



TESIS (TM 142501)

UNJUK KERJA *LPG ENGINE-GENERATOR SET* MENGGUNAKAN
SYN-GAS GASIFIKASI BATUBARA DENGAN VARIASI DERAJAT
PENGAPIAN DAN TEKANAN MASUK *SYN-GAS*

Edy Prasetyo
NRP 2112204803

Dosen Pembimbing
Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T.

PROGRAM MAGISTER
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
2015



THESIS (TM 142501)

*PERFORMANCE OF LPG ENGINE-GENERATOR SET USE SYN-GAS
FROM COAL GASIFICATION WITH ADVANCED IGNITION AND
FUEL PRESSURE OF SYN-GAS*

Edy Prasetyo
NRP 2112204803

Advisor
Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T.

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Industrial Faculty of Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2015

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

EDY PRASETYO

NRP. 2112204803

Tanggal Ujian : 7 Januari 2015

Periode Wisuda : Maret 2015

Disetujui oleh:

1. Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T......(Pembimbing)
NIP.197301161997021001

2. Prof. Dr. Ir. H. Djoko Sungkono, K, M.Eng.Sc......(Penguji I)
NIP. 194409071976031001

3. Ary Bachtiar K.P., S.T., M.T., Ph.D......(Penguji II)
NIP. 197104051997021001

4. Dr. Bambang Arif D., S.T., M.Sc.Eng......(Penguji III)
NIP.197804012002121001

Direktur Program Pascasarjana,

Prof.Dr.Ir. Adi Soeprijanto, M.T.

NIP. 196404051990021001



UNJUK KERJA *LPG ENGINE-GENERATOR SET*
MENGGUNAKAN *SYN-GAS* GASIFIKASI BATUBARA
DENGAN VARIASI DERAJAT PENGAPIAN DAN TEKANAN
MASUK *SYN-GAS*

Nama Mahasiswa : Edy Prasetyo
NRP : 2112204803
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Pembimbing : Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T.

ABSTRAK

Syn-gas gasifikasi batubara memiliki keunggulan seperti harganya murah, nilai kalor yang relatif tinggi dan menghasilkan polusi yang rendah. *Syn-gas* gasifikasi batubara tersusun atas karbon monoksida, hidrogen dan karbon dioksida. Pada penelitian ini menggunakan *syn-gas* gasifikasi batubara pada *LPG engine-generator set* dengan cara memvariasikan derajat pengapian dan tekanan masuk *syn-gas* untuk mendapatkan unjuk kerja *engine* yang optimal.

Mesin uji yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *LPG Engine-Generator set* berkapasitas 4,6 kW berbahan bakar LPG. Menggunakan dua variasi yaitu pertama memvariasikan tekanan masuk *syn-gas* mulai dari 500 mbar sampai 1100 mbar, dengan interval 200 mbar. Variasi kedua yaitu pengaturan derajat pengapian pada *engine*, dimana derajat pengapian divariasikan mulai dari 20° sampai 26° derajat sebelum TMA (titik mati atas) dengan interval 2 derajat, dengan menyetting derajat pengapian pada komputer yang telah diprogram untuk sistem pengapian *ECU programmable* sehingga akan diperoleh derajat pengapian yang tepat.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan sistem *ECU programmable, gas engine* dengan spesifikasi 4-langkah, 1 buah silinder bertipe *LPG engine-set* bisa beroperasi dengan menggunakan bahan bakar 100% *syn-gas* gasifikasi batubara. Saat menggunakan bahan bakar LPG, nilai variasi optimum terjadi pada derajat pengapian sebesar 26° sebelum TMA dan tekanan masuk 70 mbar, yaitu dapat meningkatkan kinerja berupa peningkatan daya sebesar 29,1% dan penurunan Sfc sebesar 11,8% terhadap kondisi awal. Sedangkan saat menggunakan bahan bakar *syn-gas*, nilai variasi optimum terjadi pada derajat pengapian sebesar 26° sebelum TMA dan tekanan masuk 900 mbar, yaitu dapat meningkatkan kinerja berupa peningkatan daya sebesar 76,5% dan penurunan Sfc sebesar 20,5% terhadap kondisi awal.

Kata kunci : *LPG, Syn-gas batubara, LPG engine-generator set, tekanan masukan, derajat pengapian.*

PERFORMANCE OF LPG ENGINE-GENERATOR SET USE SYN-GAS FROM COAL GASIFICATION WITH ADVANCED IGNITION AND FUEL PRESSURE OF SYN-GAS

Name : Edy Prasetyo
NRP : 2112204803
Major : Magister of Mechanical Engineering, FTI-ITS
Adviser : Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T.

ABSTRACT

Syn-gas from coal gasification have special quality like cheap, heating value relative high and low emissions. The main constituents of syn-gas from coal gasification are carbon monoxide(CO), hydrogen (H₂) and carbon dioxide(CO₂). This research is use syn-gas as fuel at LPG engine-generator set by advanced ignition variation and fuel pressure supplay variation for get optimum performance of engine.

This research use LPG engine-generator set for engine test, which it have 4,6 kW electric capacity with original fuel is LPG. The experiment use two variation, first variation is fuel pressure supplay from 500 until 1100 mbar with 200 mbar interval. Second variation is advanced ignition from 20° until 26° before top dead center (BTDC) with 2 degree interval. Arrangement of advanced ignition is use ECU programmable by computer.

The conclusion of this experiment gas engine by ECU programmable, gas engine have one stroke and one silinder, its can operation with syn-gas from coal gasification. When engine use LPG's fuel at 26° BTDC and fuel pressure 70mbar, engine has increasing performace for excample power increase 29,1% and sfc decrease 11,8% than beginning condition. When engine use syn-gas's fuel at 26° BTDC and fuel pressure 900mbar, engine has increasing performace for excample power increase 76,5% and sfc decrease 20,5% than beginning condition.

Key word : *LPG, Syn-gas coal gasificaion, LPG engine-generator set, fuel pressure, advanced ignition.*

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan petunjuk dan kekuatan sehingga kami dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “UNJUK KERJA *LPG ENGINE-GENERATOR SET* MENGGUNAKAN *SYN-GAS* GASIFIKASI BATUBARA DENGAN VARIASI DERAJAT PENGAPIAN DAN TEKANAN MASUK *SYN-GAS*”.

Tesis ini merupakan salah satu persyaratan kelulusan Program Studi S-2 di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Kami menyampaikan banyak terima kasih dalam penyusunan tesis ini kepada :

1. Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T. selaku kepala Laboratorium Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar dan Dosen Pembimbing.
2. Prof. Ir. Sutardi, M.Sc. PhD, selaku Koordinator S-2 Jurusan Teknik Mesin.
3. Prof.Dr.Ir. H.D. Sungkono K., Meng.Sc., D r. Ary Bachtiar, ST., MT. dan Dr. Bambang Arif D., ST., M.Sc., selaku dosen penguji.
4. Pak Oyok dan pak Indra terima kasih atas kesempatannya melakukan penelitian aplikasi *syn-gas* pada *gas engine* di PT. Gending-Sidoarjo.
5. Istriku Rizki Puspitasari yang selalu memberi semangat dan doanya, serta anakku tersayang Rafeyfa Alya Prasetyo yang selalu memberi inspirasi.
6. Segenap Dosen dan Karyawan Jurusan Teknik Mesin.
7. Rekan-rekan laboratorium motor bakar antara lain dimas, nuril, ni'am, taufan, bros, pak kar dan pak ilham (foreman instrument control-PLTU pacitan).

Semoga penelitian ini bermanfaat. Segala saran dan kritik akan sangat berguna dalam perbaikan tesis ini.

Surabaya, Januari 2015

Penyusun

DAFTAR ISI

	Halaman
Halaman Judul	i
Kata Pengantar.....	ii
Abstrak	iii
Abstract.....	iv
Daftar Isi.....	v
Daftar Tabel.....	x
Daftar Gambar	xi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	7
2.1 Bahan Bakar LPG (<i>liquefied petroleum gas</i>)	7
2.2 Bahan Bakar <i>Syn-gas</i>	8
2.2.1 Komposisi <i>syn-gas</i> dari batubara.....	10
2.2.2 Aplikasi <i>syn-gas</i> hasil gasifikasi batubara.....	11
2.2.3 Syarat karakteristik <i>syn-gas</i> yang diperlukan untuk <i>IC engine</i>	12
2.3 Karakteristik LPG dan <i>syn-gas</i> terhadap performa <i>Engine</i>	13
2.3.1 Nilai kalor (<i>heating value</i>)	13
2.3.2 Volume silinder <i>engine</i>	16
2.3.3 <i>Flame speed</i>	16
2.3.4 <i>Spark timing</i>	16
2.3.5 <i>Knock tendency</i>	17
2.3.6 Periode <i>Auto-Ignition</i>	18

2.4 Siklus Ideal Motor Otto (<i>Otto Cycle</i>)	18
2.5 Pembakaran Pada Motor Otto	20
2.6 Tahapan Pembakaran	20
2.6.1 <i>Ignition Lag</i>	21
2.6.2 <i>Flame Propagation</i>	24
2.7 Waktu Pengapian (<i>Ignition Timing</i>) Pada Motor Otto	27
2.8 Parameter Unjuk Kerja Motor Otto	31
2.8.1 Daya Poros (N_e)	31
2.8.2 Tekanan Efektif Rata-rata (b_{mep})	32
2.8.3 Torsi (T)	33
2.8.4 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (sfc)	34
2.8.5 Efisiensi <i>Thermal</i> (η_{th})	34
2.9 Polusi Udara	35
2.9.1 Hidrokarbon (HC)	36
2.9.2 Karbon Monoksida (CO)	37
BAB 3 METODE PENELITIAN	39
3.1 Bahan Bakar	39
3.1.1 Bahan Bakar LPG	39
3.1.2 Bahan Bakar <i>Syn-gas</i>	40
3.2 Alat Uji	40
3.2.1 <i>Engine test</i>	40
3.2.2 Alat Ukur	41
3.3 Rencana Skema Eksperimen	47
3.4 Prosedur Pengujian	48
3.4.1 Modifikasi <i>engine test</i>	48
3.4.2 Tahapan pengujian	49
3.5 <i>Flowchart</i> Penelitian	52
3.6 Rancangan Eksperimen	54

BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....	57
4.1 Data Hasil Pengujian.....	57
4.2 Perhitungan Unjuk Kerja.....	58
4.2.1 Contoh Perhitungan Daya Poros Menggunakan Bahan Bakar LPG.....	59
4.2.2 Contoh Perhitungan Tekanan Efektif Rata-rata (<i>BMEP</i>) Menggunakan Bahan Bakar LPG.....	60
4.2.3 Contoh Perhitungan Torsi Menggunakan Bahan Bakar LPG.....	61
4.2.4 Contoh Perhitungan Konsumsi Bahan Bakar (<i>Sfc</i>) Menggunakan Bahan Bakar LPG.....	61
4.2.5 Contoh Perhitungan Efisiensi <i>Thermal</i> (η_{th}) Menggunakan Bahan Bakar LPG.....	63
4.2.6 Contoh Perhitungan <i>Air Fuel Ratio</i> (<i>AFR</i>) Menggunakan Bahan Bakar LPG.....	64
4.3 Analisa <i>Mapping</i> Tekanan Masuk Dan Derajat Pengapian Dengan Bahan Bakar LPG.....	66
4.3.1 Analisa Daya Poros.....	66
4.3.2 Analisa Torsi.....	70
4.3.3 Analisa Tekanan Efektif Rata-rata (<i>Bmep</i>).....	74
4.3.4 Analisa <i>Specific Fuel Consumption</i> (<i>Sfc</i>).....	78
4.3.5 Analisa Efisiensi <i>Thermal</i> (η_{th}).....	82
4.3.6 Analisa Rasio Udara-Bahan Bakar (<i>AFR</i>).....	85
4.3.7 Analisa Temperatur <i>Engine</i>	88
4.3.8 Analisa Temperatur Oli Pelumas.....	90
4.3.9 Analisa Temperatur <i>Exhaust</i>	92
4.3.10 Analisa Emisi Karbon Monoksida (<i>CO</i>).....	94
4.3.11 Analisa Emisi Hydro Carbon (<i>HC</i>).....	96
4.4 Analisa <i>Mapping</i> Tekanan Masuk Dan Derajat Pengapian Dengan Bahan Bakar <i>Syn-gas</i>	99
4.4.1 Analisa Daya Poros.....	99
4.4.2 Analisa Torsi.....	103
4.4.3 Analisa Tekanan Efektif Rata-rata (<i>Bmep</i>).....	107
4.4.4 Analisa <i>Specific Fuel Consumption</i> (<i>Sfc</i>).....	112

4.4.5 Analisa Efisiensi <i>Thermal</i> (η_{th}).....	115
4.4.6 Analisa Rasio Udara-Bahan Bakar (AFR).....	119
4.4.7 Analisa Temperatur <i>Engine</i>	121
4.4.8 Analisa Temperatur Oli Pelumas.....	123
4.4.9 Analisa Temperatur Exhaust.....	125
4.4.10 Analisa Emisi Karbon Monoksida (CO).....	128
4.4.11 Analisa Emisi Hydro Carbon (HC).....	130
4.5Komparasi Unjuk Kerja <i>LPG engine-generator set</i> saat Menggunakan Bahan Bakar LPG dan <i>Syn-gas</i>	132
4.5.1 Analisa Komparasi Daya Dari <i>LPG engine-generator set</i> Saat Menggunakan bahan Bakar LPG dan <i>Syn-gas</i>	132
4.5.2 Analisa Komparasi Sfc Dari <i>LPG engine-generator set</i> Saat Menggunakan Bahan Bakar LPG dan <i>Syn-gas</i>	135
4.5.3 Analisa Komparasi Efisiensi <i>Thermal</i> Dari <i>LPG engine-generator set</i> Saat Menggunakan Bahan Bakar LPG dan <i>Syn-gas</i>	137
4.5.4 Analisa Komparasi Temperatur <i>Engine</i> Dari <i>LPG engine-generator set</i> Saat Menggunakan Bahan Bakar LPG dan <i>Syn-gas</i>	138
4.5.5 Analisa Komparasi Temperatur Olidari <i>LPG engine-generator set</i> Saat Menggunakan Bahan Bakar LPG dan <i>Syn-gas</i>	140
4.5.6 Analisa Komparasi Temperatur <i>Exhaust</i> dari <i>LPG engine-generator set</i> Saat Menggunakan Bahan Bakar LPG dan <i>Syn-gas</i>	142
4.5.7 Analisa Komparasi Emisi COdari <i>LPG engine-generator set</i> Saat Menggunakan Bahan Bakar LPG dan <i>Syn-gas</i>	144
4.5.8 Analisa Komparasi Emisi HCdari <i>LPG engine-generator set</i> Saat Menggunakan Bahan Bakar LPG dan <i>Syn-gas</i>	145
BAB 5KESIMPULAN DAN SARAN.....	137
5.1 Kesimpulan.....	137
5.2 Kritik dan Saran.....	138
DAFTAR PUSTAKA.....	139
LAMPIRAN 1: Data Spesifikasi Bahan Bakar.....	141
LAMPIRAN 2: Data Pengujian dan Perhitungan <i>LPG Engine-Generator Set</i> dengan Bahan Bakar LPG.....	143

LAMPIRAN 3 : Data Pengujian dan Perhitungan <i>LPG Engine-Generator Set</i> dengan Bahan Bakar <i>Syn-gas</i>	149
LAMPIRAN4 : Data Pengujian Temperatur dan Emisi pada <i>LPG Engine-Generator Set</i> dengan Bahan Bakar LPG.....	155
LAMPIRAN 5: Data Pengujian temperatur dan Emisi pada <i>LPG Engine-Generator Set</i> dengan Bahan Bakar <i>Syn-gas</i>	161
LAMPIRAN 6 : Dokumentasi Pengambilan Data.....	167

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skematik <i>plant</i> gasifikasi batubara PT. Gending-Sidoarjo	9
Gambar 2.2 Reaktor gasifikasi batubara tipe <i>fixed/moving bed – up draft</i>	10
Gambar 2.3 Aplikasi <i>syngas</i> pada <i>IC engine-generator</i>	11
Gambar 2.4 (a) Grafik energi listrik yang dihasilkan generator sebagai fungsi dari <i>flow rate</i> bahan bakar <i>syn-gas</i> . (b) Grafik <i>Overall efficiency</i> sebagai fungsi dari <i>power rating</i>	16
Gambar 2.5 Siklus motor empat langkah meliputi langkah isap, langkah kompresi, langkah kerja, dan langkah buang	19
Gambar 2.6 Tahapan pembakaran pada motor otto.....	21
Gambar 2.7 Skematik dari <i>gas carburator</i>	30
Gambar 2.8 Grafik P- θ pada pengaturan kompresi rasio (17, 14.5, 13.5 dan 11.5) dan derajat pengapian (Sridhar, 2002).....	31
Gambar 2.9 (a) mekanisme terbentuknya polutan, (b) emisi gas buang terhadap FAR	35
Gambar 3.1 Gasifikasi <i>Plant</i> PT Gending-Sidoarjo	40
Gambar 3.2 <i>Engine test</i>	41
Gambar 3.3 <i>Pressure regulator</i>	42
Gambar 3.4 <i>Tang ampere</i>	42
Gambar 3.5 <i>Voltmeter</i>	42
Gambar 3.6 <i>Pressure gauge</i>	43
Gambar 3.7 <i>Strobotester</i>	43
Gambar 3.8 <i>Exhaust gas analyzer</i>	44
Gambar 3.9 <i>Thermocouple digital</i>	44
Gambar 3.10 Komputer	44
Gambar 3.11 Konfigurasi <i>pitot static tube</i> dan <i>manometer</i> $V_{\theta} = 15^{\circ}$	45
Gambar 3.12 Rencana skema penelitian.....	47
Gambar 3.13 (a) <i>Flywheel</i> yang belum dimodifikasi (b) <i>Flywheel</i> yang sudah dimodifikasi.....	48
Gambar 3.14 Skema pengapian dan ECU yang telah dibuat.....	49
Gambar 3.15 Tampilan pengaturan derajat pengapian di komputer.....	49

Gambar 3.16 (a) Skematik modifikasi saluran suplai bahan bakar gas (b) Saluran uplai bahan bakar gas yang sudah dimodifikasi.....	50
Gambar 3.17 <i>Flowchart</i> percobaan dengan bahan bakar LPG.....	53
Gambar 3.18 <i>Flowchart</i> percobaan dengan bahan bakar <i>syn-gas</i>	54
Gambar 4.1 Grafik daya fungsi beban <i>engine</i> pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat <i>engine</i> berbahan bakar LPG.....	66
Gambar 4.2 Grafik perbandingan daya terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat <i>engine</i> berbahan bakar LPG.....	69
Gambar 4.3 Grafik torsi fungsi beban <i>engine</i> pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat <i>engine</i> berbahan bakar LPG.....	71
Gambar 4.4 Grafik perbandingan torsi terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat <i>engine</i> berbahan bakar LPG.....	73
Gambar 4.5 Grafik bmep fungsi beban <i>engine</i> pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat <i>engine</i> berbahan bakar LPG.....	75
Gambar 4.6 Grafik perbandingan bmep terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat <i>engine</i> berbahan bakar LPG.....	77
Gambar 4.7 Grafik sfc fungsi beban <i>engine</i> pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat <i>engine</i> berbahan bakar LPG.....	79
Gambar 4.8 Grafik perbandingan sfc terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat <i>engine</i> berbahan bakar LPG.....	81
Gambar 4.9 Grafik efisiensi <i>thermal</i> fungsi beban <i>engine</i> pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 m bar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat <i>engine</i> berbahan bakar LPG.....	82

Gambar 4.10	Grafik fungsi perbandingan efisiensi <i>thermal</i> (η_{th}) terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat <i>engine</i> berbahan bakar LPG.....	85
Gambar 4.11	Grafik AFR fungsi beban <i>engine</i> pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat <i>engine</i> berbahan bakar LPG.....	86
Gambar 4.12	Grafik temperatur <i>engine</i> fungsi beban <i>engine</i> pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat <i>engine</i> berbahan bakar LPG.....	89
Gambar 4.13	Grafik temperatur oli fungsi beban <i>engine</i> pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat <i>engine</i> berbahan bakar LPG.....	91
Gambar 4.14	Grafik temperatur <i>exhaust</i> fungsi beban <i>engine</i> pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat <i>engine</i> berbahan bakar LPG.....	93
Gambar 4.15	Grafik emisi CO fungsi beban <i>engine</i> pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat <i>engine</i> berbahan bakar LPG.....	95
Gambar 4.16	Grafik emisi HC fungsi beban <i>engine</i> pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat <i>engine</i> berbahan bakar LPG.....	98
Gambar 4.17	Grafik daya fungsi beban <i>engine</i> pada tekanan masuk 0,5, 0,7, 0,9 dan 1,1 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat <i>engine</i> berbahan bakar <i>syng-gas</i>	99
Gambar 4.18	Grafik perbandingan daya terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat <i>engine</i> berbahan bakar <i>syn-gas</i>	102
Gambar 4.19	Grafik torsi fungsi beban <i>engine</i> pada tekanan masuk 0,5, 0,7, 0,9 dan 1,1 bar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat <i>engine</i> berbahan bakar <i>syn-gas</i>	104

Gambar 4.20	Grafik perbandingan torsi terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat engine berbahan bakar <i>syngas</i>	106
Gambar 4.21	Grafik bmep fungsi beban <i>engine</i> pada tekanan masuk 0,5, 0,7, 0,9 dan 1,1 bar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat <i>engine</i> berbahan bakar <i>syn-gas</i>	108
Gambar 4.22	Grafik perbandingan bmep terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat <i>engine</i> berbahan bakar <i>syn-gas</i>	111
Gambar 4.23	Grafik sfc fungsi beban <i>engine</i> pada tekanan masuk 0,5, 0,7, 0,9 dan 1,1 bar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat <i>engine</i> berbahan bakar <i>syn-gas</i>	112
Gambar 4.24	Grafik perbandingan sfc terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat <i>engine</i> berbahan bakar <i>syn-gas</i>	114
Gambar 4.25	Grafik efesiensi fungsi beban <i>engine</i> pada tekanan masuk 0,5, 0,7, 0,9 dan 1,1 bar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat <i>engine</i> berbahan bakar <i>syn-gas</i>	116
Gambar 4.26	Grafik fungsi perbandingan efesiensi thermal (η_{th}) terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat engine berbahan bakar <i>syn-gas</i>	118
Gambar 4.27	Grafik AFR fungsi beban <i>engine</i> pada tekanan masuk 0,5, 0,7, 0,9 dan 1,1 bar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat <i>engine</i> berbahan bakar <i>syn-gas</i>	119
Gambar 4.28	Grafik temperatur <i>engine</i> fungsi beban <i>engine</i> pada tekanan masuk 0,5, 0,7, 0,9 dan 1,1 bar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat <i>engine</i> berbahan bakar <i>syn-gas</i>	122
Gambar 4.29	Grafik temperatur oli fungsi beban <i>engine</i> pada tekanan masuk 0,5, 0,7, 0,9 dan 1,1 bar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat <i>engine</i> berbahan bakar <i>syn-gas</i>	124

Gambar 4.30	Grafik temperatur <i>exhaust</i> fungsi beban <i>engine</i> pada tekanan masuk 0,5, 0,7, 0,9 dan 1,1 bar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat <i>engine</i> berbahan bakar <i>syn-gas</i>	126
Gambar 4.31	Grafik emisi CO fungsi beban <i>engine</i> pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat <i>engine</i> berbahan bakar <i>syn-gas</i>	129
Gambar 4.32	Grafik emisi HC fungsi beban <i>engine</i> pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat <i>engine</i> berbahan bakar <i>syn-gas</i>	131
Gambar 3.33	Grafik hasil eksperimen yang menunjukkan hubungan beban terhadap tegangan Isitrik yang dihasilkan pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, saat menggunakan bahan bakar (a) LPG, (b) <i>syn-gas</i>	133
Gambar 4.34	Grafik komparasi daya poros <i>LPG engine-generator set</i> fungsi tekanan masuk bahan bakar, saat menggunakan bahan bakar LPG dan <i>syn-gas</i>	134
Gambar 4.35	Grafik komparasi Sfc <i>LPG engine-generator set</i> fungsi tekanan masuk bahan bakar, saat menggunakan bahan bakar LPG dan <i>syn-gas</i>	137
Gambar 4.36	Grafik komparasi efisiensi pada <i>LPG engine-generator set</i> fungsi tekanan masuk bahan bakar, saat menggunakan bahan bakar LPG dan <i>syn-gas</i>	138
Gambar 4.37	Grafik komparasi temperatur <i>engine</i> pada <i>LPG engine-generator set</i> fungsi tekanan masuk bahan bakar, saat menggunakan bahan bakar LPG dan <i>syn-gas</i>	140
Gambar 4.38	Grafik komparasi temperatur oli pelumas pada <i>LPG engine-generator set</i> fungsi tekanan masuk bahan bakar, saat menggunakan bahan bakar LPG dan <i>syn-gas</i>	142
Gambar 4.39	Grafik komparasi temperatur <i>exhaust</i> pada <i>LPG engine-generator set</i> fungsi tekanan masuk bahan bakar, saat menggunakan bahan bakar LPG dan <i>syn-gas</i>	144

Gambar 4.40	Grafik komparasi emisi CO pada <i>LPG engine-generator set</i> fungsi tekanan masuk bahan bakar, saat menggunakan bahan bakar LPG dan <i>syn-gas</i>	145
Gambar 4.41	Grafik komparasi HC gas buang pada <i>LPG engine-generator set</i> fungsi tekanan masuk bahan bakar, saat menggunakan bahan bakar LPG dan <i>syn-gas</i>	147

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Data properti <i>physico-chemical</i> dari LPG.....	8
Tabel 2.2 Syarat karakteristik <i>syn-gas</i> untuk <i>power generation</i>	12
Tabel 2.3 Spesifikasi <i>syn-gas</i> untuk aplikasi pada <i>IC engine</i>	12
Tabel 2.4 Komparasi properti antara LPG dan <i>syn-gas</i>	13
Tabel 2.5 Hasil penelitian yang dilakukan Sridhar (2002)	30
Tabel 3.1 Tabel Rancangan Eksperimen.....	54
Tabel 4.1 Komparasi Unjuk Kerja <i>LPG engine-generator</i> set saat menggunakan bahan bakar LPG dan <i>Syn-gas</i> , pada beban maksimum dengan tegangan listrik 180-185 volt.....	135
Tabel 4.2 Komparasi temperatur dan emisi <i>LPG engine-generator</i> set saat menggunakan bahan bakar LPG dan <i>Syn-gas</i> , pada beban maksimum dengan tegangan listrik 180 - 185 volt.....	140

BIODATA PENULIS



Edy prasetyo, lahir di papar-kediri. Menempuh pendidikan Sekolah Dasar (SD) sampai SMU di kabupaten kediri, kemudian pada tahun 2000 penulis melanjutkan ke perguruan tinggi di Teknik Mesin-ITS, Surabaya dengan bidang studi desain dan lulus sarjana tahun 2005.

