



**PENGARUH GAP ELEKTRODA BUSI TERHADAP KINERJA
MOTOR BAKAR 4 LANGKAH BERBAHAN BAKAR LPG**

SKRIPSI

Oleh

Khoirul Wasik

NIM 131910101004

**PROGRAM STUDI STRATA I TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2017**



**PENGARUH GAP ELEKTRODA BUSI TERHADAP KINERJA
MOTOR BAKAR 4 LANGKAH BERBAHAN BAKAR LPG**

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Mesin (S1)
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh

Khoirul Wasik

NIM 131910101004

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2017**

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Negara Kesatuan Republik Indonesia (NKRI);
2. Kedua orang tua tercinta, Bapak Ta'at dan Ibu Lilis Mawati yang senantiasa memberikan restu, doa, kehangatan kasih sayang, dan pengorbanan yang luar biasa hingga saat ini;
3. Adikku Lisma Dwi Ayunda dan Keluarga tercinta yang selalu mendukung saya;
4. Bapak dan Ibu guru tercinta dari sekolah dasar sampai dengan perguruan tinggi;
5. Bapak Dr. Nasrul Ilminnafik, S.T., M.T. dan Bapak Hari Arbiantara, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing dalam penyusunan skripsi ini;
6. Bapak Ahmad Adib Rosyadi, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji Utama dan Bapak Mochammad Edoward Ramadhan, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji Anggota yang telah memberikan banyak saran demi terciptanya sebuah tulisan yang baik dan benar dalam penyelesaian skripsi ini;
7. Almamater Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember;
8. Dulur-dulur Teknik Mesin 2013 yang memberikan semangat kekeluargaan, ilmu dan motivasi selama perkuliahan hingga saat ini, salam *Solidarity Forever*;
9. Keluarga Ikatan Mahasiswa Gresik (Rizal Ilhaafah, Abdur Rokhim dan Bani Surahman) yang senantiasa memberikan dukungan hingga saat ini;
10. Keluarga seperjuangan (Puji, Zainuri, Rifqi, dan Fiqih) yang telah memberikan tenaga dan waktunya untuk membantu penelitian ini;
11. Serta civitas akademik baik lingkungan UNEJ maupun seluruh instansi pendidikan, perusahaan dan lembaga terkait.

MOTTO

Hai orang-orang beriman! Apabila dikatakan kepadamu, “Berilah kelapangan di dalam majelis-majelis”, maka lapangkanlah, niscaya Allah akan memberi kelapangan untukmu. Dan apabila dikatakan, “Berdirilah kamu”, maka berdirilah, niscaya Allah akan mengangkat (derajat) orang-orang yang beriman diantaramu dan orang-orang yang diberi ilmu beberapa derajat. Dan Allah Maha Mengetahui tentang apa yang kamu kerjakan.

(Terjemahan Surah Al-Mujaadila ayat 11)¹⁾

Boleh jadi kamu membenci sesuatu, padahal ia amat baik bagimu, dan boleh jadi (pula) kamu menyukai sesuatu padahal ia amat buruk bagimu, Allah mengetahui sedangkan kamu tidak mengetahui

(Terjemahan Surah Al-Baqarah ayat 216)¹⁾

Sesungguhnya Allah tidak mengubah keadaan suatu kaum, sehingga mereka mengubah keadaan yang ada pada diri mereka sendiri

(Terjemahan Surah Ar-Ra'd Ayat 11)¹⁾

Niatkanlah semua hal yang kamu lakukan untuk memperoleh ridha Allah, jagalah iman dan islammu, sesibuk apapun pekerjaanmu jangan lupakan shalat tepat waktu, serta jalani semua proses hidupmu dengan tekun, sabar dan tawadhu', sesungguhnya itu semua akan menentramkan hati dan fikiranmu

(Ayahku tercinta)

¹⁾ Departemen Agama Republik Indonesia. 1998. Al-Qur'an dan Terjemahannya. Semarang: PT Kumudasmoro Grafindo.

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini;

Nama : Khoirul Wasik

NIM : 131910101004

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “PENGARUH *GAP* ELEKTRODA BUSI TERHADAP KINERJA MOTOR BAKAR 4 LANGKAH BERBAHAN BAKAR LPG” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi mana pun, dan bukan termasuk karya jiplakan. Saya selaku penulis bertanggung jawab penuh atas keabsahan dan kebenaran isi yang sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapatkan sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 20 September 2017

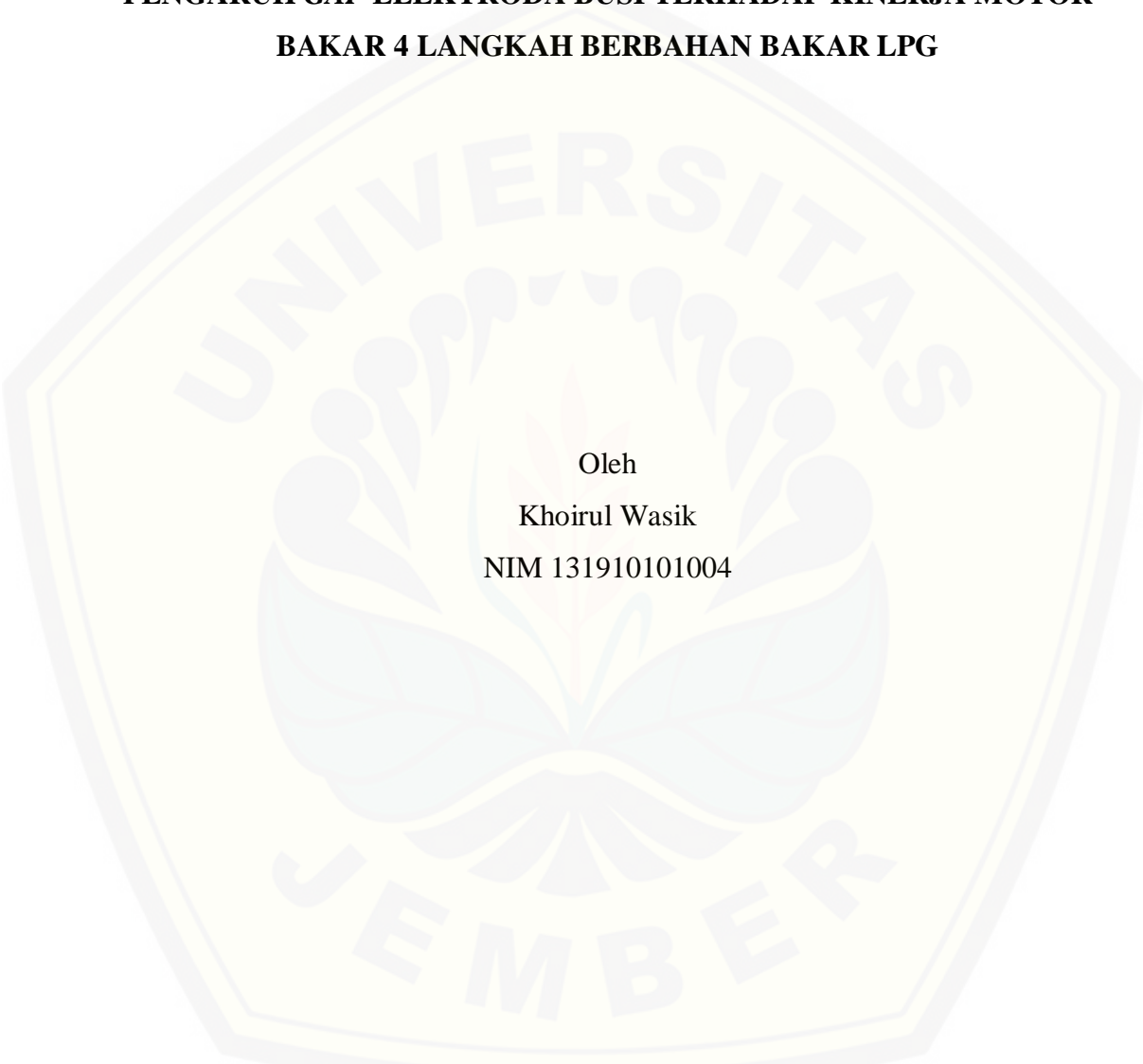
Yang menyatakan,

(Khoirul Wasik)

NIM 131910101004

SKRIPSI

**PENGARUH *GAP* ELEKTRODA BUSI TERHADAP KINERJA MOTOR
BAKAR 4 LANGKAH BERBAHAN BAKAR LPG**



Oleh
Khoirul Wasik
NIM 131910101004

Pembimbing:

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Nasrul Ilminnafik, S.T., M.T.
Dosen Pembimbing Anggota : Hari Arbiantara Basuki, S.T., M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Pengaruh *Gap* Elektroda Busi Terhadap Kinerja Motor Bakar 4 Langkah Berbahan Bakar LPG” telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal : Senin, 06 November 2017

tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji

Ketua,

Anggota 1,

Ahmad Adib Rosyadi, S.T., M.T.
NIP 19850117 201212 1 001

Mochammad Edoward R., S.T., M.T.
NIP 19870430 201404 1 001

Anggota II,

Anggota III,

Dr. Nasrul Ilminnafik, S.T., M.T.
NIP 19711114 199903 1 002

Hari Arbiantara Basuki, S.T., M.T.
NIP 19670924 199412 1 001

Mengesahkan
Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember,

Dr. Ir. Entin Hidayah, M. UM.
NIP 19661215 199503 2 001

RINGKASAN

PENGARUH GAP ELEKTRODA BUSI TERHADAP KINERJA MOTOR BAKAR 4 LANGKAH BERBAHAN BAKAR LPG

Khoirul Wasik, 131910101004; 2017; 119 halaman; Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Liquefied Petroleum Gas (LPG) merupakan gas minyak bumi yang dihasilkan dari pemurnian gas alam dan gas yang dihasilkan selama penyulingan minyak mentah. Komponen utama dari LPG adalah gas propane (C_3H_8) dan Butana (C_4H_{10}), LPG juga mengandung hidrokarbon lain dalam jumlah kecil yaitu etana (C_2H_6) dan pentana (C_5H_{12}).

Dalam penelitian ini, difokuskan tentang perubahan celah elektroda busi merk NGK C7HSA dengan sudut pengapian 18° BTDC berbahan bakar gas LPG. Variasi yang digunakan adalah ukuran jarak celah elektroda busi yaitu 0,6 mm, 0,7 mm, 0,8 mm dan 0,9 mm dengan variasi putaran mesin 3000 rpm, 4000 rpm, 5000 rpm, 6000 rpm dan 7000 rpm.

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Mesin Otomotif, Fakultas Teknik, Politeknik Negeri Jember untuk pengujian emisi gas buang dengan alat *Gas Analyzer*, pada pengujian daya dan torsi dilakukan di Bengkel Ahass Asia Sulfat Malang dengan menggunakan alat *Electric Dyno test*, sedangkan untuk pengujian laju aliran bahan bakar dilakukan di Laboratorium Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember.

Dari hasil penelitian menggunakan bahan bakar LPG, didapatkan nilai torsi maksimum sebesar 6,40 N.m diperoleh pada putaran mesin 3849 RPM dengan jarak celah 0,7 mm, sedangkan nilai daya maksimum sebesar 5,61 kW diperoleh pada putaran mesin 8791 rpm dengan jarak celah 0,8 mm. Pada pengujian emisi gas buang didapatkan nilai emisi CO optimum sebesar 0,02 % terjadi pada putaran

mesin 6000 rpm dengan jarak celah 0,8 mm, nilai emisi HC optimum sebesar 66 ppm terjadi pada putaran mesin 6000 rpm dengan jarak celah 0,8 mm, nilai CO₂ optimum sebesar 3,37 % terjadi pada putaran mesin 7000 rpm dengan jarak celah 0,8 mm, sedangkan nilai O₂ optimum sebesar 14,47 % terjadi pada putaran mesin 6000 rpm dengan jarak celah 0,8 mm. Nilai rata-rata laju aliran bahan bakar LPG terendah terjadi pada *gap* elektroda busi 0,8 mm yaitu sebesar 0,067 gr/s.



SUMMARY

THE INFLUENCE OF SPARK PLUG ELECTRODE'S GAP TOWARD 4 STEP ENGINE PERFORMANCE WITH LPG FUEL

Khoirul Wasik, 131910101004; 2017; 105 pages; *Mechanical Engineering Departement of Engineering Faculty of Jember.*

Liquefied Petroleum Gas (LPG) is a gas that produced from natural gases purification, it is also produced during crude oil's distillation. Main component of LPG are propane gas (C_3H_8) and butane (C_4H_{10}), LPG also contain other hydrocarbon in a small amount, which are ethane (C_2H_6) and pentane (C_5H_{12}).

Focus in this research is about a change in space of spark plug electrode NGK C7HSA with ignition angle 18° BTDC and Liquefied Petroleum Gas fuel. Variation used in this research is spark plug electrode gap, varies between 0,6 mm, 0,7 mm, 0,8 mm and 0,9 mm with variation of engine speed 3000 rpm, 4000 rpm, 5000 rpm, 6000 rpm and 7000 rpm.

These researches conduct in Laboratorium Mesin Otomotif, Faculty of engineering, Jember State Polytechnic to test exhaust gas emissions using *Gas Analyzer* machine. Power and torque testing conduct in workshop of Ahass Asia Sulfat Malang, using Electric Dyno Test machine. Fuel flow rate testing conduct in Conversion Energy Laboratory, Mechanical engineering, University of Jember.

The result from using LPG fuel, maximum torque obtained with a value of 6,4 N.m at 3849 rpm, space gap 0,7 mm. While maximum power is 5,61 kW obtained at 8791 rpm with space gap 0,8 mm. From the exhaust gas emissions test resulting optimum CO emission value of 0,02% at 6000 rpm with space gap 0,8 mm. Optimum value of CO_2 is at 3,37% with 7000 rpm and 0,8 mm space gap,

while O₂ optimum value of 14,47% happens at 6000 rpm and 0,8 mm space gap.
The lowest LPG fuel flow rate happens at 0,8 mm space gap which is 0,067 g/s.



PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Allah SWT. Atas segala rahmat dan karunianya-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi berjudul “Pengaruh *Gap* Elektroda Busi Terhadap Kinerja Motor Bakar 4 Langkah Berbahan Bakar LPG”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan nikmat lahiriyah maupun batiniyah yang tidak pernah henti penulis rasakan;
2. Bapak Dr. Nasrul Ilminnafik, S.T., M.T. dan Bapak Hari Arbiantara Basuki, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing yang telah meluangkan waktu maupun pikiran dalam penyusunan skripsi ini;
3. Bapak Ahmad Adib Rosyadi, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji Utama dan Bapak Moch. Edoward R., S.T., M.T. selaku Dosen Penguji anggota yang telah membantu memberikan ilmu dalam penyelesaian skripsi ini;
4. Ayah dan ibu yang selalu memberikan seluruh kasih sayang, semangat dan doa untuk penulis;
5. Adikku Lisma Dwi Ayunda yang selalu memberikan semangat dan dukungan untuk penulis guna menyelesaikan skripsi ini;
6. Bapak/Ibu Dosen Universitas Jember khususnya Jurusan Teknik Mesin yang telah membimbing selama penulis menjadi mahasiswa;
7. Guru-guruku sejak sekolah dasar hingga perguruan tinggi yang memberikan ilmu yang bermanfaat untuk penulis;
8. Dulur-dulur Teknik Mesin 2013 yang senantiasa memberikan motivasi, dukungan serta semangat selama mengikuti perkuliahan hingga saat ini, salam Solidarity Forever;
9. Semua pihak terkait yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa sebagai penulis tidak terlepas dari keterbatasan, yang biasanya mewarnai kadar ilmiah dari skripsi ini. Oleh karena itu, penulis selalu terbuka terhadap masukan dan saran dari semua pihak yang sifatnya membangun untuk kesempurnaan. Tidak lupa penulis menyampaikan permohonan maaf jika terjadi kesalahan penulisan. Akhir kata penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan dapat menjadi bahan acuan yang bermanfaat di kemudian hari.

Jember, 20 September 2017

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PERSEMBAHAN	ii
MOTTO	iii
PERNYATAAN	iv
PEMBIMBING	v
PENGESAHAN	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Minyak dan Gas Indonesia	7
2.2 Polusi Udara	9
2.3 Karakteristik <i>Liquefied Petroleum Gas (LPG)</i>	11
2.3.1 Daya dan Konsumsi Bahan Bakar	15
2.3.2 Emisi Gas Buang	22
2.3.3 Karakteristik Pengapian LPG	28
2.4 Busi	29
2.5 Hipotesa Penelitian	44

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	46
3.1 Metode Penelitian	46
3.2 Waktu dan Tempat.....	47
3.2.1 Waktu	47
3.2.2 Tempat	47
3.3 Alat dan Bahan	47
3.3.1 Alat	47
3.3.2 Bahan	49
3.4 Variabel Penelitian	49
3.4.1 Variabel Bebas	49
3.4.2 Variabel Terikat	50
3.5 Rencana Penelitian	50
3.6 Prosedur Penelitian	51
3.6.1 Persiapan dan Pemeriksaan Alat dan Bahan.....	51
3.6.2 Tahap Pengambilan Data.....	52
3.7 Skema <i>Flow Chart</i> Alur Penelitian	59
3.8 Skema <i>Flow Chart</i> Pengujian Laju Aliran Massa Bahan Bakar.....	60
3.9 Skema <i>Flow Chart</i> Pengujian Performa Mesin	61
3.10 Skema <i>Flow Chart</i> Pengujian Emisi Gas Buang	62
BAB 4. METODOLOGI PENELITIAN	63
4.1 Data Hasil Penelitian	63
4.1.1 Analisa Daya dan Torsi	63
4.1.2 Analisa Emisi Gas Buang	67
4.1.3 Analisa Laju Aliran Massa Bahan Bakar	77
BAB 5. PENUTUP	79
5.1 Kesimpulan.....	79
5.2 Saran.....	80
DAFTAR PUSTAKA	81
LAMPIRAN	86

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Perkembangan jumlah kendaraan bermotor tahun 2000 sampai 2013.....	7
Gambar 2.2 Konsumsi dan devisa minyak Indonesia	8
Gambar 2.3 Volume produksi dan Konsumsi BBM di Indonesia	8
Gambar 2.4 Cadangan gas Indonesia.....	9
Gambar 2.5 Kurva kadar emisi gas buang rasio udara – bahan bakar (AFR) <i>Spark Ignition Engine (SI Engine)</i>	10
Gambar 2.6 Grafik perbandingan efisiensi volumetric dan kecepatan mesin berbahan bakar bensin dan LPG pada bukaan throttle body.....	16
Gambar 2.7 Grafik perbandingan bahan bakar premium dan LPG dengan menggunakan mesin injeksi.....	17
Gambar 2.8 Perbandingan torsi terhadap putaran mesin berbahan bakar LPG dan bensin	18
Gambar 2.9 Perbandingan bahan bakar dalam km/g	18
Gambar 2.10 Pengaruh putaran mesin terhadap SFC, torsi dan daya.....	19
Gambar 2.11 Pengaruh sudut pengapian terhadap SFC, torsi dan daya	20
Gambar 2.12 Pengaruh AFR (λ) terhadap SFC, torsi dan daya.....	21
Gambar 2.13 Pengaruh <i>gap</i> elektroda busi terhadap SFC, torsi dan daya.....	22
Gambar 2.14 Tingkat emisi gas rumah kaca dari berbagai bahan bakar	23
Gambar 2.15 Perbandingan emisi gas CO dan HC bahan bakar bensin dengan bahan bakar LPG.....	23
Gambar 2.16 Pengaruh sudut pengapian terhadap emisi CO, CO ₂ , HC dan m_f ...	25
Gambar 2.17 Pengaruh AFR (λ) terhadap emisi CO, CO ₂ , HC dan m_f	26
Gambar 2.18 Pengaruh <i>gap</i> elektroda busi terhadap emisi CO, CO ₂ , HC dan m_f 27	27
Gambar 2.19 Nilai emisi CO dan HC pada variasi putaran mesin bahan bakar LPG dan premium	27
Gambar 2.20 Proses pembakaran pada mesin bensin	28
Gambar 2.21 Konstruksi busi	30

Gambar 2.22 <i>Gap</i> elektroda busi.....	31
Gambar 2.23 <i>Gap</i> elektroda busi dan area perambatan api	32
Gambar 2.24 Perbandingan pertumbuhan nyala api pada jarak celah 1,0 mm, 1,2 mm dan 1,4 mm pada rasio kesetaraan stokiometri (ϕ) = 1	33
Gambar 2.25 Pengaruh <i>gap</i> elektroda busi terhadap variasi rasio kesetaraan bahan bakar (ϕ) pada waktu 6 ms	34
Gambar 2.26 Perkembangan area karnel api terhadap fungsi waktu pada <i>gap</i> elektroda busi 1, 1,2 dan 1,4 mm dengan variasi rasio kesetaraan bahan bakar- udara.....	35
Gambar 2.27 Pengaruh <i>gap</i> elektroda busi terhadap IMEP dengan variabel rasio kesetaraan bahan bakar-udara	36
Gambar 2.28 Pengaruh jarak <i>gap</i> elektroda busi terhadap nilai emisi HC dengan variabel kesetaraan bahan bakar-udara	37
Gambar 2.29 Pengaruh tekanan injeksi dan <i>gap</i> elektroda busi terhadap perkembangan api	38
Gambar 2.30 Pengaruh <i>gap</i> elektroda busi terhadap nilai torsi dan daya pada variasi putaran mesin dan sudut pengapian 10° dan 15° BTDC	39
Gambar 2.31 Pengaruh jarak <i>gap</i> elektroda busi terhadap nilai bahan bakar spesifik dan nilai efisiensi termal pada variasi putaran mesin dan sudut pengapian 10° dan 15° BTDC	40
Gambar 2.32 Pengaruh beban terhadap BSFC.....	41
Gambar 2.33 Pengaruh beban terhadap BTE	42
Gambar 2.34 Pengaruh beban terhadap efisiensi volumetrik	42
Gambar 2.35 Emisi gas HC.....	43
Gambar 2.36 Emisi gas CO	44
Gambar 3.1 <i>Gap</i> elektroda busi.....	50
Gambar 3.2 Skema Instalasi converter kit	56
Gambar 3.3 Skema pengukuran voltase CDI AC.....	57
Gambar 3.4 Skema sensor tekanan intake dan exhaust ruang bakar	58
Gambar 4.1 Grafik pengaruh <i>gap</i> elektroda busi terhadap nilai torsi maksimum	64

Gambar 4.2 Grafik pengaruh <i>gap</i> elektroda busi terhadap nilai daya maksimum	65
Gambar 4.3 Grafik pengaruh <i>gap</i> elektroda busi terhadap nilai torsi dan daya maksimum	65
Gambar 4.4 Grafik nilai emisi gas CO (%) pada variasi <i>gap</i> elektroda busi	69
Gambar 4.5 Grafik nilai emisi HC (ppm) pada variasi <i>gap</i> elektroda busi	71
Gambar 4.6 Grafik nilai emisi gas CO ₂ (%) pada variasi <i>gap</i> elektroda busi	74
Gambar 4.7 Grafik nilai emisi gas O ₂ (%) pada variasi <i>gap</i> elektroda busi	76
Gambar 4.8 Grafik laju aliran massa bahan bakar pada variasi jarak <i>gap</i> elektroda busi	77

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Spesifikasi LPG PT Pertamina Indonesia.....	11
Tabel 2.2 Perbandingan properti bahan bakar LPG, Bensin, Diesel dan CNG...	13
Tabel 2.3 Perbandingan properti bahan bakar <i>Natural Gas</i> , <i>Propane</i> dan <i>Gasoline</i>	14
Tabel 3.1 Pengambilan data pengujian emisi gas buang	55
Tabel 3.2 Pengambilan data pengujian konsumsi bahan bakar	55
Tabel 3.3 Pengambilan data pengujian dyno test	55
Tabel 4.1 Hasil rata-rata pengujian torsi dan daya maksimum	64
Tabel 4.2 Nilai rata-rata emisi gas CO (%)	68
Tabel 4.3 Nilai rata-rata emisi gas HC (ppm)	71
Tabel 4.4 Nilai rata-rata gas CO ₂ (%)	73
Tabel 4.5 Nilai rata-rata gas O ₂ (%)	75
Tabel 4.6 Laju aliran massa bahan bakar terhadap putaran mesin (gr/s).....	77

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran A. Tabel Data Pengujian Emisi Gas Buang.....	86
Lampiran A.1 Tabel hasil rata-rata pengujian emisi gas buang 3000 rpm bahan bakar LPG	86
Lampiran A.2 Tabel hasil rata-rata pengujian emisi gas buang 4000 rpm bahan bakar LPG	87
Lampiran A.3 Tabel hasil rata-rata pengujian emisi gas buang 5000 rpm bahan bakar LPG	88
Lampiran A.4 Tabel hasil rata-rata pengujian emisi gas buang 6000 rpm bahan bakar LPG	89
Lampiran A.5 Tabel hasil rata-rata pengujian emisi gas buang 7000 rpm bahan bakar LPG	90
Lampiran A.6 Tabel hasil rata-rata pengujian emisi gas buang bahan bakar Premium	91
 Lampiran B. Tabel Data Pengujian Laju Aliran Massa Bahan Bakar	 92
Lampiran B.1 Tabel hasil rata-rata pengujian laju aliran massa bahan bakar LPG dengan massa 20 gram pada putaran mesin 3000 rpm	92
Lampiran B.2 Tabel hasil rata-rata pengujian laju aliran massa bahan bakar LPG dengan massa 20 gram pada putaran mesin 4000 rpm	93
Lampiran B.3 Tabel hasil rata-rata pengujian laju aliran massa bahan bakar LPG dengan massa 20 gram pada putaran mesin 5000 rpm	94
Lampiran B.4 Tabel hasil rata-rata pengujian laju aliran massa bahan bakar LPG dengan massa 20 gram pada putaran mesin 6000 rpm	95
Lampiran B.5 Tabel hasil rata-rata pengujian laju aliran massa bahan bakar LPG dengan massa 20 gram pada putaran mesin 7000 rpm	96
Lampiran B.6 Tabel hasil rata-rata pengujian laju aliran massa bahan bakar Premium dengan massa 20 gram pada celah elektroda busi 0,7 mm	97

Lampiran C. Data Pengujian Torsi dan Daya Maksimum	98
Lampiran C.1 Tabel hasil pengujian torsi dan daya maksimum	98
Lampiran C.2 Gambar data hasil pengujian <i>dynotest</i>	99
Lampiran D. Perhitungan	107
Lampiran E. Data dan Gambar Kalibrasi Sensor	108
Lampiran E.1 Tabel data kalibrasi sensor 1 <i>exhaust</i>	108
Lampiran E.2 Grafik kalibrasi sensor 1 <i>exhaust</i>	108
Lampiran E.3 Tabel data kalibrasi sensor 2 <i>intake</i>	109
Lampiran E.4 Grafik kalibrasi sensor 2 <i>intake</i>	109
Lampiran E.5 Gambar kalibrasi sensor tekanan	110
Lampiran E.6 Gambar pengujian sensor tekanan.....	110
Lampiran F. Gambar Proses Pengujian Daya dan Torsi.....	111
Lampiran F.1 Gambar alat uji <i>Dynotest</i>	111
Lampiran F.2 Gambar Pengambilan data <i>Dynotest</i>	112
Lampiran F.3 Gambar pengambilan data voltase input koil	112
Lampiran G. Gambar Proses Emisi Gas Buang.....	113
Lampiran G.1 Gambar alat uji <i>Gas Analyzer</i>	113
Lampiran G.2 Gambar pengujian emisi gas buang	113
Lampiran H. Gambar Proses Pengujian Konsumsi Bahan Bakar	114
Lampiran H.1 Pengujian konsumsi bahan bakar	114
Lampiran H.2 Penimbangan uji konsumsi bahan bakar LPG	114
Lampiran I. Gambar Alat dan Bahan Penelitian	115
Lampiran I.1 Gambar skema <i>converter kit</i>	115
Lampiran I.2 Gambar alat dan bahan penelitian.....	117

Lampiran J. Gambar Spesifikasi Busi	118
Lampiran J.1 Gambar busi sebelum dilakukan pengujian	118
Lampiran J.2 Gambar busi sesudah dilakukan pengujian.....	118
Lampiran J.3 Gambar spesifikasi Busi NGK.....	119



BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan jumlah kendaraan yang terus meningkat tiap tahun berpengaruh terhadap peningkatan kebutuhan bahan bakar minyak (BMM) di Indonesia. Dilihat dari data Badan Pusat Statistik (2016) pada tahun 2012 sampai 2013, jumlah kendaraan mengalami kenaikan sebesar 9.745.645 unit, jumlah kendaraan akan terus meningkat seiring bertambahnya tahun. Berdasarkan dari data *PB Statistikal Review* (2016), pada tahun 2015 Indonesia menempati posisi 14 dunia didalam konsumsi minyak bumi dengan pemakaian sebesar 1,628 juta barrel minyak per hari, sedangkan produksi minyak di Indonesia hanya 825 ribu barrel per hari. Karena produksi dalam negeri tidak dapat lagi memenuhi permintaan pasar yang semakin meningkat dan diikuti dengan harga minyak yang semakin tinggi, sehingga pemerintah melakukan impor minyak dengan memberikan subsidi BBM kepada masyarakat. Dilihat dari sisi lain, cadangan bahan bakar gas sebagai bahan bakar alternatif masih cukup tersedia. Dari data *BP Statistical Review* (2016) menyebutkan bahwa cadangan gas bumi di Indonesia tahun 2015 mencapai 2,8 TCM, dengan nilai produksi sebesar 75 BCM (sekitar 2,68 % dari total cadangan gas bumi), sedangkan konsumsi gas di Indonesia hanya 39,7 BCM, sehingga sangat disayangkan jika keberadaan gas di Indonesia kurang dimanfaatkan dengan baik.

