



Laporan penelitian Dosen

**OPTIMASI PEMANFAATAN LPG SEBAGAI BAHAN BAKAR
KENDARAAN MELALUI PENYETELAN CONVERTER KITS
DAN SAAT PENGAPIAN**

OLEH

**MUJI SETIYO NIS.
BAGYO CONDRO P**

**Dibiayai Dibiayai LP3M Universitas Muhammadiyah Magelang
Tahun Anggaran 2010/2011**

**UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAGELANG
2012**



Laporan penelitian Dosen

**OPTIMASI PEMANFAATAN LPG SEBAGAI BAHAN BAKAR
KENDARAAN MELALUI PENYETELAN CONVERTER KITS
DAN SAAT PENGAPIAN**

OLEH

**MUJI SETIYO NIS.
BAGYO CONDRO P**

**Dibiayai Dibiayai LP3M Universitas Muhammadiyah Magelang
Tahun Anggaran 2010/2011**

**UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAGELANG
2012**

PENGESAHAN

- | | | | |
|----|----|---------------------------------|---|
| 1. | a. | Judul penelitian | : Optimasi pemanfaatan LPG sebagai bahan bakar kendaraan melalui penyetelan converter kits dan saat pengapian |
| | b. | Bidang kajian | : Teknologi Otomotif |
| 2. | | Ketua peneliti | |
| | a. | Nama lengkap dan gelar | : Muji Setiyo, ST |
| | b. | Jenis kelamin | : Laki laki |
| | c. | Golongan/Pangkat/NIP/NIS | : IIIA/ |
| | d. | Jabatan fungsional | : - |
| | e. | Jabatan struktural | : - |
| | f. | Fakultas/program studi | : Teknik/ Mesin Otomotif |
| 3. | | Alamat ketua peneliti | |
| | a. | Alamat kantor/telp/fax/e-mail | : FT-UMMagelang |
| | b. | Alamat rumah/telp/fax/e-mail | : Batusari, Candiroto, Temanggung |
| 4. | | Jumlah anggota peneliti | |
| | a. | Nama anggota/fakultas/prodi | : Bagyo Condro P/ Teknik/ Otomotif |
| 5. | | Lokasi penelitian | : Lab Otomotif FT UMMagelang |
| 6. | | Kerjasama dengan institusi lain | |
| | a. | Nama institusi | : VEDC Malang |
| | b. | Alamat | : Arjosari Malang |
| | c. | Telpon/fak/e-mail | : |
| 7. | | Lama penelitian | : 6 (enam) bulan |
| 8. | | Biaya yang diperlukan | |
| | a. | LP3M UMM | : Rp 5.000.000,- |
| | b. | Fakultas Teknik UMMagelang | : Rp 3.000.000,- |
| | c. | Sumber lain | : Rp 2.000.000,- |
| | | JUMLAH | : Rp 10.000.000,- |

Magelang, Maret 2012

Mengetahui/menyetujui

Ketua Peneliti

Ketua LP3M

Dr. Suliswiyadi, M.Ag

Muji Setiyo, ST

NIS. 966610111

NIS.

ABSTRAK

OPTIMASI PEMANFAATAN LPG SEBAGAI BAHAN BAKAR KENDARAAN MELALUI PENYETELAN CONVERTER KITS DAN SAAT PENGAPIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mencari optimasi prestasi mesin LPG melalui penyetelan baut penyetel pegas lever dan katup aliran gas pada *converter kits* serta penyesuaian saat pengapian. Objek pada penelitian ini adalah mesin Toyota 5A-FE dengan *converter kits* Tesla A-100. Luaran yang diharapkan adalah suatu rekomendasi penyetelan mesin LPG pada kondisi torsi optimum, CO optimum, atau HC optimum.

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen matrik taguchi. Baut stelan pegas lever divariasikan pada 5,5; 5,75; dan 6 putaran. Katup aliran gas divariasikan pada bukaan 40%; 50%; dan 60%. Saat pengapian divariasikan pada 10; 12,5; dan 15⁰BTDC. Dari tiga variabel dan tiga level tersebut kemudian dicari kombinasi untuk menghasilkan emisi (CO, HC) dan torsi yang optimum.

Torsi optimum (131,2 *N.m*) diperoleh pada stelan pegas lever 5,75 putaran, bukaan katup aliran 40%, dan saat pengapian 15⁰BTDC. Emisi CO terendah (0,13%) diperoleh pada stelan pegas lever 5,5 putaran, bukaan katup aliran 40%, dan saat pengapian 10⁰BTDC. Emisi HC terendah (124 *ppm*) diperoleh pada stelan pegas lever 5,5 putaran, bukaan katup aliran 40%, dan saat pengapian 15⁰BTDC.

Kata kunci : prestasi mesin, stelan pegas lever, bukaan katup aliran, saat pengapian.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PENGESAHAN.....	ii
ABSTRAK	III
DAFTAR ISI.....	iIV
DAFTAR GAMBAR.....	VII
DAFTAR TABEL	viiVIII
DAFTAR LAMPIRAN	iIX
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Sistematika penelitian.....	3
BAB II STUDI LITERATUR.....	5
2.1. Tinjauan Pustaka	5
2.1.1. Karakteristik LPG sebagai bahan bakar kendaraan	5
2.1.2. Converter Kits.....	6
2.1.3. Spesifikasi converter kits	7
2.1.4. Proses Pembakaran dan Saat Penyalaan	8
2.1.5. Penyesuaian Busi dan Perangkat Pengapian.....	9
2.1.5.1. Tinjauan Temperatur Ruang Bakar.....	9
2.1.5.2. Tinjauan Tegangan Pengapian	9
2.1.5.3. Penyesuaian nilai panas busi (heat range).....	10
2.2. Penelitian Relevan.....	10
BAB III METODE PENELITIAN	13
3.1. Media dan Alat Penelitian.....	13
3.2. Tempat penelitian	13
3.3. Instalasi LPG	13
3.4. Skema pengujian	14

3.5. Parameter Penelitian dan Variabel Bebas.....	15
3.6. Batasan dan Lingkup Penelitian.....	15
3.7. Metode pengumpulan data.....	15
3.7.1. Menentukan Jumlah Derajat Kebebasan.....	16
3.7.2. Menentukan Matrik Orthogonal	16
3.8. Desain Eksperimen	17
3.9. Pengolahan Data	17
3.9.1. Analisis variansi dan perhitungan persen kontribusi	18
3.9.2. Identifikasi faktor dan level yang dominan	18
3.9.3. Optimasi dan Prediksi Hasil	18
3.10. Eksperimen konfirmasi	19
BAB IV ANALISIS DATA DAN HASIL PENELITIAN.....	20
4.1. Analisis data.....	20
4.1.1. Data Pengujian.....	20
4.1.1.1. Uji torsi	20
4.1.1.2. Uji emisi	21
4.1.2. Menentukan respons rerata	22
4.1.3. Analisis variansi (ANOVA)	23
4.1.3.1. ANOVA pengujian torsi	23
4.1.3.2. ANOVA pengujian CO	24
4.1.3.3. ANOVA pengujian HC	25
4.1.4. Menentukan Persen kontribusi.....	25
4.1.4.1. Persen kontribusi pada pengujian torsi	26
4.1.4.2. Persen kontribusi pada pengujian CO	26
4.1.4.3. Persen kontribusi pada pengujian HC	27
4.1.5. Identifikasi level faktor optimum	27
4.1.5.1. Level faktor optimum pengujian torsi.....	27
4.1.5.2. Level faktor optimum pengujian CO	28
4.1.5.3. Level faktor optimum pengujian HC	29
4.1.6. Prediksi hasil dan <i>Confident Interval</i> (C.I).....	30

4.1.6.1. Prediksi torsi optimum.....	31
4.1.6.2. Prediksi CO optimum.....	31
4.1.6.3. Prediksi HC optimum.....	32
4.2. Hasil penelitian.....	33
4.2.1. Percobaan konfirmasi Torsi.....	33
4.2.2. Percobaan konfirmasi CO.....	35
4.2.3. Percobaan konfirmasi HC.....	36
4.2.4. Perbandingan konsumsi bahan bakar.....	37
4.2.5. Perbandingan biaya operasional kendaraan.....	38
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	39
5.1. Kesimpulan.....	39
5.2. Saran.....	39
DAFTAR PUSTAKA.....	40

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Sistematika penelitian	4
Gambar 2.1. Bentuk fisik <i>convereter kits</i> LPG	7
Gambar 2.2. Proses pembakaran pada mesin bensin	9
Gambar 2.3. Grafik penyesuaian pengapian pada mesin LPG	10
Gambar 3.1. Instalasi LPG pada mesin	14
Gambar 3.2. Skema pengujian torsi	14
Gambar 3.3. Skema pengujian emisi gas buang	14
Gambar 4.1. Rerata renpons terhadap Torsi	28
Gambar 4.2. Rerata renpons terhadap emisi CO	29
Gambar 4.3. Rerata renpons terhadap emisi HC	30
Gambar 4.4. Perbandingan Torsi mesin LPG dan mesin bensin	34
Gambar 4.5. Perbandingan emisi CO mesin LPG dan mesin bensin	35
Gambar 4.6. Perbandingan emisi HC mesin LPG dan mesin bensin	36
Gambar 4.7. Perbandingan konsumsi bahan bakar dalam <i>km/kg</i>	38

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Spesifikasi <i>converter kits</i> -----	8
Tabel 3.1. Media dan alat penelitian -----	13
Tabel 3.2. Parameter penelitian dan variabel bebas -----	15
Tabel 3.3. Batasan dan lingkup penelitian -----	15
Tabel 3.4. Perhitungan total derajat kebebasan -----	16
Tabel 3.5. Matrik Taguchi “ $L-9(3^4)$ array” -----	16
Tabel 3.6. Konfigurasi variabel-level dan parameter yang diukur -----	17
Tabel 3.7. Respon level terhadap parameter yang diukur -----	17
Tabel 3.8. Faktor dan level dominan -----	18
Tabel 4.1. Data hasil pengujian torsi -----	20
Tabel 4.2. Data hasil pengujian emisi CO -----	21
Tabel 4.3. Data hasil pengujian emisi HC -----	22
Tabel 4.4. Respon / pengaruh rerata faktor level -----	22
Tabel 4.5. ANOVA pada pengujian torsi -----	23
Tabel 4.6. ANOVA pada pengujian CO -----	24
Tabel 4.7. ANOVA pada pengujian HC -----	25
Tabel 4.8. <i>Percent influence</i> pengujian torsi -----	26
Tabel 4.9. <i>Percent influence</i> pengujian CO -----	26
Tabel 4.10. <i>Percent influence</i> pengujian HC -----	27
Tabel 4.11. Identifikasi level faktor optimum pada pengujian torsi -----	27
Tabel 4.12. Identifikasi level faktor optimum pada pengujian CO -----	28
Tabel 4.13. Identifikasi level faktor optimum pada pengujian HC -----	29
Tabel 4.14. Eksperimen konfirmasi torsi -----	33
Tabel 4.15. Eksperimen konfirmasi CO -----	35
Tabel 4.16. Eksperimen konfirmasi HC -----	36
Tabel 4.17. Perbandingan konsumsi bahan bakar dalam <i>km/kg</i> -----	37
Tabel 4.18. Perbandingan biaya operasional skenario subsidi -----	38
Tabel 4.19. Perbandingan biaya operasional skenario non-subsidi -----	38

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Perhitungan respons rerata torsi.
- Lampiran 2 Perhitungan respons rerata emisi CO.
- Lampiran 3 Perhitungan respons rerata emisi HC.
- Lampiran 4 Perhitungan persen kontribusi untuk torsi.
- Lampiran 5 Perhitungan persen kontribusi untuk emisi CO.
- Lampiran 6 Perhitungan persen kontribusi untuk emisi HC.
- Lampiran 7 Hasil pengujian torsi dengan bahan bakar LPG.
- Lampiran 8 Hasil pengujian torsi dengan bahan bakar bensin.
- Lampiran 9 Hasil uji konfirmasi pada skenario optimasi Torsi.
- Lampiran 10 Hasil uji emisi dengan bahan bakar bensin.
- Lampiran 11 Hasil uji konfirmasi pada skenario optimasi emisi CO.
- Lampiran 12 Hasil uji konfirmasi pada skenario optimasi emisi HC.
- Lampiran 13 Perbandingan sifat beberapa bahan bakar.
- Lampiran 14 Karakteristik LPG.
- Lampiran 15 Gambar converter kits.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Jumlah kendaraan semakin meningkat setiap tahun. Badan Pusat Statistik (BPS) menyebutkan jumlah kendaraan di Indonesia mencapai 70.714.569 unit pada survei tahun 2009. Jumlah tersebut meliputi 10.364.125 unit mobil penumpang, 2.729.572 unit bis, 5.187.740 unit truk, dan 52.433.132 unit jenis sepeda motor.