Setelah menyelesaikan pendidikannya di ITS-surabaya, penulis selama 2,5 tahun bekerja di PT. Sarana Teknik Wiratama - surabaya, yaitu suatu perusahaan yang bergerak di bidang *mechanical electrical engineering* dengan posisi *desain dan instalasi staff*. Selama bekerja di PT. Sarana Teknik Wiratama, penulis telah

banyak mengerjakan proyek dalam skala kecil sampai besar sebagai *project manager*. Dimana penulis sangat berpengalaman dalam bidang diantara lain : *HVAC, piping, ducting* dan *pump*.

Kemudian pada akhir tahun 2008 sampai sekarang, penulis bekerja di PT. PJB Services, yaitu suatu perusahaan yang bergerak di bidang pemeliharaan dan pengoperasian pembangkit listrik. Selama di PT. PJB services, penulis berpengalaman dalam pengoperasian *common unit* sampai *main unit*(*boiler* dan *steam turbine*).

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia mempunyai banyak sumber energi yaitu seperti batubara, gas alam, minyak bumi, energi air dan panas bumi. Dari semua sumber energi tersebut, batubara merupakan sumber energi dengan cadangan terbesar dan memiliki keunggulan seperti harga yang relatif lebih murah jika dibandingkan dengan cadangan sumber energi yang lainnya tersebut. Sehingga batubara akan masih menjadi bahan bakar yang paling dominan dan sangat potensial digunakan sebagai bahan bakar pembangkit listrik di masa depan. Akan tetapi banyak kendala yang akan dihadapi dalam pemanfaatan batubara secara besar-besaran. Kendala tersebut antara lain adalah batubara berbentuk padat sehingga sulit dalam penanganannya, batubara banyak mengandung unsur-unsur seperti sulfur dan nitrogen yang bisa menimbulkan polusi dan batubara mengandung banyak unsur karbon yang secara alamiah bila dibakar akan menghasilkan gas CO₂. Untuk mengatasi kendala-kendala tersebut, teknologi gasifikasi batubara merupakan alternatif yang dapat diterapkan (Sugiono, 2001).

Gasifikasi batubara merupakan konversi batubara menjadi produk gas dalam sebuah reaktor, dengan atau tanpa menggunakan pereaksi berupa udara, campuran udara dan uap air atau campuran oksigen dan uap air. Produk utama dari gasifikasi batubara adalah *synthetic gas* atau biasa disebut *syn-gas*. *Syn-gas* merupakan sejenis gas campuran yang terdiri atas gas karbon monoksida (CO) dan hidrogen (H₂). Terkadang gas ini juga mengandung karbon dioksida (CO₂). *Syn-gas* bersifat mudah terbakar dan bisa digunakan sebagai bahan bakar atau digunakan dalam proses untuk membuat zat kimia lain. Dalam proses gasifikasi batubara muncul material yang tidak diinginkan yang terkandung dalam batu bara seperti kandungan partikel, tar, senyawa sulfur dan abu, sehingga material yang tidak diinginkan tersebut perlu dihilangkan dari *syn-gas* dengan menggunakan metode tertentu sehingga dapat dihasilkan *syn-gas* yang bersih dan dapat dialirkan sebagai sumber energi.



Dalam aplikasinya pada pembangkit listrik, *syn-gas* dapat digunakan sebagai bahan bakar pada boiler, gas turbin maupun mesin diesel (Balat, 2009). Untuk gasifikasi batubara yang menghasilkan *syn-gas* dengan *low heating value* (LHV) maupun *high heating value* (HHV) dapat dimanfaatkan untuk bahan bakar pada *IC engine-power generation*. Sebagai bahan bakar pada *IC engine*, diperlukan *syn-gas* dengan kandungan partikel sebesar $< 50\text{mg/Nm}^3$ dan tar sebesar $< 100\text{mg/Nm}^3$ (Hasler, 1999).

Dalam penelitian ini objek yang digunakan adalah *LPG engine-generator set*, seri “Green Power” dengan model CC5000-LPG, yang diproduksi oleh Shanghai “Chengchang” Power Technology Co., Ltd., berkapasitas 4,6 kW, volume silinder sebesar 389 CC, bersilinder tunggal, 4-langkah dan berbahan bakar LPG. Sebuah modifikasi pada sistem pengapian untuk mengatur waktu pengapian (*ignition timing*) dan pada saluran bahan bakar untuk memvariasikan tekanan bahan bakar yang masuk ke ruang bakar untuk mendapatkan unjuk kerja *LPG engine* yang paling optimum. Kemudian *syn-gas* batubara diaplikasikan pada *LPG engine* tersebut untuk menggantikan bahan bakar LPG.

Pengapian merupakan salah bagian penting dalam proses induksi pada suatu *LPG engine*. Pada *LPG engine*, pengapian tampak jelas dengan adanya percikan api pada elektroda busi yang menjadikan koil sebagai sumber pembangkit tegangan. Percikan bunga api tersebut kemudian membakar campuran udara dan bahan bakar di dalam kepala silinder untuk mengawali pengapian. Pada akhirnya pengapian tersebut menjadi langkah terakhir dari serangkaian proses induksi yang terjadi dalam waktu singkat secara sangat cepat untuk menimbulkan tenaga gerak. Maka dari itu untuk mendapatkan performa *LPG engine-generator set* yang maksimal dari proses pengapian dibutuhkan hasil yang maksimal dan kondisi mesin yang stabil. Oleh karena itu diperlukan adanya perubahan sudut pengapian yang ada sehingga pengapian yang ada bisa sempurna dari daya mesin yang didapatkan bisa maksimal.

Perubahan tekanan bahan bakar gas, berarti merubah besar aliran bahan bakar yang masuk dalam ruang bakar. Banyak atau sedikitnya aliran bahan bakar yang digunakan akan mempengaruhi daya yang dihasilkan oleh suatu *engine*. Maka dari itu untuk mendapatkan performa *LPG engine* yang maksimal



diperlukan berapa besar bahan bakar yang dibutuhkan pada pembakaran yang ideal.

Saat bahan bakar *syn-gas* diaplikasikan pada *engine* menunjukkan bahwa *engine* mengalami *de-rating* sebesar 30% dari daya maksimumnya (Sridhar, 2002). Hal ini disebabkan karena *density* dan nilai kalor dari *syn-gas* yang rendah. Saat menggunakan *syn-gas* sebagai bahan bakar menghasilkan konsentrasi CO dan NOx pada gas buang yang dihasilkan memiliki nilai yang sangat rendah, tetapi untuk konsentrasi CO₂ memiliki kandungan yang cukup tinggi (Ajay, 2010). Menurut Sridar (2002), dengan memajukan *ignition timing* saat menggunakan bahan bakar *syn-gas* akan menghasilkan performa *engine* yang bagus. Walaupun demikian, perlu untuk memperhitungkan bahwa *ignition timing* juga tergantung dari variabel lain seperti perubahan beban dan putaran *engine*. Berdasar Jefri (2008), menyatakan bahwa secara umum bertambahnya bahan bakar *syn-gas* yang masuk ruang bakar akan meningkatkan temperatur gas buang dan *engine*, sedangkan campuran bahan bakar dan udara yang kaya akan menyebabkan gas buang akan menjadi lebih dingin hal ini karena banyaknya bahan bakar yang keluar sebagai *unburnt fuel*.

Syn-gas gasifikasi batubara secara alamiah memiliki sifat yang agak berbeda dengan bahan bakar LPG (*liquified petroleum gas*) baik secara kimiawi maupun secara fisik. Sifat yang dimiliki oleh suatu bahan bakar akan sangat mempengaruhi proses pembakaran dan pembentukan campuran bahan bakar udara serta komposisi hasil pembakaran. Karakteristik bahan bakar pada LPG maupun *Syn-gas* batubara sangat mempengaruhi performa dari *engine*. Beberapa karakteristik pada *syn-gas* gasifikasi batubara yaitu memiliki angka oktan sebesar 100~105 sedangkan LPG 103~105, densitas *syn-gas* 1,05 kg/m³ sedangkan LPG 2,26 kg/m³, *flame speed syn-gas* 50 cm/s dan LPG 100 c m/s. Dari beberapa karakteristik tersebut maka *syn-gas* dapat berperan untuk menggantikan bahan bakar LPG.

Bahan bakar *syn-gas* gasifikasi batubara sangat berpotensi sebagai bahan bakar di masa depan karena harganya yang murah, dapat diaplikasikan pada *internal combustion (IC) engine* dan gas buang yang dihasilkan oleh *engine* bersifat ramah lingkungan. Dalam penelitian ini diharapkan agar mendapatkan



nilai derajat pengapian dan tekanan masuk bahan bakar yang menghasilkan unjuk kerja *engine* yang optimum serta nilai unjuk kerja yang dinyatakan dalam daya, torsi, efisiensi thermal, SFC, BMEP, AFR, temperatur *engine*, temperatur gas buang, temperatur minyak pelumas, dan emisi pada penggunaan bahan bakar *syn-gas* pada *engine*. Hasil penelitian ini tentunya akan menjadi rekomendasi dalam pemamfaatan bahan bakar *syn-gas* hasil gasifikasi batubara untuk meminimalisir kekurangan-kekurangan yang ada dalam penggunaan bahan bakar tersebut.

1.2 Perumusan Masalah

Sehubungan dengan kurang sesuainya unjuk kerja *LPG engine-generator set* dengan spesifikasi yang ada, maka dilakukan pengaturan pemasukkan bahan bakar dan penggantian mekanisme sistem pengapian dari sistem pengapian *magneto* menjadi sistem pengapian dengan menggunakan *ECU progammable*. Berkaitan dengan hal tersebut, permasalahan dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh jumlah pemasukkan bahan bakar dan derajat pengapian terhadap unjuk kerja ?
2. Bagaimana pengaruh jumlah pemasukkan bahan bakar dan derajat pengapian terhadap unjuk kerja dengan menggunakan bahan bakar *syn-gas* gasifikasi batubara ?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan agar penelitian dapat berjalan secara fokus dan terarah serta dapat mencapai tujuan yang diinginkan adalah sebagai berikut :

1. Kondisi *engine* dalam keadaan *standart*.
 2. Percobaan menggunakan *LPG engine-generator set* satu silinder empat langkah yang telah dimodifikasi pada bagian sistem pengapian dan saluran bahan bakar.
 3. Kondisi udara dalam keadaan *standart*.
 4. Tidak membahas mengenai pembuatan *Syn-gas* gasifikasi batubara serta reaksi kimia yang terjadi.
-



5. Adapun data mengenai *Syn-gas* gasifikasi batubara dapat dilihat pada data sekunder yang terdapat dalam halaman lampiran.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini berdasarkan perumusan masalah yang telah ditetapkan adalah sebagai berikut :

1. Mendapatkan karakterisasi unjuk kerja *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *syn-gas* gasifikasi batubara yang terdiri dari:
 - a. Unjuk kerja, meliputi: daya, torsi, efisiensi thermal, SFC, BMEP dan AFR.
 - b. Emisi.
 - c. Kondisi operasional, seperti temperatur *engine*, temperatur minyak pelumas dan temperatur gas buang.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Memberikan analisa yang tepat terhadap unjuk kerja pada penggunaan bahan bakar yang berbeda pada *LPG engine-generator set*.
2. Sebagai bahan referensi bagi penelitian sejenisnya dalam rangka pengembangan pengetahuan tentang optimasi kinerja *LPG engine-generator set* dengan menggunakan bahan bakar *Syn-gas* gasifikasi batubara.
3. Mengembangkan pengetahuan dan pemikiran untuk penelitian lanjutan dalam bidang teknologi bahan bakar untuk meningkatkan taraf hidup masyarakat.
4. Penelitian ini dapat dikembangkan untuk penelitian lanjutan dalam pengembangan *Syn-gas* gasifikasi batubara sebagai bahan bakar pada motor pembakaran dalam.



“Halaman ini sengaja dikosongkan”



BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Bahan Bakar LPG (*liquefied petroleum gas*)

LPG (*liquefied petroleum gas*) merupakan gas hidrokarbon yang dihasilkan dari penyulingan minyak mentah dan dari komponen gas alam. Kandungan utama LPG adalah propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}). LPG juga mengandung hidrokarbon ringan yang lain dalam jumlah kecil, misalnya etana (C_2H_6) dan pentana (C_5H_{12}) (Brenda, 2002).

Bahan bakar gas bisa bercampur secara *uniform* dengan udara sehingga bahan bakar gas akan lebih terbakar sempurna dibandingkan dengan bahan bakar cair. Sebagai bahan bakar *spark-ignition (SI) engine*, LPG memiliki beberapa kelebihan yaitu memiliki karakteristik *anti knock* dan gas buang memiliki kandungan CO dan unburned HC yang rendah.

LPG disimpan dalam bentuk di dalam tangki dengan tekanan tangki diantara 760 ~ 1030 kPa. LPG masuk ke *engine* dikontrol dengan menggunakan regulator, dimana merubah LPG menjadi *vapour* (uap). Uap tersebut masuk ke *mixer* yang posisinya dekat dengan *intake manifold*, dimana LPG mengalir dengan aliran tertentu dan bercampur dengan udara sebelum masuk ke dalam ruang bakar kemudian terbakar dan menghasilkan energi.

LPG bisa digunakan sebagai bahan bakar pada *IC engines*, dimana nilai oktan LPG sebesar 105 (Moskus, 2013). Pemakaian bahan bakar LPG memiliki beberapa keunggulan diantaranya adalah memiliki karakteristik ramah lingkungan. Pemakaian bahan bakar LPG bisa mengurangi kandungan NO_x dan hidrokarbon pada gas buang dan temperatur mesin lebih rendah jika dibandingkan saat menggunakan bahan bakar bensin atau solar. Pada pemakaian LPG juga menunjukkan penggantian oli motor memiliki periode yang lebih lama. Mesin dengan bahan bakar LPG bisa di start dengan mudah walaupun temperatur udara yang rendah -7°C. Konsumsi bahan bakar LPG per satuan volume lebih rendah daripada bensin. Distribusi gas pada tiap-tiap silinder lebih merata sehingga



percepatan mesin lebih baik dan putaran stasioner lebih halus. Ruang bakar lebih bersih sehingga umur mesin meningkat. Kandungan karbon LPG lebih rendah daripada bensin atau diesel sehingga menghasilkan CO₂ yang lebih rendah (Saraf, 2009).

Dari beberapa keunggulan diatas, LPG memiliki beberapa kelemahan. Mesin berbahan bakar LPG menghasilkan daya yang lebih rendah dari mesin bensin. Penurunan daya yang terjadi sekitar 5% -10% (Ceviz, 2005). Sistem pengapian harus lebih besar sehingga penyalaan mesin menjadi lebih berat. Perlu penyesuaian saat pengapian dan kualitas sistem pengapian. Sistem bahan bakar harus dibuat lebih kuat daripada sistem bensin (ETSAP, 2012).

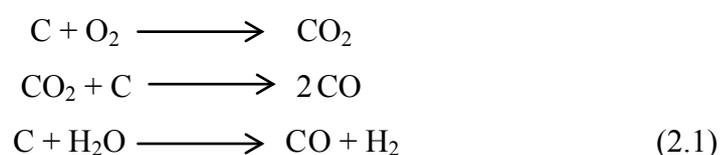
Tabel 2.1 Data properti *physico-chemical* dari LPG

Karakteristik	LPG
Chemical formula	Mix. Of mainly 40% C ₃ H ₈ and 60% C ₄ H ₁₀
Burning velocity (cm/sec)	32 in air
Molecular weight	50
Specific weight (Kg/l)	0,54
Boiling point (°C)	-0,5 -43
Lower heating value (Kcal/Kg)	10997
Fire point (°C)	~500 atm
Ignition limits (% of volume)	1,5-9.5

Sumber : Moskus, 2007.

2.2 Bahan Bakar *Syn-Gas*

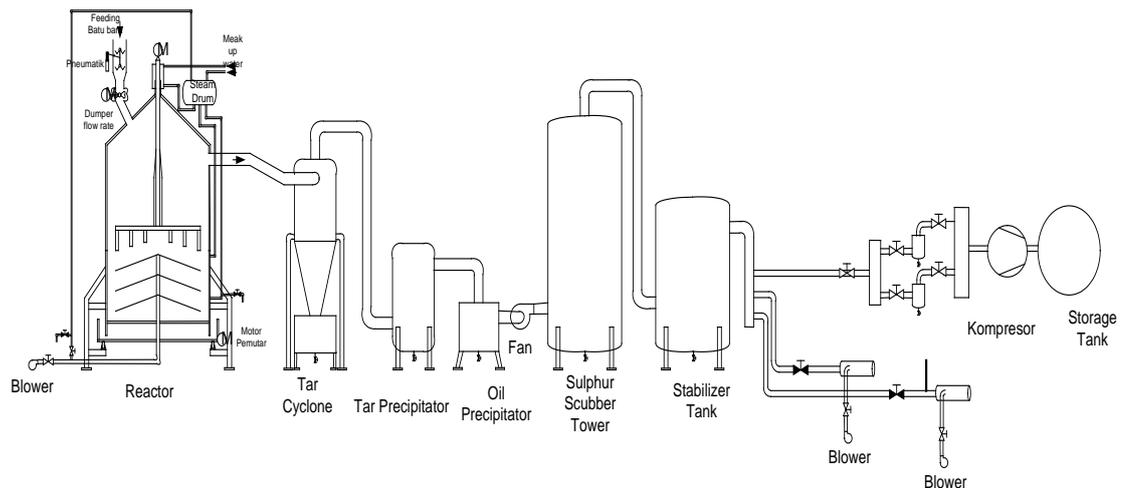
Synthesis gas juga biasa disebut *syn-gas* merupakan gas yang dihasilkan dari proses gasifikasi karbon yang terkandung pada bahan bakar dengan memakai pemanasan untuk menghasilkan gas. Salah satu bahan bakar untuk menghasilkan *syn-gas* adalah batubara. Kandungan utama *syn-gas* adalah terdiri dari karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂) dan hidrogen (H₂). *Syn-gas* merupakan gas hasil proses gasifikasi dengan reaksi kimia sebagai berikut (James, 2008) :





Gasifikasi adalah proses konversi bahan bakar padat menjadi gas melalui reaksi dengan satu atau campuran reaktan udara, oksigen, uap air, karbondioksida. Proses gasifikasi bertujuan untuk menghasilkan produk gas yang sesuai dengan penggunaannya baik sebagai sumber energi atau sebagai bahan baku industri kimia.

Proses gasifikasi batubara merupakan proses konversi secara kimia dari batubara yang berbentuk partikel atau padatan menjadi gas yang mudah terbakar atau *combustible*. Pada dasarnya gasifikasi batubara adalah reaksi oksidasi parsial dari batubara dengan oksigen atau udara. Proses gasifikasi dilakukan dalam suatu reaktor yang disebut dengan *gasifier*. *Combustible gas* atau *syn-gas* yang dapat dihasilkan dari proses gasifikasi adalah CO, H₂, CH₄ dan sebagainya. Gas produk gasifikasi ini dapat digunakan langsung sebagai bahan bakar, bahan baku proses sintesa atau bahan kimia lainnya.

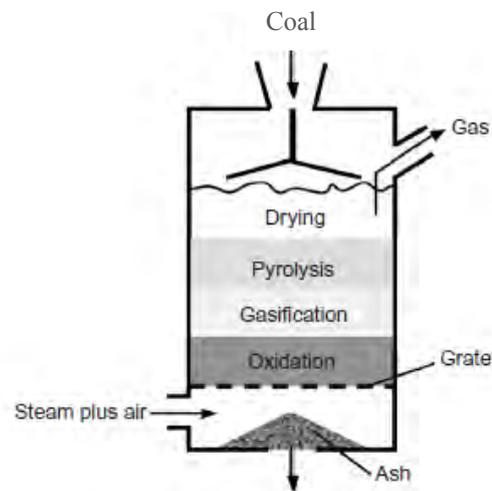


Gambar 2.1 Skematik *plant* gasifikasi batubara PT. Gending-Sidoarjo.

Syn-gas batubara yang digunakan dalam penelitian ini merupakan *syn-gas* yang produksi oleh perusahaan PT Gending – Sidoarjo, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Tipe reaktor gasifikasi batubara pada PT. Gending-sidoarjo adalah reaktor tipe *moving bed*, dimana proses gasifikasi konvensional dan dioperasikan pada temperatur reaktor sekitar 1000°C. Batubara dimasukkan dari bagian atas reaktor dan batubara tersebut turun secara perlahan karena gaya gravitasi sehingga terjadi proses konversi bahan bakar batubara. Berdasarkan arah



aliran udara di dalam reaktor, tipe *fixed bed* dikelompokkan lagi menjadi 2 yaitu *up draft* (seperti gambar 2.2) dan *down draft*.



Gambar 2.2 Reaktor gasifikasi tipe *fixed* atau *moving bed- up draft* (Basu, 2013).

2.2.1 Komposisi *Syn-gas* Dari Batubara

Proses gasifikasi atau *pyrolysis* merupakan salah satu cara yang paling banyak dipilih dalam pemanfaatan batubara untuk menghasilkan *syn-gas*. Di dalam menghasilkan *syn-gas* pada proses gasifikasi, ada beberapa produk lain seperti *fly ash*, No_x , SO_2 dan *tar* juga terbentuk. *Tar* yang diperoleh dari proses gasifikasi batubara akan terkondensasi pada temperatur di bawah dari temperatur *dew point*. *Tar* ini bisa menyebabkan kerak dan mengotori dari peralatan seperti bagian dalam pipa, *filter* dan *engine*. Untuk *tar* yang terkandung di dalam *syn-gas* dari proses gasifikasi tipe gasifier *fixed* atau *moving bed – up draft* menunjukkan kandungan *tar* bervariasi antara 0,5 sampai 100 g/m³.

Syn-gas yang dihasilkan dari gasifikasi bervariasi tergantung pada bahan baku dan proses gasifikasi yang terlibat. Namun, *syn-gas* umum yang dihasilkan dari batubara dalam gasifier ditiup oksigen memiliki volume sekitar 30% sampai 60% CO, 25% sampai 30% H₂, 0% sampai 5% metana (CH₄), 5% sampai 15% karbon dioksida (CO₂), dan sejumlah air.

Disamping parameter dalam pengoperasian *gasifier*, komposisi *syn-gas* juga tergantung pada tipe dari *gasifying agent* yang digunakan dan tipe *gasifier* yang digunakan. *Syn-gas* yang dihasilkan dengan menggunakan uap air sebagai

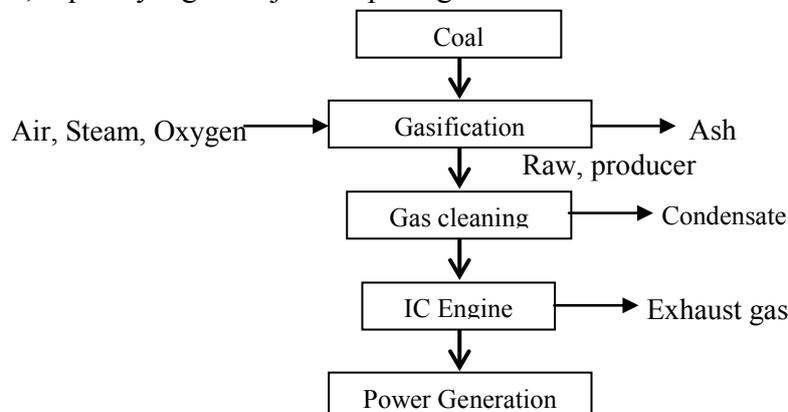


gasifying agent akan mengandung prosentse 3% N₂ lebih rendah jika dibandingkan dengan 41% N₂ dari *syn-gas* yang dihasilkan ketika udara yang digunakan sebagai *gasifying agent*.

