pada volume yang sama, diukur pada temperatur dan tekanan yang sama. *Specific gravity* udara didefinisikan sebagai 1,0. Uap yang beratnya dua kali berat udara memiliki *specific gravity* dari 2,0, dan uap yang beratnya setengah dari berat udara memiliki *specific gravity* 0,5.

*Specific gravity* LPG dalam fasa gas/ uap adalah berkisar antara 1.5 sampai 2,0 (propana 1,40 – 1,55 dan butana 1,90 – 2,10). Indeks ini menandakan bahwa LPG fasa gas lebih berat dari udara. Saat LPG berubah fasa dari uap ke cair, reduksi volume yang terjadi sangat besar. Rasio volume gas dengan volume cair pada 15,6 °C/1016 mbar adalah 233 untuk butana, dan 274 untuk propana. Ilustrasi *specific gravity* LPG disajikan dalam Gambar 2.6 sebagai berikut.



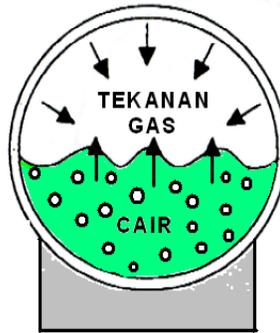
**Gambar 2.6** *Specific gravity* LPG

Berat jenis LPG yang cenderung lebih besar dari udara adalah properti fisik yang sangat penting untuk dipahami. LPG saat dilepas ke udara awalnya cenderung menumpuk di tingkat yang lebih rendah.

Sumber api, seperti nyala api terbuka, harus dihindari untuk pencegahan kebakaran.

Proses *maintenance* kendaraan LPG harus dilakukan dalam ruangan terbuka dengan ventilasi yang baik dan setidaknya berjarak minimal 25 meter dari kegiatan yang berhubungan dengan api terbuka. Jika dimungkinkan, personil atau orang yang tidak berkepentingan tidak boleh berada pada area kerja.

Jika sebagian kecil LPG keluar dari tabung, tekanan dalam tabung akan berkurang sementara. Hal ini menyebabkan LPG cair mendidih dan menghasilkan uap untuk mengisi ruang di atas cairan. Penguapan berlanjut sampai keadaan kesetimbangan tercapai. Ketika cairan ditambahkan ke tabung, cairan gas dalam berada pada ruang sisa dan meningkatkan tekanan di dalam tabung.



**Gambar 2.7** Dinamika dalam tabung LPG

Sebagai akibat kenaikan tekanan, uap LPG kemudian berangsur mulai berkondensasi ke bentuk cairan untuk mengembalikan keseimbangan pada temperatur tersebut. LPG dalam tabung tertutup akan tetap cair asalkan tekanannya dipertahankan. Menurunkan temperatur berarti menurunkan tekanan uap di dalam tabung bahan bakar yang tertutup, seperti halnya meningkatkan temperatur yang menimbulkan kenaikan tekanan. Kondisi hari-hari yang panas, malam dingin, sinar matahari langsung, hujan dan perubahan temperatur lingkungan mempengaruhi tekanan uap LPG di dalam tabung.

### **2.8.5. Odorisation**

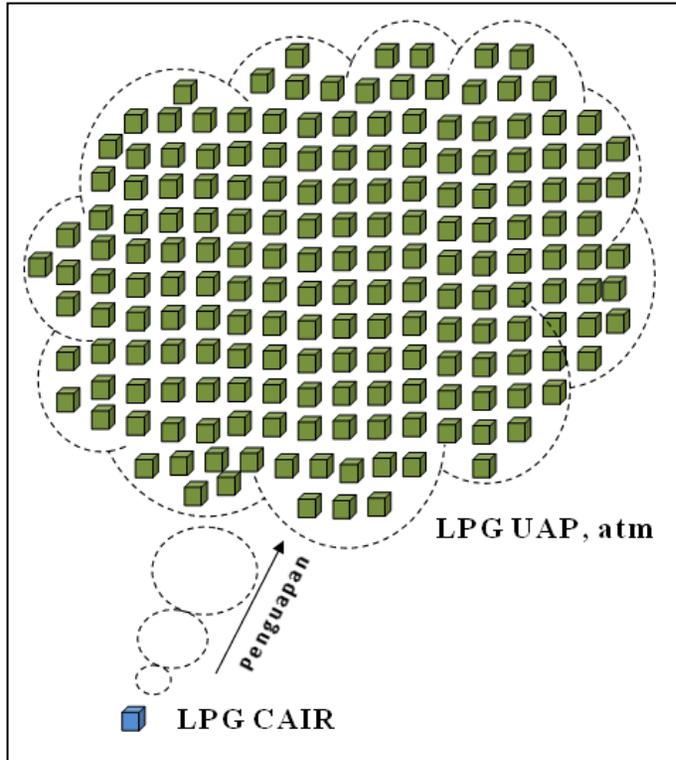
Propana dan butana, keduanya tidak mengandung bau. Zat penambah bau, biasanya etil merkaptan atau bahan lain, ditambahkan untuk memberikan bau LPG yang khas dan tajam. Zat pembau bertindak sebagai pemancar peringatan sehingga saat terjadi kebocoran dapat dideteksi dengan cepat.

Zat pembau yang ditambahkan tidak berbahaya untuk pernafasan, tidak mempengaruhi komposisi bahan bakar, dan membuat uap terlihat samar samar. Setelah bahan bakar dibakar, bau menghilang. NFPA 58 menyatakan bahwa odorization pada tingkat satu pon etil merkaptan per 10.000 galon LPG memberikan bau yang efektif.

### **2.8.6. Expansion Ratio**

Sebuah alasan mengapa LPG disimpan dalam bentuk cairan bertekanan adalah untuk menghemat ruang. Cairan lebih padat daripada uap, sehingga dalam bentuk cair bisa menyimpan bahan bakar (energi) yang jauh lebih banyak. Seperti cairan lainnya, LPG akan mengembang bila dipanaskan. LPG mengembang sekitar 1% untuk setiap kenaikan temperatur 6 °C.

Jika LPG cair dilepaskan ke udara, dengan cepat menguap dan meluas hingga 270 kali volume awalnya (ilustrasi disajikan pada Gambar 2.8). Oleh karena itu, kebocoran cairan LPG lebih berbahaya daripada kebocoran uap karena akan terjadi pengembangan uap. Fenomena yang lain, ketika LPG cair dilepaskan ke atmosfer, penguapan yang cepat menarik panas dari udara di sekitarnya dan menyebabkan efek pendingin.



**Gambar 2.8 Ekspansi volume LPG**

### 2.8.7. *Limits of Flammability*

Campuran LPG dan udara dapat terbakar dalam rentang konsentrasi tertentu, yang dikenal dengan *flammability range*. Rentang konsentrasi ini dibatasi oleh limit atas dan limit bawah “mudah terbakar” (*flammable*). Jika konsentrasi campuran berada diluar *flammability range*, pembakaran tidak akan terjadi.

*Flammability range* butana sekitar 1,8 - 8,4 % dan untuk propana sekitar 2,4 - 9,5 % pada tekanan atmosfer. Pada tekanan yang lebih tinggi atau dengan oksigen, angka limit *flammability* menjadi berbeda. Tabel 1.3 berikut menyajikan *flammability range* untuk propana dan butana serta beberapa bahan bakar gas lain sebagai pembandingan.

**Tabel 2.3 *Flammability range* propana, butana, dan gas lain sebagai pembandingan**

Gas	Lower Limit	Upper Limit	% gas in stoichiometric mixture
Commercial butana	1.8	8.4	3.2
Commercial propana	2.2	9.5	4.2
Methane	5.3	14.0	9.5
Hydrogen	4.0	74	29.6
Acetylene	2.5	80	7.75

Sumber : National Gas

Pembakaran campuran LPG dan udara dimulai dari beberapa titik yang mudah terbakar. Panas yang dihasilkan oleh pembakaran gas menyebabkan turbulensi, sehingga sebagian besar gas yang belum terbakar akan menjadi campuran dalam kisaran *flammability range*.

#### **2.8.8. *Air/ Fuel Ratio***

Meskipun LPG fasa gas akan terbakar dalam campuran apapun dalam batas *flammability range*, pembakaran paling efisien dan lengkap hanya tercapai saat perbandingan bahan bakar dan udara tepat. Rasio pembakaran ideal (*complete combustion*) untuk LPG juga disebut dengan “**stoichiometri**”. Perbandingan massa udara dan bahan bakar untuk LPG adalah 15,3 : 1, sedikit lebih tinggi dari bensin (14,7:1). Pada basis volume, perbandingannya adalah 24 : 1, artinya 24 bagian udara (96 %) untuk satu bagian dari uap LPG (4 %). Campuran bahan bakar terhadap udara yang lebih kaya daripada rasio yang ideal mengindikasikan kekurangan oksigen untuk mencapai pembakaran sempurna. Akibatnya, akan dihasilkan pembakaran parsial membentuk karbon monoksida (CO) dan menghasilkan HC yang tidak terbakar (*unburned HC*) pada gas buang.

Jika campuran bahan bakar dan udara terlalu kurus, akan terjadi kondisi *missfire* di dalam mesin. Meskipun campuran bahan bakar dan udara mungkin di atas limit *flammability range*, tetapi tidak mampu dibakar sempurna dengan nyala api listrik dari elektroda busi. Hal ini juga meningkatkan HC pada gas buang.

## 2.9. Tinjauan Pembakaran

Sebagaimana dengan bahan bakar *hydrocarbon* yang lain, proses pembakaran LPG pada mesin *spark ignition* merupakan pembakaran jenis *pre-mixed combustion*. LPG dan udara dicampur sebelum dibakar dalam ruang bakar. LPG dicampur dengan udara melalui beberapa metode.

### 2.9.1. Metode Pencampuran di Luar Silinder

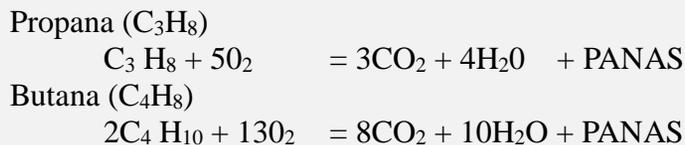
Pada mode ini, LPG dimasukkan kedalam mesin melalui sebuah mixer atau dengan injektor. Mixer dapat dipasang pada mulut karburator atau mulut *throttle body* (jika mesinnya berteknologi EFI). Teknologi yang lebih maju, LPG dimasukkan dengan sebuah injektor yang dipasang pada *intake manifold* mendekati katup masuk. Baik sistem mixer atau injektor, LPG bercampur dengan udara pada *air stream* sebelum katup masuk.

### 2.9.2. Metode Pencampuran di Dalam Silinder

Teknologi ini menyamai dengan teknologi *Gasoline Direct Injection* (GDI). LPG diinjeksikan langsung ke silinder mesin, biasanya dalam fasa cair. Mekanisme pencampuran dengan udara terjadi dalam silinder saat langkah hisap. Sebuah *Gas Control Unit* (GCU) berfungsi untuk mengontrol volume LPG yang diinjeksikan melalui pengaturan waktu pembukkaan injektor dan tekanan pada *fuel rail*.

### 2.9.3. Reaksi Pembakaran

Pembakaran LPG (propana dan butana) dengan konsep pembakaran sempurna dapat ditinjau dengan menggunakan persamaan dasar berikut.



Setiap volume propana dan butana uap membutuhkan masing-masing 24 sampai 30 kali oksigen untuk menghasilkan pembakaran yang sempurna.

Kenyataannya, pembakaran dalam ruang bakar berlangsung dengan proses yang tidak sempurna. Kekurangan atau kelebihan oksigen ( $O_2$ ) menimbulkan emisi CO dan HC, dalam kondisi tertentu (temperatur tinggi) juga timbul  $No_x$ . Selama sistem pemasukan LPG dengan sistem kontrol hisapan mesin (konvensional), resiko pembakaran kurang sempurna menjadi lebih besar.

#### **2.9.4. Octane Rating**

*Octane rating* merupakan parameter untuk mengukur ketahanan bahan bakar terhadap gejala knocking. LPG memiliki angka oktan mencapai 112, jauh lebih unggul dari bensin premium atau bahkan pertamax plus. Untuk itu, seperti dijelaskan pada bab sebelumnya, LPG mampu untuk diterapkan pada mesin-mesin dengan perbandingan kompresi yang lebih tinggi.

*Knocking* terjadi ketika campuran bahan bakar dan udara yang dikompresikan terbakar dengan sendirinya di beberapa titik sebelum ada percikan api dari elektroda busi. Pembakaran sebelum waktunya ini menyebabkan penyebaran api (*flame propagation*) tidak terkendali dan menghasilkan ketukan (*knock*). Dalam beberapa kasus menyebabkan kerusakan komponen mesin yang ekstrim.

#### **2.9.5. Karakteristik Pembakaran**

Dalam sistem bahan bakar bensin, karburator atau injektor berfungsi untuk menciptakan kabut halus dari bahan bakar cair. Untuk menguap sepenuhnya, bahan bakar harus mengambil panas tambahan saat melewati *intake manifold* dan memasuki ruang bakar. Proses kompresi juga membantu butiran bensin (*droplets*) berubah menjadi uap. Jika bensin tidak sepenuhnya menguap, pembakaran berlangsung tidak efisien, menyebabkan emisi yang lebih tinggi dan kinerja mesin menurun. Oleh karena itu, mesin bensin memerlukan berbagai strategi untuk membantu mempermudah start dingin (*cold-start*).

LPG memiliki sifat yang lebih baik saat cold-start, karena memasuki mesin sudah dalam bentuk uap, bahkan pada temperatur sedangin  $-40^{\circ}\text{C}$ . Hal ini memungkinkan bahan bakar untuk mudah bercampur dengan udara dan menghasilkan pembakaran yang efisien dan emisi yang lebih bersih. Pada mobil LPG dengan sistem pemasukan konvensional, LPG dan udara sudah mulai bercampur pada mixer. Dengan desain mixer yang baik, homogenitas campuran dapat lebih dioptimalkan sehingga menghasilkan pembakaran yang lebih baik. Ringkasan properti LPG dan perbandingan dengan bahan bakar lain disajikan dalam Tabel 2.4. sebagai berikut.

**Tabel 2.4 Properti LPG dan perbandingan dengan bahan bakar lain**

<i>Description</i>	Units	Gasoline	Butana	Propana	NGV
<i>Chemical Structure</i>		$\text{C}_4$ to $\text{C}_{10}$	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	$\text{C}_3\text{H}_8$	$\text{CH}_4$
<i>H/C Ratio</i>		1,85	2,5	2,67	4
<i>Auto Ignition Temp.</i>	$^{\circ}\text{C}$	350	225	450	650
<i>Ignition Limits</i>	lambda	0,4 to 1,4	0,36 to 1,84	0,42 to 2,0	0,7 to 2,1
<i>Stoichiometric A/F Ratio</i>	$\text{kg}/\text{m}^3$ ( $0^{\circ}$ )	14,7	15,0	15,7	17,2
<i>Boiling Point</i>	$^{\circ}\text{C}$	30 to 195	-0,5	-42	-162
<i>Heat of combustion HHV</i>	$\text{MJ}/\text{m}^3$	$3,5 \times 10^7$	$3,9 \times 10^7$	$2,5 \times 10^7$	$9,3 \times 10^6$
<i>Heat of combustion LHV</i>	$\text{MJ}/\text{m}^3$	$3,2 \times 10^7$	$3,6 \times 10^7$	$2,3 \times 10^7$	$8,3 \times 10^6$
<i>Octane Number</i>		85,2	89	95,4	120
<i>Cetane Number</i>		10	45	-2	-10
<i>Research Octane</i>	$\text{N}^{\circ}$ RON	n,a,	91,8	112,1	+120
<i>Liquid density</i>	$\text{Kg}/\text{l}$	0,755	0,58	0,5	0,42 ( $-162^{\circ}\text{C}$ )
<i>Gaseous density</i>	$\text{kg}/\text{m}^3$ ( $0^{\circ}$ )	n,a,	2,68	2,0	0,717
<i>Lead Content</i>		Very high	0	0	0
<i>Benzene</i>		Very high	0	0	0
<i>Vapor Pressure</i>	bar	0,5-0,9	2,6	12,1	n,a,
<i>Spec. <math>\text{CO}_2</math> Formation</i>	$\text{G}/\text{MJ}$	n,a	65,4	64,7	54,8
<i>Sulphur Content</i>	PPM	n.a	>50	>50	>5

Sumber : Lo-Gas

## 2.10. Tinjauan Kasus 2.1: *Interchangability Fuel* [41]

### 2.10.1. Latar Belakang

LPG telah menjadi kebijakan energi sektor transportasi di beberapa negara seperti Korea Selatan, Turki, Polandia, dan Thailand. Meskipun 60% LPG di dunia ini merupakan produk refinery, LPG dipilih sebagai bahan bakar alternatif karena harga per satuan massa yang relatif stabil dan lebih rendah dari bahan bakar minyak. Pertimbangan lain adalah bahwa LPG menghasilkan emisi yang lebih rendah dari bensin. Konsumsi energi global untuk sektor transportasi pada tahun 2015 mencapai 21,28 juta ton, sedangkan pada tahun 2014 hanya 20,9 juta ton. Ini berarti meningkat 377.000 ton atau sekitar 1,8%.

Namun demikian, karena LPG merupakan bahan bakar domestik, kandungan LPG di suatu negara akan berbeda dengan di negara lain. Di seluruh dunia, sekitar 60% LPG diperoleh dari minyak mentah dan ekstraksi gas alam, sementara sekitar 40% dihasilkan dari produksi kilang. LPG komersial untuk kendaraan umumnya merupakan campuran propana ( $C_3H_8$ ) dan butana ( $C_4H_{10}$ ). Namun, di beberapa negara seperti Jerman dan Finlandia, LPG komersial hanya terdiri dari molekul propana saja.

Di Indonesia, komposisi LPG dari masing masing kilang dan depo juga bervariasi, seperti yang dilaporkan oleh Rosmayati pada tahun 2012. Komposisi LPG juga bervariasi antara musim panas dan musim dingin, dengan persentase molekul propana yang lebih tinggi pada musim dingin. Kebijakan penambahan propana pada musim dingin diambil untuk mencegah dari pembekuan.

Seperti diketahui, LPG komersial yang tersedia untuk pasar otomotif harus sesuai dengan standar properti bahan bakar, namun tidak diatur komposisinya secara pasti. Sedangkan, kandungan energi (*Higher Heating Value*, HHV) propana dan butana adalah berbeda, yaitu 50,33 MJ/kg untuk propana dan 49,15 MJ/kg untuk butana [42]. Untuk itu, terkait dengan perubahan komposisi LPG karena penyesuaian cuaca atau kebijakan produksi suatu kilang dan berdasar pada perbedaan HHV propana dan butana, artikel ini menyajikan

sebuah analisis numerik perubahan komposisi LPG terhadap *energy delivery* pada mesin *Spark Ignition* (SI).

### 2.10.2. Metode Analisis

Perubahan *energy content* dianalisis menggunakan metode *Wobbe Index* ( $I_W$ ) yang dihitung dengan Persamaan (2.1). *Wobbe index* adalah sebuah indikator untuk mengetahui pengaruh perubahan komposisi LPG terhadap energi yang dikirim ke ruang bakar.

$$I_W = \frac{HHV}{\sqrt{SG}} \quad (2.1)$$

Dimana,  $I_W$  adalah *wobbe index*,  $HHV$  adalah nilai kalor bahan bakar, dan  $SG$  adalah berat spesifik.  $I_W$  kurang dari 5% menunjukkan bahwa perubahan dalam komposisi LPG tidak berpengaruh signifikan pada pembakaran.

Untuk menilai sensitifitas perubahan komposisi LPG terhadap performa mesin, LPG divariasikan dalam 11 campuran dari 100% propana dan 0% butana sampai 100% butana dan 0% propana pada interval 10% untuk tiap-tiap campuran. Nilai densitas propana dan butana sebagai dasar untuk menghitung  $SG$  diperoleh dari REFPROP NIST.

### 2.10.3. Hasil dan Pembahasan

#### Perhitungan *Specific Gravity* (SG)

*Specific Gravity* ( $SG$ ) diperoleh dengan membandingkan densitas LPG cair (pada variasi campuran propana: butana adalah 100:0 sampai 0:100) terhadap densitas cairan referensi, dalam hal ini adalah air; secara ekuivalen, itu adalah rasio massa LPG terhadap massa air untuk volume yang sama. Data densitas LPG campuran LPG yang diperoleh dari REFPROP NIST pada temperatur 25 °C dan 8 bar (kondisi rata rata dalam tangki LPG) diberikan dalam Tabel 2.5 sebagai berikut.

**Tabel 2.5 Densitas dan *Specific Gravity* (SG) campuran propana dan butana pada 25 °C dan 8 bar gauge (densitas air = 1000 kg/m<sup>3</sup>)**

Mass Fraction (butane)	Mass Fraction (propana)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	SG
0%	100%	493,68	0,494
10%	90%	500,45	0,500
20%	80%	508,67	0,509
30%	70%	516,87	0,517
40%	60%	525,06	0,525
50%	50%	533,24	0,533
60%	40%	541,42	0,541
70%	30%	549,59	0,550
80%	20%	557,74	0,558
90%	10%	565,88	0,566
100%	0%	573,97	0,574

#### Perhitungan *Wobbe Index* ( $I_W$ )

Menggunakan Persamaan (2.1), nilai  $I_W$  untuk tiap tiap campuran LPG dapat dihitung. Namun sebelumnya, harus diketahui nilai HHV dari tiap tiap campuran. Dengan data HHV untuk propana dan butana yang diberikan oleh Damirel, nilai HHV untuk seluruh campuran yang diteliti diberikan pada Tabel 2.6 sebagai berikut.

**Tabel 2.6 HHV LPG campuran**

Mass Fraction (butane)	Mass Fraction (propana)	HHV (MJ/kg)
0%	100%	50,330
10%	90%	50,212
20%	80%	50,094
30%	70%	49,976
40%	60%	49,858
50%	50%	49,740
60%	40%	49,622
70%	30%	49,504
80%	20%	49,386
90%	10%	49,268
100%	0%	49,150

Selanjutnya, dengan data pada Tabel 2.5 dan Tabel 2.6 yang dimasukkan pada Persamaan (2.1), nilai  $I_W$  untuk seluruh campuran yang diteliti diberikan pada Tabel 2.7 sebagai berikut.

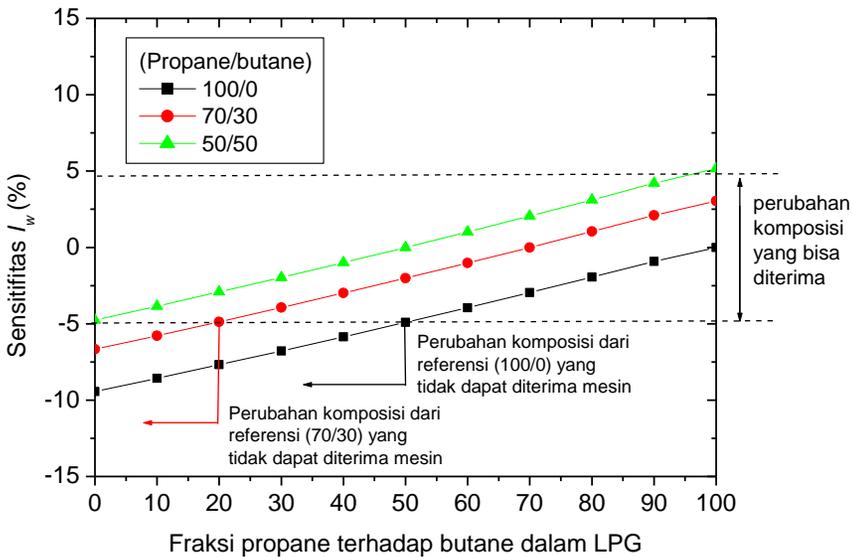
**Tabel 2.7 Nilai  $I_W$  LPG campuran**

<i>Mass Fraction</i>		HHV	$SG$	$I_W$
(butane)	(propana)	(MJ/kg)		
0%	100%	50,330	0,494	71,632
10%	90%	50,212	0,500	70,979
20%	80%	50,094	0,509	70,237
30%	70%	49,976	0,517	69,514
40%	60%	49,858	0,525	68,807
50%	50%	49,74	0,533	68,115
60%	40%	49,622	0,541	67,438
70%	30%	49,504	0,550	66,776
80%	20%	49,386	0,558	66,128
90%	10%	49,268	0,566	65,494
100%	0%	49,150	0,574	64,875

### **Pengaruh perubahan $I_W$ terhadap performa mesin**

Sebagaimana diketahui bahwa komposisi LPG dapat diubah-ubah oleh produsen sesuai dengan cuaca dan kondisi lingkungan, sementara komponen *converter kits* pada mobil berbahan bakar LPG disetting pada suatu campuran tertentu, perubahan komposisi akan berpengaruh pada performa mesin apabila komposisi LPG berubah. Gambar 2.9 berikut menyajikan data sensitifitas perubahan nilai  $I_W$  untuk berbagai campuran terhadap  $I_W$  referensi (data disajikan dalam Tabel 2.8).  $I_W$  referensi yang digunakan dalam studi ini adalah campuran propana/butana dengan komposisi yang paling umum dipakai di dunia yaitu 100/0; 70/30 dan 50/50. Perubahan  $I_W$  dibawah 5% terhadap referensi adalah nilai yang diperbolehkan, sedangkan perbedaan  $I_W$  diatas 5% dari  $I_W$  referensi akan berpengaruh terhadap performa mesin sehingga perlu melakukan penyetelan ulang pada *converter kits* untuk memperoleh AFR yang diinginkan. Perubahan setelan mungkin saja hanya pada pengaturan katup akselerasi (pada tipe CM) atau pengaturan *injection duration* pada tipe

VPI, LPI, dan LPDI. Perbedaan jenis *converter kits* VPI, LPI, dan LPDI telah dijelaskan dalam *WLPGA Autogas Incentive Policies*.



Gambar 2.9 Sensitivitas perubahan nilai  $I_w$  terhadap  $I_w$  referensi

Tabel 2.8 Perubahan nilai  $I_w$  LPG campuran terhadap  $I_w$  referensi

Mass Frac. (propana)	Perubahan $I_w$ terhadap referensi (%)		
	100/0	70/30	50/50
100%	0,000	3,047	5,162
90%	-0,912	2,107	4,204
80%	-1,946	1,041	3,115
70%	-2,956	0,000	2,053
60%	-3,944	-1,017	1,015
50%	-4,909	-2,012	0,000
40%	-5,854	-2,986	-0,994
30%	-6,778	-3,938	-1,966
20%	-7,683	-4,870	-2,917
10%	-8,568	-5,782	-3,848
0%	-9,432	-6,673	-4,757

Dari Tabel 2.8, tiga informasi utama dapat diperoleh. Pertama, untuk kendaraan yang disetting pada LPG 100% propana, komponen *converter kits* mampu mengakomodasi perubahan komposisi LPG dari 100% propana sampai 50% propana dan 50% butana,  $I_W$  71,632 ke  $I_W$  68,115. Selanjutnya, jika fraksi massa butana dalam *fuel line* lebih dari 50%, akan memerlukan penyetelan ulang pada komponen *converter kits* untuk mencapai AFR yang sesuai karena perbedaan nilai  $I_W$  lebih dari 5%.

Kedua, untuk kendaraan yang disetting pada LPG campuran 70% propana dan 30% butana, komponen *converter kits* mampu mengakomodasi perubahan komposisi LPG dari 70% propana dan 30% butana sampai 80% butana dan 20% butana. Umumnya, komposisi butana dalam LPG campuran maksimal 70%, sehingga basis LPG campuran 70% propana dan 30% butana mampu mengakomodasi perubahan komposisi LPG, kecuali jika kandungan butana lebih besar dari 80%.

Terakhir, untuk LPG campuran 50% propana dan 50% butana mampu mengakomodasi seluruh perubahan komposisi LPG tanpa perlu melakukan penyetelan ulang pada *converter kits*. Di Indonesia, LPG untuk kendaraan atau yang biasa disebut Vi-gas atau LGV terdiri dari 51% propana dan 49% butana. Ini berarti kendaraan berbahan bakar Vi-gas mampu beradaptasi terhadap seluruh perubahan komposisi LPG.

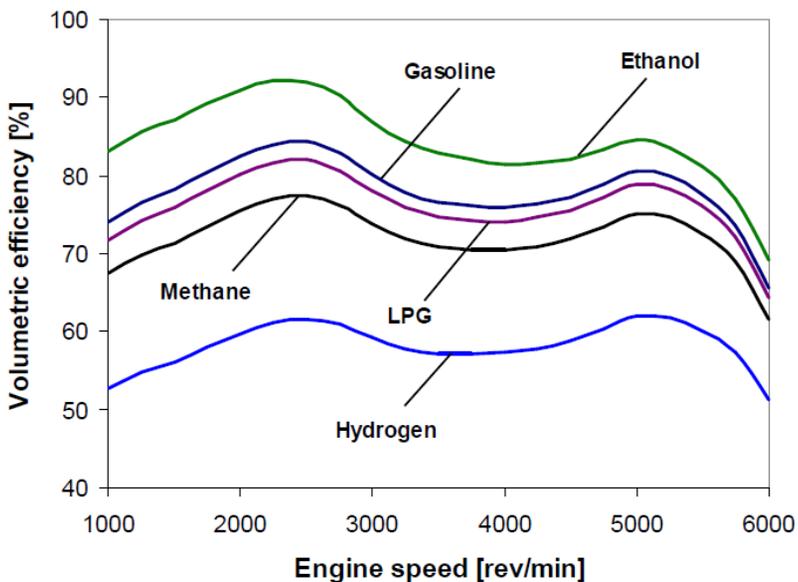
#### **2.10.4. Kesimpulan**

Hasil studi numerik pada LPG campuran propana dan butana untuk bahan bakar S.I. engine dengan parameter  $I_W$  menunjukkan bahwa kendaraan dengan *converter kits* yang disetting untuk 100% propana sensitif terhadap perubahan komposisi LPG, penambahan fraksi massa butana pada *fuel line* lebih dari 50%, memerlukan penyetelan ulang terhadap *converter kits* untuk penyesuaian AFR. Sedangkan untuk kendaraan dengan *converter kits* yang disetting untuk 50% propana dan 50% butana mampu mengakomodasi seluruh perubahan komposisi LPG tanpa harus menyetel ulang *converter kits*, kecuali pada penggunaan propana murni.

## 2.11. Tinjauan Kasus 2.2: Efisiensi Volumetrik [43]

### 2.11.1. Latar belakang

Perbedaan properti bahan bakar memiliki pengaruh yang besar terhadap efisiensi volumetrik mesin. Irimescu (2010) menyajikan hasil penelitian terkait dengan efisiensi volumetrik pada penggunaan beberapa bahan bakar alternatif dibandingkan dengan bensin. Beberapa bahan bakar yang diteliti adalah LPG, ethanol, methane, hydrogen. Mesin yang digunakan berkapasitas 1998 cm<sup>3</sup> dengan rasio kompresi 9,2. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa efisiensi volumetrik bahan bakar LPG lebih rendah dari bensin dan ethanol, meskipun lebih besar dari methanol dan hidrogen (Gambar 2.10).



**Gambar 2.10 Efisiensi volumetrik LPG dibandingkan dengan bahan bakar lainnya**

Sementara itu, Gumus (2011) melakukan penelitian lain pada mesin *Spark Ignition* berbahan bakar ganda (*dual fuel*) LPG/bensin terkait dengan efisiensi volumetrik. Bahan bakar divariasikan pada campuran LPG terhadap bensin pada 0%, 25%, 50%, 70%, dan 100%.

Pengujian dilakukan pada dinamometer pada putaran mesin konstan dengan beban yang divariasikan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semakin besar campuran LPG terhadap bensin akan menurunkan efisiensi volumetriknya. Pemakaian LPG murni (100% LPG tanpa bensin) menunjukkan efisiensi volumetrik terendah.

Penelitian oleh Masi dan Gobbato (2012) juga membahas tentang perbandingan efisiensi volumetrik bahan bakar LPG dibandingkan dengan bensin. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa efisiensi thermal dan konsumsi bahan bakar LPG lebih baik dari bensin, tetapi efisiensi volumetrik LPG lebih rendah daripada bensin. Beberapa teori dan alasan berkaitan dengan menurunnya efisiensi volumetrik pada penggunaan LPG dibandingkan dengan bensin juga diberikan. Formulasi perbandingan efisiensi volumetrik LPG terhadap bensin berbasis pada komposisi kimia (perbandingan carbon terhadap hydrogen) disajikan sebagai berikut.

$$\frac{\eta_v^{LPG}}{\eta_v^{Petrol}} = \frac{1 + \left(\frac{F}{A}\right)_{Petrol} \left(\frac{M_{air}}{M_{Petrol}}\right)}{1 + \left(\frac{F}{A}\right)_{LPG} \left(\frac{M_{air}}{M_{LPG}}\right)} \quad (2.2)$$

Dimana,  $\eta_v$  adalah efisiensi volumetrik,  $F/A$  adalah perbandingan bahan bakar terhadap udara.

Sementara itu, selama LPG masuk ke *intake manifold* dalam kondisi *superheated vapor*, akan menempati ruangan yang lebih besar untuk satuan massa yang sama. Perbandingan efisiensi volumetrik LPG terhadap bensin berbasis pada ekspansi volumenya disajikan sebagai berikut.

$$\frac{\eta_v^{LPG}}{\eta_v^{Petrol}} = \frac{1 + \left(\frac{F}{A}\right)_{Petrol} \left(\frac{\rho_{air}}{\rho_{Petrol}}\right)}{1 + \left(\frac{F}{A}\right)_{LPG} \left(\frac{\rho_{air}}{\rho_{LPG}}\right)} \quad (2.3)$$

Fakta lain adalah bahwa bensin memasuki *intake manifold* akan menimbulkan efek pendinginan karena perubahan fasa ke uap.

Sementara itu, LPG selama dimasukkan dalam fasa uap, tidak menimbulkan efek pendinginan. Merujuk pada penelitian Price (2004) dengan temperatur LPG saat keluar *vaporizer* yang relatif tinggi akan menyebabkan penurunan efisiensi volumetrik.

### 2.11.2. Spesifikasi mesin yang digunakan

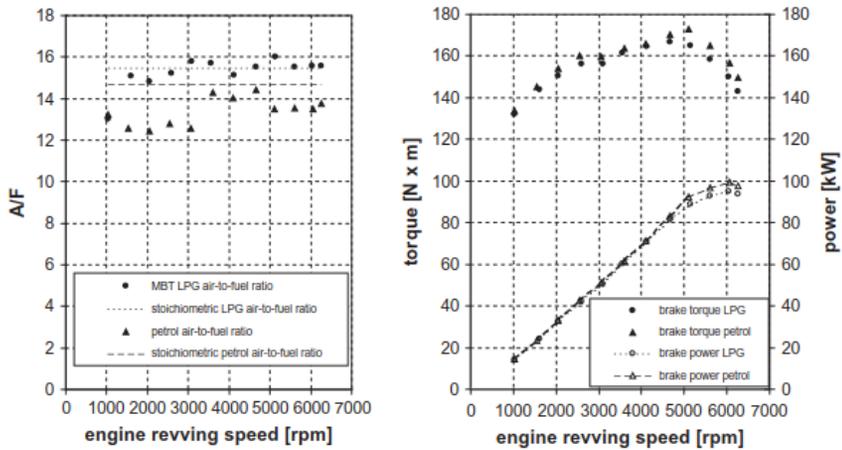
Penelitian yang dilakukan oleh Masi dan Gobato (2012) menggunakan mesin SI dengan spesifikasi yang ditunjukkan pada tabel 2.9 sebagai berikut.

**Tabel 2.9 Spesifikasi mesin**

Parameter	Value
Model	FIAT 838 A1.000
Type	4 stroke 5 cylinder inline SI
Fuel	Petrol
Swept volume	1998 cm <sup>3</sup>
Maximum torque	185 N × m @ 4500 rpm
Maximum power	107 kW @ 6100 rpm
Stroke	75.6 mm
Bore	82 mm
Combustion chamber	Pent-roof 4 valves
Compression ratio	10
Distribution	Double over-head camshaft (DOHC) with intake and exhaust variable timing device
Fuel metering	Multi-point port fuel sequential electronic injection BOSCH Motronic 2.10
Exhaust treatment	3-way catalyst with lambda sensor

### 2.11.3. Hasil Pengujian

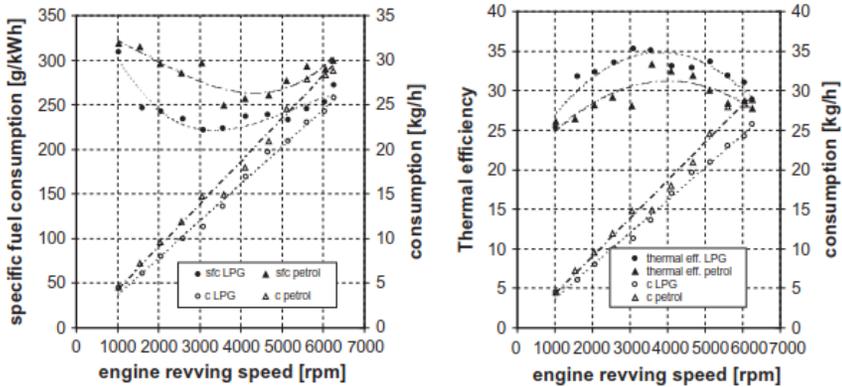
Gambar. 2.11 (kanan) melaporkan daya dan torsi output terhadap kecepatan putara mesin. Torsi maksimum (173 Nm pada 5.107 rpm) dan daya (99,3 kW pada 6.057 rpm) hasilnya sedikit lebih rendah daripada yang diklaim oleh produsen dengan mode oprasi bensin (lihat Tabel 2.9).



**Gambar 2.11 Maximum Brake Torque (MBT) dan AFR LPG yang terbaca dari ECU (kiri); Brake torque dan output power pada operasi bensin dan LPG (kanan)**

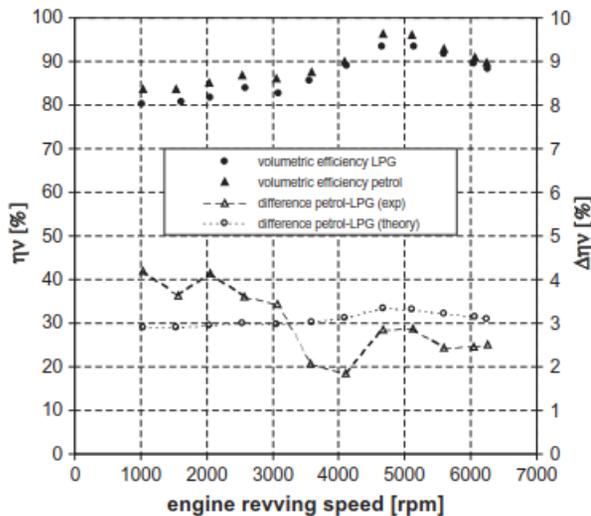
Konsumsi bahan bakar ( $c$ ) dan konsumsi bahan bakar spesifik ( $sfc$ ) disajikan pada Gambar 4.12 (kiri). Kurva regresi menunjukkan bahwa LPG memungkinkan penghematan bahan bakar absolut dan spesifik lebih besar daripada mode operasi bensin. Nilai minimum dari konsumsi bahan bakar spesifik adalah 222,5 g/kW h pada 3561 rpm untuk LPG dan 249,2 g/kW h pada 3590 rpm untuk operasi bensin. Sementara itu, konsumsi LPG adalah 25,7 kg/jam pada 6273 rpm dan konsumsi bensin adalah 28,8 kg/jam pada 6248 rpm.