Pertumbuhan jumlah kendaraan ini berbanding terbalik dengan ketersediaan bahan bakar minyak (BBM) yang terus berkurang. Pemakaian bahan bakar minyak berpengaruh negatif terhadap dua hal pokok. Pertama, pengaruh terhadap ketersediaan bahan bakar. Kedua, pengaruh terhadap peningkatan emisi gas buang yang berimbas pada pemanasan global.

Salah satu energi alternatif pengganti bahan bakar minyak untuk kendaraan adalah bahan bakar gas (BBG). Beberapa jenis BBG diantaranya adalah *Liquid Petroleum Gas (LPG)*, *Compression Natural Gas (CNG)*, *Liquid Natural Gas (LNG)* dan gas hydrogen.

Perkembangan konversi BBM ke BBG di Indonesia hingga saat ini belum terlihat secara nyata. Infrastruktur utama seperti stasiun pengisian bahan bakar gas yang belum mendukung merupakan kendala dalam pengembangan ini. Mobil berbahan bakar gas dapat berkembang jika tersedia stasiun pengisian BBG yang tersebar di seluruh wilayah.

LPG memiliki beberapa keunggulan dari segi teknis dan ekonomis. Tekanan LPG dalam tangki antara 1,0 sampai 1,2 MPa, sedangkan CNG mencapai sekitar 20 MPa. Beberapa hasil penelitian menyebutkan kendaraan berbahan bakar LPG dapat menurunkan emisi gas buang dan menghemat pemakaian bahan bakar. Dari sisi besarnya tekanan dalam tangki dan faktor ketersediaan didaerah, LPG relatif lebih aman untuk dikembangkan sebagai bahan bakar kendaraan di Indonesia.

Hingga saat ini, beberapa percobaan dan penelitian mengenai LPG sebagai bahan bakar kendaraan di Indonesia, baik mobil maupun sepeda motor berkembang

melalui pemanfaatan LPG kemasan 3 kg dan 12 kg. Ketersediaan LPG kemasan 3 kg dan 12 kg dapat dijadikan sebuah solusi yang logis. Informasi mengenai LPG sebagai bahan bakar kendaraan sudah banyak ditemukan, tetapi pada kenyataannya aplikasi secara nyata belum banyak dilihat.

Pemanfaatan LPG sebagai bahan bakar mobil bensin menggunakan *converter kits*. Ada dua jenis *converter kits*, yaitu tipe konvensional dan tipe sequential. Pada *converter kits* konvensional yang bekerja berdasarkan tingkat kevakuman *intake manifold*, LPG dalam fasa gas dialirkan ke saluran masuk (*air induction sistem*) dengan sebuah diffuser. Pada *converter kits* tipe sequential yang bekerja berdasarkan kontrol dari ECU (*Electronic Control Unit*), LPG diinjeksikan ke *intake manifold* dengan katup solenoid. Kinerja mesin dan emisi gas buang dikontrol melalui penyetelan baut pegas lever dan bukaan katup aliran gas.

Objek yang digunakan dalam penelitian ini adalah Toyota Soluna 5A-FE berkapasitas mesin 1500 cc. Sebuah *converter kits* konvensional merk Tesla dipasang pada mesin tersebut dengan system *bi-fuel*. System *bi-fuel* memungkinkan kendaraan dapat dioperasikan dengan bensin atau dengan LPG secara bergantian.

Pada saat observasi lapangan dengan pengamatan secara kualitatif, ada tiga variabel yang berpengaruh signifikan terhadap performa mesin dan emisi gas buang, Ketiga variabel tersebut adalah (1) Kekencangan pegas lever, (2) bukaan katup aliran gas, dan (3) saat pengapian.

Permasalahan yang timbul pada saat pemasangan *converter kits* adalah belum adanya suatu spesifikasi pada stelan pegas lever dan bukaan katup aliran gas. Penyetelan biasanya dilakukan dengan cara memutar baut pegas lever sampai didapat putaran stasioner paling tinggi. Penyesuaian bukaan katup aliran dilakukan secara kualitatif sampai didapat akselerasi yang terbaik dengan cara melihat respon mesin saat *throttle valve* dibuka dengan cepat.

1.2. Perumusan Masalah

Melihat permasalahan diatas, perlu dilakukan penelitian tentang pengaruh stelan pegas lever, bukaan katup aliran gas, dan saat pengapian hubungannya dengan prestasi mesin. Secara rinci, permasalahan pada penelitian ini dirumuskan sebagai berikut :

1. Seberapa besar pengaruh stelan pegas lever, tingkat bukaan katup aliran gas, dan saat pengapian terhadap prestasi mesin.
2. Bagaimana kombinasi terbaik dari stelan pegas lever, bukaan katup aliran gas, dan saat pengapian untuk menghasilkan prestasi mesin yang optimum.

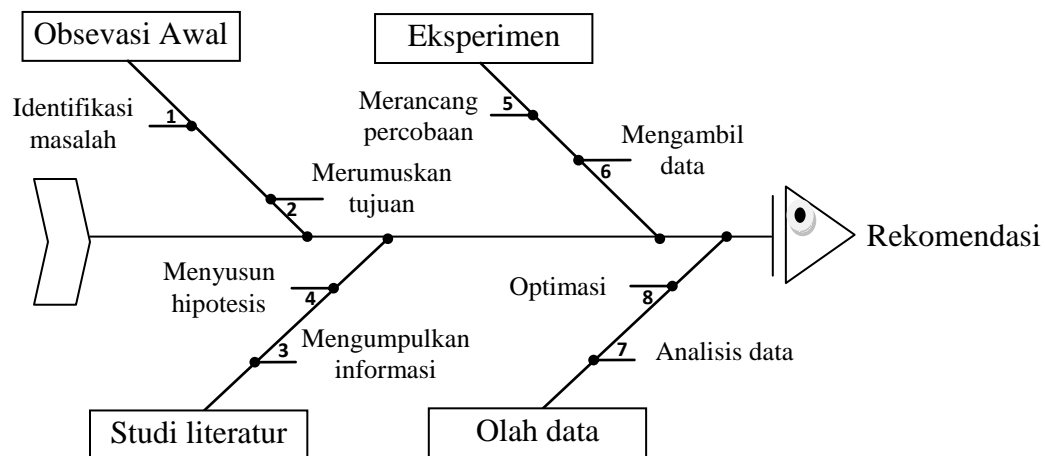
1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mempelajari seberapa besar pengaruh stelan pegas lever, tingkat bukaan katup aliran gas, dan saat pengapian terhadap prestasi mesin.
2. Mengidentifikasi kombinasi terbaik antara stelan pegas lever, tingkat bukaan katup aliran gas, dan saat pengapian untuk mendapatkan prestasi mesin yang paling optimum.

1.4. Sistematika penelitian

Penelitian ini direncanakan dalam empat tahap. Tahap pertama, melakukan studi pendahuluan melalui proses observasi lapangan dan menentukan tujuan. Tahap dua, melakukan studi literatur terkait permasalahan dengan cara menelusuri penelitian relevan yang mendukung. Tahap tiga, melakukan eksperimen yang diawali dengan merancang percobaan, melakukan pengujian, dan mengambil data. Tahap empat, melakukan analisis data dan menentukan kondisi operasi yang optimum. Pada tiap tiap kondisi yang optimum, kemudian dilakukan pengukuran konsumsi bahan bakar. Luaran dari penelitian ini berbentuk rekomendasi operasi mesin pada setiap kondisi parameter yang optimum. Gambar 1.1 menunjukkan sistematika penelitian.



Gambar 1.1 Sistematika penelitian

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tinjauan Pustaka

2.1.1. Karakteristik LPG sebagai bahan bakar kendaraan

LPG diperoleh dari hidrokarbon yang dihasilkan selama penyulingan minyak mentah dan dari komponen gas alam. Komponen LPG didominasi propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}). LPG juga mengandung hidrokarbon ringan lain dalam jumlah kecil, misalnya etana (C_2H_6) dan pentana (C_5H_{12})¹.

Kandungan energi LPG sebesar 46.23 MJ/kg dan 26 MJ/ℓ, sedangkan kandungan energi bensin sebesar 44.4 MJ/kg dan 34,8 MJ/ℓ. Dibandingkan dengan bensin, LPG memiliki kandungan energi per satuan massa relatif tinggi, tetapi kandungan energi per satuan volumenya rendah². Volume LPG lebih besar dari bensin sekitar 15 % sampai dengan 20%.

LPG memiliki nilai oktan 112³. Nilai oktan 112 memungkinkan untuk diterapkan pada mesin dengan perbandingan kompresi yang lebih tinggi sehingga memberikan efisiensi thermal yang lebih tinggi. Biaya operasional mesin LPG lebih rendah dan memiliki karakteristik ramah lingkungan. LPG menjadi alternatif energi yang populer sebagai pengganti bensin.

LPG memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan bensin. Konsumsi bahan bakar LPG per satuan volume lebih rendah daripada bensin. Distribusi gas pada tiap tiap silinder lebih merata sehingga percepatan mesin lebih baik dan putaran stasioner lebih halus. Ruang bakar lebih bersih sehingga umur mesin meningkat. Kandungan karbon LPG lebih rendah daripada bensin atau diesel sehingga menghasilkan CO_2 yang lebih rendah⁴.

¹ Brenda Brevitt, "Alternative Vehicle Fuels", Science Environment Section, House of Commons Library, Research Paper 02/11.

² ETSAP, "Automotive LPG and Natural Gas Engines", Technology Brief T03 – April 2010

³ 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 1:4 2009.

⁴ R. Saraf, S.S.Thipse and P.K.Saxena, op.cit.

Dari beberapa keunggulan diatas, LPG memiliki beberapa kelemahan. Mesin berbahan bakar LPG menghasilkan daya yang lebih rendah dari mesin bensin. Penurunan daya yang terjadi sekitar 5% -10%⁵. Sistem pengapian harus lebih besar sehingga penyalaan mesin menjadi lebih berat. Perlu penyesuaian saat pengapian dan kualitas sistem pengapian. Sistem bahan bakar harus dibuat lebih kuat daripada sistem bensin⁶.

2.1.2. Converter Kits

Converter kits adalah peralatan utama pada mesin dengan bahan bakar LPG. *Converter kits* terdiri dari dua bagian utama. Bagian pertama dinamakan regulator tekanan, berfungsi untuk menurunkan tekanan LPG dari tabung menjadi tekanan output. Penurunan tekanan pada regulator mengakibatkan perubahan fasa LPG dari cair ke gas. Untuk membantu proses penguapan, air pendingin mesin dialirkan disekeliling regulator. Bagian kedua, dinamakan dengan regulator aliran. Regulator aliran berupa katup yang dikendalikan oleh kevakuman *throttle body*. Katup regulator digerakkan oleh lever. Lever berupa pengungkit dengan titik tumpu ditengah. Satu ujung dikaitkan dengan diafragma dan ujung yang lain ditahan oleh pegas lever.