Pada proses gasifikasi, *tar* terbentuk saat proses *pyrolysis* yang terjadi pada temperatur sekitar 230°C, dimana batubara akan terurai untuk menghasilkan gas yang kandungan utamanya adalah CO₂, H₂O, CH₄, CO, H₂, *tar* dan *char*. Karena aplikasi *syn-gas* untuk *IC engine* memerlukan kandungan *tar* yaitu kurang dari 100 mg/Nm³ dan kandungan partikel kurang dari 50 mg/Nm³, sehingga *tar* dan kandungan partikel menjadi suatu yang penting dan masalah saat *syn-gas* hasil gasifikasi batubara diaplikasikan pada *IC engine*.

2.2.2 Aplikasi *Syn-gas* Hasil Gasifikasi Batubara

Batubara mengalami *thermal-decomposition* pada temperatur sekitar 600-1000°C untuk menghasilkan *syn-gas* yang mengandung H₂, CO, CO₂, CH₄, H₂O dan gas hidrokarbon lainnya. *Char* dan *tar* akan berbentuk cair saat pada temperatur atmosfer juga terbentuk pada proses gasifikasi batubara. *Syn-gas* dengan fase kandungan karbon padat lebih besar dari 76% dimungkinkan untuk digunakan secara langsung untuk keperluan industri. *Syn-gas* dapat dibakar untuk menghasilkan panas atau pembangkit listrik, sedangkan *synthesis* berupa cair dapat dimanfaatkan untuk bahan bakar pada boiler, gas turbin atau *diesel engine* (Balat, 2009). *Syn-gas* hasil dari gasifikasi batubara dengan nilai kalori yang rendah atau medium bisa digunakan sebagai bahan bakar pada *IC engine-generator*, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Aplikasi *syn-gas* pada *IC engine-generator* (Laurence, 2011).



2.2.3 Syarat Karakteristik *Syn-gas* Yang Diperlukan Untuk *IC Engine*

Pada proses memproduksinya, diperlukan *syn-gas* yang bersih sebelum digunakan pada *power generation*, dimana *IC engine* memungkinkan menggunakan *syn-gas* dengan kandungan *tar* sekitar 50-100 mg/Nm³. Material partikel pada *syn-gas* seperti *char* dan *ash* memiliki efek yang berbahaya terhadap bagian-bagian *engine* yang bergerak. *Tar* yang terkondensi akan menyebabkan kerak pada sistem perpipaan sehingga bisa menimbulkan penyumbatan. Syarat karakteristik *syn-gas* yang diperlukan oleh power generator ditunjukkan pada tabel 2.2 di bawah ini:

Tabel 2.2 Syarat karakteristik *syn-gas* untuk *power generation*

Component	Unit	IC Engine	Gas Turbine
Particles	mg/Nm ³	< 50	< 30
Particle	μ	<10	< 5
Tar	mg/Nm ³	<100	-
Alkali	mg/Nm ³	-	<0,24
NH ₃	mg/Nm ³	-	-
H ₂ S & COS	mg/Nm ³	-	-
Cl	mg/Nm ³	-	-
CO ₂	Vol. %	No limit	No limit

Sumber : Hasler, 1999.

Oleh karena itu sistem pemurnian *syn-gas* diperlukan untuk mengurangi zat pencemar pada *syn-gas* (seperti material partikel, *tar* dan *impurities* yang lain) sehingga *syn-gas* yang dihasilkan bisa untuk diaplikasikan pada *IC engine*, seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.3 sebagai berikut:

Tabel 2.3 Spesifikasi *syn-gas* untuk aplikasi pada *IC engine*

Parameter	Acceptable	Preferable
Dust content (mg/Nm ³)	< 50	< 5
Particle size (mg/Nm ³)	10	1
Tar content (mg/Nm ³)	100	50
Gas heating value (KJ/Nm ³)	2500	4200

Sumber : Knoef, 2000.

Tabel 2.4 Komparasi properti antara LPG dan *syn-gas*

Property	LPG ^[1]	Syn-gas ^[1]	Syn-gas ^[2]
Composition (% vol)	C ₃ H ₈ : 30%	N ₂ : 41,2%	N ₂ : 45,7%
	C ₄ H ₁₀ : 70%	CO ₂ : 9,3%	CO ₂ : 6,6%
		CO : 24,3%	CO : 28,2%
		CH ₄ : 2,2%	O ₂ : 2,6%
		H ₂ : 22,6%	H ₂ : 16,5%
LHV at 1 atm and 15°C (MJ/m ³)	45,7	5	5,3
Density at 1 atm and 15°C (kg/m ³)	2,26	1,05	-
Flame speed (cm/s)	100	50	-
Stoichiometric Air/fuel (kg of air/kg of fuel)	15,5	1,4	-
<i>Flammability limits (vol %in air)</i>			
Leaner	2,15	7	-
Richer	9,6	21,6	-
<i>Octane number</i>			
Research	103 ~ 105	100 ~ 105	-
Auto ignition temperature (°C)	405 ~ 450	625	-

Sumber : [1] Porpatham, 2001.

[2] Analisa komposisi *syn-gas* PT. Gending-Sidoarjo, LEMIGAS, 2013.

2.3 Karakteristik LPG Dan *Syn-gas* Terhadap Performa *Engine*

Menurut Juan (2012), pengaruh utama dari karakteristik bahan bakar *syn-gas* terhadap perfoma *engine* adalah nilai kalor (*heating value*) campuran bahan bakar dengan udara, *displaced volume* dari *engine*, nilai oktan dari bahan bakar, kecepatan menyala (*flame speed*) campuran bahan bakar dengan udara, periode *auto-ignition delay*, rasio kompresi dari *engine* (berhubungan dengan *knock tendency*), dan waktu pengapian (*spark timing*).

2.3.1 Nilai Kalor (*heating value*)

Nilai kalor dari campuran bahan bakar dan udara secara *stoichiometric* (HV_m) bisa ditentukan melalui perhitungan nilai kalor secara *volumetric* (kJ/Nm³). Nilai kalor ini tergantung besarnya konsentrasi dari komponen *combustable* yang terkandung pada *syn-gas*. LHV (*low heating value*) dari *syn-gas* diperoleh dari



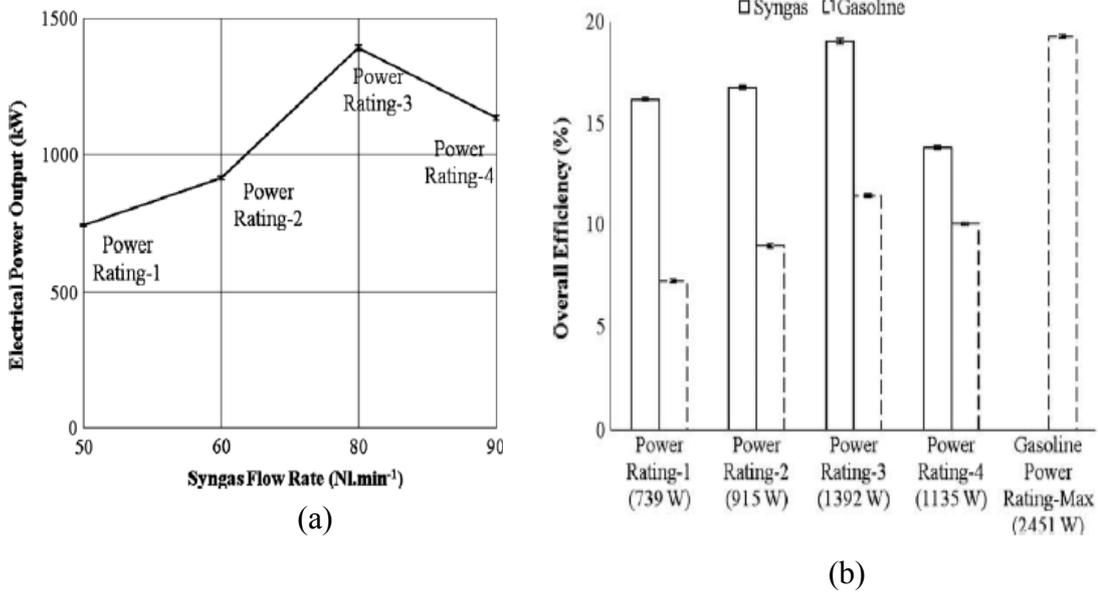
gasifikasi batubara sebesar sekitar $5,3 \text{ MJ/m}^3$ dengan komposisi dari komponen combustible : $\text{H}_2 - 16,5\%$, $\text{CO} - 28,2\%$, $\text{N}_2 - 45,7\%$ dan $\text{CO}_2 - 6,6\%$. Nilai kalor *syn-gas* jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan nilai kalor LPG yaitu sebesar $45,7 \text{ MJ/m}^3$. Secara teori nilai dari energi mengalami penurunan (*dearating*) ketika bahan bakar *gas engine* dengan LPG digantikan oleh *syn-gas*, dimana *dearating* yang diperkirakan terjadi sekitar 30%. Sedangkan *power* yang dihasilkan saat operasi beban penuh dari *engine* dengan bahan bakar *syn-gas* diperkirakan $\frac{3}{4}$ dari maksimum *power* saat *engine* menggunakan bahan bakar cair konvensional. Walaupun demikian, dari analisa termodinamik menunjukkan bahwa nilai *power-dearating* bisa kurang dari 15~20% dapat tercapai jika penggunaan bahan bakar *syn-gas* pada *engine* dengan rasio kompresi yang lebih besar.

Untuk campuran antara *syn-gas* dan udara untuk kondisi pembakaran kering akan tercapai saat rasio aktual udara dan bahan bakar lebih besar dari 2 dan pada kondisi yang sama nilai kalor dari campuran *syn-gas* dan udara akan lebih besar jika dibandingkan saat menggunakan bahan bakar bensin.

Berdasarkan penelitian dari Ajay et al (2010) yang berjudul *Performance and Emissions of a Spark-Ignited Engine Driven Generator on Biomass Based Syn-gas*, dimana objek dari penelitian ini adalah menentukan performa dan emisi gas buang pada *engine* generator berkapasitas 5,5 kW, yang dioperasikan dengan bahan bakar 100% *syn-gas* dengan *flow rate* bahan bakar *syn-gas* yang berbeda-beda dan kemudian dibandingkan dengan saat menggunakan bahan bakar *gasoline* pada beban generator yang sama. Pengujian dilakukan dengan menggunakan 4 variasi *flow rate* bahan bakar *syn-gas* yaitu 50, 60, 80 dan 90 Nl/min, dimana *flow rate* ini beroperasi pada *operating-range* dari genset. *Power rating* 1, 2, 3 dan 4 ditentukan dari energi listrik yang dihasilkan dari masing-masing *flow rate* bahan bakar *syn-gas*. Dalam pengoperasian genset dengan bahan bakar *syn-gas*, beban generator diatur pada tegangan listrik sekitar 90 volt. Dimana tegangan listrik sebesar 90 volt merupakan tegangan minimum pada pengoperasian generator *single-phase*. Untuk pengoperasian dengan bahan bakar *gasoline*, diperlukan



energi listrik yang dihasilkan setiap *power-rating* yang didapatkan dengan pengaturan beban listrik.



Gambar 2.4 (a) Grafik energi listrik yang dihasilkan generator sebagai fungsi dari *flow rate* bahan bakar *syn-gas* (Ajay, 2010).
(b) Grafik *Overall efficiency* sebagai fungsi dari *power rating* dengan bahan bakar *syn-gas* dan *gasoline* (Ajay, 2010).

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4, pe ngujian yang dilakukan menunjukkan maksimum energi listrik yang dihasilkan oleh generator saat menggunakan bahan bakar *syn-gas* sebesar 1392 W dengan *flow rate* bahan bakar sebesar 80 N l/min. *Overall efficiency* yang dihasilkan sebesar 19,1 % dan tegangan listrik sebesar 89 V olt. Sedangkan dengan bahan bakar *gasoline*, maksimum energi listrik yang dihasilkan generator sebesar 2451 W dengan *flow rate* bahan bakar sebesar 1,42 l/h. *Overall efficiency* yang dihasilkan sebesar 19,3 % dan tegangan listrik sebesar 88,9 Volt. Maksimum energi listrik yang dihasilkan saat memakai bahan bakar *syn-gas* lebih rendah dibandingkan saat menggunakan *gasoline* karena LHV dari *syn-gas* (5,179 MJ/kg) lebih rendah dibandingkan LHV dari *gasoline* (44,4 MJ/kg). Maksimum energi listrik yang dihasilkan oleh generator saat memakai bahan bakar *syn-gas* hanya 1,8 kali lebih rendah jika dibanding menggunakan bahan bakar *gasoline*, sementara density dari



syn-gas ($1,7 \text{ kg/m}^3$) sebesar 423 kali lebih rendah dari *density gasoline* (720 kg/m^3). Energi listrik yang dihasilkan oleh generator saat memakai bahan bakar *syn-gas* pada *flow rate* 50, 60, 80 dan 90 N l/min menghasilkan *power rating* sebesar 738, 915, 1392 dan 1135 W. Pada *power rating* 4, walaupun *flow rate* dari bahan bakar *syn-gas* paling besar tetapi energi listrik yang dihasilkan menunjukkan tidak paling besar. Pada saat generator memakai bahan bakar *syn-gas* maupun *gasoline*, nilai *overall efficiency* mengalami kenaikan dari *power rating* 1-3 dan mengalami penurunan pada *power rating* 4.

2.3.2 Volume Silinder Engine

Jumlah campuran udara dan bahan bakar masuk ke ruang bakar di dalam silinder ditentukan oleh *displaced volume* dari *engine* dan oleh tekanan dan temperatur bahan bakar. Sehingga untuk menjaga nilai daya dari *engine* saat bahan bakar LPG diganti dengan *syn-gas*, maka jumlah bahan bakar harus dinaikkan secara signifikan. Hal ini bisa dicapai misalkan dengan menggunakan *turbocharger* untuk meningkatkan tekanan campuran udara bahan bakar.

2.3.3 Flame Speed

Kecepatan terbakar (*flame speed*) tergantung pada komposisi kimia dari bahan bakar, jumlah dari udara yang digunakan untuk proses pembakaran, dimana karakteristiknya ditentukan oleh parameter *equivalence ratio* (ER) dan tekanan dan temperatur dari campuran bahan bakar-udara. Apalagi *flame speed* tergantung dari intensitas turbulensi, dimana hal ini dapat berubah dengan perubahan putaran *engine*. Campuran *combustable* yang kaya dan karakteristik dengan *flame speed* yang besar akan memberikan keandalan pada keseluruhan proses pembakaran. *Flame speed* memiliki pengaruh yang signifikan pada performa dari *LPG engine* dan tingkat polusi dari gas buangnya.

2.3.4 Spark Timing

Dengan memperhatikan konsentrasi hidrogen pada *syn-gas* adalah perlu memajukan waktu pengapian (*spark timing*) untuk menghasilkan performa yang bagus dari *LPG engine*. Dalam hal ini busi akan terbakar pada siklus saat posisi piston sangat dekat dengan TMA (titik mati atas). Walaupun demikian, perlu untuk memperhitungkan bahwa *spark timing* juga tergantung dari variabel lain



seperti perubahan beban dan putaran *engine*. Secara teori busi menyala ketika piston pada posisi paling tinggi yang diperbolehkan dan ketika campuran bahan bakar udara telah terkompresi penuh sehingga tenaga langkah piston bisa terjadi sedemikian hingga menghasilkan daya *engine* yang maksimum. Pengaturan waktu pengapian akan menghasilkan torsi yang tinggi pada putaran konstan, bersamaan dengan itu daya yang dihasilkan *engine* akan lebih besar dan konsumsi bahan bakar yang rendah. Titik tersebut biasa dinamakan MBT (*maximum brake torque*) point dan dapat diamati pada kurva tekanan dan *crank angle* ($p - \theta$) terjadi pada 16~17 derajat dari *crank angle* setelah posisi piston pada TDC (Heywood, 1998). Waktu pengapian saat *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* adalah diperlambat jika dibandingkan terhadap waktu pengapian pada *engine* berbahan bakar *gasoline* yaitu diantara 10 ~ 40° sebelum TMA (Heywood, 1998). Perlambatan waktu pengapian adalah perlu dilakukan saat *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* untuk efisiensi yang lebih tinggi. Waktu pengapian diperlambat dan meningkatkan rasio kompresi maka *engine* akan mencapai MBT point. Hal ini disebabkan tekanan dan temperatur yang lebih tinggi pada rasio kompresi yang tinggi sehingga proses pembakaran terjadi lebih cepat.

2.3.5 Knock Tendency

Pada bahan bakar gas, nilai methana pada gas akan mempengaruhi terjadinya *knock* dan hal ini bisa dianalogikan dengan nilai oktan akan mempengaruhi kuantitas terjadinya *knock* pada bahan bakar *gasoline*. *Engine* dengan rasio kompresi yang tinggi membutuhkan bahan bakar dengan nilai oktan atau jumlah methana yang tinggi untuk mencegah *self-ignition* dari bahan bakar yang tidak terkontrol dan pembentukan tekanan tinggi saat puncak langkah pada *silinder engine* yang terjadi pada awal proses pembakaran.

Terjadinya *knock* disebabkan dari beberapa faktor kombinasi diantaranya yaitu desain ruang bakar, *equivalence ratio*, tekanan dan temperatur udara masuk, waktu pengapian dan properti bahan bakar. Bahan bakar gas dengan kandungan hidrogen yang tinggi biasanya tahan terhadap terjadinya *knock*, walaupun demikian *flame speed* yang tinggi bersamaan dengan berkurangnya campuran bahan bakar udara memungkinkan terjadinya *knocking*. Berdasarkan Heywood



(1998), *flame speed* yang tinggi dan porsi campuran bahan bakar udara sedemikian hingga menghasilkan panas diatas temperatur *self-ignition* akan menyebabkan matinya pembakaran saat periode penundaan *ignition* sehingga terjadinya *knocking* akan terhindari.

2.3.6 Periode *Auto-Ignition*

Pada periode penundaan *auto-ignition* dari campuran bahan bakar udara merupakan parameter yang penting pada pengoperasian *engine*. Parameter ini didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan oleh campuran bahan bakar udara untuk terbakar secara spontan pada kondisi temperatur dan tekanan tertentu. Lamanya penundaan *ignition* tergantung dari komposisi *syn-gas* dan rasio bahan bakar-udara di dalam *engine*. Jika diinginkan temperatur pembakaran yang lebih rendah bersamaan dengan periode penundaan *auto-ignition* yang lebih lama, pada campuran bahan bakar udara hal ini memungkinkan untuk meningkatkan rasio kompresi *engine* tanpa meningkatkan kecederungan terjadinya *knocking*.

Masalah lain yang muncul ketika menggunakan *syn-gas* untuk bahan bakar *engine* adalah kemungkinan terjadinya *backfiring*, dimana penyalaan campuran bahan bakar udara pada *intake manifold* dan pembakaran yang bersifat *explosive* yang akan menyebabkan *engine* akan mati.

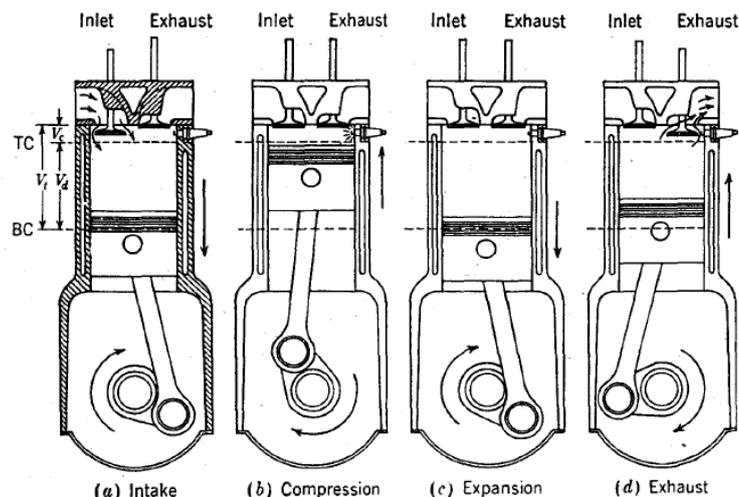
2.4 Siklus Ideal Motor Otto (*Otto Cycle*)

LPG *engine-genset* merupakan salah satu tipe dari *internal combustion* (IC) *engine* dengan bahan bakar berupa gas. Motor yang bekerja menurut siklus Otto merupakan jenis motor dengan konversi energi tidak langsung, dimana energi kimia dari bahan bakar dirubah melalui proses pembakaran di dalam silinder tertutup ruang bakar menjadi energi termal yang kemudian digunakan untuk menghasilkan energi mekanik. Motor otto empat langkah, satu siklus operasi pada diselesaikan dalam empat langkah piston atau dua putaran dari *crank shaft*. Setiap langkah menempuh 180° sehingga dalam satu siklus menjadi 720° .

Pada gambar 2.5 menunjukkan siklus Otto yang terjadi pada motor 4 langkah meliputi langkah isap, langkah kompresi, langkah kerja, dan langkah buang adalah sebagai berikut :



- a. Langkah hisap, merupakan langkah hisap bahan bakar dimana piston mulai bergerak dari TMA (titik mati atas) menuju ke TMB (titik mati bawah) dengan posisi katup hisap terbuka dan katup buang tertutup. Dari langkah piston ini mengakibatkan tekanan di dalam ruang bakar menjadi turun sehingga campuran bahan bakar dengan udara akan terhisap ke dalam ruang bakar.
- b. Langkah kompresi, dimana piston bergerak ke atas menuju TMA setelah langkah hisap selesai, dengan posisi katup hisap dan katup buang tertutup. Langkah ini akan dapat menaikkan tekanan di dalam ruang bakar yang telah terisi campuran bahan bakar dengan udara.
- c. Langkah kerja, merupakan langkah kerja dari *engine* dimana piston akan bergerak menuju titik mati bawah akibat dari kenaikan tekanan yang ditimbulkan pada proses pembakaran. Pada langkah ini posisi katup hisap dan katup buang masih dalam kondisi tertutup dan katup buang akan mulai terbuka saat piston beberapa derajat poros engkol mendekati titik mati bawah.
- d. Langkah buang, dimana katup buang dan katup hisap masih tertutup dan piston bergerak menuju ke TMA membuang gas pembakaran keluar dari silinder.



Gambar 2.5 Siklus motor empat langkah meliputi langkah isap, langkah kompresi, langkah kerja, dan langkah buang (Heywood, 1998).



Keseluruhan proses di atas dapat terjadi apabila memenuhi beberapa kondisi berikut ini, yakni (Mathur, M.D 1986).

1. Cukup tersedianya campuran bahan bakar udara yang dapat terbakar.
2. Tersedia pemantik bunga api yang mampu membakar campuran bahan bakar udara.
3. Adanya rambatan nyala api yang cukup stabil sehingga mampu membakar campuran bahan bakar udara.

2.5 Pembakaran Pada Motor Otto

Pembakaran merupakan reaksi kimia yang relatif cepat antara hidrokarbon pada bahan bakar dengan oksigen di udara yang menghasilkan energi dalam bentuk panas. Pada motor otto terjadi konversi energi dari energi panas ke dalam tekanan lalu diteruskan menjadi energi mekanik yang berupa gerak *reciprocating piston*. Energi panas tersebut diperoleh dari pembakaran sejumlah bahan bakar yang telah bercampur dengan udara yang diawali oleh percikan bunga api dari busi (*spark plug*).

Reaksi pembakaran aktual adalah reaksi pembakaran reaktan yang tidak sempurna antara bahan bakar dan udara sehingga gas buang CO , CO_2 , H_2O , O_2 , N_2 dan HC.

Reaksi pembakaran teoritis adalah pembakaran yang sempurna pada reaktan yaitu antara bahan bakar dan udara dengan semua reaktan habis terbakar dan hanya menghasilkan produk gas CO_2 , N_2 dan H_2O . Berikut reaksi pembakaran pada bahan bakar dengan udara :



2.6 Tahapan Pembakaran

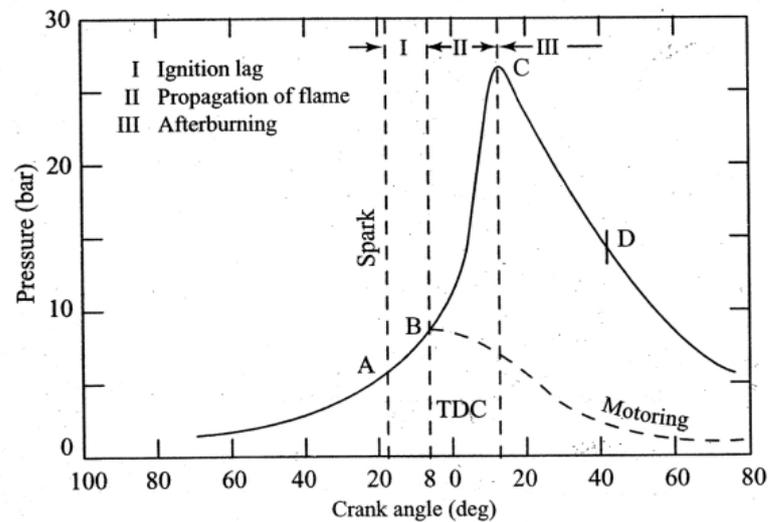
Secara umum, tahapan pembakaran dapat dibagi menjadi dua seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6 yaitu sebagai berikut (Mathur, M.D 1986) :

1. Tahapan pertama, disebut *ignition lag* merupakan fase persiapan yang mana terjadi pertumbuhan dan perkembangan dari inti api. Tahapan ini tergantung sepenuhnya pada sifat alami bahan bakar seperti: temperatur, tekanan, sifat gas buang, dan laju percepatan oksidasi dalam ruang bakar.
-



Ignition lag terjadi dari A-B pada saat kompresi berlangsung sehingga garis A-B disebut garis kompresi.