Mesin yang dioperasikan dengan LPG menunjukkan nilai efisiensi termal dalam kisaran sekitar 31–35% di atas seluruh rentang kecepatan mesin (1500–6000 rpm). Sebaliknya, mesin berbahan bakar bensin mencapai efisiensi puncak sedikit lebih besar dari 32% dan melebihi 30% hanya dalam rentang kecepatan yang sempit (dari 3250 rpm hingga 5100 rpm). Rasio AFR yang kurang kaya pada penggunaan LPG ditambah dengan kecepatan pembakaran bensin yang lebih tinggi daripada LPG adalah alasan mengapa kinerja termodinamika mesin bensin lebih baik dari mesin yang beroperasi dengan LPG.



**Gambar 2.12** Konsumsi bahan bakar spesifik (kiri) dan efisiensi termal (kanan) untuk LPG dan operasi bensin.

Di sisi lain, penggunaan LPG (dengan nilai oktan yang lebih baik daripada bensin) memungkinkan untuk membuat waktu pengapian yang lebih awal daripada mode operasi bensin, untuk mendapatkan efisiensi termal yang lebih baik. Selanjutnya, efisiensi volumetrik terukur pada penggunaan LPG dan bensin disajikan dalam Gambar 2.13 sebagai berikut.



**Gambar 2.13** Efisiensi volumetrik terukur selama mode operasi LPG dan bensin

# **BAB 3.**

## **PERKEMBANGAN KENDARAAN LPG**



LPG, sebelum digunakan sebagai sumber energi pada sektor transportasi, digunakan secara luas pada sektor industri, perumahan, sektor komersial, pembangkit listrik, pertanian, hingga pada sektor pariwisata, seperti diilustrasikan pada Gambar 3.1. Industri petrokimia menggunakan LPG/propana sebagai bahan baku, sedangkan di sektor perumahan dan komersial, digunakan untuk pemanas ruangan, pemanas air, dan memasak. Dalam sektor pertanian, LPG digunakan untuk pengkondisian temperatur tanaman, pembangkit listrik, pengendalian hama, dan sumber panas untuk biodigester.



**Gambar 3.1 Beberapa penggunaan LPG selain sektor transportasi**

Penggunaan LPG sebagai bahan bakar sebenarnya sudah memiliki sejarah yang sangat panjang. Pada awal 1900-an, bahan bakar utama yang tersedia untuk mobil adalah bensin dan alkohol

(ethanol). Bensin dengan cepat menjadi pilihan yang luar biasa karena harga yang kompetitif dan ketersediaan yang luas, meskipun praktek pemurnian waktu itu membuat bensin menjadi bahan bakar yang sangat volatil yang menguap dengan cepat.

Dr Walter Snelling dari US Bureau of Mines menemukan metode untuk memisahkan hidrokarbon ringan dari bensin. Dia kemudian mengidentifikasi senyawa ini sebagai butana dan propana, yang merupakan pembentuk utama dari LPG. Dr Snelling dan rekan-rekannya juga menemukan metode untuk mencairkan LPG. Sebuah cara praktis memisahkan butana dan propana dari minyak mentah dan gas alam. Pengembangan ini mendukung munculnya mobil LPG pada awal 1900-an.

Percobaan menggunakan LPG untuk sector otomotif dimulai sekitar tahun 1910 hingga tahun 1920. Percobaan pertama diterapkan pada kendaraan di California, Amerika Serikat. Pada tahun 1950, Chicago Transit Authority memesan 1.000 unit bus dengan bahan bakar LPG, dan Milwaukee mengkonversi 270 unit taksi untuk beralih dari bahan bakar minyak ke LPG. Sejak saat itu aplikasinya menjadi meluas.

Pada tahun 1973, Embargo minyak di Arab meningkatkan ketertarikan publik terhadap bahan LPG. Pada saat itu, tiba-tiba bensin menjadi sangat mahal dan rantai pasokannya tidak menentu. Hal itu mendorong pertumbuhan retrofit LPG pada kendaraan yang tinggi pada rentang sampai awal 1980-an. Pada tahun 1978 sekitar 35.000 kendaraan per tahun dikonversi ke LPG di Amerika Serikat. Pada 1981 jumlah tersebut hampir 250.000. Pada tahun 1989 hampir 4 juta kendaraan di seluruh dunia didukung dengan bahan bakar LPG.

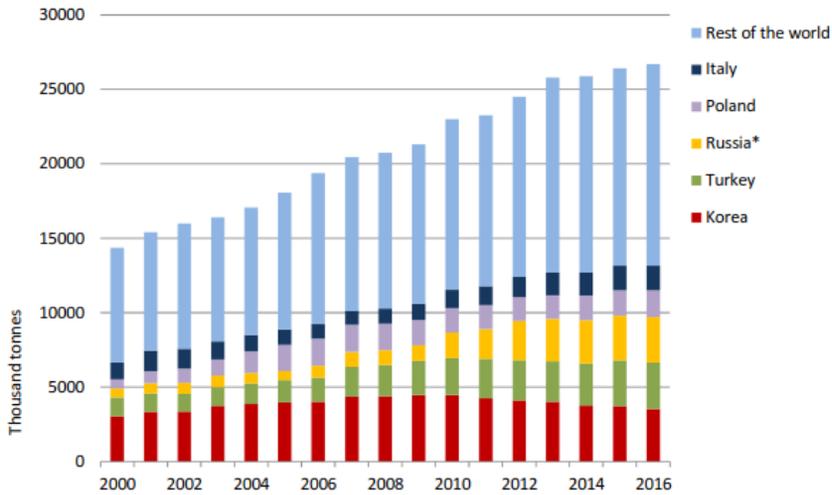
Sejak saat itu, LPG menjadi salah satu bahan bakar alternatif yang populer untuk kendaraan. Dari Amerika Serikat berkembang ke Eropa, Asia, dan hingga kini telah merambah ke seluruh benua. Di beberapa Negara, LPG yang digunakan sebagai bahan bakar otomotif lebih dikenal dengan "Autogas". Menurut data dari *World Liquid Petroleum Gas Assotiation* (WLPGA), hingga tahun 2012 diperkirakan lebih dari 17 juta kendaraan dengan berbagai tipe dan merk beroperasi dengan LPG dan menghiasi jalan jalan di seluruh dunia.

Generasi terbaru dari teknologi kendaraan LPG hampir setara dengan teknologi *Electronic Fuel Injection* (EFI), bahkan telah mencapai teknologi *Gasoline Direct Injection* (GDI). LPG diinjeksikan pada fasa cairan dan dikabutkan langsung oleh injector ke *intake manifold* atau langsung ke silinder. Suatu *Electronic Control Unit* (ECU) diaplikasikan untuk mengatur dengan teliti jumlah LPG yang dimasukkan ke mesin. ECU LPG ini dapat berkomunikasi langsung dengan ECU mesin (original) untuk menyesuaikan volume injeksi berdasarkan informasi dari beberapa sensor. Sensor ini mengirimkan signal umpan balik untuk mengontrol campuran LPG dan udara hingga diperoleh AFR stoichiometri atau campuran yang sedikit lebih kaya sesuai kebutuhan dan beban mesin. Bahkan, pada kondisi akselerasi, aliran LPG diputus sementara untuk penghematan dan reduksi emisi.

### **3.1. Kebijakan Bahan Bakar Alternatif**

LPG adalah bahan bakar alternatif *non-blended* yang paling banyak digunakan untuk bahan bakar transportasi untuk menggantikan bahan bakar minyak konvensional, bensin dan solar.

Sejumlah negara memiliki pasar LPG yang berkembang dengan baik. Konsumsi global LPG terus meningkat dalam beberapa tahun terakhir, mencapai 26,7 juta ton pada tahun 2016 (terjadi peningkatan 283.000 ton) atau 1,1%, dan 3,7 Mt, atau 16% naik dari tahun 2000. Pasar LPG telah meningkat sebesar 85% sejak tahun 2000 (Gambar 3.2).



**Gambar 3.2 Konsumsi LPG Global [44]**

Namun demikian, permintaan tetap sangat terkonsentrasi di sejumlah negara (Korea, Turki, Rusia, Polandia, dan Italia) menyumbang 49% dari konsumsi dunia pada tahun 2016. Ada 23 negara yang disurvei oleh WLPGA bersama-sama menyumbang 83% dari penggunaan LPG dunia. Dua dari tiga konsumen terbesar (Turki dan Rusia) mengalami peningkatan terbesar dalam konsumsi LPG selama sepuluh tahun hingga 2016, sementara penurunan terbesar terjadi di Meksiko, Australia, Jepang, dan Korea. Di seluruh dunia, LPG saat ini menyumbang 1,2% dari total konsumsi bahan bakar transportasi jalan. Konsumsi, jumlah kendaraan, dan jumlah stasiun LPG di negara-negara yang sukses menerapkan LPG untuk transportasi disajikan pada Tabel 3.1 sebagai berikut.

**Tabel 3.1 Data kendaraan LPG di dunia [44]**

Country	Consumption (thousand tonnes)	Vehicles (thousands)	Refuelling sites
Korea	3 515	2 185	2 031
Turkey	3 142	4 440	10 426
Russia	3 050	3 000	4 900
Italy	1 659	2 211	3 940
Poland	1 790	2 977	5 390
Thailand	1 466	920	950
Ukraine	1 385	2 250	3 500
Japan	1 002	221	1 440
China	990	165	550
Australia	532	360	2 500
Rest of the World	8 173	8 077	40 465
<b>World</b>	<b>26 704</b>	<b>26 806</b>	<b>76 092</b>

Sampai 2016 saja, ada hampir 27 juta kendaraan LPG yang digunakan di seluruh dunia dan lebih dari 76.000 situs pengisian bahan bakar. LPG untuk kendaraan menyumbang 9% dari konsumsi LPG global pada tahun 2016, meskipun pasar ini bervariasi di berbagai negara. Di antara negara-negara yang disurvei, pasar tertinggi di Ukraina, sebesar 85%, dan terendah di Amerika Serikat hanya 1,5%

Jenis dan penggunaan kendaraan LPG di suatu negara berbeda dengan negara yang lain, ini menyangkut dengan kebijakan energi dari pemerintah. Dalam dua pasar terbesar Asia (Korea dan Jepang) misalnya, armada taksi dan kendaraan ringan menjadi target terbesar dari konsumsi LPG. Di kedua negara tersebut, mayoritas taksi beroperasi dengan LPG sebagai bentuk kebijakan pemerintah dalam hal bahan bakar alternatif.

Di Eropa, mobil pribadi menjadi pasar utama LPG. Di sebagian besar negara, kendaraan yang beroperasi dengan LPG adalah kendaraan bensin yang telah dikonversi dengan sistem bi-fuel (LPG/Bensin), belum dengan mode *full dedicated*. Kendaraan bensin dapat dikonversi dengan biaya yang lebih murah karena hanya melakukan sedikit modifikasi pada komponen mesin.

Saat ini, kendaraan tugas berat (*Heavy-Duty Vehicle*) yang berjalan dengan LPG relatif sedikit. Ini karena dibutuhkan biaya yang

mahal untuk mengkonversi mesin diesel agar bisa beroperasi dengan LPG. Namun, di beberapa negara telah diaplikasikan dengan contoh yang disajikan pada Gambar 3.3.



**Gambar 3.3 Bis Sekolah yang beroperasi dengan LPG**  
(sumber :*Propana Exeptional Energy*)

### 3.2. Terobosan Awal

Guncangan harga minyak dunia tahun 1970-an memberikan dorongan awal untuk pengembangan bahan bakar alternatif di sektor otomotif. Beberapa negara berusaha untuk mengurangi ketergantungan pada impor minyak mentah dan produk olahan. Masalah lingkungan juga menjadi pemikiran utama sebagai pendorong kebijakan pemerintah untuk mempromosikan bahan bakar tersebut, karena LPG dapat menurunkan kadar polusi.

Fokus awal dari eksekusi kebijakan adalah untuk mereduksi polusi udara di kota-kota besar, terutama disebabkan oleh bahan bakar otomotif. Sejak tahun 1990-an, perhatian telah bergeser pada ancaman perubahan iklim global akibat meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer yang dihasilkan terutama dari pembakaran bahan bakar fosil. Akibatnya, pemerintah mencari bahan bakar alternatif yang mengeluarkan karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) yang lebih rendah dari bahan bakar minyak.

Kegiatan Penelitian dan pengembangan teknologi bahan bakar alternatif beberapa tahun terakhir difokuskan pada bahan bakar

berbasis minyak dan gas alam, biofuel yang berasal dari bahan nabati seperti ethanol atau bio-diesel, kendaraan listrik dan *fuel cell*. Kendaraan listrik saat ini telah berada pada tahap komersialisasi, tapi serapan mereka cenderung lambat karena harganya relatif mahal dan jarak tempuh yang terbatas.

Pasokan ethanol dan bio-diesel telah meningkat tajam dalam beberapa tahun terakhir, walaupun kedua bahan bakar ini biasanya dicampur dengan bensin dan solar. Ruang lingkup untuk meningkatkan produksi biofuel menggunakan teknologi konvensional akan dibatasi oleh kompetisi untuk lahan tanaman pangan.

Bahan bakar alternatif utama non campuran yang digunakan di dunia saat ini adalah LPG, gas alam terkompresi (CNG) dan methanol. LPG di banyak negara sebagai bahan bakar yang paling penting, karena efisiensi yang tinggi, murah, dan ramah lingkungan. Kandungan racun dari LPG termasuk yang paling rendah dari semua bahan bakar otomotif tersedia secara komersial saat ini. Selain itu, efek gas rumah kaca dari LPG umumnya lebih rendah dibandingkan dari bensin, diesel dan beberapa bahan bakar alternatif.

Dari perspektif keamanan energi, LPG memiliki keunggulan dibandingkan bahan bakar konvensional. Cadangan LPG berlimpah dari berbagai sumber di seluruh dunia. Selain berasal dari cadangan minyak dan gas, fleksibilitas proses penyulingan yang modern menawarkan potensi besar untuk memperluas pasokan untuk memenuhi permintaan dari sektor transportasi. Pasokan LPG diperkirakan akan meningkat cepat dalam beberapa tahun ke depan seiring dengan pertumbuhan produksi gas alam dan ekstraksi cairan terkait.

Penggunaan LPG umumnya lebih mendapat dukungan kebijakan pemerintah untuk dipromosikan sebagai bahan bakar alternatif dibandingkan kendaraan CNG, kendaraan methanol, atau kendaraan listrik. Meskipun efek lingkungan yang jauh lebih baik dibandingkan bahan bakar konvensional, pembangunan CNG lambat karena pertimbangan biaya infrastruktur pengisian bahan bakar.

Methanol juga menjadi alternatif bahan bakar yang lebih bersih terutama jika dihasilkan dari biomassa terbarukan. Namun

demikian, penggunaan methanol sebagai bahan bakar motor masih terbatas, masalah teknis yang terkait dengan efek korosi masih menjadi kendala pengembangan. Sebaliknya, teknologi untuk menginstal sistem LPG dalam kendaraan atau mengkonversi lebih mudah dan sederhana dengan biaya infrastruktur yang relatif lebih murah daripada bahan bakar alternatif yang lain.

### 3.3. Pertimbangan Praktis

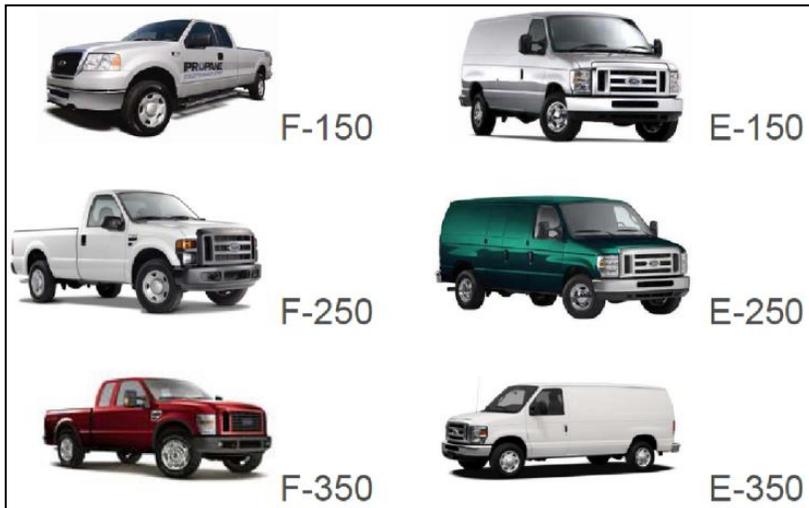
Dalam kebanyakan kasus, kendaraan dengan bahan bakar konvensional yang ada diubah untuk dapat beroperasi dengan LPG dengan sistem *bi-fuel*. Dengan sistem ini, perangkat bahan bakar gas dan konvensional dipasang secara terpisah yang memungkinkan kendaraan untuk beralih dari mode bahan bakar bensin ke gas atau sebaliknya. Peralatan ini dapat diinstal pada saat mobil diproduksi. Tangki biasanya dipasang di bagasi atau bawah lantai. Beberapa OEM kini memproduksi dan memasarkan mobil LPG baik dengan sistem *bi-fuel* atau sistem *full dedicated* misalnya Ford dan General Motors memasarkan berbagai pilihan mobil LPG di Australia, seperti halnya Hyundai dan Kia di Korea Selatan. Contoh produk kendaraan LPG OEM disajikan pada Gambar 3.4.

Karakteristik kinerja dan operasional kendaraan LPG lebih menguntungkan dibandingkan dengan yang dimiliki oleh bahan bakar lainnya. LPG memiliki nilai oktan yang lebih tinggi daripada bensin, sehingga mesin lebih halus. Hal ini dapat mengurangi keausan mesin dan biaya pemeliharaan, termasuk frekuensi penggantian busi dan minyak pelumas.

LPG menghasilkan jelaga yang lebih rendah daripada penggunaan bensin dan diesel. Oktan yang lebih tinggi dari LPG juga memungkinkan untuk diterapkan pada mesin-mesin dengan kompresi rasio tinggi, yang dapat memberikan peningkatan daya output mesin dan efisiensi termal yang lebih baik, mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi.

Akselerasi dan *top speed* menggunakan generasi terbaru dari sistem bahan bakar LPG sebanding dengan bensin atau solar. LPG memiliki densitas energi yang lebih rendah dari bensin dan solar. Ini

berarti dibutuhkan volume bahan bakar dan tangki yang lebih besar untuk mencapai jarak tempuh yang sama.



**Gambar 3.4 Mobil LPG produksi Ford**

### **3.4. Tantangan**

Dalam prakteknya, mengubah kendaraan untuk dapat berjalan dengan LPG menyebabkan beberapa ketidaknyamanan operasional. Yang paling kelihatan adalah berkurangnya ruang bagasi untuk mengakomodasi tangki bahan bakar seperti ditunjukkan pada Gambar 3.5. Dalam beberapa kasus (tergantung pada peralatan yang dipasang dan settingannya), terjadi kerugian pada akselerasi dan kecepatan terutama karena berat ekstra dari tangki. Perkembangan teknologi baru, tangki dan braket dibuat dari bahan komposit yang ringan, sehingga dapat mereduksi sebagian permasalahan.



**Gambar 3.5 Berkurangnya ruang bagasi untuk peletakan tabung LPG**

Ketidaknyamanan lain timbul saat pengisian bahan bakar dan saat penggantian mode bahan bakar. Untuk mesin Injeksi, penggantian mode bahan bakar tidak akan menjadi masalah, namun untuk mobil karburator akan timbul ketidaknyamanan saat berkendara. Meskipun demikian, pengalaman praktis telah menunjukkan bahwa pemilik kendaraan bersedia mengonversi kendaraan mereka ke bahan bakar LPG karena penghematan biaya operasional yang cukup menarik.

Keprihatinan sehubungan dengan keselamatan dan isu mudah meledak adalah penghalang untuk konversi. Namun selama bertahun-tahun di seluruh dunia telah cukup menunjukkan integritas dan keselamatan sistem transportasi dengan kendaraan LPG. Bahkan, catatan keselamatan dari kendaraan LPG tidak lebih buruk daripada mobil bensin atau diesel. Sebuah contoh yang baik adalah Hong Kong, di mana armada taksi LPG telah terakumulasi selama 20 miliar kilometer sejak tahun 1990 tanpa kecelakaan besar tunggal.

LPG disimpan dalam tangki yang solid, sangat kecil kemungkinan untuk bocor. Lebih aman dibandingkan dengan bensin

yang rentan terhadap kebocoran dan penguapan. Meskipun demikian, kecelakaan yang menimpa mobil LPG sering dipublikasikan secara luas, disebabkan dari instalasi yang jelek, tidak adanya katup pengaman pada tangki bahan bakar, dan lain lain, telah merusak citra keamanan mobil LPG dalam beberapa negara.

### **3.5. Perkembangan Teknologi *Converter Kits***

Untuk mengoperasikan kendaraan dengan LPG, baik sebagai *full dedicated fuel* (bahan bakar tunggal) atau *bi-fuel* (bensin dan LPG dioperasikan secara bergantian), hanya dibutuhkan sedikit modifikasi pada sistem bahan bakar [39]. Sampai dengan saat ini, ada empat jenis utama dari sistem bahan bakar LPG (LPG Kits) yang digunakan [45].

#### **1. *Converter and Mixer (CM)***

Ini adalah generasi pertama perangkat konversi dari bensin ke LPG mirip dengan sistem karburator. LPG masuk ke mesin melalui pengaturan kevakuman oleh mixer. Ini adalah sistem tertua, ada sejak tahun 1940-an, dan masih banyak digunakan saat ini terutama pada kendaraan yang diproduksi belum mengkodasi teknologi *bi-fuel*.

#### **2. *Vapour Phase Injection (VPI)***

Sistem ini menggunakan konverter seperti generasi pertama, tapi gas keluar konverter pada tekanan yang diatur. Gas tersebut kemudian disuntikkan ke dalam *intake manifold*.

#### **3. *Liquid Phase Injection (LPI)***

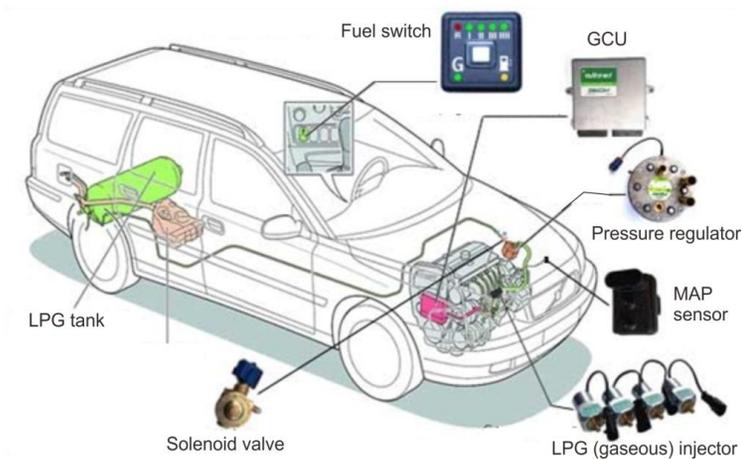
Sistem ini tidak menggunakan *converter*, melainkan memberikan bahan bakar cair langsung ke rel bahan bakar seperti pada sistem injeksi bensin.

#### **4. *Liquid phase direct injection (LPDI)***

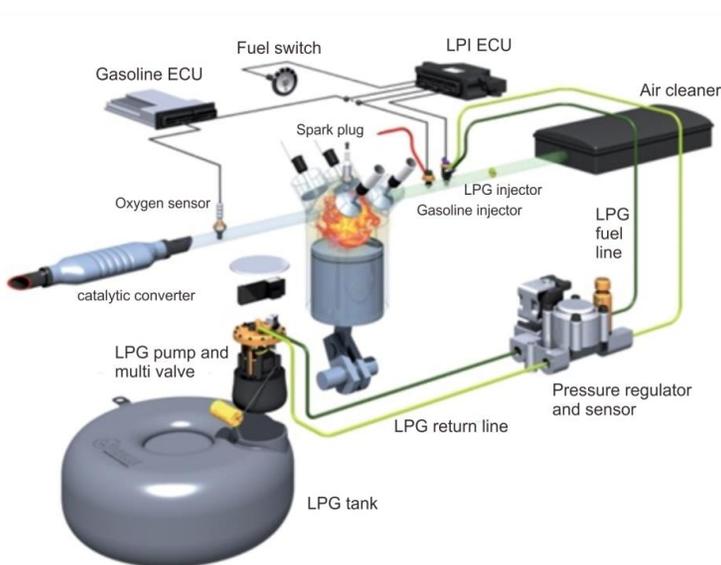
LDPI adalah sistem yang paling canggih saat ini. LPDI menggunakan pompa tekanan tinggi dan injektor untuk menyuntikkan LPG cair langsung ke ruang bakar.

Dari keempat sistem yang ada, sistem *converter and mixer (CM)* adalah yang paling banyak diaplikasikan untuk hampir seluruh teknologi kendaraan yang ada. Pada jenis pertama dan kedua, perubahan fasa LPG dari cair ke uap terjadi diluar mesin. Pada LPI,

perubahan fasa terjadi di *intake manifold*. Sementara pada LPDI, perubahan fasa terjadi di dalam silinder. Ilustrasi sistem bi-fuel dan LPI LPG kits disajikan dalam Gambar 3.6 dan Gambar 3.7 secara berurutan.



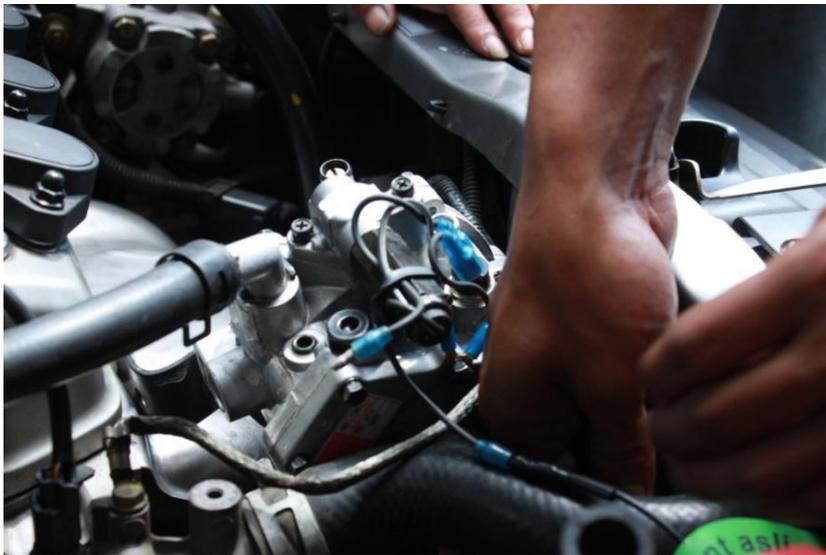
**Gambar 3.6 Bi-fuel LPG-bensin**



**Gambar 3.7 LPI-LPG kits**

# **BAB 4.**

## **INSTALASI *CONVERTER KITS***



Pada bab ini akan diuraikan tentang proses pemasangan *converter kits* konvensional. Proses pemasangan *converter kits* ke dalam mobil memerlukan perencanaan yang detail tentang beberapa hal. Perencanaan ini dimaksudkan untuk mempermudah pengerjaan dan perawatan komponen. Faktor keamanan dan mitigasi resiko juga menjadi pertimbangan penting dalam proses ini.

Perencanaan ini meliputi identifikasi karakteristik mesin mobil, dimensi dan ukuran *throttle body*, jenis *converter kits* yang sesuai dengan karakter mesin dan desain lay out pada kendaraan. Lay out ini meliputi rencana penempatan *vaporizer* dan selang air, perencanaan perpipaan, penempatan tangki LPG, penempatan *filling point*, *fuel selector*, dan identifikasi jalur pengkabelan. Sebuah perangkat konversi (*converter kits*) disajikan dalam Gambar 4.1. sebagai berikut.



**Gambar 4.1 CML LPG kits dengan tangki model tabung**  
(Sumber : IWEMA Interprise)

#### **4.1. Perencanaan**

Tahap perencanaan merupakan proses awal (studi pendahuluan) untuk mengidentifikasi kendaraan dan *converter kits* alternatif yang akan digunakan. Beberapa pengamatan perlu dilakukan secara teliti, termasuk mempelajari sistem yang bekerja pada kendaraan yang akan dikerjakan. Beberapa kendaraan memiliki

sistem kelengkapan mesin yang sangat kompleks dengan konstruksi yang sangat kompak. Pekerjaan perencanaan konversi disajikan dalam Tabel 4.1 sebagai berikut.

**Tabel 4.1 Perencanaan Instalasi**

No	Pekerjaan	Data dan informasi yang diperoleh
1	Identifikasi jenis dan tipe kendaraan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kapasitas mesin (cc )</li> <li>• Tipe mesin, karburator atau EFI</li> <li>• Sistem pemasukan, hisapan biasa atau <i>turbo charger</i></li> </ul>
2	Observasi tata letak	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Observasi kecukupan ruang untuk menempatkan komponen <i>converter kits</i></li> <li>• Posisi selang radiator (<i>water house</i>) dan selang <i>by-pass</i></li> <li>• Bentuk dan ukuran <i>throttle body</i> atau <i>air horn</i></li> <li>• Bentuk saluran udara (<i>air duct</i>) dan saringan udara (<i>air filter</i>)</li> </ul>
3	Pemilihan <i>converter kits</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kesesuaian ukuran <i>water house</i></li> <li>• Bentuk dan ukuran <i>mixer</i></li> <li>• Mode <i>fuel selector, pull-push</i> atau switch 3 posisi</li> <li>• Bentuk dan ukuran tabung</li> <li>• Jenis <i>filling point</i></li> </ul>

#### 4.1.1. Identifikasi Jenis Kendaraan

Identifikasi kendaraan sangat diperlukan pada proses perencanaan. Ada suatu jenis *converter kits* yang dapat melayani volume mesin dari 500 cc sampai 4000 cc. Jenis lain mungkin hanya bisa melayani kapasitas 1000 cc sampai maksimal 2000 cc, dan yang lainnya lagi hanya cocok diterapkan pada mesin dengan kapasitas tertentu. Manual book dan parts catalog kendaraan sangat membantu dalam pekerjaan observasi.

Identifikasi berikutnya adalah mengenai jenis sistem bahan bakarnya, karburator atau EFI. Ini berkaitan dengan pemilihan *Mixer, fuel selector* dan katup solenoid. Mesin Injeksi umumnya memiliki ujung *throttle body* yang lebih panjang, sedangkan *air horn* pada karburator lebih pendek. Beberapa tipe karburator menggunakan baut memanjang pada sisi depan untuk mengikat box filter udara. Pada karburator tipe ini, cocok untuk menggunkan mixer dengan baut

pengikat ditengah. Sementara untuk mesin injeksi, tidak terdapat baut tanam pada sisi depan *throttle body*, sehingga harus menggunakan mixer dengan baut pengikat yang terletak pada bagian samping. Namun demikian, beberapa model mixer memiliki kombinasi baut pengikat disamping dan ditengah.

Mesin karburator lebih cocok menggunakan *fuel selector* 3 posisi (LPG-Netral-Petrol) untuk memudahkan pengoperasian. Ini dikarenakan pada mesin karburator harus menghabiskan dulu sejumlah bensin yang ada dalam ruang pelampung sebelum dipindahkan pada mode LPG. Beberapa jenis mesin sangat sensitif terhadap konsentrasi campuran bahan bakar-udara yang disuplai. Suatu mesin dengan sistem pengapian yang kuat dapat membakar dengan baik pada campuran kaya (*Rich*), namun beberapa tipe mesin yang lain hanya dapat membakar campuran bahan bakar-udara pada range campuran tertentu.

Sementara untuk mesin injeksi lebih cocok menggunakan *fuel selector* 2 posisi (LPG-Petrol). Mesin injeksi sangat responsif terhadap perubahan jenis bahan bakar. Saat pompa bahan bakar dimatikan, sesaat itu juga injeksi akan dihentikan dan LPG dialirkan dari *vaporizer*. Saat mode dipindah dari petrol ke LPG, solenoid LPG menutup aliran gas dan pompa bahan bakar bekerja.

Pada mesin hisapan biasa, pemasukan LPG ke mesin distur oleh kevakuman *intake manifold*. Hal ini tidak berlaku pada mesin dengan sistem pemasukan yang dipaksa dengan *turbocharger* atau kompresor. Pada mesin *turbocharger*, mixer tidak dapat dipasang pada *throttle body* karena hisapan terjadi pada sisi depan kompresor. Namun demikian, jika mixer dipasang pada mulut kompresor akan membuat jarak yang terlalu panjang antara mixer dengan silinder mesin. Ini akan berefek negatif, sehingga *converter kits* konvensional (CM) tidak cocok untuk mesin dengan sistem pemasukan *turbocharger* atau *supercharger*.

#### **4.1.2. Observasi Tata Letak (*Lay Out*)**

Beberapa jenis mobil modern diproduksi dengan memperhitungkan kemungkinan untuk dioperasikan dengan mode *bi-*

*fuel* (LPG/Petrol atau CNG/petrol), walaupun perangkat bahan bakar gas belum terpasang. Sebagai contoh, mobil produksi Korea yang dipasarkan di negaranya sudah dipasang perangkat *bi-fuel*, namun yang dipasarkan di beberapa negara yang belum tersedia infrastruktur bahan bakar gas belum dilengkapi perangkatnya. Pada mobil jenis ini, proses pemasangan *converter kits* menjadi lebih mudah dan kompak.

Umumnya, mobil yang dipasarkan di Indonesia belum mengakomodasi sistem bahan bakar gas. Untuk itu, observasi tata letak menjadi bagian pekerjaan yang sangat penting. Ini berkaitan dengan dimensi tabung LPG, braket, *vaporizer*, *water house*, dan komponen lainnya. Untuk mobil sedan dan *pick-up*, penempatan tabung LPG tidak menjadi kendala karena tersedia ruang bagasi yang luas dan terisolasi dengan ruang penumpang. Hal ini berbeda dengan mobil jenis station dan minibus yang terkadang tidak cukup ruang untuk menempatkan tabung LPG. Salah satu alternatif solusi diletakkan pada bagian bawah kendaraan dekat dengan tangki bahan bakar.

Observasi berikutnya dilakukan pada bagian mesin. Salah satu dari pengamatan ini untuk mengidentifikasi sistem pendinginan. Beberapa jenis mesin memiliki saluran *by-pass* dengan ukuran selang (*water house*) yang sesuai dengan jalur air pada *vaporizer*. Kondisi ini sangat memudahkan dalam proses instalasi. Namun demikian jenis mesin yang lain seperti Toyota Soluna 4A-FE misalnya, tidak terdapat saluran *by-pass* pada sistem pendinginannya. Pada kasus seperti ini, harus dibuatkan saluran air yang membagi laju aliran air pendingin pada bagian *upper water house*. Contoh pemasangan *water house* disajikan dalam Gambar 4.2 sebagai berikut.



**Gambar 4.2 Vaporizer dengan selang air (water house) berukuran kecil**

Pada sisi *throttle body* dan *air ducting*, observasi diperlukan untuk memeriksa seberapa besar ukuran diameter *throttle body*. Mixer standar memiliki ukuran diameter tertentu sesuai dengan ukuran *throttle body* dan karburator. Beberapa jenis mixer memiliki ketebalan yang cukup untuk dilakukan pembesaran diameter dengan mesin bubut, namun jenis yang lain sangat tipis dan rawan pecah jika dilakukan perubahan dimensi.

Pada mesin dengan karburator solex (lihat Gambar 4.3), memiliki diameter *air horn* yang sangat besar dengan posisi box filter udara yang pipih. Beberapa jenis karburator memiliki bentuk *air horn* oval. Mixer standar tidak dapat digunakan pada karburator model ini. Untuk itu perlu mixer dengan desain khusus.



**Gambar 4.3 Karburator solex dengan bentuk *air horn* oval**

#### **4.1.3. Pemilihan *Converter Kits***

Tahap ketiga dari proses perencanaan adalah pemilihan *converter kits*. Pemilihan *converter kit* didasarkan pada beberapa pertimbangan sebagai berikut :

- Dimana tabung LPG akan diletakkan?
- Bagaimana bentuk filling point-nya?
- Berapa kapasitas vaporizer ?
- Bagaimana dengan ukuran water house-nya?
- Apa jenis sistem bahan bakarnya ?
- Bagaimana sistem fuel selector-nya akan dibuat?

Pekerjaan yang harus dilakukan sebelum melakukan instalasi adalah melakukan pemeriksaan secara menyeluruh (*general inspection*) terhadap kendaraan yang akan dikerjakan, peralatan, dan *converter kits* yang akan dipasang. Secara terperinci, pekerjaan instalasi dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut.

**Tabel 4.2 Instalasi *converter kits***

No	Tahap	Pekerjaan
1	Persiapan	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Persiapan kendaraan</li> <li>● Persiapan peralatan</li> <li>● Persiapan bahan</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>● Persiapan alat keselamatan kerja</li> </ul>
2	Memasang tabung LPG	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pemasangan braket pada chassis</li> <li>● Pemasangan tabung</li> <li>● Pemasangan <i>filling point</i> dan <i>coupling</i></li> </ul>
3	Memasang sistem perpipaan	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Perencanaan jalur perpipaan/ <i>LPG house</i></li> <li>● Pengikatan</li> </ul>
4	Memasang <i>vaporizer</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pengaturan posisi <i>vaporizer</i></li> <li>● Pemasangan <i>water house</i></li> <li>● Pemasangan solenoid</li> </ul>
5	Memasang mixer	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Penyesuaian ukuran</li> <li>● Pemasangan katup akselerasi</li> </ul>
6	Memasang <i>fuel selector</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Identifikasi wiring diagram</li> <li>● Pengaturan kabel</li> </ul>
7	Pemeriksaan	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pengujian switch</li> <li>● Pemeriksaan tekanan output</li> <li>● Pemeriksaan kebocoran LPG</li> </ul>

#### 4.1.4. Persiapan Kerja

Pemasangan *cover set* (lihat Gambar 4.4) menjadi bagian dari keselamatan kerja untuk melindungi body kendaraan dari kemungkinan tergores atau terbentur. Pemasangan *cover set* ini merupakan bagian dari mitigasi resiko kerja.