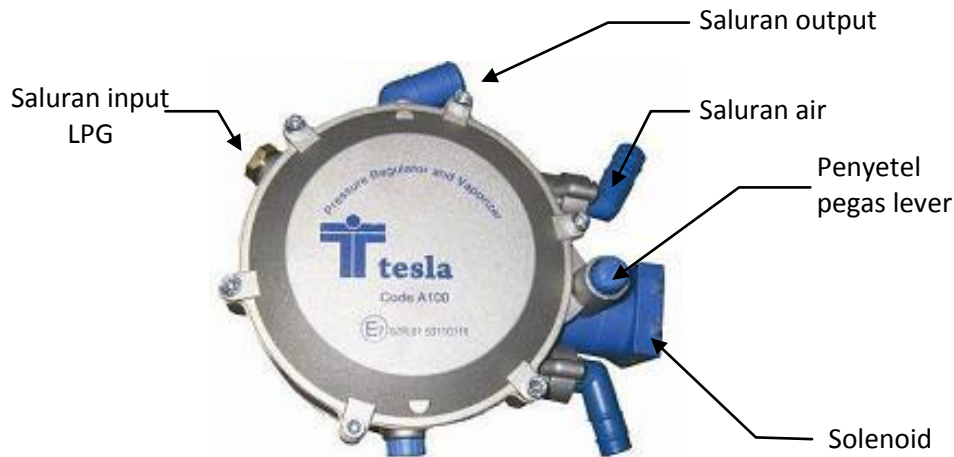
Jumlah gas yang mengalir dari regulator tekanan ke ruang diafragma dipengaruhi oleh kekuatan pegas lever dan kevakuman ruang diafragma. Pegas lever dapat diatur dengan memutar baut penyetel yang terdapat pada bagian luar *converter kits*. kevakuman ruang diafragma tergantung dari kecepatan aliran udara pada *throttle body*.

Converter kits juga dilengkapi dengan katup solenoid dan katup aliran gas pada saluran output. Solenoid berfungsi untuk membuka dan menutup saluran gas didalam *converter kits*. Solenoid dikendalikan oleh tegangan listrik dari sistem kelistrikan kendaraan. Katup aliran gas berfungsi untuk mengatur kapasitas aliran pada sisi output *converter kits*. Katup aliran gas dapat diatur untuk mengurangi atau

⁵ M.A. Ceviz, F. Yuksel, "Cyclic variations on LPG and gasoline-fuelled lean burn SI engine", Renewable Energy 31 (2006) 1950–1960

⁶ ETSAP, op.cit.

menambah luasan saluran output. Bentuk fisik *converter kits* LPG yang dipakai dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Bentuk fisik *converter kits* LPG

Untuk memasukkan LPG ke saluran manifold, digunakan sebuah diffuser yang dipasang pada sisi depan *throttle body*. Diffuser memiliki beberapa lubang memanjang yang mengelilingi lingkaran dalam. LPG dalam fasa gas mengalir dari *converter kits* ke diffuser melalui katup aliran gas (katup akselerasi).

2.1.3. Spesifikasi *converter kits*

Converter kits yang digunakan dalam penelitian ini adalah merk Tesla seri A100 dengan spesifikasi teknis sebagai berikut :

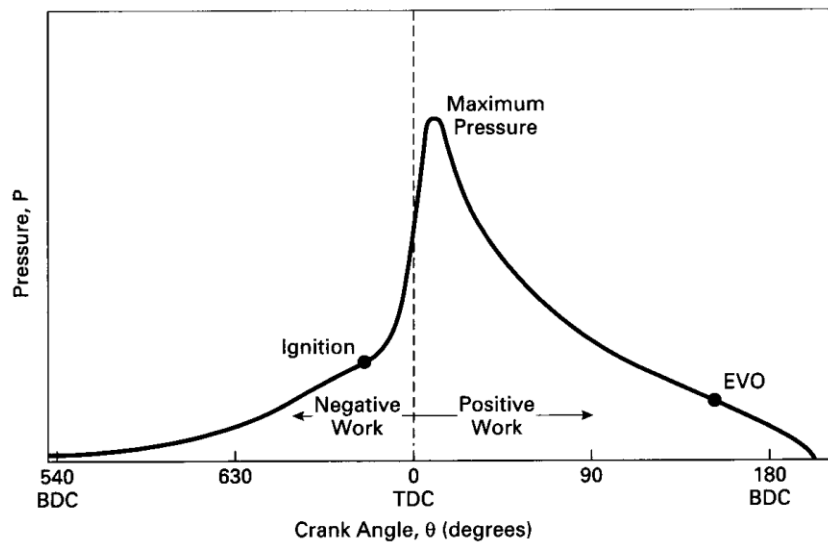
Tabel 2.1. Spesifikasi *converter kits*

No	Kriteria / items	Spesifikasi
1	Regulator	Tipe 2 stage
2	Tekanan inlet	200 psi max
3	Stelan tekanan awal	1,5 bar
4	Power supply	12 V DC
5	Kapasitas solenoid	12 W
6	Penggunaan pada mesin	50 – 4000 cc

2.1.4. Proses Pembakaran dan Saat Penyalaan

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

Proses pembakaran pada mesin bensin 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*)⁷. Gambar 2.1. merupakan ilustrasi proses pembakaran mesin bensin.



Gambar 2.2. Proses pembakaran pada mesin bensin

Pemakaian LPG sebagai bahan bakar akan mengurangi kecenderungan terjadinya detonasi. Efek lain dari pemakaian LPG adalah terjadinya perubahan kecepatan perambatan api (*flame propagation speed*). LPG mempunyai kecepatan rambat api yang lebih besar 12% dari bensin pada komposisi campuran yang sama.

⁷ Willard W. Pulkrabek, "Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine", new jersey, page 229.

LPG membutuhkan waktu yang lebih singkat untuk mencapai pembakaran eksplosif, ini berarti pada putaran tinggi proses pembakaran berlangsung lebih sempurna⁸.

2.1.5. Penyesuaian Busi dan Perangkat Pengapian

Penyesuaian perangkat pengapian pada mesin berbahan bakar LPG meliputi tegangan coil pengapian, jenis busi / *heat range value*, dan celah elektroda busi. Tujuan dari penyesuaian ini adalah untuk memperoleh optimasi pembakaran.

2.1.5.1. Tinjauan Temperatur Ruang Bakar

Pada mesin dengan bahan bakar bensin, bensin masuk ke ruang bakar dalam bentuk uap. Selain berfungsi sebagai bahan bakar, bensin berfungsi sebagai pendingin (*evaporative cooling*). Bensin 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*)⁹. Hal ini menyebabkan ruang bakar dan elektroda busi menjadi lebih panas.

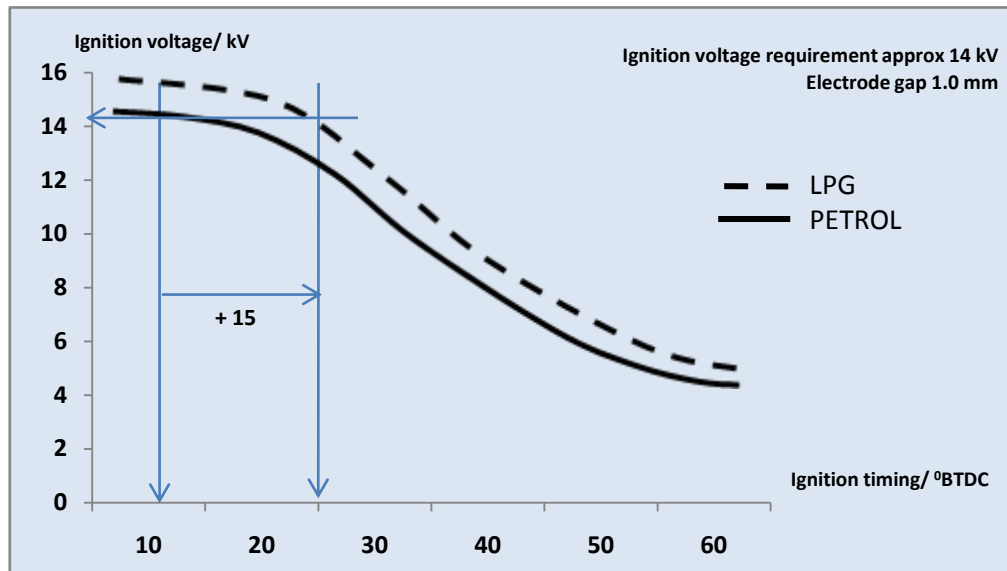
2.1.5.2. Tinjauan Tegangan Pengapian

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

⁸ Tri Agung Rohmat dan Harwin Saptoadi, "Pengaruh Waktu Penyalaan Terhadap Kinerja Spark-Ignition Engine Berbahan Bakar LPG", Media Teknik No.3 Tahun XXV edisi Agustus 2003ISSN 0216-3012.

⁹ Robert bosch, "Different sparks for different fuels" www.bosch.com.au

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 2.3.



Gambar 2.3. Grafik penyesuaian pengapian pada mesin LPG

2.1.5.3. Penyesuaian nilai panas busi (heat range)

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

2.2. Penelitian Relevan

Beberapa rujukan menyebutkan, untuk meningkatkan kinerja sistem pengapian pada mobil LPG dilakukan dengan mengurangi celah elektrode busi. Pada kasus tertentu dapat menghasilkan pengaruh yang berbeda. Dziubiński (2007),

melakukan penelitian eksperimental tentang pengujian sistem pengapian pada mobil berbahan bakar LPG. Salah satu variabel yang diteliti adalah ketergantungan tegangan sekunder *ignition coil* pada variasi ukuran celah busi 0,8; 0,9; 1,0; 1,1 mm. busi yang digunakan adalah NGK BPR6-ES11. Hasil dari penelitian ini menyebutkan tegangan sekunder *ignition coil* paling optimal terjadi pada celah electrode busi 0,8 mm dan 1,1 mm.

Lejda (2008), meneliti pengaruh tekanan injeksi LPG terhadap perubahan kontrol injeksi. Pada penelitian ini LPG diinjeksikan dalam fasa cair. Beberapa diantara hasil penelitiannya adalah sebagai berikut:

1. Peningkatan tekanan injeksi memperbesar volume injeksi LPG, meskipun terjadi pemendekan waktu injeksi oleh unit kontrol.
2. Peningkatan tekanan injeksi menghasilkan peningkatan volume bahan bakar dan menghasilkan peningkatan emisi CO dan HC pada gas buang.
3. Optimasi emisi beracun dan parameter yang bermanfaat dari mesin dengan campuran bahan bakar yang berbeda, bahan bakar LPG jauh lebih sulit daripada bahan bakar bensin.

Tasik (2011), melakukan penelitian tentang perbandingan emisi pada mesin berbahan bakar bensin dan LPG. Penelitian ini menunjukkan bahwa mesin LPG menghasilkan emisi yang lebih rendah dari mesin bensin, dengan rincian sebagai berikut. CO menurun 30% untuk *urban cycle* dan 10 % untuk *extra urban cycle*. HC menurun 30% untuk *urban cycle* dan 51 % untuk *extra urban cycle*. CO₂ menurun 10% untuk *urban cycle* dan 11 % untuk *extra urban cycle*. NO_x menurun 41 % untuk *urban cycle* dan 77 % untuk *extra urban cycle*. Penelitian serupa juga dilakukan oleh R.R. Saraf (2009). Penelitian ini juga menunjukkan penurunan emisi pada mesin berbahan bakar LPG, meskipun dengan prosentase yang sedikit berbeda.

Penelitian lain dilakukan Mockus (2006), menganalisa komposisi gas buang motor pembakaran dalam dengan bahan bakar LPG. Tujuan utama dari penelitian ini untuk mempelajari kerugian daya dan efek terhadap lingkungan. Metode pengukuran daya dan emisi dilakukan langsung pada dinamometer dengan memasang dinamometer pada roda mobil secara langsung. Objek utama penelitian ini adalah

mesin dengan *LPG converter* untuk daya maksimum dan mesin dengan *LPG converter* untuk minimasi emisi. Salah satu hasil studi ini adalah untuk mendapatkan penyetelan yang tepat perlu dibuat algoritma dengan beberapa hal perlu diasumsikan. Jika karakteristik mekanikal diinginkan tanpa mengorbankan ekologi, harus dirumuskan dengan ketat.