2. Tahapan kedua disebut *propagation of flame* dimana terjadi perubahan temperatur, tekanan, dan sifat bahan bakar akibat oksidasi. Perubahan tekanan terjadi disepanjang garis pembakaran (B-C). Pada grafik di atas, titik C menunjukkan selesainya perjalanan api. Namun, pembebasan panas dari bahan bakar masih berlangsung meskipun tidak memberikan kenaikan tekanan di dalam silinder dikarenakan pada saat itu sudah terjadi proses ekspansi. Oleh karena itu, tahapan ini dikenal dengan istilah pembakaran lanjut (*after burning*).



Gambar 2.6 Tahapan pembakaran pada motor otto.

2.6.1 Ignition Lag

Ignition lag bukan periode yang pasif, tetapi merupakan suatu proses kimia. Periode *ignition lag* kira-kira 10° sampai 20° *crank angle* dalam waktu kira-kira 0,0015 detik. Perlu diketahui bahwa selama periode penyebaran api akan sangat lambat sehingga fraksi campuran yang terbakar sangatlah sedikit dideteksi oleh indikator diagram. Kenaikan tekanan pada fase ini hanya 1% dari tekanan maksimum pembakaran yang setara dengan pembakaran sekitar 1,55 dari campuran bahan bakar – udara dan volume yang dilalui oleh produk pembakaran 5% dari volume ruang bakar.



Durasi dari *ignition lag* bergantung pada faktor-faktor berikut ini :

1. Bahan bakar

Fase *ignition lag* tergantung pada susunan senyawa kimia dari bahan bakar, semakin tinggi temperatur nyala sendiri dari bahan bakar maka semakin panjang fase *ignition lag*. Selain itu fase bahan bakar yang disuplai ke dalam ruang bakar juga berpengaruh pada *ignition lag*, bahan bakar yang telah berbentuk gas akan mempunyai *ignition lag* yang lebih singkat dibandingkan dengan bahan bakar yang berupa cairan walupun sebelumnya telah dikabutkan oleh karburator, namun pada saat memasuki ruang bakar hasil pengkabutan bahan bakar akan terlebih dahulu menyerap panas lingkungan untuk mengubah ke dalam fase uap panas, hal ini dapat mempengaruhi fase *ignition lag* yang semakin panjang.

2. Rasio campuran bahan bakar dan udara

Ignition lag terkecil terjadi pada rasio campuran bahan bakar dengan udara yang mempunyai temperatur paling tinggi. Komposisi campuran sangat menentukan laju pembakaran dimana kecepatan api maksimum terjadi ketika campuran 10% lebih kaya dari stoikiometri. Campuran yang terlalu miskin akan memberikan energi panas yang kecil, sehingga menyebabkan temperatur dan kecepatan api yang rendah. Campuran yang terlalu kaya menyebabkan pembakaran yang tidak sempurna, dimana beberapa karbon hanya terbakar menjadi CO dan bukan menjadi CO₂, sehingga menyebabkan hasil produksi energi panas pada pembakaran akan lebih kecil. Jadi dapat disimpulkan bahwa jika energi panas yang bisa dibebaskan oleh proses pembakaran pada campuran bahan bakar udara kecil, maka temperatur api dan kecepatan api akan rendah.

Beberapa metode yang digunakan untuk menghitung rasio campuran bahan bakar dan udara antara lain AFR (*air-fuel ratio*) dan FAR (*fuel-air ratio*).

a. Rasio udara bahan bakar (*Air-Fuel Ratio* atau AFR)

Metode ini paling sering digunakan untuk mendefinisikan campuran dan merupakan perbandingan antara massa dari udara dan bahan



bakar pada suatu titik tinjau. Secara simbolis, AFR dihitung sebagai berikut :

$$AFR = \frac{m_a}{m_f} = \frac{M_a N_a}{M_f N_f} \quad (2.3)$$

Dimana :

m_a = massa udara (kg)

m_f = massa bahan bakar (kg)

Jika nilai aktual lebih besar dari nilai AFR, maka terdapat udara yang jumlahnya lebih banyak daripada yang dibutuhkan oleh sistem dalam proses pembakaran dan dikatakan miskin bahan bakar, jika nilai aktual lebih kecil dari AFR stokiometrik maka tidak cukup terdapat udara pada sistem dan dikatakan kaya bahan bakar.

b. Rasio bahan bakar udara (*Fuel Air Ratio* atau FAR)

Rasio bahan bakar udara merupakan kebalikan dari pada AFR yang dirumuskan sebagai berikut :

$$FAR = \frac{m_f}{m_a} = \frac{M_f N_f}{M_a N_a} \quad (2.4)$$

3. Temperatur dan tekanan awal

Laju reaksi kimia sangat tergantung dari temperatur, laju ini amat rendah bila temperaturnya rendah namun akan naik dengan cepat bersamaan dengan naiknya temperatur. Laju reaksi kimia juga terpengaruh oleh tekanan *intake* bahan bakar namun pengaruhnya relatif kecil. Jadi *ignition lag* turun bersamaan dengan naiknya temperatur dan tekanan gas pada waktu penyalaan. Jadi menaikkan temperatur, tekanan, rasio kompresi dan memperlambat nyala api semuanya akan dapat mengurangi *ignition lag*.

4. Celah elektroda busi

Jarak antar elektroda pada busi adalah penting bila dipandang dari sudut pembentukan inti api. Bila jaraknya terlalu kecil pendinginan inti api mungkin saja terjadi oleh katoda busi dan rentang daerah dari rasio bahan



bakar udara untuk pembentukan inti api menjadi lebih kecil. Voltase pada elektroda busi yang makin tinggi dapat membangkitkan api yang semakin besar pada ujung busi. Saat kualitas bahan bakar menurun, atau memperbesar rasio kompresi maka pembakaran akan dapat dijaga agar tetap stabil dengan memperbesar nyala api pada busi.

5. Turbulensi

Ignition lag tidak banyak terpengaruh oleh intensitas turbulensi. Turbulensi itu sendiri berbanding lurus dengan kecepatan motor. Sehingga kenaikan kecepatan motor juga tidak banyak mempengaruhi *ignition lag* yang pengukurannya dalam milidetik. Saat kecepatan motor naik maka sudut engkol juga naik dalam milidetik. Jadi diukur dalam derajat rotasi engkol, kenaikan *ignition lag* hampir *linier* dengan kecepatan motor. Untuk alasan inilah menjadi keharusan untuk memajukan *ignition timing (advance)* saat operasional motor pada kecepatan yang lebih tinggi. Turbulensi berlebihan dari campuran di daerah busi adalah amat merugikan karena dapat menaikkan perpindahan panas dari daerah pembakaran dan akan menuju pembentukan nyala api yang tidak stabil. Dari itulah sebabnya bahwa busi diletakkan sedikit lebih masuk di dalam dinding dalam ruang bakar.

2.6.2 Flame Propagation

Tahapan kedua dari pembakaran adalah tahap penyebaran api, tahap ini sangat penting karena dalam fase ini kecepatan api dalam penyebaran pada seluruh permukaan campuran akan menentukan laju kenaikan tekanan di dalam silinder.

Beberapa faktor yang mempengaruhi *propagation of flame* adalah sebagai berikut (Mathur, MD 1986) :

1. Rasio bahan bakar dan udara

Komposisi dari campuran bahan bakar udara mempengaruhi laju pembakaran yang berakibat pada panas yang dihasilkan dari pembakaran. Dengan bahan bakar hidrokarbon kecepatan maksimum api terjadi pada campuran 110% lebih dari stoikiometri yaitu 10% lebih kaya.



2. Kompresi rasio

Kompresi rasio yang lebih tinggi akan menaikkan tekanan dan temperatur pembakaran serta dapat menurunkan konsentrasi gas buang. Kondisi ini akan memperpendek *ignition lag* pembakaran dan mengurangi *ignition advance*. Tekanan tinggi dan temperatur tinggi dari campuran akan mempercepat pembakaran tahap kedua dimana akan dapat menyebabkan tekanan maksimum dan tekanan efektif rata-rata indikasi (*imep*) juga akan naik. Dengan menggunakan kompresi rasio yang lebih tinggi akan menaikkan *rasio surface* ke volume ruang bakar, yang berarti menaikkan bagian dari campuran dimana fase *after burning* pada tahap ketiga. Kenaikan kompresi rasio yang mengakibatkan kenaikan temperatur akan menaikkan pula kecenderungan motor untuk menjadi detonasi.

3. Temperatur dan tekanan masuk

Menaikkan temperatur dan tekanan *intake* maka akan menaikkan kecepatan api karena campuran akan semakin mudah terbakar dan perambatan api akan lebih cepat.

4. Beban motor

Dengan naiknya beban motor, tekanan siklus naik sehingga kecepatan api juga naik. Pada motor bensin dengan penurunan beban, tenaga dari motor akan turun dengan *throttling*. Karena *throttling* tekanan kompresi awal dan akhir turun serta delusi antara campuran kerja dan sisa gas buang menjadi lebih banyak. Hal ini akan menyebabkan pengembangan inti api sulit dan tidak tetap sehingga akan memperpanjang *ignition lag*. Kesulitan ini dapat diatasi dengan cara memperkaya campuran pada beban rendah (0,8-0,9 dari stoikiometri) tetapi masih sulit untuk menghindari *after burning* yang terjadi pada sebagian saat langkah ekspansi. Dalam kenyataannya, pembakaran yang jelek pada beban rendah dan keharusan memperkaya campuran bahan bakar adalah beberapa kerugian dari pada motor bensin yang berarti membuang bahan bakar dan penghembusan keluar sejumlah besar produk pembakaran yang tidak sempurna seperti gas CO dan gas racun lainnya ke lingkungan.



5. Turbulensi

Turbulensi memegang peranan yang sangat penting dalam fenomena pembakaran. Kecepatan api akan cenderung rendah pada campuran non turbulen. Turbulensi dapat meningkatkan proses perpindahan panas dan pencampuran antara porsi gas yang terbakar (*burned gas*) dengan porsi gas yang belum terbakar (*unburned gas*) dalam muka api (*flame front*). Proses perpindahan panas dan pencampuran antara porsi gas yang terbakar (*burned gas*) dengan porsi gas yang belum terbakar (*unburned gas*) dalam muka api (*flame front*) tersebut biasa disebut dengan difusi. Dua faktor inilah yang menyebabkan kecepatan api menjadi turbulen (*turbulent flame*) dan terus meningkat seiring dengan kecepatan turbulensi. Derajat turbulensi secara langsung meningkat terhadap kecepatan piston.

Tidak tercukupinya turbulensi akan menghasilkan *efisiensi thermis* yang rendah akibat pembakaran campuran bahan bakar-udara yang tidak sempurna. Dampak turbulensi dapat dirangkum sebagai berikut :

- a. Turbulensi mempercepat reaksi kimia dengan menyebabkan campuran yang lebih bagus (*intimate mixing*) antara bahan bakar-udara sehingga kecepatan api akan meningkat. Dengan meningkatnya kecepatan api, waktu pembakaran menurun sehingga akan meminimalkan tendensi detonasi.
- b. Turbulensi menaikkan perpindahan panas ke dinding silinder yang dapat menurunkan efisiensi *thermis*.
- c. Turbulensi yang berlebihan menyebabkan kenaikan tekanan yang semakin cepat sehingga menyebabkan getaran yang tinggi pada motor dan motor akan beroperasi dengan kasar dan berisik.

6. Kecepatan motor

Makin tinggi kecepatan motor makin tinggi pula turbulensi yang terjadi di dalam silinder. Dari alasan ini kecepatan api berbanding hampir linier dengan kecepatan motor. Jadi bila kecepatan motor dinaikkan dua kali (dalam milidetik) api akan menjelajah di ruang bakar dengan waktu separuhnya.



2.7 Waktu Pengapian (*Ignition Timing*) Pada Motor Otto

Untuk mendapatkan tenaga yang maksimal dari *engine* maka campuran bahan bakar udara terkompresi harus memberikan tekanan yang maksimal pada awal langkah ekspansi, sehingga pembakaran harus dimulai sebelum piston mencapai TMA (titik mati atas). Hal ini dilakukan karena terjadi jeda (*time lag*) antara pencetusan bunga api (*spark*) dengan awal terjadinya pembakaran bahan bakar dan juga tergantung sifat pembakarannya (*combustion properties*) masing-masing bahan bakar mempunyai waktu tertentu untuk mengakhiri proses pembakaran. Akibatnya adalah tekanan maksimum tidak dapat dihasilkan pada saat volume ruang bakar minimum sehingga muncul *time losses*.

Pengaturan waktu pengapian yang tepat merupakan hal yang penting karena masing-masing *engine* memiliki waktu pengapian optimal pada kondisi standarnya. Jika pencetusan bunga api terlalu cepat maka akhir pembakaran akan terjadi sebelum langkah kompresi selesai sehingga tekanan yang dihasilkan akan melawan arah gerakan piston yang berakibat pada penurunan tenaga yang dihasilkan hal ini disebut *direct losses*. Dan sebaliknya jika pencetusan bunga api terlalu lambat maka piston sudah melakukan langkah ekspansi sebelum terbentuk tekanan yang tinggi akibatnya tenaga yang dihasilkan tidak maksimal. Berikut ini adalah beberapa hal yang mempengaruhi waktu pengapian (*ignition timing*) :

1. Kecepatan *engine*

Kecepatan *engine* yang semakin tinggi akan menyebabkan laju pembakaran akan naik, sehingga waktu penyalaan harus lebih lambat sehingga *igniton timing* harus dimajukan.

2. Campuran bahan bakar udara

Pembakaran akan menjadi lebih cepat dengan campuran bahan bakar udara yang semakin kaya, sehingga waktu pengapian dilambatkan mendekati TDC.

3. Bagian beban operasi

Beban operasi pada *SI engine* yaitu dengan *men-throttle*. Berkaitan dengan *men-throttle* jumlah campuran bahan bakar udara yang masuk ke ruang bakar semakin kecil dan gas residunya akan lebih besar. Rasio bahan bakar udara lebih tinggi dibutuhkan untuk kondisi beban sebagian menyebabkan



waktu pembakaran lebih lama. Sehingga pada beban sebagian waktu pengapian harus dimajukan.

4. Tipe bahan bakar

Ignition delay akan bergantung pada tipe bahan bakar yang digunakan pada *engine*. Untuk mencapai kondisi daya maksimum bahan bakar yang mempunyai waktu pembakaran yang lambat dimajukan waktu pengapiannya.

Berdasarkan penelitian Dabhadkar (2013) yang berjudul *Effect of Ignition Timing on the Performance of LPG Fuelled SI Engine*, dimana penelitian ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui efek dari *ignition timing* terhadap performa *engine* dan efek dari *ignition timing* terhadap emisi gas buang. Untuk pengaturan waktu pengapian dilakukan berdasarkan perbedaan mekanisme pengapian di dalam *engine*, waktu pengapian dapat bervariasi berdasarkan putaran dari *contact breaker* pada *base plate* dengan berdasarkan pada *ignition cam* ataupun *vice versa*. *Contact breaker* pada *base plate* akan diikuti *contact breaker* pada *lever arm*. *Timing lever* terletak pada kedudukan bodi distributor yang berbentuk seperti ulir. Dengan *timing lever*, bodi distributor dapat diputar sedikit dariudukannya semula, dengan jalan ini waktu pengapian dapat divariasikan. Waktu pengapian bisa divariasikan dengan metode manual ataupun otomatis. Untuk pengontrolan waktu pengapian secara otomatis dilakukan dengan cara mekanisme *vaccum advance* dan mekanisme *centrifugal advance*. Dari pengujian yang dilakukan menunjukkan bahwa waktu pengapian memiliki efek secara signifikan terhadap performa dari *engine*. Terlalu cepat waktu pengapian akan meningkatkan tekanan puncak dan menaikkan kurva ekspansi diatas dari waktu yang optimum. Pada beberapa perubahan waktu pengapian bisa menyebabkan pembakaran yang abnormal (*knock*). Waktu pengapian yang terlalu lambat akan menghasilkan tekanan puncak yang rendah. Tetapi pada waktu pengapian yang terlalu cepat ataupun lambat akan menyebabkan efisiensi *engine* menjadi rendah. Waktu pengapian yang lambat bisa menyebabkan *overheating* pada *engine* sehingga dapat menyebabkan kerusakan pada *exhaust manifold*. Emisi gas buang juga bervariasi tergantung dari perubahan dari waktu pengapian.

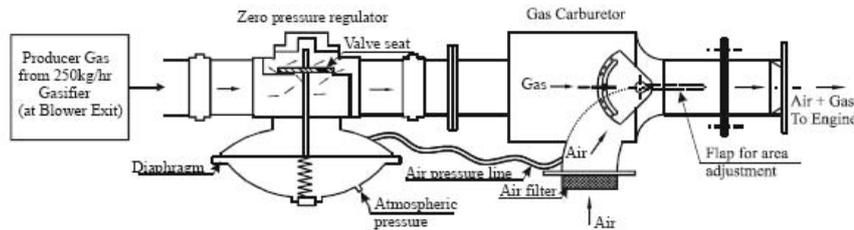


Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Hagos et al (2014) yang berjudul *Trend of Syn-gas as a Fuel in Internal Combustion Engines*, dimana penelitian ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui aplikasi *syn-gas* pada *power generating plants*, *trend* dari teknologi *engine* dan potensi dari bahan bakar *syn-gas* untuk digunakan pada *IC engines*. Penelitian dilakukan dengan 3 bahan bakar *syn-gas* yang memiliki properti yang berbeda, yang didapatkan dari proses gasifikasi dengan variasi parameter *input* yang berbeda. Kemudian bahan bakar *syn-gas* tersebut dibandingkan dengan CNG dan hidrogen, untuk mengetahui pengaruhnya terhadap performa dan emisi gas buang dari *engine*. Dari pengujian yang dilakukan menunjukkan bahwa teknologi sistem *direct-injection* bahan bakar dan rasio kompresi yang tinggi dari *SI engine*, perbaikan dari efisiensi dan proses gasifikasi yang bersih, dengan cara demikian terpisahnya produksi gas dan *power generation* merupakan faktor motivasi untuk *syn-gas* sebagai bahan bakar pada teknologi *engine* saat ini. Pembagian berdasar pada besarnya pembakaran merupakan cara yang efektif dalam pemakaian *syn-gas*, mengingat bahwa masalah stoichiometric dalam pengaplikasian *syn-gas*. Walaupun demikian, menjaga pembatasan daya yang disebabkan pembatasan durasi injeksi bahan bakar *syn-gas*. Kemudian penelitian pada optimasi waktu injeksi, komposisi bahan bakar, rasio bahan bakar *syn-gas* udara dan waktu pengapian sangat diperlukan untuk memperbaiki performa dan gas buang dari *engine*.

Dari Penelitian yang dilakukan oleh Sridhar et al (2002) yang berjudul *Development of Producer Gas Engines*, dimana dalam penelitian ini menggunakan 3 buah *engine-generator set* sebagai objeknya yaitu berkapasitas 28 kw, 310 kw dan 101 kw. Kajian ini bertujuan untuk mengetahui cara dan metode pengaplikasian bahan bakar *syn-gas*. Pada eksperimen dilakukan modifikasi pada gas karburator dimana secara stoichiometric *air fuel ratio* (AFR) dari *syn-gas* 1,2 sampai 1,4 (berbasis volume) sehingga gas karburator tersebut memiliki kemampuan menghasilkan AFR sebesar 1,2 s ampai 1,5 : 1 da lam berbagai variasi beban. Skema modifikasi karburator ditunjukkan pada gambar 2.7. Selain itu gas karburator yang telah dimodifikasi mampu beroperasi secara



smooth dengan *pressure loss* yang kecil dan bisa *shut-off* bahan bakar secara otomatis saat *engine* terjadi *trip*.



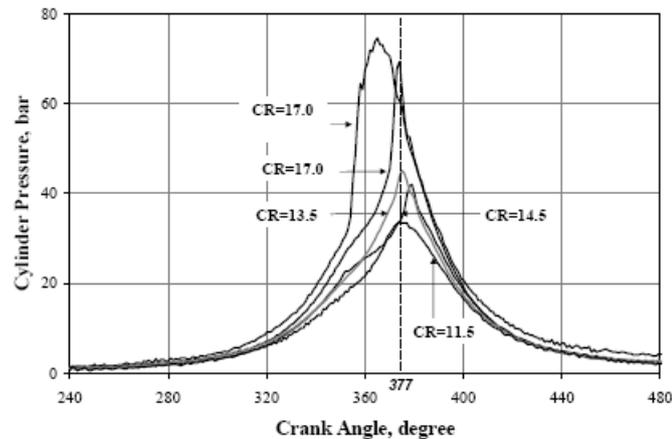
Gambar 2.7 Skematik dari gas karburator.

Engine dilakukan pengetesan pada putaran yang konstan sebesar 1500 rpm. Untuk variasi kompresi rasio (CR) yang dilakukan sebesar 17, 14, 13,5, 11,5 dan 10, kemudian pada setiap kompresi rasio dilakukan pengaturan *ignition timing* untuk performa mendapatkan yang paling optimum. Pengukuran pada *engine* meliputi daya (tegangan dan arus listrik), laju udara dan bahan bakar, serta emisi yang dihasilkan. Pada hasil penelitian menunjukkan bahwa *engine* dengan bahan bakar *syn-gas* akan memiliki unjuk kerja yang optimum jika dilakukan perubahan kompresi rasio dan *ignition timing*, seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.5 dan tabel 2.6. Dimana *engine* mengalami *dearating* yang paling rendah pada kompresi rasio sebesar 17 dengan *ignition timing* 6 sampai 10 sebelum TMA.

Tabel 2.5 Hasil penelitian yang dilakukan Sridhar (2002)

Engine	CR	Net Rating, kW	Achieved Output, kW	Derating, %	Remarks
E1	17.0	24	20	16.7	
E1			19.5	19.0	Increased cooling capacity
E2	12.0	258 on diluted natural gas (75% CH4)	182	30.0	
E2	12.0		202	22.0	with 10% increase in LCV
E3	10.0	84	60	28.5	

Selain itu, dari penelitian menunjukkan bahwa dalam pengaplikasian *syn-gas* akan menyebabkan *dearating* sebesar 20 sampai 30 % dari kemampuan yang dimiliki *engine*.



Gambar 2.8 Grafik P- θ pada pengaturan kompresi rasio (17, 14.5, 13.5 and 11.5) dan derajat pengapian (Sridhar, 2002).

2.8 Parameter Unjuk Kerja Motor Otto

Baik atau tidaknya suatu *LPG engine-genset* dapat dilihat melalui unjuk kerja (*performance*) yang dihasilkan. Adapun parameter-parameter dari unjuk kerja tersebut adalah sebagai berikut :

1. Daya Poros (*Power*).
2. Tekanan Efektif Rata-rata (*bme_p*, *brake mean effective pressure*).
3. Torsi (*Torque*).
4. Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (*sfc*, *specific fuel consumption*)
5. Efisiensi Thermal.

2.8.1 Daya Poros (*Ne*)

Daya adalah ukuran suatu *engine* untuk menghasilkan kerja yang berguna per satuan waktu yang dinyatakan dalam *horse power* (hp). Untuk mengukur daya pada sebuah *engine-generator set*, dimana pengukuran melibatkan pengukuran tegangan listrik (V) dan arus listrik (I) yang keluar dari generator yang digerakkan oleh putaran poros *engine* yang dinyatakan dalam watt. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan beban pada generator sehingga poros secara otomatis akan mendapat pembebanan juga.

Besarnya daya poros dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut :



$$Ne = \frac{V \times I \times \cos \theta}{746,3 \times \eta_{mg} \times \eta_t} \quad (2.5)$$

Dengan :

Ne = daya poros (hp)

V = tegangan listrik (volt)

I = arus listrik (ampere)

Cos θ = faktor daya = 1 (konstan) karena hambatan (R) pada generator yang terjadi merupakan hambatan resistensi bukan kapasitif.

η_{mg} = efisiensi mekanis generator = 0,95 (ASME PTC 17, 1991)

η_t = efisiensi transmisi = memakai *belt* nilainya 0,9
= 1 (jika tidak memakai *belt*) (ASME PTC 17, 1991)

1 hp = 0,7463 Kwatt

2.8.2 Tekanan Efektif Rata-rata (*b MEP*)

Tekanan efektif rata-rata poros (*b MEP*, *brake mean effective pressure*) didefinisikan sebagai tekanan rata-rata teoritis yang bekerja sepanjang langkah kerja torak untuk menghasilkan daya yang besarnya sama dengan daya efektif yang terukur dengan besarnya daya efektif rata-rata. Semakin besar tekanan efektif rata-rata maka akan semakin besar daya yang dihasilkan pada volume langkah yang sama.