**Gambar 4.4 Pemasangan *cover set***

Hasil instalasi *converter kits* sangat dipengaruhi oleh kondisi mesin mobil. Pemeriksaan kondisi mesin secara menyeluruh perlu dilakukan sebelum memulai pekerjaan. Beberapa hal yang perlu diperiksa adalah kondisi minyak pelumas, air pendingin, selang pernafasan mesin, kondisi baterai, dan suara mesin. Jika belum memenuhi standar, lakukan penyetelan mesin dan perbaikan komponen dan sistem. Pada mesin Injeksi (EFI) akan lebih baik jika dilakukan pemeriksaan mesin menggunakan *engine scanner* untuk melihat *service data* dan untuk memperoleh informasi kondisi mesin. Contoh *service data* mesin disajikan pada Gambar 4.5 sebagai berikut.

HYUNDAI NEW AVANTE XD ECM 2.0			
01	O2 SENSOR(B1/S1)	858.9	mV
02	O2 SENSOR(B1/S2)	780.8	mV
03	AIR FLOW SENSOR	0.9	Kg/H
04	BATTERY VOLTAGE	13.4	V
05	COOLANT TEMP. SENSOR	60.0	°C
06	CTS VOLTAGE	4980	mV
07	OIL TEMPERATURE	104.0	°C
08	OIL TEMP. VOLTAGE	4980	mV
09	IAT SENSOR	10.5	°C
10	IAT SNSR. VOLTAGE	3125	mV
F1 FIX			

**Gambar 4.5** *Service data* pada display *engine scanner*

Persiapan selanjutnya berkaitan dengan peralatan kerja. Pastikan seluruh peralatan yang akan digunakan telah disediakan dan dalam kondisi yang baik. Dalam instalasi ini ada tiga kelompok peralatan yang harus tersedia yaitu peralatan kerja, peralatan ukur dan peralatan keselamatan kerja.

Peralatan kerja terdiri dari *tools set*, mesin bor tangan, mesin gerinda tangan, hand tools dan *special service tools* (SST) untuk pekerjaan perpipaan. Peralatan ukur yang digunakan antara lain multimeter, *pressure gauge*, *vernier caliper*, dan *engine gas analyzer*. Multimeter, *pressure gauge*, dan *engine gas analyzer* harus dalam kondisi

terkalibrasi. Alat pemadam kebakaran harus tersedia dalam kondisi siap pakai sebagai bagian dari peralatan keselamatan kerja.

Tahap terakhir dari persiapan *converter kits* dan material pendukungnya. *Manual book* dari kendaraan yang akan dikerjakan sangat diperlukan sebagai sumber informasi letak komponen, ukuran, dan diagram perkabelan.

#### **4.2. Keselamatan Kerja**

1. LPG diklasifikasikan sebagai bahan berbahaya. Secara hukum, *Material Safety Data Sheet* (MSDS) harus tersedia dan dapat diakses oleh semua karyawan di tempat kerja, dimanapun bahan berbahaya dipindahkan, disimpan, atau digunakan. MSDS untuk LPG tersedia dari pemasok atau distributor.
2. LPG dalam atmosfer adalah mudah terbakar dalam batas flammability limitnya. Titik dimana LPG dipindahkan atau diletakkan harus setidaknya 8 meter dari sumber pengapian dan setidaknya 10 meter dari pengerindaan logam atau operasi las. Semua orang yang tidak berkepentingan harus dijaga setidaknya 8 meter.
3. Semua pelepasan LPG dari tabung harus dilakukan di luar ruangan dan di area berventilasi baik. Orang lain (selain petugas) di daerah tersebut disarankan agar tetap berada di luar area untuk mencegah adanya sumber api yang tidak teridentifikasi, misalnya menyulut rokok dan sebagainya.
4. Gas yang dibuang dalam kondisi terkendali harus dibakar dalam kondisi yang terkendali atau ditangkap dan dikembalikan ke tangki tambahan untuk alasan keamanan dan lingkungan.
5. LPG tidak berwarna dan tidak berbau dalam keadaan alami. LPG adalah gas yang tidak beracun, tetapi jika terhirup dalam jumlah yang cukup, dapat menyebabkan disorientasi atau akhirnya kematian karena kekurangan oksigen. Zat pembau buatan, biasanya etil mercaptan (senyawa berbasis belerang) ditambahkan ke LPG sebelum distribusi untuk alat bantu deteksi kebocoran.

6. Karena LPG (gas) lebih berat daripada udara, konsentrasi terbesar LPG dan campuran udara-LPG yang mudah terbakar mungkin awalnya berada di permukaan tanah, sehingga bau awalnya hampir tidak terdeteksi pada tingkat yang lebih tinggi atau di daerah sekitarnya.
7. Tekanan bisa melebihi 300 psig dalam tangki. Tekanan bervariasi terhadap temperatur udara di sekitar tangki karena sistem exhaust, radiasi matahari atau pantulan panas dari permukaan jalan.
8. Ketika LPG cair dilepaskan ke tekanan di bawah tekanan penyimpanan, LPG akan menguap, menyerap panas dari sekitarnya, dan suhunya sesaat menurun drastis. Jika tekanan dibiarkan turun menjadi nol, LPG akan mendinginkan secara otomatis ke titik didihnya, yaitu -42 sampai -44°C. Kontak dengan LPG cair bisa menyebabkan radang pada kulit. Paparan LPG cair harus dicegah dengan memakai pakaian pelindung yang sesuai, termasuk sarung tangan dan kacamata pengaman.
9. Penggunaan alat pelindung diri bersifat “wajib” ketika memasang atau menservis sistem atau tangki bahan bakar LPG.
10. Mengebor, menggerinda, mengelas, dan bekerja di bawah kendaraan dapat menghasilkan percikan, kotoran, dan serpihan. Kacamata pengaman wajib digunakan
11. Tindakan pencegahan khusus harus digunakan dan dijaga untuk mencegah cedera, termasuk memakai sarung tangan pelindung, kacamata pengaman, dan pelindung pendengaran.

#### **4.3. Bagian 1: Inspeksi/Validasi Sebelum Konversi**

##### **4.3.1. Memvalidasi Kendaraan Sebelum Konversi**

Kendaraan yang sedang dipertimbangkan untuk konversi ke LPG harus dilakukan *screening* dengan hati-hati untuk memastikan hasil yang memuaskan. Tidak semua kendaraan bisa atau harus dikonversi. Daftar periksa pra-konversi ini akan membantu mekanik/

konsemen memutuskan apakah kendaraan itu bisa dikonversi atau tidak.

#### **4.3.2. Daftar Periksa Pra-Konversi**

Pelanggan harus diberi tahu bahwa setiap kerusakan pada kendaraan harus diperbaiki sebelum konversi. Kendaraan mungkin ditolak untuk konversi jika cacat dan tidak dapat diperbaiki.

Pelanggan terkadang keliru menganggap bahwa:

- Kendaraan bekas yang telah dikonversi menjadi LPG akan dikembalikan ke kondisi baru;
- Setiap kerusakan kendaraan yang ada akan diperbaiki selama konversi; dan
- Fasilitas konversi akan memperbaiki kerusakan komponen apapun setelah kendaraan beroperasi dengan LPG, bahkan jika kegagalan tidak terkait dengan konversi.

Pemeriksaan pra-konversi harus dilakukan pada setiap kendaraan yang akan dikonversi, termasuk kendaraan baru, untuk menghindari kesalahpahaman atau membuang-buang waktu dan sumber daya pada saat konversi.

#### **4.3.3. Konversi Kendaraan Dengan Jarak Tempuh Tinggi**

Fasilitas konversi harus mempertimbangkan pemeriksaan menyeluruh terhadap kompartemen mesin, termasuk suara, kebocoran atau asap, sebelum mengkonversi kendaraan dengan jarak tempuh lebih dari 100.000 km. Analisis oli mesin juga sangat disarankan.

- Tes kompresi sebaiknya dilakukan pada kendaraan dengan jarak tempuh tinggi. Setiap pembacaan kompresi yang bervariasi lebih dari 15 % dari pembacaan tertinggi harus didiskualifikasi dari konversi. Uji kompresi basah dan kering dapat menunjukkan di mana keausan mesin berada.
- Setiap kendaraan yang menunjukkan asap putih, biru, atau hitam terlihat saat distart harus didiskualifikasi dari konversi. Bagian

knalpot seharusnya tidak memiliki jelaga atau film gelap berminyak atau lembab di dalam pipa. Bagian knalpot harus kering.

- Sambungkan *engine scanner* ke port konektor diagnostik. Periksa dan verifikasi kode masalah diagnostik terkini (*Diagnostic Throuble Code*, DTC) atau yang menunggu keputusan. Semua harus normal.
- Periksa transmisi. Analisis cairan transmisi sangat dianjurkan, tidak boleh ada kebocoran.
- Periksa sistem pendingin. Verifikasi kondisi radiator, semua selang dan pengikatnya, serta *recervoirnya*. Periksa jika ada korosi yang terlihat dalam sistem pendingin, dan pastikan bahwa kipas pendingin mesin beroperasi dengan benar.
- Periksa sistem pembuangan, termasuk *manifold*, pipa knalpot, *catalytic converters*, *muffler* dan *tailpipes*. Verifikasi dan dokumentasikan modifikasi pada sistem pembuangan.
- Periksa rem dan catat kondisi abnormal termasuk kinerja pengereman, kebisingan, dan kebocoran jika ada.

#### **4.3.4. Pre-Conversion Test Drive**

##### **Inspeksi start dingin dan start panas**

Suhu dingin berarti setidaknya empat jam sejak *re-start* terakhir. Suhu panas berarti tidak lebih dari 10 menit sejak *re-start* terakhir setelah operasi temperatur penuh. Pastikan bahwa temperatur kerja mesin normal.

##### **Test idle**

Kendaraan harus mampu berputar stasioner sekurangnya 30 detik, lancar tanpa naik turun, beroperasi tanpa masalah, dan tidak mati.

##### **Test akselerasi**

Dari keadaan idling, kendaraan harus dicoba ke jalan raya dengan akselerasi penuh tanpa *overrunning*. Perhatikan suara mesin, suara dapat mengindikasikan keausan atau kerusakan pada mesin.

### Test kecepatan dan kestabilan

Tes ini harus memberikan informasi tentang kelaikan jalan, keseimbangan ban atau roda dan *cruise control*, jika dilengkapi.

### Test kemampuan pengereman

Pada kecepatan sedang, tekan dengan kuat pedal rem untuk menghentikan tanpa mengunci rem. Ini menguji kemampuan kendaraan untuk mengerem dengan lancar tanpa suara yang tidak biasa.

### Test deselerasi

Kendaraan harus mampu melakukan deselerasi dengan lembut.

Beberapa item yang ditunjukkan pada daftar periksa ini mungkin menunjukkan bahwa kendaraan telah dimodifikasi di luar spesifikasi aslinya atau peralatan tambahan telah dipasang. Inspeksi juga harus mencoba untuk mengidentifikasi pekerjaan tambahan atau biaya yang akan diperlukan di luar konversi normal. Semua daftar periksa harus memiliki akses bagi pelanggan untuk melihat, untuk memverifikasi bahwa pelanggan mengenali item dan kerusakan yang ada. Kendaraan tidak boleh dikonversi tanpa tanda tangan pelanggan.

#### 4.3.5. Pencatatan Spesifikasi Kendaraan

Sebelum melakukan konversi, langkah pertama adalah mengidentifikasi dengan jelas kendaraan dalam bentuk formulir. Dokumen formulir ini harus mencakup minimal:

<i>Vehicle Owner</i>	Bagian ini diisi dengan nama pemilik kendaraan, bukan supir. Jika kendaraan pribadi, tuliskan nama pemilik dan jika armada, gunakan nama perusahaannya.
<i>Vehicle Address</i>	Kolom ini mungkin memerlukan dua atau lebih entri. Entri utama harus berupa alamat penagihan, alamat kedua mungkin berada di tempat kendaraan berada, seperti alamat pool taksi.
<i>Vehicle Make and Model</i>	Ini harus secara jelas mengidentifikasi jenis kendaraan, misalnya, Chevrolet atau Ford, dan modelnya, misalnya, C-1500 atau F-150.
<i>Body Style</i>	Ini harus mengidentifikasi jenis body, misalnya, king cab, super crew, extended cab, station wagon, SUV, CUV, cab and chassis.
<i>Vehicle License</i>	Lakukan copy nomor lisensi kendaraan atau STNK

<b>Number</b>	
<b>Vehicle Mileage</b>	Catatlah pembacaan odometer aktual seperti yang ditunjukkan pada dasbor/ meter kombinasi. Beberapa kendaraan mungkin mengindikasikan jarak tempuh kendaraan selama uji OBD-II. Kedua nomor itu harus sesuai. Masukkan pembacaan odometer tambahan saat konversi selesai, untuk menunjukkan sejauh mana kendaraan dijalankan selama pengujian.
<b>Vehicle Color</b>	Ini untuk kemudahan identifikasi. Jika dalam satu waktu ada banyak kendaraan dengan model dan tipe yang sama saat konversi.
<b>Date</b>	Tanggal kendaraan masuk ke bengkel untuk konversi. Perhatikan juga: <ul style="list-style-type: none"> <li>● tanggal dan waktu dimulai konversi,</li> <li>● tanggal dan waktu selesai konversi,</li> <li>● tanggal dan waktu selesai inspeksi konversi,</li> <li>● Tanggal dan waktu pelanggan dipanggil untuk pemberitahuan penyelesaian, dan</li> <li>● Tanggal dan waktu pelanggan menerima kendaraan.</li> </ul>
<b>Gasoline Fuel Level</b>	Sebagai rasa hormat kepada pelanggan, ini membantu menyelesaikan pertanyaan tentang jumlah bahan bakar yang ada di dalam kendaraan pada saat masuk bengkel.
<b>Customer Sign Off</b>	Di kolom ini pelanggan mengenali kondisi kendaraan dan menyerahkan kendaraan tersebut ke pusat konversi/ bengkel.
<b>Comment Section</b>	Semua formulir harus menyertakan bagian "komentar".

#### 4.3.6. Daftar Periksa Kendaraan Setelah Diserahkan oleh Konsumen

Daftar periksa harus mencakup pemeriksaan kendaraan menyeluruh, termasuk semua hal berikut.

1. Foto kendaraan dari keempat penjuru; pastikan bahwa setiap tanda identifikasi (plat nomor, nomor ID pintu, dll.) terlihat. Dokumentasikan jika ada kondisi abnormal apapun.
2. Periksa terhadap panel dan instrumentasi kendaraan
  - Semua panel bodi dari cat yang tidak rata, yang mungkin mengindikasikan perbaikan setelah kecelakaan;
  - Semua panel bodi dari kemungkinan penyok, goresan, cacat, atau cacat lainnya;

- Semua jendela depan dan belakang dan kaca pintu dari kemungkinan terdapat goresan;
  - Semua pintu, check operasi jendela dan penguncian;
  - Semua lampu ekterior dan interior;
  - Semua perangkat instrument kendaraan yang mungkin mengindikasikan perubahan sistem pengkabelan atau perubahan lain pada kendaraan yang mungkin mempengaruhi konversi;
  - Aksesoris interior, termasuk: AC, radio atau fitur hiburan lainnya (CD, DVD, MP3, GPS, Nav-Con), dan peralatan komunikasi atau darurat tambahan; dan
  - Merk ban, kedalaman, rating yang tepat untuk kendaraan, dan periksa ukuran ban yang berbeda atau ukuran ban tidak sesuai.
3. Mesin dan *Driveline*
- Mesin harus dapat dihidupkan dengan mudah, tanpa asap dan suara abnormal.
  - Transmisi harus bisa dipindahkan tanpa suara, kebocoran, atau selip.
  - Lampu peringatan tekanan minyak, sistem pengisian daya, dan lampu peringatan lain harus normal.
4. Modifikasi komponen bawah kendaraan (*under-hood*)
- Baterai tambahan
  - Sirene
  - Alarm
  - Radio atau perangkat komunikasi lainnya
5. Sistem kelistrikan dan emisi
- Periksa dan verifikasi pengoperasian sistem pengisian kendaraan dengan benar, termasuk baterai dan alternator.
  - Lakukan *On-Board Vehicle Diagnostic Code test*. Dokumentasikan dan perbaiki kode masalah diagnostik aktif atau yang menunggu keputusan sebelum konversi. Kendaraan dengan DTC aktif tidak boleh dikonversi.

#### 4.4. Bagian 2: Memasang *Fuel Tank* dan *Fuel Line*

##### 4.4.1. Jenis Tangki LPG

Perlu diketahui, semua tangki LPG untuk kendaraan telah didesain khusus dengan spesifikasi yang distandarkan (Lihat Gambar 4.6). Tangki dipilih untuk instalasi tertentu berdasarkan jenis sistem bahan bakar [46]. Dua jenis tank yang umum digunakan:

- *Vapor pressure type*: Tangki yang menggunakan tekanan uap LPG untuk mendorong bahan bakar cair ke mesin untuk dikonversi menjadi uap. Tipe ini misalnya untuk jenis CM dan VPI LPG kits.
- *Integral pump type*: Tangki yang menggunakan pompa bahan bakar integral untuk meningkatkan tekanan output yang dibutuhkan. Jenis ini dipakai untuk LPI dan LPDI LPG kits.



Gambar 4.6 Contoh *multivalve* pada tangki LPG

Katup yang ditunjukkan pada Gambar 6 adalah sebagai berikut:

a. *Fill Valve*

Katup digunakan untuk mengisi tangki dengan LPG cair.

b. *80 Percent Outage Valve (Fixed Maximum Liquid Level Gauge)*.

Katup ini bisa dibuka selama mengisi untuk menunjukkan kapan tangki terpenuhi 80 persen dengan melepaskan sedikit aliran cairan LPG.

c. *Vapor Service Valve*.

Digunakan untuk membersihkan uap dari tangki selama pemasangan awal.

d. *Liquid Service Valve*

Digunakan untuk memasok LPG cair ke mesin (katup outlet).

e. *Pressure Relief Valve*

Ventilasi uap LPG jika tekanan di tangki melebihi nilai preset, biasanya 312 psig.

Bentuk *multivalve* yang lain ditunjukkan pada Gambar 4.7 sebagai berikut.



**Gambar 4.7** *Multivalve* pada tangki LPG jenis LPI

#### 4.4.2. Pertimbangan Penempatan Tangki

Penempatan di bagian bawah bodi kendaraan memerlukan pertimbangan yang cermat antara jarak tangki terhadap komponen suspensi yang bergerak, komponen yang menghasilkan panas, dan *ground clearance* kendaraan.

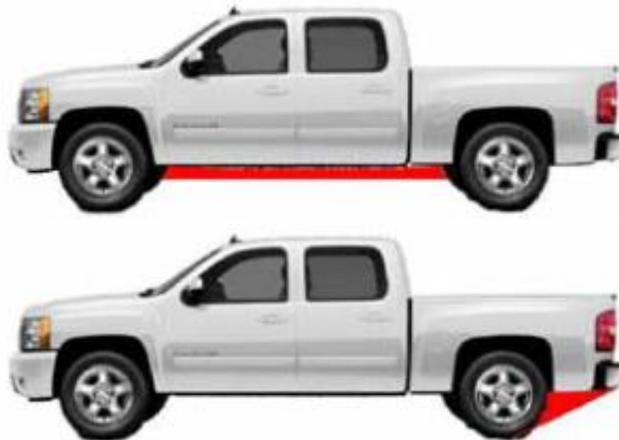
- **Panas**

Sebuah tangki LPG harus berada pada jarak paling tidak 18 inci dari komponen yang menghasilkan panas kecuali ditambahkan baffle yang tidak mudah terbakar (pelindung panas) yang ditempatkan di antara keduanya. Pelindung panas dapat dibuat dari logam lembaran, aluminium, stainless steel, pembungkus logam komposit, atau kain tahan panas dan tahan api.

- **Perlindungan Benturan**

Selain pelindung panas, perlu ditambahkan pelindung untuk mencegah impact atau benturan dari kerikil kerikil yang mungkin terlempar mengenai tangki saat kendaraan berjalan. Pelindung benturan ini dapat dibuat dari lembaran logam atau pelat baja. Namun demikian, akses ke katup kontrol manual dan katup pelepas tekanan jangan sampai terhambat dengan adanya pelindung ini.

Tangki dan perlengkapannya (*valves, guards, fittings, and hoses*) hanya boleh masuk ke area yang diarsir di belakang ban belakang, dari garis tengah as roda belakang hingga bagian terendah komponen tidak bergerak sebuah kendaraan. Perhitungan ini juga harus dilakukan dengan mempertimbangkan kendaraan saat dikenai beban maksimal, yaitu saat suspensi pada tingkat terendah.



**Gambar 4.8 Tank clearance, bagian yang diarsir merupakan daerah yang aman untuk penempatan tangki**

#### **4.4.3. Pembersihan (*Purging*)**

Tangki LPG harus dibersihkan sebelum dipasang atau diisi. Pabrik tangki sering memasukkan sejumlah kecil nitrogen ke dalam tangki untuk menekan tangki dan mencegah korosi. Pembersihan bisa dilakukan dengan memasukkan uap LPG ke dalam tangki kemudian membuangnya untuk melepaskan *gas inert* ini dan juga udara dan uap air yang mungkin masuk ke dalam tangki jika katup dibuka antara pembuatan dan pemasangan.

Sebuah tangki LPG yang belum dibersihkan dengan benar akan sulit untuk mengisi dengan tingkat pengisian yang tepat karena ada udara yang terjebak. Yang lebih penting lagi, udara dalam tangki akan menyebabkan tekanan melonjak, karena udara tidak mencair seperti uap LPG dibawah tekanan uapnya. Lonjakan tekanan bisa menyebabkan *relief valve* mengeluarkan campuran yang mudah terbakar. Selain itu, udara mengandung uap air, yang akan merugikan pengoperasian sistem.

#### **4.4.4. Persyaratan dan Pilihan Instalasi**

Sebuah tangki LPG harus dilekatkan pada kendaraan dengan pengencang/ pemegang yang sesuai untuk mencegah dari kendur, tergelincir, atau memutar. Pengencang harus menahan dengan kuat tanpa deformasi permanen dengan kekuatan empat kali berat tangki yang diisi penuh (faktor keamanan). Misalnya, jika tangki penuh berbobot 350 lbs., maka pemegang tangki harus tahan terhadap gaya statis sebesar empat kali beratnya, yaitu 1,400 lbs., dalam enam arah ke atas, ke bawah, ke kiri, kanan, depan, dan belakang tanpa selip atau terjadi deformasi pada pengencang/ pemegang. Lebih lanjut, *Canadian Code* (B149.5) mensyaratkan bahwa semua pengencang memiliki kekuatan minimum yang mampu menahan tangki dengan kekuatan 20 kali berat wadah penuh secara vertikal, dan 8 kali berat tangki penuh ke arah manapun secara horisontal.

#### **Penempatan tangki LPG pada *pick up***

Tangki LPG bisa dicat agar sesuai dengan warna kendaraan. Lapisan cat juga melindungi terhadap korosi. Setiap pengeboran atau

pemotongan yang menghasilkan tepi logam terbuka di badan kendaraan harus dilindungi oleh senyawa anti korosi yang sesuai. Senyawa/ *compound* anti karat ini tersedia di toko-toko *spareparts* otomotif. Contoh pemasangan tabung LPG pada mobil *pick up* disajikan pada Gambar 4.9 sebagai berikut.



**Gambar 4.9** Pemasangan tangki pada jenis *pick up*

### **Penempatan tangki LPG pada kolong kendaraan**

Tangki LPG yang ditempatkan di bawah kendaraan memiliki tantangan dan persyaratan unik. Di antara yang paling penting adalah *ground clearance*, terutama saat kendaraan terisi penuh. Isolasi dari knalpot atau komponen penghasil panas lainnya juga penting. Jika tangki berada di belakang as roda belakang, harus berada di atas garis yang ditarik dari bagian tengah gandar belakang pada titik di mana ban belakang menyentuh tanah ke titik tetap terendah dari kendaraan,

biasanya bumper belakang. Memasang tangki di atas garis ini membuat tangki aman saat berada pada jalan yang tidak datar seperti saat melewati *speed bump* (lihat Gambar 4.8).

Jika tangki terletak kurang dari 18 inchi ke komponen penghasil panas (sistem pembuangan, mesin, transmisi, kondensor AC), harus ditambahkan pelindung panas untuk tangki (Lihat Gambar 4.10).



**Gambar 4.10 Pemasangan pelindung panas**

### **Penempatan tangki LPG pada bagasi belakang**

Persyaratan pemasangan untuk tangki LPG yang berada di dalam kendaraan berbeda dari tangki pada bak *pick up* atau yang dipasang pada chassis di kolong kendaraan. Tangki LPG yang terletak di dalam kendaraan harus memiliki penghalang atau segel uap yang menahan kebocoran dari katup atau alat kelengkapan agar tidak memasuki ruang penumpang. Pembatas ini biasanya berbentuk kotak logam atau peralatan serupa yang berada di sekitar katup dan alat kelengkapan pada tangki.

Akses ke katup dan alat kelengkapan diperoleh dengan membuka panel segel uap tersebut. Tangki dengan segel uap dirancang oleh produsen secara khusus agar panel dapat dibuka tanpa peralatan, cukup dengan tangan. Beberapa produsen menyediakan kotak segel uap yang bisa ditambahkan ke tangki. Dalam kasus ini, baik tutup segel uap dan tangki dirancang khusus. Semua katup dan

alat kelengkapan terletak di dalam kotak segel uap, dan semua jalur bahan bakar terkait harus disalurkan melalui saluran atau tabung fleksibel yang disegel ke dalam kotak tangki. Selain itu, ujung tabung saluran harus diamankan ke kendaraan dengan flens atau perlengkapan lain yang sesuai. Praktik ini memastikan pemasangan yang kencang. Gambar 4.11 menunjukkan tangki yang dipasang di bagasi dengan kotak segel uap dan selang ventilasi yang disalurkan melalui selang ventilasi besar atau pipa saluran.



**Gambar 4.11** Pemasangan tangki di bagasi belakang

#### **4.4.5. Selang Bahan Bakar Pada Tangki**

Setidaknya ada tiga selang bahan bakar yang disalurkan melalui pipa saluran fleksibel:

- Selang bahan bakar mesin, biasanya 5/16 inchi;
- Selang pengisian bahan bakar, biasanya 1/2 inchi; dan
- Selang katup ventilasi tekanan ventilasi, biasanya 5/8 inchi

Pengkabelan untuk unit pengukur tingkat bahan bakar dan katup penutup bahan bakar yang dioperasikan secara elektrik juga akan disalurkan melalui saluran.

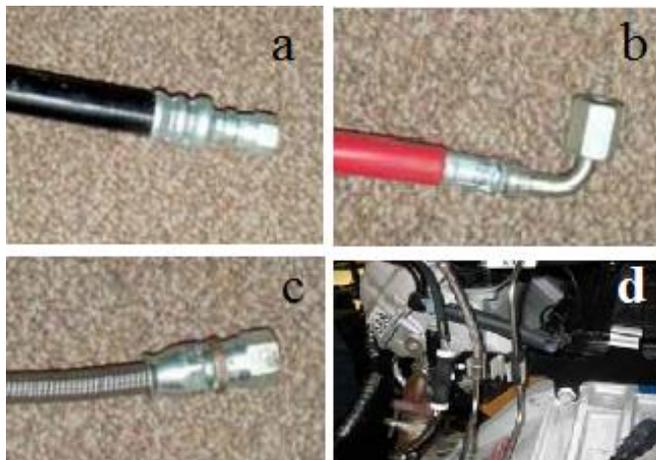
Tangki bahan bakar yang berada di dalam kendaraan memerlukan perangkat pengisian (*filling point*) dan alat pengukur tingkat cairan maksimum (*fuel gauge*) yang dipasang jauh dari tangki. Untuk mobil penumpang, harus memungkinkan kendaraan diisi ulang tanpa membuka bagasi atau membuka segel uap tangki (Contoh pada Gambar 4.12 berikut ini).



**Gambar 4.12 Contoh pengisian LPG (Vi-gas)**

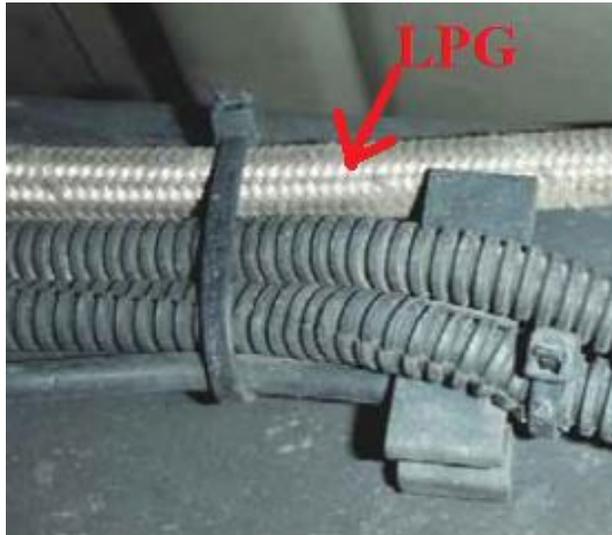
#### **4.4.6. Fuel Transfer Lines**

Sekarang, tersedia beberapa model dan jenis selang LPG, diantaranya *Type III hose*, *Composite hose*, *Stainless steel braid hose*, dan *OEM metal fuel lines*. Penggunaannya bisa dikombinasikan tergantung pada kondisi dan kebutuhan.



**Gambar 4.13 Contoh fuel line: (a) Type III hose, (b) Composite hose, (c) Stainless steel braid hose, dan (d) OEM metal fuel lines**

Selang LPG dari tangki ke mesin lebih baik diarahkan melalui jalur di dekat jalur bahan bakar dan pipa pipa rem yang ada, karena cenderung terlindungi dari benturan. Tali dari plastik (*zip ties*) bisa digunakan sebagai pengikat sepanjang jalur LPG agar terpasang kencang ke chassis.



**Gambar 4.14** Selang LPG yang dipasang dekat *fuel line* dengan zip ties

#### 4.4.7. Penggunaan *Conector*

*Conector* digunakan menancapkan selang LPG ke tangki dan ke *vaporizer* (tergantung jenisnya). Ini digunakan untuk menjamin LPG tidak bocor.



**Gambar 4.15** Tipe *conector*/ kopleng selang LPG

## 4.5. Bagian 3: Memasang Vaporizer

### 4.5.1. Tipe CM

#### Memasang Vaporizer

Tahap berikutnya adalah pemasangan vaporizer pada ruang mesin. Prinsipnya, semakin dekat dengan mixer semakin baik. Ini akan membuat selang output menjadi pendek. Pemasangan vaporizer harus memperhatikan posisi selang selang air dan baut baut penyetel. Posisi dan arah saluran air pada vaporizer dapat diatur dengan mengendorkan baut pengikat dan memutarinya.

Selang air dari vaporizer dihubungkan dengan selang by-pass pada sistem pendinginan. Pada mesin injeksi, dapat diambil pada saluran pemanas *intake manifold* atau ISC valve dengan memasangnya secara seri. Pastikan bahwa jalur *by-pass* yang diambil dapat mensirkulasikan air pendingin dengan lancar. Contoh pemasangan vaporizer pada ruang mesin disajikan pada Gambar 4.16.



**Gambar 4.16** Pemasangan vaporizer pada ruang mesin

Pada *vaporizer* terdapat *solenoid valve* untuk membuka dan menutup saluran LPG. Pada jenis tertentu dipasang solenoid tambahan untuk menjamin kerapatan saluran saat mesin berhenti atau berputar dengan mode bensin.

Satu solenoid bensin dipasang pada saluran bensin antara pompa bensin dengan karburator untuk menutup saluran saat mesin

beroperasi dengan mode LPG. Pada mesin EFI, solenoid bensin tidak dibutuhkan. Proses pemutusan aliran bensin dengan pengaturan pompa bensin dan injektor.

### **Memasang mixer**

Mixer dipasang pada *air horn* karburator atau *throttle body* untuk mesin EFI. Aliran LPG tekanan rendah dari vaporizer dialirkan ke mixer melalui sebuah katup akselerasi. Gambar 4.17 berikut menyajikan posisi mixer dengan katup akselerasi yang langsung dipasang pada mixer.



**Gambar 4.17 Pemasangan mixer dan katup akselerasi**

### **4.5.2. Tipe VPI**

Perbedaan tipe VPI dari tipe CM adalah pada penggunaan injektor. Pada VPI, LPG dari vaporizer dialirkan ke *intake manifold* dengan injektor yang dikontrol secara elektronik. Injektor LPG dipasang di blok atau rel. Rel ini dapat dibuat dari komposit yang diperkuat serat atau aluminium. Untuk itu, harus membuat nepel pada *intake manifold* untuk menyalurkan LPG dari injektor ke *intake manifold*. Pada tipe VPI, juga terdapat *fuel filter* untuk menyaring kotoran sebelum LPG dikirim ke injektor [47].

Selanjutnya, sebagai satu kelebihan pada tipe VPI, LPG yang disuplai ke mesin telah melalui pengaturan ECU-LPG yang bekerja

berdasarkan sensor-sensor yang dipasang pada mesin dan kompatibel dengan sistem injeksi mesin. Contoh injektor dan *fuel rail* pada VPI disajikan pada Gambar 4.18 dan cara pemasangannya ke *manifold* ditunjukkan pada Gambar 4.19. Sementara itu, *fuel filter* ditunjukkan pada Gambar 4.20.



**Gambar 4.18** Injektor LPG pada *fuel rail*



**Gambar 4.19** Injektor LPG dan saluran ke *manifold*



**Gambar 4.20 Fuel filter**

#### **4.5.3. Memasang Fuel Selector**

*Fuel selector* biasa dipasang pada *dashboard* atau panel samping pengemudi. Tujuannya supaya mudah dioperasikan. *Pemasangan fuel selector* biasanya dengan metode tempel atau bisa juga dengan baut. *Fuel selector* terdiri dari dua kelompok kabel yaitu kabel untuk memindahkan mode bahan bakar dan beberapa kabel untuk *fuel metering*.

#### **4.5.4. Pemeriksaan Instalasi**

Langkah terakhir dari tahap instalasi adalah pemeriksaan yang terdiri dari pemeriksaan kebocoran pemeriksaan tekanan, dan pemeriksaan kerja *fuel selector*. Sesaat setelah Instalasi terpasang, lakukan pemeriksaan pada setiap sambungan dengan leak detector. Jika leak detector tidak tersedia dapat dilakukan dengan air sabun. Pastikan seluruh sambungan tidak terjadi kebocoran sebelum dilanjutkan pada pemeriksaan tekanan output.

Tekanan output diukur dengan *pressure gauge* yang dipasang pada ujung saluran output dari *vaporizer*. Jika selang output sudah terlanjur disambungkan ke mixer, lakukan pelepasan dahulu. Pada saat Mode LPG dan solenoid bekerja, tekanan maksimal yang ada pada output harus berkisar antara 1,5 sampai 2 bar. Ada beberapa

model *vaporizer* yang dilengkapi dengan baut penyetel tekanan output. Jika tekanan output lebih rendah dari 1,5 bar atau lebih tinggi dari 2 bar, lakukan penyetelan pada *vaporizer*.

Selanjutnya adalah pemeriksaan *fuel selector*. Solenoid LPG harus aktif saat switch pada posisi mode LPG dan solenoid bensin atau pompa bensin harus aktif saat switch pada posisi petrol. Setelah semua prosedur dilakukan dan diperiksa baik, bahan bakar LPG siap digunakan.

#### **4.6. Pengoperasian dan Penyetelan**

Setelah memastikan semua komponen dapat berfungsi dengan baik dan tidak ada kebocoran gas, langkah selanjutnya adalah mencoba menghidupkan mesin dengan mode petrol dan mode LPG.

##### **4.6.1. Mencoba Menghidupkan Mesin**

Jika tekanan LPG dan semua instalasi baik, mobil langsung dapat dihidupkan dengan mode LPG. Namun demikian, khususnya mobil karburator biasanya tidak berhasil dihidupkan pada start pertama dengan mode LPG. Ini disebabkan pada karburator masih terisi bensin. Pada kondisi ini akan terjadi campuran yang bahan bakar yang berlebihan (bensin dan LPG masuk secara bersamaan).

Untuk mengatasi masalah tersebut dilakukan dengan cara memindahkan *fuel selector* ke posisi netral. Hidupkan mesin dengan putaran diatas stasioner (1200-1500 rpm). Tahan beberapa saat sampai mesin terindikasi seperti kehabisan bahan bakar. Pada kondisi ini, pindahkan *fuel selector* ke posisi LPG, jika mesin mati saat pindah mode LPG, lakukan penyetelan pada baut penyetel pegas lever pada *vaporizer*. Jika mesin berhasil hidup dengan mode LPG, lepaskan pedal gas dan amati putaran stasionernya. Jika mesin mati saat pedal gas dilepas, putar baut penyetel stasioner dan hidupkan mesin kembali untuk dilakukan penyetelan lebih lanjut.

##### **4.6.2. Menyetel Putaran Stasioner**

Setelah mesin berhasil dihidupkan, penyetelan pertama yang dilakukan adalah menyetel putaran stasioner.

### **Mesin karburator**

Tahan putaran mesin pada  $\pm 800$  rpm. Putar baut penyetel pegas lever pada *vaporizer* searah jarum jam sampai putaran mesin menurun. Putar kembali baut penyetel berlawanan arah jarum jam sampai didapat putaran tertinggi. Turunkan stasioner dengan memutar baut penyetel stasioner pada karburator sampai  $\pm 750$  rpm atau sesuai spesifikasi.

### **Mesin injeksi (EFI)**

Mesin EFI tidak terdapat baut penyetel stasioner. Jika mesin berhasil dihidupkan, putar baut penyetel pegas lever pada *vaporizer* searah jarum jam sampai putaran mesin menurun. Putar kembali baut penyetel berlawanan arah jarum jam sampai didapat putaran tertinggi. Jika putaran mesin berkisar pada  $\pm 1000$  rpm pada kondisi dingin, ini berarti normal. Tunggu beberapa waktu sampai mtemperatur kerja mesin tercapai. Amati putaran mesin, jika putaran mesin turun sampai  $\pm 800$  rpm menandakan setelan yang baik. Jika pada kondisi mesin panas, putaran stasioner tidak sesuai spesifikasi, lakukan penyetelan pada sisi air valve yang terletak pada *throttle body*. Jangan menyetel stasioner dengan menggeser posisi *throttle valve*.