Mandloi (2010), melakukan penelitian tentang pengaruh penggunaan LPG pada kendaraan terhadap proses pembakaran. Hasil penelitian ini adalah sebagai berikut. Aplikasi LPG pada mesin bensin mempercepat proses pembakaran, tetapi durasi pembakarannya melambat. Sebagai konsekuensinya, tekanan dan temperatur pembakaran menjadi tinggi. Ini bisa berakibat kerusakan pada elemen mesin. LPG menurunkan efisiensi volumetrik, sehingga untuk mendapatkan daya yang tinggi diperlukan penambahan konsumsi bahan bakar spesifik. LPG menurunkan emisi CO dan NOx. Dalam kesimpulan akhir, diperoleh bahwa pemanfaatan LPG memberikan efek negatif terhadap performa mesin, tetapi memberikan efek positif terhadap emisi gas buang.

Shankar (2011), meneliti karakteristik unjuk kerja dan emisi pada mesin MPFI. Variabel yang diteliti adalah pengaruh saat pengapian terhadap kinerja mesin dan emisi gas buang. Hasil dari studi ini menjelaskan bahwa koefisien variasi IMEP (COV_{IMEP}) dapat dikurangi dengan memajukan saat pengapian dari 5^0 BTDC menjadi 6^0 BTDC. Efisiensi thermal meningkat dengan memajukan saat pengapian. Ketika mesin berjalan dengan LPG, kinerja terbaik dan emisi terendah rata-rata didapat dengan saat pengapian distel 6^0 BTDC.

Rohmat (2003), meneliti hubungan saat pengapian terhadap daya mesin. Hasil studinya adalah terjadi penurunan daya 20% sampai 30% pada mesin LPG tanpa penyetelan saat pengapian. Untuk meningkatkan kinerja mesin berbahan bakar LPG mendekati aslinya perlu dilakukan pemajuan saat pengapian.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Media dan Alat Penelitian

Media dan peralatan yang digunakan dalam penelitian ini tersaji dalam tabel 3.1 berikut :

Tabel 3.1. Media dan alat penelitian

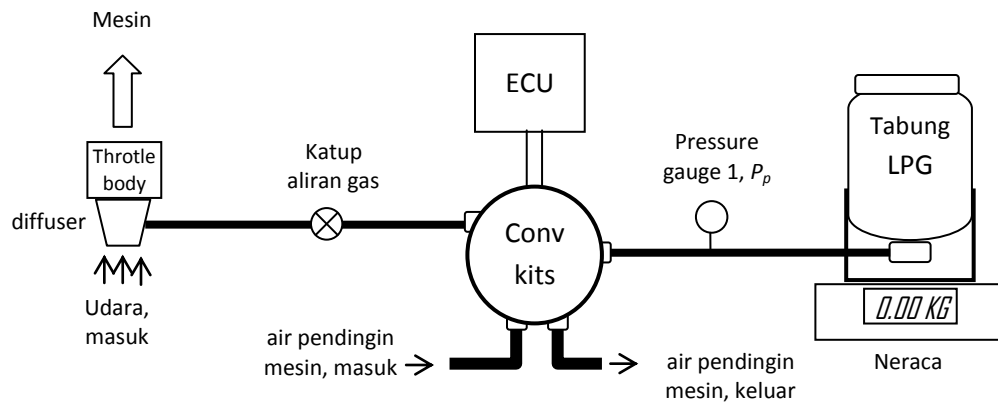
No	Nama bahan	Merk	Spesifikasi	Jumlah
1	Mobil	Toyota	Seri 5A-FE	1 unit
3	<i>Converter kits</i>	Tesla	A-100	1 unit
4	Chasis dinamometer	HOFFMAN	Dynatest pro 260 kW	1 unit
5	Engine gas analyzer	Q-Rotech	QRO-401	1 unit
6	Pressure gauge	Tekiro	0 – 1,6 MPa	1 unit
9	Hidraulic house	Mondea	350 psi	6 meter

3.2. Tempat penelitian

Pengambilan data uji pada penelitian ini dilaksanakan di dua tempat. Pengujian torsi mesin dilaksanakan di Departemen Ototronik VEDC Malang. Pengujian emisi gas buang dilaksanakan di Laboratorium Mesin Otomotif Universitas Muhammadiyah Magelang.

3.3. Instalasi LPG

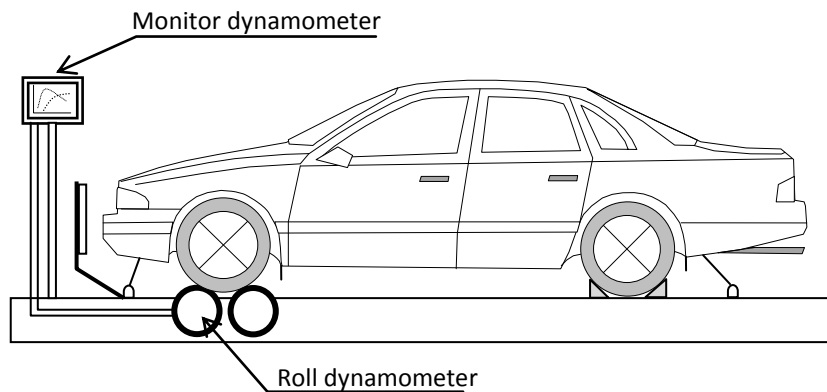
Tangki LPG diletakkan pada bagasi bagian belakang mobil. *Converter kits* diletakkan di ruang mesin. LPG dari tangki dialirkan ke *converter kits* melalui *hydraulic house* dengan sebuah *pressure gauge* dipasang di *dashboard* sebagai indikator tekanan LPG. LPG fasa gas dimasukkan ke mesin melalui sebuah diffuser yang dipasang pada *throttle body*. Skema aliran gas dari tangki sampai ke *intake manifold* disajikan dalam gambar 3.1.



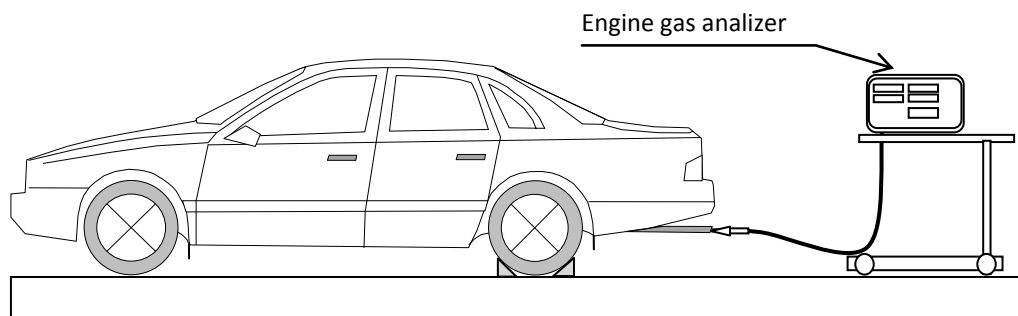
Gambar 3.1 Instalasi LPG pada mesin

3.4. Skema pengujian

Pengujian torsi mesin dilakukan dengan *chassis dynamometer* yang diukur pada roda roda penggerak. Emisi gas buang diukur dengan *engine gas analyzer*. Skema pengujian torsi dan emisi gas buang disajikan pada gambar 3.2 dan gambar 3.3 secara berurutan.



Gambar 3.2. Skema pengujian torsi



Gambar 3.3. Skema pengujian emisi gas buang

3.5. Parameter Penelitian dan Variabel Bebas

Tabel 3.2. Parameter penelitian dan variabel bebas

No	Parameter yang diukur	Variabel bebas/ Faktor
1	Torsi mesin, T (N.m)	Stelan pegas lever, (<i>putaran</i>)
2	Carbon monoksida, CO (%)	Bukaan katup aliran gas, (%)
3	Hydro Carbon, HC (ppm)	Saat pengapian, ($^{\circ}BTDC$)

Pada tiap tiap parameter yang optimal kemudian dilakukan pengujian konsumsi bahan bakar.

3.6. Batasan dan Lingkup Penelitian

Rancangan eksperimen pada penelitian ini dibatasi dengan tiga level untuk setiap variabel bebas / faktor. Tabel 3.3. menunjukkan batasan dan lingkup penelitian.

Tabel 3.3. Batasan dan lingkup penelitian

Kode	Variabel bebas/ faktor	Level 1	Level 2	Level 3
A	Stelan pegas lever, (<i>putaran</i>)	5,5	5,75	6
B	Bukaan katup aliran gas, (%)	40	50	60
C	Saat pengapian, ($^{\circ}BTDC$)	10	12,5	15

Keterangan :

1. Katup aliran gas tertutup penuh dianggap terbuka 0 % dan terbuka penuh dianggap terbuka 100 %.
2. Kekencangan pegas lever distel dengan memutar baut penyetel.
3. Saat pengapian diukur dalam derajat engkol (*crank angel*), pada putaran stasioner 700 rpm.

3.7. Metode pengumpulan data

Metode penelitian yang dipilih adalah metode eksperimen. Kombinasi tiga variabel bebas/ faktor dan tiga level penelitian seperti pada tabel 3.3, dibutuhkan pengambilan data (*trial*) yang banyak. Jika menggunakan metode *full factorial*, dibutuhkan 27 kali percobaan. Untuk mereduksi jumlah trial, kemudian dipilih metode taguchi.

3.7.1. Menentukan Jumlah Derajat Kebebasan

Pemilihan matrik orthogonal didasarkan pada jumlah total derajat kebebasan (*degree of freedom*). Perhitungan derajat bebasnya adalah sebagai berikut :

Tabel 3.4. Perhitungan total derajat kebebasan

Faktor	Level	Derajat bebas	Jumlah
A	3	(3-1)	2
B	3	(3-1)	2
C	3	(3-1)	2
Total derajat bebas (DOF)			6

3.7.2. Menentukan Matrik Orthogonal

Total derajat bebas menunjukkan jumlah baris minimal dalam percobaan. Matrik yang memiliki lebih dari enam baris dengan masing masing faktor memiliki tiga level adalah matrik "*L-9(3⁴) array*" seperti yang disajikan dalam tabel 3.5.

Tabel 3.5. Matrik Taguchi "*L-9(3⁴) array*"

Trial number	Column			
	1	2	3	4
1	1	1	-	1
2	1	2	-	2
3	1	3	-	3
4	2	1	-	3
5	2	2	-	1
6	2	3	-	2
7	3	1	-	2
8	3	2	-	3
9	3	3	-	1

3.8. Desain Eksperimen

Desain eksperimen yang berdasar matrik pada tabel 3.5, disajikan dalam tabel 3.6 berikut.

Tabel 3.6. Konfigurasi faktor-level dan parameter yang diukur

Trial number	A (<i>put</i>)	B (%)	C (^o <i>BTDC</i>)	<i>T</i> (<i>N.m</i>)	<i>CO</i> (%)	<i>HC</i> (<i>ppm</i>)
1	5,5	40	10			
2	5,5	50	12,5			
3	5,5	60	15			
4	5,75	40	15			
5	5,75	50	10			
6	5,75	60	12,5			
7	6	40	12,5			
8	6	50	15			
9	6	60	10			

3.9. Pengolahan Data

Konsep dari analisis ini adalah mencari respon atau pengaruh masing masing level dari variabel bebas/ faktor terhadap nilai rata rata parameter yang diukur.

Tabel 3.7. Respon level terhadap parameter yang diukur

No	Uraian	<i>T</i> (<i>N.m</i>)	<i>CO</i> (%)	<i>HC</i> (<i>ppm</i>)
1	Rerata hasil pengujian (<i>Y</i>)			
2	Pengaruh rerata stelan pegas lever 5,5 putaran			
3	Pengaruh rerata stelan pegas lever 5,75 putaran			
4	Pengaruh rerata stelan pegas lever 6 putaran			
5	Pengaruh rerata bukaan katup aliran 40 %			
6	Pengaruh rerata bukaan katup aliran 50 %			

7	Pengaruh rerata bukaan katup aliran 60 %			
8	Pengaruh rerata saat pengapian 10 ^o BTDC			
9	Pengaruh rerata saat pengapian 12,5 ^o BTDC			
10	Pengaruh rerata saat pengapian 15 ^o BTDC			

3.9.1. Analisis variansi dan perhitungan persen kontribusi

Analisis variansi (ANOVA) digunakan untuk mengetahui tingkat signifikansi dari tiap tiap faktor terhadap hasil parameter uji. Tiap tiap faktor dinyatakan berpengaruh signifikan jika nilai F_{hitung} lebih besar dari nilai F_{tabel} . Dari perhitungan ANOVA kemudian dilakukan penghitungan persen kontribusi dari tiap tiap faktor.