Besarnya tekanan rata-rata teoritis dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$BMEP = \frac{60 \times Ne \times z}{A \times L \times n \times i \times 1,34} [KPa] \quad (2.6)$$

Dengan :

Ne = daya poros (hp)

A = luas penampang torak (m²)

L = panjang langkah torak (m)

i = jumlah silinder

n = putaran engine (rpm)

z = 1 untuk motor 2 langkah atau 2 untuk motor 4 langkah



2.8.3 Torsi (T)

Torsi merupakan ukuran kemampuan motor untuk menghasilkan kerja, torsi didapat dari perkalian gaya tengensial dengan lengannya. Poros dari rotor dihubungkan dengan poros dari *engine* yang akan diuji, rotor tersebut dikopel dengan stator secara elektris, magnetis, hidrolis atau mekanis (gesekan) dalam satu revolusi dari poros *engine*, titik tertentu yang berada pada diameter terluar rotor (jari-jari, r) akan bergerak sepanjang $2\pi r$ melawan gaya kopel (f). Sehingga kerja per revolusi sebagai berikut :

$$\text{Kerja } (W) = 2\pi r \cdot f$$

Keseimbangan akan terjadi apabila :

$$\text{Momen di dalam} = \text{Momen di luar}$$

$$r \cdot f = P \cdot R$$

Jadi, kerja dalam satu revolusi poros *engine* : $W = 2\pi P \cdot R$

Apabila mesin berputar dalam n rpm, maka : $W_{\text{per menit}} = 2\pi P \cdot R \cdot n$ [watt]

Tenaga adalah kerja per satuan waktu, apabila dinyatakan dalam tenaga kuda (hp), maka :

$$\text{Tenaga engine } (Ne) = \frac{2\pi P \cdot R \cdot n}{X} \quad [\text{hp}], \quad \text{dengan } X \text{ adalah faktor konversi}$$

$$X = 550 \times 60 \left[\frac{\text{ft. lb/sec}}{\text{dK}} \right]$$

$$X = 75 \times 60 \left[\frac{\text{ft. m/sec}}{\text{dK}} \right]$$

Dalam pengujian ini, momen torsi dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$Mt = \frac{X \cdot Ne}{2\pi n} \quad [\text{kg. m}]$$

$$Mt = 71620 \frac{Ne}{n} \quad [\text{kg. cm}] \quad (2.7)$$

Dengan :

Mt = momen torsi (kg.cm)

n = putaran mesin (rpm)

Ne = daya poros efektif (hp)

Karena pengukuran daya melibatkan tegangan listrik (V) dan arus listrik (I) yang dihasilkan dari generator bukan pengukuran menggunakan *water brake* dinamometer maka pengukuran daya sesuai dengan persamaan 2.6. Di dalam



prakteknya torsi dari motor berguna untuk mengatasi hambatan pada saat kendaraan terperosok atau berguna untuk mempercepat laju kendaraan atau berakselerasi.

2.8.4 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (*sfc*)

Pemakaian bahan bakar spesifik (*specific fuel consumption*) adalah jumlah bahan bakar yang dikonsumsi *engine* untuk menghasilkan daya efektif 1 (satu) hp selama 1 (satu) jam. Apabila dalam pengujian diperoleh data mengenai penggunaan bahan bakar, m_{bb} (kg) dalam waktu selama t (detik) dan daya yang dihasilkan sebesar bhp (hp), maka pemakaian bahan bakar per jam (FC) adalah :

$$FC = \frac{3600 \cdot m_{bb}}{s} \quad [kg/jam]$$

Sedangkan pemakaian bahan bakar spesifik adalah

$$sfc = \frac{3600 \cdot m_{bb}}{Ne \cdot s} \quad (2.8)$$

Dimana :

sfc = *specific fuel consumption* (kg/hp.jam)

m_{bb} = masa bahan bakar (kg)

Ne = daya motor (hp)

s = waktu ,menghabiskan bahan bakar (detik)

2.8.5 Effisiensi *Thermal* (η_{th})

Effisiensi *thermal* merupakan ukuran dan besarnya energi panas yang terkandung dalam bahan bakar yang dapat dimanfaatkan untuk menjadi daya yang berguna. Efisiensi *thermal* juga didefinisikan sebagai perbandingan antara kerja yang dihasilkan dengan energi yang diberikan. Secara teoritis dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\eta_{th} = \frac{\text{Daya efektif yang dihasilkan}}{\text{Energi panas}} \times 100\%$$

$$\eta_{th} = \frac{632}{sfc \cdot Q} \times 100\% \quad (2.9)$$

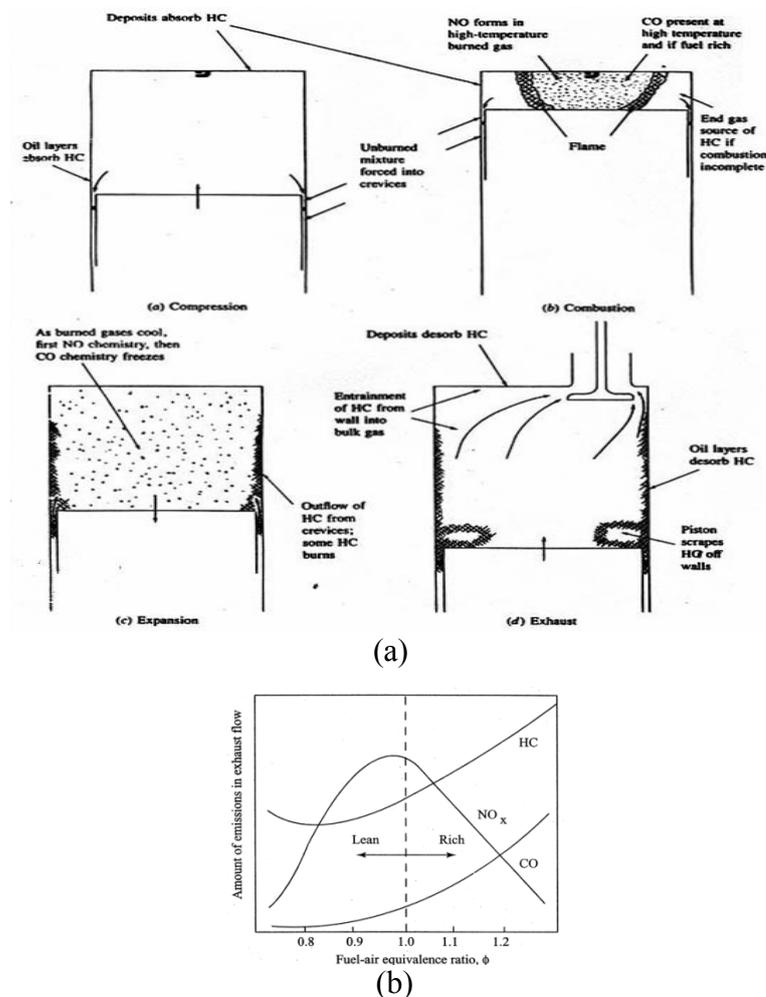
Dengan :

Q = nilai kalor bahan bakar (KCal/kg)

sfc = *specific fuel consumption* (kg/hp.jam)

2.9 Polusi Udara

Polusi udara adalah masuknya bahan pencemar kedalam udara sedemikian rupa sehingga mengakibatkan kualitas udara menurun dan lingkungan tidak berfungsi sebagaimana mestinya (UUPLH No.23/1997 pasal 1). Polutan dapat dibedakan menjadi dua, yaitu polutan primer dan polutan sekunder. Polutan primer adalah polutan dimana keberadaannya di udara langsung dari sumbernya. Contoh polutan primer adalah partikulat, *sulfur oksida* (SO_x), *nitrogen oksida* (NO_x), *hidrokarbon* (HC), dan *carbon monoksida* (CO). Sedangkan polutan sekunder adalah polutan primer yang bereaksi dengan komponen lain di udara, contohnya *Ozon* (O₃) dan *peroksi asetil nitrat* (PAN) dimana keduanya terbentuk di atmosfer melalui proses hidrolisis, *petrochemical* atau oksidasi (Sungkono, 2011). Mekanisme terbentuknya polutan ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.9 (a) Mekanisme terbentuknya polutan.
(b) Emisi gas buang terhadap FAR.



Dari kedua jenis polutan di atas yang sering jadi perhatian adalah polutan primer, meskipun polutan sekunder tidak bisa dianggap ringan. Berikut ini adalah penjelasan tentang beberapa polutan primer.

2.9.1 Hidrokarbon (HC)

Hidrokarbon terjadi dari bahan bakar yang tidak terbakar langsung keluar menjadi gas mentah, dan dari bahan bakar terpecah menjadi reaksi panas berubah menjadi gugusan HC yang lain, yang keluar bersama gas buang. Sebab terjadinya *hydrocarbon* (HC) adalah karena tidak mampu melakukan pembakaran, penyimpanan dan pelepasan bahan bakar dengan lapisan minyak, penyalaan yang tertunda, disekitar dinding ruang bakar yang bertemperatur rendah dan karena adanya *overlap valve*, sehingga HC dapat keluar saluran pembuangan.

Polutan *unburned hydrocarbon* berasal dari beberapa sumber yang berbeda. Terdapat empat kemungkinan penyebab terbentuknya HC pada *engine SI* sebagai berikut:

1) HC dalam *volume crevice*

Volume crevice adalah volume dengan celah yang sangat sempit sehingga api tidak dapat menjangkaunya yang merupakan sumber utama munculnya HC dalam gas buang. *Volume crevice* yang paling utama adalah volume diantara piston, ring piston, dinding silinder, pusat elektroda busi, dan *crevice* disekitar gasket silinder *head*.

2) Proses *flame quenching* pada dinding ruang bakar

Api akan padam ketika menyentuh dinding ruang bakar karena *heat loss* (*wall quenching*), sehingga meninggalkan lapisan tipis yang terdiri dari campuran yang tidak terbakar dan terbakar sebagian.

3) Penyerapan uap bahan bakar kedalam lapisan oli pada dinding ruang bakar

Selama proses pengisian dan kompresi, uap bahan bakar diserap oleh oli pada dinding ruang bakar, selanjutnya melepaskannya kembali ke ruang bakar selama ekspansi dan pembuangan.



4. Pembakaran yang tidak sempurna

Terjadi ketika kualitas pembakaran jelek baik terbakar sebagian (*partial burning*) atau tidak terbakar sama sekali (*complete misfire*) akibat homogenitas, turbulensi, A/F dan *spark timing* yang tidak memadai. Saat tekanan silinder turun selama langkah ekspansi, temperatur *unburned mixture* didepan muka api menurun, menyebabkan laju pembakaran menurun. Karena temperatur *unburned* didepan muka api yang terlalu rendah maka menyebabkan api padam sehingga nilai HC akan naik.

2.9.2 Karbon Monoksida (CO)

Gas karbon monoksida merupakan gas yang tidak berwarna, tidak berbau pada suhu diatas titik didihnya dan mudah larut dalam air. Di industri karbon monoksida dihasilkan dari proses oksidasi gas alam yaitu metana. Gas karbon monoksida merupakan komponen utama dalam udara tercemar, karena kereaktifan gas karbon monoksida terhadap hemoglobin dalam darah yang mengakibatkan darah kekurangan oksigen dan menyebabkan gangguan saraf pusat. Pembakaran yang normal pada motor bensin akan membakar semua hidrogen dan oksigen yang terkandung dalam campuran udara dan bahan bakar. Akan tetapi dalam pembakaran yang tidak normal, misalnya pembakaran yang kekurangan oksigen, akan mengakibatkan CO yang berada didalam bahan bakar tidak terbakar dan keluar bersama-sama dengan gas buang. Karbon monoksida juga cenderung timbul pada temperatur pembakaran yang tinggi. Meskipun pada campuran miskin (mempunyai cukup oksigen) jika temperatur pembakaran terlalu tinggi, maka oksigen yang telah terbentuk dalam karbon dioksida bisa berdisosiasi membentuk karbon monoksida dan oksigen.



“Halaman ini sengaja dikosongkan”



BAB 3

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode eksperimental. Pengujian yang digunakan dalam penelitian ini adalah *LPG engine-generator set*. Pengujian pada *engine* dimana poros utama (*main shaft*) dari *engine* yang dipakai sebagai alat uji dihubungkan langsung dengan *generator*. Untuk mendapatkan kinerja *engine* yang baik, khususnya daya, dilakukan pengaturan *ignition timing* dan tekanan bahan bakar gas. Untuk mengetahui kadar emisi yang dihasilkan *engine* dari proses pembakaran di ruang bakar, dilakukan pengujian dengan menggunakan *gas analyzer*. Proses modifikasi mesin dilakukan di Laboratorium Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar (TPBB), Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) - Surabaya, sedangkan untuk pengujian dilakukan di PT. Gending – Sidoarjo. Hasil yang diharapkan dari penelitian untuk mendapatkan nilai pengaturan derajat pengapian dan tekanan bahan bakar yang maksimal serta nilai kerja yang dinyatakan dalam : daya, torsi, bmep, efisiensi thermal, temperatur (*exhaust, engine* dan minyak pelumas) dan emisi gas buang (CO dan HC). Penelitian ini dibagi menjadi dua kelompok yaitu sebagai berikut :

1. Pengujian *single fuel engine* dengan bahan bakar LPG.
2. Pengujian *single fuel engine* dengan bahan bakar *Syn-gas* gasifikasi batubara.

3.1 Bahan Bakar

3.1.1 Bahan Bakar LPG

LPG yang digunakan untuk penelitian adalah LPG yang dipasarkan oleh PT. Pertamina, dengan spesifikasi yang dikeluarkan oleh Dirjen MIGAS No. 26525.K/10/DJM.T/2009 tanggal 31 desember 2009 (Lampiran 1.A).



3.1.2 Bahan Bakar *Syn-gas*

Syn-gas yang digunakan pada penelitian ini adalah produksi gasifikasi batubara dengan menggunakan reaktor gasifikasi bertipe *fixed bed-up draft*, di PT Gending-sidoarjo, dengan spesifikasi yang dikeluarkan oleh LEMIGAS NO. 24/92/LHU/I/2013 tahun 2013 (lampiran 1.B). Komposisi *syn-gas* produksi PT. Gending-sidoarjo yang standar dengan reaktan udara memiliki nilai kalor sebesar 1.400-1.600 Kcal/Nm³ (150 btu/ ft³ atau 5,3 MJ/m³) dengan komposisi gas 18-22%H₂, 24-28%CO, 0.4-0.5CO₂, 1-2.2%CH₄ dan 45-55%N₂. Untuk kandungan *tar* sebesar 1-4% dan kandungan *oil* sebesar 2-5% dari batubara yang dikonsumsi.



Gambar 3.1 Gasifikasi *Plant* di PT Gending-Sidoarjo.

3.2 ALAT UJI

Peralatan uji yang digunakan dalam penelitian ini antara lain :

3.2.1 *Engine Test*

Engine yang digunakan dalam penelitian ini adalah *LPG engine-generator set* dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Merek : Green Power, dengan model CC5000-LPG
- Daya maksimum : 4800 Watt
- Frekuensi rata-rata : 50 Hz
- Mode generator : 1 phase atau 3 phase
- Jumlah silinder : 1 silinder



- Volume langkah : 389 CC
- Diameter x langkah : 88x64 mm
- Bahan bakar : LPG
- Konsumsi LPG : 0,32 kg/kW-h (*rated power*)
- Tekanan LPG : 2,5 kPa ~ 3,2 kPa (25 mbar ~ 32 mbar),
tekanan pada sisi outlet dari *pressure regulator*
- *Starting mode* : *electric starter*
- Pendingin mesin : blower
- Putaran *engine* : 3000 rpm
- Arah putaran : CCW(*counter clockwise*), dilihat dari generator



Gambar 3.2 *Engine test*.

3.2.2 Alat Ukur

Alat ukur yang digunakan dalam pengujian terdiri dari :

1. *Pressure regulator*

Pressure regulator dilengkapi dengan *pressure gauge* sisi *inlet* dan sisi *outlet*. Alat ini berfungsi untuk mengatur tekanan bahan bakar gas yang masuk ke *engine*, sekaligus berfungsi mengukur tekanan tabung bahan bakar. Adapun spesifikasi *pressure regulator* tersebut adalah :

- Tipe : 550L
- Tekanan maksimal sisi *inlet* : 16kg/cm²
- Tekanan maksimal sisi *outlet* : 1.5kg/cm²
- Debit : 6 m³/h



Gambar 3.3 *Pressure regulator.*

2. *Tang ampere*

Alat ini digunakan untuk mengukur arus listrik (I) yang terjadi akibat pemberian beban pada generator listrik.



Gambar 3.4 *Tang ampere.*

3. *Voltmeter*

Alat ini digunakan untuk mengukur tegangan listrik (V) yang dibangkitkan oleh generator listrik yang disuplai ke beban.



Gambar 3.5 *voltmeter.*



4. *Pressure gauge*

Pressure gauge yang digunakan berskala maksimal 100 mbar. Alat ini digunakan untuk mengukur tekanan suplai bahan bakar gas yang dikonsumsi oleh *engine*.



Gambar 3.6 *Pressure gauge*.

5. *Alat pengukur putaran mesin (strobotester)*

- Merk : CZ SINCRO
- Tipe : DG-85
- Range : 0 – 99999 RPM
- Akurasi : 1 digit
- Sistem Pengukuran : Digital



Gambar 3.7 *Strobotester*.

6. *Exhaust gas analyzer*

Alat ini digunakan untuk mengukur kadar emisi gas buang, meliputi CO, HC, CO₂, NO_x dan O₂.

- Merk : Stargas 898
 - Berat : 7.5 Kg
 - Temperatur Kerja : 40-45 °C
 - Dimensi : 470 x 230 x 220 mm
-



- *Measurement range* : CO : 0-15% Vol, CO₂ : 0-20% Vol,
HC : 0-30.000 ppm Vol, O₂ : 0-25% Vol,
NO_x : 0-5000 ppm Vol.



Gambar 3.8 Exhaust gas analyzer.

7. Thermocouple digital

Alat ini digunakan untuk mengukur temperatur gas buang, temperatur mesin dan temperatur minyak pelumas.



Gambar 3.9 Thermocouple digital.

8. Komputer

Alat ini dipergunakan untuk pengaturan derajat pengapian yang dihubungkan langsung dengan ECU (*electro control unit*).

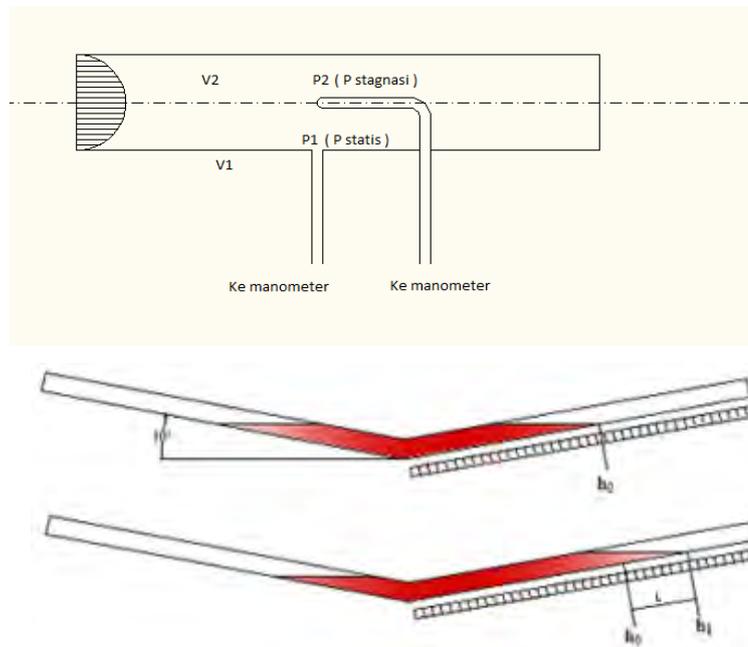


Gambar 3.10 Komputer.



9. Pitot Static Tube dan Manometer V

Alat ini dipergunakan untuk mengukur jumlah udara masuk yang disuplai keruang bakar.



Gambar 3.11 Konfigurasi *pitot static tube* dan *manometer* $V_{\theta} = 15^{\circ}$

Pitot static tube dihubungkan dengan *manometer* untuk mengetahui besarnya perbedaan ketinggian cairan pada *manometer* yang nantinya akan digunakan untuk mengetahui *mass flow rate* udara dan *syn-gas* yang masuk ke ruang bakar dengan menggunakan persamaan *Bernoulli* sebagai berikut :

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \quad (3.1)$$

Dimana :

P_2 = Tekanan stagnasi (pada titik 2) (Pa)

P_1 = Tekanan statis (pada titik 1) (Pa)

ρ = Massa jenis (kg/m^3)

V_1 = Kecepatan di titik 1 (m/s)

V_2 = Kecepatan di titik 2, kecepatan pada *P stagnasi* = 0 (m/s)



Dengan mengasumsikan $\Delta_z = 0$ maka persamaan menjadi :

$$\frac{V_1^2}{2} = \frac{P_0}{\rho} - \frac{P}{\rho}$$

Untuk mencari kecepatan udara yang masuk kedalam ruang bakar dari persamaan diatas menjadi :

$$V = \sqrt{\frac{2(P_0 - P)}{\rho_{udara}} \frac{m}{s}} \quad (3.2)$$

Dimana :

$$\begin{aligned} P_0 - P &= \rho_{red\ oil} \cdot g \cdot h \\ &= (\rho_{H_2O} \cdot SG_{red\ oil}) \cdot g \cdot h \end{aligned}$$

$h = 2L \sin \theta$ dan L adalah perbedaan ketinggian cairan pada *manometer* V dengan $\theta = 15^\circ$, maka persamaan menjadi :

$$V = \sqrt{\frac{2 \times \rho_{H_2O} \times SG_{redoil} \times g \times 2L \sin \theta}{\rho_{udara}} \frac{m}{s}} \quad (3.3)$$

Dengan :

$SG_{red\ oil}$: Spesifik *gravity red oil* (0.827)

ρ_{H_2O} : Massa jenis air (999 kg/m³)

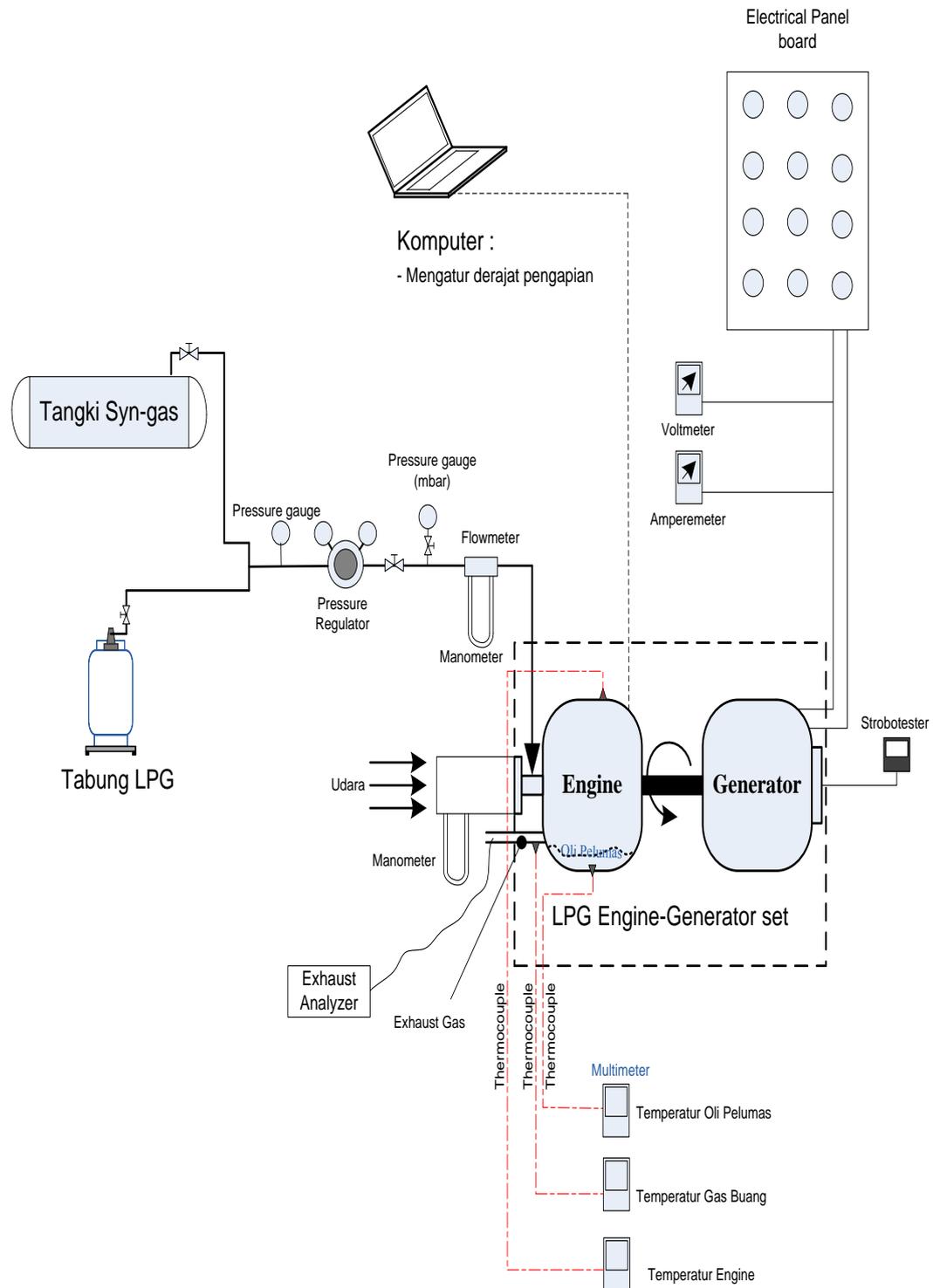
ρ_{udara} : Massa jenis udara (1.1447 kg/m³)

L : Selisih ketinggian cairan pada *manometer* (m)

θ : Besar sudut yang digunakan pada *manometer* V (°)



3.3 Skema Penelitian



Gambar 3.12 Skema penelitian.