#### **4.6.3. Menyetel Saat Pengapian**

Penyetelan atau penyesuaian saat pengapian perlu dilakukan untuk mendapatkan performa yang optimal. Kecepatan rambat api pada ruang bakar antara LPG dengan bensin berbeda. LPG memiliki kecepatan rambat api yang lebih kecil dari bensin. Waktu pengapian (*ignition timing*) LPG dapat dimajukan sampai  $\pm 20^\circ$  sebelum TMA tanpa menimbulkan gejala *knocking*, namun harus memperhatikan saat mesin beroperasi dengan mode petrol. Untuk itu, harus dicari titik temu yang tepat agar mesin dapat beroperasi optimal saat beroperasi dengan LPG maupun bensin tanpa menimbulkan gejala *knocking*.

#### **4.6.4. Menyetel Katup Akselerasi**

Katup akselerasi terletak antara *vaporizer* dengan mixer. Katup ini berfungsi untuk mengatur tenaga mesin. Jika katup terlalu kecil,

mesin akan mati saat pedal gas dibuka lebar. Jika katup terlalu lebar, akselerasi akan melambat. Jika bengkel dilengkapi dengan dynamometer, proses penyetelan ini akan lebih mudah dan akurat. Proses penyetelan katup akselerasi biasanya dilakukan secara berulang ulang sampai didapat power maksimal melalui uji jalan.

#### 4.7. Pengujian

Bagian akhir dari proses instalasi adalah pengujian sistem yang terdiri dari uji kebocoran, uji akselerasi, dan uji *fuel selector*. Uji kebocoran dilakukan dengan *leak detector* atau dengan air sabun pada sambungan sambungan pipa dan nepel. Uji akselerasi dilakukan dengan dynamometer atau dengan mencoba mengendarai pada jalan lurus dan menanjak pada berbagai tingkat gigi kecepatan. Pada saat uji jalan, lakukan juga uji kinerja fuel selector. Pindahkan mode bahan bakar pada kondisi mesin berhenti atau pada saat kendaraan berjalan.

Selanjutnya, harus dilakukan uji emisi untuk memastikan AFR nya tepat. Contoh hasil uji emisi untuk kendaraan LPG disajikan dalam Gambar 4.21 berikut.

4 Gas Emission Analyzer	4 Gas Emission Analyzer	4 Gas Emission Analyzer
2012/02/14 PM 9:00 CAR NUMBER: 1442 CO : 0.13 % HC : 164 ppm CO2 : 10.9 % O2 : 2.13 % LAMBDA: 1.104 AFR : 17.1 FUEL : LPG H/C : 2.5000 O/C : 0.0000	2012/02/14 PM 9:00 CAR NUMBER: 1442 CO : 0.13 % HC : 167 ppm CO2 : 11.1 % O2 : 2.02 % LAMBDA: 1.096 AFR : 16.9 FUEL : LPG H/C : 2.5000 O/C : 0.0000	2012/02/14 PM 8:58 CAR NUMBER: 1442 CO : 0.13 % HC : 149 ppm CO2 : 11.0 % O2 : 1.96 % LAMBDA: 1.094 AFR : 16.9 FUEL : LPG H/C : 2.5000 O/C : 0.0000

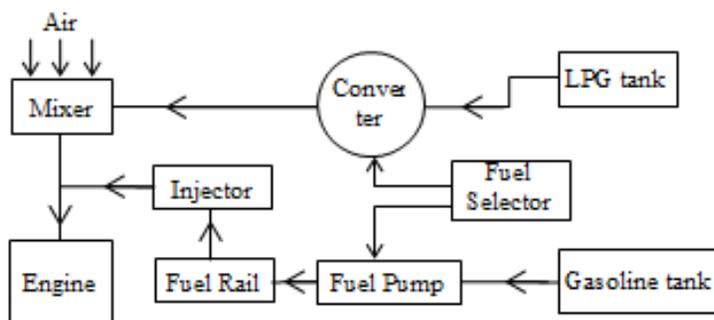
Gambar 4.21 Hasil uji emisi mesin LPG

## 4.8. Tinjauan Kasus 4.1: Pengaruh Ukuran Mixer [48]

### 4.8.1. Latar Belakang

Perkembangan kendaraan berbahan bakar LPG menunjukkan kemajuan yang signifikan dalam dekade terakhir. Di satu sisi, lingkungan memperoleh benefitnya dengan emisi lebih rendah dari bensin. Namun, karena sifatnya, daya yang dihasilkan oleh mesin LPG dilaporkan lebih rendah dari bensin, berkisar antara 5-20% [49]–[51]. Beberapa peneliti sepakat bahwa pengurangan daya pada mesin LPG dipengaruhi oleh efisiensi volumetrik [43], [52], [53]. Pada generasi pertama LPG kit (*Converter and Mixer*, CM), torsi dan daya mesin sangat dipengaruhi oleh ukuran venturi mixer [54], namun kasus ini belum banyak dibahas. Di sisi lain, CM LPG kit adalah yang paling banyak digunakan. Oleh karena itu, studi kasus yang dilaporkan ini berfokus pada karakteristik kinerja mesin pada variasi luasan area venturi mixer.

Umumnya kendaraan berbahan bakar LPG dioperasikan oleh sistem *bi-fuel* yang hanya memerlukan sedikit modifikasi tanpa menggantikan atau melepas sistem bahan bakar yang ada. Kendaraan *bi-fuel* bisa dioperasikan dari bensin ke LPG dan sebaliknya, secara manual atau otomatis. Sampai saat ini, CM LPG kit adalah yang paling banyak digunakan daripada *Vapor Phase Injection* (VPI), *Liquid Phase Injection* (LPI), dan *Liquid Phase Direct Injection* (LPDI). Skema CM disajikan pada Gambar 4.22.



Gambar 4.22 Skema CM LPG kit

Pada CM LPG kit, LPG disimpan dalam bentuk cairan didalam tangki (bisa dari baja atau komposit) pada tekanan 8-10 bar. Pasokan LPG ke mesin dikontrol oleh *vaporizer* yang mengubah LPG cair menjadi uap. Kemudian, uap LPG dipasok ke mixer yang terpasang pada mulut *throttle body*, dimana LPG dicampur dengan udara sebelum dihisap ke ruang bakar. Terakhir, campuran LPG-udara dibakar untuk menghasilkan tenaga, sama seperti menggunakan bensin.

*Vaporizer* memiliki dua fungsi utama, yaitu menguapkan LPG dan mengatur jumlah uap LPG yang masuk ke mesin. Biasanya, untuk menguapkan cairan LPG dilakukan dengan cara mensirkulasikan engine coolant melalui rongga-rongga *vaporizer*. Di sisi lain, beberapa mesin memiliki sistem pendingin udara. Dalam hal ini, LPG cair harus dipanaskan terlebih dulu dengan penukar panas khusus yang terpasang di sistem pembuangan atau oleh udara sekitar dari kipas khusus. Untuk mengatur jumlah LPG yang masuk ke mesin, *vaporizer* bekerja sama dengan mixer untuk menjaga campuran LPG dan udara yang tepat.

Venturi pada mixer pada prinsipnya adalah untuk mendapatkan campuran yang akurat. Berdasarkan komposisi udara yang terdiri dari 21% oksigen dan 79% nitrogen, dan untuk campuran gas ideal, persen volume sama dengan mol. Setiap mol oksigen di udara terdiri dari 79/21 mol nitrogen. Jumlah mol nitrogen per mol oksigen sama dengan 3,76 mol nitrogen. Oleh karena itu, formula pembakaran ideal bensin dan LPG diberikan sebagai berikut.

#### 1. Pembakaran pada bensin

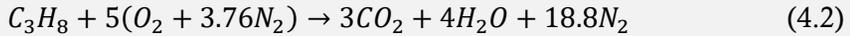


AFR teoritik untuk bensin diberikan sebagai berikut.

$$AFR_{gasoline} = \frac{12.5(1 + 3.76)}{1} \frac{kmol\ air}{kmol\ gasoline}$$

$$AFR_{gasoline} = 59.5 \frac{kmol\ air}{kmol\ gasoline}$$

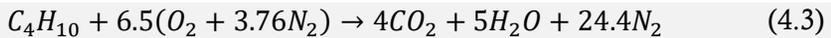
## 2. Pembakaran pada propana



AFR teoritik untuk propana diberikan sebagai berikut.

$$AFR_{propane} = \frac{5(1 + 3.76)}{1} \frac{kmol\ air}{kmol\ propane}$$
$$AFR_{propane} = 23.8 \frac{kmol\ air}{kmol\ propane}$$

## 3. Pembakaran pada butana



AFR teoritik untuk butana diberikan sebagai berikut.

$$AFR_{butane} = \frac{6.5(1 + 3.76)}{1} \frac{kmol\ air}{kmol\ butane}$$
$$AFR_{butane} = 30.95 \frac{kmol\ air}{kmol\ butane}$$

Dari Persamaan (4.1) - (4.3), AFR teoritik untuk campuran LPG (50% propana, 50% butana) dapat dihitung dengan sebagai berikut.

$$AFR_{LPG} = \frac{23.8 + 30.95}{2} \frac{kmol\ air}{kmol\ LPG}$$
$$AFR_{LPG} = 27.38 \frac{kmol\ air}{kmol\ LPG}$$

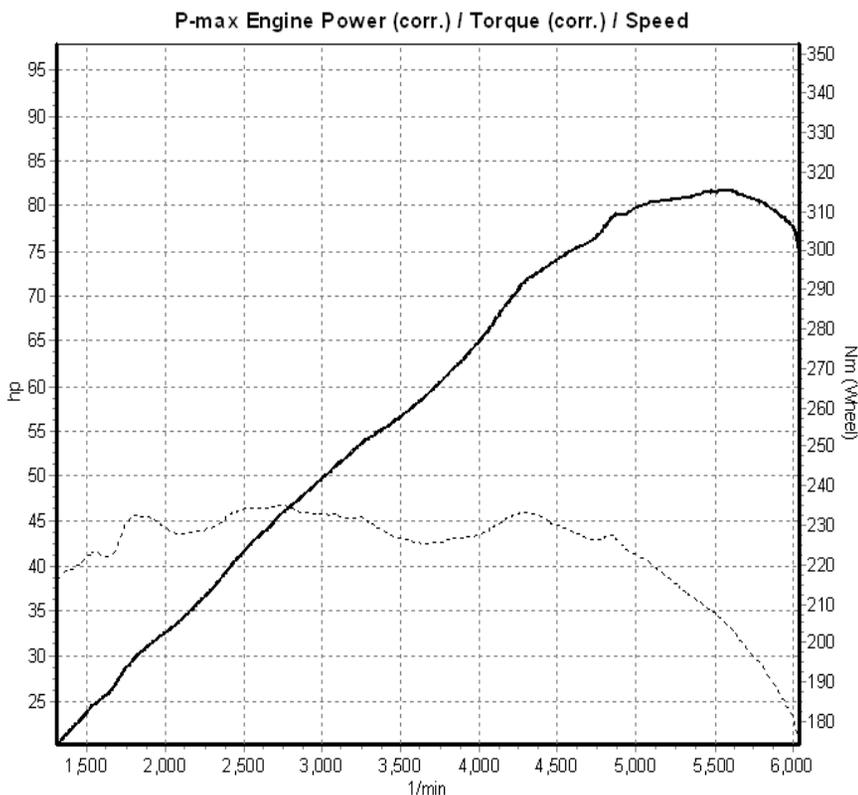
Dengan asumsi bahwa ukuran *throttle body* mobil adalah ideal untuk membuat campuran yang akurat, area ideal venturi mixer dapat diperkirakan sebagai berikut.

$$A_{LPG} = \frac{AFR_{LPG}}{AFR_{gasoline}} \cdot A_{gasoline} \quad (4.4)$$

Dimana,  $A_{LPG}$  adalah area ideal venturi mixer and  $A_{gasoline}$  adalah area aktual *throttle body*. Dalam studi kasus ini, mesin Toyota 5A-FE memiliki *throttle body* 58 mm (2640 mm<sup>2</sup>). Menggunakan Persamaan (4.4), luasan area ideal untuk mixer LPG adalah sebagai berikut.

$$A_{LPG} = \frac{27.38}{59.5} \cdot 2640 \text{ mm}^2$$
$$A_{LPG} = 1215 \text{ mm}^2 \text{ (39.4 mm in diameter)}$$

Namun demikian, Hugo van Osch [54] merekomendasikan agar area ideal venturi mixer adalah 10 mm<sup>2</sup> per hp daya mesin. Pada studi pendahuluan menggunakan bensin, mesin Toyota 5A-FE ini menghasilkan 81,6 hp pada 5.550 rpm. Karakteristik tenaga mesin sepanjang putaran mesin disajikan pada Gambar 4.23.



**Gambar 4.23 Karakteristik kurva daya Toyota 5A-FE menggunakan bensin**

Dari Gambar 6.23, area venturi mixer di mesin ini bisa dibuat mendekati diameter 816 mm<sup>2</sup> (32,2 mm). Untuk memastikannya, mesin tersebut diuji untuk mengetahui pengaruh area venturi mixer terhadap karakteristik daya mesin pada putaran mesin 1500 sampai 6000 rpm. Venturi mixer yang diuji adalah diameter 705, 960, dan 1256 mm<sup>2</sup> (diameter 30, 35, dan 40 mm) yang diaplikasikan pada vaporizer Tesla A-100. Selanjutnya, emisi gas buang diuji untuk semua ukuran mixer saat putaran stasioner.

#### 4.8.2. Metode Pengujian

Mesin yang digunakan dalam penelitian ini adalah Toyota 5A-FE yang telah dimodifikasi ke sistem *bi-fuel*. Spesifikasi mesin ditunjukkan pada Tabel 4.3. Sedangkan *converter* dan mixer disajikan pada Gambar 4.24.

**Tabel 4.3 Spesifikasi mesin**

<i>Engine manufacturer</i>	: Toyota
<i>Engine code</i>	: <u>5A-FE</u>
<i>Cylinders</i>	: Inline 4
<i>Capacity</i>	: 1498 cc
<i>Bore × Stroke</i>	: 78.7 × 77 mm
<i>Valve mechanism</i>	: DOHC, 4 valves per cylinder
<i>Maximum power output</i>	: 77 kw @ 6000 rpm
<i>Maximum torque</i>	: 135 Nm @ 4800 rpm
<i>Compression ratio</i>	: 9.8:1
<i>Fuel system</i>	: EFI



**Gambar 4.24 Vaporizer Tesla A-100 (kiri) dan mixer (kanan)**

Untuk menguji daya mesin, sebuah chassis dynamometer Hofmann Dynatest Pro digunakan pada menu "Program P-Max". Tes

ini dilakukan untuk mendapatkan kurva torsi dan daya mesin. Prosedur uji *coast-down* dilakukan untuk mendapatkan karakteristik kendaraan yang sebenarnya. Kendaraan dilakukan akselerasi dari diam sampai kecepatan maksimal dengan mengubah gigi secara lancar tapi cepat. Begitu tingkat daya maksimum telah terlampaui, kopling dilepas dan mesin mobil dibiarkan untuk berputar bebas. Selama meluncur ke putaran stasioner, kehilangan daya dicatat. Parameter yang diukur adalah daya, kecepatan, dan torsi yang diperoleh. Uji eksperimental dengan dynamometer ditunjukkan pada Gambar 4.25.



**Gambar 4.25** *Set up* eksperimen and fasilitas pengujian

Selanjutnya, emisi gas buang diuji menggunakan *engine gas analyzer* QROTECH QRO-401 pada putaran stasioner. Uji emisi yang dilakukan pada mesin saat beroperasi dengan bensin dan LPG untuk semua ukuran mixer yang diteliti. Kemudian, hasil uji emisi dibandingkan hasil uji daya untuk membuat rekomendasi.

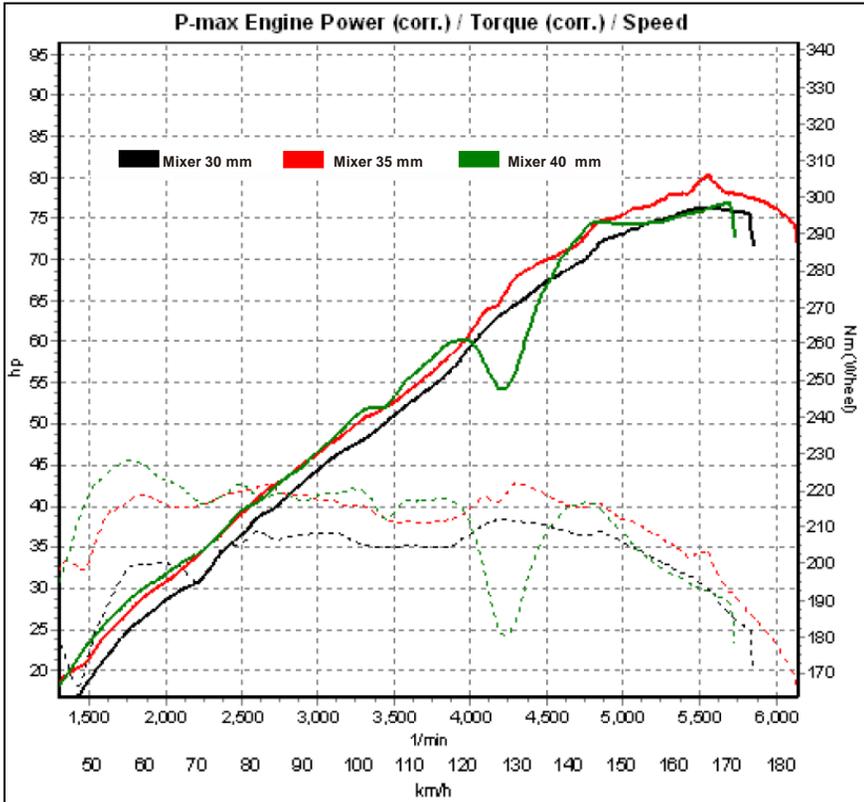
### **4.8.3. Hasil dan Pembahasan**

#### **Karakteristik daya mesin**

Dalam studi ini, mobil diuji pada *Wide Open Throttle* (WOT). Data tercatat 1500 sampai 6000 rpm. Serangkaian tes menunjukkan bahwa area venturi mixer memiliki pengaruh besar pada daya mesin

(Gambar 4.26). Mixer dengan diameter venturi 30 mm menghasilkan output daya maksimum 76,3 hp @ 5584 rpm. Output daya maksimal terbaik diperoleh dari mixer dengan diameter venturi 35 mm, yaitu 80,3 hp @ 5550 rpm. Sementara itu, mixer dengan diameter venturi 40 menghasilkan output daya maksimum sama dengan mixer dengan diameter venturi 30 mm, namun pada putaran mesin 4000 sampai 4.500 rpm, terjadi kehilangan torsi. Pada putaran mesin di bawah 4000 rpm, mixer dengan diameter venturi 40 mm menghasilkan performa terbaik diantara ketiganya.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin kecil ukuran venturi mixer menghasilkan daya yang lebih kecil. Namun, ukuran venturi mixer yang lebih besar akan memberikan daya yang bagus pada putaran mesin rendah, dan menghasilkan daya yang lebih rendah pada putaran mesin tinggi. Ini sesuai dengan penjelasan Osch [54], bahwa mixer menghasilkan daya terbaik hanya pada kondisi parsial. Untuk mesin 5A-FE (seperti yang digunakan dalam uji coba ini), disarankan penggunaan mixer dengan venturi 35 mm. Mixer ini mampu menghasilkan daya yang konsisten sepanjang putaran mesin.

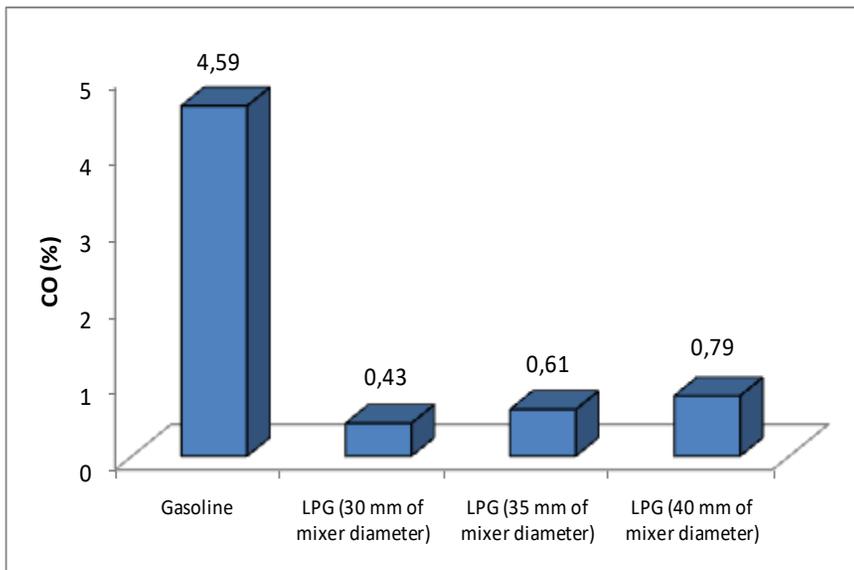


**Gambar 4.26 Karakteristik daya mesin pada berbagai variasi ukuran mixer**

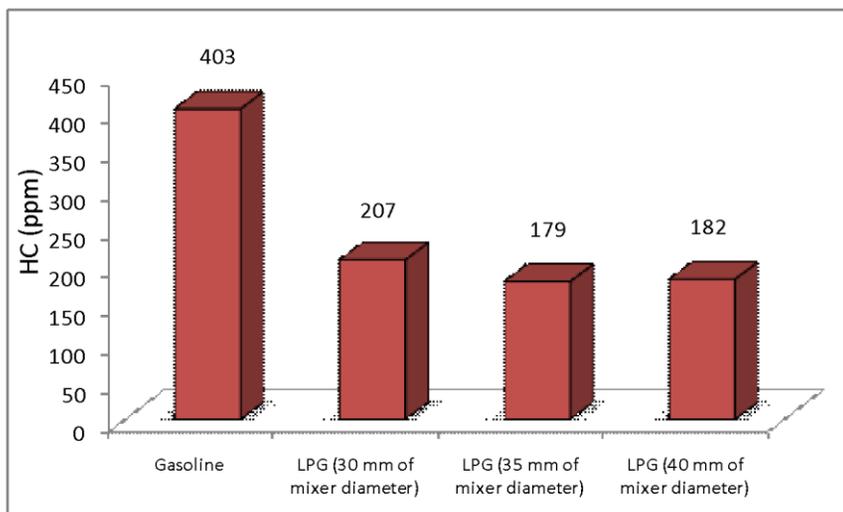
Dari Gambar 4.26, pada aplikasi mobil perkotaan atau angkutan umum seperti taksi, mixer dengan diameter venturi 35 mm dan 40 mm lebih baik dari pada mixer dengan diameter venturi 30 mm. Karena kehilangan daya pada mixer dengan diameter venturi 40 mm terjadi pada putaran mesin tinggi (4000 rpm) dan kecepatan kendaraan tinggi (120 km/jam), ini tidak akan menjadi masalah pada kendaraan ringan. Mobil perkotaan dan taksi jarang bekerja dalam kondisi seperti ini.

### Karakteristik Emisi

Gambar 4.27 dan Gambar 4.28 menyajikan hasil emisi dari bensin berbahan bakar bensin dan LPG untuk parameter CO dan HC. Hasil ini mengkonfirmasi peneliti sebelumnya [55]–[57], meskipun dengan angka yang berbeda. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan LPG secara signifikan menurun pada CO dan HC. Sementara itu, ukuran mixer tidak mempengaruhi emisi secara signifikan.



**Gambar 4.27 Karakteristik emisi CO**



**Gambar 4.28 Karakteristik emisi HC**

Hasil uji emisi menunjukkan bahwa LPG sebagai pengganti bahan bakar alternatif untuk bensin menjanjikan untuk saat ini. Seperti diketahui bahwa emisi dari kendaraan jalan telah mempengaruhi kualitas udara perkotaan. Hal ini penting karena berdampak pada kesehatan manusia, produksi ozon troposfer, dan iklim global [58]. Mengurangi ketergantungan minyak dengan melakukan diversifikasi ke bahan bakar alternatif merupakan tantangan besar bagi sektor transportasi di masa depan. Di sisi lain, pengembangan dan penerapan bahan bakar alternatif perlu pertimbangan menyeluruh terkait ketersediaan bahan baku, proses produksi, infrastruktur distribusi, dan kompatibilitas dengan teknologi mesin yang ada [59].

#### **4.8.4. Kesimpulan**

Dalam studi kasus spesifik ini, mixer LPG dengan luas venturi 705, 960, dan 1256 mm<sup>2</sup> (diameter 30, 35, dan 40 mm) telah diuji untuk mendapatkan performa terbaik pada mesin Toyota 5A-FE yang dioperasikan dengan LPG. Serangkaian tes menunjukkan bahwa area venturi mixer memiliki pengaruh besar terhadap daya mesin. Untuk setiap ukuran venturi mixer, mesin menghasilkan karakteristik daya

yang spesifik. Namun demikian, perbedaan ukuran mixer berpengaruh kecil terhadap emisi. Mesin berbahan bakar LPG menghasilkan emisi CO dan HC yang lebih rendah dari mesin bensin, untuk semua ukuran mixer.

#### **4.9. Tinjauan Kasus 4.2: Uji Coba Berbagai Vaporizer [60]**

##### **4.9.1. Latar Belakang**

Aspek keekonomian LPG yang lebih baik dari bahan bakar minyak membuat pertumbuhan kendaraan LPG dalam beberapa tahun terakhir meningkat dengan pesat. Seiring dengan pertumbuhan tersebut, berbagai model dan bentuk *vaporizer* diproduksi untuk memenuhi kebutuhan dengan berbagai fitur, ukuran, dan peruntukannya. Setiap jenis *vaporizer* memiliki karakteristik yang berbeda. Suatu model *vaporizer* mampu melayani mesin dengan kapasitas 1 liter sampai 4 liter, namun ada juga yang rentang penggunaannya spesifik. Jenis yang lain menawarkan performa yang baik untuk mesin putaran rendah, namun kurang mendukung untuk putaran tinggi dan sebaliknya.

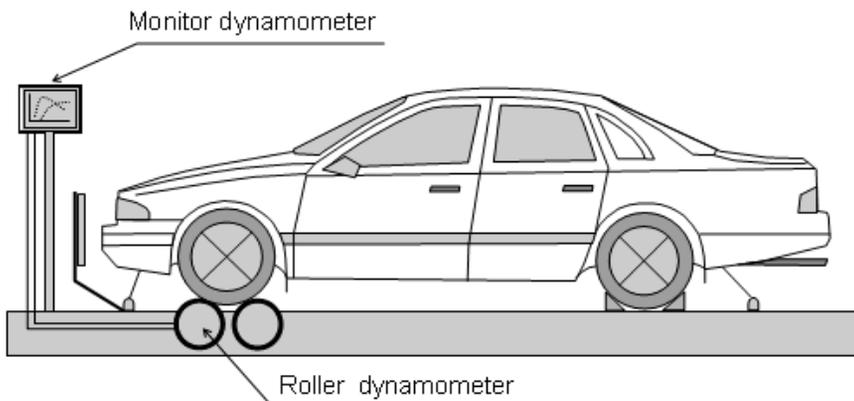
Uji coba ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik kurva daya berbagai jenis *vaporizer* dan dibandingkan dengan kurva daya pada operasi bahan bakar bensin. *Vaporizer* yang diuji adalah jenis Tesla A-100, Hansung C-081, dan Stefanelli 150HP. *Mixer* yang diaplikasikan memiliki luasan venturi 960 mm<sup>2</sup>. Kendaraan yang diuji adalah Toyota Soluna 1,5 l. Alat uji performa mesin yang digunakan adalah *chassis dynamometer* merk Hofmann tipe Dynatest pro 260 kW dengan *vaporizer* yang ditunjukkan pada Gambar 4.29 sebagai berikut.



**Gambar 4.29 Vaporizer LPG (urut dari kiri ke kanan: Tesla A-100, Stefanelli 150HP, dan Hansung C-081)**

#### 4.9.2. Metode

Parameter dalam pengujian ini adalah output daya (hp) yang diukur pada roda-roda penggerak. Pengujian dilakukan pada *chassis dynamometer* (Gambar 4.30 dan Gambar 4.31). Sebuah kipas berdaya tiup besar dipasang di depan kendaraan untuk membantu mendinginkan mesin. Data dari *chassis dynamometer* ditampilkan dalam sebuah monitor. Kondisi awal pengujian (*initial set up*) ditentukan pada nilai lambda ( $\lambda$ ) antara 0,98 sampai 1,02 yang terbaca pada *engine gas analyzer* untuk setiap kali perubahan jenis *vaporizer* dan setiap kali perpindahan mode operasi bahan bakar.



**Gambar 4.30 Penempatan mobil pada dinamometer**



**Gambar 4.31 Pengukuran Performa Mesin**

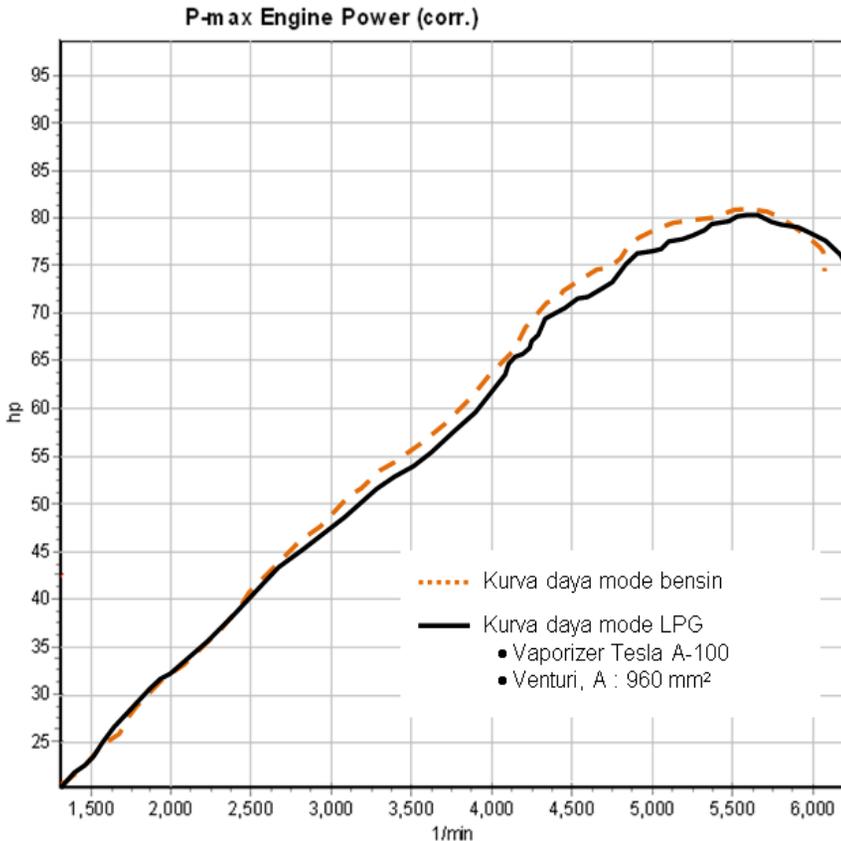
**4.9.3. Hasil dan Pembahasan**

Tabel 4.4 berikut menunjukkan hasil pengukuran performa mesin dengan mode operasi LPG pada setiap jenis penggunaan vaporizer dan performa mesin dengan mode operasi bensin. Pengambilan data dilakukan tiga kali untuk setiap jenis *vaporizer*. Data yang ditampilkan merupakan data koreksi dari *dynamometer* dan merupakan hasil pengukuran yang terbaik dari setiap jenis *vaporizer*.

**Tabel 4.4 Hasil Pengukuran Performa Mesin**

No. uji	Jenis <i>vaporizer</i>	venturi <i>mixer</i> (mm <sup>2</sup> )	Parameter ukur	
			Daya (hp)	rpm
1	Tesla A-100	35	80.3	5550
2	Hansung C-081	35	77.3	5746
3	Stafanelli 150HP	25	79.4	5451
4	Mode operasi bensin		81.6	5550

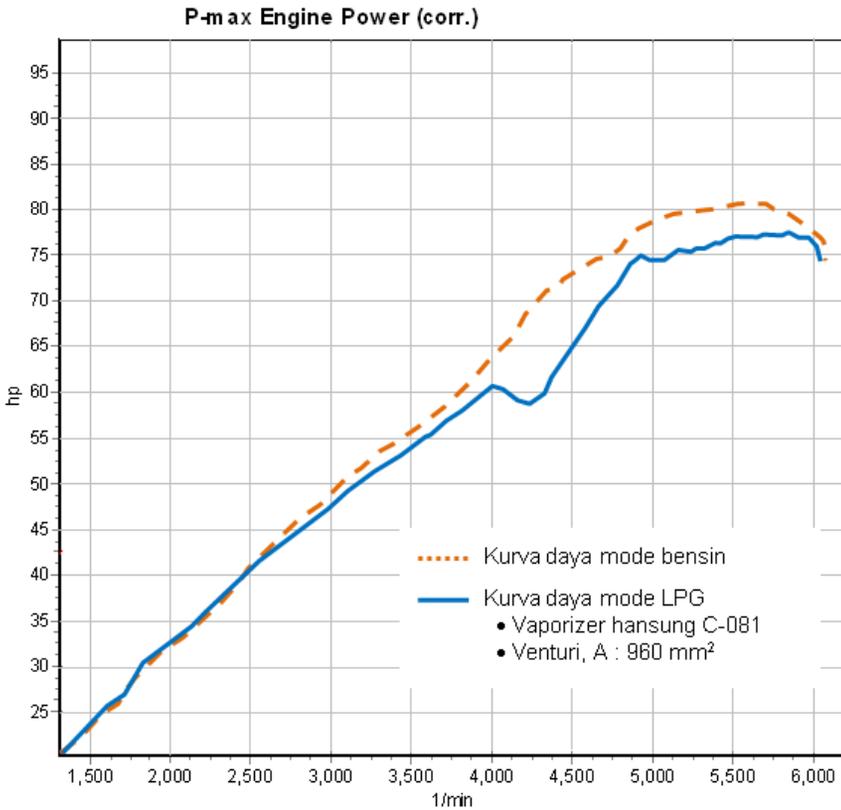
## Kurva daya dengan vaporizer Tesla A-100



**Gambar 4.32 Kurva daya dengan vaporizer Tesla A-100**

Gambar 4.32 memberikan informasi dengan *vaporizer* Tesla A-100 menghasilkan daya yang setara dengan mode operasi bensin dan bahkan sedikit lebih tinggi pada putaran dibawah 2500 rpm. Pada putaran setelah 2500 rpm, kurva daya mode operasi LPG lebih rendah dari mode operasi bensin sampai pada kurva daya maksimal (*peak power*) yang dicapai sama sama pada kisaran  $\pm 5550$  rpm. Namun demikian kurva daya mode operasi LPG menurun lebih landai dari pada mode operasi bensin setelah keduanya mencapai *peak power*.

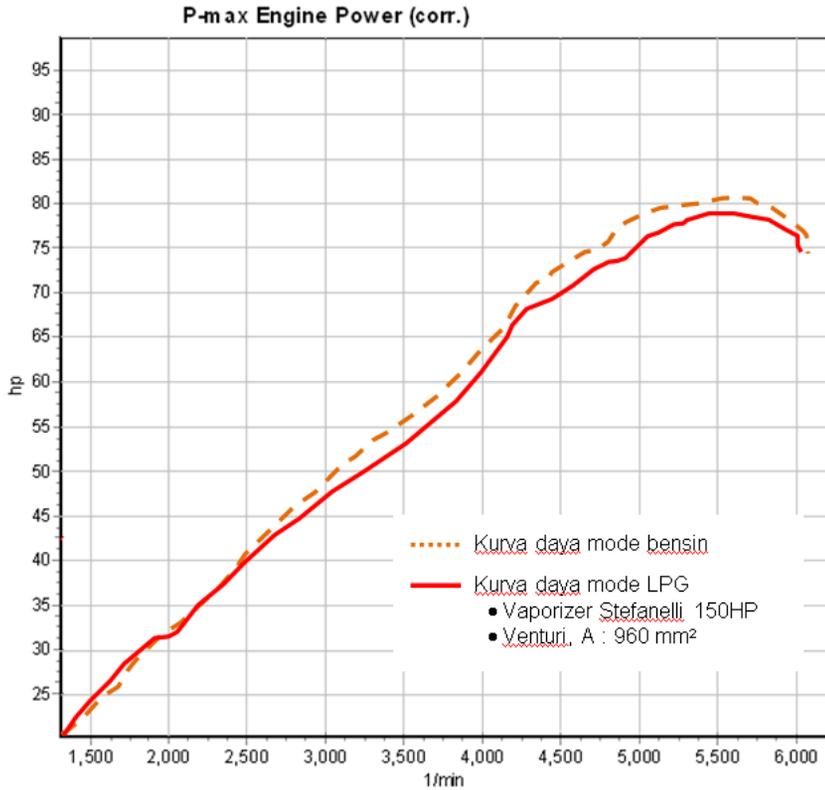
## Kurva daya dengan vaporizer Hansung C-081



Gambar 4.33 Kurva daya dengan vaporizer Hansung C-081

Seperti halnya pada *vaporizer* Tesla A-100, Hansung C-081 menghasilkan daya yang lebih baik dari pada mode operasi bensin pada putaran dibawah 2500 rpm, namun menghasilkan daya yang lebih kecil pada putaran mesin diatas 2500 rpm. Suatu fenomena dari karakteristik kurva daya tidak normal ditunjukkan oleh *vaporizer* ini. Pada putaran  $\pm$  4000 rpm terjadi *power loss* yang menyerupai bentuk palung dan meningkat kembali normal pada putaran  $\pm$  4500 rpm.

## Kurva daya dengan vaporizer Stefanelli 150HP



**Gambar 4.34 Kurva daya dengan vaporizer Stefanelli 150HP**

Karakter kurva daya dengan *vaporizer* Stefanelli 150HP pada putaran dibawah 4000 rpm seperti halnya kurva pada tesla dan hansung. Namun demikian pada putaran  $\pm 4000$  sampai  $\pm 4500$  rpm menunjukkan karakteristik kurva yang merupakan kebalikan dari kurva hansung. Jika *vaporizer* hansung menunjukkan *power loss* menyerupai bentuk palung, *vaporizer* stefanelli justru membentuk kurva positif dengan lengkungan keatas hingga berhimpit dengan kurva daya pada mode operasi bensin . Ini menunjukkan sebuah karakteristik performa yang baik, meskipun *peak power* yang dicapai sedikit lebih rendah dari mode operasi bensin.

Pada kondisi pengendaraan di jalan melalui pengamatan kualitatif, mode operasi LPG dengan ketiga jenis *vaporizer* ini memberikan akselerasi yang lebih lembut daripada mode operasi bensin. Nilai oktan LPG yang jauh lebih tinggi dari bensin menghasilkan *noise* mesin yang lebih rendah.