Jumlah kendaraan yang semakin meningkat juga berdampak pada peningkatan polusi udara dan gas rumah kaca (GRK) di sebagian besar negara di dunia. Polusi udara yang berbahaya bagi kesehatan manusia seperti senyawa hidrokarbon (HC), oksida nitrogen (NO_x), karbon monoksida (CO) dan *particulate matter* (PM) berasal dari kendaraan bermotor (Esteves dan Barbosa, 2007). Tingginya emisi gas buang pada kendaraan bermotor disebabkan oleh kurang sempurnanya proses pembakaran di dalam silinder, sehingga dihasilkan gas dan partikel sisa pembakaran atau emisi gas buang yang mengandung unsur polutan yang berbahaya bagi kesehatan (Sriyanto dkk., 2010). Dari permasalahan tersebut maka diperlukan terobosan baru yakni adanya penelitian dengan hasil mesin

kendaraan bermotor yang efisien sehingga dapat mengantisipasi terjadinya polusi udara secara berkelanjutan.

Liqueid Petroleum Gas (LPG) adalah salah satu bahan bakar gas alternatif pengganti bahan bakar minyak untuk kendaraan bermotor di Indonesia. Ketersediaan gas LPG produksi PT Pertamina Indonesia ukuran 3 kg dan 12 kg yang banyak tersebar di seluruh wilayah menjadi salah satu solusi untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar transportasi yang saat ini masih menggunakan bahan bakar minyak bumi (Setiyo, 2013). LPG memiliki nilai oktan lebih tinggi (105-112) dibandingkan dengan bensin (91-97), yang memungkinkan untuk digunakan pada rasio kompresi yang lebih tinggi sehingga dapat meningkatkan efisiensi termal mesin (Kalra dkk., 2014). 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 volumenya lebih rendah (IEA ETSAP, 2010). LPG merupakan bahan bakar gas yang memiliki efek gas rumah kaca terkecil dibandingkan dengan bahan bakar minyak maupun gas lainnya (Anyon, 2013). LPG juga memiliki gas buang yang ramah lingkungan (Arijianto dan Usman, 2015). Setiyo dan Condro (2012) meneliti kadar CO dan HC pada gas LPG dengan penyetelan *converter kits* dan saat pengapian, hasil penelitiannya menunjukkan penurunan gas CO hingga 80,6 % dan HC 37,2 %. Arijianto dan Usman (2015) melakukan penelitian menggunakan bahan bakar gas LPG dengan sistem injeksi, dari komposisi gas yang dihasilkan terjadi pengurangan gas CO 15 % , gas CO₂ 25 % dan HC 50%. Romandoni dan Siregar (2012) dalam penelitiannya menggunakan bahan bakar LPG pada motor Honda Vario 110 cc tahun 2010, hasil yang diperoleh dapat menurunkan kadar CO sebesar 99,56 % pada putaran 5500 rpm, CO₂ sebesar 55,72 % pada putaran 3500 rpm dan HC sebesar 77,67 % pada putaran 5500 rpm, sedangkan konsentersasi O₂ mengalami peningkatan sebesar 83,65% pada putaran 7500 rpm. LPG merupakan bahan bakar yang ekonomis dan hemat energi. Anton (2013) dalam penelitiannya menggunakan coverter kit *dual fuel* pada motor 150 cc bahan bakar LPG, hasil penelitian menunjukkan penurunan konsumsi bahan bakar bahan bakar LPG mencapai 14,93 % dari bahan bakar premium. Romandoni dan Siregar (2012) juga melakukan

perbandingan konsumsi bahan bakar premium dan LPG, hasil yang diperoleh terjadi penurunan konsumsi bahan bakar LPG tertinggi mencapai 29,03 % pada putaran 6000 rpm. Arijianto dan Usman (2015) melakukan penelitian menggunakan bahan bakar gas LPG dengan system injeksi, hasilnya terjadi penghematan bahan bakar sampai 50%. Salah satu kelemahan dari bahan bakar LPG adalah daya *output* yang rendah karena efisiensi volumetriknya yang rendah. Penurunan daya sekitar 5 % - 10 % lebih rendah dari mesin bensin (Cewis dan Yuksel, 2005). Salah satu metode alternatif untuk meningkatkan daya mesin akibat rendahnya efisiensi volumetrik yaitu dengan meningkatkan rasio kompresi (CR) maupun menerapkan *turbocharger* atau *supercharger* (Sulaiman dkk., 2013). Willard (1985) menyebutkan bahwa daya mesin dapat ditingkatkan dengan penyesuaian sistem pengapian dan kualitas sistem pengapian.

Variabel oprasi utama yang mempengaruhi performa mesin, efisiensi dan emisi mesin *Spark Ignition* (SI) pada setiap beban dan kecepatan yang diberikan adalah tekanan kompresi, waktu percikan bunga api, rasio bahan bakar / udara atau udara / bahan bakar relatif terhadap rasio stokiometri, tegangan pengapian, kualitas bahan bakar, emisi spesifik dan indeks emisi (Heywood, 1998; Heywood dan Bandvadeker, 2004). Parameter yang digunakan untuk mengetahui performa mesin yaitu daya, torsi, konsumsi bahan bakar dan emisi gas buang. Busi merupakan salah satu komponen pendukung dalam sistem pengapian. Sistem pengapian (bunga api busi) yang kuat dan akurat mampu membakar campuran bahan bakar secara sempurna dan tepat pada waktu yang dibutuhkan sehingga dihasilkan *output* tenaga mesin yang optimal dengan penggunaan bahan bakar yang efisien dan memungkinkan untuk menghasilkan emisi gas buang yang rendah (Sriyanto dkk., 2010). Salah satu yang mempengaruhi besarnya energi pengapian adalah jarak keregangan celah elektroda busi (Joshi dkk., 2015). Nuramal dan Suryono (2014) meneliti tentang pengaruh jarak keregangan celah elektroda busi terhadap performa botor bakar honda GX-160 dengan campuran bensin dan alkohol, pada jarak celah elektroda busi 0,7 – 0,8 mm menghasilkan nilai daya, torsi dan sfc yang paling optimal. Markus (2013) menyimpulkan bahwa daya dan torsi yang paling optimal terjadi pada jarak celah elektroda busi 0,7 mm pada motor 4 langkah berbahan bakar

bensin. Machmud dan Irwan (2011) memvariasikan celah elektroda busi dengan motor 4 langkah berbahan bakar bensin, dalam penelitiannya didapatkan nilai daya dan torsi tertinggi terjadi pada jarak elektroda busi 0,6 mm, sedangkan nilai tertinggi untuk tekanan efektif rata-rata terjadi pada putaran 8000 rpm dengan jarak elektroda busi 0,8 mm. Joshi dkk. (2015) melakukan penelitian tentang pengaruh rasio kompresi dan energi pengapian pada kinerja dan emisi gas buang mesin SI 4 langkah berbahan bakar biogas, dalam penelitian disimpulkan bahwa dengan menggunakan energi pengapian koil 60 mJ dan jarak keregangan celah elektroda busi 0,6 mm dan 0,8 mm dapat meningkatkan kinerja dan emisi gas buang mesin berbahan bakar biogas. Ogola dan Korir (2010) melakukan penelitian tentang performa dan emisi gas buang mesin mobil berbahan bakar gas LPG dengan memvariasikan sudut pengapian, lamda dan variasi jarak elektroda busi, hasil dari penelitian ini didapatkan kecepatan optimal 2.839 rpm, pada sudut pengapian 16° BTDC, lamda 1,05 dan jarak elektroda busi 0,8 mm memberi nilai SFC optimal 368 g/ kWh, torsi maksimum 179 Nm, CO 4,4 %, CO₂ 10,9 % dan HC 433 PPM.

Dari latar belakang tersebut, dalam penelitian kali ini peneliti ingin mengetahui lebih lanjut tentang pengaruh *gap* elektroda busi terhadap kinerja motor bakar 4 langkah berbahan bakar LPG.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh variasi *gap* elektroda busi terhadap nilai torsi dan daya motor bakar 4 langkah berbahan bakar LPG?
2. Bagaimana pengaruh variasi *gap* elektroda busi terhadap emisi gas buang (CO, HC, CO₂ dan O₂) motor bakar 4 langkah berbahan bakar LPG?
3. Bagaimana pengaruh variasi *gap* elektroda busi terhadap laju aliran massa bahan bakar motor bakar 4 langkah berbahan bakar LPG?

1.3 Tujuan

1. Menentukan *gap* elektroda busi yang paling efektif terhadap nilai torsi dan daya motor bakar 4 langkah berbahan bakar LPG.
2. Menentukan *gap* elektroda busi yang paling efektif terhadap penurunan nilai emisi gas buang (CO, HC, CO₂ dan O₂) motor bakar 4 langkah berbahan bakar LPG.
3. Menentukan *gap* elektroda busi yang paling efisien terhadap laju aliran bahan bakar motor bakar 4 langkah berbahan bakar LPG.

1.4 Batasan Masalah

Untuk memperjelas, menyederhanakan dan menghindari meluasnya masalah maka diberi batasan-batasan sebagai berikut:

1. Kandungan LPG produksi PT Pertamina Indonesia dengan kemasan 3 kg dianggap sama yaitu terdiri dari 50 % propana dan 50 % butana.
2. Semua alat dan bahan dalam penelitian ini sesuai dengan standart dan dalam keadaan normal.
3. Tekanan dan suhu udara di lingkungan dianggap tetap dalam setiap percobaan.
4. Performa busi dianggap tetap saat dilakukan beberapa kali pengujian.
5. Busi yang digunakan dalam penelitian ini yaitu merk NGK C7HSA.
6. Sudut pengapian dan celah elektroda busi yang digunakan yaitu 18 °BTDC dengan celah 0,6 mm, 0,7 mm, 0,8 mm dan 0,9 mm untuk bahan bakar LPG sedangkan untuk bahan bakar premium menggunakan 15 °BTDC dengan celah 0,7 mm.
7. Arus listrik dari koil yang masuk ke busi dianggap tetap dalam setiap percobaan.
8. Rasio udara dan bahan bakar (AFR) dianggap tetap dalam setiap pengujian
9. Hanya meneliti emisi gas buang (CO, HC, CO₂ dan O₂)

1.5 Manfaat

1. Pembaca dapat mengetahui dan memahami pengaruh *gap* elektroda busi terhadap kinerja motor bakar 4 langkah berbahan bakar LPG baik dilihat dari nilai torsi dan daya, emisi gas buang (CO, HC, CO₂ dan O₂) dan laju aliran konsumsi bahan bakar.
2. Menambah pengetahuan kepada masyarakat tentang pengaturan *gap* elektroda busi yang efektif dan efisien, sehingga dapat meminimalisir dampak dari emisi gas buang yang berbahaya bagi lingkungan maupun kesehatan masyarakat.
3. Mampu meningkatkan kualitas ilmu pengetahuan dan sebagai pertimbangan penelitian selanjutnya guna meningkatkan kualitas ilmu pengetahuan dan teknologi yang berkembang saat ini.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Minyak dan Gas Indonesia

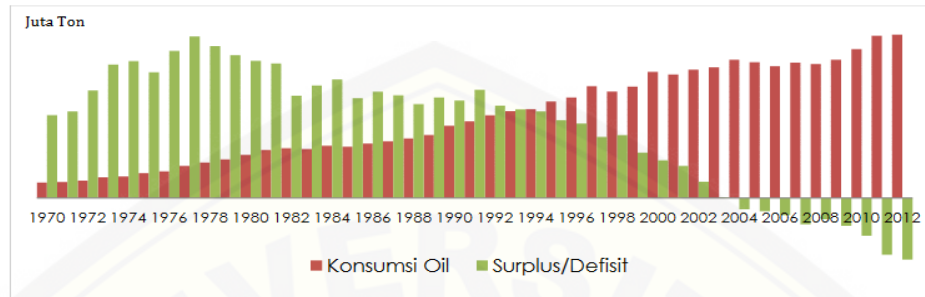
Pertumbuhan jumlah kendaraan yang terus meningkat tiap tahun mempengaruhi peningkatan jumlah kebutuhan bahan bakar minyak (BMM) di Indonesia. Dari data Badan Pusat Statistik (BPS) tahun 2016 menyebutkan jumlah kendaraan di Indonesia baik mobil penumpang, bis, truk dan sepeda motor mengalami peningkatan seiring bertambahnya tahun. Dilihat dari gambar 2.1, rata – rata kenaikan jumlah kendaraan di Indonesia pada tahun 2010 sampai tahun 2013 mencapai 9.195.581 unit dan peningkatan jumlah kendaraan terbanyak didominasi oleh kendaraan sepeda motor yang mencapai 7.884.821 unit tiap tahun.

Tahun	Mobil Penumpang	Bis	Truk	Sepeda Motor	Jumlah
2000	3038913	666280	1707134	13563017	18975344
2001	3189319	680550	1777293	15275073	20922235
2002	3403433	714222	1865398	17002130	22985183
2003	3792510	798079	2047022	19976376	26613987
2004	4231901	933251	2315781	23061021	30541954
2005	5076230	1110255	2875116	28531831	37623432
2006	6035291	1350047	3398956	32528758	43313052
2007	6877229	1736087	4234236	41955128	54802680
2008	7489852	2059187	4452343	47683681	61685063
2009	7910407	2160973	4452343	52767093	67336644
2010	8891041	2250109	4687789	61078188	76907127
2011	9548866	2254406	4958738	68839341	85601351
2012	10432259	2273821	5286061	76381183	94373324
2013	11 484 514	2 286 309	5 615 494	84 732 652	104 118 969

Gambar 2.1 Perkembangan jumlah kendaraan bermotor tahun 2000 sampai 2013
(Sumber: Badan Pusat Statistik (BPS) Indonesia, 2016)

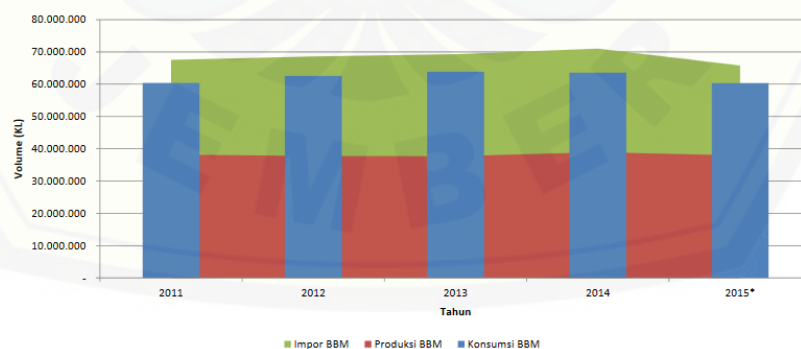
Indonesia merupakan salah satu negara sumber produksi minyak mentah di dunia. Indonesia menempati posisi ke-24 sebagai negara produsen minyak mentah dari 53 negara di dunia, sedangkan di asia pasifik, Indonesia menempati posisi ke-2 setelah China. Pada gambar 2.2 menyebutkan penurunan kinerja produksi dengan peningkatan konsumsi minyak bumi tiap tahun, sehingga pada akhirnya Indonesia

mengalami defisit minyak pada tahun 2004 sekitar 5 juta ton (Nasir, 2014). Keadaan tersebut membuat Indonesia harus impor balik minyak mentah maupun hasil olahan minyak bumi ke negara lain.



Gambar 2.2 Konsumsi dan devisa minyak Indonesia (Sumber: PB *Statistical Review*, 2013)

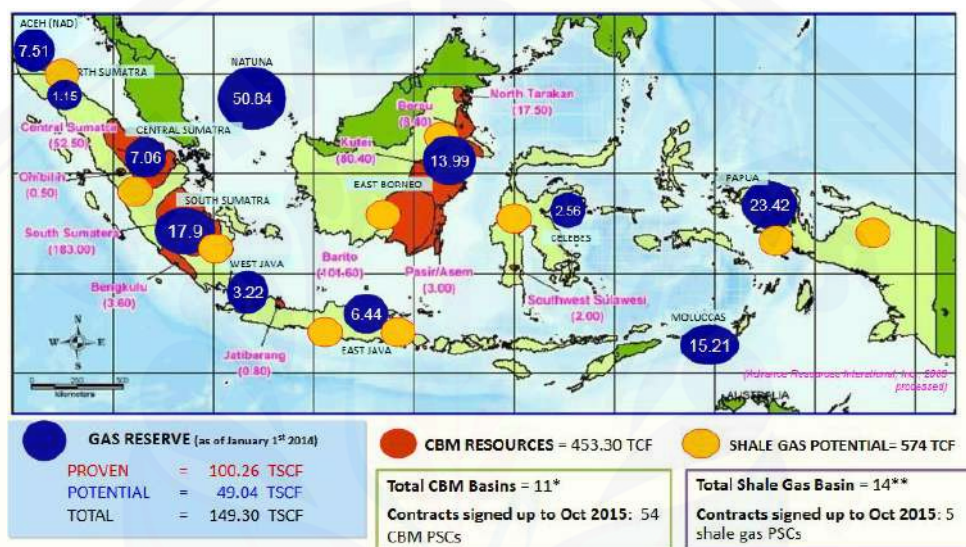
Berdasarkan data *BP Statistical Review* (2016), pada tahun 2015 Indonesia menempati posisi 14 dunia didalam hal konsumsi minyak bumi dengan pemakaian sebesar 1,628 juta barrel minyak per hari, sedangkan produksi minyak Indonesia hanya 825 ribu barrel per hari. Dilihat dari data BPS tahun 2016 pada gambar 2.3, menyebutkan kebutuhan masyarakat Indonesia akan bahan bakar minyak bumi lebih dari 60.000.000 kiloliter per tahun, sedangkan rata-rata nilai produksi minyak bumi di Indonesia pada tahun 2011 sampai 2015 hanya mencapai 38.113.319 kiloliter per tahun, sehingga untuk memenuhi kekurangan tersebut, pemerintah melakukan impor minyak bumi sebesar ±30.000.000 kiloliter pertahun.



Tahun	2011	2012	2013	2014	2015*
Penjualan BBM (KL)	60,381,564	62,546,988	63,860,204	63,598,040	60,320,430
Impor BBM (KL)	29,333,166	30,849,979	31,629,547	32,079,786	27,858,945
Produksi (KL)	38,231,601	37,759,611	37,693,887	38,950,478	37,931,019
	67,564,767	68,609,590	69,323,434	71,030,265	65,789,964

Gambar 2.3 Volume produksi dan konsumsi BBM di Indonesia (Sumber: Kementerian ESDM Republik Indonesia, 2016)

Dilihat dari sisi lain, Indonesia mempunyai cadangan gas yang cukup besar. Dari data kementerian ESDM tahun 2016 (pada gambar 2.4), total cadangan gas di Indonesia pada tahun 2014 mencapai 149,30 TSCF. Dari data PB *Statistical Review* (2016) menyebutkan cadangan gas bumi di Indonesia tahun 2015 mencapai 2,8 TCM, dengan nilai produksi sebesar 75 BCM (sekitar 2,68 % dari total cadangan gas bumi), sedangkan konsumsi gas bumi di Indonesia hanya 39,7 BCM, sehingga sisa produksi gas di Indonesia di ekspor ke luar.



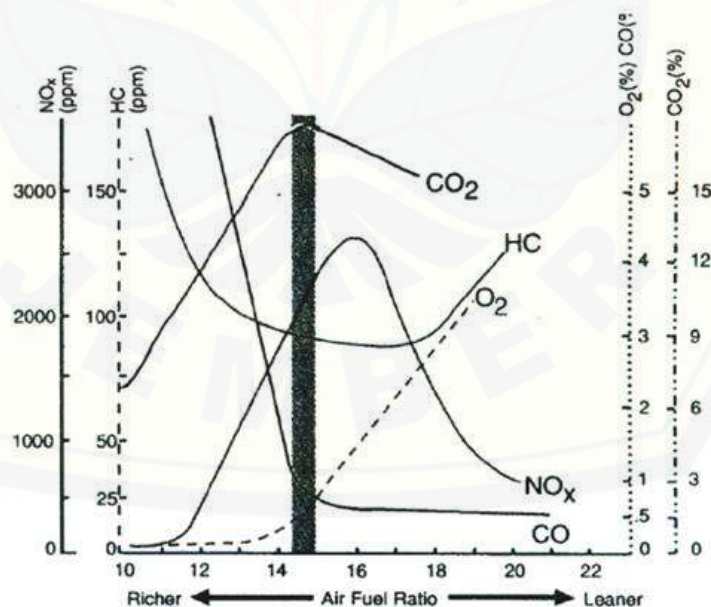
Gambar 2.4 Cadangan gas Indonesia

(Sumber: Kementerian ESDM Republik Indonesia, 2016)

2.2 Polusi Udara

Jumlah kendaraan yang semakin meningkat tiap tahun berpengaruh terhadap peningkatan polusi udara dan gas rumah kaca (GRK) di sebagian besar negara di dunia. Pembakaran sempurna kendaraan bermotor akan selalu membentuk karbon dioksida (CO_2) dan uap air (H_2O) yang tidak berbahaya bagi kesehatan manusia, tetapi pada kenyataannya pembakaran sempurna sangat sulit didapatkan. Polusi udara yang berbahaya bagi kesehatan manusia seperti hidrokarbon (HC), oksida nitrogen (NO_x), karbon monoksida (CO) dan *particulate matter* (PM) berasal dari proses pembakaran yang tidak sempurna (Esteves dan Barbosa, 2007). Tingginya emisi gas buang pada kendaraan bermotor disebabkan

oleh kurang sempurnanya proses pembakaran di dalam silinder, sehingga dihasilkan gas dan partikel sisa pembakaran atau emisi gas buang yang mengandung unsur polutan yang berbahaya bagi kesehatan (Sriyanto dkk., 2010). Pada gambar 2.5 menunjukkan kurva kadar emisi yang ditimbulkan berdasarkan rasio udara – bahan bakar (AFR) mesin *spark ignition* (SI). Dalam kondisi kaya, kekurangan gas oksigen pada percampuran bahan bakar dan udara menghasilkan kadar konsentrasi hidrokarbon (HC) dan karbon monoksida (CO) yang tinggi, hal tersebut terjadi karena tidak adanya proses oksidasi sehingga terjadi proses pembakaran yang tidak sempurna. Gas CO merupakan produk dari hasil pembakaran miskin yang didominasi dengan waktu pembakaran yang kurang tepat dan temperatur yang rendah. Presentasi kadar CO meningkat dalam keadaan stasioner, sedangkan konsentrasi CO rendah pada saat kecepatan konstan, karena CO dapat diubah menjadi CO₂ dengan oksidasi. Udara mengandung 78 % gas nitrogen, polutan NO_x pada gas buang dihasilkan akibat pembakaran dengan temperatur tinggi diatas 1800 °C, karena gas nitrogen akan bereaksi dengan oksigen pada saat pembakaran (Aditya dan Arijanto, 2012)



Gambar 2.5 Kurva kadar emisi gas buang rasio udara – bahan bakar (AFR) Spark Ignition Engine (SI Engine) (Sumber: Guzzela and Onder, 2004)

2.3 Karakteristik *Liquefied Petroleum Gas (LPG)*

Liquefied Petroleum Gas (LPG) merupakan gas minyak bumi yang dicairkan dengan menambah tekanan dan menurunkan suhunya, LPG merupakan hasil dari pemurnian gas alam dan gas yang dihasilkan selama penyulingan minyak mentah. Pundkar dkk. (2012) menyebutkan bahwa 55 % gas LPG berasal dari pemurnian gas alam dan 45 % berasal dari penyulingan minyak mentah. Komponen utama dari LPG adalah gas propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}), LPG juga mengandung hidrokarbon lain dalam jumlah kecil yaitu etana (C_2H_6) dan pentana (C_5H_{12}) (Brevit, 2012). Pada table 2.1 merupakan spesifikasi komposisi campuran LPG dipasaran produksi PT Pertamina Indonesia mengandung 50 % propana dan 50 % butana dengan penambahan zat mercaptan untuk memberikan bau khas sehingga dapat dideteksi dengan cepat ketika terjadi kebocoran gas. LPG PT Pertamina Indonesia menyediakan tabung kemasan ukuran 3 kg, 6 kg, 12 kg dan 50 kg.