3.9.2. Identifikasi faktor dan level yang dominan

Pada tahap ini adalah menentukan level dari variabel/faktor yang dominan terhadap parameter yang diukur. Rekapitulasi dan pemeringkatan faktor-level dominan disajikan dalam tabel 3.8.

Tabel 3.8. Faktor dan level dominan

	Variabel /faktor								
	Stelan pegas lever (<i>put</i>)			Bukaan katup aliran (%)			Saat pengapian (^o BTDC)		
	A			B			C		
	<i>T</i>	<i>CO</i>	<i>HC</i>	<i>T</i>	<i>CO</i>	<i>HC</i>	<i>T</i>	<i>CO</i>	<i>HC</i>
Level 1									
Level 2									
Level 3									

3.9.3. Optimasi dan Prediksi Hasil

Pada penelitian ini terdapat dua jenis optimasi, yaitu optimasi torsi mesin (maksimasi) dan optimasi emisi *CO*, dan *HC* (minimasi).

Persamaan untuk optimasi torsi,

$$Y_{opt} = Y + (A_{max} - Y) + (B_{max} - Y) + (C_{max} - Y)$$

Persamaan untuk optimasi CO , dan HC ,

$$Y_{opt} = Y + (A_{min} - Y) + (B_{min} - Y) + (C_{min} - Y)$$

Y_{opt} adalah prediksi hasil optimal melalui kombinasi faktor-level yang dominan.

3.10. Eksperimen konfirmasi

Eksperimen konfirmasi dilakukan untuk membuktikan kebenaran dari nilai prediksi. Batas nilai penerimaan uji konfirmasi dinyatakan dengan perhitungan *confident interval* (CI). Pada kondisi yang paling optimal pada setiap parameter ukur yaitu CO , HC , dan torsi, kemudian dilakukan pengujian konsumsi bahan bakar aktual dalam satuan km/kg .

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis data

Analisis data pada penelitian ini terdiri dari dua tahap, yaitu tahap pengumpulan data dan tahap pengolahan data. Pengumpulan data meliputi kegiatan pengujian dan pengambilan data. Pengolahan data meliputi pengelompokan data, analisis variansi, identifikasi faktor-level dominan, dan memperkirakan hasil yang optimum.

4.1.1. Data Pengujian

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data hasil pengujian secara langsung. Pada penelitian ini terdapat tiga tahap pengujian, yaitu uji dyno, uji emisi, dan uji jarak tempuh. Uji dyno dilakukan untuk mendapatkan data torsi. Uji emisi dilakukan untuk mendapatkan data CO dan HC.. Uji jarak tempuh dilakukan untuk mendapatkan konsumsi bahan bakar.

4.1.1.1. Uji torsi

Uji torsi dilakukan pada unit *chassis dynamometer*. Torsi yang terukur adalah torsi pada roda roda penggerak. Roda roda depan dinaikkan diatas roller dynamometer, dengan satu orang operator berada didalam mobil. Tabel 4.1 berikut menyajikan data hasil pengujian torsi, dengan beberapa variasi perlakuan sesuai dengan desain eksperimen.

Tabel 4.1. Data pengujian torsi mesin

Trial	Faktor A	Faktor B	Faktor C	Hasil pengujian	
				Torsi (N.m)	Put (Rpm)
1	5,5	40	10	219	2543
2	5,5	50	12,5	221	2724
3	5,5	60	15	216	4199
4	5,75	40	15	231	2573

5	5,75	50	10	215	4287
6	5,75	60	12,5	212	4192
7	6	40	12,5	221	2740
8	6	50	15	222	4284
9	6	60	10	207	4149

4.1.1.2. Uji emisi

Uji emisi dilakukan dengan unit *engine gas analyzer* untuk mendapatkan data CO dan HC. Pada saat mesin beroperasi dengan bensin, dipilih mode gasoline, sedangkan pada saat mesin beroperasi dengan LPG, dipilih mode LPG. Pencatatan dilakukan pada kondisi stasioner (± 700 rpm).

Tata cara pengujian mengikuti prosedur uji emisi sesuai dengan lampiran Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup nomor 05 tahun 2006 tentang cara uji kendaraan bermotor kategori M, N, dan O berpengerak penyalaan cetus api pada kondisi idle (SNI 19-7118.1-2005).

Tabel 4.2 dan tabel 4.3 berikut menyajikan data hasil pengujian nilai CO dan HC secara berurutan, dengan beberapa variasi perlakuan sesuai dengan desain eksperimen.

Tabel 4.2. Data hasil pengujian emisi CO

Trial	Faktor A	Faktor B	Faktor C	Hasil pengujian CO (%)					
				Tes 1	Tes 2	Tes 3	Tes 4	Tes 5	Rerata
1	5,5	40	10	0,13	0,13	0,14	0,14	0,12	0,132
2	5,5	50	12,5	2,24	2,37	2,26	2,29	2,32	2,296
3	5,5	60	15	3,06	2,84	2,83	2,87	2,76	2,872
4	5,75	40	15	2,32	2,32	2,31	2,3	2,32	2,314
5	5,75	50	10	3,29	3,28	3,28	3,29	3,28	3,284
6	5,75	60	12,5	5,49	5,53	5,52	5,54	5,52	5,52
7	6	40	12,5	3,53	3,37	3,55	3,52	3,47	3,488
8	6	50	15	4,81	4,8	4,9	5,18	5,09	4,956
9	6	60	10	6,52	6,6	6,45	6,4	6,42	6,478

Tabel 4.3. Data hasil pengujian emisi HC

Trial	Faktor A	Faktor B	Faktor C	Hasil pengujian HC (ppm)					
				Tes 1	Tes 2	Tes 3	Tes 4	Tes 5	Rerata
1	5,5	40	10	162	164	158	161	162	161,4
2	5,5	50	12,5	119	120	122	123	118	120,4
3	5,5	60	15	188	198	192	190	192	192,0
4	5,75	40	15	156	153	155	157	155	155,2
5	5,75	50	10	180	182	178	186	188	182,8
6	5,75	60	12,5	300	290	289	298	296	294,6
7	6	40	12,5	262	256	258	264	260	260,0
8	6	50	15	327	329	226	331	333	309,2
9	6	60	10	460	457	463	456	459	459,0

Keterangan tabel 4.2 dan tabel 4.3:

Faktor A : Stelan baut pegas lever [putaran]

Faktor B : Bukaannya katup aliran gas [%]

Faktor C : Saat pengapian [⁰BTDC]

4.1.2. Menentukan respons rerata

Perhitungan respons rerata digunakan untuk mengetahui pengaruh tiap tiap level faktor terhadap hasil pengujian. Hasil perhitungan respons rerata digunakan untuk mengidentifikasi level faktor yang dominan terhadap hasil pengujian. Tabel 4.4 berikut ini menyajikan respon rerata factor level terhadap nilai torsi, CO, dan HC.

Tabel 4.4. Respon / pengaruh rerata faktor level

No	Uraian	Notasi	T (N.m)	CO (%)	HC (ppm)
1	Rerata hasil pengujian (Y)	\bar{Y}			
2	Pengaruh rerata stelan pegas lever 5,5 putaran	$\bar{A1}$			
3	Pengaruh rerata stelan pegas lever 5,75 putaran	$\bar{A2}$			
4	Pengaruh rerata stelan pegas lever 6 putaran	$\bar{A3}$			
5	Pengaruh rerata bukanya katup aliran 40 %	$\bar{B1}$			
6	Pengaruh rerata bukanya katup aliran 50 %	$\bar{B2}$			

7	Pengaruh rerata bukaan katup aliran 60 %	$\overline{B3}$			
8	Pengaruh rerata saat pengapian 10 ^o BTDC	$\overline{C1}$			
9	Pengaruh rerata saat pengapian 12,5 ^o BTDC	$\overline{C2}$			
10	Pengaruh rerata saat pengapian 15 ^o BTDC	$\overline{C3}$			

Keterangan : Perhitungan respons rerata terhadap nilai torsi, CO, dan HC dapat dilihat pada lampiran 1, lampiran 2, dan lampiran 3.

4.1.3. Analisis variansi (ANOVA)

Analisis variansi digunakan untuk mengetahui tingkat signifikansi tiap tiap faktor terhadap hasil pengujian. Penghitungan ANOVA menggunakan perangkat bantu statistik minitab. Konsep penghitungan ANOVA adalah membandingkan nilai F_{hitung} terhadap F_{tabel} . Jika F_{hitung} lebih besar dari F_{tabel} , dinyatakan ada hubungan yang signifikan antara perlakuan faktor terhadap hasil pengujian. Sebaliknya jika F_{hitung} lebih kecil dari F_{tabel} , menunjukkan adanya hubungan yang tidak signifikan.

4.1.3.1. ANOVA pengujian torsi

Tabel 4.5 menyajikan hasil perhitungan anova pada pengujian torsi dengan perangkat bantu minitab.

Tabel 4.5 ANOVA pada pengujian torsi

General Linear Model

Faktor	Levels	Values
STELAN PEGAS LEVER (A)	3	5.50 5.75 6.00
BUKAAN KATUP ALIRAN (B)	3	40 50 60
SAAT PENGAPIAN (C)	3	10.0 12.5 15.0

Analysis of Variance for TORSI

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
FAKTOR A	2	11.556	11.556	5.778	1.21	0.453
FAKTOR B	2	221.556	221.556	110.778	23.19	0.041
FAKTOR C	2	130.889	130.889	65.444	13.70	0.068
Error	2	9.556	9.556	4.778		
Total	8	373.556				

Dari hasil penghitungan Anova diatas , diperoleh bahwa faktor B (bukaan katup aliran gas) dan faktor C (saat pengapian) menunjukkan nilai $F_{hitung} \gg F_{tabel}$, sedangkan untuk faktor A (stelan pegas lever) menunjukkan nilai $F_{hitung} < F_{tabel}$. Nilai F_{tabel} untuk tingkat kepercayaan 95 % $F_{(0,05,2,8)}$ adalah 4,46. Ini mengindikasikan bahwa faktor B dan Faktor C berpengaruh signifikan, sedangkan faktor A tidak berpengaruh signifikan terhadap output torsi pada mesin LPG.

4.1.3.2. ANOVA pengujian CO

Tabel 4.6 menyajikan hasil perhitungan anova pada pengujian emisi CO dengan perangkat bantu minitab.

Tabel 4.6 ANOVA pada pengujian CO

General Linear Model						
Faktor		Levels	Values			
STELAN PEGAS LEVER (A)		3	5.50	5.75	6.00	
BUKAAN KATUP ALIRAN (B)		3	40	50	60	
SAAT PENGAPIAN (C)		3	10.0	12.5	15.0	

Analysis of Variance for EMISI (CO)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
FAKTOR A	2	15.6558	15.6558	7.8279	43.42	0.023
FAKTOR B	2	13.3127	13.3127	6.6563	36.92	0.026
FAKTOR C	2	0.3778	0.3778	0.1889	1.05	0.488
Error	2	0.3605	0.3605	0.1803		
Total	8	29.7068				

Dari hasil penghitungan Anova diatas , diperoleh bahwa faktor A (stelan pegas lever) dan faktor B (bukaan katup aliran) menunjukkan nilai $F_{hitung} \gg F_{tabel}$, sedangkan untuk faktor C (saat pengapian) menunjukkan nilai $F_{hitung} < F_{tabel}$. Nilai F_{tabel} untuk tingkat kepercayaan 95 % $F_{(0,05,2,8)}$ adalah 4,46. Ini mengindikasikan bahwa faktor A dan Faktor B berpengaruh signifikan, sedangkan faktor C tidak berpengaruh signifikan terhadap emisi CO pada mesin LPG.

4.1.3.3. ANOVA pengujian HC

Tabel 4.7 menyajikan hasil perhitungan anova pada pengujian emisi HC dengan perangkat bantu minitab.