#### 4.9.4. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari kegiatan penelitian ini antara lain:

1. Mode operasi LPG dengan *vaporizer* Tesla A-100, Hansung C-081, dan Stefanelli 150HP yang dikombinasikan dengan *mixer* yang memiliki luasan 960 mm<sup>2</sup> menghasilkan output daya mesin yang lebih baik pada putaran dibawah 2500 rpm, namun menghasilkan kurva daya yang lebih rendah pada putaran diatas 2500 rpm.
2. *Peak power* terbaik dihasilkan oleh *vaporizer* Tesla A-100 sebesar 80,3 hp pada 5550 rpm, sementara dengan mode operasi bensin menghasilkan *peak power* 81,6 pada 5550 rpm, sehingga selisih *peak power* yang dihasilkan hanya terpaut 1,6%.

### 4.10. Tinjauan Kasus 4.3: Penyerapan Kalor [61]

#### 4.10.1. Latar belakang

Pada CM dan VPI, LPG sebelum masuk ke *mixer* atau injektor dilewatkan sebuah *vaporizer* yang berfungsi untuk menurunkan tekanan sehingga terjadi perubahan fasa dari cair ke *superheated vapor*. LPG menyerap kalor dari sekeliling *vaporizer*. Gambar 6.36 menyajikan ilustrasi lapisan kristal es (*ice formation layer*) pada bodi *vaporizer* ketika *engine coolant* tidak disirkulasikan (Gambar 4.35).



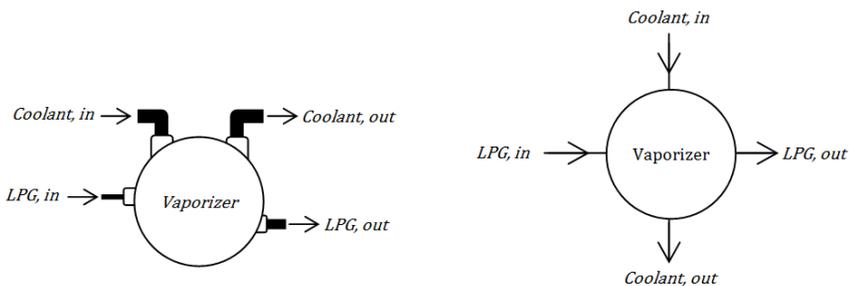
(a) [www.go-lpg.co.uk](http://www.go-lpg.co.uk)



(b) [ecomodder.com](http://ecomodder.com)

**Gambar 4.35 Fenomena *ice formation layer* pada dinding LPG vaporizer**

Untuk menguapkan LPG dan mencegah terjadinya pembekuan (*ice formation layer*), pada sekeliling aliran LPG didalam *vaporizer* disirkulasikan air panas yang diambilkan dari sebagian sirkulasi *engine coolant*. Sketsa fisik *vaporizer* dan skema alirannya disajikan dalam Gambar 4.36.



**Gambar 4.36 Skema tranfer kalor pada *vaporizer* (original)**

Pada saat mesin beroperasi, terjadi transfer kalor dari *engine coolant* ke LPG secara kontinyu. Berdasarkan hukum termodinamika ke-1 dengan asumsi tidak ada kalor yang tertransfer dari bodi *vaporizer* ke lingkungan, besarnya kalor yang tertransfer dari aliran air pendingin (*engine coolant*) ke LPG adalah sebagai berikut.

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_c \quad (4.5)$$

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_c c_{p,c} \Delta T_c \quad (4.6)$$

$$\Delta T_c = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{m}_c c_{p,c}} \quad (4.7)$$

Dimana,  $\dot{Q}_L$  adalah kalor yang diterima LPG,  $\dot{Q}_c$  adalah kalor yang dilepas oleh *engine coolant*,  $\dot{m}_c$  adalah laju aliran massa *engine coolant* melalui rongga *vaporizer*,  $c_{p,c}$  adalah kalor jenis *engine coolant*, dan  $\Delta T_c$  adalah perbedaan temperatur *engine coolant* saat masuk dan keluar *vaporizer*.

Pada kenyataannya, kalor yang diterima LPG lebih kecil dari pada yang dilepas oleh *engine coolant*. Hal ini terjadi karena sebagian kalor tertransfer ke lingkungan melalui bodi *vaporizer*. Dengan demikian besarnya energi kalor aktual yang dibutuhkan LPG untuk menguap diformulasikan dengan persamaan berikut.

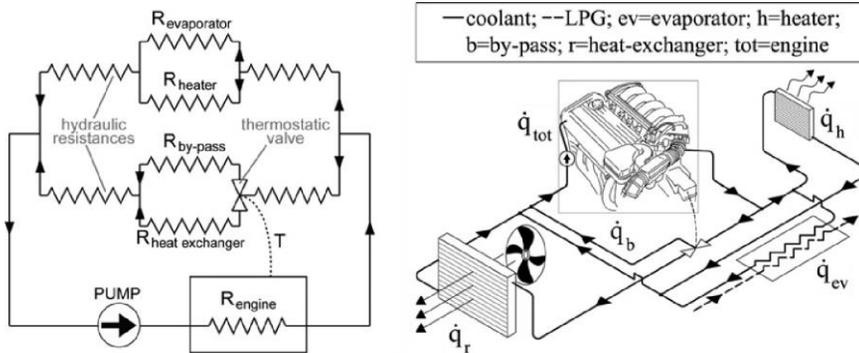
$$\dot{Q}_{ev} = \dot{m}_L (\Delta h) \quad (4.8)$$

Dimana,  $\dot{Q}_{ev}$  adalah kalor evaporasi (*cooling effect*),  $\dot{m}_L$  adalah laju aliran massa LPG, dan  $\Delta h$  adalah perbedaan *enthalpy* LPG saat masuk dan keluar *vaporizer*.

Hasil studi Price (2004) menunjukkan bahwa dengan aliran *engine coolant* sebesar 0,1 kg/s mampu menurunkan temperatur *engine coolant* sebesar 7 °C dan meningkatkan temperatur LPG  $\pm$  55 °C. Pada studi ini, proses pertukaran kalor terjadi pada bidang kontak yang relatif kecil dan besarnya energi kalor yang ditransfer sangat bergantung terhadap laju aliran massa LPG dan kondisi lingkungan. Hasil penelitian ini juga menunjukkan data yang berbeda pada pengujian musim panas (*hot climate*) dan musim dingin (*cold climate*).

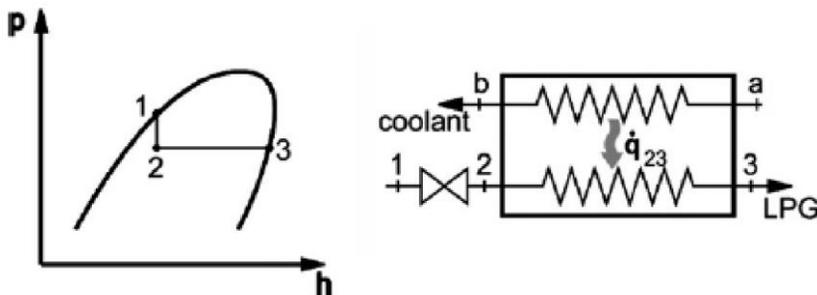
Model *vaporizer* yang lain (*converter kits* yang bekerja squential dengan pengendali sebuah ECU) juga telah diuji terkait dengan kinerja mesin [43]. Dalam penelitian ini, untuk menguapkan LPG

pada *vaporizer* juga digunakan sebagian aliran sirkuit *engine coolant* dengan sketsa sebagai berikut (Gambar 4.37).



**Gambar 4.37** Skema aliran engine coolant pada *vaporizer* LPG

Mekanisme perubahan fasa LPG dalam *vaporizer* dan pertukaran kalor antara *engine coolant* dengan LPG disajikan dalam Gambar 4.38 berikut.



**Gambar 4.38** Perubahan fasa LPG dalam *vaporizer* dan pertukaran kalornya

#### 4.10.2. Potensi Efek Pendinginan yang Tersedia

Untuk mengestimasi potensi efek pendinginan yang tersedia dari proses penguapan LPG dalam *vaporizer*, digunakan asumsi sebagai berikut :

- 1) Penurunan tekanan di katup ekspansi terjadi secara *iso-enthalpy*;
- 2) Energi kinetik dan energi potensial diabaikan karena sangat kecil;
- 3) Densitas udara  $1,2 \text{ kg/m}^3$ .

Menggunakan Persamaan (4.8), potensi efek pendinginan yang dihasilkan ( $\dot{Q}_{ev}$ ) merupakan fungsi dari laju aliran massa LPG ( $\dot{m}_L$ ) dan perbedaan *enthalpy* pada kedua fasa, gas dan cair ( $h_g - h_f$ ). Namun demikian, Laju aliran massa LPG sangat bergantung pada laju aliran massa udara yang dihisap mesin ( $\dot{m}_a$ ) dan komposisi campurannya (AFR). Mengacu pada studi Irimescu (2010), efisiensi volumetrik mesin disajikan dalam Tabel 6.5 berikut.

**Tabel 4.5 AFR dan efisiensi volumetrik mesin 1998 cm<sup>3</sup>**

<i>Engine speed, n</i> (rpm)	<i>Volumetric efficiency, <math>\eta_v</math></i>	<i>Engine speed, n</i> (rpm)	<i>Volumetric efficiency, <math>\eta_v</math></i>
1000	0,720	3600	0,747
1200	0,740	3800	0,743
1400	0,755	4000	0,742
1600	0,771	4200	0,747
1800	0,789	4400	0,755
2000	0,805	4600	0,764
2200	0,817	4800	0,779
2400	0,824	5000	0,792
2600	0,820	5200	0,790
2800	0,803	5400	0,775
3000	0,782	5600	0,750
3200	0,766	5800	0,710
3400	0,755	6000	0,650

Laju aliran massa udara dan LPG dapat dihitung dengan persamaan 4.9 dan 4.10 berikut.

$$\dot{m}_a = \frac{\rho_a \eta_v V_s n}{12 \cdot 10^7} \quad (4.9)$$

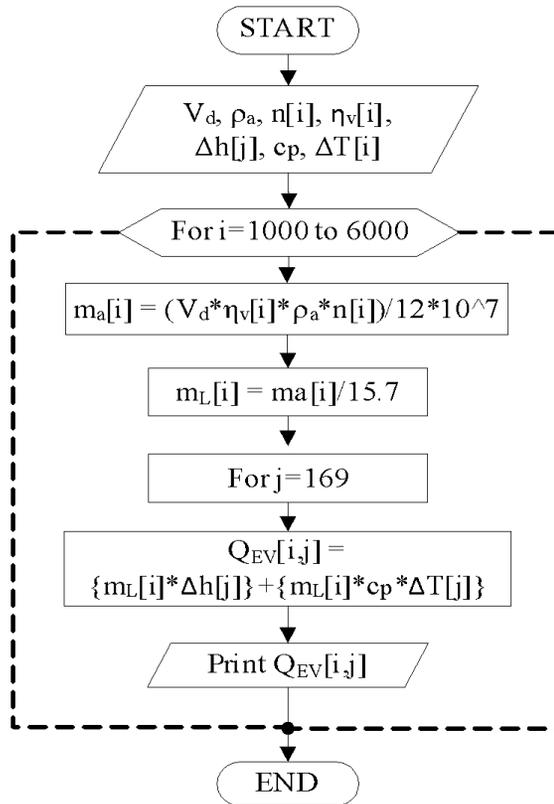
$$\dot{m}_L = \frac{\dot{m}_a}{AFR} \quad (4.10)$$

Data *enthalpy* LPG saat tekanannya diturunkan dari 0,8 MPa ke 0,05 MPa (gauge) disajikan dalam Tabel 4.6 berikut.

**Tabel 4.6 Properti LPG pada 0,05 MPa.**

<i>Specific state point</i>	<i>Properties</i>	
<i>Liquid temperature</i> (°C), <i>before vaporizer</i>	[1]	27
<i>Mixture temperature</i> (°C)	[2]	-27
<i>Saturated vapor temperature</i> (°C)	[3]	-11
<i>Superheated vapor temperature</i> (°C)	[4]	15
<i>Mixture enthalpy</i> (kJ/kg)	[5]	240
<i>Vapor enthalpy</i> (kJ/kg)	[6]	426
$\Delta T$ , <i>vapor</i> (°C)	[4-3]	31
$\Delta h$ (kJ/kg)	[6-5]	169

Berdasar pada Persamaan (4.5 – 4.10), serta dengan data-data yang ada pada Tabel 4.5 dan Tabel 4.6 dan asumsi-asumsi yang ditetapkan, potensi efek pendinginan yang tersedia ( $\dot{Q}_{ev}$ ) dihitung dengan algoritma yang disajikan dalam Gambar 4.39. Nilai  $c_p$  LPG ditetapkan sebesar 1,67 kJ/kg.K. Sementara itu, hasil simulasinya disajikan dalam Tabel 4.7 dan Gambar 4.40.

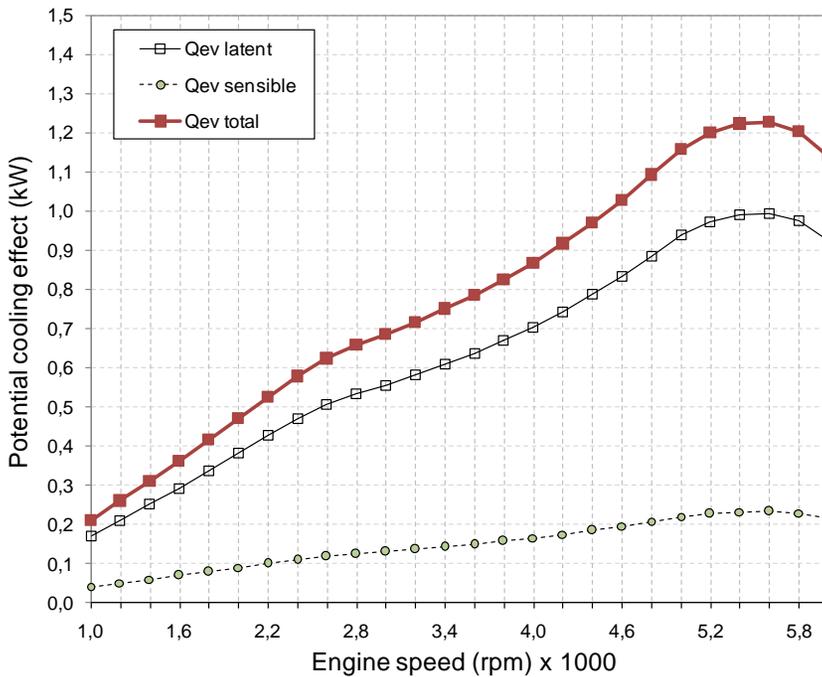


**Gambar 4.39** Algoritma untuk menghitung potensi efek pendinginan ( $\dot{Q}_{ev}$ )

**Tabel 4.7** Potensi efek pendinginan dari aliran LPG pada vaporizer pada sebuah mesin 1998 cm<sup>3</sup>

<i>Engine speed</i> rpm	$\dot{m}_L$ (g/s)	$\dot{Q}_{ev}$ latent (kW)	$\dot{Q}_{ev}$ sensible (kW)	$\dot{Q}_{ev}$ total (kW)
1000	0,92	0,170	0,040	0,210
1200	1,13	0,210	0,049	0,259
1400	1,35	0,250	0,058	0,309
1600	1,57	0,292	0,068	0,360
1800	1,81	0,336	0,078	0,415
2000	2,05	0,381	0,089	0,470

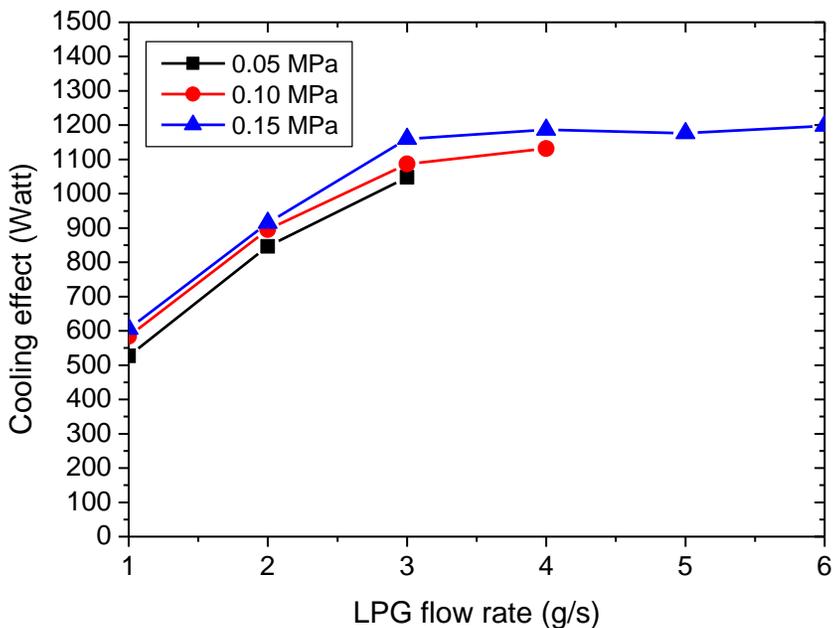
<i>Engine speed</i> rpm	$\dot{m}_L$ (g/s)	$\dot{Q}_{ev}$ latent (kW)	$\dot{Q}_{ev}$ sensible (kW)	$\dot{Q}_{ev}$ total (kW)
2200	2,29	0,425	0,099	0,525
2400	2,52	0,468	0,109	0,577
2600	2,71	0,505	0,118	0,622
2800	2,86	0,532	0,124	0,656
3000	2,99	0,555	0,130	0,685
3200	3,12	0,580	0,135	0,716
3400	3,27	0,608	0,142	0,749
3600	3,42	0,637	0,149	0,785
3800	3,59	0,668	0,156	0,824
4000	3,78	0,703	0,164	0,867
4200	3,99	0,743	0,173	0,916
4400	4,23	0,786	0,184	0,970
4600	4,47	0,832	0,194	1,026
4800	4,76	0,885	0,207	1,092
5000	5,04	0,937	0,219	1,156
5200	5,23	0,972	0,227	1,199
5400	5,33	0,991	0,231	1,222
5600	5,34	0,994	0,232	1,226
5800	5,24	0,975	0,228	1,202
6000	4,96	0,923	0,216	1,139



**Gambar 4.40 Potensi efek pendinginan ( $\dot{Q}_{ev}$ ) yang tersedia untuk mesin 1998 cm<sup>3</sup>**

#### 4.10.3. Hasil Pengukuran

Efek pendinginan yang dihasilkan pada berbagai laju aliran LPG dibandingkan dengan tekanan penguapan yang sama ditunjukkan pada Gambar 6.42. Semakin tinggi tekanan penguapan, semakin besar efek pendinginan yang dihasilkan. Namun, karena keterbatasan area transfer kalor pada evaporator, efek pendinginan yang dihasilkan adalah nonlinear. Dalam penelitian yang pernah dilakukan oleh penulis, efek pendinginan maksimum yang dapat dihasilkan adalah 1,2 kW dengan karakteristik kurva yang disajikan pada Gambar 6.41.



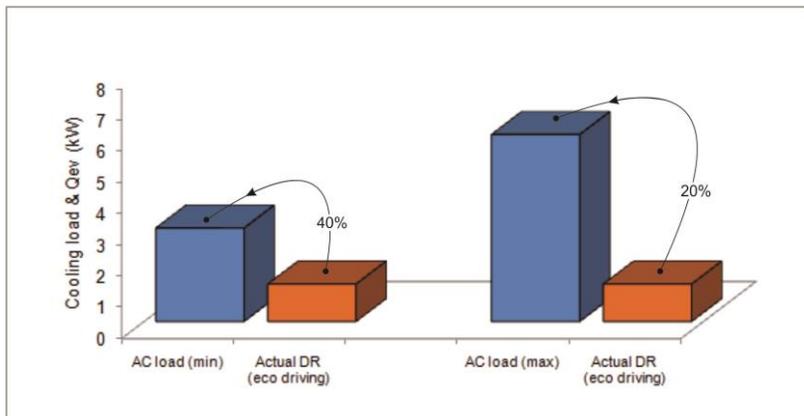
**Gambar 4.41** Efek pendinginan aktual pada *steady state* yang dihasilkan dari proses evaporasi LPG pada berbagai laju aliran massa dan tekanan penguapan LPG.

#### 4.10.4. Kontribusi pada Sistem AC Kendaraan

Efek pendinginan dari penguapan LPG pada sistem bahan bakar telah diuji untuk mengurangi beban dari sistem AC kendaraan. Seperti diketahui, kapasitas pendinginan yang diperlukan untuk kendaraan penumpang bervariasi tergantung pada volume mesin, beban panas, geometri kabin, dan beban-beban lainnya. Namun, dari tinjauan literatur, kapasitas pendinginan dari mobil penumpang umumnya berkisar 3-6 kW. Hasil dari uji coba ini, efek pendinginan aktual dari kendaraan LPG mencapai 1,2 kW pada laju aliran massa LPG 3-6 g/s pada tekanan penguapan 0,15 MPa.

Namun demikian, untuk mencapai *eco-driving*, kendaraan dioperasikan pada putaran mesin dibawah 2500 rpm. Mengacu pada studi Masi (2012), konsumsi bahan bakar mesin 1998 cm<sup>3</sup> hampir linier, mulai dari 1,1 g/s pada 1000 rpm sampai 7 g/s pada 6000 rpm.

Sehingga, putaran mesin 2500 rpm setara dengan laju aliran massa LPG 3 g/s. Ini berarti bahwa efek pendinginan dari sistem bahan bakar LPG memberikan kontribusi pada sistem AC hingga 40% untuk kendaraan dengan beban pendinginan 3 kW dan 20% untuk kendaraan dengan beban pendinginan 6 kW. Perbandingan antara beban pendinginan, hasil simulasi, dan hasil uji validasi pada skala maksimal dan skala *eco-driving* disajikan dalam Gambar 4. 42 sebagai berikut.



**Gambar 4.42** Kontribusi *direct refrigeration* (DR) terhadap beban AC kendaraan

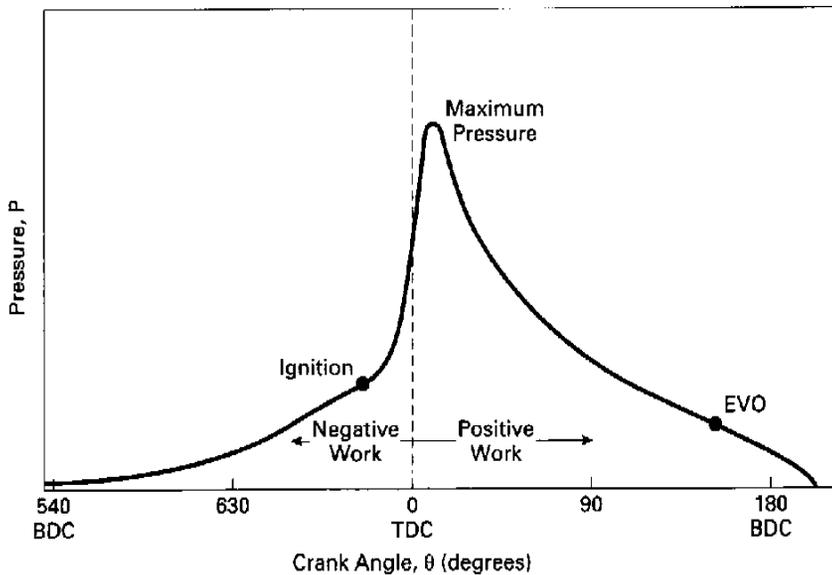
# **BAB 5.**

## **PENYESUAIAN SISTEM PENGAPIAN DAN KONTROL ELEKTRONIK**



## 5.2. Proses Pembakaran dan Waktu Penyalaan

LPG dan bensin memiliki siklus pembakaran yang sama. Keduanya mengikuti siklus *Otto*, dimana pembakaran terjadi dalam volume constant. Proses pembakarannya terdiri dari tiga periode, yaitu periode penyalaan dan pengembangan api (*ignition and flame development*), periode penyebaran api (*flame propagation*), dan periode akhir pembakaran (*flame termination*). Awal pembakaran disulut dengan busur api listrik antar kedua elektroda busi. Gambar 5.1 berikut merupakan ilustrasi proses pembakaran mesin bensin.



**Gambar 5.1** Proses pembakaran pada mesin bensin/LPG

Waktu penyalaan pada mesin bensin/ LPG sangat menentukan kinerja yang dihasilkan. Penyalaan yang terlalu awal menyebabkan kerja negatif, yaitu ekspansi gas pembakaran melawan gerakan piston yang bergerak menuju titik mati atas (TMA). Pada kondisi yang ekstrim dapat menyebabkan kerusakan pada piston, *connecting rod*, dan *bearing*.

Penyalaaan terlalu lambat menyebabkan tekanan puncak menurun sehingga kerja yang dihasilkan menurun. Maximum *brake-torque timing* (*MBT timing*) adalah waktu penyalaaan yang akan menghasilkan torsi maksimum. Waktu MBT tergantung pada kecepatan putaran dan beban mesin.

Pemakaian LPG sebagai bahan bakar akan mengurangi kecenderungan terjadinya *knocking*, ini karena nilai oktan yang terkandung jauh lebih tinggi dari bensin. Efek lain dari pemakaian LPG adalah terjadinya perubahan kecepatan perambatan api (*flame propagation speed*). Kecepatan rambat api LPG lebih rendah daripada bensin. Untuk itu beberapa penyesuaian perlu dilakukan terkait jenis busi dan saat pengapiannya.

### **5.3. Temperatur Ruang Bakar**

Pada mesin bensin, bensin masuk ke ruang bakar dalam bentuk uap. Selain berfungsi sebagai bahan bakar, berfungsi juga sebagai pendingin (*evaporative cooling*). Bensin mengambil panas dari *air stream* dan komponen mesin untuk berubah fasa dari cair ke uap. Proses ini dapat membantu mendinginkan elektroda busi dan komponen ruang bakar yang lain seperti katup katup dan dinding ruang bakar.

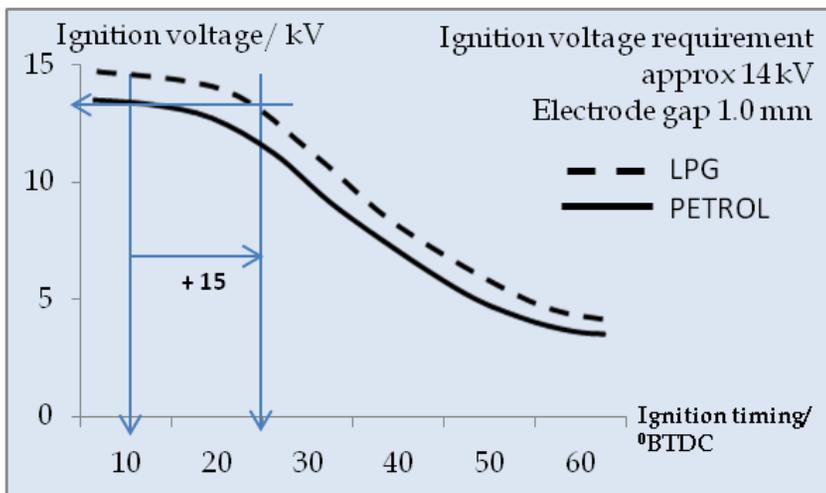
Pada mesin berbahan bakar LPG, selama LPG dimasukkan sudah dalam bentuk gas, akan terjadi fenomena pembakaran kering dan tidak menghasilkan efek pendinginan dalam (*inner cooling*). Pada sistem konvensional, LPG fasa gas masuk ke mesin justru dengan kondisi yang lebih panas karena terjadi pertukaran panas dengan aliran air pada sistem pendinginan mesin. Hal ini menyebabkan ruang bakar dan elektroda busi menjadi lebih panas.

### **5.4. Tegangan Pengapian**

Sistem bahan bakar ganda atau tunggal, bensin maupun LPG, mesin memiliki busi yang bekerja dengan cara dasar yang sama. Hal ini memungkinkan hampir semua mesin bensin dapat dikonversi ke LPG dengan mudah dan ekonomis. Namun demikian, ada beberapa perbedaan signifikan ketika mesin berjalan pada LPG dibandingkan dengan bensin.

Pembakaran LPG menghasilkan temperatur dan tekanan yang lebih tinggi dari mesin bensin (untuk mesin yang sama). Pada penyetelan celah elektroda busi yang sama (10 mm), ini berarti mesin LPG membutuhkan tegangan pengapian yang lebih besar untuk ionisasi (peletikan bunga api dari elektroda positif ke elektroda negatif) dibandingkan mesin bensin.

Sebagai langkah penyesuaian, dengan tegangan pengapian yang tidak diubah, maka dilakukan penyesuaian celah elektroda busi dengan cara mengurangi celah busi untuk mempermudah ionisasi. Mengingat kecepatan pembakaran LPG lebih rendah daripada bensin, maka diperlukan penyesuaian saat penyalaan. Untuk mendapatkan MBT yang sama dengan mesin bensin, saat pengapian dimajukan beberapa derajat engkol. Grafik ilustrasi penyesuaian pengapian dapat dilihat pada Gambar 5.2 berikut [62].



**Gambar 5.2 Grafik penyesuaian pengapian pada mesin LPG**

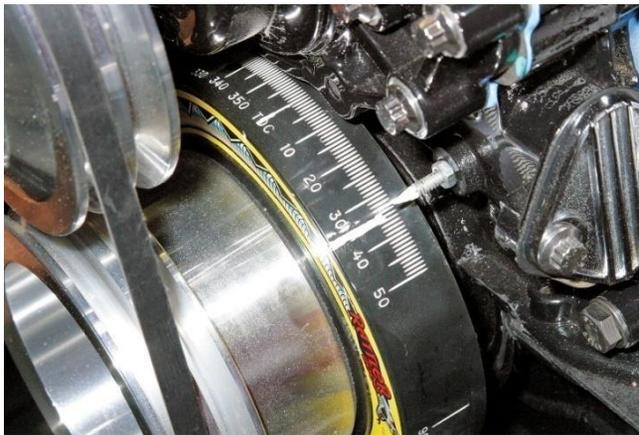
Gambar 5.2 diatas memberikan informasi ketika mesin beralih dari bensin ke LPG, saat pengapian (*ignition timing*) dapat dimajukan hingga +15° dari kondisi awal. LPG memiliki nilai oktan yang relatif tinggi (lebih dari 108), sehingga tangguh terhadap gejala *knocking*. Ini tidak akan menjadi masalah jika mesin beroperasi dengan LPG

dengan sistem *full dedicated*. Kondisi yang berbeda akan muncul pada mobil LPG sistem *bi-fuel*. Jika saat pengapian distel terlalu awal, akan timbul gejala knocking saat beroperasi dengan bensin. Untuk itu perlu kompromi agar diperoleh performa yang baik untuk kedua mode bahan bakar.

### 5.5. Pemeriksaan dan Penyetelan Waktu Pengapian

Penyetelan waktu pengapian dilakukan dengan menggeser posisi distributor. Waktu pengapian dapat dilihat dengan menyorotkan *timing light* ke *timing mark*. *Timing mark* umumnya terletak pada pulley *crank shaft* (Lihat Gambar 5.3). Namun demikian, beberapa mesin memiliki *timing mark* yang diletakkan pada *fly wheel*.

Pada mesin mesin modern, dengan adanya *knock sensor* tidak diperlukan lagi menyetel pengapian. Saat pengapian akan bergeser secara otomatis menyesuaikan jenis dan kualitas bahan bakar. Jika performa optimal mesin tidak dicapai, dapat dilakukan penyesuaian saat pengapian dengan sirkuit tambahan.



**Gambar 5.3** *Timing mark*  
(Sumber : mustangandfords)

### 5.6. Penyesuaian Nilai Panas Busi (*Heat Range*)

Nilai panas busi adalah indeks untuk menyatakan kapasitas mentransfer panas. Karakteristik yang berbeda dari setiap mesin

terkait dengan beban operasi, tekanan kompresi, putaran mesin, jenis sistem pendinginan, dan jenis bahan bakar, sangat tidak memungkinkan untuk menjalankan semua mesin dengan busi standar.

Pembakaran dengan LPG menghasilkan deposit carbon dan pengotoran yang lebih sedikit daripada pembakaran bensin. Walaupun demikian, busi pada mesin LPG harus dapat mentransfer panas pembakaran ke kepala silinder yang lebih baik, mengingat beban panas yang diterima lebih besar. Dengan alasan ini, mesin berbahan bakar LPG harus menggunakan busi dengan nilai panas yang lebih rendah. Penyesuaian jenis busi ini perlu dilakukan agar kinerja mesin pada temperatur tinggi tetap terjamin.

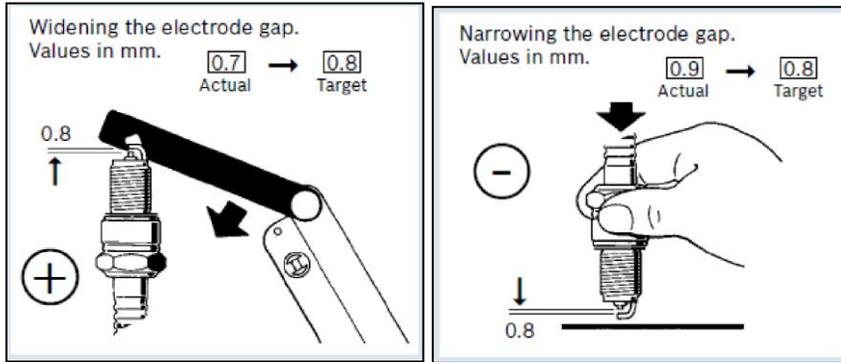
Bosch, adalah yang pertama untuk memperkenalkan program busi khusus untuk mesin LPG yang awalnya didedikasikan untuk pasar Australia. Umur pakai rata-rata kebanyakan busi standar adalah 15.000 km. Busi LPG buatan Bosch dirancang khusus untuk aplikasi LPG dengan umur pakai hingga mencapai 30.000 km.

**Tabel 5.1 Aplikasi busi Bosch pada berbagai jenis kendaraan LPG**  
[62]

Make	Model	Model Code	Engine Size	Power	Engine Type	Gap (mm)	Bosch Spark Plug
Holden	Commodore	VX	3.8	152	VH <LN3>	0.7	HR 7 KI 332 S
Holden	Commodore	VX	5.7	225	VF <LS1>	0.9	HR 8 KI 332 W
Holden	Commodore	VX II	3.8	152	VH <LN3>	0.7	HR 7 KI 332 S
Holden	Commodore	VX II	5.7	225	VF <LS1>	0.9	HR 8 KI 332 W
Holden	Commodore	VY	3.8	152	VH <LN3>	0.7	HR 7 KI 332 S
Holden	Commodore	VY	5.7	225	VF <LS1>	0.9	HR 8 KI 332 W
Holden	Commodore	VY II	3.8	152	VH <LN3>	0.7	HR 7 KI 332 S
Holden	Commodore	VY II	5.7	235-245	VF <LS1>	0.9	HR 8 KI 332 W
Holden	Commodore	VZ	3.6	175	HB <Decontent>	0.7	HR 6 NI 332 S
Holden	Commodore	VZ	3.6	190	H7 <Premium>	0.7	HR 6 NI 332 S
Holden	Commodore	VZ	5.7	235-250	VF <LS1>	0.9	HR 8 KI 332 W
Holden	Commodore	VZ	6.0	260	L76	0.9	HR 8 KI 332 W
Holden	Commodore	VE	3.6	180	H7	0.7	HR 6 NI 332 S
Holden	Commodore	VE	3.6	195	H7 <Premium>	0.7	HR 6 NI 332 S
Holden	Commodore	VE	6.0	270	L98 <LS2>	0.9	HR 8 KI 332 W
Ford	Falcon	BA	4.0	156	S <GAS>	0.9	FR 7 KPP 33 U+
Ford	Falcon	BA	4.0	182	H <Barra 182>	0.7	FR 6 KI 332 S
Ford	Falcon	BA II	4.0	156	S <GAS>	0.9	FR 7 KPP 33 U+
Ford	Falcon	BA II	4.0	182	H <Barra 182>	0.7	FR 6 KI 332 S
Ford	Falcon	BF	4.0	156	S <Egas>	0.9	FR 7 KPP 33 U+
Ford	Falcon	BF	4.0	190	H <Barra 190>	0.7	FR 6 KI 332 S
Ford	Falcon	BF II	4.0	156	S <Egas>	0.9	FR 7 KPP 33 U+
Ford	Falcon	BF II	4.0	190	H <Barra 190>	0.7	FR 6 KI 332 S
Holden	Rodeo	KB	1.8	63	G180Z	0.7	WR 6 KI 33 S
Holden	Rodeo	KB	1.9	65	G200Z	0.7	WR 6 KI 33 S
Holden	Rodeo	TF	2.2	87	22NE	0.7	WR 6 KI 33 S
Holden	Rodeo	TF	2.3	81	4ZD1	0.7	WR 7 KI 33 S
Holden	Rodeo	RA	2.4	94	C24SE	0.7	WR 7 KI 33 S
Holden	Rodeo	TF	2.6	88	4ZE1	0.7	WR 7 KI 33 S
Holden	Rodeo	TF	3.2	140	6VD1	0.7	FR 6 KI 332 S
Holden	Rodeo	RA	3.5	147	6VE1	0.7	FR 6 KI 332 S
Holden	Rodeo	RA	3.5	147	6VE1	0.7	FR 6 KI 332 S
Holden	Rodeo	RA	3.6	157	H9 <HFV6 Euro3>	0.7	HR 6 NI 332 S
Toyota	Camry	SKV10	2.2	93	5SFE	0.7	FR 6 KI 332 S
Toyota	Camry	SKV20	2.2	94	5SFE	0.7	FR 6 KI 332 S
Toyota	Camry	ACV40	2.4	117	2AZFE	0.7	FR 6 KI 332 S
Toyota	Camry	VDV10	3.0	136	3VZFE	0.7	FR 6 KI 332 S
Toyota	Camry	VCV10	3.0	136	3VZFE	0.7	FR 6 KI 332 S
Toyota	Camry	MCV20	3.0	141	1MZFE	0.7	FR 7 LI 332 S
Toyota	Camry	MCV36	3.0	141	1MZFE	0.7	FR 7 LI 332 S
Mitsubishi	Triton	MK	3.0	133	6G72	0.7	FR 5 KI 33 S

### 5.7. Penyesuaian Celah Busi (*Spark Gap*)

Celah busi sangat mungkin berubah saat dipakai dalam jangka waktu tertentu. Kondisi ini juga mungkin terjadi pada busi baru. Jika celah busi tidak sesuai dengan target spesifikasi, dapat dilakukan penyesuaian dengan *spark plug gap gauge* atau dengan *feeler gauge*. Ilustrasi penyetelan celah busi disajikan dalam Gambar 5.4 sebagai berikut.