Tabel 2.1 Spesifikasi LPG PT Pertamina Indonesia

LPG Mixture specification

	Min	Max	Method
Spesific Gravity at 60/60 °F	to be reported	to be reported	ASTM D-1657
Vapour Pressure 100 °F, psig	-	120	ASTM D-1267
Weathering Test 36 °E, % vol	95	-	ASTM D-1837
Copper Corrosion, thr, 100 °F	-	ASTM No. 1	ASTM D-1837
Total Sulfur, gr/100 cuft	-	15	ASTM D-784
Water Content	No Free Water	No Free Water	Visual
Composition:			
• C1 % vol		0.2	ASTM D-2163
• C3 & C4 % vol	97.5		
• C5 & heavier % vol		2.0	
Ethyl or Buihyl. MI/1000 AG	50	50	
Mercaptan Added			

LPG Propane specification

	Min	Max	Method
Spesific Gravity at 60/60 °F		to be reported	ASTM D-1657
Vapour Pressure 100 °F, psig	-	210	ASTM D-1267
Weathering Test 36 °E,% vol	95	-	ASTM D-1837
Copper Corrosion, thr, 100 °F	-	ASTM No. 1	ASTM D-1838
Total Sulfur, gr/100 cuft		15	ASTM D-784
Water Content	-	No Free Water	Visual
Composition:			
• C3 Total % vol			ASTM D-2163
• C4 & heavier % vol	95	2.5	
Ethyl or Buihyl. MI/1000 AG			
Mercaptan Added	50		

LPG Butane Specification

	Min	Max	Method
Spesific Gravity at 60/60 °F	-	to be reported	ASTM D-1657
Vapour Pressure 100 °F, psig	-	70	ASTM D-1267
Weathering Test 36 °E,% vol	95	-	ASTM D-1837
Copper Corrosion, thr, 100 °F	-	ASTM No. 1	ASTM D-1838
Total Sulfur, gr/100 cuft		15	ASTM D-784
Water Content	-	No Free Water	Visual
Composition:			
• C4 % vol			ASTM D-2163
• C5 % vol	97.5	2.5	
• C6 & heavier % vol			
Ethyl or Buihyl. ml/1000 AG	Nil		
Mercaptan Added	50		

(Sumber: [//www.pertamina.com/index.php/detail/read/liquefied-petroleum-gas#](http://www.pertamina.com/index.php/detail/read/liquefied-petroleum-gas#))

LPG pada umumnya memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan mesin bensin, salahsatunya karakteristik pembakaran yang efisien yang dapat digunakan untuk bahan bakar alternatif kendaraan transportasi. LPG memiliki nilai oktan lebih tinggi (105-112) dibandingkan dengan bensin (91-97), yang memungkinkan untuk digunakan pada rasio kompresi yang lebih tinggi sehingga dapat meningkatkan efisiensi termal mesin (Kalra dkk, 2004). Nilai oktan bahan bakar menunjukkan bagaimana perambatan bahan bakar akan menolak pra-ignition sebelum penyalaan bunga api busi. bahan bakar yang memiliki nilai oktan lebih

tinggi dapat dibakar pada rasio kompresi (CR) lebih tinggi. Bahan bakar yang memiliki CR lebih tinggi menunjukkan seberapa besar tekanan yang diberikan sebelum bahan bakar tersebar secara spontan, semakin tinggi nilai oktan maka bahan bakar lebih lambat terbakar sehingga dapat meningkatkan *output* daya mesin dan tidak meninggalkan residu yang dapat mengganggu kinerja mesin maupun terjadi *destructive knocking* (Pudkar dkk., 2012). LPG memiliki kandungan energi persatuan massa lebih tinggi dari bahan bakar bensin, tetapi untuk kandungan energi persatuan volumenya lebih rendah. 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 (IEA ETSAP, 2010)

Tabel 2.2 Perbandingan properti bahan bakar LPG, Bensin, Diesel dan CNG

No	Properti / Bahan bakar	Gasoline	Diesel	LPG	CNG
1	Struktur Kimia	$C_8H_{18}/ C_4 - C_{12}$	$C_8 - C_{25}$	C_3H_8 dan C_4H_{10}	CH_4
2	Kepadatan Energi (<i>Energy density</i>)	109.000 – 125.000	128.000 – 130.000	84.000	35.000 @ 3.000
3	Nilai Oktan	86 – 94	8 – 15	105 +	120 +
4	<i>Lower Heating Value</i> (MJ/kg)	43,44	42,79	46,60	47,14
5	<i>High Heating Value</i> (MJ/kg)	46,53	45,76	50,15	52,20
6	<i>Stoichiometric air/fuel ratio (AFR)</i>	14,7	14,7	15,5	17,2
7	<i>Density at 15°C, kg/m³</i> <i>Autoignition</i>	737	820 – 950	1,85 / 505	0,78
8	<i>Temperature, K</i>	531	588	724	755 – 905
9	<i>Specific Gravity</i> 60°F/60°	0,72–0,78	0,508	0,85	0,424

(Sumber: Pundkar, 2012)

Tabel 2.3 Perbandingan properti bahan bakar *Natural Gas*, *Propane*, dan *Gasoline*

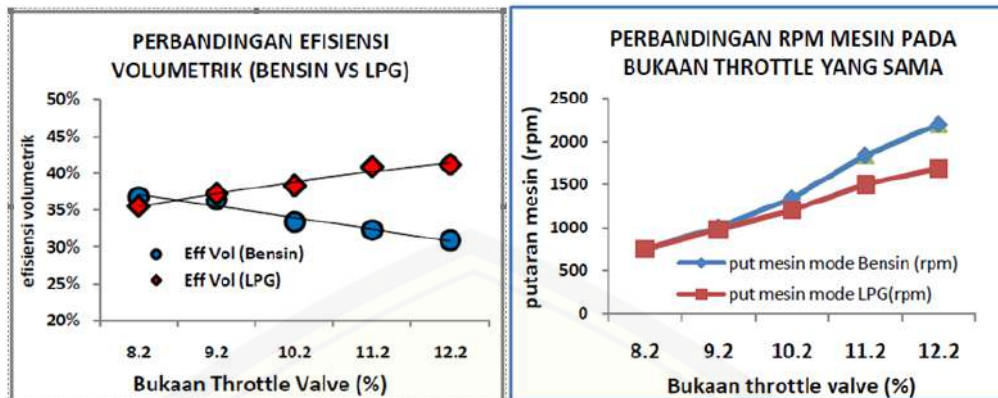
	Natural Gas (~Methane CH ₄)	Propane (C ₃ H ₈)	Gasoline
Molecular Weight	~18	44,10	~110
Energy Density (MJ/kg)	45	46,4	44,0
Energy Density (kJ/mol)	810	2002	4840
Stoichiometric AFR (by mass)	14,5	15,7	14,6
Stoichiometric AFR (by volume)	9,04	23,9	57,7
Energy in 1 mol Stoichiometric Fuel-Air Mixture	80,8	80,4	82,5
Gas Constant – R (kJ/kg K)	0,518	0,187	–
Density (kg/m ³) 0 °C and 1 atm	0,79	2,0	735
Laminar Flame Speed (m/s)	0,39	0,45	0,4
LFL (%) (by vol)	5,6	2,2	1,4
UFL (%) (by vol)	15	9,5	7,6
Lambda at LFL	1,9	1,9	1,2
Lambda at UFL	0,63	0,40	0,21
Auto Ignition Temperature (°C)	632	500	530
Min Ignition Energy (mJ)	0,33	0,30	0,8
Fuel Octane Rating (RON)	120	112	92-98
Fuel Octane Rating (MON)	120	97	80-90

(Sumber: William dkk., 2012)

William dkk., (2012) melakukan penelitian tentang visualisasi pengapian bahan bakar premium, propan, dan gas alam dengan pembakaran *turbulen jet ignition*. Dari penelitian yang dilakukan disebutkan bahwa stabilitas pembakaran dalam keadaan miskin menyebabkan kegagalan penyalaan dan menyebabkan lambatnya kecepatan nyala api laminar yang mempengaruhi stabilitas karnel api, sehingga menyebabkan peningkatan emisi HC dan CO. energi minimum (energi aktivasi) pada bahan bakar mempengaruhi kcepatan laju reaksi yang terjadi, energi aktifasi propan lebih rendah dibandingkan dengan gas alam, sehingga kecepatan laju reaksi pembakaran bahan bakar propan lebih cepat dari gas alam.

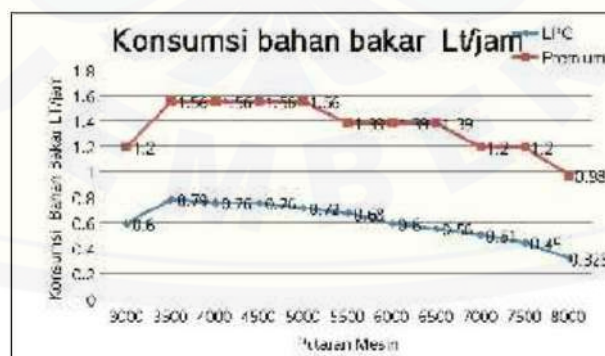
2.3.1 Daya dan Konsumsi Bahan Bakar LPG

Kelemahan pada mesin bahan bakar LPG pada umumnya menghasilkan daya yang lebih rendah daripada mesin bensin, penurunan daya yang terjadi sekitar 5% - 10% (Cewis dan Yuksel, 2005). Turunya efisiensi volumetrik pada bahan bakar LPG disebabkan karena pada suhu lingkungan fasa yang terjadi adalah uap sehingga tidak ada efek pendinginan, hal itu berdampak pada kurangnya kepadatan asupan, penurunan efisiensi volumetrik juga disebabkan karena volume bahan bakar yang dibutuhkan lebih besar dalam campuran asupan (Pourkhesalian dkk., 2009). Efisiensi volumetrik dapat ditingkatkan dengan menggunakan kontrol secara elektronik injeksi LPG cair sehingga rasio udara - bahan bakar dapat dikontrol yang dapat meningkatkan efisiensi pengisian asupan (Erkus dkk., 2013). Perbandingan volume LPG 15 % sampai 20 % lebih besar daripada bensin. Sehingga output daya yang dihasilkan berkurang 5 % sampai 10 % (Ceviz dan Yuksel, 2005). Hilangnya daya juga dapat diperoleh dengan meningkatkan rasio kompresi dan juga dengan menerapkan *supercharger* atau *turbocharger*. LPG memiliki kecepatan rambat api rendah daripada bensin, sehingga dapat di tingkatkan dengan memajukan waktu pengapian (Mustafa dan Briggs.,2009). Setiyo dan Purnomo (2014) melakukan investigasi penurunan daya mobil berbahan bakar gas LPG melalui pengukuran efisiensi volumetrik, pada gambar 2.6 menunjukkan efisiensi volumetrik LPG lebih meningkat dibandingkan dengan efisiensi volumetrik bensin yang mengalami penurunan dengan bukaan *throttle body* yang sama, pada efisiensi volumetrik yang meningkat bahan bakar LPG mengalami penurunan kecepatan putaran mesin dibandingkan dengan bensin, sehingga pada bukaan *throttle body* yang sama daya LPG yang dihasilkan mengalami penurunan (tanpa mengajukan saat pengapian).

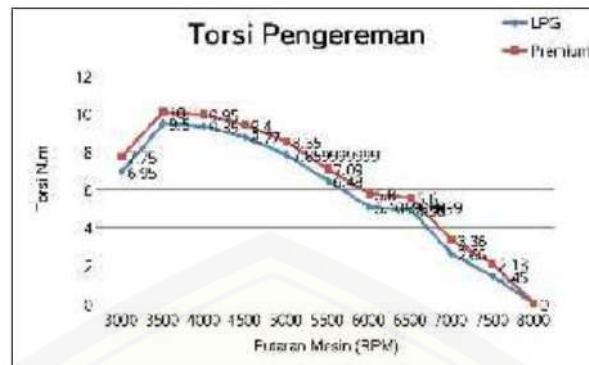


Gambar 2.6 Grafik perbandingan efisiensi volumetrik dan kecepatan mesin bahan bakar bensin dan LPG pada bukaan throttle body (Sumber: Setiyo dan Purnomo, 2014).

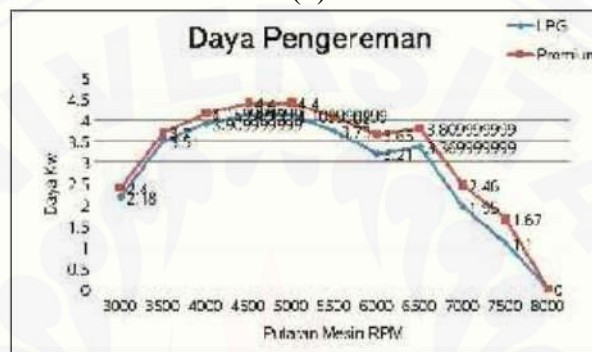
Arijianto dan Usman (2015) melakukan penelitian tentang penggunaan gas sebagai bahan bakar pada sepeda motor bermesin injeksi, dalam penelitiannya peneliti membandingkan antara bahan bakar LPG dengan bahan bakar premium dalam putaran 3000 rpm sampai 8000 rpm. Hasil pengujian dapat dilihat pada gambar 2.7, bahwa penggunaan mesin injeksi mampu menghemat bahan bakar LPG sampai dengan 50 % dibandingkan dengan bahan bakar premium. Pada grafik juga terlihat bahwa nilai torsi dan daya mesin LPG hanya 5% lebih rendah dari mesin berbahan bakar premium, sehingga dengan bahan bakar yang sama mesin berbahan bakar LPG akan mampu memberikan torsi dan daya mesin lebih tinggi dari bahan bakar bensin.



(a)



(b)

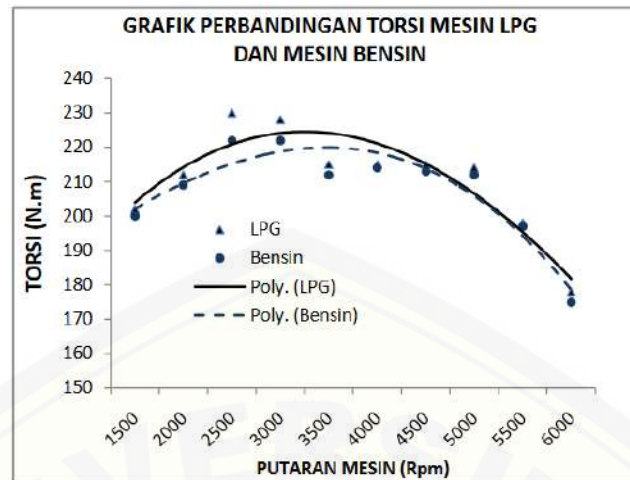


(c)

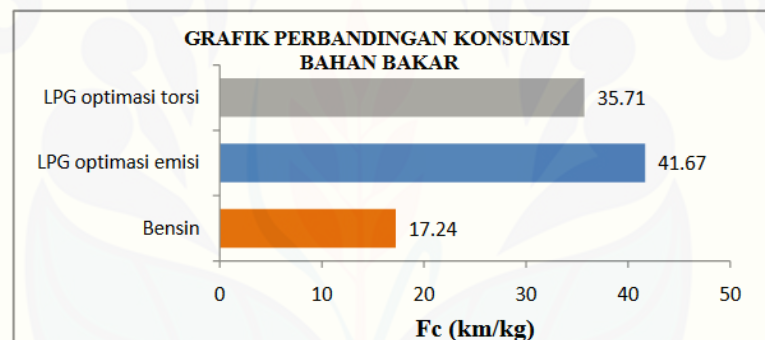
(a) konsumsi bahan bakar, (b) torsi dan (c) daya, dengan menggunakan mesin injeksi.

Gambar 2.7 Grafik perbandingan bahan bakar premium dan LPG (Sumber: Arijipto dan Usman, 2015)

Setiyo dan Condro (2012) melakukan pengujian untuk mengoptimasi pemanfaatan LPG sebagai bahan bakar kendaraan melalui penyetelan *converter kits* dan saat pengapian, dalam penelitian (pada gambar 2.8) dihasilkan torsi maksimum bahan bakar LPG sebesar 231,3 Nm pada bukaan katup aliran 40 %, penyetelan pegas lever pada 5,75 putaran dan saat pengapian 15 °BTDC, sedangkan dengan bahan bakar bensin sebesar 210 Nm. Dapat dilihat pada gambar 2.8, bahwa jarak tempuh per kilogram bahan bakar LPG lebih tinggi daripada bensin, penggunaan LPG dengan skala optimasi torsi menghasilkan 35,71 km/kg. sedangkan konsumsi bahan bakar premium menghasilkan 17,24 km/kg (ρ_{bensin} 0,76 kg/l).



Gambar 2.8 Perbandingan torsi terhadap putaran mesin bahan bakar LPG dan Bensin
(Sumber: Setiyo dan Condro, 2012)

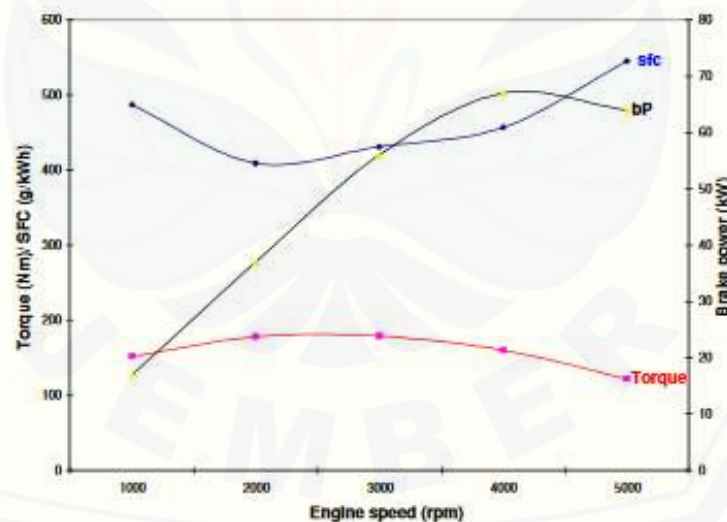


Gambar 2.9 Perbandingan bahan bakar dalam km/kg (Sumber: Setiyo dan Condro, 2012)

Ogola dan Korir (2010) melakukan penelitian tentang performa mesin dengan menggunakan mesin 4 silinder 2500 cc, daya output 110 kW pada 5400 rpm dan nilai torsi maksimum 220 Nm pada putaran mesin 3800 rpm. Pada gambar 2.10 merupakan grafik percobaan pengaruh putaran mesin terhadap nilai torsi, SFC dan daya pada putaran 1000 rpm sampai dengan 5000 rpm, dengan sudut pengapian 10° BTDC dan lamda (AFR) 0,95, didapatkan nilai daya yang meningkat dari 17 kW menjadi 67 kW pada putaran mesin 1000 rpm sampai 4000 rpm, di atas putaran 4000 rpm daya mengalami penurunan. Hal tersebut terjadi karena efisiensi volumetrik menurun seiring dengan peningkatan kecepatan karena kenaikan suhu, *valve timing* dan mekanisme katup. Torsi meningkat dengan kecepatan 2000 rpm sampai 3000 rpm setelah itu menurun seiring dengan peningkatan kecepatan. Nilai

konsumsi bahan bakar spesifik (SFC) pada putaran mesin 2000 rpm sampai 3000 rpm merupakan nilai yang ekonomis berdasar pada nilai daya yang dihasilkan sehingga pada titik tersebut merupakan nilai efisiensi termal maksimum. Pada kecepatan lebih dari 2000 rpm, nilai konsumsi bahan bakar spesifik akan terus meningkat seiring dengan penambahan energi yang diperlukan untuk mengatasi kekuatan gesekan yang berbanding lurus dengan kecepatan. *Output* daya maksimum terjadi pada putaran 4000 rpm sebesar 67 kW pada saat nilai daya sebesar 61%. Torsi maksimum terjadi pada putaran mesin 2500 rpm sebesar 180 Nm pada saat nilai daya 82,7 %.

Engine speed (rpm)	Engine performance parameters		
	Torque (Nm)	SFC (g/kWh)	Brake power (kW)
1000	152	487	17
2000	178	409	37
3000	179	431	56
4000	160	457	67
5000	122	545	64

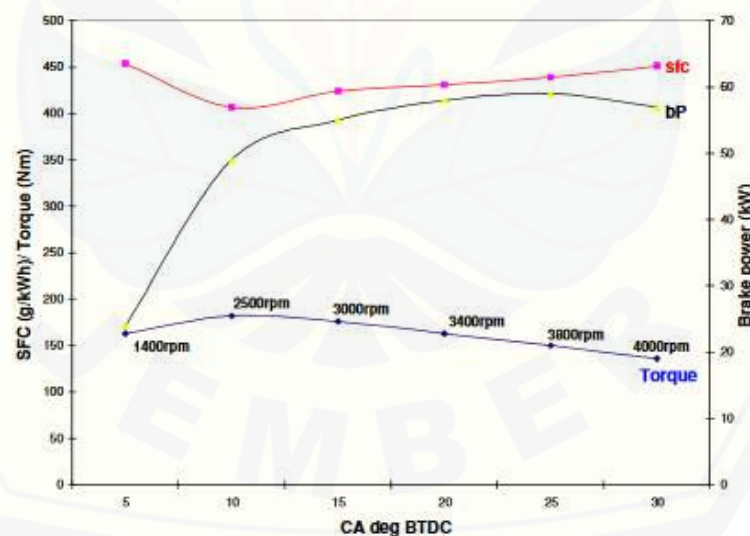


Gambar 2.10 Pengaruh putaran mesin terhadap SFC, torsi dan daya (Sumber: Ogola dan Korir, 2010)

Pada gambar 2.11 merupakan grafik pengaruh sudut pengapian terhadap nilai konsumsi bahan bakar spesifik, daya dan torsi dengan variasi sudut 5° BTDC sampai 30° BTDC, dengan nilai λ 0,95 dan jarak celah elektroda busi 0,8 mm.

dari grafik didapatkan nilai torsi yang mengalami penurunan dari 179 Nm menjadi 176 Nm pada saat pengubahan sudut pengapian dari 10 °BTDC menjadi 15 °BTDC dengan peningkatan nilai konsumsi bahan bakar spesifik dari 407 g/kWh menjadi 429 g/kWh pada putaran 3000 rpm. Penurunan torsi juga terjadi saat sudut pengapian di ubah menjadi 30 °BTDC, nilai torsi berkurang dari 160 Nm menjadi 136 Nm dengan nilai SFC yang mengalami peningkatan dari 457 g/ kWh menjadi 463 g/ kWh pada putaran 4000 rpm. Nilai torsi maksimum terjadi saat sudut pengapian pada posisi 10 °BTDC sebesar 182 dengan nilai konsumsi bahan bakar spesifik 407 g/kWh dan dengan nilai daya 49 kW.

Crank angle (deg. BTDC)	Engine performance parameters		
	Torque (Nm)	SFC (g/kWh)	Brake power (kW)
5	163	454	24
10	182	407	49
15	176	429	55
20	163	443	58
25	150	551	59
30	136	463	57

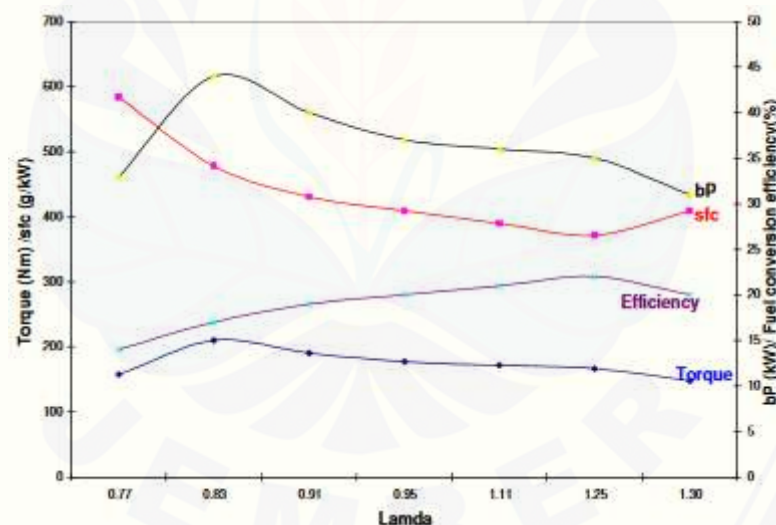


Gambar 2.11 Pengaruh sudut pengapian terhadap SFC, torsi dan daya (Sumber: Ogola dan Korir, 2010)

Pada gambar 2.12 merupakan grafik pengaruh rasio bahan bakar udara (lamda) terhadap nilai SFC, torsi dan daya mesin, dengan variasi lamda 0,77 – 1,30, sudut pengapian 10 °BTDC, celah elektroda busi 0,8 mm dan pada putaran 2000

rpm. Pada grafik diperoleh nilai torsi maksimum sebesar 210 Nm dengan nilai SFC 478 dan daya 44 kW pada saat nilai lamda 0,83. Nilai SFC mengalami peningkatan ketika nilai lamda lebih dari 1,25, hal tersebut terjadi karena pada campuran miskin pembakaran terjadi lebih lambat dan memiliki suhu maksimum lebih rendah dari campuran kaya. Pada campuran kaya yaitu pada lamda 0,833 terjadi pencapaian daya maksimum sebesar 44 kW, setelah pencapaian tersebut *output* daya mengalami pengurangan.