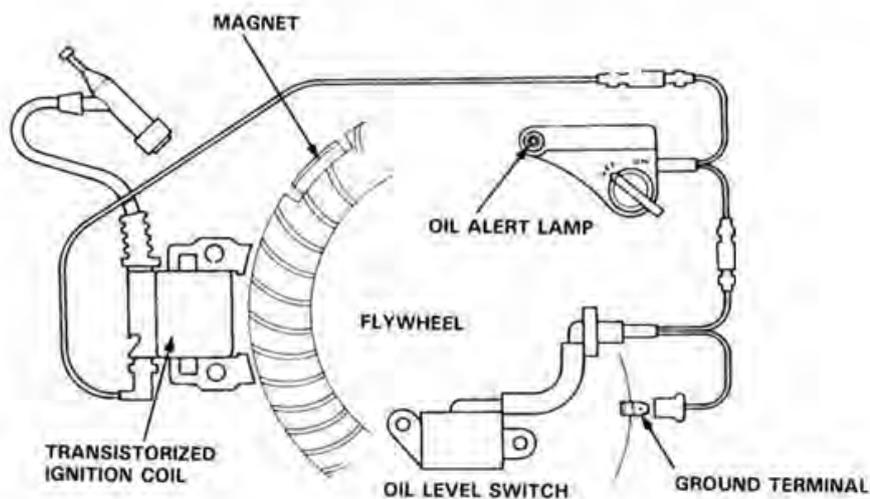


3.4 Prosedur Pengujian

3.4.1 Modifikasi *Engine Test*

1. Modifikasi Sistem Pengapian *LPG Engine-Generator Set*

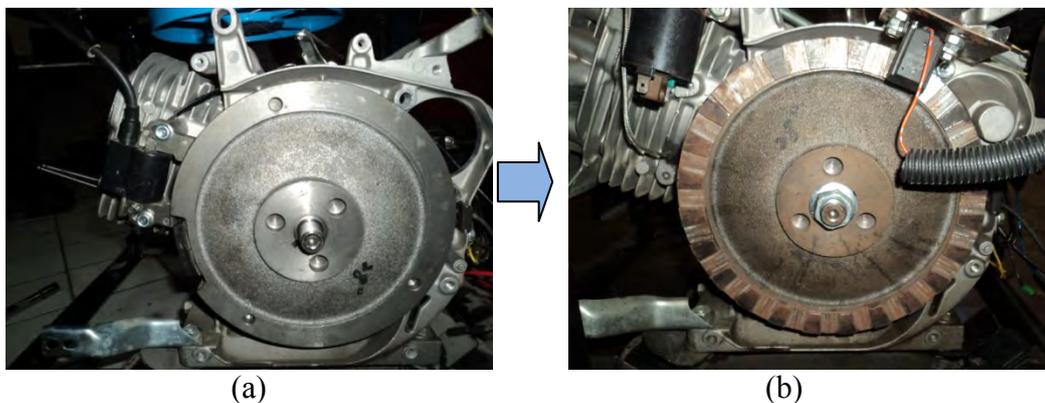
Untuk melakukan variasi derajat pengapian pada pengoperasian *LPG engine-generator set* maka perlu dilakukan modifikasi pada sistem pengapian agar nilai derajat pengapian bisa divariasikan. Sistem pengapian yang digunakan *LPG engine-generator set* merupakan sistem pengapian *magneto* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.13, dimana dalam sistem ini sulit dilakukan pengaturan derajat pengapian. Sistem pengapian *magneto* berkerja tidak tergantung pada sumber *battery* dan memberikan tegangan tinggi yang diperlukan untuk membakar campuran udara/bahan bakar di dalam ruang pembakaran. Sistem pengapian *magneto* terdiri dari *flywheel* baja yang berputar yang dilengkapi dengan magnet permanen, dipasangkan pada poros engkol *engine*. Medan magnet yang terdapat pada *flywheel* sejajar dengan inti armatur pengapian. Pada saat *flywheel* berputar tegangan AC diinduksikan pada rangkaian primer (coil). Sehingga jika posisi coil terhadap magnet tidak tepat maka induksi magnet ke coil kurang baik, hal ini yang membuat sistem pengapian magnet sulit dilakukan pengaturan pada derajat pengapian.



Gambar 3.13 Sistem pengapian *magneto*.



Agar derajat pengapian pada *LPG engine-generator set* bisa divariasikan, dilakukan modifikasi pada sistem pengapiannya yaitu menggunakan sistem pengapian elektronik dengan menggunakan program ECU (*Electro Control Unit*). Pada sistem pengapian elektronik diperlukan *pulser* sebagai signal input ke ECU, sehingga pada *flywhell* dipasang gigi-gigi yang berfungsi sebagai *timing mark* untuk *pulser*. Pembangkit sinyal (*pulser*) digunakan untuk memberikan *impuls* listrik dan memberikan sinyal saat pengapian pada unit pengendali pengapian elektronik (ECU). Unit pengendali pengapian (ECU) akan mensaklarkan rangkaian primer pada coil pengapian. Pemasangan *pulser* dan gigi-gigi pada *flywhell* ditunjukkan pada gambar 3.14.



Gambar 3.14 (a) *Flywhell* yang belum dimodifikasi.
(b) *Flywhell* yang sudah dimodifikasi.

Sedangkan skema pengapian elektronik yang baru dan ECU (*Electro Control Unit*) ditunjukkan pada gambar 3.15. Dimana sumber arus listrik 12 volt DC berasal dari battery (accu). Ketika *engine* dihidupkan dengan *electric stater*, menyebabkan rotor *engine* berputar dan sekaligus *flywhell* ikut berputar. Pada saat *pulser* mengeluarkan sinyal induktif yang masuk ke ECU. Sinyal tersebut berfungsi memberikan informasi ke ECU, untuk mulai memutus atau menghubungkan arus primer. Arus primer yang terjadi diteruskan ke coil pengapian, kemudian coil pengapian menghasilkan tegangan listrik sekunder tinggi yang dimanfaatkan untuk penyalan busi.



Gambar 3.15 Skema pengapian dan ECU yang telah dibuat.

Dalam pengaturan derajat pengapian menggunakan perangkat lunak komputer yang telah dipasang program untuk mensetting derajat pengapian, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.16.

The screenshot shows a software interface for setting ignition timing. It has a menu bar with 'Quit', 'Save', 'Load', 'Default', and 'InfoQt'. Below the menu bar are tabs for 'Basic', 'TPS RPM', and 'Display'. The 'Basic' tab is selected. There are two sections: 'Injection' and 'Ignition'. Each section has a 'Set' button and a 'Get' button. The 'Injection' table has columns for TPS RPM (500, 750, 1000, 1250, 1500, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000, 5500, 6000) and rows for TPS (0, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100). The 'Ignition' table has the same columns and rows.

	500	750	1000	1250	1500	2000	2500	3000	4000	5000	5500	6000
0	48	50	57	97	97	97	97	97	88	88	88	88
10	47	49	54	97	97	97	97	97	88	88	88	88
15	45	48	52	55	57	59	64	64	74	81	82	84
20	44	47	51	53	56	59	62	62	74	79	82	84
30	42	45	50	52	55	57	62	62	69	75	77	80
40	40	42	47	48	50	52	57	57	62	70	72	74
50	38	40	44	46	48	51	54	56	63	67	70	74
60	36	38	43	45	48	50	52	54	61	65	68	70
70	29	32	36	38	40	43	45	47	54	58	60	62
80	28	30	34	37	39	41	43	45	52	56	59	61
90	26	29	33	35	37	40	42	44	51	55	57	59
100	44	26	13	4	0	0	0	0	0	0	0	0

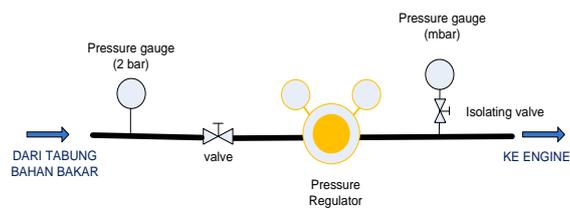
	500	750	1000	1250	1500	2000	2500	3000	4000	5000	5500	6000
0	10	15	15	18	20	20	20	20	27	27	30	30
10	10	15	15	18	20	22	25	25	27	27	30	30
15	10	15	15	18	20	22	25	25	27	27	30	30
20	10	15	15	18	20	22	25	25	27	27	30	30
30	10	15	15	18	20	22	25	25	27	27	30	30
40	10	15	15	18	20	22	25	25	27	27	30	30
50	10	15	15	18	20	22	25	25	27	27	30	30

Gambar 3.16 Tampilan pengaturan derajat pengapian di komputer.



b. Modifikasi Saluran Bahan Bakar Gas.

Untuk mendapatkan variasi tekanan bahan bakar yang masuk ke *engine* maka perlu dilakukan modifikasi pada saluran bahan bakar gas.



(a)



(b)

Gambar 3.17 (a) Skematik modifikasi saluran suplai bahan bakar gas.
(b) Saluran suplai bahan bakar gas yang dimodifikasi.

3.4.2 Tahapan Pengujian

Dalam pelaksanaan eksperimen ini ada beberapa tahapan yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Persiapan Pengujian

Persiapan pengujian meliputi *setting* alat uji dan alat ukur adalah sebagai berikut :

- Pengecekan kondisi *engine* sehingga siap untuk digunakan dalam percobaan. Pengecekan yang dilakukan meliputi pengecekan kondisi karburator, pelumasan, bahan bakar dan sistem pembebanan.
- Pengecekan dan pemasangan alat-alat ukur yang digunakan untuk pengujian.
- Mempersiapkan tabel pengambilan data.



2. Proses Pengujian

Pada penelitian ini pengujian dilakukan dengan putaran motor konstan (*stationary speed*) dengan memvariasikan tekanan suplai bahan bakar dan derajat pengapian. Pengaturan tekanan suplai bahan bakar dilakukan melalui *pressure regulator*, sedangkan pengaturan derajat pengapian dilakukan melalui perubahan posisi *coil-pulser* dimana *support* untuk *coil-pulser* tersebut telah dilakukan modifikasi.

Adapun langkah pengujian adalah sebagai berikut :

1. Pengujian dengan bahan bakar LPG
 - a. Posisikan *circuit breaker* pada posisi *Off*, yang tujuannya adalah untuk memastikan *engine* pada awal operasi pada keadaan tidak berbeban.
 - b. Posisikan *engine switch* pada posisi *On*, yaitu untuk memastikan bahwa katub utama bahan bakar masuk menuju ke ruang bakar telah terbuka.
 - c. Posisikan *choke switch* pada posisi *Close*.
 - d. Pada saluran bahan bakar, posisikan *isolating valve* untuk *pressure gauge* (skala mbar) pada posisi tertutup. Yang tujuannya untuk mengamankan *pressure gauge* (skala mbar) ketika pengaturan bukaan *pressure regulator* yang berlebihan pada awal bukaan.
 - e. Atur derajat pengapian pada komputer sesuai yang diinginkan (20° , 22° , 24° atau 26° sebelum TMA).
 - f. Atur bukaan *pressure regulator* untuk mendapatkan tekanan bahan bakar yang diinginkan.
 - g. Menghidupkan *engine*.
 - h. Posisikan *choke switch* pada posisi *Open*.
 - i. Melakukan pengkondisian *engine* pada putaran *idle* (tanpa beban) selama ± 5 menit untuk mencapai kondisi *steady state* atau stasioner.
 - j. Posisikan *circuit breaker* pada posisi *On*, kemudian naikan beban secara perlahan 500W sampai beban 5000W dengan interval 500W, dengan tegangan listrik minimal 180 Volt. Kenaikan beban diikuti dengan bukaan *pressure regulator* untuk mendapat tekanan bahan



bakar gas yang diinginkan, yaitu untuk bahan bakar LPG : 30, 50, 70 dan 90 mbar, sedangkan untuk bahan bakar *syn-gas* : 500, 700, 900 dan 1100 mbar.

- k. Dengan derajat pengapian yang sama, pengambilan data akan didapatkan untuk variasi tekanan bahan bakar.
- l. Pada setiap pengujian *engine*, dilakukan pencatatan data-data.
- m. Setelah selesai, beban diturunkan sampai tanpa beban kemudian *engine* dimatikan.
- n. Dilakukan pengaturan derajat pengapian yang lain (20°, 22°, 24° dan 26° sebelum TMA). Kemudian kembali dilakukan pengujian *engine* dengan metode dan urutan dari point pertama.

2. Pengujian dengan bahan bakar *syn-gas* gasifikasi batubara

Untuk pengujian dengan menggunakan bahan bakar *syn-gas* gasifikasi batubara, metode yang digunakan sama seperti dengan pengujian pada bahan bakar LPG.

3. Pengujian temperatur *engine*, gas buang dan oli pendingin

Pada pengujian temperatur dilakukan pencatatan bersamaan saat pengujian *engine* dengan bahan bakar LPG maupun *syn-gas* batubara, dimana temperatur tersebut dapat diketahui dari nilai yang tertera pada alat baca *thermocouple digital*.

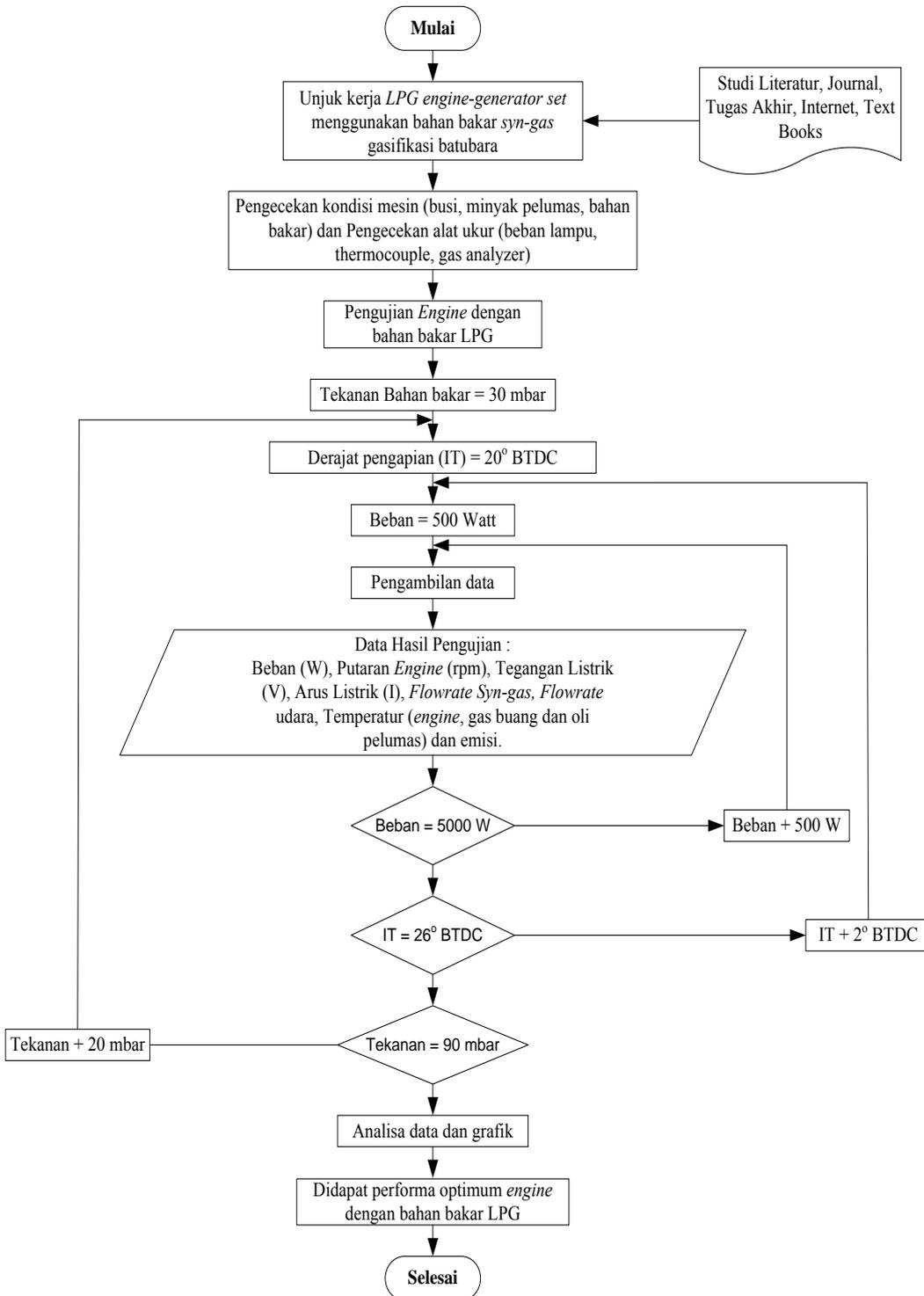
4. Akhir pengujian

Untuk setiap akhir pengujian, maka *engine* yang dipakai sebagai alat uji dimatikan dengan cara sebagai berikut :

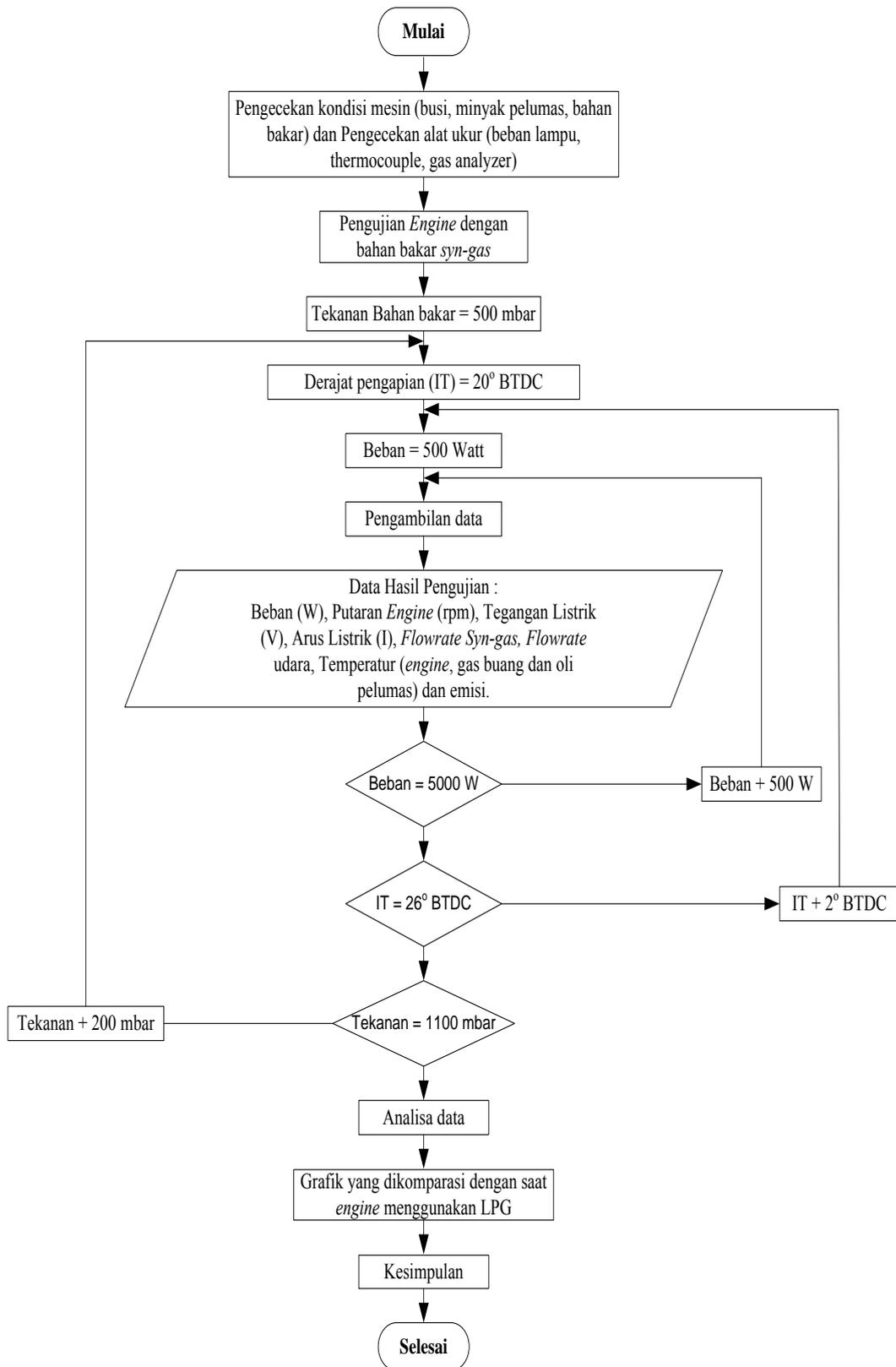
- a. Menurunkan beban yang bersamaan memutar regulator sampai *engine* tidak berbeban.
- b. Untuk *engine* dibiarkan pada putaran idle tersebut selama ± 1 menit untuk mencapai kondisi *steady state* atau stasioner.
- c. *Engine* dimatikan.



3.5 Flowchart Penelitian



Gambar 3.18 Flowchart percobaan dengan bahan bakar LPG.



Gambar 3.19 Flowchart percobaan dengan bahan bakar *syn-gas*.



3.6 Rancangan Eksperimen

Pada penelitian ini ditetapkan beberapa parameter *input* dan *output* sehingga hasil dari penelitian diharapkan sesuai dengan yang diharapkan. Dari percobaan ini data-data yang dihitung dan kemudian ditampilkan dalam bentuk :

- a. Grafik daya terhadap beban generator.
- b. Grafik bmep terhadap beban generator.
- c. Grafik torsi terhadap beban generator.
- d. Grafik sfc terhadap beban generator.
- e. Grafik η_{th} terhadap beban generator.
- f. Grafik emisi terhadap beban generator.
- g. Grafik temperatur dinding *engine* terhadap beban generator.
- h. Grafik temperatur oli pelumas terhadap beban generator.
- i. Grafik temperatur gas buang terhadap beban generator.

Tabel 3.1 Tabel Rancangan Eksperimen

Parameter Input				Parameter Output	
Konstan	Variasi			Diukur	Dihitung
	Tekanan Masuk	Derajat Pengapian	Beban		
<ul style="list-style-type: none"> • Bahan Bakar: – LPG – <i>Syn-gas</i> 	– LPG : 30 mbar	– 20° sebelum TMA – 22° sebelum TMA – 24° sebelum TMA – 26° sebelum TMA	500 -5000 Watt, dengan interval kenaikan 500Watt	<ul style="list-style-type: none"> • Arus Listrik (Amp) • Tegangan Listrik (Volt) • Emisi Gas CO dan HC • Temperatur <i>Engine</i> (°C) • Temperatur Oli (°C) • Temperatur Exhaust (°C) • \dot{m} bahan bakar • \dot{m} udara 	<ul style="list-style-type: none"> • Daya • bmep • Torsi • Sfc • η_{th} • AFR
	– <i>Syn-gas</i> : 500 mbar				
	– LPG : 50 mbar	– 20° sebelum TMA – 22° sebelum TMA – 24° sebelum TMA – 26° sebelum TMA	500 -5000 Watt, dengan interval kenaikan 500Watt		
	– <i>Syn-gas</i> : 700 mbar				
	– LPG : 70 mbar	– 20° sebelum TMA – 22° sebelum TMA – 24° sebelum TMA – 26° sebelum TMA	500 -5000 Watt, dengan interval kenaikan 500Watt		
	– <i>Syn-gas</i> : 900 mbar				
	– LPG : 90 mbar	– 20° sebelum TMA – 22° sebelum TMA – 24° sebelum TMA – 26° sebelum TMA	500 -5000 Watt, dengan interval kenaikan 500Watt		
	– <i>Syn-gas</i> : 1100 mbar				



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 4

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas mengenai hasil penelitian yang telah dilakukan, yang terdiri dari perhitungan dan analisa grafik. Perhitungan yang dilakukan adalah daya, torsi, sfc, tekanan efektif rata-rata (BMEP), efisiensi *thermal* dan AFR. Adapun untuk data hasil penelitian, hanya data-data tertentu saja yang ditampilkan dalam bab ini yaitu data yang digunakan sebagai contoh perhitungan unjuk kerja. Sedangkan untuk data hasil penelitian seluruhnya bisa dilihat pada lampiran.

4.1 Data Hasil Pengujian

Data hasil pengujian dan perhitungan pengujian disajikan dalam bentuk tabel pada lampiran 2, 3, 4 dan 5. Sedangkan lampiran 6 merupakan foto dokumentasi saat pengambilan data *LPG engine-generator set* dengan bahan bakar LPG yang dilakukan di Laboratorium Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar (TPBB), Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) – Surabaya dan untuk pengujian dengan bahan bakar *syn-gas* dilakukan di PT. Gending – Sidoarjo.