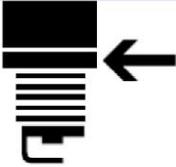
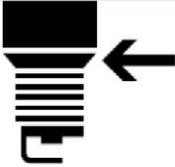


**Gambar 5.4** Penyetelan celah busi  
(Sumber : Bosch; *LPG spark plug*)

### 5.8. Memasang Busi dengan *Torque Wrench*

Pemasangan busi yang benar adalah dengan *torque wrench* atau kunci momen. Saat ini, tersedia tiga jenis *torque wrench* yaitu model jarum, model klik, dan model digital. Pasangkan busi dengan tangan sampai busi duduk menguulir sempurna pada kepala silinder. Kencangkan busi dengan *torque wrench* sesuai spesifikasi. Spesifikasi torsi pengencangan yang tertera adalah pada saat ulir busi dan ulir lubang busi dalam kondisi kering. Untuk itu, pasang busi tanpa oli atau *grease*.

Tingkat torsi pengencangan tergantung pada jenis material kepala silinder dan bentuk cincin busi. Torsi pengencangan busi pada kepala silinder yang terbuat dari baja tuang (*cast iron*) lebih besar daripada material alumunium paduan (*alloy*). Baja tuang memiliki sifat fisik yang lebih keras daripada alumunium paduan. Begitu juga pada jenis cincin busi, torsi pengencangan pada busi dengan cincin bentuk kerucut lebih besar daripada busi dengan cincin bentuk rata

Flat seat			Conical seat		
					
	in cast iron	in light alloy		in cast iron	in light alloy
M 10x1	10 ... 15	10 ... 15			
M 12x1,25	15 ... 25	15 ... 25			
M 14x1,25	20 ... 40	20 ... 30	M 14x1,25	15 ... 25	10 ... 20
M 18x1,5	30 ... 45	20 ... 35	M 18x1,5	20 ... 30	15 ... 23

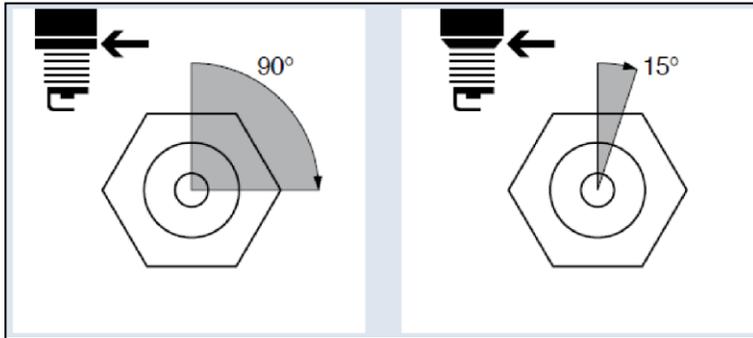
**Gambar 5.5 Spesifikasi torsi pengencangan (*torque wrench*)**

(Sumber : Bosch; *LPG spark plug*)

### 5.9. Memasang Busi Tanpa *Torque Wrench*

Jika tidak tersedia *torque wrench*, pemasangan busi dapat dilakukan dengan kunci busi atau SST busi. Pasang busi dan putar dengan tangan sampai mengulir sempurna pada kepala silinder. Busi baru dengan cincin rata dikencangkan dengan kunci busi sampai  $\pm 90^\circ$ , sedangkan busi dengan cincin kerucut dikencangkan sampai  $\pm 15^\circ$ .

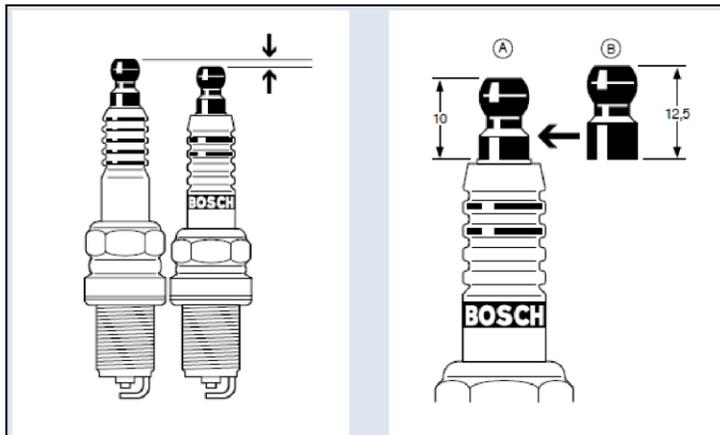
Kepala silinder dengan material dari aluminium paduan sangat sensitive terhadap kekuatan pengencangan busi. Torsi pengencangan yang berlebihan (*over torque*) akan menimbulkan kerusakan pada ulir lubang busi. Namun demikian, jika torsi pengencangannya terlalu lemah akan menyebabkan kebocoran kompresi.



**Gambar 5.6 Pemasangan busi tanpa *torque wrench***

### 5.10. Memasang Tutup Busi

Pada sisi ujung busi terdapat baut (*connecting nuts*) untuk mengkoneksikan busi ke tutup busi. Beberapa jenis busi dengan merk dan spesifikasi yang berbeda mungkin saja berbeda ukuran *connecting nuts*-nya. Hal ini akan mempengaruhi posisi pengunci pada tutup busi. Jika ini terjadi, lepaskan *connecting nuts* pada busi baru dan busi lama kemudian saling ditukarkan. Namun demikian, beberapa jenis busi memiliki *connecting nuts* yang tidak dapat dilepas. Untuk kasus ini, harus dipastikan koneksinya dengan tutup busi dalam keadaan baik.



**Gambar 5.7 Penyesuaian *connecting nuts***

### **5.11. Inspeksi Kabel Busi (*Ignition Lead*)**

Sistem pengapian adalah kunci untuk mendapatkan tenaga mesin yang optimal. Ketika kendaraan berbahan bakar bensin dikonversi ke LPG, kinerja sistem pengapian harus lebih efisien. Salah satu titik masalah melemahnya sistem pengapian adalah pada kabel kabel busi (*ignition leads*). Kerusakan pada kabel busi menghasilkan perbedaan yang signifikan terhadap kinerja mesin. Pada beberapa kasus, dapat mengakibatkan suara mesin kasar (*noise*), *miss-fire*, pemborosan konsumsi bahan bakar, dan menyebabkan kerusakan pada komponen lainnya.

Untuk memastikan berfungsinya sistem pengapian, kabel busi harus dalam kondisi baik (tidak aus atau rusak pada ujung ujungnya) dan semua koneksi harus kuat. Kinerja sistem pengapian dapat diuji dengan sebuah osiloskop. Tegangan pengapian yang terukur harus sesuai dengan target tegangan atau spesifikasi yang diberikan oleh produsen kendaraan. Jika hasil pengukuran jauh diluar spesifikasi, ganti kabel busi dan kelengkapannya.

### **5.12. Tinjauan Kasus 5.1: *Simple Electronic Spark Advance Module***

[63]

#### **5.12.1. Latar Belakang**

Studi yang berkaitan dengan waktu pengapian untuk kendaraan berbahan bakar LPG telah banyak dilaporkan. Sebuah pengujian telah dilakukan dengan propana cair HD-5 pada stok Ford Taurus 3.5 L V6 Eco Boost. Studi ini melaporkan bahwa waktu pengapian dapat ditingkatkan hingga 20 derajat pada muatan penuh, dan tidak terjadi knocking pada putaran berapapun. Secara signifikan, efisiensi termal yang lebih baik ditunjukkan dengan waktu pengapian optimal. Sebelumnya, Lawankar (2012) juga telah meneliti secara rinci tentang kinerja mesin SI berbahan bakar LPG pada rasio kompresi dan pengapian yang berbeda. Hasilnya menunjukkan bahwa waktu pengapian memiliki pengaruh terhadap efisiensi termal. Diamati bahwa efisiensi terbaik diperoleh pada 30 °BTDC untuk semua rasio kompresi.

Mengacu pada penelitian sebelumnya, diperoleh informasi bahwa mesin bi-fuel memerlukan dua kurva pengapian. Jika hanya satu kurva pengapian untuk mode bensin yang tersedia, akan menyebabkan penurunan daya yang signifikan saat dioperasikan dalam mode LPG. Sebaliknya, jika kurva pengapian mengacu pada mode LPG, knocking akan terjadi saat menggunakan bensin. Untuk mencapai hasil maksimal pada kedua mode bahan bakar, kurva pengapian harus diganti mengikuti operasi bahan bakar. Kurva pengapian harus bisa bergerak maju atau mundur secara otomatis saat operasi bahan bakar berubah, terutama saat akselerasi dan beban motor. Cara terbaik untuk memastikan pengapian dioptimalkan untuk kedua bahan bakar adalah dengan sistem "Dual Curves".

Percobaan untuk menyesuaikan kurva pengapian di LPG, CNG dan mesin bensin telah dilakukan. *Timing Advance Processor* (TAP) diterapkan untuk memanipulasi sinyal dari koil pengapian. Sinyal diproses lebih lanjut melalui perangkat ini sebelum umpan balik ke ECU. Perangkat lain dinamakan *Electronic Spark Advance Variator* (ESAV). Baik *Timing Advance Processor* dan *Electronic Spark Advance Variator* bekerja berdasarkan pada sinyal dari koil pengapian. Kekurangannya, selama akselerasi dan beban berat, pengajuan pengapian belum sepenuhnya diakomodasi.

Studi kasus ini menyajikan metode baru untuk mengendalikan waktu pengapian mesin bi-fuel dengan sebuah modul elektronik. Tujuannya adalah untuk memperbaiki *power loss* saat berjalan dengan LPG selama akselerasi dan beban berat serta mempertahankan daya saat berjalan dengan bensin. Kurva pengapian dapat diubah berdasarkan informasi dari *Manifold Absolute Pressure Sensor* (MAPS). Metode ini dinamakan *Simple Electronic Spark Advance Module* (SESAM). Prinsip dasar metode ini adalah memanipulasi sinyal umpan balik dari MAPS dari 4,5 - 0,5 volt berdasarkan tekanan *intake manifold* (101 - 20,1 kPa). Pada kecepatan idle dengan bensin, umpan balik dari MAPS berkisar antara 1,4 sampai 1,5 volt yang linier dengan tekanan manifold. Saat mesin berjalan dengan LPG, umpan balik dibuat lebih rendah dari 1,4 volt saat mesin bekerja pada tekanan *intake manifold* yang lebih tinggi.

Total Ignition Timing (TIT) mesin EFI diatur berdasarkan pada pengaturan ECU kemudian dikoreksi oleh kondisi mesin yang direkam oleh sensor. Rumusnya diberikan sebagai berikut:

$$TIT = BIT + AT + CT + BP + MC + CC + UI \quad (5.1)$$

Dimana, TIT berdasarkan waktu pengapian dari tabel pengapian dasar, AT adalah kompensasi temperatur udara, CT adalah kompensasi temperatur pendingin, BP adalah kompensasi tekanan barometrik, MC adalah kompensasi MAP, CC adalah kompensasi silinder individu, dan UI adalah kompensasi masukan yang dapat dipilih oleh pengguna. Sebuah kurva pengajuan pengapian saat berjalan pada mode LPG, ketika mesin berakselerasi, umpan balik dari MAPS dimanipulasi dengan sirkuit elektronik sederhana (SESAM). Umpan balik dari MAPS diturunkan beberapa volt sebelum dipasok ke ECU. Perbedaan voltase dapat diatur sesuai keinginan dengan menyesuaikan variabel resistor. Dengan menerapkan metode ini, ECU menerima informasi seolah-olah mesin berjalan dalam tekanan intake manifold yang lebih tinggi sehingga pengapian bergeser ke depan. Ketika mesin dikembalikan ke operasi bensin, tegangan umpan balik dari MAPS tidak melewati sirkuit dan kembali ke kurva pengapian normal.

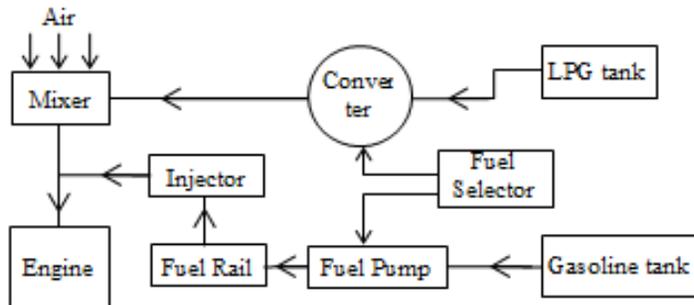
### 5.12.2. Uji Coba pada Mesin

Mesin yang digunakan selama uji coba ini adalah Toyota 5A-FE yang telah dimodifikasi untuk sistem pengalaman *bi-fuel*. Converter yang digunakan adalah Stefanelli 150HP. Spesifikasi mesin, dan instalasi bahan bakar biokimia LPG/bensin disajikan pada Tabel 5.1 dan Gambar 5.8 sebagai berikut.

**Tabel 5.2 Spesifikasi mesin yang digunakan**

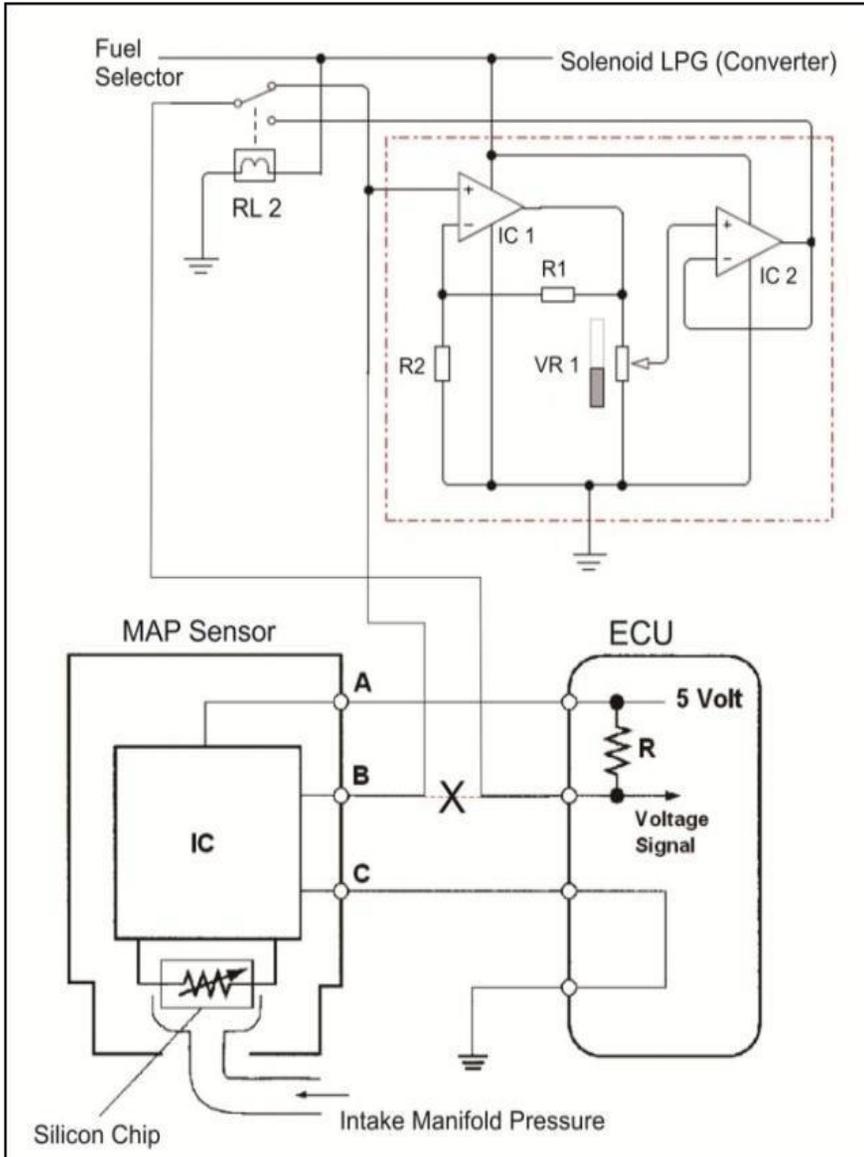
<i>Engine code</i>	: <u>5A-FE</u>
<i>Cylinders</i>	: <i>Inline 4</i>
<i>Capacity</i>	: 1498 cc

<i>Bore × Stroke</i>	: 78,7 × 77 mm
<i>Valve mechanism</i>	: DOHC, 4 valves per cylinder
<i>Maximum power output</i>	: 77 kw @ 6000 rpm
<i>Maximum torque</i>	: 135 Nm @ 4800 rpm
<i>Compression ratio</i>	: 9,8:1
<i>Fuel system</i>	: EFI



**Gambar 5.8 Instalasi *bi-fuel* LPG/Bensin**

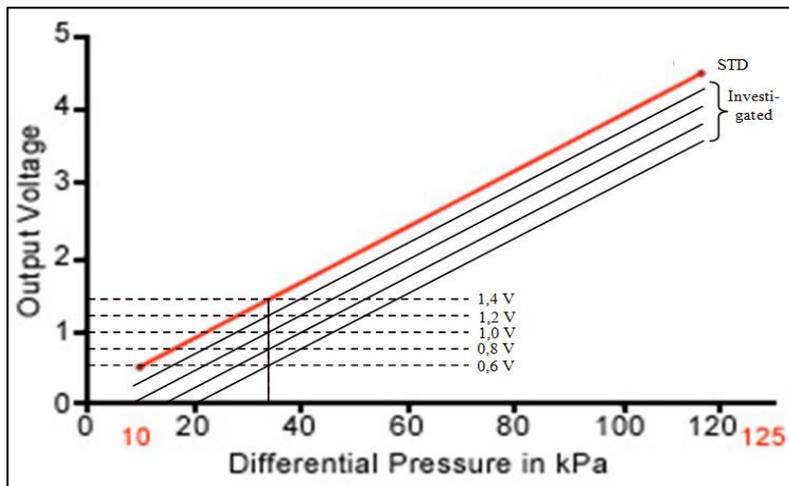
Saat pemilih bahan bakar dialihkan ke mode LPG, RL2 diaktifkan sehingga voltase umpan balik dari MAPS akan diproses melalui sirkuit. Bila mode operasi digeser ke Bensin, RL2 menjadi tidak aktif, tegangan umpan balik dari MAPS akan dipasok langsung ke ECU. Modul SESAM ditunjukkan pada Gambar 5.9.



**Gambar 5.9 Simple Electronic Spark Advance Module (SESAM)**

Dalam kondisi standar dan mesin beroperasi dengan bensin, tegangan dari ECU ke MAPS (A) adalah 5 volt dan umpan balik dari MAPS ke ECU (B) sekitar 1,4 volt saat idle ( $\pm 37$  kPa) dan meningkat

secara linear hingga 4,5 volt pada 100 kPa. Saat mesin beroperasi dengan LPG, output dari SESAM ditetapkan pada 0,6; 0,8; 1.0; 1.2; dan 1,4 volt saat idle. Dibandingkan dengan standar data, grafik MAPS setelah melalui rangkaian disajikan pada Gambar 5.10.



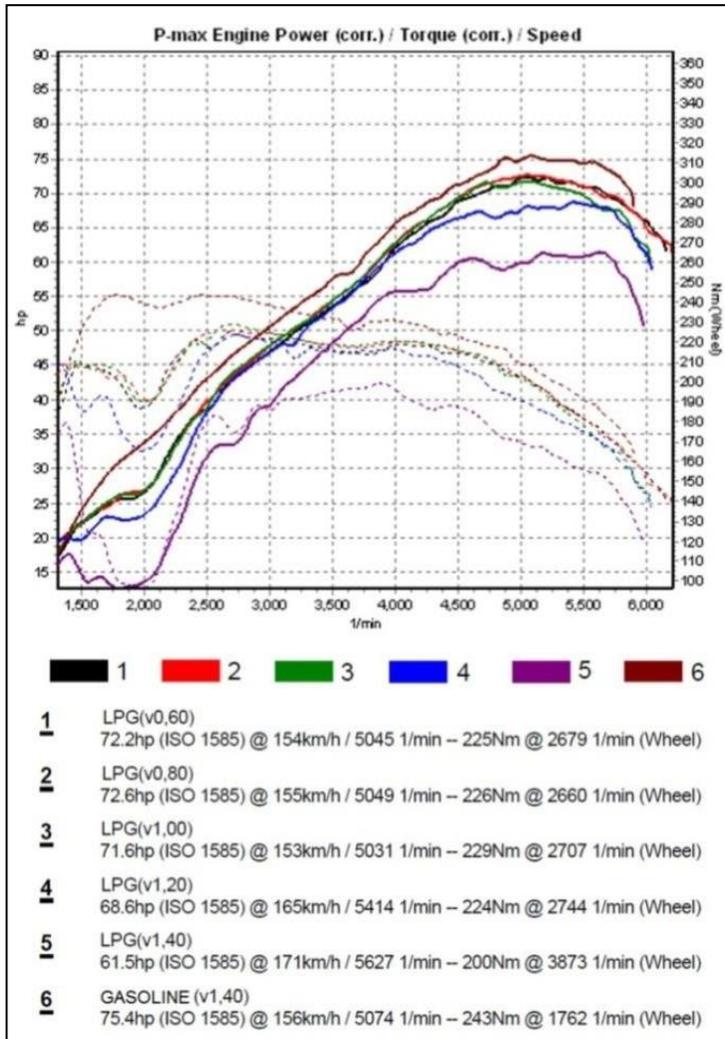
Gambar 5.10 Grafik MAPS sebelum dan setelah melalui SESAM

### 5.12.3. Hasil dan Pembahasan

Dalam uji terap ini, daya mesin dicatat dari 1500 sampai 6000 rpm. Serangkaian tes menunjukkan bahwa kontrol umpan balik MAPS (yang berarti mengubah waktu pengapian) memiliki pengaruh besar pada torsi dan daya mesin (Gambar 5.11). Dalam mode operasi LPG dan tanpa kontrol umpan balik MAPS (V: 1,4), daya mesin sangat rendah (kurva 5). Terlihat jelas bahwa daya maksimum hanya 61,5 hp @ 5045 rpm sedangkan mode bensin mampu menghasilkan 75,4 hp @ 5049 rpm (kurva 6). Terjadi penurunan sebesar 14,5%. Bahkan pada putaran mesin di bawah 2000 rpm, terjadi kehilangan daya yang signifikan.

Jika umpan balik MAPS diturunkan menjadi 1,2 volt (kurva 4) setelah melalui SESAM, daya mesin maksimum naik menjadi 68,6 hp @ 5414 rpm, atau hanya berbeda 9% dari mode operasi bensin. Mesin menunjukkan kinerja yang baik pada rpm tinggi, namun masih rendah pada rpm rendah. Hasil yang baik diperoleh pada umpan balik MAPS

adalah V: 1,0 dan V: 0,8 (kurva 3 dan 2) dengan kurva yang hampir berhimpit, namun V: 0,8 lebih baik dari V: 1,0, meskipun daya maksimumnya belum bisa menyamai mesin bensin. Bila umpan balik MAPS diturunkan lagi menjadi 0,6 Volts (kurva 1), daya maksimum akan menurun. Informasi tambahan didapat bahwa kehilangan daya dengan penerapan SESAM hanya 4%. Ini lebih baik dibandingkan dengan ujicoba oleh beberapa peneliti sebelumnya.



**Gambar 5.11 Hasil ujicoba SESAM**

#### 5.12.4. Kesimpulan

*Simple Electronic Spark Advance Module* (SESAM) untuk mengendalikan waktu pengapian pada mesin bi-fuel bisa menghasilkan kinerja yang baik dalam dua mode bahan bakar, LPG dan bensin, terutama saat akselerasi dan beban berat. Ketika mesin berjalan dengan LPG, dan umpan balik MAPS berubah dari 1.4 sampai 1,0 volt memiliki pengaruh yang cukup besar, meskipun pada kisaran 1,0 sampai 0,6 volt menunjukkan hasil yang hampir sama, daya maksimum terbaik terjadi saat umpan balik MAPS diatur pada 0,8 volt. Kesimpulannya, kehilangan daya dari mesin *bi-fuel* saat berjalan dengan LPG dapat diperbaiki dengan memanipulasi umpan balik MAPS sebelum disuplai ke ECU.

### 5.13. Tinjauan Kasus 5.2: *Deceleration Fuel Cut-Off* [64]

#### 5.13.1. Latar Belakang

Selama dekade terakhir, penurunan kualitas udara, terutama di daerah perkotaan menjadi perhatian serius karena berdampak langsung pada kesehatan manusia. Sektor transportasi menjadi penyumbang utama meningkatnya emisi, polutan udara, dan gas rumah kaca global. Sekarang, sebagian besar negara telah menerapkan kebijakan standar ekonomi bahan bakar untuk kendaraan sebagai cara yang efisien untuk mengurangi konsumsi minyak, emisi karbon, dan polutan udara. Teknologi mesin pembakaran internal juga berkembang ke arah itu. Oleh karena itu, studi kasus ini menyajikan simulasi *fuel cut-off* selama perlambatan pada kendaraan berbahan bakar LPG sebagai upaya mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi. LPG menjadi pilihan karena bisa langsung diterima pada teknologi kendaraan yang ada hanya dengan menambahkan converter kit pada sistem bahan bakar. Meski kurang menjanjikan terkait output daya mesin, namun emisi gas buang dari mesin LPG lebih bersih dari pada mesin bensin.

Dalam dekade terakhir, banyak pendekatan telah dilakukan untuk memperbaiki ekonomi bahan bakar mesin LPG. Diketahui bahwa campuran stoikiometri ( $\lambda = 1$ ) dapat mencapai efisiensi termal yang sangat baik. Baru-baru ini, sistem kontrol temperatur LPG untuk memperbaiki emisi telah dikembangkan. Sirkuit pendingin di

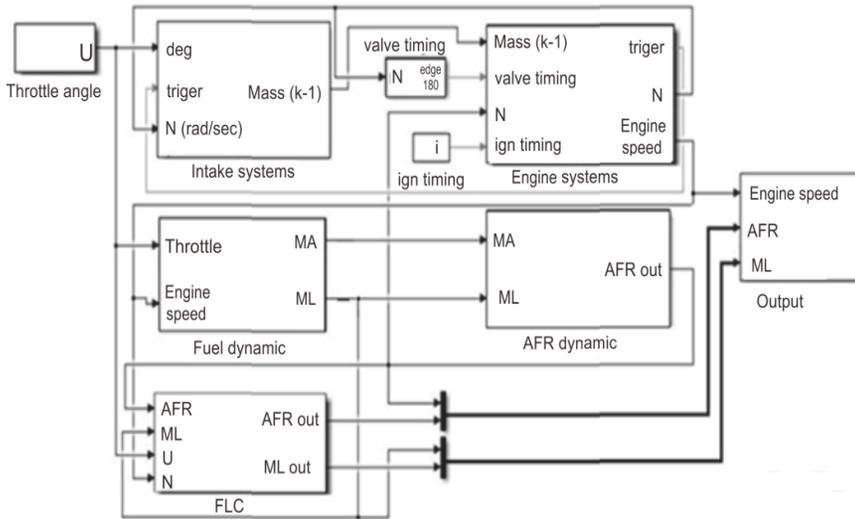
vaporizer dikendalikan oleh katup yang diaktifkan oleh unit pengendali PID. Hasilnya menunjukkan bahwa emisi NO dapat dikurangi sekitar 2% dibandingkan dengan operasi dengan sistem injeksi LPG asli. Selain itu, melalui penerapan sistem kontrol, emisi kendaraan LPG dapat dikurangi jauh di bawah operasi bensin.

Pada CM LPG kits, LPG yang terhisap ke mesin diatur melalui kevakuman *intake manifold*. Pada saat perlambatan, kevakuman *intake manifold* sangat besar karena katup throttle tertutup. Hal ini menyebabkan pemborosan bahan bakar dan menghasilkan emisi yang tinggi. Cara alternatif untuk menghemat bahan bakar sekaligus mengurangi emisi adalah dengan menghentikan arus LPG saat mesin mengalami perlambatan melalui penghentian bahan bakar sementara.

Kenyataannya, mesin pembakaran dalam (ICE) memiliki sistem dinamik yang kompleks, termasuk hubungan antara aliran bahan bakar, kecepatan mesin, pembakaran, dan aliran gas buang. Untuk itu, cara terbaik untuk menggerakkan sistem *cut-off* bahan bakar adalah dengan sistem kontrol. Dalam studi ini, *deceleration fuel cut-off* (DFCO) dimodelkan oleh simulasi komputer untuk mengaktifkan solenoid pada *converter* LPG. Mengingat bahwa sistem dalam kendaraan bersifat dinamis dan non linier, pendekatan yang dilakukan dalam pemodelan ini adalah dengan pengontrol logika fuzzy (FLC). FLC dipilih karena memiliki stabilitas sistem yang relatif baik, mampu mengatasi masalah black box dan bisa diaplikasikan pada multi input multi output (MIMO). Konsep matematika fuzzy sederhana dan mudah dimengerti. Fuzzy juga toleran terhadap *improper data*.

### **5.13.2. Pemodelan Sistem**

Dalam studi kasus ini, model matematik digunakan untuk memodelkan kondisi sebenarnya dari mesin SI. Pemodelan mesin dibagi menjadi beberapa bagian, termasuk dinamika manifold dan dinamika mesin. Hubungan antara tekanan udara manifold, termeratur udara manifold, dinamika kecepatan poros engkol dan dinamika bahan bakar ditunjukkan pada Gambar 5.12.



**Gambar 5.12** Pemodelan mesin

### Dinamikan *intake manifold*

Dinamika *intake manifold* dipengaruhi oleh posisi katup throttle, tekanan *intake manifold* dan *mass flow rate*. Dinamika *intake manifold* disajikan dengan Persamaan (5.2) sebagai berikut

$$\dot{m}_{ai} = f(\theta) \cdot g(P_m) \quad (5.2)$$

Dimana,  $\dot{m}_{ai}$  adalah *flow rate* udara ke manifold (g/s),  $f(\theta)$  adalah sudut throttle valve, dan  $P_m$  adalah *intake manifold pressure* (bar). Selanjutnya, fungsi kendala pada dinamika *intake manifold* diberikan pada Persamaan (5.3) - (5.7) sebagai berikut.

$$f(\theta) = 2.821 - 0.05231 \cdot \theta + 0.10299 \cdot \theta^2 - 0.00036 \cdot \theta^3 \quad (5.3)$$

$$g(P_m) = 1; \text{ if } P_m \leq \frac{P_{amb}}{2} \quad (5.4)$$

$$g(P_m) = \frac{2}{P_{amb}} \sqrt{P_m \cdot P_{amb} - P_m^2}; \text{ if } \frac{P_{amb}}{2} \leq P_m \leq P_{amb} \quad (5.5)$$

$$g(P_m) = -\frac{2}{P_{amb}} \sqrt{P_m \cdot P_{amb} - P_m^2}; \text{ if } P_{amb} \leq P_m \leq P_{amb} \quad (5.6)$$

$$g(P_m) = -1; \text{ if } P_m \geq P_{amb} \quad (5.7)$$

Kenyataannya, saat mesin sedang berjalan, akan terjadi perubahan tekanan *intake manifold*. Dalam hal ini, massa udara dari waktu ke waktu dalam *intake manifold* adalah berbeda. Tanpa mempertimbangkan resirkulasi gas mesin (EGR), perubahan tekanan pada *intake manifold* disajikan di persamaan berikut.

$$\dot{P}_m = \frac{R \cdot T}{V_m} (\dot{m}_{ai} - \dot{m}_{ao}) \quad (5.8)$$

$$\dot{m}_{ao} = -0.366 + 0.08979 \cdot N \cdot P_m - 0.0337 \cdot N \cdot P_m^2 + 0.0001 \cdot N^2 \cdot P_m \quad (5.9)$$

$\dot{P}_m$  adalah *intake manifold pressure changes* (bar/s).  $R$  dan  $T$  adalah konstanta gas and temperatur udara (K), secara berurutan. Sementara,  $V_m$  adalah volume *intake manifold* (m<sup>3</sup>) dan  $\dot{m}_{ao}$  adalah mass *flow rate* udara keluar *intake manifold* (g/s). Terakhir,  $N$  adalah *angular engine speed* (rad/s).

### Dinamika Mesin

Seperti diketahui, torsi mesin dipengaruhi oleh massa udara yang masuk ke silinder, rasio udara terhadap bahan bakar, waktu pengapian dan kecepatan putar mesin. Perhitungan torsi disajikan dengan Persamaan (5.10) sebagai berikut.

$$\begin{aligned} Torque_{eng} = & -181.3 + 379.36 \cdot m_a + 21.91 \cdot AFR \quad (5.10) \\ & - 0.85 \cdot AFR^2 + 0.26 \cdot \sigma - 0.0028 \cdot \sigma^2 \\ & + 0.027 \cdot N - 0.000107 \cdot N^2 + 0.00048 \cdot N \cdot \sigma \\ & + 2.55 \cdot \sigma \cdot m_a - 0.05 \cdot \sigma^2 \cdot m_a \end{aligned}$$

$Torque_{eng}$  adalah torsi mesin (N.m) dan  $\sigma$  adalah spark advance. Kemudian, akselerasi mesin dinyatakan dengan Persamaan (5.11) sebagai berikut.

$$JN = Torque_{eng} - Torque_{load} \quad (5.11)$$

### LPG flow rate

Dalam studi kasus ini, LPG diaplikasikan pada mesin 1998 cc. LPG masuk ke mesin berdasarkan kevakuman *intake manifold*. Kecepatan alir massa udara tergantung pada kecepatan mesin, efisiensi volumetrik, kerapatan udara, dan kecepatan mesin. Jumlah udara yang masuk mesin dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$m_a = \frac{\eta_v \cdot \rho_a \cdot V_d \cdot N}{12 \cdot 10^7} \quad (5.12)$$

$m_a$  adalah masa udara yang terhisap ke silinder (g/s).  $\eta_v, \rho_a, V_d$  dan  $N$  adalah *volumetric efficiency*, densitas udara ( $\text{kg/m}^3$ ), volume engine ( $\text{m}^3$ ) dan kecepatan mesin (rpm), secara berurutan. Densitas udara yang masuk ke mesin diasumsikan konstan pada  $1.2 \text{ kg/m}^3$ . Sementara, *volumetric efficiency* diperhitungkan dari studi Masi (2012).

**Tabel 5.3 Efisiensi volumetrik mesin 1998 cc berbahan bakar LPG**

Engine speed, n (rev/min)	Volumetric efficiency, $\eta_v$	Engine speed, n (rev/min)	Volumetric efficiency, $\eta_v$
1000	0,720	3600	0,747
1200	0,740	3800	0,743
1400	0,755	4000	0,742
1600	0,771	4200	0,747
1800	0,789	4400	0,755
2000	0,805	4600	0,764
2200	0,817	4800	0,779
2400	0,824	5000	0,792
2600	0,820	5200	0,790
2800	0,803	5400	0,775
3000	0,782	5600	0,750
3200	0,766	5800	0,710
3400	0,755	6000	0,650

Mengacu pada Tabel 5.3 dan persamaan (5.11), laju aliran LPG dan AFR sepanjang rentang putaran mesin dapat dihitung

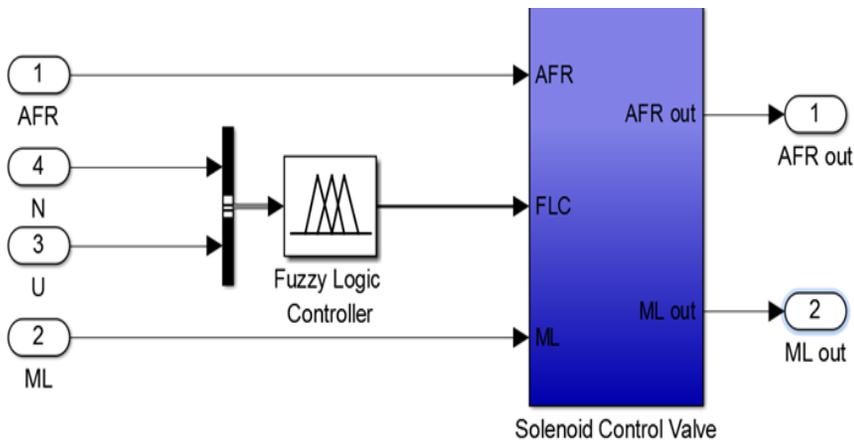
dengan menggunakan Persamaan (5.13) dan Persamaan (5.14) adalah sebagai berikut.

$$m_L = \frac{m_a}{AFR} \quad (5.13)$$

$$AFR = \frac{m_a}{m_L} \quad (5.14)$$

### Pemodelan DFCO

Pemodelan DFCO mempresentasikan sistem pengendalian bahan bakar yang dikembangkan. Sistem *cut-off* bahan bakar bekerja berdasarkan respons katup throttle  $U$  dan putaran mesin  $N$ . pemodelan DFCO disajikan pada Gambar 5.13.



**Gambar 5.13 Pemodelan *deceleration fuel cut-off* (DFCO)**

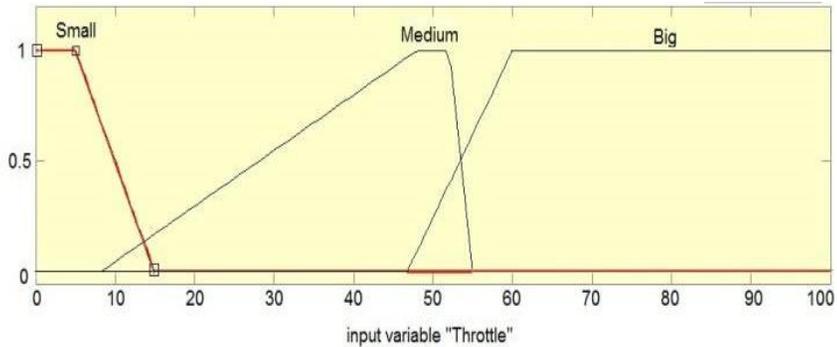
DFCO aktif saat putaran mesin tinggi sedangkan posisi katup *throttle* kecil. Dalam kondisi ini, mesin tidak membutuhkan bahan bakar. DFCO yang dikembangkan dalam studi ini berdasarkan keputusan yang disajikan pada Tabel 5.4.