Lambda	Engine performance parameters			
	Torque (Nm)	SFC (g/kWh)	bP (kW)	η_f (%)
0.77	158	584	33	14
0.83	210	478	44	17
0.91	191	431	40	19
0.95	178	409	37	20
1.11	172	390	36	21
1.25	167	372	35	22
1.30	148	409	31	20

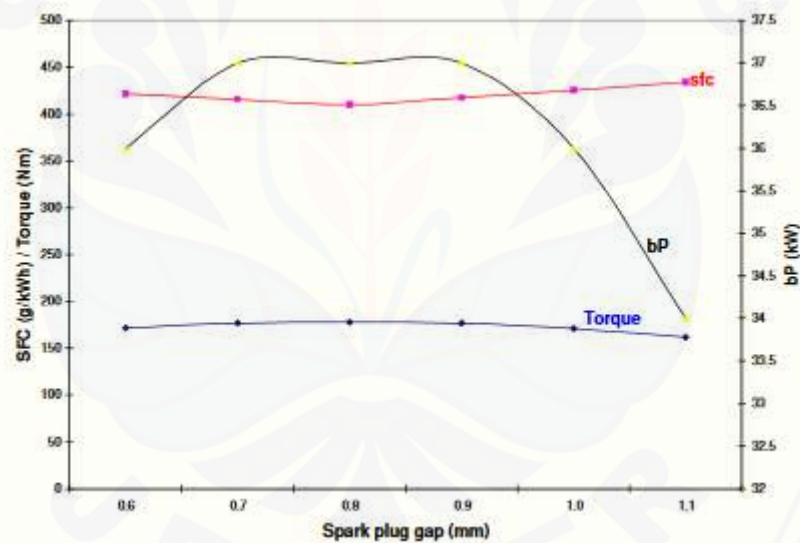


Gambar 2.12 Pengaruh AFR (Lambda) terhadap SFC, torsi dan daya (Sumber: Ogola dan Korir, 2010).

Pada gambar 2.13 merupakan grafik pengaruh jarak celah elektroda busi terhadap nilai SFC, torsi dan daya dengan variasi celah 0,6 mm sampai 1.1 mm, pada sudut pengapian 10° BTDC, putaran mesin 2000 rpm dan lamda 0,95. Dari grafik terlihat bahwa SFC minimum dan daya maksimum diperoleh pada celah busi 0,8 mm yaitu 410 g/kWh dan 37 kW dengan nilai torsi maksimum 178 Nm, hal

tersebut terjadi karena ketika jarak celah elektroda busi lebih kecil dari celah yang direkomendasikan akan mengurangi tegangan yang diperlukan untuk menghasilkan busur api. Tegangan yang lebih tinggi diperlukan untuk mendukung busur melintasi celah yang lebih besar dan keadaan tersebut dibatasi dengan desain pengapian tertentu yang mengakibatkan lemahnya percikan, sehingga mempengaruhi proses pembakaran.

Engine speed (rpm)	Engine performance parameters		
	Torque (Nm)	SFC (g/kWh)	Brake power (kW)
0.6	172	422	36
0.7	177	416	37
0.8	178	410	37
0.9	177	418	37
1.0	171	426	36
1.1	162	434	34

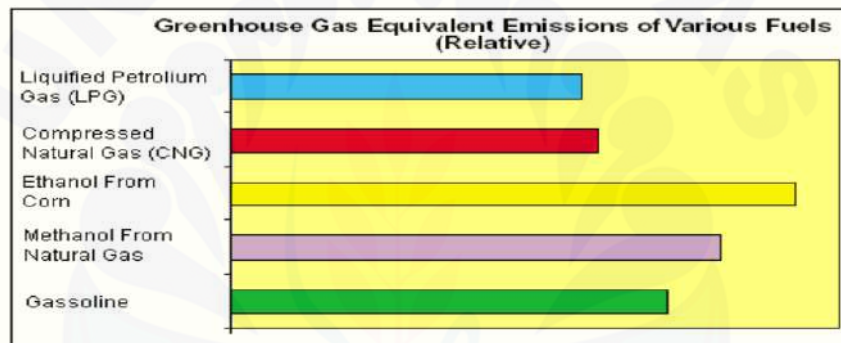


Gambar 2.13 Pengaruh gap elektroda busi terhadap SFC, torsi dan daya (Sumber: Ogola dan Korir, 2010)

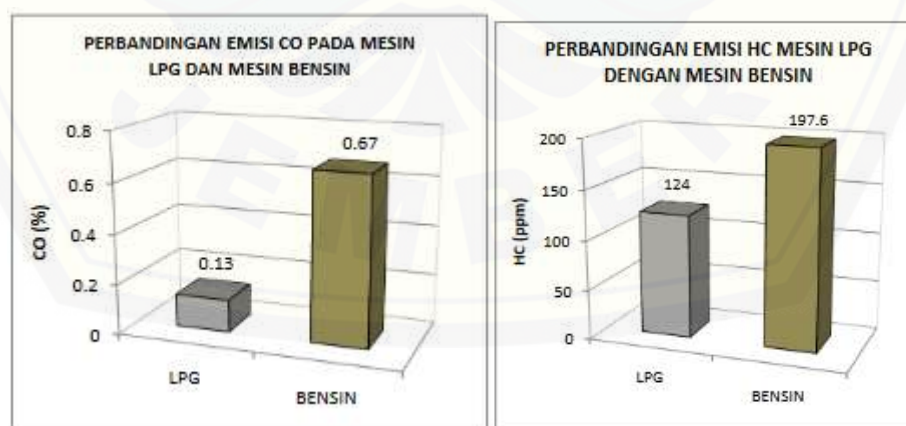
2.3.2. Emisi Gas Buang

LPG merupakan bahan bakar yang menghasilkan gas buang ramah terhadap lingkungan. Pada gambar 2.14 menyebutkan bahwa LPG merupakan bahan bakar gas yang memiliki efek gas rumah kaca terkecil dibandingkan dengan bahan bakar minyak maupun gas lainnya (Anyon, 2013). Setiyo dan Condro (2012) meneliti

kadar CO dan HC pada bahan Bakar LPG dengan penyetelan converter kits dan saat pengapian, dengan penyetelan baut pegas lever 5 putaran, bukaan katup aliran 40 %, dan saat pengapian 10 °BTDC dapat mereduksi emisi gas CO hingga 80,6 % sedangkan untuk skala optimasi terhadap emisi HC, penyetelan baut lever pada 5 putaran, bukaan katup aliran 40 % dan saat pengapian 15 °BTDC dapat mereduksi sebesar 37,2 %. Perbandingan gas CO dan HC antara bahan bakar bensin dan LPG dapat dilihat pada gambar 2.15, bahwa nilai CO bahan bakar bensin pada nilai lamda (λ) 1 ± 0.004 adalah 0,67 % sedangkan untuk LPG 0,13 %, untuk nilai HC bahan bakar bensin rata – rata 197,6 ppm sedangkan untuk LPG bernilai 124 ppm.



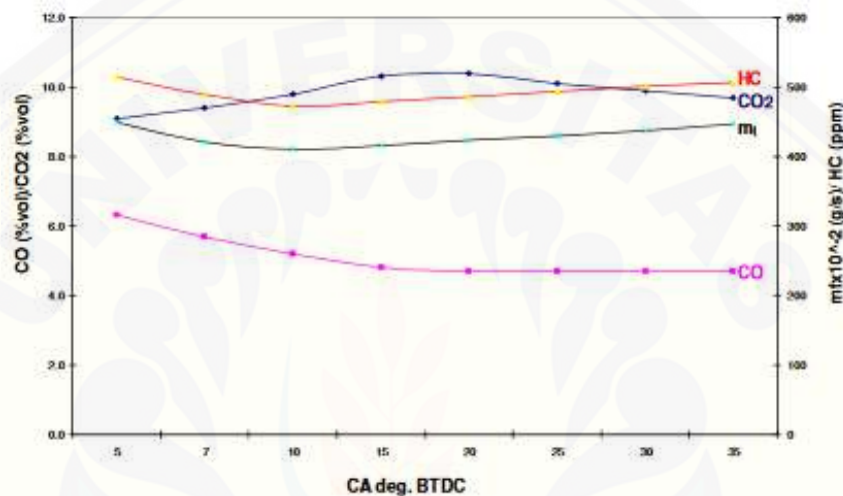
Gambar 2.14 Tingkat emisi gas rumah kaca dari berbagai bahan bakar (Sumber: Kalra dkk., 2014).



Gambar 2.15 Perbandingan emisi gas CO dan HC bahan bakar bensin dengan bahan bakar LPG (Sumber: Setiyo dan Condro, 2012).

Arijianto dan Usman (2015) melakukan perbandingan emisi gas buang bahan bakar bensin dan LPG bermesin injeksi pada putaran mesin 3000 rpm, 4000 rpm sampai 8000 rpm di tahan dengan waktu 5 menit, dari pengujian gas buang bahan bakar LPG diperoleh hasil gas CO berkurang sampai 25 % sedangkan gas HC berkurang sampai 40 %. Ogola dan Korir (2010) melakukan penelitian tentang emisi gas buang mesin mobil berbahan bakar gas LPG dengan memvariasikan sudut pengapian, lamda dan variasi jarak elektroda busi. Pada gambar 2.16 merupakan grafik pengaruh sudut pengapian terhadap emisi gas buang yang ditimbulkan dengan memvariasikan sudut pengapian antara 5 °BTDC sampai 35 °BTDC, celah elektroda busi 0,8 mm, pada putaran mesin 2500 dan lamda 0,95. Pada grafik menunjukkan bahwa pada sudut pengapian kurang dari 10 °BTDC meningkatkan kadar CO dari 5,2 % vol menjadi 6,3 % vol, HC dari 473 ppm menjadi 514 ppm dan m_f dari 5.5 g/s menjadi 6,1 g/s, sedangkan kadar CO₂ mengalami penurunan dari 9,8 % vol menjadi 9,1 % vol. Hal tersebut terjadi karena perlambatan pada sudut pengapian menurunkan tekanan puncak maksimum silinder yang menyebabkan pembakaran tidak sempurna yang mengakibatkan peningkatan kadar CO, m_f dan HC sedangkan konsentrasi CO₂ mengalami pengurangan. Namun dengan memajukan waktu pengapian lebih dari 10 °BTDC mempengaruhi konsentrasi CO dari 5,2 % vol menjadi 4,7 % vol, sementara itu terjadi peningkatan nilai HC dari 473 ppm menjadi 507 ppm, m_f dari 5,5 g/s menjadi 6.2 g/s dan meningkatkan konsentrasi CO₂ dari 9,8 % vol menjadi 9.7 % vol. Memajukan sudut pengapian dapat meningkatkan tekanan puncak silinder sehingga dapat meningkatkan SFC, menghasilkan suhu yang lebih tinggi, dan dengan oksigen yang cukup maka terjadi pembakaran sempurna. Namun dengan meningkatkan kompresi pembakaran dapat meningkatkan tekanan silinder sehingga memaksa beberapa gas dalam silinder ke dalam celah-celah volume piston, cincin dan dinding silinder sehingga bahan bakar banyak yang lolos dari proses pembakaran, hal tersebut yang menyebabkan sumber emisi HC.

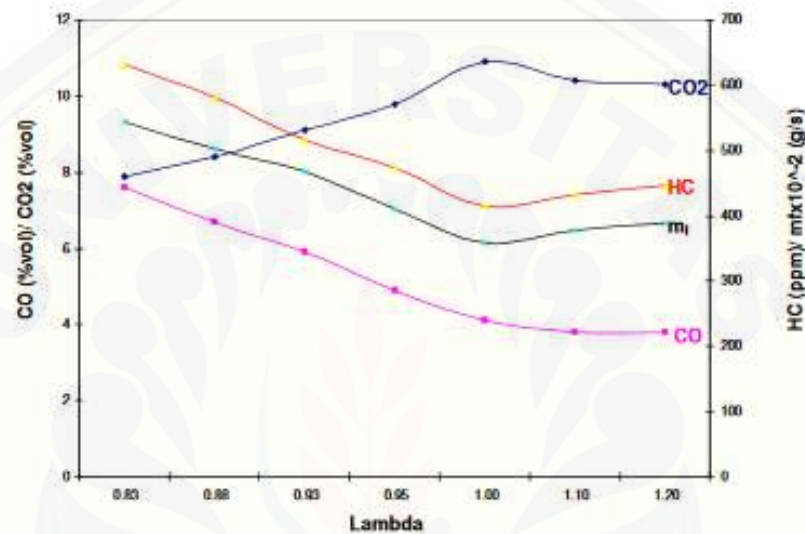
Crank angle (deg. BTDC)	Engine performance parameters			
	CO (% vol)	CO ₂ (% vol)	HC (ppm)	m _f (g/s)
5	6.3	9.1	514	6.1
7	5.7	9.4	489	5.7
10	5.2	9.8	473	5.5
15	4.8	10.3	479	5.6
20	4.7	10.4	486	5.7
25	4.7	10.1	593	5.8
30	4.7	9.9	501	5.9
35	4.7	9.7	507	6.2



Gambar 2.16 Pengaruh Sudut pengapian terhadap emisi CO, CO₂, HC dan m_f (Sumber: Ogola dan Korir, 2010)

Salah satu variabel penting dalam menentukan emisi gas buang pada mesin SI adalah rasio bahan bakar udara (λ), pada gambar 2.17, λ divariasikan dari 0,83 sampai 1,3 untuk mencari nilai gas CO, CO₂, HC dan m_f. sudut pengapian 10 °BTDC, putaran mesin pada 2500 rpm dan pada jarak celah elektroda busi 0,8 mm. pada campuran kaya atau kekurangan udara akan menyebabkan emisi gas HC, CO dan m_f meningkat tajam, namun konsentrasi gas CO₂ mengalami penurunan, hal tersebut karena gas CO₂ merupakan fungsi dari pembakaran sempurna yang dibatasi oleh jumlah bahan bakar dalam campuran udara berlebih.

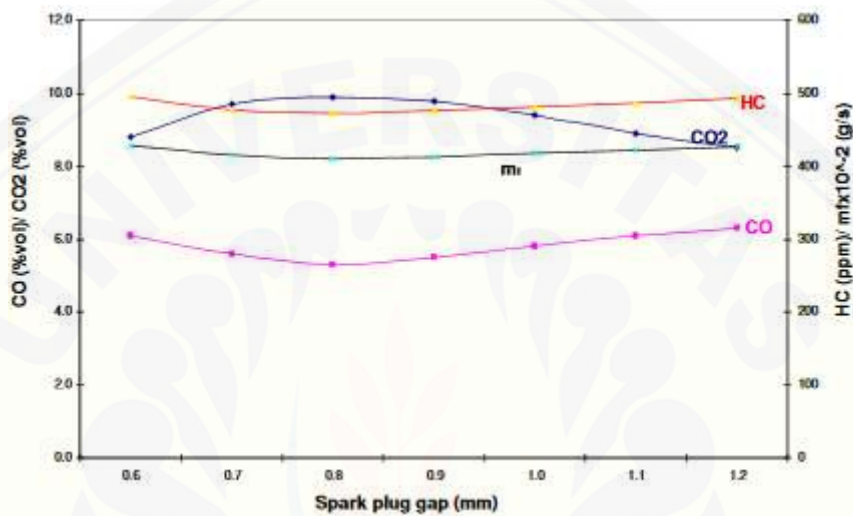
Lambda	Engine performance parameters			
	CO (% vol)	CO ₂ (% vol)	HC (ppm)	m _f (g/s)
0.83	7.6	7.9	631	7.3
0.88	6.7	8.3	581	6.7
0.93	5.9	9.1	516	6.3
0.95	5.2	9.8	473	5.5
1.00	4.1	10.9	414	4.8
1.10	3.8	10.4	433	5.1
1.20	3.8	10.3	447	5.2



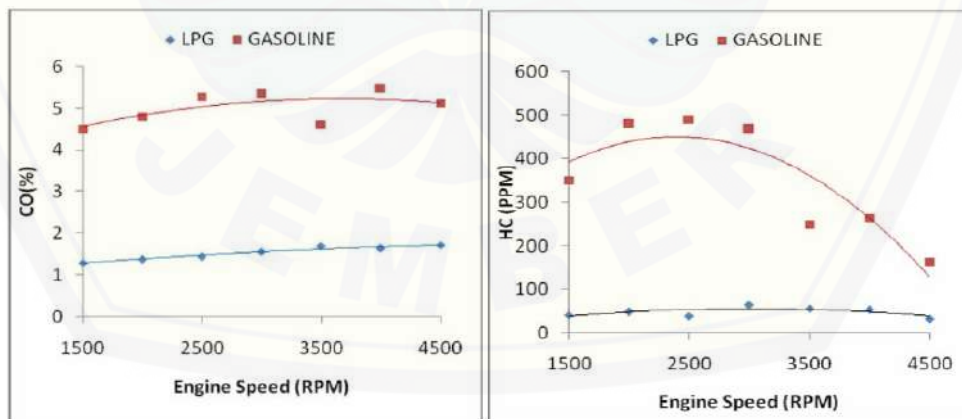
Gambar 2.17 Pengaruh AFR (Lambda) terhadap emisi CO, CO₂, HC dan m_f. (Sumber: Ogola dan Korir, 2010)

Pada gambar 2.18 merupakan grafik pengaruh jarak celah elektroda busi terhadap emisi gas buang mesin SI dengan variasi jarak celah 0,6 mm sampai dengan 1,1 mm, sudut pengapian 10 °BTDC, rasio bahan bakar udara (lamda) 0,95 dan pada putaran mesin 2500 rpm. Dari grafik dapat diamati bahwa nilai konsentrasi CO, HC dan m_f terendah terjadi pada jarak elektroda busi 0,8 mm yaitu CO 5,3 % vol, HC 473 ppm dan m_f sebesar 5,5 g/s, nilai CO₂ mengalami kenaikan 9.9 % vol. pada jarak celah elektroda busi 0,8 mm merupakan hasil dari pencapaian energi pengapian yang maksimal sehingga tercipta pembakaran yang sempurna.

Spark plug gap (mm)	Engine performance parameters			
	CO (% vol)	CO ₂ (% vol)	HC (ppm)	m _f (g/s)
0.6	6.1	8.8	496	5.7
0.7	5.6	9.7	478	5.6
0.8	5.3	9.9	473	5.5
0.9	5.5	9.8	476	5.6
1.0	5.8	9.4	481	5.6
1.1	6.1	8.9	487	5.7
1.2	6.3	8.5	493	5.8



Gambar 2.18 Pengaruh gap elektroda busi terhadap emisi CO, CO₂, HC dan m_f (Sumber: Ogola dan Korir, 2010)

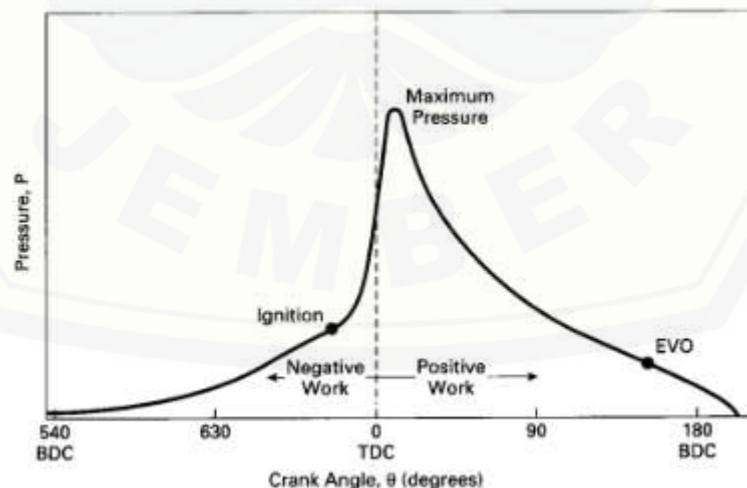


Gambar 2.19 Nilai emisi CO dan HC pada variasi putaran mesin bahan bakar LPG dan premium (Shankar dan Mohanan, 2011)

Gambar 2.19 perbandingan nilai emisi gas buang CO dan HC bahan bakar premium dan LPG pada variasi putaran mesin, pada grafik terlihat nilai emisi gas CO maupun HC bahan bakar LPG lebih rendah dari bahan bakar premium.

2.3.3 Karakteristik Pengapian LPG

Salah satu variabel operasi utama yang mempengaruhi performa, efisiensi dan emisi mesin SI adalah waktu percikan bunga api atau saat penyalaan dan tegangan pengapian (Heywood, 1998; Heywood dan Badvadeker, 2004). Penyalaan yang terlalu awal akan menyebabkan kerja negatif dimana proses *ekspansi* gas reaksi pembakaran akan melawan gerakan piston yang bergerak menuju titik mati atas, sedangkan penyalaan yang terlalu lambat menyebabkan tekanan puncak menurun sehingga kerja (*ekspansi*) yang dihasilkan akan menurun. Maksimum brake-torque timing (MBT timing) adalah waktu penyalaan yang akan menghasilkan torsi maksimum, sedangkan waktu MBT tergantung pada putaran dan beban mesin (Setiyo dan Condro, 2012). Proses pembakaran pada mesin bensin terdiri dari tiga priode, yaitu priode penyalaan dan pengembangan api (*ignition and flame developmen*), priode penyebaran api (*flame propagation*), dan priode akhir pembakaran (*flame termination*) (Pulkrabek, 1985). Proses pembakaran diilustrasikan pada gambar 2.20.



Gambar 2.20 Proses pembakaran pada mesin bensin (Setiyo dan Condro, 2012)

Kecepatan rambat api LPG 12 % lebih cepat dari bahan bakar bensin di campuran yang sama. LPG membutuhkan waktu yang singkat untuk mencapai pembakaran eksplosif, sehingga pada putaran tinggi proses pembakaran berlangsung lebih sempurna (Rohmat dan Saptoadi, 2003). Shankar dan Mohanan (2011) mengatakan bahwa rasio kesetimbangan stokiometri kecepatan rambat api dari bahan bakar LPG lebih cepat dari bahan bakar bensin pada campuran bahan bakar miskin.

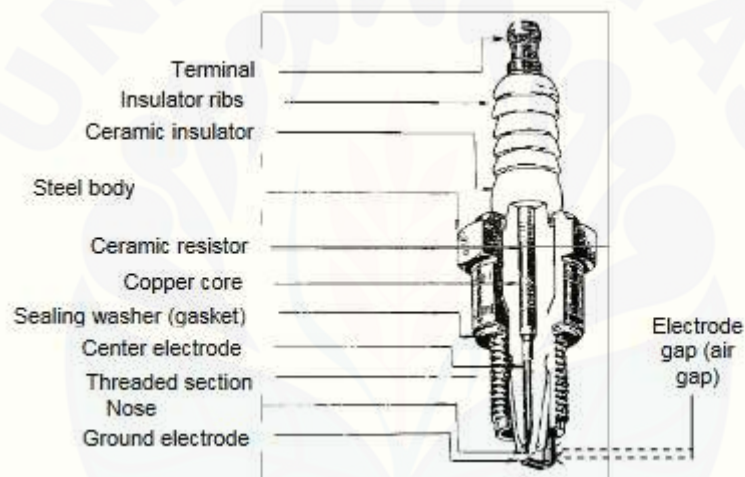
Ditinjau dari temperatur ruang bakar, bahan bakar gas pada umumnya mengalami fenomena pembakaran kering dan tidak mengalami efek pendinginan dalam (*inner cooling*) tidak seperti pada bahan bakar bensin yang berbentuk uap saat masuk ke ruang bakar sehingga dapat berfungsi sebagai pendingin (*evaporative cooling*) komponen di dalam ruang bakar baik katup, elektroda busi maupun dinding ruang bakar (Setiyo dan Condro, 2012). Karena terjadi pembakaran kering maka beban panas yang diterima lebih besar sehingga busi yang digunakan harus dapat mentransfer panas pembakaran ke *silinder head* yang lebih baik.

Ditinjau dari tegangan pengapian, pada mesin yang sama, pembakaran LPG menghasilkan temperatur dan tekanan yang lebih tinggi dari mesin bensin, hal tersebut akan mempersulit proses ionisasi (peletikan bunga api elektroda positif ke elektroda negatif). Salah satu cara untuk menghasilkan ionisasi yang maksimal yaitu dengan cara menambahkan tegangan pengapian atau dengan mengurangi celah elektroda busi sebagai langkah penyesuaian. Mengingat kecepatan pembakaran LPG lebih rendah daripada bahan bakar bensin, maka diperlukan penyesuaian saat penyalaan untuk mendapatkan MBT yang sama dengan mesin bensin saat sudut pengapian dimajukan beberapa derajat engkol (Setio dan Condro, 2012). Pengubahan jarak keregangan celah elektroda busi mempengaruhi besarnya energi pengapian (Joshi dkk., 2015)

2.4 Busi

Busi (*spark plug*) merupakan salah satu komponen pendukung dalam sistem pengapian. Busi berfungsi memercikan api untuk membakar campuran bahan bakar

diruang bakar. Sistem pengapian (bunga api busi) yang kuat dan akurat mampu membakar campuran bahan bakar secara sempurna dan tepat pada waktu yang dibutuhkan sehingga dihasilkan *output* tenaga mesin yang optimal dengan penggunaan bahan bakar yang efisien dan memungkinkan untuk menghasilkan emisi gas buang yang rendah (Sriyanto dkk., 2010). Untuk itu busi mempunyai syarat sebagai berikut: (1) harus dapat merubah tegangan tinggi menjadi loncatan bunga api pada elektrodanya; (2) harus tahan terhadap suhu pembakaran gas yang tinggi sehingga busi tidak terbakar elektrodanya; (3) harus tidak terjadi deposit karbon atau busi harus tetap bersih (Sriyanto dkk., 2010).