Tabel 4.7 ANOVA pada pengujian HC

General Linear Model						
Faktor	Levels	Values				
STELAN PEGAS LEVER (A)	3	5.50	5.75	6.00		
BUKAAN KATUP GAS (B)	3	40	50	60		
SAAT PENGAPIAN (C)	3	10.0	12.5	15.0		

Analysis of Variance for HASIL CO						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
FAKTOR A	2	54575	54575	27287	17.91	0.053
FAKTOR B	2	27752	27752	13876	9.11	0.099
FAKTOR C	2	4181	4181	2091	1.37	0.422
Error	2	3047	3047	1524		
Total	8	89308				

Dari hasil penghitungan Anova diatas , diperoleh bahwa faktor A (stelan pegas lever) dan faktor B (bukaan katup aliran) menunjukkan nilai $F_{hitung} \gg F_{tabel}$, sedangkan untuk faktor C (saat pengapian) menunjukkan nilai $F_{hitung} < F_{tabel}$. Nilai F_{tabel} untuk tingkat kepercayaan 95 % $F_{(0.05,2,8)}$ adalah 4,46. Ini mengindikasikan bahwa faktor A dan Faktor B berpengaruh signifikan, sedangkan faktor C tidak berpengaruh signifikan terhadap emisi HC pada mesin LPG.

4.1.4. Menentukan Persen kontribusi

Perhitungan persen kontribusi (*percent influence*) digunakan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh dari faktor A (stelan pegas lever), faktor B (bukaan katup aliran), dan faktor C (saat pengapian) terhadap hasil pengujian secara keseluruhan. Jika jumlah total dari ketiga faktor bernilai 100 %, maka dinyatakan bahwa hasil pengujian seluruhnya dipengaruhi oleh faktor faktor tersebut. Jika total dari ketiga faktor kurang dari 100 %, maka ada faktor lain yang ikut berkontribusi terhadap hasil pengujian. Faktor lain ini dinamakan *error*.

4.1.4.1. Persen kontribusi pada pengujian torsi

Tabel 4.8 berikut menyajikan persen kontribusi dari tiap tiap factor terhadap hasil pengujian torsi.

Tabel 4.8. *Percent influence* pengujian torsi

Source	DF	SS	SS'	% Kontribusi
A	2	11,56	2,0	0,0054
B	2	221,56	212,0	0,5675
C	2	130,89	121,33	0,3248
ERROR	2	9,56		
TOTAL	8	373,56	335,33	0,8977

Keterangan : Perhitungan dapat dilihat pada lampiran 4

Dari tabel 4.8 dapat diinterpretasikan bahwa faktor A (stelan pegas lever) berpengaruh sangat kecil terhadap torsi, yaitu sebesar 0,54 %(tidak berpengaruh signifikan). Faktor B (bukaan katup aliran) berpengaruh 56,75 % dan faktor C (saat pengapian) berpengaruh 32,48 % terhadap torsi yang dihasilkan.

4.1.4.2. Persen kontribusi pada pengujian CO

Tabel 4.9. *Percent influence* pengujian CO

Source	DF	SS	SS'	% Kontribusi
A	2	15,656	15,295	0,5149
B	2	13,313	12,952	0,436
C	2	0,3778	0,0172	0,0006
ERROR	2	0,3605		
TOTAL	8	30,98	29,20	0,943

Keterangan : perhitungan dapat dilihat pada lampiran 5

Dari tabel 4.9 dapat diinterpretasikan bahwa faktor A (stelan pegas lever) berpengaruh 51,49 % dan faktor B (bukaan katup aliran) berpengaruh 43.60 % terhadap produk emisi CO, sedangkan faktor C (saat pengapian) hanya berpengaruh 0,06 % (tidak berpengaruh signifikan).

4.1.4.3. Persen kontribusi pada pengujian HC

Tabel 4.10. *Percent influence* pengujian HC

Source	DF	SS	SS'	% Kontribusi
A	2	54342	51242	0.5738
B	2	27607	24507	0.2744
C	2	4259	1159	0.013
ERROR	2	3100.1		
TOTAL	8	89308	76908	0.9734

Keterangan : perhitungan dapat dilihat pada lampiran 6

Dari tabel 4.10 dapat diinterpretasikan bahwa faktor A (stelan pegas lever) berpengaruh 57,38 % dan faktor B (bukaan katup aliran) berpengaruh 27,44 % terhadap produk emisi HC, sedangkan faktor C (saat pengapian) hanya berpengaruh 1,3 % (tidak berpengaruh signifikan).

4.1.5. Identifikasi level faktor optimum

Identifikasi level faktor optimum diperlukan untuk mengetahui level faktor yang memberikan pengaruh terbesar terhadap hasil pengujian. Kombinasi dari level faktor dominan ini diharapkan memberikan parameter yang optimum.

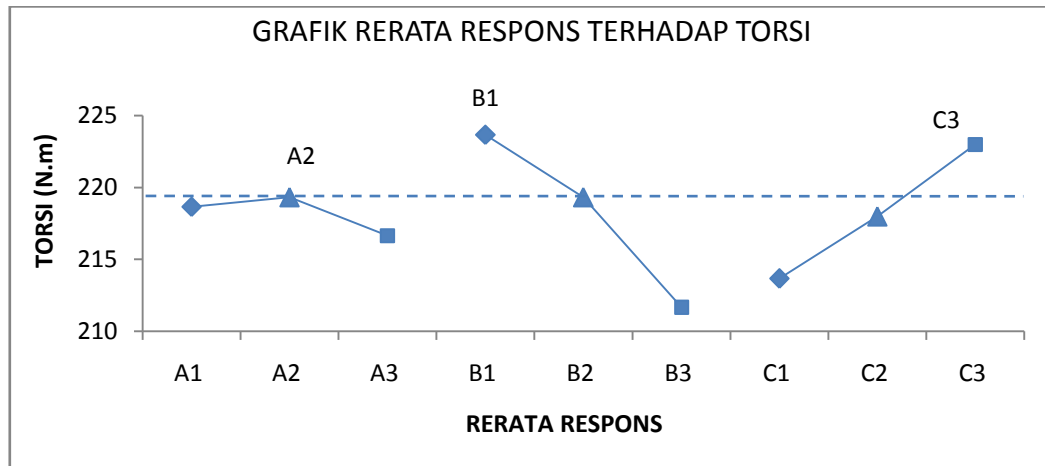
4.1.5.1. Level faktor optimum pengujian torsi

Pengaruh tiap tiap level dan faktor terhadap torsi dapat dilihat pada tabel 4.11 berikut.

Tabel 4.11. Identifikasi level faktor optimum pada pengujian torsi

Faktor Level	Stelan pegas lever (<i>put</i>) (A)	Bukaan katup aliran gas (%) (B)	Saat pengapian (^o BTDC) (C)
1	218,67	223,67	213,67
2	219,33	219,33	218,00
3	216,67	211,67	223,00
Selisih	0,67	12,00	9,33
Rangking	3	1	2

Dari tabel 4.11, dapat diketahui bahwa kombinasi level faktor untuk mendapatkan torsi tertinggi diperoleh pada B1; C3; dan A2; yaitu pada bukaan katup aliran gas 40 %, saat pengapian 15^oBTDC, dan pada stelan pegas lever 5,75 putaran. Gambar 4.1 menunjukkan respons rerata tiap faktor terhadap torsi.



Gambar 4.1. Rerata respons terhadap torsi

4.1.5.2. Level faktor optimum pengujian CO

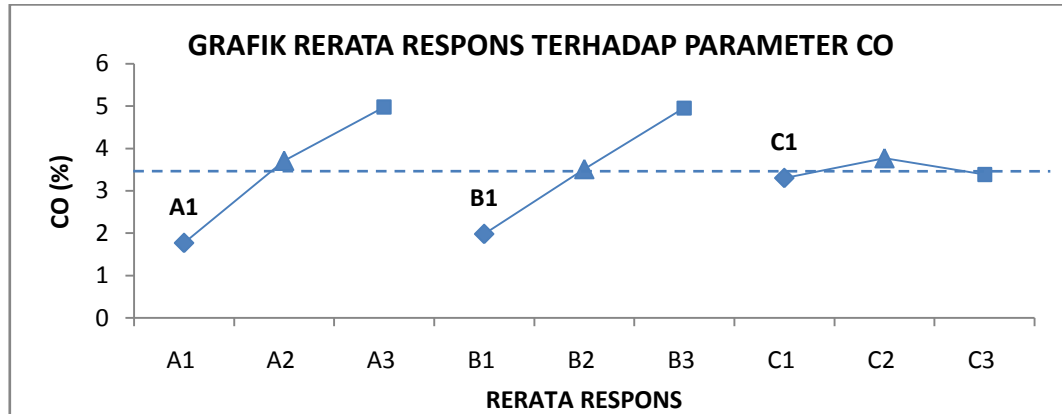
Pengaruh tiap tiap level dan faktor terhadap emisi CO dapat dilihat pada tabel 4.12 berikut.

Tabel 4.12. Identifikasi level faktor optimum pada pengujian CO

Faktor \ Level	Stelan pegas lever (<i>put</i>) (A)	Bukaan katup aliran gas (%) (B)	Saat pengapian (^o BTDC) (C)
1	1,77	1,98	3,30
2	3,71	3,51	3,77
3	4,97	4,96	3,38
Selisih	-3,21	-2,98	-0,47
Rangking	1	2	3

Dari tabel 4.12, dapat diketahui bahwa kombinasi level faktor untuk mendapatkan emisi CO terendah diperoleh pada A1; B1; C1; yaitu pada stelan pegas

lever 5,5 putaran, bukaan katup aliran gas 40 %, dan saat pengapian 10 ^oBTDC. Gambar 4.2 menunjukkan respons level faktor terhadap emisi CO.



Gambar 4.2. Rerata respons terhadap emisi CO

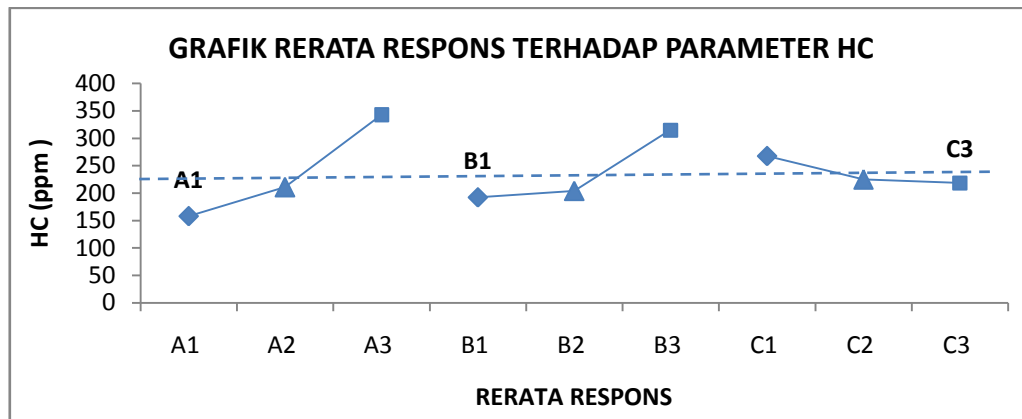
4.1.5.3. Level faktor optimum pengujian HC

Pengaruh tiap tiap level dan faktor terhadap emisi HC dapat dilihat pada tabel 4.13 berikut.

Tabel 4.13. Identifikasi level faktor optimum pada pengujian HC

Faktor / Level	Stelan pegas lever (<i>put</i>) (A)	Bukaan katup aliran gas (%) (B)	Saat pengapian (^o BTDC) (C)
1	157,93	192,20	267,73
2	210,87	204,13	225,00
3	342,73	315,20	218,80
Selisih	-184,80	-123,00	-48,93
Rangking	1	2	3

Dari tabel 4.13, dapat diketahui bahwa kombinasi level faktor untuk mendapatkan emisi HC terendah diperoleh pada A1; B1; C3; yaitu pada stelan pegas lever 5,5 putaran, bukaan katup aliran gas 40 %, dan saat pengapian 15 ^oBTDC. Gambar 4.3 menunjukkan respons rerata tiap faktor terhadap emisi HC.