**Tabel 5.4 DFCO decision**

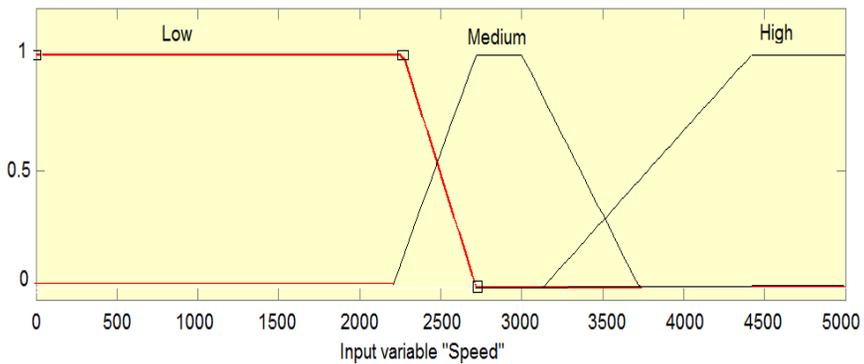
<i>Throttle valve position</i>	<i>Engine speed</i>	<i>DFCO decision</i>
High (47 - 100%)	High(3128 - 6000 rpm)	off
High (47 - 100%)	Medium (2200 - 3730 rpm)	off
High (47 - 100%)	Low (0 - 2700 rpm)	off
Medium (8 - 55%)	High (3128 - 6000 rpm)	off
Medium (8 - 55%)	Medium (2200 - 3730 rpm)	off
Medium (8 - 55%)	Low (0 - 2700 rpm)	off
<b>Small (0 - 15%)</b>	<b>High (3128 - 6000 rpm)</b>	<b>on</b>
Small (0 - 15%)	Medium (2200 - 3730 rpm)	off
Small (0 - 15%)	Low (0 - 2700 rpm)	off

### **Membership function**

*Fuzzy logic controller* (FLC) membutuhkan nilai fungsi keanggotaan (MF) sebagai input. MF adalah kurva yang menunjukkan pemetaan poin data masukan menjadi nilai keanggotaan (tingkat keanggotaan) yang memiliki interval antara 0 dan 1. Dalam studi ini, MF dirancang untuk dua masukan, MF dari posisi katup throttle dan MF dari kecepatan mesin. Pertama, MF dari katup throttle dibagi menjadi tiga kelas keanggotaan, kecil, sedang dan besar. Nilai MF untuk kecil, sedang dan besar masing-masing adalah 0 - 15%, 8% - 55% dan 45% - 100%. Dinamika katup Throttle pada MF disajikan pada Gambar 5.14. Kedua, MF kecepatan mesin juga terdiri dari rendah, sedang dan tinggi. Nilai MF rendah, sedang dan tinggi masing-masing adalah 0 - 2700 rpm, 2300 rpm sampai 3.400 rpm dan 3200 rpm - 6000 rpm. MF dari putaran mesin disajikan pada Gambar 5.15. Kemudian, FLC akan memberikan sinyal digital untuk mengatur voltase listrik ke solenoid yang terpasang pada alat penguap LPG.



**Gambar 5.14** *Membership function (MF) posisi throttle valve*

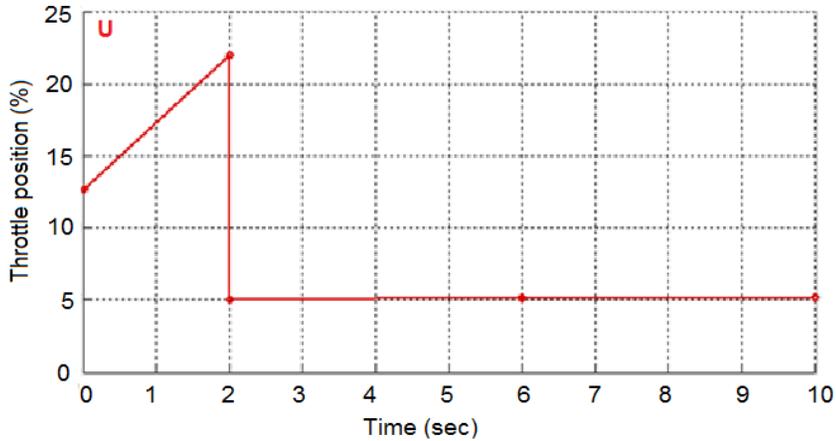


**Gambar 5.15** *Membership function (MF) kecepatan mesin*

### 5.13.3. Hasil dan Pembahasan

#### *Input condition*

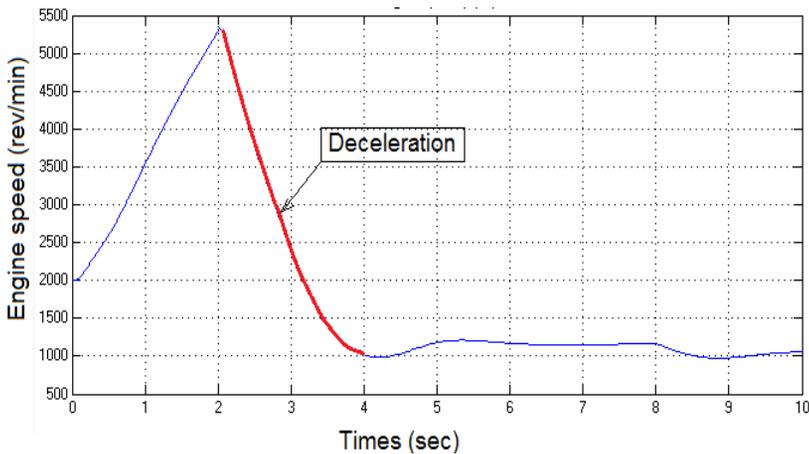
Dalam studi ini, mesin disimulasikan selama 10 detik yang merupakan percepatan dan perlambatan. Input utama mesin adalah posisi katup throttle. Periode pertama, 0 detik, katup throttle dibuka 13%. Periode kedua dari 0 - 2 detik, katup *throttle* dibuka dari 13% - 23%. Periode ketiga tepat pada 2 detik, katup throttle ditutup dari 23% - 5%. Periode ketiga dijaga hingga 10 detik. Dinamika posisi katup throttle disajikan pada Gambar 5.16.



**Gambar 5.16** Simulai *throttle valve* dari 0 tke 10 detik

### Efek pembukaan *throttle valve* terhadap kecepatan mesin

Seperti diketahui, saat katup *throttle* dibuka, udara dan bahan bakar terhisap ke dalam silinder. Tekanan pembakaran akan menghasilkan putaran mesin. Memperhatikan Persamaan (5.1 - 5.13) yang diproses oleh FLC, hasil putaran mesin (dengan posisi katup *throttle* sesuai dengan Gambar 5.16) disajikan pada Gambar 5.17 sebagai berikut.

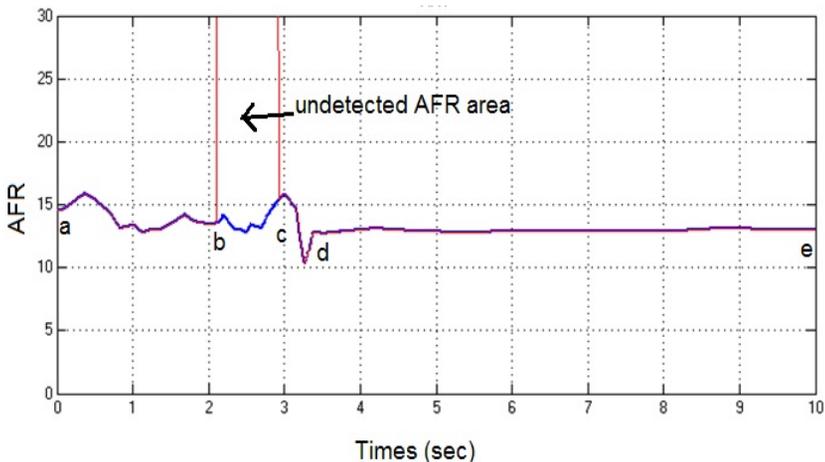


**Gambar 5.17** Simulai kecepatan mesin berdasarkan dinamika *throttle valve*

Dengan memperhatikan Gambar 5.17, katup *throttle* dibuka dari 13% - 23% meningkatkan kecepatan mesin dari putaran 2000 rpm menjadi 5300 rpm. Kemudian, saat *throttle* ditutup tiba-tiba 2 detik, putaran mesin tetap tinggi sampai 4 detik. Mesin masih beroperasi dengan kecepatan tinggi meski katup *throttle* tertutup. Dalam kondisi ini, bahan bakar mengalir ke silinder, meskipun tidak dibutuhkan.

### Kondisi DFCO bekerja

Kinerja DFCO dapat dilihat dengan kurva AFR yang ditunjukkan pada Gambar 5.18. Bila mesin sedang akselerasi (a-b), dinamika tekanan *intake manifold* menyebabkan AFR berfluktuasi. Kemudian, ketika katup *throttle* ditutup tiba-tiba (b-c), nilai AFR tidak terdeteksi. Kondisi ini mengindikasikan DFCO sedang bekerja. LPG yang mengalir ke mesin terputus oleh solenoid. FLC mengaktifkan kembali solenoid beberapa saat sebelum mesin menyala sesuai target yang ditentukan (c-d). Selanjutnya, jika katup *throttle* dibuka konstan, AFR juga terbaca konstan (d-e).

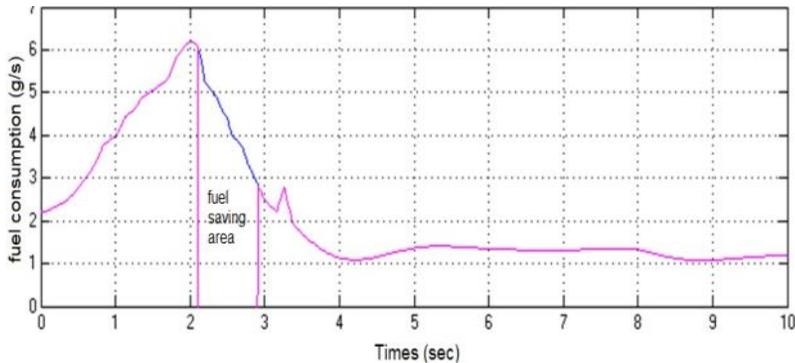


**Gambar 5.18 Kinerja DFCO**

### *Fuel consumption*

Sesuai dengan tujuan studi ini, DFCO digunakan untuk mengurangi konsumsi bahan bakar dan mengurangi emisi. Oleh

karena itu, kinerja DFCO terhadap penghematan bahan bakar dan pengurangan emisi disajikan pada Gambar 7.19. Bila mesin beroperasi dari periode 0 - 2 detik, konsumsi LPG telah meningkat. Pada saat DFCO aktif, konsumsi bahan bakar terbaca dalam 0 g/s. Garis warna biru menyajikan konsumsi LPG tanpa sistem kontrol DFCO dan garis ungu menyajikan konsumsi LPG dengan sistem kontrol DFCO.



**Gambar 5.19 Kinerja DFCO terhadap *fuel consumption***

#### 5.13.4. Kesimpulan

Serangkaian hasil simulasi menunjukkan bahwa pemodelan FLC untuk memotong aliran LPG selama deselerasi/perlambatan yang merupakan kondisi non linier dapat diterapkan. Posisi katup *throttle*, kecepatan mesin dan tekanan manifold mampu mengendalikan aliran LPG dalam kondisi yang diinginkan. Pada saat perlambatan, AFR tidak terdeteksi, yang berarti tidak ada aliran LPG dari tangki bahan bakar ke mesin. Kesimpulannya, sistem DFCO menjanjikan penerapan pada kendaraan berbahan bakar LPG untuk penghematan bahan bakar.

# BAB 6.

## ANALISIS TEKNO-EKONOMI



## **6.1. Studi Kasus 6.1: Analisis Tekno Ekonomi [65]**

### **6.1.1. Latar belakang**

Teknologi propulsi kendaraan bersih seperti kendaraan listrik (EV) dan sel bahan bakar (FC) menjanjikan di masa kini dan masa depan. EV dan FC membuktikan dampak lingkungan yang lebih baik daripada kendaraan bensin dan diesel. Namun demikian, mengganti kendaraan bahan bakar konvensional dengan teknologi EV dan FC dalam waktu dekat tidak mudah dilakukan karena faktor biaya kepemilikan dan infrastruktur. Dengan demikian, penggunaan bahan bakar alternatif dan energi alternatif yang memiliki dampak lingkungan dan viabilitas ekonomi lebih baik daripada bahan bakar fosil konvensional menjadi pilihan yang realistis. Di Indonesia, penggunaan LPG di kendaraan telah dipromosikan melalui kebijakan pemerintah sejak tahun 1988. Namun sampai tahun 2014 armada umum menggunakan LPG kurang dari 6000 unit.

### **6.1.2. Implementasi Skala Global**

Tren kendaraan LPG di seluruh dunia telah dilaporkan dan diperbaharui oleh World LPG Association. Dalam dekade terakhir, kendaraan LPG meningkat sekitar 9,4 juta pada tahun 2003 [66] dan lebih dari 17.4 juta pada tahun 2010. Pada 2014, ada lebih dari 25 juta kendaraan LPG, sebagian besar adalah Kendaraan Beban Ringan (*Light Duty Vehicle*, LDV) dan sisanya adalah Kendaraan Beban Berat (*Heavy Duty Vehicles*, HDV). Korea Selatan, Rusia, Polandia, Australia, Turki, India, dan Thailand adalah contoh negara yang berhasil mempromosikan LPG sebagai bahan bakar alternatif untuk kendaraan jalan. Di Asia Tenggara, Thailand berhasil mendorong LPG sebagai bahan bakar alternatif, termasuk jumlah kendaraan, konsumsi, dan jumlah tempat pengisian bahan bakar. Pada tahun 2020, diperkirakan ada lebih dari 35 juta.

Di negara-negara tersebut, orang tertarik untuk mengkonversi kendaraan mereka ke bahan bakar LPG. Biaya operasional menggunakan LPG lebih rendah daripada bensin, walaupun mereka memerlukan investasi awal untuk menginstalasi converter kit. Modal mereka akan segera kembali dalam jarak tempuh beberapa ribu

kilometer. Break Even Point (BEP) dan rasio biaya bahan bakar penggunaan LPG dibandingkan bensin di beberapa negara Asia disajikan pada Tabel 6.1.

**Tabel 6.1 BEP dan *cost ratio* kendaraan LPG di beberapa Negara.**

<i>Country</i>	<i>BEP distance compared to gasoline (km)</i>	<i>Fuel cost ratio (LPG to gasoline)</i>
Japan	169,405	0,62
India	22,141	0,59
Turkey	13,650	0,59
South korea	43,191	0,62
Thailand	28,508	0,32
Average	55,379	0,55

Kebijakan pemerintah sangat penting untuk memastikan keberhasilan pembangunan infrastruktur LPG [67]. Kesadaran dan edukasi masyarakat mempromosikan LPG juga telah dikembangkan untuk memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pertumbuhan pasar di beberapa negara. Kebijakan program konversi untuk armada publik telah sangat sukses di beberapa negara, termasuk India dan Amerika Serikat. Di Korea dan Jepang, pembatasan kendaraan diesel telah menjadi faktor penting dalam keberhasilan penggunaan LPG. Di sisi lain, kekhawatiran publik tentang keamanan dan keandalan LPG jelas telah mempengaruhi permintaan di beberapa negara, termasuk Prancis dan Belanda. Dalam beberapa kasus, fasilitas pengisian bahan bakar tidak mencukupi dan tidak merata juga dapat mencegah minat dalam menggunakan LPG.

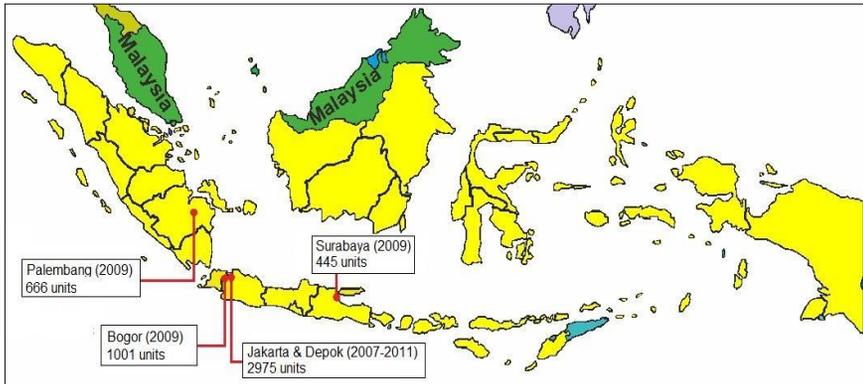
Berdasarkan pengalaman negara-negara yang sukses mendorong LPG untuk kendaraan jalan, sebuah kebijakan jangka panjang yang komprehensif diperlukan untuk memastikan keberhasilan konversi LPG, antara lain terkait dengan insentif fiskal, insentif peraturan, dan insentif penelitian dan pengembangan. Insentif fiskal termasuk pajak penjualan dan pemilikan kendaraan LPG, penyediaan peralatan converter secara gratis, keringanan biaya pendaftaran kendaraan, dan keringanan parkir di jalan. Insentif

peraturan meliputi kebutuhan semua kendaraan umum dan kendaraan dinas yang dilengkapi dengan peralatan converter, membebaskan kendaraan LPG melalui jalan tol, dan menetapkan emisi knalpot standar tinggi [68]. Sementara insentif penelitian dan pengembangan meliputi pemberian biaya penelitian bagi peneliti dan lembaga lembaga riset.

### **6.1.3. Status Pengembangan Kendaraan LPG di Indonesia**

Kebijakan energi alternatif (termasuk LPG) diprakarsai oleh "*Blue Sky Program*" yang diluncurkan pertama kali pada tahun 1996 oleh Kementerian Lingkungan Hidup. *Blue Sky Program* ditujukan untuk mengendalikan polusi udara dan mewujudkan perilaku sadar lingkungan baik dari sumber stasioner seperti sumber rumah tangga dan industri atau non stasioner seperti kendaraan. Bagi sektor rumah tangga, pemerintah Indonesia telah berhasil mengubah minyak tanah ke LPG selama periode 2007-2011. Pemerintah Indonesia tidak hanya berhasil mengurangi subsidi untuk bahan bakar minyak tetapi juga memperbaiki bahan bakar rumah tangga, seperti kebersihan, kenyamanan, lingkungan, dan pengurangan biaya.

Penerapan LPG untuk LDV sebagai angkutan umum sudah dimulai sejak tahun 1988. Namun, selama 30 tahun ke depan tidak berkembang. Sekitar tahun 2007, pemerintah kembali mempromosikan LPG sebagai bahan bakar alternatif untuk kendaraan jalan. Insentif pemerintah dimulai dengan mendistribusikan converter kit secara gratis untuk transportasi umum di banyak kota seperti Jakarta, Surabaya, Bogor, dan Palembang sebagai proyek percontohan. Selama tahun 2007 sampai 2011, lebih dari 5000 kit LPG diberikan untuk transportasi umum, seperti taksi dan angkutan kota (Gambar 6.1). Pemerintah juga mengeluarkan panduan teknis tentang standar converter kit, infrastruktur, bengkel, dan teknisi. Kemudian, Pertamina sebagai salah satu Badan Usaha Milik Negara bersama beberapa perusahaan swasta secara bertahap membangun infrastruktur pengisian bahan bakar di beberapa kota. Kini, stasiun pengisian bahan bakar LPG sudah tersedia di Jakarta, Surabaya, Bandung, Bogor, Palembang, Semarang, Solo, Yogyakarta, Denpasar, dan Magelang.



**Gambar 6.1 Peta distribusi LPG dari Pemerintah Indonesia (2007-2011)**

LPG untuk kendaraan jalan di Indonesia disebut dengan Liquefied Gas for Vehicle (LGV) atau Vi-Gas. Pertumbuhan konsumsi gas telah meningkat rata-rata 40% per tahun, dari 189 kiloliter pada tahun 2008 menjadi 913 kiloliter pada tahun 2013, dan diperkirakan lebih dari 2000 kiloliter pada tahun 2016. Namun, jumlah ini terlalu kecil dibandingkan dengan bahan bakar konvensional seperti bensin dan solar. Saat ini, kendaraan LPG masih didominasi kendaraan milik dinas, Badan Usaha Milik Negara, dan kendaraan angkutan umum sebagai pilot project. Studi ekonomi LPG sebagai bahan bakar angkutan umum terkait dengan pengendalian harga dan investasi infrastruktur oleh pemerintah telah dilakukan oleh Samosir (2010) dan Mahendra dkk (2014). Namun, kemungkinan masyarakat belum menerima informasi yang akurat dan objektif terkait dengan manfaat yang diperoleh saat mereka mengganti bahan bakar konvensional ke LPG sehingga pertumbuhannya belum signifikan.

#### **6.1.4. Identifikasi Biaya (*Cost identification*)**

Secara umum, beberapa biaya harus dipertimbangkan oleh pemilik mobil sebelum beralih ke LPG, termasuk biaya modal, biaya perawatan, dan biaya bahan bakar. Untuk beralih dari bensin ke LPG, pemilik mobil bisa membeli kendaraan LPG yang diproduksi oleh

produsen mobil atau biasa disebut *Original Equipment Manufacturers* (OEM) atau menambahkan converter kit pada kendaraan yang ada. Kendaraan LPG memiliki biaya perawatan yang lebih rendah dibanding kendaraan bensin karena kontaminasi minyak pelumas oleh LPG yang lebih rendah daripada bensin. Karakteristik pembakaran yang lebih bersih karena kandungan karbon yang rendah juga mengurangi biaya perawatan. Biaya operasional kendaraan LPG bisa jauh lebih rendah dari pada kendaraan bensin karena selisih harga bahan bakar di situs pengisian bahan bakar.

Berdasarkan biaya modal, biaya perawatan, dan biaya bahan bakar yang dibutuhkan, studi ini membahas secara rinci sebuah analisis tekno-ekonomi untuk menilai biaya operasional kendaraan angkutan umum yang beroperasi dengan LPG dibandingkan bensin RON 88 (premium) dan bensin RON 92 (pertamax). Titik impas penggunaan LPG di Indonesia akan dijelaskan dan dibandingkan dengan beberapa negara di Asia. Sedangkan parameter *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), *Payback Period* (PP), dan analisis sensitivitas akan digunakan untuk menilai kelayakan investasi pengonversian kendaraan ke LPG.

#### **6.1.5. Parameter Assesment**

Dalam studi yang dicontohkan ini, *Light Duty Vehicles* yang mewakili angkutan umum, seperti taksi dan mobil angkutan kota disimulasikan. Konsumsi bahan bakar dan jarak tempuh mengacu pada studi yang dilaporkan oleh Samosir (2010) dan harga bahan bakar yang digunakan adalah harga di stasiun pengisian bahan bakar. Pada saat penulisan (April 2016), harga bensin di Indonesia di stasiun pengisian bahan bakar adalah Rp. 6.450 untuk RON 88 dan Rp 7.550 untuk RON 92. Sementara itu, harga LPG untuk kendaraan jalan adalah Rp 5.100 per liter setara premium (Isp). Parameter untuk analisis disajikan pada Tabel 6.2.

**Tabel 6.2 Parameter analisis**

<i>Item description</i>	<i>Unit</i>	<i>Value</i>	<i>Source</i>
A. Mileages per year	km	100,000	Samosir (2010) [69]
B. Fuel consumption	km/liter	10	Samosir (2010) [69]
C. Annual fuel consumption	liter	10,000	(A/B)
D. Gasoline 88 RON price per liter	IDR	6,450	Price in refueling site (April, 2016)
E. Gasoline 92 RON price per liter	IDR	7,550	Price in refueling site (April, 2016)
F. LPG price per liter(equivalent to gasoline)	IDR	5,100	Price in refueling site (April, 2016)
G. Annual fuel cost for gasoline 88 RON	IDR	64,500,000	(C x D)
H. Annual fuel cost for gasoline 92 RON	IDR	75,500,000	(C x E)
I. Annual fuel cost for LPG	IDR	51,000,000	(C x F)
J. Annual saving LPG to gasoline 88 RON	IDR	13,500,000	(G - I)
K. Annual saving LPG to gasoline 92 RON	IDR	24,500,000	(H - I)
L. Capital cost of LPG conversion	IDR	15,000,000	Considering the installation cost
M. Maintenance cost for LPG per kilometer	IDR	130	Estimated from RACQ, 2014 [70]
N. Maintenance cost for LPG per kilometer	IDR	104	Assumed to be 20% lower than gasoline operation because extended reliability of engine oil and spark plugs.
O. Salvage value in the end of 60 month	IDR	5,500,000	50% of LPG kits price [71]

### ***Break Even Point (BEP) Jarak Tempuh***

Analisis BEP digunakan untuk menilai kesetaraan antara biaya modal untuk konversi dan penghematan bahan bakar yang dihasilkan dari jarak tempuh. BEP LPG dibandingkan dengan bensin RON 88 dan RON 92 dihitung dengan menggunakan Persamaan (6.1).

$$BEP = \frac{FC}{(P_{gasol} - VC_{LPG})} \quad (6.1)$$

$FC$  adalah capital cost.  $P_{gasol}$  adalah biaya bensin per kilometer tergantung pada RON.  $VC_{LPG}$  adalah biaya LPG per kilometer. Biaya bensin dan LPG termasuk biaya perawatan mesin namun tidak mempertimbangkan biaya ban.

### ***Economic values***

Untuk menilai kelayakan investasi konversi dari bensin ke LPG, studi ini menggunakan parameter *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), *Payback Period* (PP), dan analisis sensitivitas. NPV adalah selisih antara pengeluaran dan pendapatan yang telah didiskontokan dengan menggunakan *social opportunity cost of capital* sebagai faktor diskon. Jika NPV lebih besar dari 0, proyek ini layak dilakukan. Sementara itu, IRR diperoleh saat NPV = 0. Jika IRR lebih besar dari bunga bank, proyek ini layak dilakukan. Umumnya NPV dihitung dengan Persamaan (6.2) sebagai berikut.

$$NPV = (Ci_0 - Co_0) + \frac{(Ci_1 - Co_1)}{(1+i)} + \frac{(Ci_2 - Co_2)}{(1+i)^2} + \dots + \frac{(Ci_n - Co_n)}{(1+i)^n} + \frac{S}{(1+i)^n} - I_0 \quad (6.2)$$

Dimana,  $Ci$  adalah cash inflows,  $Co$  adalah cash outflows,  $i$  adalah bank interest,  $n$  adalah periode,  $S$  adalah salvage values pada akhir periode perhitungan, dan  $I_0$  adalah initial investment atau capital costs. Dalam studi ini, umur pakai converter kit diasumsikan sebesar 10 tahun dan tingkat penyusutan dihitung dengan metode garis lurus. Dengan demikian, nilai sisa kit converter adalah 50% biaya modal tanpa biaya instalasi. Jika keuntungan bersih ( $Ci_1 - Co_1$ ) dan bunga ( $i$ ) diasumsikan tidak berubah selama  $n$  periode, Persamaan (8.2) dapat ditulis ulang sebagai Persamaan (6.3) di bawah ini.

$$NPV = \frac{(C_i - C_o) \times [1 - (1 + i)^{-n}]}{i} + \frac{S}{(1 + i)^n} - I_0 \quad (6.3)$$

Setelah NPV dan IRR diketahui, penilaian investasi dilakukan dengan menghitung payback period. yaitu rasio antara biaya modal dengan hasil kumulatif (Persamaan 6.4).

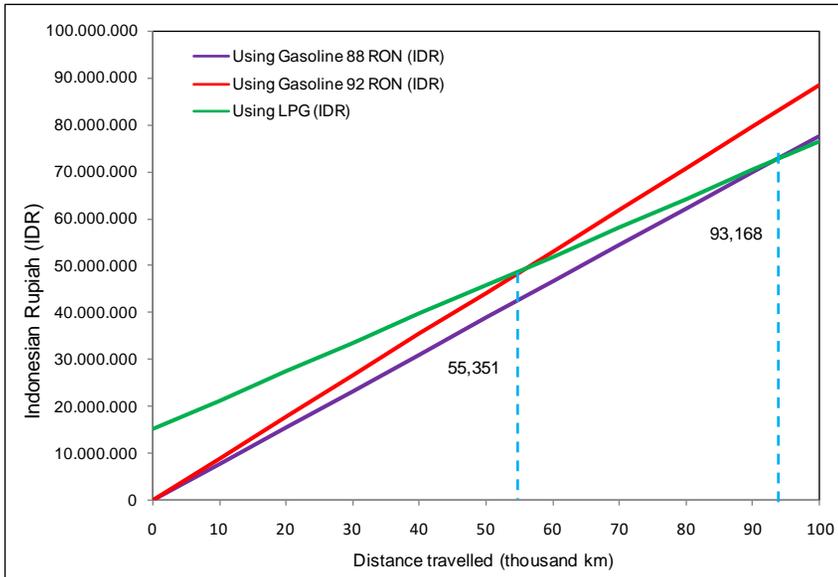
$$PP = \frac{\textit{investment costs}}{\textit{accumulative proceed}} \quad (6.4)$$

Selanjutnya, analisis sensitivitas dilakukan untuk mengantisipasi perubahan nilai parameter, termasuk jarak tempuh kendaraan per tahun dan rasio biaya antara bensin dan LPG. Harga bahan bakar di lokasi pengisian bahan bakar di Indonesia telah berfluktuasi dalam beberapa tahun terakhir. Jarak tempuh per tahun juga kemungkinan berubah karena kemacetan dan kondisi ekonomi yang mempengaruhi mobilitas masyarakat. Dengan demikian, ketidakpastian harga BBM dan jarak tempuh tahunan juga merupakan pertimbangan penting dalam analisis ini.

#### **6.1.6. Running cost dan BEP**

Dalam studi ini, biaya operasional kendaraan dan BEP dihitung berdasarkan asumsi bahwa tidak ada perubahan harga BBM. Perhitungan tersebut menunjukkan bahwa biaya operasional per kilometer yang ditempuh kendaraan LPG di Indonesia dengan LPG, bensin RON 88 dan RON 92 adalah Rp. 560, Rp 705, dan Rp 815. Biayanya tersebut sudah termasuk biaya bahan bakar dan perkiraan biaya perawatan. Perhitungan BEP yang dilakukan pada kendaraan LPG yang beralih dari bensin, bukan produk OEM. Biaya Pemeliharaan di kedua bahan bakar (bensin dan LPG) diturunkan menjadi Rp per kilometer. Menggunakan persamaan (8.1) dan nilai parameter yang tercantum dalam Tabel 6.2, hasil perhitungan biaya operasional dan BEP disajikan pada Gambar 6.2. Untuk angkutan umum dengan konsumsi bahan bakar 10 km/liter, BEP LPG dicapai

pada kisaran 55.351 km dibandingkan dengan bensin RON 92 dan 93.168 km dibandingkan dengan bensin RON 88.

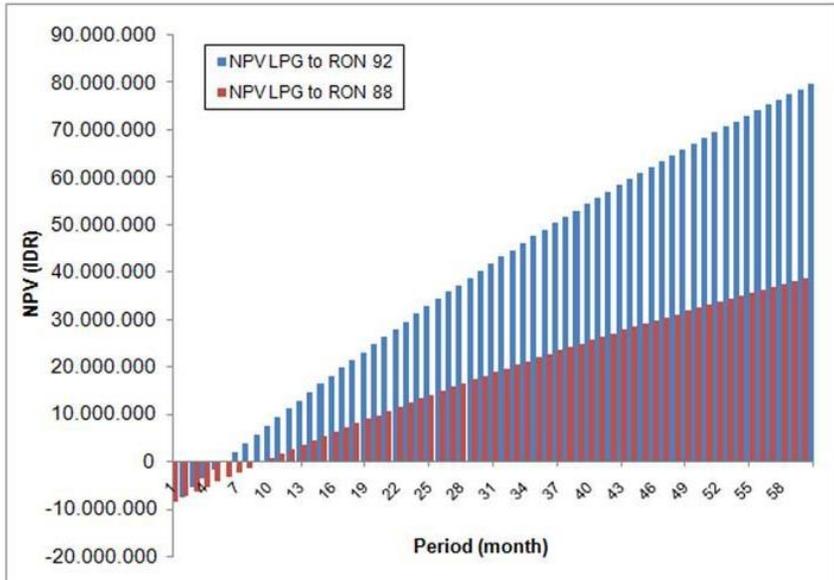


**Gambar 6.2 Running cost and BEP**

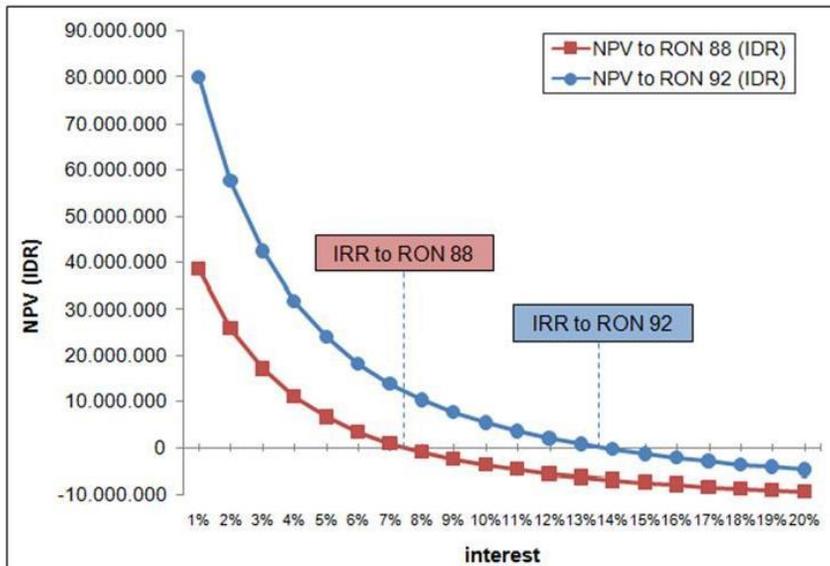
Di Asia, BEP tercepat berada di Turki hanya 13.650 km dan terpanjang di Jepang sebesar 169.405 km. Sementara, rata-rata BEP dari lima pasar kendaraan utama LPG di Asia adalah 54.977 km. Dalam konteks Indonesia, dengan mengasumsikan kendaraan LPG adalah beralih dari bensin RON 92, BEP lebih rendah dari rata-rata Asia. Namun jika dibandingkan dengan bensin RON 88, BEP lebih tinggi dari rata-rata Asia.

### 6.1.7. Feasibility Analysis

Analisis kelayakan investasi untuk mengonversi bensin ke LPG dengan menggunakan suku bunga efektif per bulan. Bunga diasumsikan sebesar 1% per bulan. Batas maksimum kelayakan investasi ditetapkan selama 60 bulan (5 tahun). Menggunakan Persamaan (6.2) dan nilai parameter yang tercantum dalam Tabel. 6.2, hasil perhitungan NPV dan IRR disajikan pada Gambar 6.3.



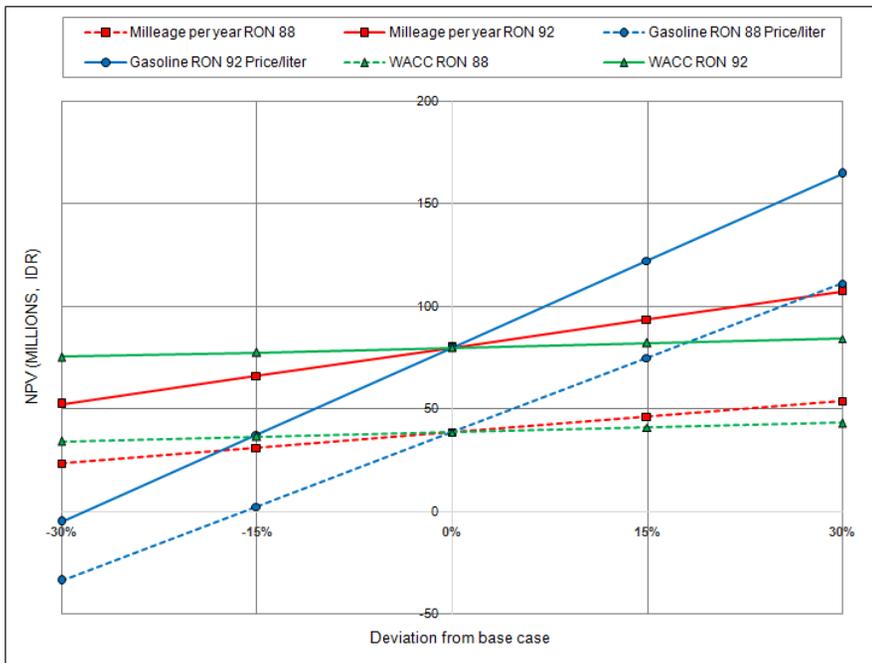
(a)



(b)

**Gambar 6.3 NPV (a) and IRR (b)**

Gambar 6.3 menyajikan profitabilitas investasi bagi perusahaan angkutan umum untuk mengubah armadanya ke LPG. Menggunakan persamaan (6.4), periode pengembalian investasi mencapai 13,3 bulan dan 7,35 bulan terhadap RON 88 dan RON 92. Namun, beberapa kondisi perlu diperhatikan, termasuk perubahan harga minyak sehingga menyebabkan perubahan rasio biaya bahan bakar, ketidakpastian jarak tempuh per tahun, dan bunga bank. Oleh karena itu, analisis sensitivitas dilakukan untuk memperkirakan probabilitas investasi. Parameter yang mungkin mempengaruhi perubahan yang dilakukan terhadap toleransi 30% dari *baseline*. Gambar 6.4 menyajikan analisis sensitivitas hasil perhitungan.



**Gambar 6.4 Analisis sensitivitas**

Berdasarkan analisis sensitivitas yang disajikan pada Gambar 8.4, investasi untuk mengkonversi bensin menjadi LPG sangat sensitif terhadap harga bensin, baik pada RON 88 dan RON 92. Pada saat

penulisan, rasio biaya bahan bakar LPG terhadap bensin di Indonesia adalah 0,79 dan 0,68 untuk RON 88 dan RON 92. Sementara itu, rasio biaya bahan bakar rata-rata lima pasar kendaraan LPG utama di Asia (Jepang, India, Turki, Korea Selatan, dan Thailand) adalah 0,55. Selanjutnya, simulasi beberapa kondisi yang mungkin terjadi (terburuk, buruk, normal, bagus, dan terbaik) dilakukan untuk menilai risiko investasi. Parameter untuk setiap kondisi disajikan pada Tabel 6.3 sementara keputusan investasi disajikan pada Tabel 6.4.

**Tabel 6.3 Analisis skenario**

No	Condition	Probability	Mileage/ year (km)	Gasoline	Gasoline	WACC	NPV	NPV	Squared Deviation Time		
				RON 88 price/liter (IDR)	RON 92 price/liter (IDR)		Gasoline RON 88 (IDR)	Gasoline RON 92 (IDR)	Gasoline RON 88	Gasoline RON 92	
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J		
1	Worst	10%	70,000	4,515	5285	1.3%	(31,813,434)	(11,621,129)	5.83717E+14	9.68872E+14	
2	Bad	15%	85,000	5,483	6417	1.2%	(2,026,600)	27,746,747	3.25937E+14	5.23273E+14	
3	Normal	50%	100,000	6,450	7550	1.0%	38,601,891	79,810,676	1.79164E+13	2.44965E+13	
4	Good	15%	115,000	7,418	8682	0.9%	90,141,344	144,596,881	3.11267E+14	5.00895E+14	
5	Best	10%	130,000	8,385	9815	0.7%	152,511,216	222,154,063	1.16474E+15	1.8318E+15	
6									$\Sigma$	2.40358E+15	3.84933E+15

**Tabel 6.4 Budgeting decision**

Description	Value	Formula
Expected NPV of LPG to Gasoline RON 88	44,587,935	(B1*G1)+(B2*G2)+(B3*G3)+(B4*G4)+(B5*G5) from table 3
Expected NPV of LPG to Gasoline RON 92	86,810,176	(B1*H1)+(B2*H2)+(B3*H3)+(B4*H4)+(B5*H5) from table 3
Standar Deviation of LPG to Gasoline RON 88	49,026,329	(I6*0.5) from table 3
Standar Deviation of LPG to Gasoline RON 92	62,043,003	(J6*0.5) from table 3
Coefficient of variation (CV) of LPG to RON 88	1.10	Standar Deviation Gasoline RON 88/Expected NPV Gasoline RON 88
Coefficient of variation (CV) of LPG to RON 92	0.71	Standar Deviation Gasoline RON 92/Expected NPV Gasoline RON 92

Berdasarkan Tabel 6.4, NPV LPG untuk bensin RON 88 dan RON 92 masing-masing adalah Rp. 44.587.935 dan Rp. 86.810.176. Selanjutnya, koefisien variasi (CV) LPG ke RON 88 dan RON 92 masing-masing adalah 1,10 dan 0,71. CV kurang dari 2 menunjukkan bahwa investasi tersebut dapat diterima.