Gambar 2.21 Konstruksi busi (Sumber: Jama dkk., 2008)

Tegangan tinggi yang dihasilkan oleh kumparan sekunder koil pengapian berkisar 15.000 sampai 30.000 Volt, setelah melalui rangkaian tegangan tinggi akan dikeluarkan diantara elektroda tengah (elektroda positif) dan elektroda sisi (elektroda negatif) busi berupa percikan bunga api (percikan api elektrik). Tujuan adanya busi adalah untuk mengalirkan pulsa atau arus tegangan tinggi dari tutup (terminal) busi ke bagian elektroda tengah ke elektroda sisi melewati celah udara dan kemudian berakhir ke masa (ground) (Jama, 2008).

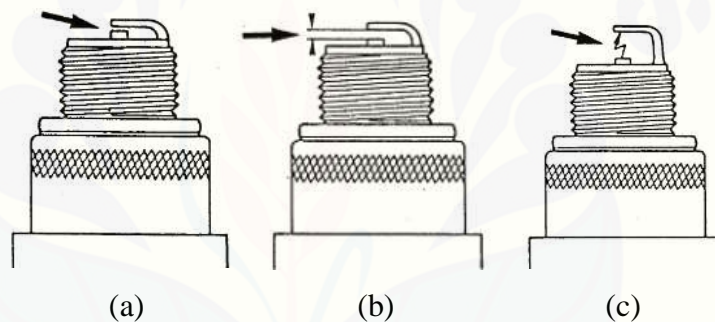
Kemampuan dalam menghasilkan bunga api dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu:

- a. Bentuk elektroda busi

Bentuk elektroda mempengaruhi lemah tidaknya loncatan percikan bunga api busi. Bentuk elektroda yang persegi, runcing dan tajam akan mempermudah loncatan bunga api namun umur penggunaannya lebih pendek karena cepat mengalami aus, elektroda yang berbentuk bulat mempersulit loncatan bunga api dan loncatan bunga apinya lemah sehingga menyebabkan terjadi kesalahan.

b. *Gap* elektroda busi

Bila *gap* elektroda busi terlalu lebar akan membutuhkan tegangan sekunder yang lebih besar untuk menghasilkan percikan bunga api, sehingga ketika tegangan api tidak bisa memenuhi kebutuhan tegangan tersebut maka akan terjadi kegagalan percikan, sedangkan jika *gap* elektroda busi terlalu kecil menyebabkan percikan bunga api kecil dan sangat mudah terselip kotoran.



(a) terlalu kecil; (b) sedang (c) terlalu besar

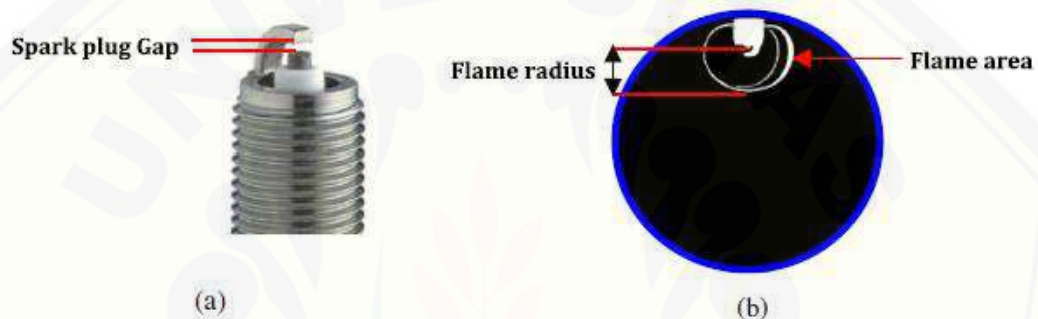
Gambar 2.22 *Gap* elektroda busi (Sumber: Jama dkk., 2008)

c. Tekanan kompresi

Peningkatan tekanan kompresi mempengaruhi loncatan bunga api busi, apabila tekanan meningkat, maka bunga apipun akan menjadi semakin sulit untuk meloncat sehingga tegangan yang dibutuhkan semakin tinggi, hal tersebut juga terjadi pada kerja lambat dengan kecepatan rendah dan katup gas terbuka penuh. Tegangan pengapian yang dibutuhkan juga akan naik bila suhu campuran udara – bahan bakar turun (Jama dkk., 2008).

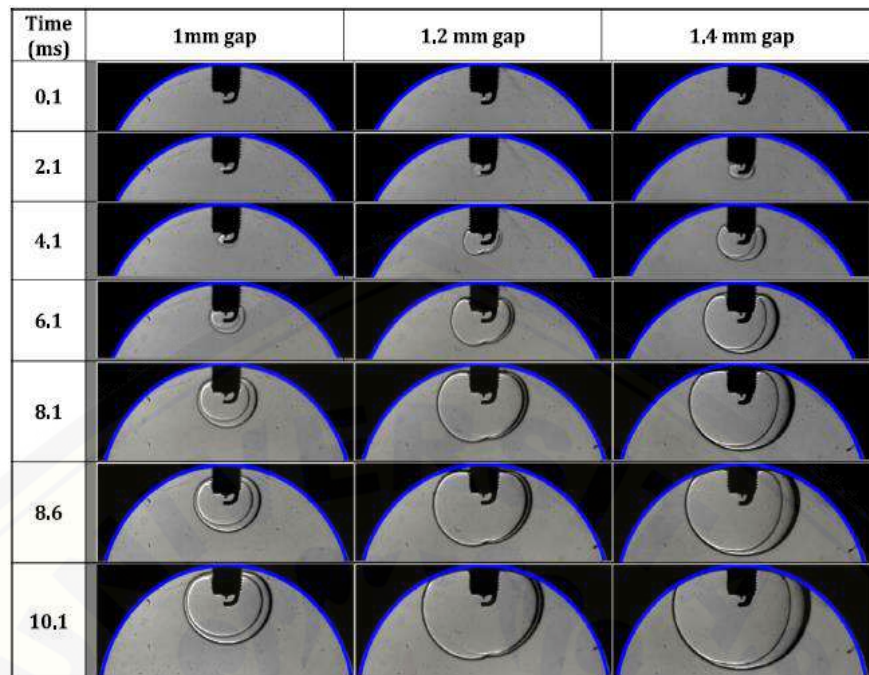
Badawy dkk. (2017) melakukan penelitian tentang pengaruh jarak celah elektroda busi terhadap propagasi karnel api, performa mesin dan emisi gas buang dengan menggunakan mesin satu silinder *Gasoline Direct Injection* (GDI), *Planar*

Laser Induced Fluorescence (PLIF) digunakan untuk menyelidiki zona pembakaran dan pengembangan api pada bidang horisontal setelah percikan api. Variabel penelitian yang digunakan adalah *gap* elektroda busi 1,0 mm, 1,2 mm dan 1,4 mm, dengan menggunakan rasio kesetaraan (ϕ) 0,9, 1, 1,1 dan 1,2. Bahan bakar yang digunakan adalah premium pada suhu awal dan tekanan masing-masing 90 °C dan 1 bar. Pada gambar 2.23 (b) area karnel api didefinisikan sebagai daerah terluar dari luas area penyebaran nyala api, sedangkan jari-jari karnel api didefinisikan sebagai jarak vertikal dari ujung pusat elektroda ke batas nyala api.



Gambar 2.23 (a) *Gap* elektroda busi, (b) area perambatan api dan definisi radius perambatan api (Badawy dkk., 2017)

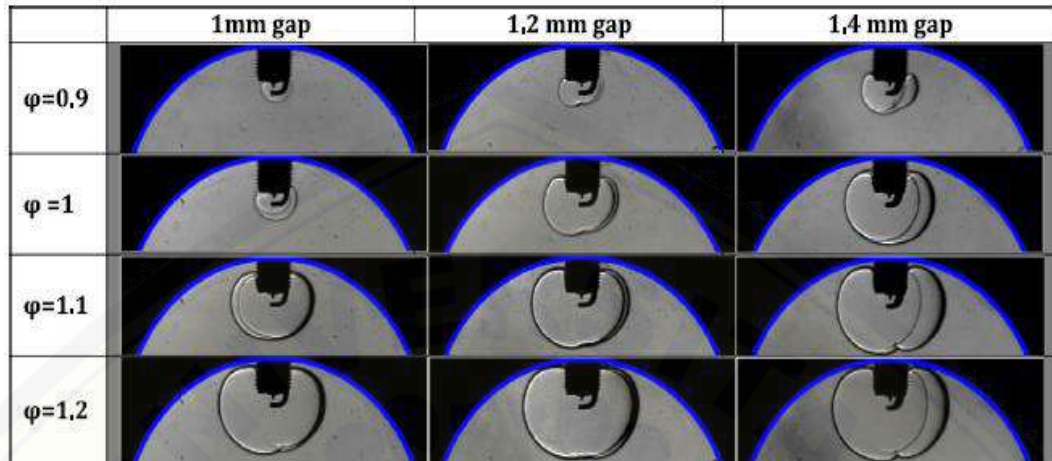
Gambar 2.33 menampilkan pertumbuhan nyala karnel pada rasio kesetaraan $\phi = 1$, pada *gap* elektroda busi 1, 1,2 dan 1,4 mm. pada waktu penyalaan 1 ms, perbedaan ukuran karnel api antara ketiga celah relatif kecil. Seiring bertambahnya waktu inisiasi karnel api terus meningkat, *gap* elektroda busi 1,2 dan 1,4 mm menghasilkan area karnel api yang secara signifikan lebih besar dibandingkan dengan *gap* 1 mm. peningkatan terus berlanjut hingga waktu 8 ms, rata-rata daerah karnel api dari *gap* 1,2 dan 1,4 mm masing-masing sekitar 672,8 dan 903 mm² sedangkan pada *gap* elektroda busi 1 mm luas daerah karnel mencapai 286 mm².



Gambar 2.24 Perbandingan pertumbuhan nyala api pada *gap* elektroda busi 1,0 mm, 1,2 mm dan 1,4 mm pada rasio kesetaraan stokiometri (ϕ) = 1 (Badawy dkk., 2017)

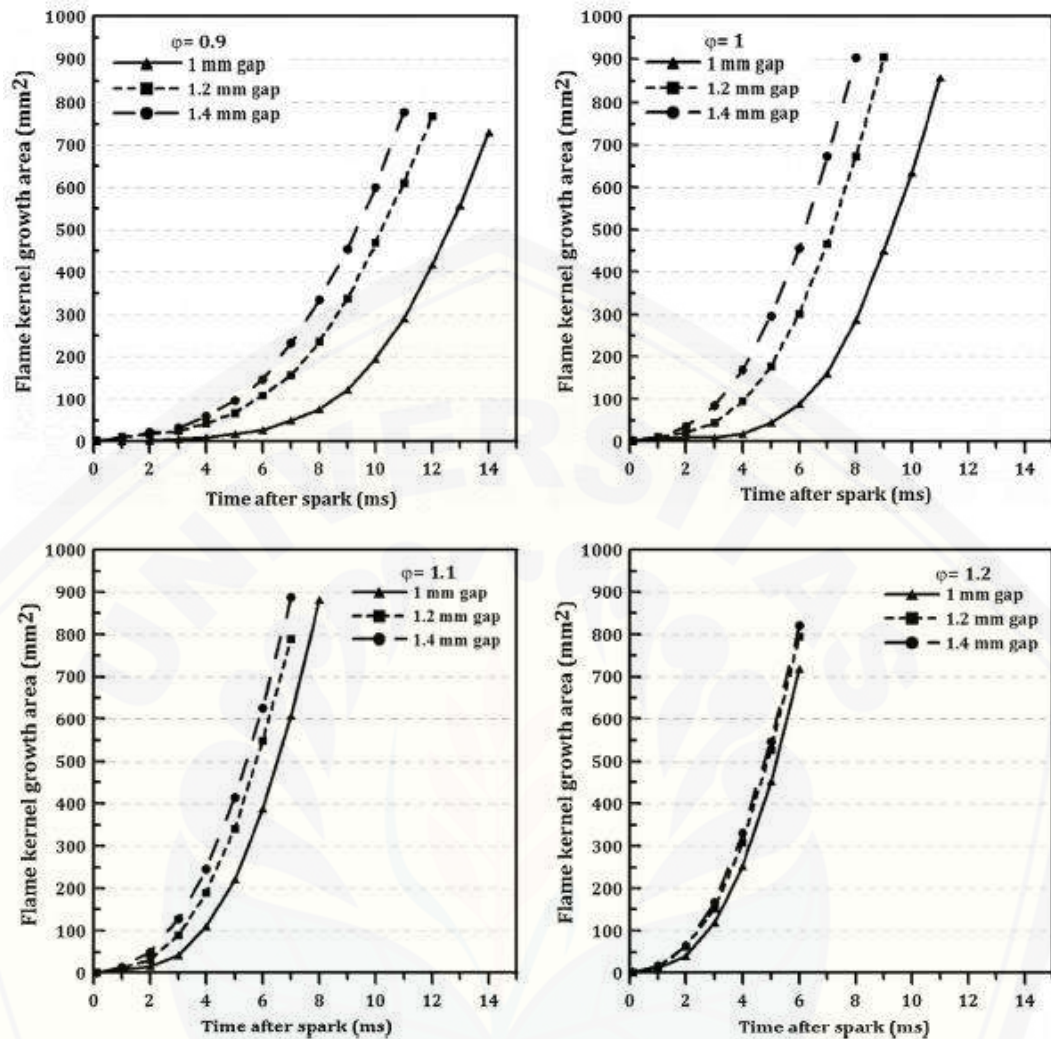
Sebagian besar perbedaan luasan area karnel disebabkan oleh perpanjangan *gap* elektroda busi yang menyebabkan energi pengapian meningkat dengan volume plasma lebih besar, sehingga lebih banyak terjadi kontak dengan gas di dalam ruang bakar. Akibatnya karnel api lebih cepat dikembangkan, mempercepat fraksi massa yang terbakar dan menghasilkan tingkat pelepasan panas yang lebih cepat (Badawy dkk., 2017; Jeonghoon dkk., 2000). Oleh karena itu, pada *gap* elektroda sempit menghasilkan inti api kecil dan berakibat pada hilangnya percikan energi listrik yang berpindah dari katoda ke anoda, hal itu memungkinkan terjadinya percikan energi listrik yang jatuh berada didekat permukaan elektroda (Andersson, 1999). Ishii dkk. (1992) mengungkapkan bahwa saat *gap* elektroda busi di perlebar, jumlah kerugian panas berkurang, begitu sebaliknya, untuk *gap* elektroda busi yang sempit kerugian panas akan cenderung lebih besar, sejumlah panas tidak dapat tersirkulasi sempurna di dalam ruang bakar karena arah percikan terhalang oleh ujung elektroda sehingga area karnel cenderung lebih sempit. Seiring dengan meningkatnya *gap* elektroda busi, kehilangan panas akibat quenching akan rendah, dan ini

menyebabkan kondisi pengapian menjadi lebih baik. Sebaliknya, seiring dengan bertambahnya *gap* elektroda busi menuntut tegangan pengapian yang lebih besar.



Gambar 2.25 Pengaruh *gap* elektroda busi terhadap variasi rasio kesetaraan bahan bakar-udara (φ) pada waktu 6 ms (Badawy dkk., 2017)

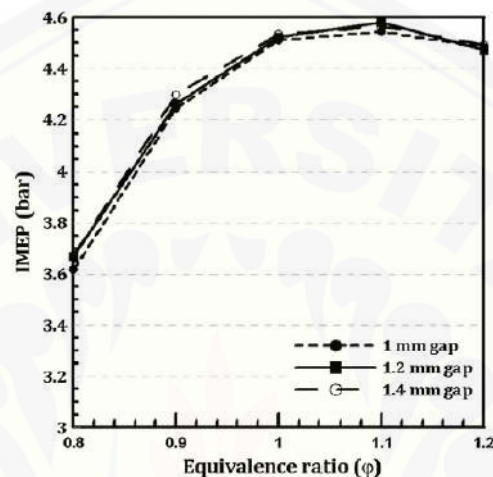
Gambar 2.25 merupakan pengaruh pertumbuhan api karnel pada variasi celah busi terhadap perubahan rasio kesetaraan bahan bakar-udara (φ) dalam waktu 6 ms. Pada kondisi kaya $\varphi = 1,1$ dan $\varphi = 1,2$, perubahan *gap* elektroda busi tidak mempengaruhi pertumbuhan api karnel. Alasan semakin kaya campuran bahan bakar, molekul bahan bakar di ruang bakar melimpah sehingga lebih banyak radikal api yang terbentuk, dan tercapai suhu api lebih tinggi (Brown, 1991). Namun, pada kondisi yang terlalu kaya, menyebabkan suhu api akan menurun karena terjadi proses pembakaran yang tidak sempurna.



Gambar 2.26 Perkembangan area kanel api terhadap fungsi waktu pada *gap* elektroda busi 1, 1,2 dan 1,4 mm dengan variasi rasio kesetaraan bahan bakar-udara (Badawy dkk., 2017)

Gambar 2.26 merupakan perbandingan kumulatif kanel api rata-rata terhadap fungsi waktu percikan elektroda busi 1, 1,2 dan 1,4 mm pada rasio kesetaraan bahan bakar-udara yang berbeda. Pada semua rasio ekuivalensi, *gap* elektroda busi 1,4 mm secara konsisten memiliki daerah api yang lebih besar dibandingkan dengan *gap* elektroda lainnya. Pada rasio kesetaran bahan bakar-udara kaya, pengaruh *gap* mulai berkurang terutama pada celah 1,2 mm dan 1,4 mm. energi pengapian dan *quenching* merupakan parameter kunci yang berperan penting pada pembentukan kanel api. Penyempurnaan energi pengapian dari

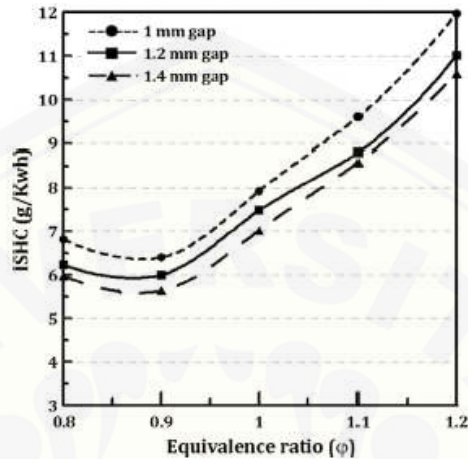
percikan api *gap* elektroda busi yang diperlebar berbanding lurus dengan lebarnya luasan plasma, sehingga pada *gap* yang lebar banyak membutuhkan energi untuk mempertahankan karnel dari terjadinya breakdown, terutama pada kondisi dimana kerapatan energi ditahan dan menghasilkan suhu konstan sepanjang permukaan plasma (Arcoumanis dkk., 1993).



Gambar 2.27 Pengaruh jarak keregangan *gap* elektroda busi terhadap nilai IMEP dengan variabel rasio kesetaraan bahan bakar-udara (Badawy dkk., 2017)

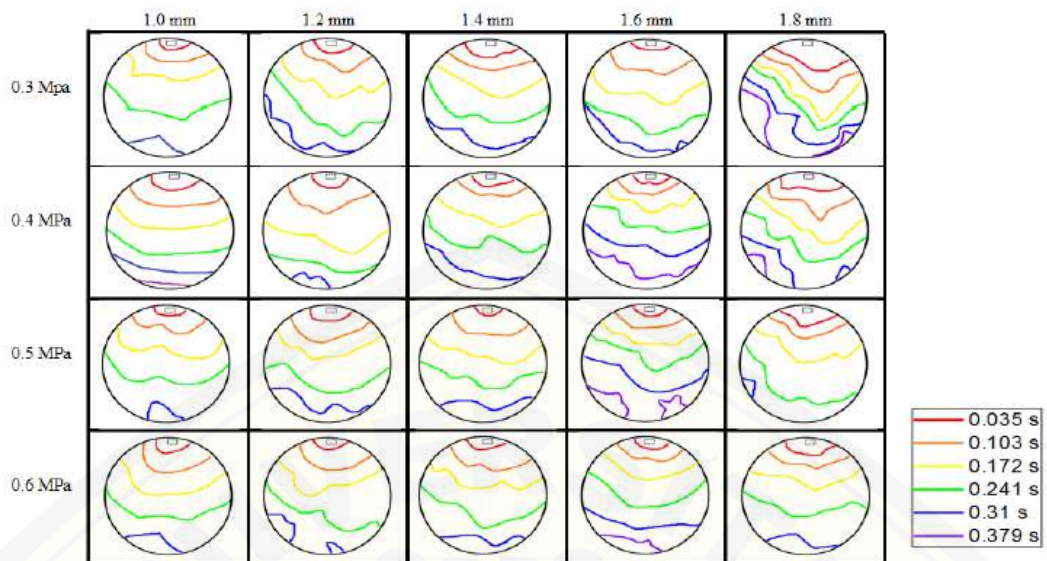
Gambar 2.27 merupakan perbandingan rasio kesetaraan bahan bakar-udara terhadap nilai tekanan rata-rata (IMEP) pada variasi *gap* elektroda busi. Dapat dilihat bahwa ketika rasio kesetaraan meningkat, beban akan terus meningkat sampai maksimum dan kemudian mengalami penurunan pada kondisi rasio kesetaraan sangat kaya. Tekanan efektif rata-rata (IMEP) akan menurun pada kondisi miskin dan pada kondisi rasio terlalu kaya, disebabkan karena kecepatan perkembangan nyala api lambat akibat rendahnya pelepasan energi panas. Pengurangan kecepatan nyala api menyebabkan lambatnya waktu pembakaran dan berdampak pada kurangnya tenaga pada mesin (Gupta, 2012). Gap elektroda busi yang terlalu sempit pada kondisi rasio kesetaraan $\phi = 1$ menghasilkan IMEP rendah karena jangkauan area api karnel sempit, sedangkan pada rasio kesetaraan $\phi > 1$, pada *gap* elektroda busi 1,1 mm dan 1,4 mm menghasilkan tekanan IMEP sama. Pada kondisi rasio campuran miskin, laju aliran massa bahan bakar rendah yang menghasilkan energi eksoterm rendah dan menghasilkan suhu api rendah sehingga

kecepatan nyala api rendah. Sementara pada campuran kaya, suhu didalam silinder berkurang karena pembakaran yang tidak sempurna yang juga berakibat pada rendahnya suhu didalam silinder.



Gambar 2.28 Pengaruh jarak *gap* elektroda busi terhadap nilai emisi HC dengan variabel rasio kesetaraan bahan bakar-udara (Badawy dkk., 2017)

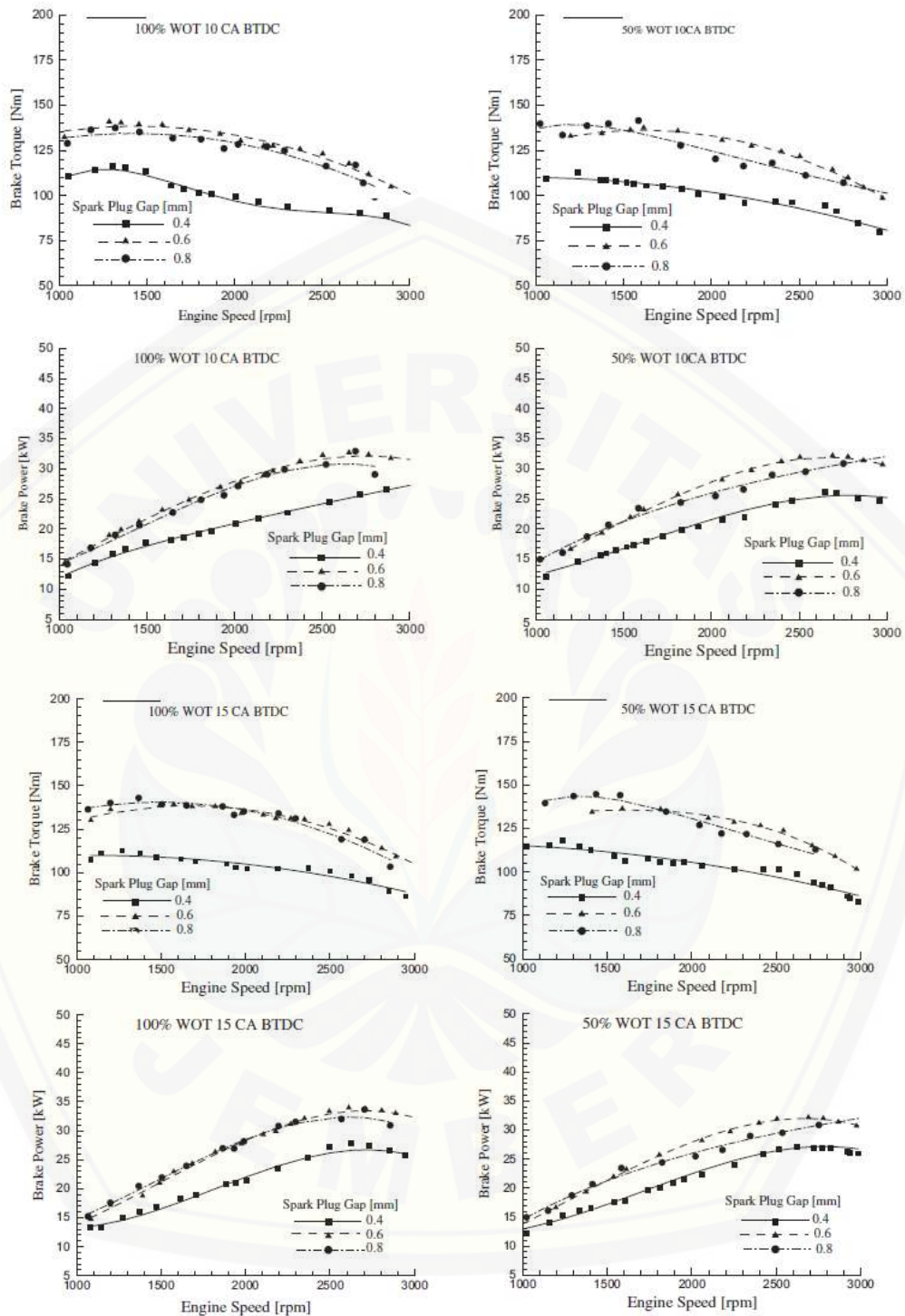
Gambar 2.28 merupakan grafik emisi HC pada tekanan injeksi 150 bar diukur dengan analisa Horiba MEXA-7100DEGR dengan resolusi 1 ppm. Nilai emisi HC meningkat pada kondisi miskin $\phi = 0,9$ dan kondisi sangat kaya. Jika rasio bahan bakar udara terlalu ramping, akan terjadi pembakaran yang buruk karena api tidak mampu membakar semua campuran dan suhunya akan rendah sehingga terbentuk emisi hidrokarbon diakhir ledakan (Badawy dkk., 2017). Pada kondisi kaya emisi HC meningkat karena kurangnya oksigen yang beraksi dengan atom karbon sehingga tidak terjadi pembakaran sempurna. Burgett dkk. (1972) menyimpulkan bahwa semakin lebar *gap* elektroda busi, semakin besar volume campuran bahan bakar yang terpapar percikan, sehingga banyak campuran bahan bakar yang terbakar. Sedangkan pada kondisi *gap* yang terlalu rapat memberikan efek *shrouding* dan karena itu turbulensi pada campuran di dalam *gap* elektroda akan hilang, hal ini menyebabkan terjadinya campuran yang tidak tepat di sekitar *gap* elektroda busi, sehingga menghasilkan proses pembakaran yang kurang efisien dan berakibat pada peningkatan emisi HC.