Gambar 4.3. Rerata repons terhadap emisi HC

4.1.6. Prediksi hasil dan *Confident Interval* (C.I)

Setelah diketahui level faktor yang berpengaruh dominan, kemudian dilakukan perhitungan perkiraan atau prediksi hasil, jika level faktor yang berpengaruh dominan tersebut dikombinasikan. Kontrol kualitas untuk optimasi torsi adalah “yang terbesar yang terbaik”, sedangkan untuk optimasi CO dan HC adalah “yang terkecil yang terbaik”.

Dari perhitungan prediksi hasil, kemudian dilakukan uji konfirmasi untuk membuktikan kebenaran dari hasil perkiraan yang dilakukan. Sebelum dilakukan percobaan konfirmasi, dilakukan perhitungan tingkat interval kepercayaan / *confident interval* (CI). Jika hasil percobaan konfirmasi berada pada daerah penerimaan *confident interval*, maka optimasi dinyatakan berhasil atau tepat. Pada penelitian ini, tingkat *confident interval* untuk semua parameter ukur (torsi, CO, dan HC) ditetapkan sebesar 95 %. Formula CI untuk tingkat kepercayaan 95% sebagai berikut:

$$CI = \left[\frac{F_{(0,05,1,n_2)} \times V_e}{N_e} \right]^{0,5}$$

Keterangan :

CI = Confident interval

$F_{(1,n2)}$ = Nilai F_{tabel}

V_e = Jumlah variansi error

N_e = Jumlah pengamatan efektif

4.1.6.1. Prediksi torsi optimum

a. Perhitungan prediksi torsi optimum

Dari tabel 4.11, torsi terbesar diperoleh dari kombinasi antara B1, C3, dan A2. Hasil perhitungan prediksi torsi optimum adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} Y_{opt} &= \bar{Y} + (\bar{B1} - \bar{Y}) + (\bar{C3} - \bar{Y}) + (\bar{A2} - \bar{Y}) \\ &= 218,2 + (223,67 - 218,2) + (223 - 218),2 + (219,3 - 218,2) \quad [N.m] \\ &= 229,6 \text{ N.m} \end{aligned}$$

b. Perhitungan confident interval (CI)

Perhitungan *confidence interval* (CI) dengan tingkat interval kepercayaan 95% untuk optimasi torsi adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} CI &= \pm \left[\frac{F_{(0.05,1,n_2)} \times V_e}{N_e} \right]^{0,5} \\ CI &= \pm \left[\frac{4,22 \times 4,78}{\left(\frac{27}{7}\right)} \right]^{0,5} \\ CI &= \pm 2,29 \text{ N.m} \end{aligned}$$

Dengan nilai torsi optimasi sebesar 229,6 N.m, berarti level minimum penerimaan 229,6 N.m dikurangi 2,29 N.m yaitu sebesar 227,27 N.m, sedangkan level maksimum penerimaan adalah 229,6 N.m ditambah 2,29 N.m, yaitu 231,84 N.m.

4.1.6.2. Prediksi CO optimum

a. Perhitungan prediksi CO optimum

Dari tabel 4.12, CO terkecil diperoleh dari kombinasi antara, A1, B1, dan C1. Kondisi optimal untuk CO ternyata sama dengan konfigurasi percobaan pertama, yaitu dengan kombinasi stel baut pegas lever 5,5 putaran, bukaan katup gas 40 %, dan saat pengapian 10^oBTDC. Hasil perhitungan prediksi emisi CO optimum adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 Y_{opt} &= \bar{Y} + (\overline{A1} - \bar{Y}) + (\overline{B1} - \bar{Y}) + (\overline{C1} - \bar{Y}) \\
 &= 3,48 + (1,77 - 3,48) + (1,98 - 3,48) + (3,30 - 3,48) \quad [\%] \\
 &= 0,08 \%
 \end{aligned}$$

b. Perhitungan *Confident Interval* (*C.I*)

Perhitungan *confidence interval* (CI) untuk optimasi CO adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 CI &= \pm \left[\frac{F_{(0,05,1,n_2)} \times V_e}{N_e} \right]^{0,5} \\
 CI &= \pm \left[\frac{4,098 \times 0,18}{\left(\frac{45}{7}\right)} \right]^{0,5} \\
 CI &= \pm 0,34 \%
 \end{aligned}$$

Dengan nilai CO optimasi sebesar 0,08 %, berarti level minimum penerimaan sebesar 0,08 % dikurangi 0,34 %, yaitu sebesar -0,26 %, sedangkan level maksimum penerimaan sebesar 0,08 % ditambah 0,34 %, yaitu sebesar 0,42 %.

4.1.6.3. Prediksi HC optimum

a. Perhitungan prediksi HC optimum

Dari tabel 4.13, HC terkecil diperoleh dari kombinasi antara B1, A1, dan C3. Hasil perhitungan prediksi emisi HC optimum adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 Y_{opt} &= \bar{Y} + (\overline{A1} - \bar{Y}) + (\overline{B1} - \bar{Y}) + (\overline{C3} - \bar{Y}) \\
 &= 237,18 + (157,93 - 237,18) + (192,20 - 237,18) + (218,80 - 237,18) \quad [ppm] \\
 &= 94,58 ppm
 \end{aligned}$$

b. Perhitungan *Confident Interval* (*C.I*)

Perhitungan *confidence interval* (CI) dengan tingkat kepercayaan 95 % untuk optimasi HC adalah sebagai berikut :

$$CI = \pm \left[\frac{F_{(0.05,1,n_2)} \times V_e}{N_e} \right]^{0,5}$$

$$CI = \pm \left[\frac{4,098 \times 1550}{\left(\frac{45}{7}\right)} \right]^{0,5}$$

$$CI = \pm 31,43 \text{ ppm}$$

Dengan nilai HC optimasi sebesar 94,58 ppm, berarti level minimum penerimaan sebesar 94,58 ppm dikurangi 31,43 ppm, yaitu sebesar 63,14 ppm, sedangkan level maksimum penerimaan sebesar 94,58 ppm ditambah 31,43 ppm, yaitu sebesar 126 ppm.

4.2. Hasil penelitian

Dari analisis tentang prediksi hasil yang optimum, kemudian dilakukan uji konfirmasi untuk membuktikan bahwa hasil optimasi berada pada daerah penerimaan *confident interval* (CI). Faktor dan level yang digunakan dalam uji konfirmasi adalah factor level pada perhitungan prediksi hasil. Berikut merupakan hasil uji konfirmasi.

4.2.1. Percobaan konfirmasi Torsi

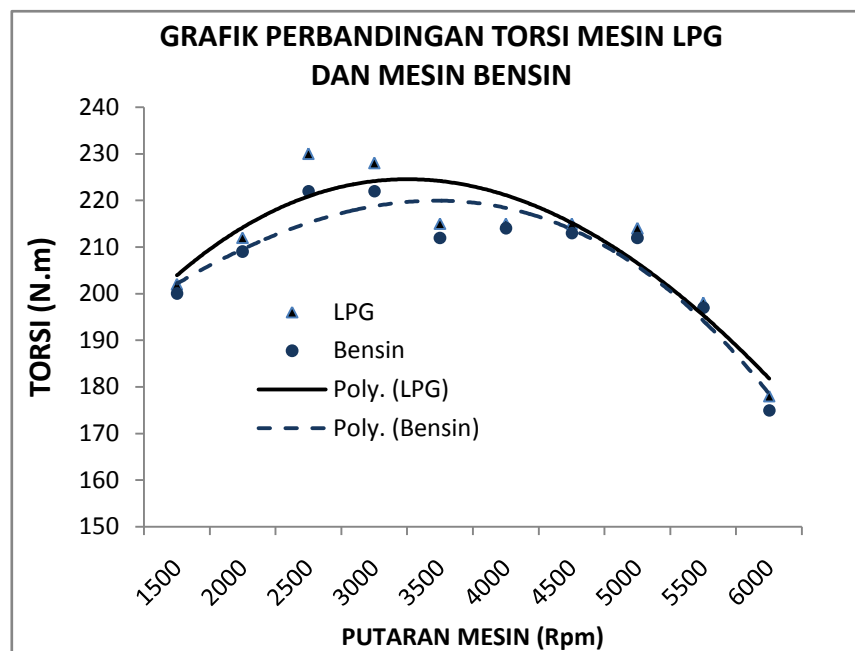
Kombinasi terbaik untuk mendapatkan Torsi optimum adalah pada bukaan katup aliran gas 40 % (B1), dan saat pengapian 15 °BTDC (C3), dan stelan pegas lever 5,75 putaran (A1) secara berurutan. Tabel 4.14 berikut adalah hasil percobaan konfirmasi dengan menggunakan kombinasi faktor level optimum.

Tabel 4.14. Eksperimen konfirmasi Torsi

Rpm mesin	TORSI (N.m)	
	LPG	Bensin
1500	202	200
2000	212	209
2500	230	222
3000	228	222

3500	215	212
4000	215	214
4500	215	213
5000	214	212
5500	198	197
6000	178	175

Gambar 4.4. berikut menunjukkan hasil pengujian karakteristik torsi skenario optimasi terhadap torsi dengan bahan bakar bensin pada nilai lambda (λ) $1 \pm 0,004$.



Gambar 4.4. Perbandingan torsi mesin LPG dan mesin bensin

Torsi maksimum yang dihasilkan pada pengujian konfirmasi bernilai 231,3 *N.m*, sementara dengan bahan bakar bensin dihasilkan torsi maksimum sebesar 210 *N.m*. Ini berarti pemakaian LPG dengan bukaan katup aliran 40 %, saat pengapian 15^o BTDC, dan penyetelan pegas lever pada 5,75 putaran dapat meningkatkan torsi sebesar 10 %. Dengan melihat interval kepercayaan antara 27,35 *N.m* sampai 31,85 *N.m*, menunjukkan bahwa uji konfirmasi torsi sebesar 231,3 *N.m* berada pada interval penerimaan.

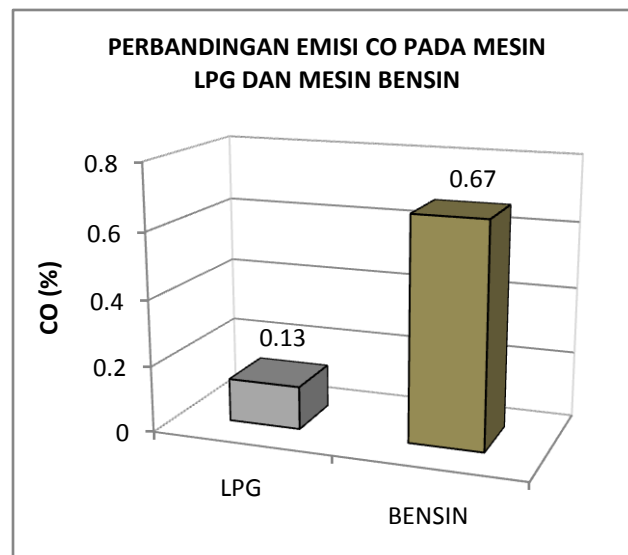
4.2.2. Percobaan konfirmasi CO

Kombinasi terbaik untuk mendapatkan CO optimum adalah stelan pegas lever 5,5 putaran (A1), bukaan katup aliran gas 40 % (B1), dan saat pengapian 10⁰BTDC (C1). Berikut adalah hasil percobaan konfirmasi dengan menggunakan kombinasi faktor level optimum.

Tabel 4.15. Eksperimen konfirmasi CO

Trial	Faktor A	Faktor B	Faktor C	Hasil pengujian CO (%)					
				Tes 1	Tes 2	Tes 3	Tes 4	Tes 5	Rerata
LPG	5,5	40	10	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
BENSIN	Standar			0,58	0,61	0,72	0,70	0,74	0,67

Gambar 4.5. berikut menunjukkan hasil pengujian emisi CO skala optimasi terhadap emisi CO dengan bahan bakar bensin pada nilai lambda (λ) $1 \pm 0,004$. Emisi CO pada uji konfirmasi bernilai 0,13 %, sedangkan dengan bahan bakar bensin dihasilkan CO rata rata 0,67 %. Ini menunjukkan bahwa pemakaian LPG dengan penyetelan baut pegas lever pada 5 putaran, bukaan katup aliran 40 %, dan saat pengapian 10⁰BTDC dapat mereduksi emisi CO hingga 80,6 %. Dengan melihat interval kepercayaan antara -0,223 %, sampai 0,403 %, berarti uji konfirmasi CO sebesar 0,13 % berada pada interval penerimaan.