Pada saat pengujian *LPG engine-generator set* dengan menggunakan bahan bakar LPG, awal tekanan bahan bakar di sisi keluaran *pressure regulator* diatur sekitar 400 mbar. Kemudian setelah *engine* menyala, tekanan bahan bakar diturunkan dengan menggunakan *pressure regulator*. Pada proses penurunan bahan bakar tersebut, terdengar suara *engine* menjadi lebih halus pada tekanan bahan bakar sekitar 70 mbar. Pengujian *engine* dengan bahan bakar LPG dilakukan variasi pada derajat pengapian dari 20° sampai 26° sebelum TMA dengan interval kenaikan 2° dan tekanan bahan bakar 30 mbar sampai 90 mbar dengan interval kenaikan 20 mbar.

Untuk proses pengujian *LPG engine-generator set* dengan menggunakan bahan bakar *syn-gas* gasifikasi batubara, awal tekanan bahan bakar di sisi



keluaran *pressure regulator* diatur sekitar 500 mbar. Kemudian setelah *engine* menyala, tekanan bahan bakar diatur dengan menggunakan *pressure regulator*. Dalam pengoperasian *LPG engine-generator set* dengan bahan bakar *syn-gas* menunjukkan bahwa jika tekanan bahan bakar diturunkan dari 500 mbar akan menyebabkan *engine* akan mati (*trip*). Kemudian jika tekanan bahan bakar *syn-gas* dinaikkan dari 500 mbar, pada tekanan bahan bakar di sisi keluaran *pressure regulator* mencapai tekanan 1200 mbar, putaran mesin turun drastis dan akhirnya *engine* menjadi mati (*trip*). Pengujian *LPG engine-generator set* dengan menggunakan bahan bakar *syn-gas* gasifikasi batubara dilakukan variasi pada derajat pengapian dari 20° sampai 26° sebelum TMA dengan interval kenaikan 2° dan tekanan bahan bakar 500 mbar sampai 1100 mbar dengan interval kenaikan 200 mbar.

4.2 Perhitungan Unjuk Kerja

Tujuan melakukan perhitungan unjuk kerja adalah untuk mengetahui unjuk kerja dari *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG dan *syn-gas* gasifikasi batubara. Pada penelitian ini terdapat parameter yang diukur dari alat ukur dan parameter yang dihitung. Parameter yang diukur adalah arus listrik (ampere), tegangan listrik (volt), putaran poros (rpm), emisi gas (CO dan HC), temperatur *engine* (°C), temperatur oli (°C), temperatur *exhaust* (°C). Sedangkan parameter yang dihitung meliputi : $\dot{m}_{\text{bahan bakar}}$, \dot{m}_{udara} , daya, bmep, torsi, Sfc, η_{thermal} dan AFR. Pada penelitian ini satuan yang digunakan adalah satuan SI.

Perhitungan unjuk kerja *LPG engine-generator set* saat menggunakan bahan bakar LPG maupun bahan bakar *syn-gas* gasifikasi batubara memiliki metode yang sama dalam perhitungannya. Sehingga dalam contoh perhitungan unjuk kerja *engine*, diambil dari salah satu data bahan bakar yang digunakan yaitu bahan bakar LPG. Contoh perhitungan unjuk kerja *LPG engine-generator set* saat menggunakan bahan bakar LPG diambil dari data hasil eksperimen pada beban 4000 watt dengan derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar LPG sebesar 70 mbar adalah sebagai berikut :



4.2.1 Contoh Perhitungan Daya Poros Menggunakan Bahan Bakar LPG

Dengan menggunakan persamaan 2.5 besarnya daya poros *engine* dihitung sebagai berikut :

$$Ne = \frac{V \times I \times \cos \theta}{746,3 \times \eta_{mg} \times \eta_t}$$

Dengan :

$$\cos \theta = 1$$

$$\eta_{mg} = 0,95$$

$$\eta_t = 1$$

Dimana *LPG engine-generator set* saat menggunakan bahan bakar LPG, pada kondisi beban 4000 watt dengan derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar LPG pada sisi keluaran *pressure regulator* sebesar 70 mbar, hasil percobaan menunjukkan untuk nilai tegangan listrik dan arus listrik adalah sebesar :

$$\text{Tegangan listrik (V)} = 180 \text{ volt}$$

$$\text{Arus listrik (I)} = 14,4 \text{ ampere}$$

Sehingga akan diperoleh nilai daya poros sebagai berikut :

$$Ne_{LPG} = \frac{V \times I \times \cos \theta}{746,3 \times \eta_{mg} \times \eta_t}$$

$$= \frac{180 \times 14,4 \times 1}{746,3 \times 0,95 \times 1}$$

$$= 3,656 \text{ hp}$$

Hasil perhitungan daya poros saat *engine* menggunakan bahan bakar LPG secara lengkap disajikan dalam bentuk tabel pada lampiran 2, sedangkan besar daya poros saat *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* disajikan dalam bentuk tabel pada lampiran 3.



4.2.2 Contoh Perhitungan Tekanan Efektif Rata-rata (BMEP) Menggunakan Bahan Bakar LPG

Besarnya tekanan efektif rata-rata (BMEP) dihitung dengan menggunakan persamaan 2.6 yaitu sebagai berikut :

$$B_{mep} = \frac{60 \times Ne \times z}{A \times L \times n \times i \times 1,34} \text{ [KPa]}$$

Dengan :

A = luas permukaan torak

$$= \frac{1}{4} \pi d^2$$

$$= \frac{1}{4} \pi (0,088)^2$$

$$= 0,00608 \text{ m}^2$$

z = 2 (motor 4 langkah)

L = 0,064 m

n = 1962 rpm

i = 1 buah

Dimana saat *engine* menggunakan bahan bakar LPG, pada kondisi beban 4000 watt dengan derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 70 mbar, didapat nilai daya poros (Ne) dari perhitungan yaitu sebesar 3,656 hp, sehingga dapat dihitung besarnya BMEP sebagai berikut :

$$BMEP_{LPG} = \frac{60 \times Ne \times z}{A \times L \times n \times i \times 1,34} \text{ [KPa]}$$

$$= \frac{60 \times (3,656) \times (2)}{(0,00608) \times (0,064) \times (1962) \times (1) \times 1,34} \text{ [KPa]}$$

$$= 428,904 \text{ KPa}$$

Hasil perhitungan tekanan efektif rata-rata (BMEP) saat *engine* menggunakan bahan bakar LPG secara lengkap disajikan dalam bentuk tabel pada lampiran 2, sedangkan besar BMEP saat *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* disajikan dalam bentuk tabel pada lampiran 3.



4.2.3 Contoh Perhitungan Torsi Menggunakan Bahan Bakar LPG

Torsi pada penelitian ini dihitung melalui penurunan rumus daya efektif seperti pada persamaan 2.7 yaitu sebagai berikut :

$$Mt = 71620 \frac{Ne}{n} \text{ [kg.cm]}$$

Dengan :

$$n = 1962 \text{ rpm}$$

Sedangkan saat *engine* menggunakan bahan bakar LPG, pada kondisi beban 4000 watt dengan derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 70 mbar, didapat nilai daya poros (Ne) dari perhitungan yaitu sebesar 3,656 hp, sehingga dapat dihitung besarnya torsi sebagai berikut :

$$Mt_{LPG} = 71620 \frac{(3,656)}{(1962)} \text{ [kg.cm]}$$

$$= 133,455 \text{ kg.cm}$$

Hasil perhitungan torsi saat *engine* menggunakan bahan bakar LPG secara lengkap disajikan dalam bentuk tabel pada lampiran 2, sedangkan besar torsi saat *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* disajikan dalam bentuk tabel pada lampiran 3.

4.2.4 Contoh Perhitungan Konsumsi Bahan Bakar (Sfc) Menggunakan Bahan Bakar LPG

Besarnya konsumsi bahan bakar LPG dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.8 yaitu sebagai berikut :

$$sfc = \frac{3600 \cdot m_{bb}}{Ne \cdot s}$$

$$= \frac{3600 \cdot \dot{m}_{bb}}{Ne}$$

Dengan :

$$\dot{m}_{bb} = \text{mass flow rate bahan bakar per detik}$$

$$= \rho_{LPG} \cdot V_{LPG} \cdot A_{LPG}$$



Dimana nilai densitas bahan bakar LPG (ρ_{LPG}) sebesar $2,26 \text{ kg/m}^3$ dan besar penampang *pitot tube* yang digunakan untuk bahan bakar LPG sebesar $0,000032 \text{ m}^2$. Sedangkan besar kecepatan aliran bahan bakar LPG dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 3.3 yaitu sebagai berikut :

$$V_{LPG} = \sqrt{\frac{2 \times \rho_{H_2O} \times g \times 2L \sin \theta}{\rho_{LPG}}} \frac{m}{s}$$

Karena cairan manometer menggunakan air (H_2O) dan $2L$ sebesar $5,5 \text{ mm}$, maka kecepatan aliran bahan bakar LPG dapat dihitung sebagai berikut :

$$V_{LPG} = \sqrt{\frac{2 \times \rho_{H_2O} \times g \times 2L \sin \theta}{\rho_{LPG}}} \frac{m}{s}$$

Dengan :

$$\rho_{H_2O} = 999 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{LPG} = 2,26 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}$$

$$2L = 5,5 \text{ mm} = 0,0055 \text{ m}$$

$$\theta = 15^\circ$$

Sehingga kecepatan aliran bahan bakar LPG dapat hitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned} V_{LPG} &= \sqrt{\frac{2 \times (999) \times (9,8) \times (0,0055) \sin 15}{2,26}} \frac{m}{s} \\ &= 3.51 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Maka *mass flow rate* bahan bakar LPG sebesar :

$$\begin{aligned} \dot{m}_{LPG} &= \rho_{LPG} \cdot V_{LPG} \cdot A_{\text{pitot tube}} \\ &= (2,26) \times (3,51) \times (0,000032) \\ &= 0,00025 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Sedangkan saat *engine* menggunakan bahan bakar LPG, pada kondisi beban 4000 watt dengan derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan bahan



bakar 70 mbar, didapat nilai daya poros (N_e) dari perhitungan yaitu sebesar 3,656 hp, sehingga dapat dihitung besarnya konsumsi bahan bakar LPG sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Sfc_{LPG} &= \frac{3600 \cdot \dot{m}_{LPG}}{N_e} \\ &= \frac{3600 \times (0,00025)}{(3,656)} \\ &= 0,24 \text{ kg/hp.jam} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan Sfc saat *engine* menggunakan bahan bakar LPG secara lengkap disajikan dalam bentuk tabel pada lampiran 2, sedangkan besar Sfc saat *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* disajikan dalam bentuk tabel pada lampiran 3.

4.2.5 Contoh Perhitungan Efisiensi *Thermal* (η_{th}) Menggunakan Bahan Bakar LPG

Besar efisiensi *thermal engine* dihitung dengan menggunakan persamaan 2.9 yaitu sebagai berikut :

$$\eta_{th} = \frac{632}{sfc \cdot Q} \times 100\%$$

Dengan nilai kalor (Q) bahan bakar LPG sebesar 10997 KCal/kg, sedangkan saat *engine* menggunakan bahan bakar LPG, pada kondisi beban 4000 watt dengan derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 70 mbar didapat nilai Sfc dari perhitungan yaitu sebesar 0,24 kg/hp.jam, sehingga dapat dihitung besarnya efisiensi *thermal* sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \eta_{th \text{ LPG}} &= \frac{632}{sfc \cdot Q} \times 100\% \\ &= \frac{632}{(0,24) \times (10997)} \times 100\% \\ &= 23,26 \% \end{aligned}$$



Hasil perhitungan efisiensi *thermal* saat menggunakan bahan bakar LPG secara lengkap disajikan dalam bentuk tabel pada lampiran 2, sedangkan besar efisiensi *thermal* saat *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* disajikan dalam bentuk tabel pada lampiran 3.

4.2.6 Contoh Perhitungan Air Fuel Ratio (AFR) Menggunakan Bahan Bakar Syn-gas

Besar AFR saat *engine* menggunakan bahan bakar LPG dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.3 yaitu sebagai berikut :

$$AFR = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f}$$

Dengan *mass flow rate* bahan bakar LPG (\dot{m}_f) telah didapatkan sebesar 0,00025 kg/s. Sedangkan besar *mass flow rate* udara (\dot{m}_a) adalah sebagai berikut :

\dot{m}_a = *mass flow rate* udara per detik

$$= \rho_{udara} \cdot V \cdot A_{pitot\ tube}$$

Dimana nilai densitas udara (ρ_{udara}) sebesar 1.1447 kg/m³ dan besar penampang *pitot tube* untuk saluran udara yang digunakan sebesar 0,00114 m², Sedangkan besar kecepatan aliran udara dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 3.3 yaitu sebagai berikut :

$$V_{udara} = \sqrt{\frac{2x\rho_{H_2O}xSG_{redoil}xgx2L \sin \theta}{\rho_{udara}}} \frac{m}{s}$$

Karena cairan manometer menggunakan air (H₂O) dan manometer U, maka kecepatan aliran udara dapat dihitung sebagai berikut :

$$V_{udara} = \sqrt{\frac{2x\rho_{H_2O}xgxh}{\rho_{udara}}} \frac{m}{s}$$

Dengan :

$$\rho_{H_2O} = 999 \text{ kg/m}^3$$



$$\begin{aligned}\rho_{udara} &= 1.1447 \text{ kg/m}^3 \\ g &= 9,8 \text{ m/s} \\ h &= 1 \text{ mm} = 0,001 \text{ m}\end{aligned}$$

Kemudian kecepatan aliran udara yang masuk ke ruang bakar dapat hitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned}V_{udara} &= \sqrt{\frac{2x\rho_{H_2O}xg xh}{\rho_{udara}}} \frac{m}{s} \\ &= \sqrt{\frac{2 x (999) x (9,8) x 0,001}{1,1447}} \\ &= 4,13 \text{ m/s}\end{aligned}$$

Maka *mass flow rate* udara yang masuk ke ruang bakar sebesar :

$$\begin{aligned}\dot{m}_{udara} &= \rho_{udara} \cdot V \cdot A_{pitot \ tube} \\ &= (1,1447) x (4,13) x (0,00114) \\ &= 0,0054 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

Sehingga besar AFR adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}AFR &= \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} = \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{LPG}} \\ &= \frac{0,0054}{0,00025} \\ &= 21,5\end{aligned}$$

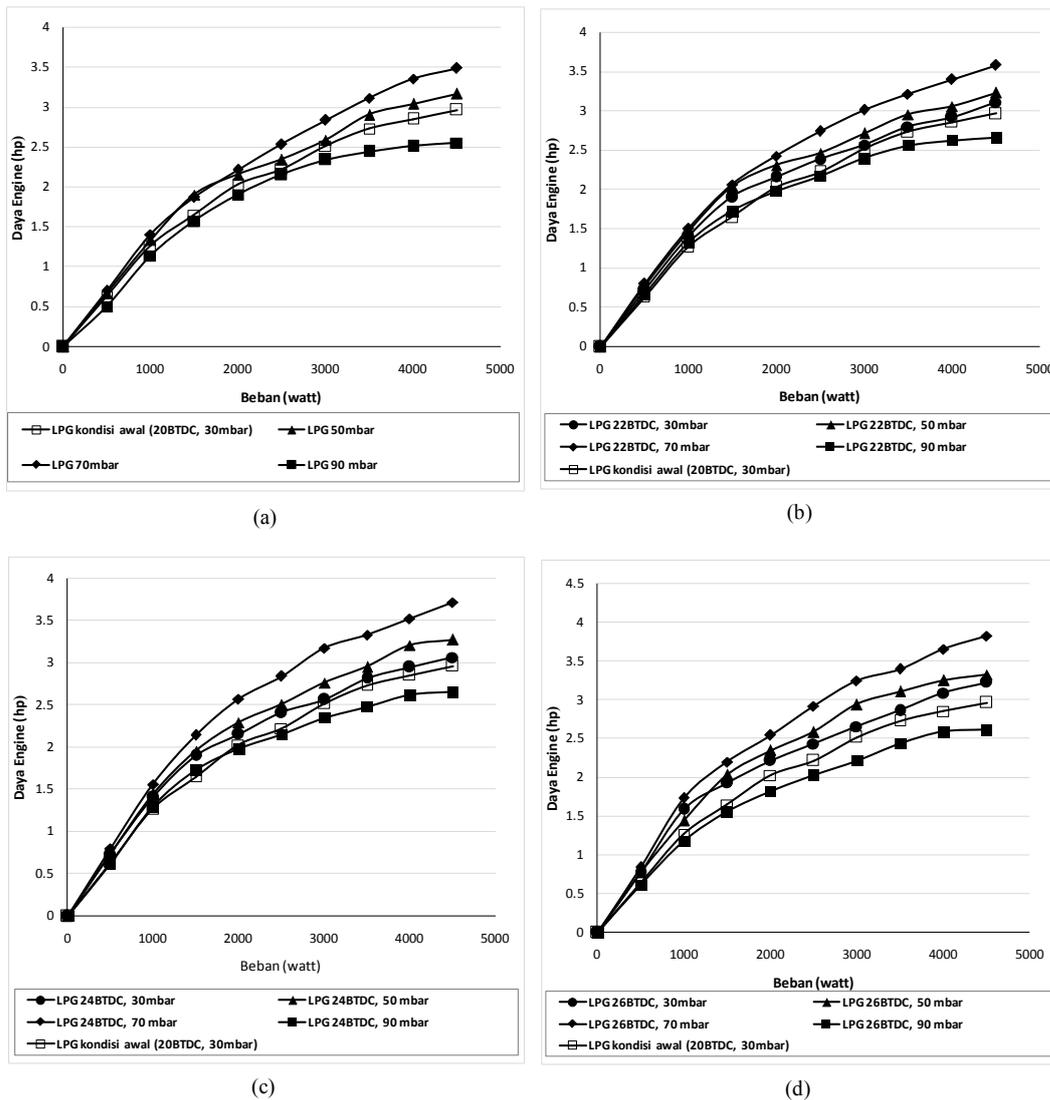
Hasil perhitungan AFR saat menggunakan bahan bakar LPG secara lengkap disajikan dalam bentuk tabel pada lampiran 2, sedangkan besar AFR saat *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* disajikan dalam bentuk tabel pada lampiran 3.



4.3 Analisa *Mapping* Tekanan Masuk Dan Derajat Pengapian Dengan Bahan Bakar LPG

4.3.1 Analisa Daya Poros

Daya poros adalah analisa ukuran kemampuan dari suatu *engine* untuk menghasilkan kerja yang berguna per satuan waktu yang dinyatakan dalam daya kuda (dk) atau *horse power* (hp). Berikut ini adalah grafik daya terhadap beban saat *engine* menggunakan bahan bakar LPG :



Gambar 4.1 Grafik daya fungsi beban *engine* pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat *engine* berbahan bakar LPG.



Secara umum pada gambar 4.1 menunjukkan daya poros (N_e) mengalami kenaikan seiring dengan penambahan beban. Pada pengujian *engine* yang telah dilakukan menunjukkan bahwa pada setiap penambahan beban lampu menyebabkan tekanan bahan bakar pada sisi keluaran *pressure regulator* mengalami penurunan, padahal pada pengoperasiannya tekanan yang masuk ruang bakar dijaga konstan. Maka pada setiap penambahan beban lampu, selalu dilakukan penambahan bukaan *pressure regulator* untuk menjaga tekanan yang masuk ruang bakar tidak berubah. Sehingga setiap penambahan beban lampu, menyebabkan peningkatan kebutuhan suplai bahan bakar yang ditunjukkan dengan selalu dilakukan penambahan bukaan *pressure regulator*. Hal ini menyebabkan daya poros meningkat seiring penambahan beban, karena energi yang diberikan oleh bahan bakar juga bertambah. Dengan penambahan tekanan masuk maka semakin banyak jumlah bahan bakar yang dapat dibakar sehingga energi pembakaran lebih besar. Nilai daya poros terbesar *engine* ketika menggunakan bahan bakar LPG sebelum divariasikan sebesar 2,966 hp saat diberi beban lampu 4500 watt. Gambar 4.1(a) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 20° sebelum TMA, memiliki nilai daya motor terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 70 mbar yaitu sebesar 3,491 hp saat *engine* diberi beban lampu 4500 watt. Gambar 4.1(b) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 22° sebelum TMA, memiliki nilai daya motor terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 70 mbar yaitu sebesar 3,584 hp saat *engine* diberi beban lampu 4500 w att. Gambar 4.1(c) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 24° sebelum TMA, memiliki nilai daya motor terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 70 mbar yaitu sebesar 3,717 hp saat *engine* diberi beban lampu 4500 watt. Gambar 4.1(d) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, memiliki nilai daya motor terbesar terjadi pada saat tekanan masuk bahan bakar 70 mbar yaitu sebesar 3,826 hp saat *engine* diberi beban lampu 4500 watt. Dari semua variasi derajat pengapian yang dilakukan, menunjukkan daya poros terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan



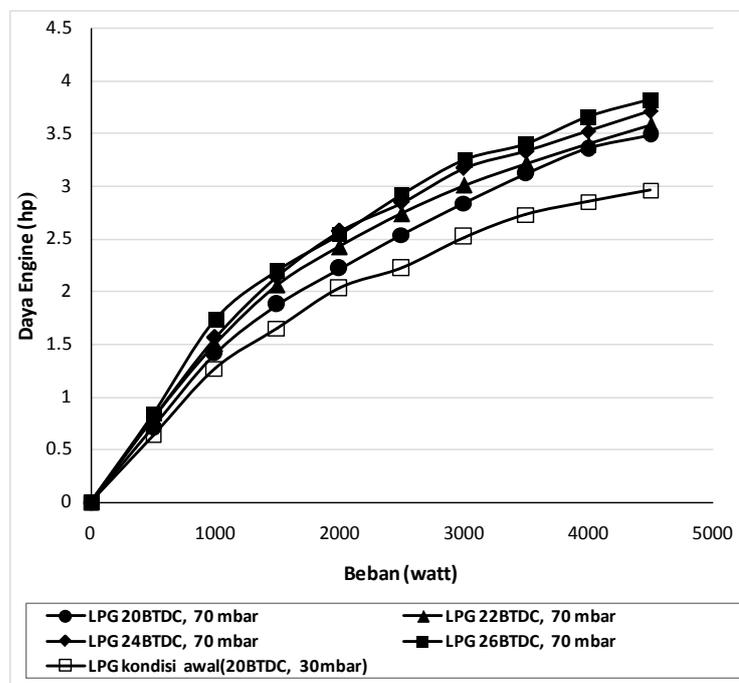
bakar sebesar 70 mbar. Sehingga saat dilakukan variasi tekanan masuk bahan bakar pada derajat pengapian yang konstan, menyebabkan kenaikan nilai daya seiring dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar ke ruang bakar. Hal ini karena dengan peningkatan tekanan bahan bakar yang masuk ruang bakar, akan menyebabkan suplai bahan bakar ke ruang bakar juga meningkat. Sehingga daya poros mengalami peningkatan seiring peningkatan tekanan masuk bahan bakar.

Pada gambar 4.1 juga menunjukkan bahwa jika tekanan bahan bakar dari 70 mbar di naikkan lagi, justru daya poros *engine* mengalami penurunan pada tekanan masuk 90 mbar. Hal ini karena pada ruang bakar terlalu banyak bahan bakar sehingga proses pembakaran yang terjadi kurang sempurna dan energi yang dihasilkan dari proses pembakaran tersebut kurang maksimal. Secara keseluruhan kenaikan daya secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi, pada derajat pengapian 20° sebelum TMA adalah 6,7% pada tekanan masuk 50 mbar, 14,2% pada tekanan masuk 70 mbar, sedangkan saat tekanan masuk bahan bakar 90 mbar terjadi penurunan 9,2%, sehingga daya yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 70 mbar. Untuk menaikkan daya secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi, pada derajat pengapian 22° sebelum TMA adalah 5,8% pada tekanan masuk 30 mbar, 11,3% pada tekanan masuk 50 mbar, 20,5% pada tekanan masuk 70 mbar. Sedangkan saat tekanan masuk bahan bakar 90 mbar terjadi penurunan 4%, sehingga daya yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 70 mbar. Kenaikkan daya secara rata-rata terhadap kondisi sebelum divariasi pada derajat pengapian 24° sebelum TMA sebagai berikut pada tekanan masuk 30 mbar adalah 6,1% , pada tekanan masuk 50 mbar adalah 12,1%, pada tekanan masuk 70 mbar adalah 25,4%. Sedangkan saat tekanan masuk bahan bakar 90 mbar terjadi penurunan 5,2%, sehingga daya yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 70 mbar. Pada derajat pengapian 26° sebelum TMA kenaikan daya secara rata-rata terhadap kondisi sebelum divariasi adalah 10,1% pada tekanan masuk 30 mbar, 15,7% pada tekanan masuk 50 mbar, 29,1% pada tekanan masuk 70 mbar. Sedangkan saat tekanan masuk bahan bakar 90 mbar terjadi penurunan 9,4%, sehingga daya yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 70 mbar. Sehingga pada tiap variasi derajat pengapian yang



dilakukan, memiliki kenaikan daya secara rata-rata terbesar terjadi pada tekanan masuk 70 mbar.