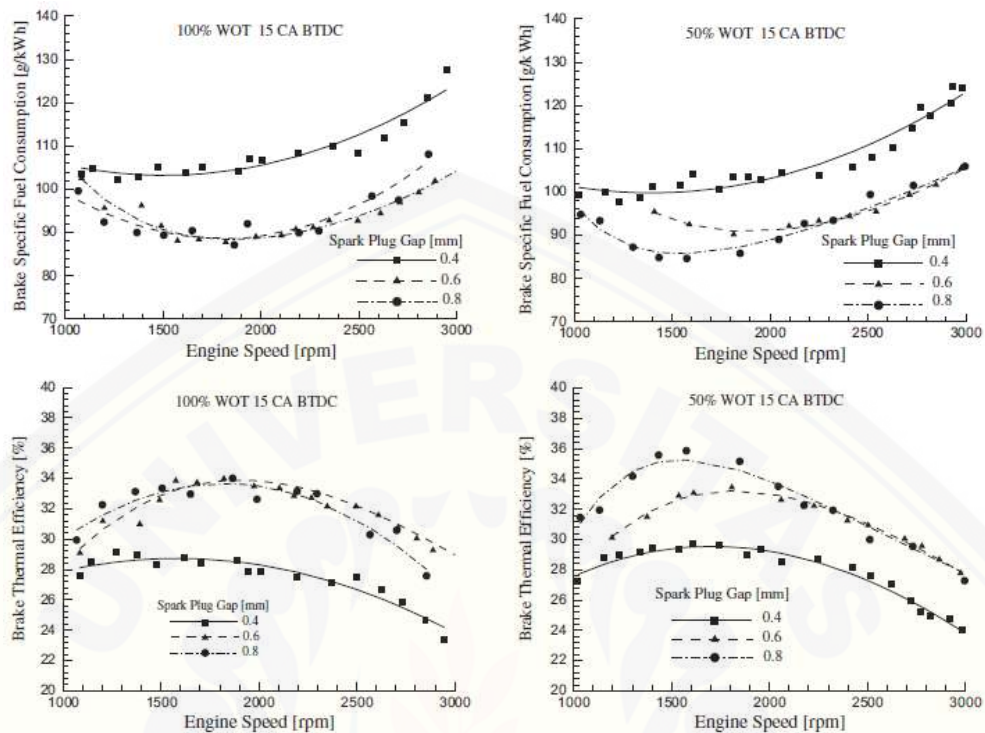
Gambar 2.29 Tekanan injeksi dan *gap* elektroda busi terhadap perkembangan api (Shu-Yi dkk., 2016)

Gambar 2.29 merupakan pengaruh tekanan injeksi dan *gap* elektroda busi terhadap perkembangan api dengan variasi waktu yang ditentukan. Pada gambar terlihat bahwa semakin lebar *gap* elektroda busi menyebabkan perkembangan api lebih baik dalam waktu yang lebih singkat dan semakin lebar *gap* elektroda busi memerlukan tekanan injeksi yang lebih tinggi untuk meningkatkan perkembangan api karnel (Shu-Yi dkk., 2016). Ozdor dkk. (1994) mengungkapkan bahwa *gap* elektroda busi mempengaruhi *ignitability* campuran. Jarak celah yang lebar membutuhkan tegangan pengapian yang lebih besar, namun hal tersebut dapat mempercepat laju pelepasan energi dan mempersingkat durasi percikan api.

Ceper B. A. (2012) melakukan penelitian tentang pengaruh *gap* elektroda busi pada mesin SI berbahan bakar hidrogen. Penelitian ini dilakukan pada mesin 4 langkah, 6 silinder. volume mesin 4,9 L, *bore* 102,1 mm, *stroke* 101,1 mm dan rasio kompresi 13,5:1. Variabel penelitian menggunakan *gap* elektroda busi (0,4, 0,6 dan 0,8 mm), kecepatan mesin 1000 rpm sampai dengan 3000 rpm, dan sudut pengapian (10° dan 15° BTDC).



Gambar 2.30 Pengaruh *gap* elektroda busi terhadap nilai torsi dan daya pada variasi putaran mesin dan sudut pengapian 10° dan 15° BTDC (100% dan 50 % WOT) (Ceper, 2012)

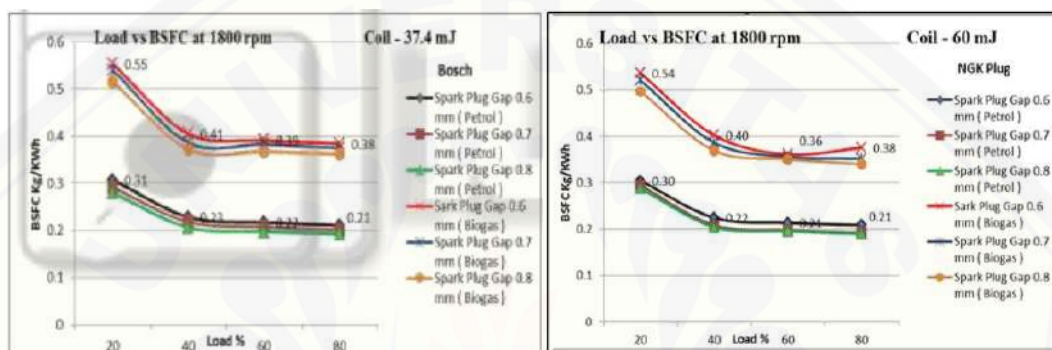


Gambar 2.31 Pengaruh *gap* elektroda busi terhadap nilai *spesifik fuel consumption* dan nilai efisiensi termal pada variasi putaran mesin dan sudut pengapian 10° dan 15° BTDC (50% dan 100% WOT) (Ceper.2012)

Gambar 2.30 merupakan pengaruh *gap* elektroda busi terhadap nilai torsi dan daya pada variasi putaran mesin dan sudut pengapian. Pada penelitian tersebut disimpulkan bahwa, nilai output daya mesin di tentukan oleh efisiensi volumetrik, kepadatan energi bahan bakar, dan waktu pengapian. kepadatan yang rendah pada bahan bakar hidrogen menjadi salah satu faktor penyebab hilangnya efisiensi volumetrik. Pemilihan jarak *gap* elektroda busi yang tepat tergantung pada struktur mesin (volume ruang bakar, sistem pengapian, rasio kompresi dll) sehingga harus dipertimbangkan karena dapat mempengaruhi kinerja mesin (Ceper. 2012).

Joshi dkk. (2015) melakukan penelitian tentang pengaruh rasio kompresi dan energi pengapian pada kinerja dan emisi gas buang mesin *spark ignition* 4 langkah berbahan bakar biogas dan bensin, spesifikasi mesin: *bore diameter* 86 mm; *stroke length* 63 mm; *displacement volume* 396 m³; *compression ratio* 18,01; RPM 3600; HP 7.5 kw, dengan memvariasikan beban: 20 %; 40 %; 60 %; 80 %,

pada energi pengapian koil 37,4 mJ dan 60 mJ dan *gap* elektroda busi: 0,6 mm; 0,7 mm; 0,8 mm menggunakan busi NGK (iridium). Pada gambar 2.22 diperoleh grafik percobaan pengaruh beban terhadap BSFC (*Brake Spesific Fuel Comsumption*), pada putaran mesin 1800 rpm nilai konsumsi bahan bakar spesifik (BSFC) semakin menurun seiring bertambahnya beban, nilai BSFC biogas lebih tinggi daripada bensin, dengan peningkatan energi koil sebesar 60 mJ dan *gap* elektroda busi 0,8 mm dapat menurunkan nilai BSFC pada mesin berbahan bakar biogas dan bensin.



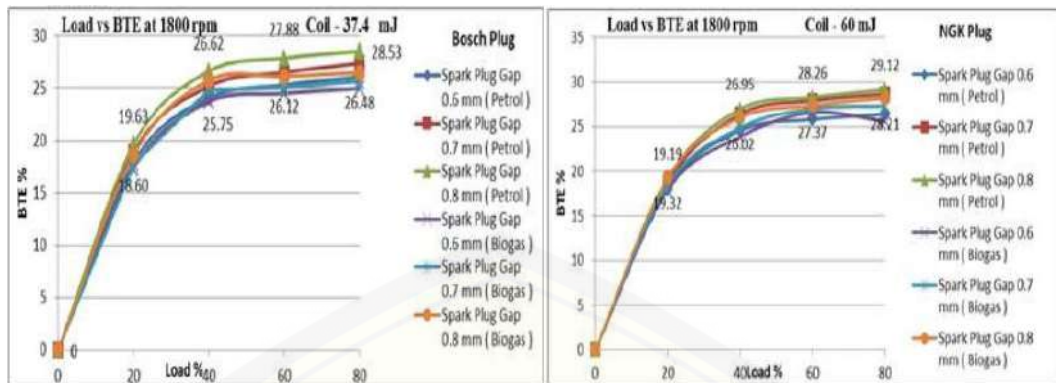
(a)

(b)

(a) energi pengapian 37,4 mJ; (b) energi pengapian 60 mJ

Gambar 2.32 Pengaruh beban terhadap BSFC (Sumber: Joshi dkk., 2015).

Pada gambar 2.23 dilakukan pengujian beban terhadap nilai BTE (*Brake Thermal Efisiensi*) pada putaran mesin 1800 rpm, pada grafik didapatkan nilai BTE berbanding lurus dengan beban, semakin tinggi beban maka nilai efisiensi termal semakin meningkat. Pada grafik juga didapatkan nilai efisiensi termal tertinggi pada energi koil 60 mJ dan *gap* elektroda busi 0,8 mm yaitu 29,12 % pada bahan bakar biogas dan 27,21 % pada bahan bakar bensin, sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi energi koil dan pada *gap* elektroda busi yang sesuai dapat meningkatkan nilai efisiensi termal (BTE) pada mesin SI.



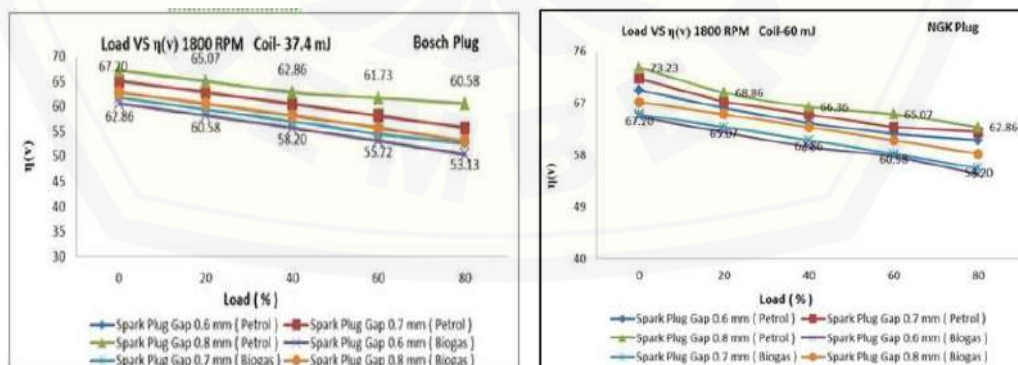
(a)

(b)

(a) energi pengapian koil 27,4 mJ; (b) energi pengapian koil 60 mJ

Gambar 2.33 Pengaruh beban terhadap BTE (Sumber: Joshi dkk., 2015)

Pada gambar 2.34 merupakan hasil pengujian dari pengaruh beban terhadap efisiensi volumetrik bahan bakar biogas dan bensin, pada grafik diperlihatkan nilai efisiensi volumetrik yang berbanding terbalik dengan beban, nilai efisiensi volumetrik bahan bakar biogas menurun dibandingkan dengan bahan bakar bensin pada mesin SI, efisiensi tertinggi terjadi pada bahan bakar bensin sebesar 73,23 % pada kecepatan 1800 rpm, efisiensi volumetrik meningkat seiring dengan meningkatnya energi pengapian koil dan *gap* elektroda busi. pada grafik terjadi peningkatan nilai efisiensi volumetrik pada tegangan koil 60 mJ dan *gap* elektroda 0,8 mm sebesar 5,13 %.



(a)

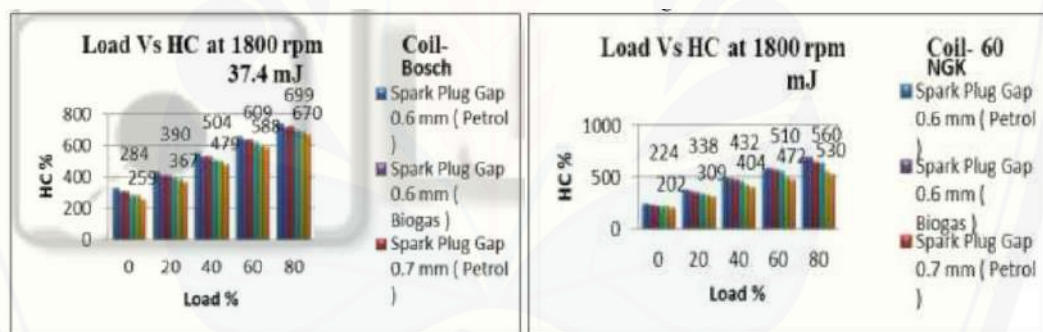
(b)

(a) energi pengapian 37,4 mJ; (b) energi pengapian 60 mJ

Gambar 2.34 Pengaruh beban terhadap efisiensi volumetrik (η)

(Sumber: Joshi dkk., 2015)

Pada gambar 2.35 merupakan grafik emisi gas buang HC yang dihasilkan oleh mesin SI berbahan bakar biogas dan bensin, dari data tersebut disimpulkan bahwa nilai HC berbanding lurus seiring dengan penambahan beban, nilai emisi HC bahan bakar biogas lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan bahan bakar bensin baik dengan energi pengapian koil dan jarak elektroda busi yang sama. Nilai emisi HC tertinggi terjadi pada energi pengapian koil 37,4 mJ dan pada jarak keregangannya elektroda busi 0.6 mm pada bahan bakar bensin dan biogas yaitu sebesar 699 ppm dan 670 ppm, sedangkan nilai HC terendah terjadi pada energi pengapian koil 60 mJ dan *gap* elektroda busi 0.8 pada bahan bakar bensin dan biogas yaitu sebesar 224 ppm dan 202 ppm. Penurunan nilai emisi HC mengalami penurunan sampai 17,56 % dan 21,54 % pada *gap* elektroda busi 0,8 mm dan energi pengapian koil 60 mJ untuk bahan bakar bensin dan biogas.



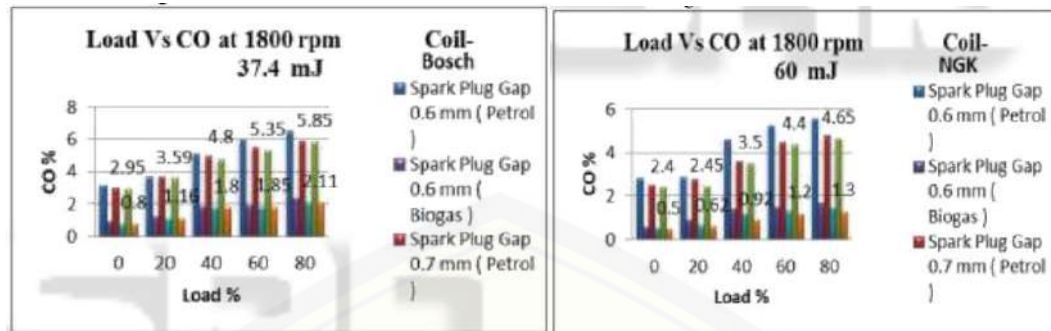
(a)

(b)

(a) energi pengapian koil 37,4 mJ; (b) energi pengapian koil 60 mJ

Gambar 2.35 Emisi gas HC (Sumber: Joshi dkk., 2015)

Pada gambar 2.36 merupakan hasil pengujian dari pengaruh beban terhadap nilai emisi gas CO bahan bakar biogas dan bensin dengan memvariasikan energi pengapian koil dan jarak elektroda busi. Emisi gas CO meningkat seiring dengan bertambahnya beban. Nilai peningkatan emisi gas CO maksimum terdapat pada energi pengapian koil 37,4 mJ dengan *gap* elektroda busi 0,6 mm pada bahan bakar bensin dan biogas yaitu 5,85 % dan 2,11 %. Sedangkan prosentase penurunan nilai emisi gas CO maksimum terjadi pada energi pengapian 60 mJ dengan *gap* elektroda busi 0,8 mm pada bahan bakar bensin dan biogas yaitu 2,4 % dan 0,6 %.



(a)

(b)

(a) energi pengapian koil 37,4 mJ; (b) energi pengapian koil 60 mJ

Gambar 2.36 Emisi gas CO (Sumber: Joshi dkk., 2015)

Dari uraian penelitian Joshi dkk. (2015) dapat disimpulkan bahwa performa dan emisi gas buang mesin SI berbahan bakar biogas dapat ditingkatkan dengan menggunakan tegangan tinggi energi pengapian koil dan dengan menyesuaikan *gap* elektroda busi sehingga didapatkan pembakaran yang sempurna.

2.5 Hipotesa Penelitian

Ditinjau dari penelitian sebelumnya, bahan bakar LPG pada umumnya menghasilkan daya yang lebih rendah dari mesin bensin. Penurunan daya sekitar 5% sampai 10%. Hilangnya daya dapat diperoleh dengan meningkatkan rasio kompresi maupun dengan menerapkan *supercharger* atau *turbocharger*. LPG mempunyai nilai oktan yang lebih tinggi sekitar (115) dibanding dengan mesin bensin (86-94), sehingga dapat mencegah terjadinya *destructive knocking* dan dapat meningkatkan output daya mesin. Semakin tinggi nilai oktan, bahan bakar akan lebih lambat terbakar sehingga perlu adanya pelebaran celah elektroda busi agar dapat mempercepat pembakan, semakin lebar *gap* elektroda busi menyebabkan energi pengapian lebih tinggi dan volume plasma lebih besar, sehingga api lebih banyak kontak dengan bahan bakar. Akibatnya karnel api lebih cepat dikembangkan, mempercepat fraksi massa yang terbakar dan menghasilkan tingkat pelepasan panas yang lebih cepat. Namun *gap* yang semakin lebar memerlukan tekanan injeksi yang lebih tinggi untuk meningkatkan perkembangan karnel api

agar lebih stabil dan tegangan pengapian yang lebih besar agar tidak terjadi *collab* (kehilangan api listrik). Dari latar belakang tersebut, penulis melakukan penelitian tentang pengaruh *gap* elektroda busi terhadap kinerja motor bakar 4 langkah berbahan bakar LPG. Ogola dan Korir (2010) melakukan penelitian dengan *gap* 0,6 mm sampai dengan 1.1 mm pada mobil 2500 cc berbahan bakar LPG, dan didapatkan *gap* elektroda busi yang paling optimal adalah 0,8 mm. Sehingga dengan variasi *gap* elektroda busi (0,6 mm, 0,7 mm, 0,8 mm dan 0,9 mm) penulis dapat mengetahui tiap perubahan karakter baik dilihat dari nilai daya, emisi gas buang maupun konsumsi bahan bakar. Dari *gap* elektroda busi yang terlalu sempit (0,6 mm) diduga hal tersebut berakibat pada nilai daya yang semakin rendah karena luas area karnel api kecil dan waktu penyebaran api semakin lama, sehingga pada akhir langkah proses ekspansi, masih menyisahkan bahan bakar yang tidak dapat terbakar, hal tersebut dapat menyebabkan nilai emisi gas buang HC maupun CO akan naik dan laju aliran massa bahan bakar meningkat karena tidak sempurnanya proses pembakaran. Begitu sebaliknya, pada *gap* elektroda busi yang terlalu lebar (0,9 mm) diduga terjadi kehilangan percikan api (*collab*) karena kurangnya rasio kompresi dan energi pengapian yang dibutuhkan, sehingga menyebabkan pembakaran tidak sempurna. Dari masing-masing variasi *gap* elektroda busi, diduga nilai daya, emisi gas buang dan konsumsi bahan bakar yang paling optimal terjadi pada *gap* elektroda busi 0,7 mm dan 0,8 mm.

BAB 3. METODOLOGI

3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian dapat diartikan sebagai suatu cara ilmiah guna mendapatkan data secara valid yang bertujuan untuk menemukan, mengembangkan dan membuktikan suatu pengetahuan yang selanjutnya dapat digunakan untuk memahami, memecahkan dan mengantisipasi suatu masalah sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai. Penelitian ini menggunakan metode penelitian eksperimental.

Metode eksperimental adalah suatu penelitian yang dilakukan terhadap variabel dengan data-data yang belum ada sehingga diperlukan proses manipulasi dengan memberikan perlakuan tertentu pada obyek penelitian serta dengan kontrol yang diukur dampak dari perlakuan tersebut (Jaedun, 2011). Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan jarak elektroda busi dan kecepatan putaran mesin dengan melakukan 3 kali pengulangan percobaan, masing-masing variasi dilakukan pengujian performa mesin meliputi torsi dan daya, laju aliran massa bahan bakar dan emisi gas buang (HC, CO, CO₂ dan O₂). Pengukuran jarak celah elektroda busi menggunakan *fuller*. Voltase input dari koil dianggap tetap. Tekanan *intake* dan *exhaust* ruang bakar diketahui dengan menggunakan sensor MPX 5100 DP untuk mengetahui perubahan tekanan pada setiap pengujian. Pemindahan bahan bakar LPG 12 kg dari berat tabung 15,1 kg ke tabung isobutane yang mempunyai berat tabung 144 gr dengan alat adaptor gas sehingga memudahkan dalam penimbangan gas ketika pengujian konsumsi bahan bakar. Alat pengubah sistem bahan bakar bensin ke bahan bakar gas melalui karburator menggunakan alat konverter kit.

3.2 Waktu dan Tempat

3.2.1 Waktu

Penelitian yang dilakukan oleh penulis mengenai “Pengaruh *Gap* Elektroda Busi Terhadap Kinerja Motor Bakar 4 Langkah Berbahan Bakar LPG” akan dilakukan selama 6 bulan, yang dimulai pada bulan Maret 2017 sampai dengan Agustus 2017.

3.2.2 Tempat

Perancangan, pembuatan dan pengujian alat dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Fakultas Teknik Universitas Jember Jln. Slamet Riyadi No. 62 Patrang Jember.