### 6.1.8. Kesimpulan

Serangkaian analisis *running costs* menunjukkan bahwa BEP kendaraan berbahan bakar LPG di Indonesia relatif lebih tinggi daripada rata-rata lima pasar utama LPG di Asia (Jepang, India, Turki, Korea Selatan, dan Thailand). Namun, hasil analisis investasi menunjukkan bahwa indikator kelayakan investasi yang meliputi NPV, IRR, dan *payback period* menunjukkan investasi layak dilakukan, baik untuk perbandingan dengan bensin RON 88 dan RON 92. Dari analisis sensitivitas, investasi ini sangat sensitif terhadap rasio biaya bahan bakar antara LPG dan bensin. Sementara itu, biaya modal dan jarak tempuh per tahun hanya berdampak kecil terhadap NPV. Kesimpulannya, dalam kondisi ekonomi normal, investasi untuk konversi dari bensin ke LPG untuk transportasi umum di Indonesia merupakan keputusan yang menjanjikan.

### 6.2. Masalah Subsidi Bahan Bakar [69]

Setiap perubahan harga minyak internasional baik turun maupun naik akan secara langsung mempengaruhi besaran subsidi BBM. Semakin tinggi kenaikan harga minyak internasional maka semakin besar beban subsidi BBM yang ditanggung dalam APBN tahun bersangkutan. Sebagai contoh tahun 2010, asumsi ICP yang telah ditetapkan bersama DPR yaitu US\$ 80 per barel dalam APBN P, maka beban subsidi BBM diperkirakan mencapai Rp88,9 triliun. Dengan demikian, tahun 2011 dengan asumsi harga minyak internasional mengalami kenaikan sampai dengan US\$ 85 per barel dan tidak ada perubahan atau kenaikan harga jual eceran BBM bersubsidi, maka beban subsidi tahun 2011 lebih dari Rp 90 triliun.

Adanya kenaikan harga minyak internasional jelas akan semakin memberatkan beban APBN tanpa ada perubahan kebijakan subsidi BBM. Bila pemerintah menaikkan harga jual BBM seperti pada bulan Juni 2008 hal ini tentu sangat membebani masyarakat terutama masyarakat miskin yang selalu terkena dampak akibat perubahan kebijakan tersebut. Bila tidak dinaikkan, maka beban subsidi menjadi tinggi dan dapat menyulitkan ruang gerak pemerintah dalam mengalokasikan belanja diluar subsidi BBM. Ada tidaknya perubahan kebijakan akan menyebabkan dilematis bagi kebijakan

publik. Padahal, hampir seluruh pihak mengetahui bahwa pemberian subsidi BBM tidak tepat sasaran dan kurang efisien karena hanya menguntungkan beberapa pihak. Untuk mengurangi beban subsidi BBM bukanlah pekerjaan mudah. Argumentasi yang dikemukakan pemerintah kepada DPR seringkali tidak sejalan dengan harapan-harapan seluruh stakeholders. Begitu banyak penolakan dari pihak-pihak tertentu bila pemerintah bermaksud mengurangi subsidi dan memberikannya kepada yang berhak. Dan realitasnya, subsidi masih terus dipertahankan dengan segala kondisi ekonomi yang terjadi di Indonesia. Yang menjadi pertanyaan adalah apakah pemberian subsidi terutama subsidi BBM pada tahun-tahun selanjutnya dapat dikurangi?

Dalam PPKF 2011 secara jelas telah disampaikan oleh pemerintah bahwa salah satu prioritas pembangunan di bidang energi adalah kebijakan energi yang menitikberatkan pada nilai keekonomian agar tercipta efisiensi ekonomi dengan tetap memperhatikan keadilan sosial bagi seluruh masyarakat dan mengurangi ketergantungan yang berlebihan terhadap minyak bumi melalui penganekaragaman energi primer. Beberapa kebijakan pemerintah untuk mulai mengurangi ketergantungan terhadap minyak bumi adalah konversi minyak tanah ke LPG 3 kilogram sejak tahun 2007. Program ini berhasil mengurangi beban subsidi BBM minyak tanah dengan mengalihkan beban subsidinya ke subsidi LPG 3 kilogram. Namun, dalam perjalanannya program baru berhasil di kota-kota besar dan seluruh pulau Jawa dan Bali. Keberlanjutan program tersebut ke daerah-daerah lainnya seperti Sumatera dan Sulawesi masih mengalami hambatan. Demikian halnya dengan program penggunaan energi lainnya seperti liquid gas vehicle (LGV), bioethanol, biosolar dan panas bumi menjadi tertunda karena belum siapnya infrastruktur dan ketersediaan energi tersebut.

Ketergantungan terhadap energi fosil sudah selayaknya dikurangi, sedangkan penggunaan energi yang ramah lingkungan dan terbarukan yang memiliki potensi yang sangat besar di Indonesia perlu ditingkatkan. Kebijakan pro green atau go green dalam rangka diversifikasi energi dan mengurangi subsidi energi merupakan kebijakan yang dapat diterapkan pada masa yang akan datang.

Salah satu alternatif penggunaan energi (bahan bakar) yang murah dan ramah lingkungan terhadap kendaraan bermotor adalah liquid gas vehicle (LGV). Pemerintah daerah (Pemda) yang mulai menerapkan penggunaan LGV adalah Pemda DKI Jakarta melalui Keputusan Gubernur nomor 141/2007 tentang penggunaan bahan bakar gas untuk angkutan umum dan kendaraan operasional pemerintah daerah. Keunggulan menggunakan LGV dibandingkan premium secara teknis cukup menguntungkan yaitu ramah lingkungan, biaya operasional murah, umur mesin lebih panjang dan bebas timbal serta nilai oktannya sangat tinggi lebih dari 98. Kelebihan lainnya seperti harganya yang stabil dan tidak terlalu terpengaruh harga gas internasional. Namun, seperti yang telah dikemukakan sebelumnya kebijakan ini masih berjalan ditempat dan perluasan penggunaan LGV belum memperoleh hasil yang menggembirakan. Jumlah pengguna LGV justru cenderung tetap atau menurun. Taksi yang telah menggunakan LGV masih menggunakan BBM bersubsidi sebagai bahan bakar kendaraannya. Dari sisi kepentingan pemerintah dalam upaya mewujudkan prioritas pembangunan yaitu mengurangi subsidi dan diversifikasi energi serta mendorong terciptanya ketahanan energi Indonesia.

### **6.3. Laporan Beberapa Media Terkait Penggunaan Vigas**

#### **6.3.1. Saatnya Mengkonversi BBM ke Gas untuk Transportasi [72]**

Hampir 90% konsumsi BBM didominasi untuk keperluan transportasi. Dari angka itu, sebagian besar alokasinya digunakan untuk transportasi pribadi. Padahal, dalam jangka panjang, pola konsumsi tersebut akan membahayakan struktur APBN karena alokasi untuk pembangunan infrastruktur, kesehatan, pendidikan, akan tersedot untuk pemakaian ini.

Oleh karenanya, Pemerintah merancang strategi untuk mengubah pola konsumsi bahan bakar sektor transportasi dari BBM ke gas. Melalui Pertamina, Pemerintah akan menggerakkan perubahan pola konsumsi bahan bakar berbasis gas ini.

Sekarang ini, terdapat dua jenis bahan bakar gas yang dapat digunakan untuk keperluan transportasi, yakni *Compressed Natural Gas* (CNG) dan *Liquid Gas for Vehicle* (LGV). CNG sudah digunakan

untuk bahan bakar kendaraan angkutan massal TransJakarta. Sementara LGV sebenarnya juga sudah mulai tersedia di beberapa Stasiun Pengisian Bahan Bakar Umum (SPBU). Di pasaran, PERTAMINA menggunakan merek Vigas.

Dibandingkan dengan BBM seperti Premium atau Pertamax, LGV atau Vigas memiliki beberapa kelebihan. Misalnya, LGV memiliki angka oktan 98 sedangkan Premium 88 dan Pertamax 92. Jika digunakan pada kendaraan bermotor, kualitas dan kinerja mesin berbahan bakar LGV akan jauh lebih terjaga. Kelebihan lain dari LGV adalah tingkat emisi yang rendah.

Selanjutnya, harga produksi maupun harga eceran LGV jauh lebih rendah dibandingkan dengan harga eceran Premium (disubsidi ataupun tidak), apalagi dibandingkan dengan Pertamax. Pertamina menjual harga Premium di angka 7.400 dan mulai 16 Mei ini harga Pertamax dijual seharga 9.600 per liter (2015). Sementara harga LGV per liter saat ini adalah 5.100, yang merupakan harga keekonomian. Bukan harga yang disubsidi pemerintah. Efisiensinya lebih dari 40% dibandingkan dengan menggunakan BBM.

Untuk mendorong penggunaan LGV secara lebih luas, Pertamina sudah dan akan terus memperluas jaringan distribusi melalui SPBU-SPBU yang sudah ada. Pada tahun 2015 ini saja, akan ditambahkan 118 titik SPBG baru, melengkapi jaringan SBPG yang sudah terpasang di Jakarta dan sekitarnya, Bandung, Bali, dan Surabaya. Pulau Jawa dan Bali akan menjadi sasaran prioritas program konversi ini, mengingat berdasarkan kajian Pusat Data dan Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral Kementerian ESDM pada tahun 2012, kelebihan kuota penggunaan Premium di Pulau Jawa saja sudah melebihi 71% dari alokasi yang diamanatkan oleh APBN.

Dalam Rencana Pembangunan Jangka Menengah (RPJMN) 2015-2019 dijelaskan, selain akses energi gas bumi untuk rumah tangga, penyediaan infrastruktur gas untuk bisnis, industri dan transportasi, perlu terus dikembangkan. Program konversi ini tentu saja akan diikuti oleh penyediaan konverter kit bagi kendaraan secara luas. Tantangan yang paling besarnya kini, adalah mengubah cara berpikir masyarakat bahwa kendaraan berbahan bakar gas lebih aman dan lebih efisien.

### **6.3.2. Kendaraan kru Garuda gunakan bahan bakar LGV [73]**

PT Garuda Indonesia (Persero) Tbk beserta anak usahanya PT AeroTrans Services Indonesia dan PT Pertamina (Persero), meluncurkan kerja sama penggunaan bahan bakar *Liquefied Gas for Vehicle* (LGV) Vi-Gas untuk pengoperasian kendaraan kru Garuda yang berbahan bakar gas. Penggunaan bahan bakar RON di atas 98 ini merupakan wujud komitmen kedua perusahaan plat merah untuk mewujudkan kepedulian lingkungan sesuai program *Go Green* pemerintah.

AeroTrans telah menambah kendaraan operasional sebanyak 50 unit dengan menggunakan bahan bakar LGV. Ke depan, akan ditambah secara bertahap menjadi 280 unit armada.

### **6.3.3. Pertamina gencarkan Vigas di GIIAS Surabaya [74]**

Pertamina menyajikan sejumlah produk unggulan dalam Gaikindo *Indonesia International Auto Show* (GIIAS) 2016 di Surabaya. Beberapa produk tersebut merupakan produk teranyar yang belum pernah ada di Jawa Timur sebelumnya. Area Manager Communication & Relation Jawa Timur, Bali, dan Nusa Tenggara, Heppy Wulansari menjelaskan salah satu bahan bakar yang digencarkan dalam GIIAS 2016 di Surabaya adalah bahan bakar gas, yang dikenal dengan produk Vigas. "Masyarakat bisa merasakan langsung bagaimana mengemudi kendaraan yang bahan bakarnya menggunakan gas. Keunggulannya, bahan bakar gas ini lebih ramah lingkungan dan lebih hemat karena harganya sekitar Rp5.100 per setara liter BBM," ujar Heppy kepada *Sindonews*, Kamis (29/9/2016).

Kampanye Vigas dalam GIIAS 2016 di Surabaya adalah demi mewujudkan program pemerintah soal penggunaan bahan bakar ramah lingkungan. Selain ramah lingkungan, Vigas adalah bahan bakar berwujud gas cair alias LGV (*Liquefied Gas for Vehicle*), yang merupakan kombinasi antara Propana (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) dan Butana (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) ini mampu membuat pengendara mobil berhemat biaya bahan bakar dan perawatan mobil. Tekanan Vigas dalam tangki cukup rendah, hanya 8-12 bar. Karena itu, tangki kendaraan dapat menampung lebih banyak bahan bakar. Keunggulan lain, Vigas memiliki angka RON di atas 98, sehingga pembakaran mesin dengan Vigas menjadi lebih sempurna.

## Referensi

- [1] Jestec, *Car-Doctor Operating Manual*, 1st Editio. Gyeonggi-do, South Korea: JESTEC, Co, Ltd., 2006.
- [2] Hyundai Training Support & Development, *EMS & Troubleshooting*. Hyundai Motor Company.
- [3] Hyundai Training Support & Development, *On Board Diagnosis – II*. Hyundai Motor Company.
- [4] Argonne National Laboratory, “Advanced Vehicle Technologies,” *Energy Systems*. [Online]. Available: <http://www.anl.gov/energy-systems/group/advanced-vehicle-technologies>. [Accessed: 04-Mar-2018].
- [5] Argonne National Laboratory, “Energy, Power, and Decision Analytics,” *Energy Systems*. [Online]. Available: <http://www.anl.gov/energy-systems/group/energy-power-and-decision-analytics>. [Accessed: 04-Mar-2018].
- [6] Argonne National Laboratory, “Engines and Fuels,” *Energy Systems*. [Online]. Available: <http://www.anl.gov/energy-systems/group/engines-and-fuels>. [Accessed: 04-Mar-2018].
- [7] Argonne National Laboratory, “Friction, Wear, and Lubrication Technologies,” *Energy Systems*. [Online]. Available: <http://www.anl.gov/energy-systems/group/friction-wear-and-lubrication-technologies>. [Accessed: 04-Mar-2018].
- [8] Argonne National Laboratory, “Thermal-Mechanical Technologies,” *Energy Systems*. [Online]. Available: <http://www.anl.gov/energy-systems/group/thermal-mechanical-technologies>. [Accessed: 04-Mar-2018].
- [9] Argonne National Laboratory, “Transportation and Vehicle Energy Modeling,” *Energy Systems*. [Online]. Available: <http://www.anl.gov/energy-systems/group/transportation-and-vehicle-energy-modeling>. [Accessed: 04-Mar-2018].
- [10] Argonne National Laboratory, “Vehicle-Grid Interoperability,” *Energy Systems*. [Online]. Available: <http://www.anl.gov/energy-systems/group/vehicle-grid-interoperability>. [Accessed: 04-Mar-2018].
- [11] R. Bosch, *Bosch D-jetronic*. Stuttgart: Robert Bosch GmbH, 1995.

- [12] R. Bosch, "BOSCH L-Jetronic Injection Manual." Robert Bosch GmbH, Stuttgart, pp. 1–37, 95AD.
- [13] Hyundai Training Support & Development, *COMMON RAIL BOSCH*. Hyundai Motor Company.
- [14] Fuel Cell Today, "Fuel Cell Today, the leading authority on fuel cells." [Online]. Available: <http://www.fuelcelltoday.com/>. [Accessed: 11-Mar-2018].
- [15] M. Messagie, K. Lebeau, T. Coosemans, C. Macharis, and J. Van Mierlo, "Environmental and financial evaluation of passenger vehicle technologies in Belgium," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 5, no. 12, pp. 5020–5033, 2013.
- [16] M. Eshani, Y. Gao, S. Gay, and A. Emadi, *Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles 2nd. Edition*. 2010.
- [17] Chevron Pascagoula Refinery, "Processing & Refining Crude Oil," *About the Refinery*. [Online]. Available: <http://pascagoula.chevron.com/abouttherefinery/whatwedo/processingandrefining.aspx>. [Accessed: 18-Mar-2018].
- [18] Institut Francais du Petrole, "EETP: European Emission Test Programme," Rueil-Malmaison, 2004.
- [19] International Energy Agency, *Automotive Fuel for the Future*. .
- [20] Methanex, "Methane as a Vehicle Fuel," *About Methanol*. [Online]. Available: <https://www.methanex.com/about-methanol/methanol-vehicle-fuel>. [Accessed: 05-Mar-2018].
- [21] M. Bakenhus, "Economical , High-Efficiency Engine Technologies for Alcohol Fuels," *American Energy Independence*, 2016.
- [22] The Royal Society, "Sustainable biofuels: prospects and challenges," 2008.
- [23] N. D. Brinkman, R. Halsall, Scott W. Jorgensen, and J. E. Kirwan, "The Development of Improved Fuel Specifications for Methanol (M85) and Ethanol (Ed85)," *SAE Technical Paper*, vol. 1994–03–01, 1994.
- [24] A. Kameoka, K. Nagai, G. Sugiyama, and T. Seko, "Effect of Alcohol Fuels on Fuel-Line Materials of Gasoline Vehicles," *Powertrain & Fluid Systems Conference & Exhibition Technical Papers*, no. 2005–01–3708. 2005.
- [25] US Department of Energy, "Biodiesel Fuel Basics," *Alternative Fuels Data Center*, 2012. [Online]. Available: [http://www.afdc.energy.gov/fuels/biodiesel\\_basics.html](http://www.afdc.energy.gov/fuels/biodiesel_basics.html). [Accessed:

05-Mar-2018].

- [26] U. G. Akpan, A. A. Alhakim, and U. J. J. Ijah, "Production of ethanol fuel from organic and food wastes," *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, vol. 7, no. 13, pp. 001–011, 2008.
- [27] I. K. Adam, A. Galadima, and A. I. Muhammad, "Biofuels in the Quest for Sustainable Energy Development," *Journal of Sustainable Development*, vol. 4, no. 3, pp. 10–19, 2011.
- [28] H. Carlsson and P. Fenton, "BioEthanol for Sustainable Transport - Results and recommendations from the European Best project," Stockholm, 2010.
- [29] IEA, "World Energy Outlook 2015," Paris, 2015.
- [30] S. Sorrell, J. Speirs, R. Bentley, A. Brandt, and R. Miller, *Global Oil Depletion: An Assessment of the Evidence for a Near-term Peak in Global Oil Production*, vol. 38, no. 9. 2009.
- [31] EAA, "Annual report 2008 and Environmental statement 2009," Copenhagen, 2009.
- [32] I. E. A. ETSAP, "Ethanol Internal Combustion Engines," *Technology Brief T06*, no. June, pp. 1–6, 2010.
- [33] U.S Department of Energy, "Low-Level Ethanol Fuel Blends," *Clean Cities*, no. April, 2005.
- [34] EPURE, "European Renewable Ethanol: State of the Industry Report," *Energy*, no. August, 2015.
- [35] "Propane Autogas: Sustainable Transportation Fuel." Propane Exceptional Energy.
- [36] J. Adolf, C. Balzer, A. Joedicke, and U. Schabla, "Shell LPG Study," Hamburg, 2015.
- [37] P. Price, S. Guo, and M. Hirschmann, "Performance of an evaporator for a LPG powered vehicle," *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, no. 8–9, pp. 1179–1194, 2004.
- [38] ETSAP, "Automotive LPG and Natural Gas Engines," © IEA *ETSAP - Technology Brief T03*, no. April, pp. 1–5, 2010.
- [39] M. R. Werpy, A. Burnham, and K. Bertram, "Propane Vehicles : Status, Challenges, and Opportunities," Argonne, 2010.
- [40] F. Hofmann, *Converting Vehicles to Propane Autogas Part 4: Troubleshooting Four Current Autogas Fuel Systems*. Washington, D.C, USA: Propane Education & Research Council, 2012.

- [41] M. Setiyo, B. Waluyo, B. C. Purnomo, S. Munahar, and I. C. Setyawan, "Studi Numerik: Efek Perubahan Komposisi LPG terhadap Energy Delivery pada Spark Ignition ( S . I .) Engine," in *The 6th URECOL*, 2017, pp. 17–20.
- [42] Y. Damirel, *Energy - Production, Conversion, Storage, Conservation, and Coupling*. London: Springer-Verlag, 2012.
- [43] M. Masi and P. Gobato, "Measure of the volumetric efficiency and evaporator device performance for a liquefied petroleum gas spark ignition engine," *Energy Conversion and Management*, vol. 60, pp. 18–27, 2012.
- [44] World LPG Association, "Autogas Incentive Policies, 2017 Edition," Neuilly-sur-Seine, 2017.
- [45] World LPG Association, "Autogas Incentive Policies, 2015 Update," Neuilly-sur-Seine, 2015.
- [46] Propane Education and Research Council, *Converting Vehicles to Propane Autogas Part 1: Installing Fuel Tanks and Fuel Lines*. Washington, D.C.: Propane Education & Research Council, 2011.
- [47] Propane Education and Research Council, *Converting Vehicles to Propane Autogas Part 2: Installing Underhood Components*. Washington, D.C., 2011.
- [48] M. Setiyo, B. Waluyo, M. Husni, and D. W. Karmiadji, "Characteristics of 1500 CC LPG fueled engine at various of mixer venturi area applied on Tesla A-100 LPG vaporizer," *Jurnal Teknologi*, vol. 78, no. 10, 2016.
- [49] M. A. Ceviz and F. Yüksel, "Cyclic variations on LPG and gasoline-fuelled lean burn SI engine," *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 1950–1960, 2006.
- [50] C. Manzie, H. Watson, and Marimuthu Palaniswami, "Air Fuel Ratio Control In Liquefied Petroleum Gas Injected SI Engines," in *15th Triennial World Congress*, 2002.
- [51] M. Campbell, Ł. P. Wyszynski, and R. Stone, "Combustion of LPG in a Spark-Ignition Engine," *SAE Technical Paper*, vol. 2004-01-09, 2004.
- [52] A. Irimescu, "Study of Volumetric Efficiency for Spark Ignition Engines Using Alternative Fuels," *Analele Universităţii "Eftimie Murgu"*, no. 2, pp. 149–154, 2010.
- [53] M. Gumus, "Effects of volumetric efficiency on the performance and emissions characteristics of a dual fueled (gasoline and LPG) spark

- ignition engine,” *Fuel Processing Technology*, vol. 92, no. 10, pp. 1862–1867, 2011.
- [54] Hugo van Osch, “Techniek - LPG- installatie.” [Online]. Available: [www.iwemalpg.com](http://www.iwemalpg.com). [Accessed: 13-Apr-2013].
- [55] S. Mockus, J. Sapragonas, A. Stonys, and S. Pukalskas, “Analysis of Exhaust Gas Composition of Internal Combustion Engines Using Liquefied Petroleum Gas,” *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, vol. 14, no. 1, pp. 16–22, 2006.
- [56] R. R. Saraf, S. S. Thipse, and P. K. Saxena, “Comparative Emission Analysis of Gasoline / LPG Automotive Bifuel Engine,” *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, vol. 1, no. 4, pp. 199–202, 2009.
- [57] K. S. Shankar and P. Monahan, “MPFI gasoline engine combustion, performance and emission characteristics with LPG injection,” *International journal of Energy and Environment*, vol. 2, no. 4, pp. 761–770, 2011.
- [58] R. . Colvile, E. . Hutchinson, J. . Mindell, and R. . Warren, “The transport sector as a source of air pollution,” *Atmospheric Environment*, vol. 35, no. 9, pp. 1537–1565, Mar. 2001.
- [59] COWI, “State of the Art on Alternative Fuels Transport Systems in the European Union,” 2015.
- [60] M. Setiyo and M. Husni, “Karakteristik Kurva Daya Mesin EFI 1 , 5 L Berbahan Bakar LPG Pada Berbagai,” in *TEKNOIN*, 2013, vol. 2, pp. 59–62.
- [61] M. Setiyo, S. Soeparman, N. Hamidi, S. Wahyudi, and M. Hanafi, “Numerical Study on Cooling Effect Potential from Vaporizer Device of LPG vehicle,” *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 12, no. 7, pp. 1766–1779, 2017.
- [62] R. Bosch, *LPG Spark Plugs*. Road Clayton, 2010.
- [63] M. Setiyo, B. Waluyo, W. Anggono, and M. Husni, “Performance of Gasoline/LPG Bi-Fuel Engine of Manifold absolute Pressure Sensor (MAPS) Variations Feedback,” *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 11, no. 7, pp. 4707–4712, 2016.
- [64] M. Setiyo, S. Munahar, A. Triwiyatno, and J. D. Setiawan, “Modeling of deceleration Fuel cut-off for LPG fuelled engine using Fuzzy logic controller,” *International Journal of Vehicle Structures and Systems*, vol. 9, no. 4, 2017.
- [65] M. Setiyo, S. Soeparman, N. Hamidi, and S. Wahyudi, “Techno-

- economic analysis of liquid petroleum gas fueled vehicles as public transportation in Indonesia,” *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 6, no. 3, pp. 495–500, 2016.
- [66] World LPG Association, “Autogas Incentive Policies, A Country-by-Country Analysis of Why and How Governments Encourage Autogas and What Works,” Paris, 2005.
- [67] E. Liu, S. Y. Yue, and J. Lee, “A Study On LPG As A Fuel For Vehicles,” *Research and Library Services Division Legislative Council Secretariat*, no. March, 1997.
- [68] C. Abdini and H. Rahmat, “Switching to gas is an alternative policy options in solving the problem of subsidized fuel,” *Rubric Policy, Ministry of State Secretariat of the Republic of Indonesia*, 2013. [Online]. Available: <http://www.setneg.go.id/>. [Accessed: 14-Feb-2016].
- [69] A. Samosir, “Should Government Provide Subsidy of LGV/Vigas in the 2011? Case Study of Public Transportation in Jakarta (Perlukah Pemerintah Memberikan Subsidi LGV/Vi-Gas Tahun 2011? Studi Kasus Angkutan Umum Taksi di Jakarta,” *Policy Paper, Fiscal Policy Office Ministry of Finance Republic of Indonesia*, vol. Augustus, no. 1, pp. 1–32, 2010.
- [70] RACQ, “Vehicle Running Costs 2014,” 2014.
- [71] I. Zain, “Installation Cost of Gas Converter in Fuel Injected Car,” <http://www.otomania.com/>, 2016. [Online]. Available: <http://www.otomania.com/>. [Accessed: 11-May-2016].
- [72] “Saatnya Mengkonversi BBM ke Gas untuk Transportasi,” *PresidenRI.go.id*. [Online]. Available: <http://www.presidentri.go.id/program-prioritas-2/saatnya-mengkonversi-bbm-ke-gas-untuk-transportasi.html>. [Accessed: 18-Mar-2018].
- [73] C. R. Fajarta, “Kendaraan Kru Garuda Gunakan Bahan Bakar LGV Pertamina,” *BeritaSatu*. [Online]. Available: <http://www.beritasatu.com/ekonomi/341640-kendaraan-kru-garuda-gunakan-bahan-bakar-lgv-pertamina.html>. [Accessed: 18-Mar-2018].
- [74] B. Ventura, “Dukung Pemerintah, Pertamina Gencarkan Vigas di GIIAS Surabaya,” *SINDONEWS.com*, 2016. [Online]. Available: <https://autotekno.sindonews.com/read/1143282/120/dukung-pemerintah-pertamina-gencarkan-vigas-di-giias-surabaya-1475142987>. [Accessed: 18-Mar-2018].

# Glosarium

<b><i>Auto-ignition</i></b>	Batas temperatur terendah di mana zat tersebut akan terbakar tanpa adanya sumber pembakaran dari luar.
<b><i>Bahan bakar alternatif</i></b>	Bahan bakar yang dapat digunakan untuk menggantikan bahan bakar konvensional.
<b><i>Bahan bakar fosil</i></b>	Sumber daya alam yang mengandung hidrokarbon seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam.
<b><i>Boiling point</i></b>	Temperatur dimana suatu zat berubah fasa dari keadaan cair menjadi gas.
<b><i>Cetane number</i></b>	Angka yang menunjukkan seberapa cepat bahan bakar mesin diesel yang diinjeksikan ke ruang bakar bisa terbakar secara spontan (setelah bercampur dengan udara).
<b><i>Common Rail System</i></b>	Mesin diesel yang sistem bahan bakarnya dikontrol secara elektrikal. Pada saat mesin bekerja, tekanan bahan bakar pada fuel rail dijaga pada tekanan yang cukup tinggi. Kontrol tekanan tinggi tersebut diatur secara independen pada setiap injector.
<b><i>Compressed Natural Gas (CNG)</i></b>	Gas alam terkompresi.
<b><i>Compression Ignition (CI) engine</i></b>	Sebuah mesin pembakaran dalam, dimana proses pembakaran di dalam mesin menggunakan temperatur kompresi.
<b><i>Crude oil</i></b>	Minyak mentah sebagai bahan dasar membuat bahan bakar fosil.
<b><i>Eco-routing</i></b>	Rute pengemudian yang memerlukan bahan bakar paling hemat.
<b><i>Energy content</i></b>	Batas bawah nilai kalor ( <i>lower caloric value</i> ) atau kapasitas panas pembakaran ketika suatu bahan bakar dibakar,

	dinyatakan dalam MegaJoule per kilogram (MJ/kg) atau per liter (MJ/l).
<b><i>Energy density Engine Management System (EMS)</i></b>	Kepadatan energi bahan bakar. Sistem pengaturan pada engine yang mengatur dan mengontrol seluruh sistem pada engine, yang dikendalikan oleh Electronic Control Unit (ECU).
<b><i>Evaporative cooling</i></b>	Efek pendinginan akibat penguapan bahan bakar
<b><i>Expansion Ratio</i></b>	Perbandingan volume LPG saat cair dan saat berupa uap.
<b><i>flame propagation Flammability range</i></b>	Periode penyebaran api pada mesin S.I. Rentang konsentrasi tertentu (campuran LPG dan udara) yang dapat terbakar.
<b><i>Flexible-fuelled vehicle</i></b>	Kendaraan yang dapat beroperasi dengan dua jenis bahan bakar atau dengan mencampurnya.
<b><i>Frictional losses fuel cell</i></b>	Kerugian energi akibat gesekan. Alat konversi energi elektrokimia yang akan mengubah hidrogen dan oksigen menjadi air, secara bersamaan menghasilkan energi listrik dan panas dalam prosesnya.
<b><i>Fuel cost ratio</i></b>	Perbandingan biaya bahan bakar alternatif terhadap bahan bakar konvensional.
<b><i>Fuel cut-off</i></b>	Pemutusan aliran bahan bakar saat mesin tidak membutuhkan, biasanya saat deselerasi.
<b><i>Heavy-duty vehicle (HDV) ignition delay</i></b>	Kendaraan dengan beban berat, biasanya adalah kendaraan niaga. Penundaan pengapian, jeda antara letikan bunga api busi sampai proses pembakaran terjadi.
<b><i>Internal Combustion Engine (ICE)</i></b>	Suatu motor penggerak mula yang mengubah energi primer (kimia bahan bakar) menjadi energi mekanik melalui siklus pembakaran.

<b><i>Kendaraan hybrid</i></b>	Kendaraan yang memiliki dua <i>powertrain system</i> .
<b><i>Kendaraan listrik</i></b>	Kendaraan yang menggunakan motor listrik sebagai tenaga pemutar poros (traksi). Sumber energi untuk motor listrik dapat disuplai dari baterai, sel bahan bakar ( <i>fuel cell</i> ), ultracapacitors, atau dari sumber energi yang lain.
<b><i>Knocking</i></b>	Terbentuknya pembakaran yang tidak terkendali pada campuran udara-bahan bakar sebelum ada pengapian dari busi, dengan menghasilkan gelombang tekanan yang dapat menyebabkan kerusakan mesin.
<b><i>Converter kits</i></b>	Seperangkat alat yang dipasangkan pada mobil untuk bisa beroperasi dengan LPG.
<b><i>Light Duty Vehicle (LDV)</i></b>	Kendaraan dengan beban ringan, biasanya adalah kendaraan penumpang.
<b><i>Liquefied Petroleum Gas (LPG)</i></b>	Gas hasil produksi dari kilang minyak dan Kilang gas, yang komponen utamanya adalah gas propana ( $C_3H_8$ ) dan butana ( $C_4H_{10}$ ) lebih kurang 99 % dan selebihnya adalah gas pentana ( $C_5H_{12}$ ) yang dicairkan.
<b><i>Membership function</i></b>	Nilai sebagai input pada Fuzzy Logic Controller (FLC).
<b><i>Natural Gas vehicle (NGV)</i></b>	Kendaraan dengan bahan bakar Gas Alam.
<b><i>Nett Present Value (NPV)</i></b>	Selisih antara pengeluaran dan pendapatan yang telah didiskontokan dengan menggunakan social opportunity cost of capital sebagai faktor diskon, dalam hal ini merupakan salah satu parameter asesmen dalam program konversi BBM ke LPG.
<b><i>Octane number</i></b>	Bilangan yang menunjukkan ketahanan bahan bakar terhadap knocking.
<b><i>Odor</i></b>	Zat penambah bau, biasanya etil merkaptan

	atau bahan lain, ditambahkan untuk memberikan bau LPG yang khas dan tajam.
<b><i>On Board Diagnostics (OBD)</i></b>	Sistem diagnostik otomatis secara elektronik pada mesin EFI.
<b><i>Panas laten</i></b>	Jumlah panas yang dibutuhkan untuk memungkinkan terjadinya penguapan.
<b><i>Pressure vessel</i></b>	Tangki bahan bakar yang mampu menahan tekanan tertentu dengan aman.
<b><i>Running cost</i></b>	Biaya operasional kendaraan per kilometer.
<b><i>Self-diagnosis</i></b>	Mobil yang mampu mengenali problem kesalahan pada mesin dan komponen mesin.
<b><i>Smart grid</i></b>	Jaringan listrik pintar yang mampu mengintegrasikan aksi-aksi atau kegiatan dari semua pengguna, mulai dari pembangkit sampai ke konsumen dengan tujuan agar efisien, berkelanjutan, ekonomis dan suply listrik yang aman.
<b><i>Spark Ignition (SI) Engine</i></b>	Sebuah mesin pembakaran dalam, dimana proses pembakaran di dalam mesin menggunakan percikan bunga api listrik dari busi / spark plug di dalam ruang bakar.
<b><i>Spesific gravity</i></b>	Berat cairan dalam volume tertentu dibandingkan dengan berat air dalam volume yang sama, diukur pada temperatur dan tekanan yang sama.
<b><i>thermal expansion</i></b>	Kenaikan volume LPG dalam tabung akibat kenaikan temperatur.
<b><i>Vaporizer</i></b>	Alat penguap LPG, bagian dari LPG kits.
<b><i>Vapour pressure</i></b>	Tekanan suatu uap pada kondisi kesetimbangan (equilibrium) dengan bentuk cairnya dalam lingkungan tertutup.
<b><i>Wobbe index</i></b>	Indikator untuk mengetahui pengaruh perubahan komposisi LPG terhadap energi yang dikirim ke ruang bakar.

## Profil Penulis



Muji Setiyo, lahir di Temanggung pada tahun 1983. Tahun 2002 studi di Program Studi D3 Teknik Otomotif Universitas Muhammadiyah Magelang, selesai tahun 2006. Sarjana Teknik Mesin diperoleh dari Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, pada tahun 2009. Dari tahun 2010 sampai 2012 mengambil S2 di Program Magister

Teknik Mesin konsentrasi Konversi Energi di Universitas Pancasila Jakarta. Gelar Doktor Teknik Mesin konsentrasi Konversi Energi diperoleh tahun 2017 dari Universitas Brawijaya. Tahun 2018, mengikuti program Short Course bidang Vocational Education di Technische Universität Dresden, Jerman. Saat ini, penulis aktif sebagai Dosen di Prodi Otomotif, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Magelang.



[0000-0002-6582-5340](https://orcid.org/0000-0002-6582-5340)



[57189574332](https://scopus.org/57189574332)



Prof. Dr. techn. Suyitno adalah dosen pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret sejak tahun 2001. Gelar S1 dan S2 diperoleh dari Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Bandung pada tahun 1998 dan 2001. Gelar S3 diraih dari Graz University of Technology, Austria pada tahun

2007. Pengalaman mengajarnya pada program Sarjana dan Master meliputi mata kuliah Kalkulus, Analisis Teknik, Desain Eksperimen, Perpindahan Panas, Termodinamika, Mekanika Fluida, Mesin Konversi Energi, Energi Surya, Teknik Refrigerasi, Teknologi Surfaktan dan Pewarna Alam, dan Nanogenerator.



[0000-0003-1786-0798](https://orcid.org/0000-0003-1786-0798)



[56177538900](https://scopus.org/56177538900)

# TEKNOLOGI KENDARAAN BERBAHAN BAKAR LPG

Buku ini membahas secara komprehensif tentang kendaraan berbahan bakar LPG (*Liquid Petroleum Gas*). Buku ini didahului dengan tulisan tentang konsep kendaraan modern, sistem energi dan dilengkapi dengan overview tentang sistem propulsi otomotif serta overview tentang bahan bakar.

Buku ini terdiri dari 6 (enam) bab yang saling berkaitan, dengan *brief summary* sebagai berikut:

Bab 1 Membahas tentang tuntutan kendaraan modern.

Bab 2 Membahas properti dan karakteristik LPG

Bab 3 Menyajikan perkembangan dan teknologi kendaraan LPG.

Bab 4 Membahas tentang bagaimana mengkonversi kendaraan dari bahan bakar konvensional (BBM) ke LPG.

Bab 5 Membahas tentang penyesuaian waktu pengapian.

Bab 6 Membahas tentang analisis tekno-ekonomi.



**Penerbit Deepublish (CV BUDI UTAMA)**  
Jl. Rajawali, Gang Elang 6 No.3, Drono, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman  
Jl. Kaliurang Km 9,3 Yogyakarta 55581  
Telp/Fax : (0274) 4533427  
Anggota IKAPI (076/DIY/2012)  
cs@deepublish.co.id @penerbitbuku\_deepublish  
Penerbit Deepublish www.penerbitbukudeepublish.com

Kategori : Teknologi

ISBN 978-623-209-731-5



9 786232 097315