Gambar 4.5. Perbandingan emisi CO mesin LPG dan mesin bensin

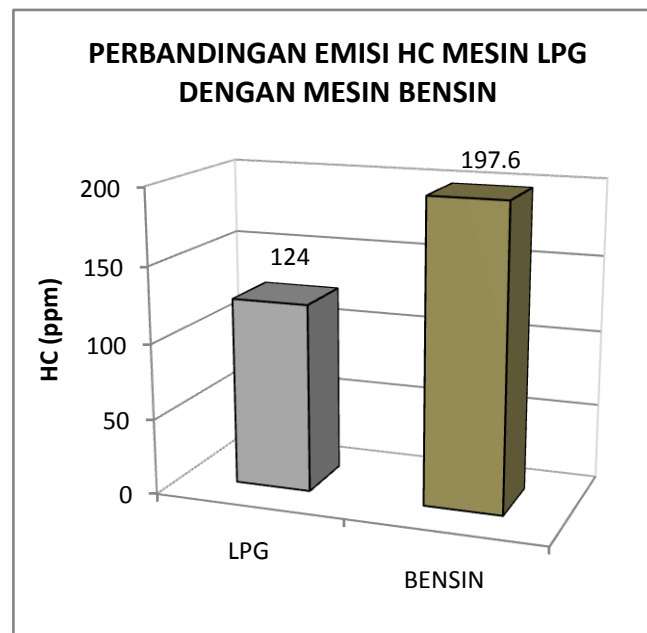
4.2.3. Percobaan konfirmasi HC

Kombinasi terbaik untuk mendapatkan HC optimum adalah stelan pegas lever 5,5 putaran (A1), bukaan katup aliran gas 40 % (B1), dan saat pengapian 15⁰BTDC (C1). Berikut adalah hasil percobaan konfirmasi dengan menggunakan kombinasi faktor level optimum.

Tabel 4.16. Eksperimen konfirmasi HC

Trial	Faktor A	Faktor B	Faktor C	Hasil pengujian HC (ppm)					
				Tes 1	Tes 2	Tes 3	Tes 4	Tes 5	Rerata
LPG	5.5	40	15	126	130	116	120	128	124
BENSIN	Standar			201	193	221	191	182	197,6

Gambar 4.6. berikut menunjukkan hasil pengujian emisi HC skala optimasi terhadap emisi HC dengan bahan bakar bensin pada nilai lambda (λ) $1 \pm 0,004$.



Gambar 4.6. Perbandingan emisi HC mesin LPG dan mesin bensin.

Emisi HC pada uji konfirmasi bernilai 124 ppm, sedangkan dengan bahan bakar bensin dihasilkan HC rata rata 197,6 ppm. Ini berarti pemakaian LPG dengan penyetelan baut pegas lever pada 5 putaran, bukaan katup aliran 40 %, dan saat

pengapian 15⁰ BTDC dapat mereduksi emisi HC sebesar 37,2 %. Dengan melihat interval kepercayaan antara 39,5 ppm, sampai 184,6 ppm, berarti uji konfirmasi HC sebesar 124 ppm berada pada interval penerimaan.

4.2.4. Perbandingan konsumsi bahan bakar

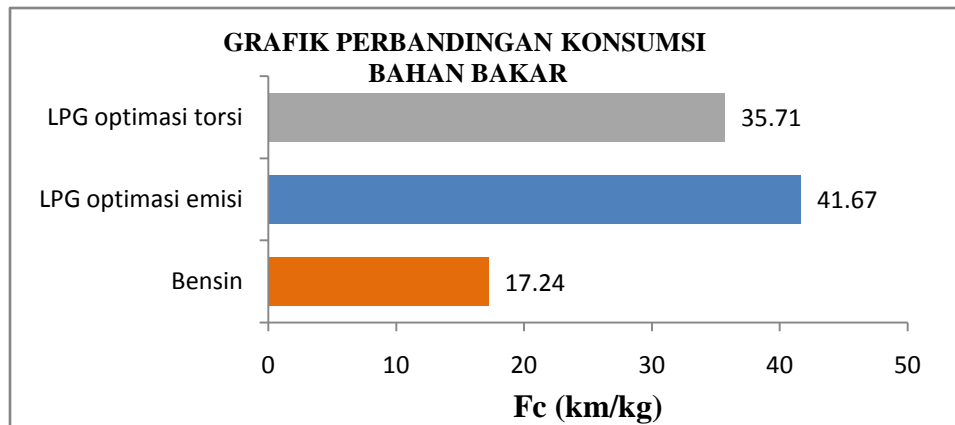
Dalam penelitian ini terdapat dua jenis rekomendasi untuk konsumsi bahan bakar, yaitu konsumsi bahan bakar dalam kaitannya dengan optimasi emisi dan konsumsi bahan bakar dalam kaitannya dengan optimasi torsi. Pengujian konsumsi bahan bakar dilakukan dilakukan di jalan raya dengan kecepatan antara 60 km/jam sampai 80 km/jam.

Konsumsi bahan bakar dihitung dengan membandingkan jarak tempuh per satuan massa bahan bakar dalam satuan km/kg. Data hasil pengujian konsumsi bahan bakar dengan bensin dan LPG adalah sebagai berikut.

Tabel 4.17 Perbandingan konsumsi bahan bakar dalam km/kg

Jenis bahan bakar	Perlakuan	Jarak (km)	Mbb (kg)	Fc (km/kg)
Bensin premium	Standar	50	2.9	17.24
LPG	Optimasi emisi	50	1.2	41.67
LPG	Optimasi torsi	50	1.4	35.71

Gambar 4.8 dibawah menunjukkan bahwa jarak tempuh per kilogram bahan bakar untuk LPG lebih tinggi daripada bensin. Penggunaan LPG dengan skala optimasi emisi menghasilkan konsumsi bahan bakar 41,67 km/kg, sedangkan konsumsi bahan bakar LPG skala optimasi torsi menghasilkan 35,71 km/kg. Sementara konsumsi bahan bakar dengan bensin premium menghasilkan 17,24 km/kg ($\rho_{\text{bensin}} 0,76 \text{ kg/l}$).



Gambar 4.7. Perbandingan konsumsi bahan bakar dalam km/kg

4.2.5. Perbandingan biaya operasional kendaraan

Dari perhitungan konsumsi bahan bakar diatas, dapat dihitung biaya operasional kendaraan jika dioperasikan dengan bahan bakar LPG. Perhitungan biaya operasional dibedakan menjadi dua jenis, yaitu pada penyetelan *converter kits* untuk mendapatkan emisi optimum dan pada penyetelan *converter kits* untuk mendapatkan torsi optimum. Perbandingan biaya operasional dengan skenario subsidi dan skenario non subsidi dapat dilihat pada tabel 4.18 dan tabel 4.19 secara berurutan.

Tabel 4.18. Perbandingan biaya operasional skenario subsidi

Jenis bahan bakar	Perlakuan	Harga (Rp/kg)	Fc (km/kg)	Fc (Rp/km)
Bensin	Standar	5.921	17,24	343,42
LPG	Optimasi emisi	4.500	41,67	108,00
LPG	optimasi torsi	4.500	35,71	126,00

Tabel 4.19. Perbandingan biaya operasional skenario non-subsidi

Jenis bahan bakar	Perlakuan	Harga (Rp/kg)	Fc (km/kg)	Fc (Rp/km)
Bensin	Standar	10.526*	17,24	610,53
LPG	Optimasi emisi	6.250	41,67	150,00
LPG	optimasi torsi	6.250	35,71	175,00

Asumsi : harga premium non-subsidi Rp. 8.000,-/liter.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan selama proses penelitian adalah sebagai berikut :

1. Output torsi pada mesin LPG lebih besar dipengaruhi oleh bukaan katup aliran dan saat pengapian, sedangkan emisi (CO dan HC) lebih besar dipengaruhi oleh penyetelan pegas lever dan bukaan katup aliran.
2. Torsi optimum (231,3 *N.m*) diperoleh pada kombinasi bukaan katup aliran gas 40 %, saat pengapian 15⁰BTDC, dan pada stelan pegas lever 5,75 putaran.
3. Emisi CO optimum (0,13 %) diperoleh pada kombinasi stelan pegas lever 5,5 putaran, bukaan katup aliran 40 %, dan saat pengapian 10⁰BTDC.
4. Emisi HC optimum (124 *ppm*) diperoleh pada kombinasi stelan pegas lever 5,5 putaran, bukaan katup aliran 40 %, dan saat pengapian 15⁰BTDC.

5.2. Saran

1. Untuk peneliti lanjutan, perlu ditambahkan sirkuit *fuel cut off* pada saat deselerasi / perlambatan untuk mereduksi emisi dan menghemat bahan bakar.
2. Pada saat menempuh jarak jauh, terjadi pengembunan pada sisi luar tabung LPG hingga diselimuti butiran es, untuk itu perlu dipikirkan mekanisme pemanas untuk menghindari penurunan tekanan karena pengaruh pengembunan.

DAFTAR PUSTAKA

- Brenda Brevitt, 2002, *Alternative Vehicle Fuels*, Science Environment Section, House of Commons Library, Research Paper 02/11.
- ETSAP, 2010, *Automotive LPG and Natural Gas Engines*, Technology Brief T03 – April 2010 - www.etsap.org
- ETSAP, 2009, *Liquid Petroleum Gas and Natural Gas Internal Combustion Engines*, Technology Brief T03 – june 2009 - www.etsap.org
- R.R. Saraf, S.S.Thipse and P.K.Saxena,2009, *Comparative Emission Analysis of Gasoline/LPG Automotive Bifuel Engine*, International Journal of Civil and Environmental Engineering 1:4 2009.
- M.A. Ceviz_, F. Yu` ksel, 2005, *Cyclic variations on LPG and gasoline-fuelled lean burn SI engine*, Renewable Energi 31 (2006) 1950–1960
- Willard W. Pulkrabek, 1985, *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*, new jersey.
- Tri Agung Rohmat dan Harwin Saptoadi, 2003, *Pengaruh Waktu Penyalaan Terhadap Kinerja Spark-Ignition Engine Berbahan Bakar LPG*, Media Teknik No.3 Tahun XXV edisi Agustus 2003ISSN 0216-3012.
- Mieczysław Dziubiński et.al, 2007, *Testing Of An Ignition System In A Car Run On Various Fuels*, *Teka* Kom. Mot. Energ. Roln. - OL PAN, 2007, 7, 97–104
- Kazimierz Lejda, Artur Jaworski, 2008, *Influence of liquid LPG injection pressure on the injection control*, *TEKA* Kom. Mot. Energ. Roln. – OL PAN, 2008, 8, 141–148
- Tasik T et.al, 2011, *Gasoline and LPG Exhaust Emissions Comparation*, *Advances in Production Engineering and Managemant*, 6(2011)2,87-94, ISSN 1854-6250
- Saulius Mockus et.al, 2006, *Analysis Of Exhaust Gas Composition Of Internal Combustion Engines Using Liquefied Petroleum Gas*, *Journal Of Environmental Engineering And Landscape Management* 2006, Vol XIV, No 1, 16–22
- R K Mandloi and A Rehman, 2010, *Long Term Continuous Use Of Auto- LPG Causes Thermal Pitting In Automotive S.I. Engine Parts*, *International Journal of Engineering Science and Technology* Vol. 2(10), 2010, 5907-5911
- Shankar K. S and Mohanan P, 2011, *MPFI Gasoline Engine Combustion, Performance And Emission Characteristics With LPG Injection*, *International Journal Of Energy And Environment* Volume 2, Issue 4, 2011 pp.761-770
- Ranjit K. Roy, 2001, *Design Of Experiments Using The Taguchi Approach*, John Wiley and Sons Inc, Canada.