3.3 Alat dan Bahan

3.3.1 Alat

- a. Mesin yang digunakan dalam pengujian yaitu motor Honda Astrea Prima tahun 1991 dengan spesifikasi sebagai berikut:

Tipe Mesin	: 4 Langkah,
Kapasitas	: 97 cc
Bore x stroke	: 50 x 49,5 mm
Rasio Kompresi	: 9,0 : 1
Max. power	: 8,9 ps @ 8000 rpm
Max. torsi	: 0,93 kgf.m @ 6000 rpm
Pendingin	: udara
Karburator	: keihin 16 mm
Transmisi	: 4 speed (N-1-2-3-4) rotary
Kopling	: manual, basah, multiplat
Starter	: electric dan kick.
Kelistrikan	
Baterai	: 12 v – 4 Ah
Busi	: C7HSA
Koil	: KGD FL503CDI
Pengapian	: CDI-AC

Dimensi

Panjang x lebar x tinggi : 1915 x 705 x 1076 mm

Jarak sumbu roda : 1234 mm

Kapasitas oil mesin : 0,9

Tangki BBM : 3,7 liter

Berat : 93 kg

Ban Depan : 2.25 – 17”

Ban Belakang : 2.50 – 17”

Rem Depan dan Belakang : drum (tromol)

- b. Motor *electric dynamometer*
- c. Tabung LPG ukuran 12 kg Produksi PT Pertamina Indonesia dengan berat tabung 15,1 kg
- d. Tabung Isobutane berat tabung 144 gram.
- e. *Exhaust gas analyzer*
 - Merk mesin : TEXA, Italy.
 - Tipe : GASBOX Autopower, MULTIEGASO.
- f. Sensor MPX 5100 Differential Pressure
- g. Multimeter digital
- h. Regulator tekanan tinggi
- i. Adaptor gas
- j. Selang gas LPG
- k. Kran membran
- l. Kran pembagi
- m. *Fuller*
- n. Blower
- o. Komputer
- p. Timbangan digital
- q. *Tool set*
- r. *Stopwatch*

3.3.2 Bahan

- a. Bahan bakar LPG (*Liquified Petroleum Gas*) sebanyak 12 kg yang diproduksi oleh PT Pertamina Indonesia dengan nilai propana 50 % dan butana 50 %.
- b. *Spark plug* (busi) merk NGK C7HSA sebanyak 4 buah dengan spesifikasi sebagai berikut:

1. *Shell*:

- *Thread size: 10 mm*
- *Thread pitch: 1.0 mm*
- *Seat type: gasket*
- *Resistor: No*
- *Reach: 12.7 mm*
- *Terminal type: threaded stud*
- *Overall height: ISO*
- *Gap: 0,7 mm*

2. *Center electrode*:

- *Material: Nickel*
- *Type: Standard*
- *Size: 2.5 mm*

3. *Ground Electode*

- *Material: Nickel*
- *Type: Standard*

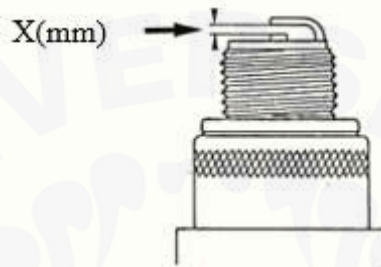
3.4 Variabel Penelitian

Variabel penelitian merupakan sesuatu yang ditetapkan oleh peneliti untuk dipelajari guna memperoleh informasi mengenai kajian dari penelitian tersebut yang selanjutnya ditarik sebuah kesimpulan.

3.4.1 Variabel Bebas (Independen)

Variabel bebas yaitu variabel yang bebas ditentukan oleh peneliti dalam rangka untuk menerangkan hubungannya dengan fenomena yang diobservasi. Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini adalah *gap* elektroda busi

dengan panjang 0,6 mm, 0,7 mm, 0,8 mm, dan 0,9 mm. Pemilihan variasi tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Ogola dan Korir (2010) yang melakukan variasi *gap* 0,6 mm sampai 1,1 mm pada mobil berbahan bakar LPG dan didapatkan *gap* elektroda maksimal pada 0,8 mm, sedangkan *gap* elektroda tersebut belum diteliti lebih lanjut. Variabel kedua adalah kecepatan udara yang digunakan adalah 3000 rpm, 4000 rpm, 5000 rpm, 6000 rpm dan 7000 rpm sesuai dengan spesifikasi putaran maksimum motor dan rentan minimum alat uji.



Gambar 3.1 Gap elektroda busi (X) (Sumber: Jama dkk., 2008)

3.4.2 Variabel Terikat

Merupakan variabel yang besarnya tidak dapat ditentukan sepenuhnya oleh peneliti, tetapi besarnya tergantung dengan variabel bebasnya. Variabel terikat dalam penelitian kali ini adalah:

- a. Torsi
- b. Tekanan campuran bahan bakar dan udara ketika memasuki ruang bakar
- c. Tekanan gas buang hasil pembakaran
- b. Laju aliran bahan bakar
- c. Emisi gas buang (CO, HC, CO₂ dan O₂)

3.5 Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian ini dilaksanakan menggunakan 2 faktor dimana faktor yang pertama adalah *gap* elektroda busi dan faktor kedua yaitu putaran mesin. *Gap* elektroda busi menggunakan 4 variasi sedangkan faktor putaran mesin menggunakan 5 variasi, sehingga terdapat 20 kombinasi perlakuan dengan 3 kali pengulangan.

Faktor I: *Gap* elektroda busi (X):

- $X_1 = 0,6$ mm
- $X_2 = 0,7$ mm
- $X_3 = 0,8$ mm
- $X_4 = 0,9$ mm

Faktor II: Putaran Mesin (N)

- $N_1 = 3000$ rpm
- $N_2 = 4000$ rpm
- $N_3 = 5000$ rpm
- $N_4 = 6000$ rpm
- $N_5 = 7000$ rpm

Sehinga diperoleh kombinasi perlakuan sebagai berikut:

Perlakuan	X_1	X_2	X_3	X_4
N_1	X_1N_1	X_2N_1	X_3N_1	X_4N_1
N_2	X_1N_2	X_2N_2	X_3N_2	X_4N_2
N_3	X_1N_3	X_2N_3	X_3N_3	X_4N_3
N_4	X_1N_4	X_2N_4	X_3N_4	X_4N_4
N_5	X_1N_5	X_2N_5	X_3N_5	X_4N_5

3.6 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian merupakan suatu rangkaian kegiatan yang dilakukan oleh peneliti secara terstruktur dan sistematis guna mencapai tujuan penelitian. Prosedur penelitian ini diawali dengan langkah penyusunan alat penelitian. Setelah semua telah didapatkan, dilanjutkan dengan tahapan penelitian yang meliputi tahap pengujian, pengambilan data dan pengolahan hasil penelitian.

3.6.1 Persiapan dan Pemeriksaan Alat Pengujian

Persiapan alat pengujian ini meliputi persiapan alat dan bahan, baik melalui tahap pembelian, penyewaan, perakitan sampai proses pemodifikasian alat. Setelah alat dan bahan terkumpul, perlu adanya pemeriksaan meliputi kesiapan dan kelengkapan alat uji agar bekerja sesuai dengan sistem pengujian. Adapun tahap persiapan dan pemeriksaan alat dalam penelitian ini meliputi:

- a. Merangkai komponen *converter kit* sesuai dengan perancangan
- b. Memasang alat multimeter digital untuk mengetahui voltase masukan pada kumparan primer koil
- c. Merancang dan memasang alat ukur tekanan *intake* dan *exhaust* ruang bakar dengan sensor MPX 5100 DP sesuai dengan perancangan
- d. Memindahkan gas LPG dari tabung 12 kg ke dalam tabung isobutene 144 gram dengan menggunakan alat adaptor gas
- e. Melakukan pengecekan motor yang akan digunakan sesuai dengan standart pengujian
- f. Menyiapkan dan memeriksa alat uji *dyno test*, *gas analyzer* dan alat lainnya agar bekerja maksimal

3.6.2 Tahap Pengambilan data

Tahap pengambilan data dilakukan dengan cara mengukur variabel bebas dan variabel tetap saat pengujian. Tahapan yang dilakukan untuk pengambilan data adalah sebagai berikut:

- a. Pengujian performa mesin
 1. Merangkai dan mengecek kembali semua alat komponen pengujian, meliputi alat ukur voltase input, alat uji tekanan, *converter kit* dan alat uji *dyno test*
 2. Melakukan penyetelan *gap* elektroda busi pada (X mm) dengan *fuller*
 3. Menjalankan alat uji *Dyno Test* sesuai dengan prosedur pengujian
 4. Menghidupkan mesin dan memosisikan gas stabil pada putaran gas *idle* dan setelah itu memosisikan bukaan *throttle* penuh hingga terjadi putaran mesin maksimum pada transmisi gigi 3
 5. Mesin dimatikan
 6. Pengambilan data terhitung pada waktu bukaan throtel penuh pada putaran mesin 3000 rpm sampai dengan putaran mesin maksimum
 7. Pengambilan data berupa waktu pengujian, data perubahan tekanan yang terjadi pada saluran *intake* dan *exhaust* ruang bakar dan data hasil pengujian berupa torsi dan daya pada layar komputer
 8. Pengambilan data dilakukan 3 kali pegulangan pengujian pada variabel yang sama.

9. Mengubah variabel *gap* elektroda busi (X mm) dan mengulangi langkah 1-8 pada setiap percobaan.
- b. Pengujian laju aliran massa bahan bakar
 1. Merangkai dan mengecek kembali semua alat komponen pengujian, meliputi alat ukur voltase input, alat uji tekanan dan *converter kit*
 2. Melakukan penyetelan *gap* elektroda busi (X mm) dengan *fuller*
 3. Memasang tabung LPG pada alat *converter kit*
 4. Meletakkan tabung LPG ke atas timbangan digital untuk mengetahui massa awal saat pengujian berlangsung
 5. Menyiapkan *stopwatch* untuk menghitung waktu yang diperlukan, jika diketahui massa bahan bakar LPG dalam satu kali pengujian adalah 20 gram
 6. Menghidupkan mesin dan memposisikan gas stabil pada putaran mesin (N rpm) dengan posisi transmisi gigi 3
 7. Menghentikan *stopwatch* dan mencatat waktu yang diperlukan, jika massa LPG sudah berkurang 20 gram
 8. Mematikan mesin
 9. Pengambilan data berupa data konsumsi bahan bakar per detik, voltase input dan data perubahan tekanan pada *intake* dan *exhaust* ruang bakar
 10. Pengambilan data dilakukan 3 kali pengulangan pengujian dengan variabel yang sama
 11. Mengulangi langkah 1-10, dengan mengubah variabel *gap* elektroda busi (X mm) dan putaran mesin (N rpm).
- c. Pengujian emisi gas buang
 1. Merangkai dan mengecek kembali semua alat komponen pengujian, meliputi alat ukur voltase input, alat uji tekanan, *konverter kit* dan alat uji *Gas Analyzer*
 2. Melakukan penyetelan *gap* elektroda busi (X mm) dengan *fuller*
 3. Pemasangan alat *gas analyzer* dan penyambungan perangkat *auto gas analyzer* ke computer
 4. Pengujian dilakukan pada posisi gigi 3

5. Menghidupkan mesin dan memposisikan gas stabil pada putaran mesin N rpm dengan waktu pengujian selama 1 menit
6. Pengambilan data berupa perubahan tekanan yang terjadi pada saluran *intake* dan *exhaust* ruang bakar dan data hasil pengujian berupa kadar emisi gas buang (CO, HC, CO₂ dan O₂) pada layar komputer
7. Mematikan mesin
8. Pengambilan data dilakukan 3 kali pengulangan pengujian pada setiap variabel yang sama
9. Mengulangi langkah pengujian 1-8 dengan mengubah variabel *gap* elektroda busi (X mm) dan putaran mesin (N rpm).

Tabel 3.1 Pengambilan data pengujian emisi gas buang

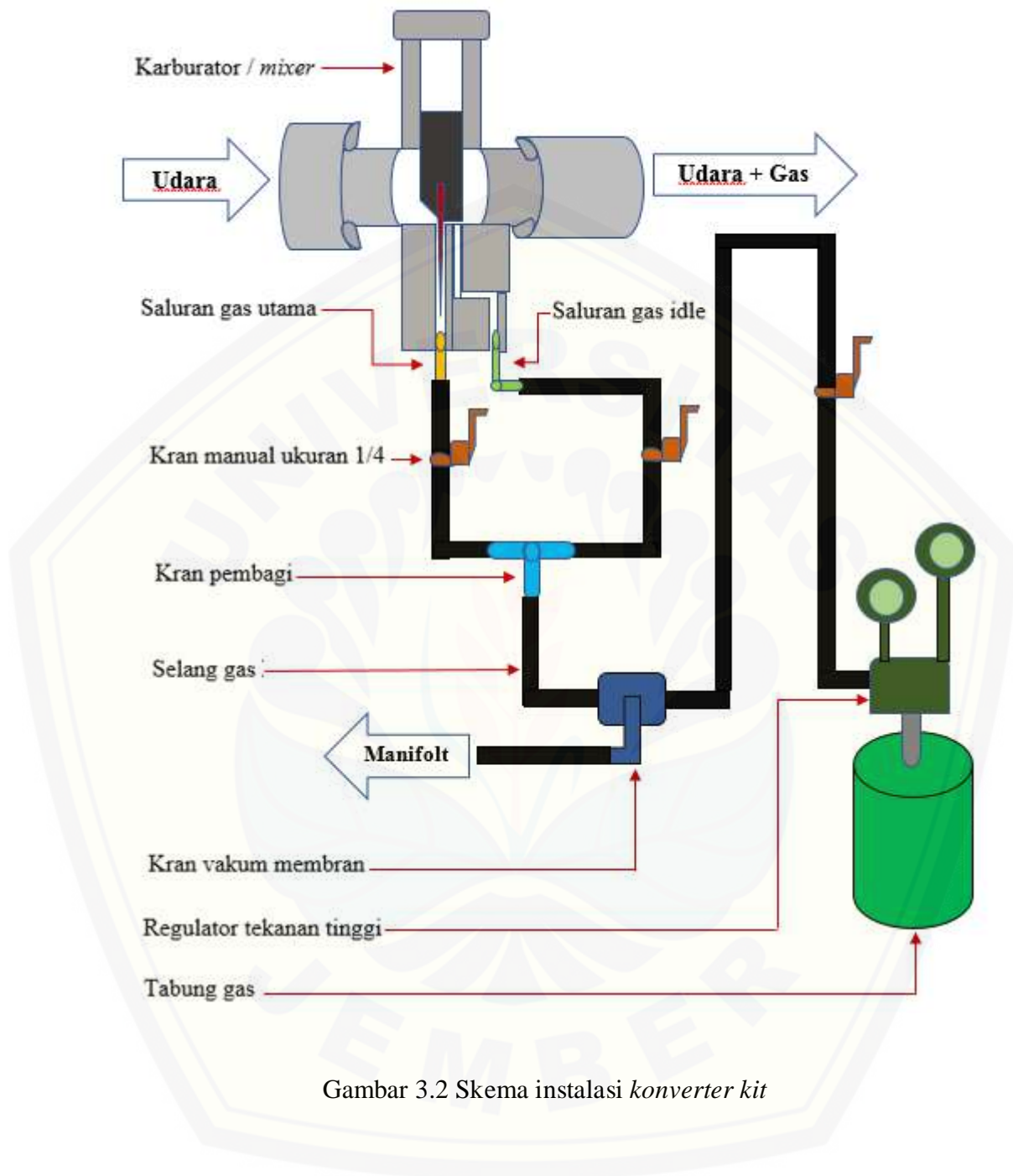
NO	Gap Elektroda Busi (X)	rpm (N)	Energi Pengapian Input (E)	Percobaan	CO (%)	HC (%)	CO ₂ (%)	P _{in} (kPa)	P _{out} (kPa)
1	X ₁	N ₁		Pertama					
	X ₁	N ₁		Kedua					
	X ₁	N ₁		Ketiga					
2	X ₂	N ₁		Pertama					
	X ₂	N ₁		Kedua					
	X ₂	N ₁		Ketiga					

Tabel 3.2 Pengambilan data pengujian laju aliran massa bahan bakar

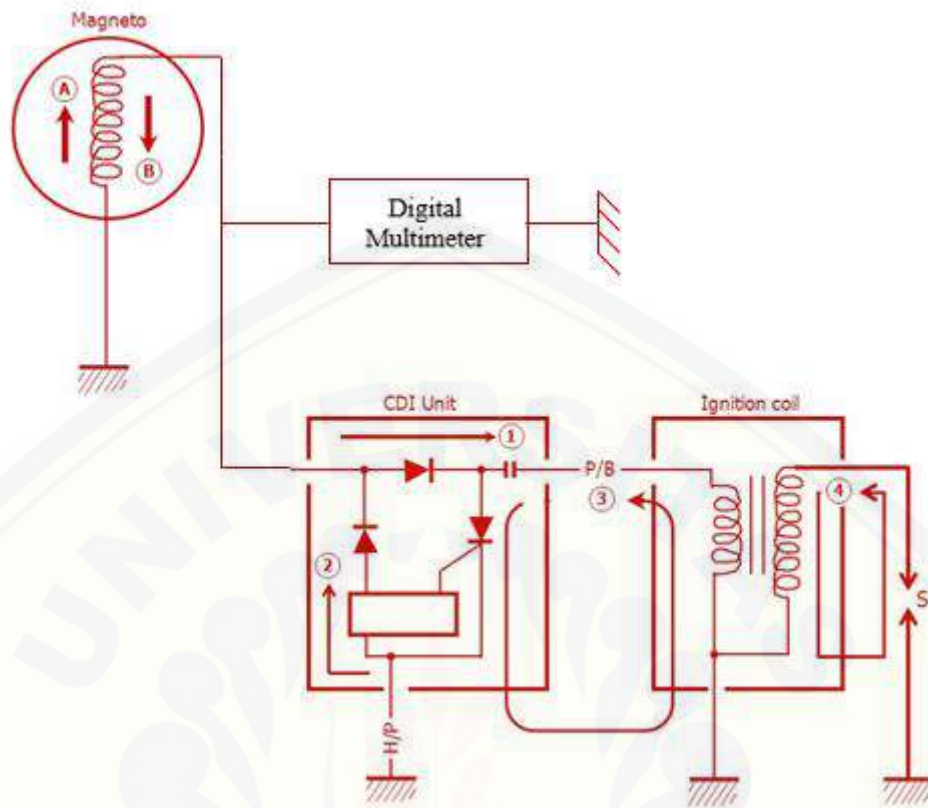
NO	Gap Elektroda Busi (X)	rpm (N)	Energi Pengapian Input (E)	Percobaan	Massa (gram)	Waktu (detik)	P _{in} (kPa)	P _{out} (kPa)
1	X ₁	N ₁		Pertama	20			
	X ₁	N ₁		Kedua	20			
	X ₁	N ₁		Ketiga	20			
2	X ₂	N ₁		Pertama	20			
	X ₂	N ₁		Kedua	20			
	X ₂	N ₁		Ketiga	20			

Tabel 3.3 Pengambilan data pengujian performa mesin

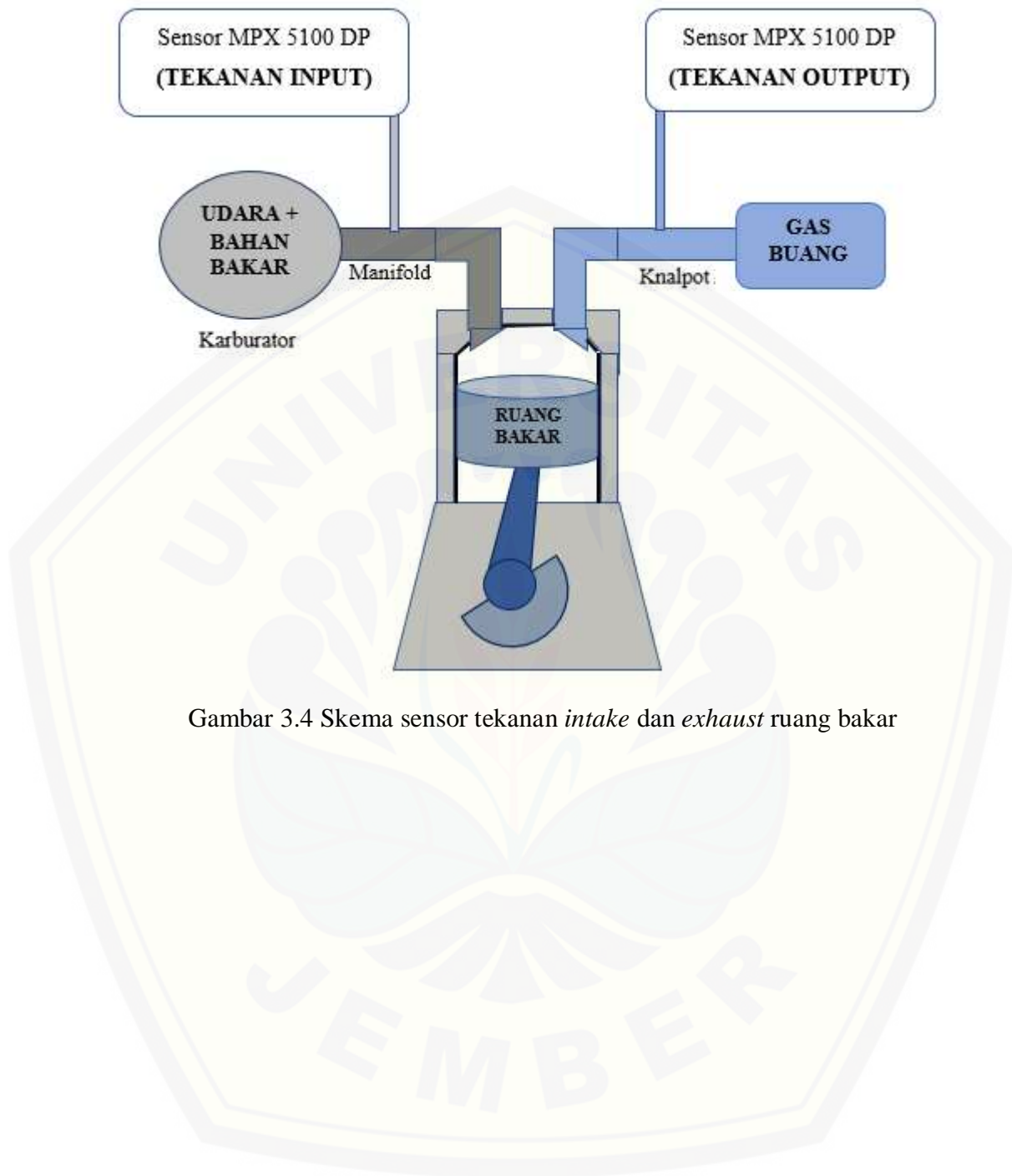
NO	Gap Elektroda Busi (X)	rpm (N)	Energi Pengapian Input (E)	Percobaan	Waktu (s)	Torsi (N.m)	Daya (kW)	P _{in} (kPa)	P _{out} (kPa)
1	X ₁	3000		Pertama					
	X ₁	s/d		Kedua					
	X ₁	7000		Ketiga					
2	X ₂	3000		Pertama					
	X ₂	s/d		Kedua					
	X ₂	7000		Ketiga					



Gambar 3.2 Skema instalasi konverter kit

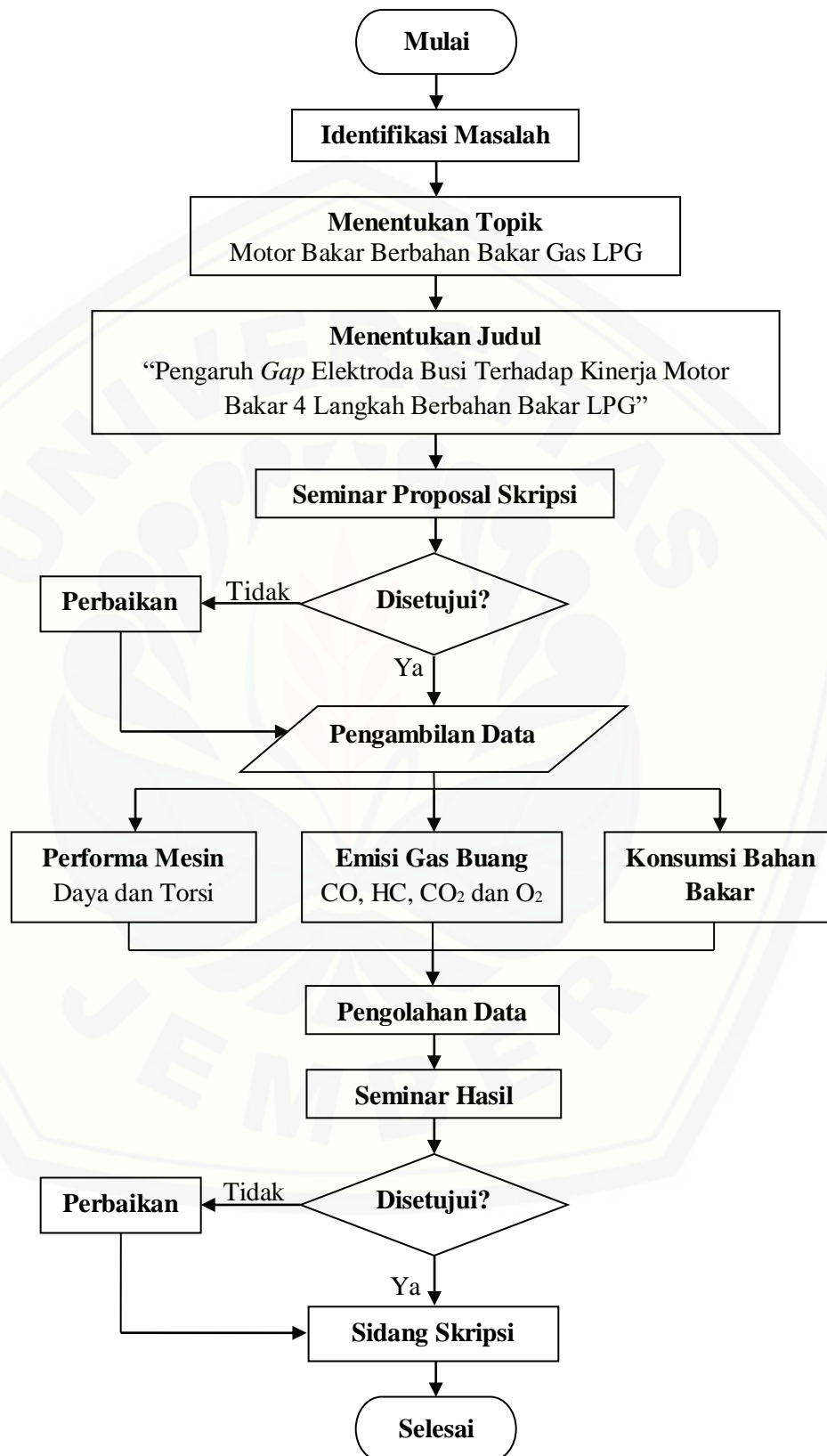


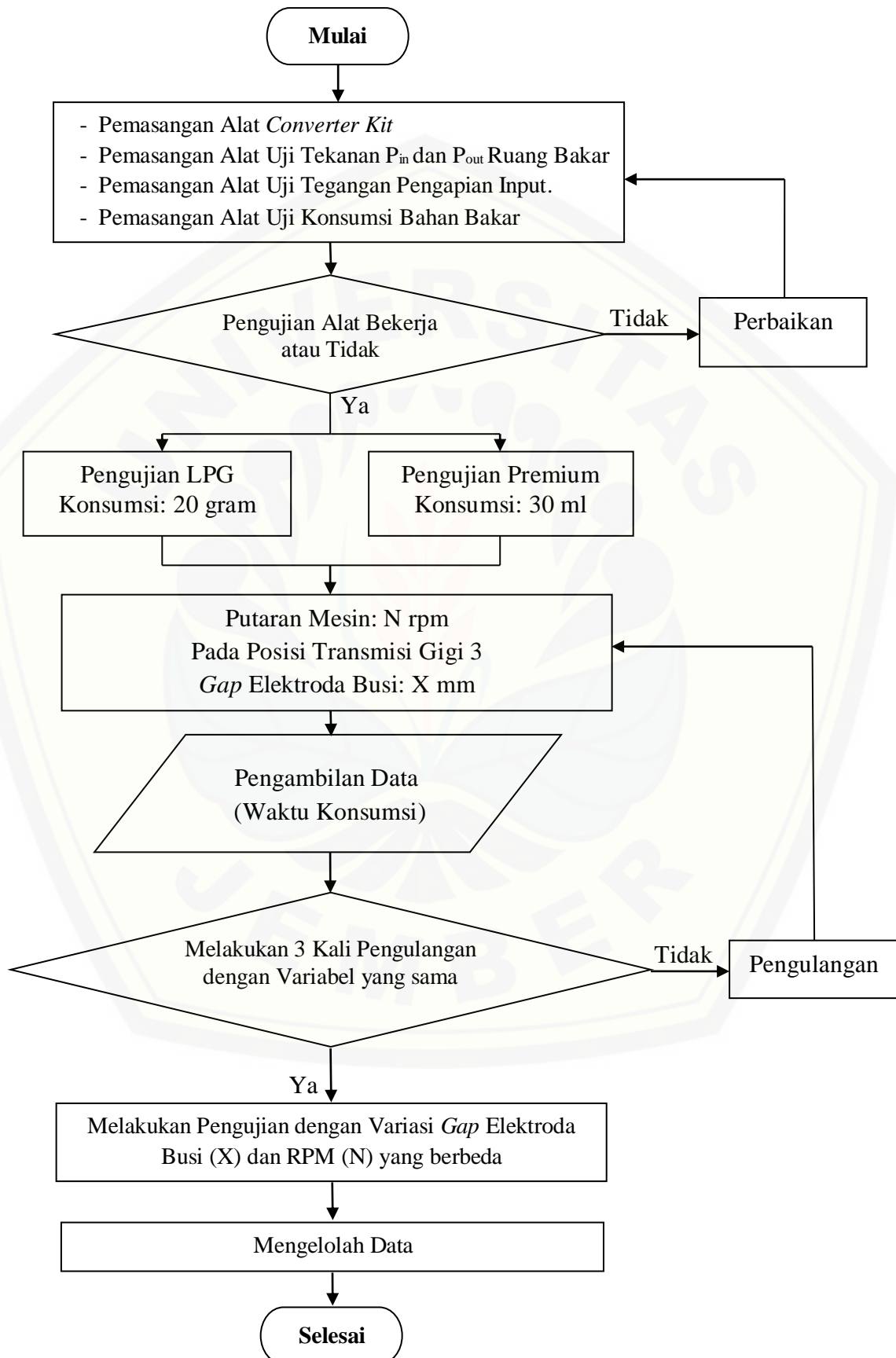
Gambar 3.3 Skema pengukuran voltase CDI AC



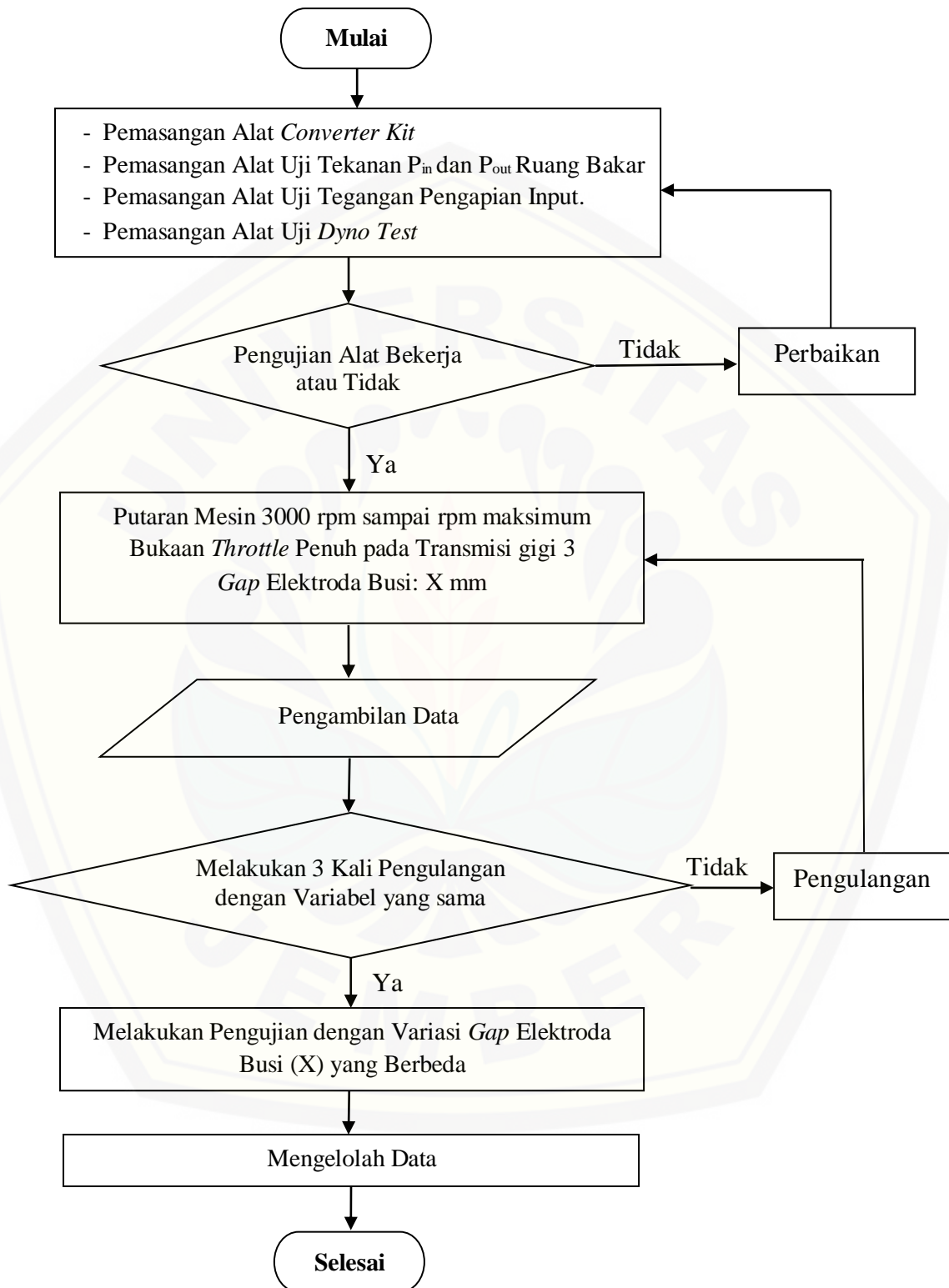
Gambar 3.4 Skema sensor tekanan *intake* dan *exhaust* ruang bakar

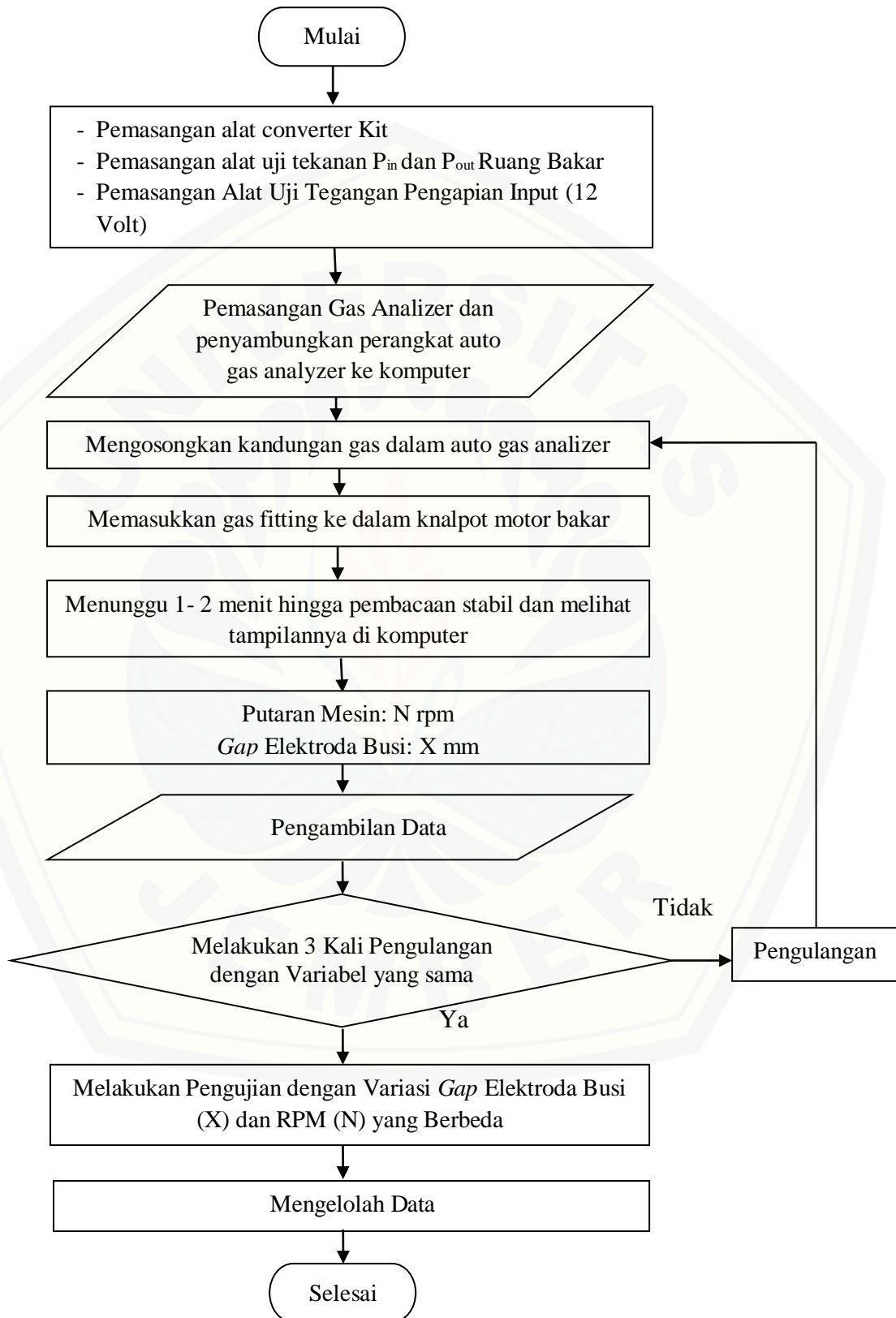
3.7 Skema Flow Chart Alur Penelitian



3.8 Skema Flow Chart Pengujian Laju Aliran Massa Bahan Bakar

3.9 Skema Flow Chart Pengujian Performa Mesin



3.10 Skema Flow Chart Pengujian Emisi Gas Buang

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasar analisis dan data-data yang diperoleh dari hasil pengujian dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Penggunaan bahan bakar LPG pada motor bakar 4 langkah dengan pengaturan celah elektroda busi dapat meningkatkan nilai daya. Daya optimal terjadi pada *gap* elektroda busi 0,8 mm, hal ini terjadi karena pada *gap* elektroda yang lebar, karnel api lebih cepat dikembangkan, mempercepat fraksi massa yang terbakar dan menghasilkan tingkat pelepasan panas yang lebih cepat. Begitu sebaliknya, pada *gap* yang sempit menghasilkan inti api kecil, luas area karnel api lebih sempit dan lambatnya perkembangan karnel api sehingga sering terjadi *blackfire* dan *knocking* yang dapat menurunkan nilai daya. Namun pada *gap* elektroda busi yang lebar menuntut tegangan pengapian dan tekanan kompresi yang lebih besar.
2. *Gap* elektroda busi mempengaruhi nilai emisi gas buang CO dan HC pada hasil pembakaran. Jarak celah elektroda 0,8 mm menghasilkan emisi CO lebih rendah karena *flame area* yang ditimbulkan lebih stabil dengan area karnel api lebih luas sehingga tidak terjadi deposit karbon yang tersisa pada proses pembakaran dan menyebabkan terbentuknya emisi gas CO. *Gap* elektroda busi 0,8 mm juga menghasilkan nilai emisi HC lebih rendah dibandingkan dengan *gap* yang lainnya, *gap* yang sempit menyebabkan tekanan efektif rata-rata (IMEP) rendah, luasan karnel api sempit sehingga tidak tercapai suhu pembakaran yang diinginkan, hal tersebut berdampak pada meningkatnya emisi HC. *Gap* elektroda busi yang terlalu lebar menuntut tekanan kompresi dan energi pengapian yang lebih tinggi agar area penyebaran api lebih stabil tanpa adanya deposit karbon yang tersisa dan tidak terjadi kegagalan percikan api listrik (*collab*). Sehingga dua hal tersebut merupakan penentu dalam pemilihan *gap* elektroda busi agar terjadi

pembakaran sempurna dan dapat meminimalisir terbentuknya emisi gas buang yang berbahaya bagi kesehatan manusia.

3. *Gap* elektroda busi mempengaruhi laju aliran massa bahan bakar, *gap* elektroda busi yang lebar dapat memperluas area karnel api, mempersingkat durasi penyebaran percikan dan menyebabkan banyaknya volume campuran bahan bakar dan udara yang terpapar percikan. Sehingga dapat mengoptimalkan seluruh bahan bakar menjadi nilai daya tanpa adanya bahan bakar yang tersisa diakhir proses pembakaran.

5.2 Saran

Saran yang dapat diambil pada penelitian kali ini adalah:

1. Untuk mendapatkan nilai torsi dan daya maksimal pada bahan bakar LPG, perlu adanya penelitian lebih lanjut dengan menambahkan tekanan kompresi di ruang bakar.
2. Karakter pembakaran LPG merupakan pembakaran kering, sehingga perlu adanya media pendingin yang sesuai sehingga tidak terjadi pijaran pada busi yang memungkinkan terjadi penyalaan dini.
3. Perlu adanya uji kelayakan *converter kit* bahan bakar LPG yang *portable* pada kendaraan bermotor, sehingga pengaturan gas lebih stabil pada saat deselerasi maupun akselerasi dan tidak terjadi kebocoran gas
4. Pada saat dilakukan pengujian terjadi pengembunan pada sisi luar tabung LPG, sehingga perlu adanya mekanisme pemanas untuk menghindari penurunan tekanan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aditya, P dan Arijianto, Ir. MT. 2012. Pengujian Menggunakan Katalisator Broquet Terhadap Emisi Gas Buang Mesin Sepeda Motor 4 Langkah. *Thesis*. Universitas Diponegoro. <http://eprints.undip.ac.id/41573/>.
- Andersson. J, Collier. A, Garrett. M, Wedekind. B. 1999. *Particle and Sulphur Species as Key Issues in Gasoline Direct Injection Exhaust*. Nippon Kikai Gakkai: 15,449-52.
- Anton. 2013. Perbandingan Gas Buang Kendaraan Bermotor Berbahan Bakar Bensin dan LPG dengan Konverter KIT Dual Fuel Sebagai Pengatur LPG Pada Motor Bermesin 150 cc. *Skripsi*. Semarang: Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.
- Anyon, P. 2003. *LPG - The Clean Transport Alternative: Presenting the Environmental Case*. Australian Liquefied Petroleum Gas Association Limited: ISBN: 0 9750843 2 1. Sydney.
- Arcoumanis. C, Bae. C. 1993. *Visualization of Flow/Flame Interaction in a Constant – Volume Combustion Chamber*. SAE Technical Paper: 1999-01-3651.
- Arijianto dan Usman, M.B.I. 2015. *Penggunaan Gas Sebagai Bahan Bakar Pada Sepeda Motor Bermesin Injeksi*. *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTTM XIV)*. 7-8 Oktober 2015. Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Labung Mangkurat:10.
- Badan Pusat Statistik. 2016. *Perkembangan Jumlah Kendaraan Bermotor Menurut Jenis tahun 1987-2013*. Jakarta: BPS Indonesia.
- Badawy. T, Bao. X, Hongming. X. 2017. *Impact of Spark Plug Gap on Kernal Propagation and Engine Performance*. *Applied Energy*: 311-327.
- BP Statistical Review. 2016. *BP Statistical Review of World Energy June 2016*. June. London: BP Statistical Review World.
- Brown. A. G. 1991. *Measurement and Modelling of Combustion in s Spark Ignition Engine*. *Theses*. Brunel University Shool of Engineering and Design PhD.

- Burgett, R, Leptich, J, Sangwan, K. 1972. *Measuring the Effect of Spark Plug and Ignition System Design on Engine Performance*. SAE Technical Paper: 720007.
- Ceper, B. A. 2012. *Experimental Investigation of the Effect of Spark Plug Gap on a Hydrogen Fueled SI Engine*. International Journal of Hydrogen Energy 37: 17310 – 17320.
- Cevis, M.A., Yuksel, F. 2005. Cyclic variation on LPG and gasoline-fuelled lean burn SI engine, Renewable Energy 31 (2006): 1950-1960.
- Dziubinski, M, Walusiak, S, Pietrzyk, W. 2007. *Testing of Ignition Systems In a Car Run On Various Fuels*. TEKA KOM.mot.Energ. Roln-ol PAN, 7: 97-104.
- Erkus, B. Surmen, A. Karamangil, M.I. 2013. *A Comparative Study of Carburation and Injection Fuel Supply Methods in an LPG – Fuelled SI Engine*. Fuel. Vol. 107: 511 – 517.
- Esteves, G.R.T and Barbosa, S.P.C.S. 2007. *Correlation Between Pollutants Emission and Inhabitants Morbidity*. Paper presented to Pripode Workshop on Urban Population. 11 – 13 June 2007. Nairobi Kenya.
- Gupta. H. N. 2012. *Fundamentals of Internal Combustion Engines*. PHI Learning Pvt. Ltd.
- Guzzella, L dan Onder, C.H. 2004. *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine System*. Springer. Heidelberg.
- Heywood J.B. 1998. *International Combustion Engine Fundamentals*. United States: MC Graw Hill.
- Heywood, J and Bandvadeker. 2004. *Assessment of future ICE and fuel cell powdered vehicles, and their potential impacts 10th annual Diesel engines Emission Reduction*. 29 August – 2 September. San Diego: USA.
- IEA ETSAP, 2010, *Automotive LPG and Natural Gas Engines*, Technology Brief T03 – April 2010 - www.etsap.org.
- Ishii, K, Ysukamoto, T, Ujiie, Y, Kono, M. 1992. *Analysis of Ignition Mechanism of Combustible Mixtures by Composite Spark*. Combust Flame: 91, 153-64.

- Jama, J. 2008. *Teknik Sepeda Motor Jilid 2*. Buku Sekolah Elektronik. Jakarta. ISBN: 978-979-060-145-1.
- Jeonghoon. S, Youngho. S, Myoungcho. S. 2000. *Effects of Ignition Energy and System on Combustion Characteristics in a Constant Volume Combustion Chamber*. SAE, 2000-05-0016.
- Joshi, A.B., Umrigar, P.B., Patel, A.B., Patel K.A. 2015. *Effect of Compression Ratio and Ignition Energy on Performance and Emission for Dedicated 4-Stroke S.I Engine Fuelled with BIOGAS – A Technical Review*. IJSRD (International Journal for Scientific Research & Development). Vol. 3, Issue 04, 2015. ISSN: 2321-0613
- Kalra, D., Dr.Veeresh, B.A., Kumar, M.V. 2014. *Effects of LPG on the performance and emission characteristics of SI engine - An Overview*. IJEDR1403019. Volume 2, Issue 3, ISSN: 2321-9939: 2997 – 3003.
- Kristanto, P. 2015. *Motor Bakar Torak Teori dan Aplikasinya*. Buku Teknik. Yogyakarta.
- Markus. 2013. *Pengaruh Gap Elektroda Busi Terhadap Kinerja Mesin Sepeda Motor Satu Silinder 4 Langkah Berbahan Bakar Bensin*. Jurnal Refigrasi, Tata Udara, dan Energi. Vol. 7. No. 1. Politeknik Negeri Bandung.
- Machmud, S dan Irwan, Y.G. 2011. *Dampak Celah Keregangan Elektrode Busi Terhadap Kinerja Motor Bensin 4 Tak*. Jurnal Teknik. Vol 1. No. 2. Oktober. ISSN 2088 - 3676: 103 – 109.
- Mahmud, R dan Sungkono, D. 2016. *Komparasi Penggunaan bahan Bakar Premium Dengan bahan Bakar LPG Sistem Manifold Injeksi Terhadap Kadar Emisi Gas Buang Sepeda Motor 4 Langkah*. Skripsi. Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya.
- Mustafa, K.F and Briggs, G.H.W. 2009. *Liquid Petroleum Gas (LPG) as an Alternative Fuel in Spark Ignition Engine: Perfoemace and Emission Characteristic*. IEEE Energy and Environment. ISBN: 978-1-4244-5144-9.2010. 189-194.

- Myung, C.L., Choi, K., Kim, J., Lim, Y., Lee J and Park, S. 2012. *Comparative study of regulated and unregulated toxic emissions characteristics from a spark ignition direct injection light-duty vehicle fueled with gasoline and liquid phase LPG (liquefied petroleum gas)*. Journal Energy 44: 189 – 196.
- Nasir, M. 2014. Potret Kinerja Migas Indonesia. Buletin Info Risiko Fisikal. Edisi 1. annasiru@gmail.com.
- Nuramal, A dan Suryono, A.F. 2014. *Analisa Pengaruh Jarak Celah Elektroda Busi Terhadap Performa Motor Bakar 4 Langkah Studi Kasus Pada Motor Bakar Honda GX-160*. Jurnal Teknosia. Vol.01. No. 14. Tahun VIII. Maret. ISSN: 1978 – 8819.
- Ogola, W dan Korir, J. 2010. Performance and Emission Characteristics of Spark Ignition Engines Based on Engine Operating Parameters. *Thesis*. Egerton: Philosophy in Energy Engineering of Egerton University.
- Ozdor, N, Dulger, M, Sher, E. 1994. *Cyclic Variation in Spark Ignition Engine – a Literature Survey*. SAE Paper: 01-0224.
- Pourkhesalian, A.M. Shamekhi, A.H. Salimi, F. 2009. *Performance and Emissions Comparision and Investigation Alternative Fuels in SI Engines*. SAE International. ISSN: 0148-719.1.
- Pulkrabek, W.W. 1985. *Engineering Fudamentals of the Internal Combustion Engine*. New Jersey
- Pundkar, A.H. Lawankar, S.M. Deshmukh, Dr.S. 2012. *Performance and Emissions of LPG Fueled Internal Combustion Engine: A Review*. International Journal of Scientific & Engineering Research. Vol. 03. Issue. 03. March. ISSN: 2229-5518.
- Rohmat, T.A dan Saptoadi, H. 2003. *Pengaruh Waktu Penyalaan Terhadap Kinerja Spark-Ignition Engine Berbahan Bakar LPG*. Media Teknik. No. 03. ISSN: 0216 – 3012.

- Romandoni, N. dan Siregar, I.H. 2012. *Studi Komparasi Performa Mesin dan Kadar Emisi Gas Buang Sepeda Motor Empat Langkah Berbahan Bakar Bensin dan LPG*. Surabaya: Penelitian Eksperimen. April – September.
- Setiyo, M. 2013. *Insentif Sistem Inovasi Nasional (SINAS) Tahun 2013*. Laporan Penelitian Dosen. Magelang: Universitas Muhammadiyah Magelang.
- Setiyo, M. dan Condro, B. 2012. *Optimasi Pemanfaatan LPG Sebagai Bahan Bakar Kendaraan Melalui Penyetelan Converter Kits dan Saat Pengapian*. Laporan Penelitian Dosen. Magelang: Universitas Muhammadiyah Magelang.
- Setiyo, M dan Purnomo B.C.2014. *Investigasi Penurunan Daya Pada Kendaraan Berbahan Bakar Gas LPG dengan Metode Pengukuran Evisiensi Volumetris*. Laporan Penelitian Dosen. Magelang: Universitas Muhammadiyah Magelang.
- Shankar, K.S and Mohanan, P. 2011. *MPFI Gasoline Engine Combustion, Performance and Emission Characteristics With LPG Injection*. International Journal of Energy and Environment. Vol. 02. Issue 4 : 761 – 770.
- Shu-Yi. P. H, Khalid. A, Anuar. M, Manshoor. B, Sapit. A, Zaman. I, Hashim. A. 2016. *Analysis of Spark Plug Gap on Flame Development Using Schlieren Technique and Image Processing*. Materials Science and Engineering 160: 012044.
- Sriyanto, J., Tasliman, A., Haryana, K. 2010. *Pengaruh Tipe Busi Terhadap Konsumsi Bahan Bakar dan Emisi Gas Buang Sepeda Motor*. Penelitian Dosen. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.
- Sulaiman, M.Y., Ayob, M.R., Meran, I. 2013. *Performans of Single Cylinder Spark Ignition Engine Fueled by LPG*. Journal Procedia Engineering 53: 579 – 585.
- Willard W. Pulkrabek. 1985. *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. New Jersey.
- William, P. A., Toulson, E., Huisjen, A., Chen, X., Zhu, G., Schock, H. 2012. *Visualization of Propane and Natural Gas Spark Ignition and Turbulent Jet Ignition Combustion*. SAE Int. J. Engines 5(4),doi: 10.4271/2012-32-0002