Gambar 4.2 merupakan grafik perbandingan daya terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat *engine* berbahan bakar LPG, yang menunjukkan daya terbaik terjadi pada tekanan masuk 70 mbar dengan derajat pengapian sebesar 26° sebelum TMA. Dimana pada derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan masuk 70 mbar, kenaikan daya secara rata-rata terhadap kondisi sebelum divariasi adalah 29,1%. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin meningkatnya tekanan bahan bakar maka masa campuran bahan bakar yang masuk ke ruang bakar semakin besar sehingga energi atau kalor yang dapat dikonversi menjadi kerja akan semakin besar.



Gambar 4.2 Grafik perbandingan daya terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat *engine* berbahan bakar LPG.

Pada gambar 4.2 j uga menunjukkan bahwa daya poros dari derajat pengapian 20° ke 26° sebelum TMA, menghasilkan daya yang meningkat seiring dengan peningkatan derajat pengapian. Dengan demikian besar derajat pengapian yang optimum untuk menghasilkan daya maksimal ketika menggunakan bahan

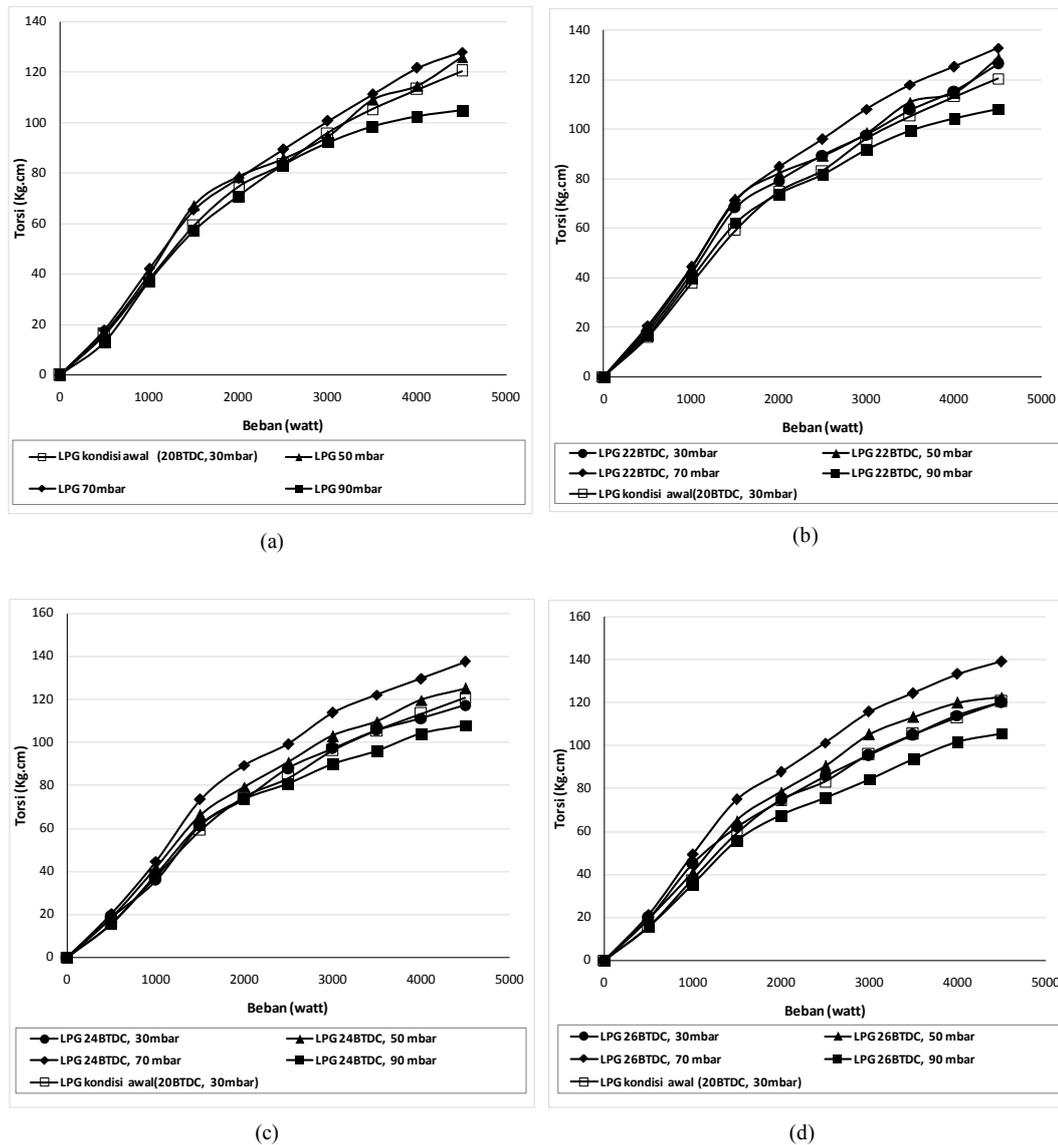


bakar LPG yaitu sebesar 26° sebelum TMA. Pada derajat pengapian yang lebih maju maka semakin banyak jumlah udara-bahan bakar yang dapat dibakar sehingga energi pembakaran lebih besar. Energi hasil pembakaran yang besar juga didapatkan dari laju pembakaran yang cepat karena semakin banyak campuran udara dan bahan bakar yang dapat terbakar maka daya poros *engine* akan bertambah.

4.3.2 Analisa Torsi

Torsi adalah analisa ukuran kemampuan *engine* untuk menghasilkan kerja. Dalam kenyataannya torsi dari *engine* dimanfaatkan untuk mengatasi hambatan sewaktu kendaraan terperosok atau untuk berakselerasi. Besarnya nilai kalor ditentukan oleh tekanan yang dihasilkan di dalam ruang bakar. Jika tekanan di dalam ruang bakar tinggi maka torsi yang dihasilkan juga tinggi. Gambar 4.3 merupakan grafik torsi terhadap beban saat *engine* menggunakan bahan bakar LPG .

Pada gambar 4.3 menunjukkan bahwa torsi mengalami kenaikan seiring dengan penambahan beban. Hal ini disebabkan setiap penambahan beban lampu, menyebabkan peningkatan kebutuhan suplai bahan bakar yang ditunjukkan dengan selalu dilakukan penambahan bukaan *pressure regulator*. Semakin besar suplai bahan bakar, maka semakin besar nilai kalor yang masuk ke ruang bakar. Sehingga energi dihasilkan oleh proses pembakaran di ruang bakar akan meningkat, yang menyebabkan nilai torsi meningkat seiring penambahan beban. Dengan pengujian menggunakan pembebanan lampu didapatkan nilai torsi pada *LPG engine-generator set* ketika menggunakan bahan bakar LPG sebelum divariasikan sebesar 120,5 kg.cm diberi beban lampu 4500 watt. Saat dilakukan variasi tekanan masuk bahan bakar dengan derajat pengapian tidak dirubah atau konstan, menunjukkan kenaikan nilai torsi seiring peningkatan tekanan masuk bahan bakar. Gambar 4.3(a) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 20° sebelum TMA, memiliki nilai torsi terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 70 mbar yaitu sebesar 128 kg.cm saat *engine* diberi beban lampu 4500 watt.



Gambar 4.3 Grafik torsi fungsi beban *engine* pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat *engine* berbahan bakar LPG.

Pada gambar 4.3(b) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 22° sebelum TMA, memiliki nilai torsi terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 70 mbar yaitu sebesar 132,86 kg.cm saat *engine* diberi beban lampu 4500 watt. Gambar 4.3(c) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 24° sebelum TMA, memiliki nilai torsi terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 70 mbar yaitu sebesar 137,3 kg.cm saat *engine* diberi beban lampu 4500 watt. Gambar 4.3(d) juga



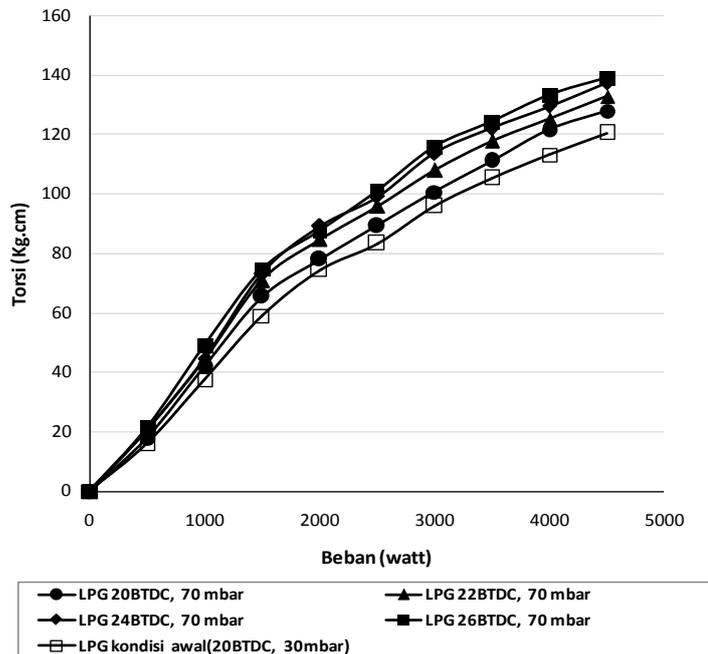
menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, di sini memiliki nilai torsi terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 70 mbar yaitu sebesar 139,2 kg.cm saat *engine* diberi beban lampu 4500 w att. Dari semua variasi derajat pengapian yang dilakukan, menunjukkan nilai torsi terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar sebesar 70 mbar. Dengan penambahan tekanan masuk maka semakin banyak jumlah bahan bakar yang dapat dibakar sehingga energi pembakaran lebih besar menyebabkan nilai torsi semakin meningkat.

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa jika tekanan bahan bakar lebih besar dari 70 mbar, justru nilai torsi akan mengalami penurunan. Hal ini karena pada ruang bakar terlalu banyak bahan bakar, sehingga proses pembakaran yang terjadi kurang sempurna dan energi yang dihasilkan dari proses pembakaran tersebut kurang maksimal. Secara keseluruhan kenaikan torsi secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi, pada derajat pengapian 20° sebelum TMA adalah 3,8% pada tekanan masuk 50 mbar, 6,9% pada tekanan masuk 70 mbar. Sedangkan saat tekanan masuk bahan bakar 90 mbar terjadi penurunan 6,5%, sehingga torsi yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 70 mbar. Untuk kenaikan torsi secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi pada derajat pengapian 22° sebelum TMA adalah 5,5% pada tekanan masuk 30 m bar, 7,6% pada tekanan masuk 50 m bar, 13,5% pada tekanan masuk 70 mbar. Sedangkan saat tekanan masuk bahan bakar 90 mbar terjadi penurunan 3,9%, sehingga torsi yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 70 m bar. Kenaikkan torsi secara rata-rata terhadap kondisi sebelum divariasi pada derajat pengapian 24° sebelum TMA sebagai berikut pada tekanan masuk 30 m bar adalah 0,4%, pada tekanan masuk 50 mbar adalah 6,9%, pada tekanan masuk 70 mbar adalah 17,5%. Sedangkan saat tekanan masuk bahan bakar 90 mbar terjadi penurunan 5,2%, sehingga torsi yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 70 mbar. Pada derajat pengapian 26° sebelum TMA kenaikan torsi secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi adalah 2,3% pada tekanan masuk 30 m bar, 7,2% pada tekanan masuk 50 m bar, 20,2% pada tekanan masuk 70 m bar. Sedangkan saat tekanan masuk bahan bakar 90 mbar terjadi penurunan 9,9%, sehingga torsi yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 70 mbar.



Sehingga pada tiap variasi derajat pengapaian yang dilakukan, memiliki nilai kenaikan torsi secara rata-rata terbesar terjadi pada tekanan masuk 70 mbar.

Gambar 4.4 merupakan grafik fungsi perbandingan torsi terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat *engine* berbahan bakar LPG. Grafik ini menunjukkan bahwa torsi mengalami peningkatan seiring penambahan beban pada *engine*. Dari variasi derajat pengapian dan tekanan masuk bahan bakar LPG, pada gambar 4.4 menunjukkan bahwa torsi terbaik terjadi pada tekanan masuk 70 m bar dengan derajat pengapian sebesar 26° sebelum TMA. Dimana pada derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan masuk 70 m bar, kenaikan daya secara rata-rata terhadap kondisi sebelum divariasi adalah 20,2%. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin meningkatnya tekanan bahan bakar maka masa campuran bahan bakar yang masuk ke ruang bakar semakin besar sehingga energi atau kalor yang dapat dikonversi menjadi kerja akan semakin besar.



Gambar 4.4 Grafik perbandingan torsi terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat *engine* berbahan bakar LPG.

Pada gambar 4.4 menunjukkan bahwa torsi pada derajat pengapian 20° ke 26° sebelum TMA, menghasilkan daya yang meningkat seiring dengan



peningkatan derajat pengapian. Dengan demikian besar derajat pengapian yang optimum untuk menghasilkan torsi maksimal ketika menggunakan bahan bakar LPG yaitu sebesar 26° sebelum TMA. Naiknya torsi seiring dengan waktu pengapian yang semakin maju, hal ini disebabkan semakin banyak tersedianya waktu pembakaran sehingga campuran udara-bahan bakar akan terbakar lebih banyak dan energi hasil pembakaran yang dihasilkan akan lebih besar. Energi hasil pembakaran yang besar juga didapatkan dari laju pembakaran yang cepat karena semakin banyak campuran udara dan bahan bakar yang dapat terbakar maka torsi akan bertambah.

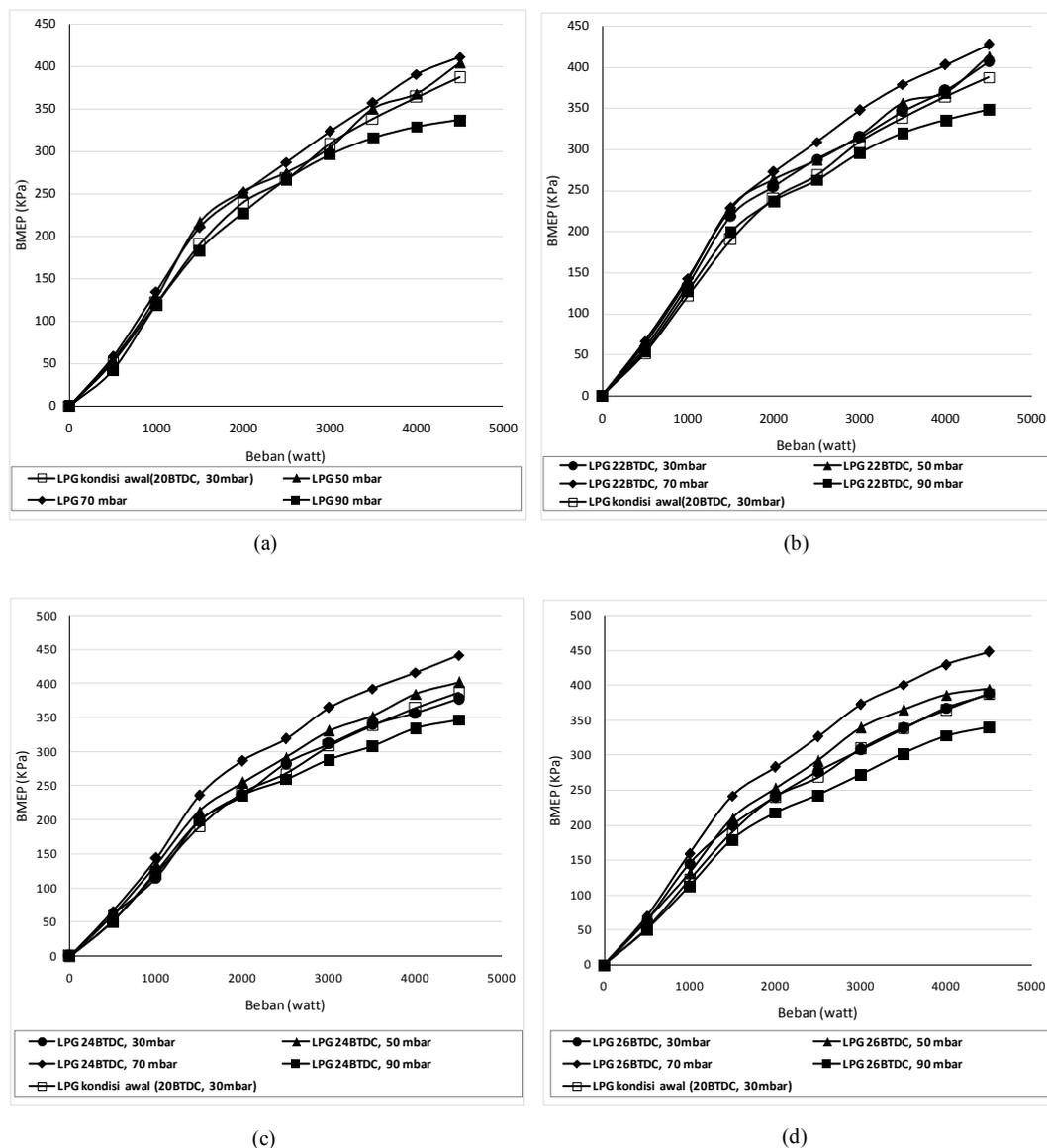
4.3.3 Analisa Tekanan Efektif Rata-rata (Bmep)

Tekanan efektif rata-rata (Bmep) didefinisikan dengan tekanan tetap rata-rata teoritis yang bekerja sepanjang langkah kerja piston. Besarnya tekanan yang dialami piston berubah-ubah sepanjang langkah piston tersebut. Jika diambil tekanan berharga konstan yang bekerja pada piston dan menghasilkan kerja yang sama, maka tekanan tersebut merupakan tekanan efektif rata-rata piston. Torsi dari suatu *engine* sangat dipengaruhi oleh bmep yang dapat dihasilkan dari *engine* tersebut, sehingga grafik bmep identik dengan grafik torsi. *Trendline* grafik Bmep sebagai fungsi beban secara umum sama dengan grafik torsi terhadap beban. Gambar 4.5 merupakan grafik tekanan efektif rata-rata (bmep) terhadap beban saat *engine* menggunakan bahan bakar LPG.

Dari gambar 4.5 menunjukkan grafik bmep identik dengan grafik daya dan torsi. Secara umum, bmep mengalami kenaikan seiring dengan penambahan beban pada *engine*. Hal ini disebabkan setiap penambahan beban lampu, menyebabkan peningkatan kebutuhan suplai bahan bakar yang ditunjukkan dengan selalu dilakukan penambahan bukaan *pressure regulator*. Semakin besar suplai bahan bakar, maka semakin besar nilai kalor yang masuk ke ruang bakar. Sehingga energi dihasilkan oleh proses pembakaran di ruang bakar akan meningkat, yang menyebabkan nilai bmep meningkat seiring penambahan beban. Besar tekanan efektif rata-rata (bmep) saat *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar LPG yang belum divariasikan sebesar 387,2 kPa saat



diberi beban lampu 4500 watt. Gambar 4.5(a) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 20° sebelum TMA, memiliki nilai bmeip terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 70 mbar yaitu sebesar 242,4 kPa saat *engine* diberi beban lampu 4500 watt. Gambar 4.5(b) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 22° sebelum TMA, memiliki nilai bmeip terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 70 mbar yaitu sebesar 257,4 kPa saat *engine* diberi beban lampu 4500 watt.



Gambar 4.5 Grafik bmeip fungsi beban *engine* pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20° , (b) 22° , (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat *engine* berbahan bakar LPG.

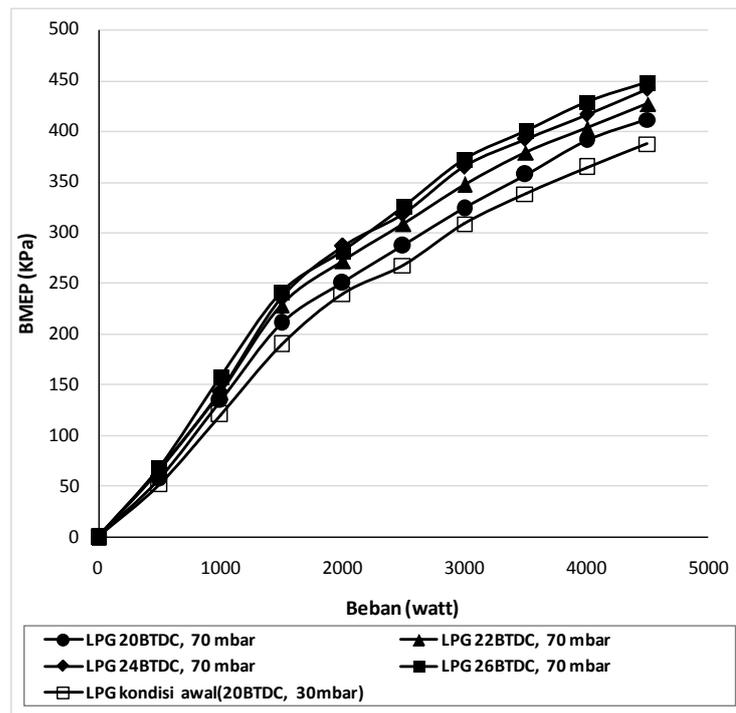


Gambar 4.5(c) menunjukkan dengan adanya peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 24° sebelum TMA, memiliki nilai bmep terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 70 mbar yaitu sebesar 266,6 kPa saat *engine* diberi beban lampu 4500 watt. Gambar 4.5(d) juga menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, memiliki nilai bmep terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 70 mbar yaitu sebesar 272,5 kPa saat *engine* diberi beban lampu 4500 watt. Dengan penambahan tekanan masuk maka semakin banyak jumlah bahan bakar yang dapat dibakar sehingga energi pembakaran lebih besar sehingga nilai bmep semakin meningkat.

Pada gambar 4.5 menunjukkan bahwa jika tekanan bahan bakar dari 70 mbar dinaikkan lagi, justru nilai bmep akan mengalami penurunan. Hal ini karena pada ruang bakar terlalu banyak bahan bakar sehingga proses pembakaran yang terjadi kurang sempurna dan energi yang dihasilkan dari proses pembakaran tersebut kurang maksimal. Secara keseluruhan kenaikan bmep secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi, pada derajat pengapian 20° sebelum TMA adalah 3,8% pada tekanan masuk 50 mbar, 6,9% pada tekanan masuk 70 mbar. Sedangkan saat tekanan masuk bahan bakar 90 mbar terjadi penurunan 6,5%, sehingga bmep yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 70 mbar. Untuk menaikkan bmep secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi, pada derajat pengapian 22° sebelum TMA adalah 5,5% pada tekanan masuk 30 mbar, 7,6% pada tekanan masuk 50 mbar, 13,5% pada tekanan masuk 70 mbar, sedangkan saat tekanan masuk bahan bakar 90 mbar terjadi penurunan 3,9%, sehingga bmep yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 70 mbar. Kenaikkan bmep secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi pada derajat pengapian 24° sebelum TMA sebagai berikut pada tekanan masuk 30 mbar sebesar 0,4% , pada tekanan masuk 50 mbar sebesar 6,9%, pada tekanan masuk 70 mbar sebesar 17,5%. Sedangkan saat tekanan masuk bahan bakar 90 mbar terjadi penurunan sebesar 5,2%, sehingga bmep maksimum yang dihasilkan *engine* terjadi pada tekanan 70 mbar. Pada derajat pengapian 26° sebelum TMA Kenaikkan bmep secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi pada derajat



pengapian 26° sebelum TMA adalah 2,3% pada tekanan masuk 30 mbar, 7,2% pada tekanan masuk 50 mbar dan 20,2% pada tekanan masuk 70 mbar. Sedangkan saat tekanan masuk bahan bakar 90 mbar terjadi penurunan 9,9%, sehingga bmep yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 70 mbar. Sehingga pada tiap variasi derajat pengapian yang dilakukan, memiliki nilai kenaikan bmep secara rata-rata terbesar terjadi pada tekanan masuk 70 mbar.



Gambar 4.6 Grafik perbandingan bmep terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat *engine* berbahan bakar LPG.

Gambar 4.6 merupakan grafik perbandingan bmep terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat *engine* berbahan bakar LPG. Dari variasi derajat pengapian dan tekanan masuk bahan bakar LPG, pada gambar 4.6 menunjukkan bahwa bmep terbaik terjadi pada tekanan masuk 70 mbar dengan derajat pengapian sebesar 26° sebelum TMA. Dimana kenaikan bmep secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi pada derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan masuk 70 mbar sebesar 20,2%. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin meningkatnya tekanan masuk bahan bakar maka



masa campuran bahan bakar yang masuk ke ruang bakar semakin besar sehingga energi atau kalor yang dapat dikonversi menjadi kerja akan semakin besar.

Dari variasi derajat pengapian sebesar 20° sampai 26° sebelum TMA, menunjukkan bmep meningkat seiring dengan kenaikan derajat pengapian. Dimana derajat pengapian yang optimum untuk menghasilkan bmep maksimal terjadi pada 26° sebelum TMA. Naiknya bmep seiring dengan waktu pengapian yang semakin maju, disebabkan semakin banyak tersedianya waktu pembakaran sehingga campuran udara-bahan bakar akan terbakar lebih banyak dan energi hasil pembakaran yang dihasilkan akan lebih besar. Energi hasil pembakaran yang besar juga didapatkan dari laju pembakaran yang cepat karena semakin banyak campuran udara dan bahan bakar yang dapat terbakar maka bmep akan bertambah.

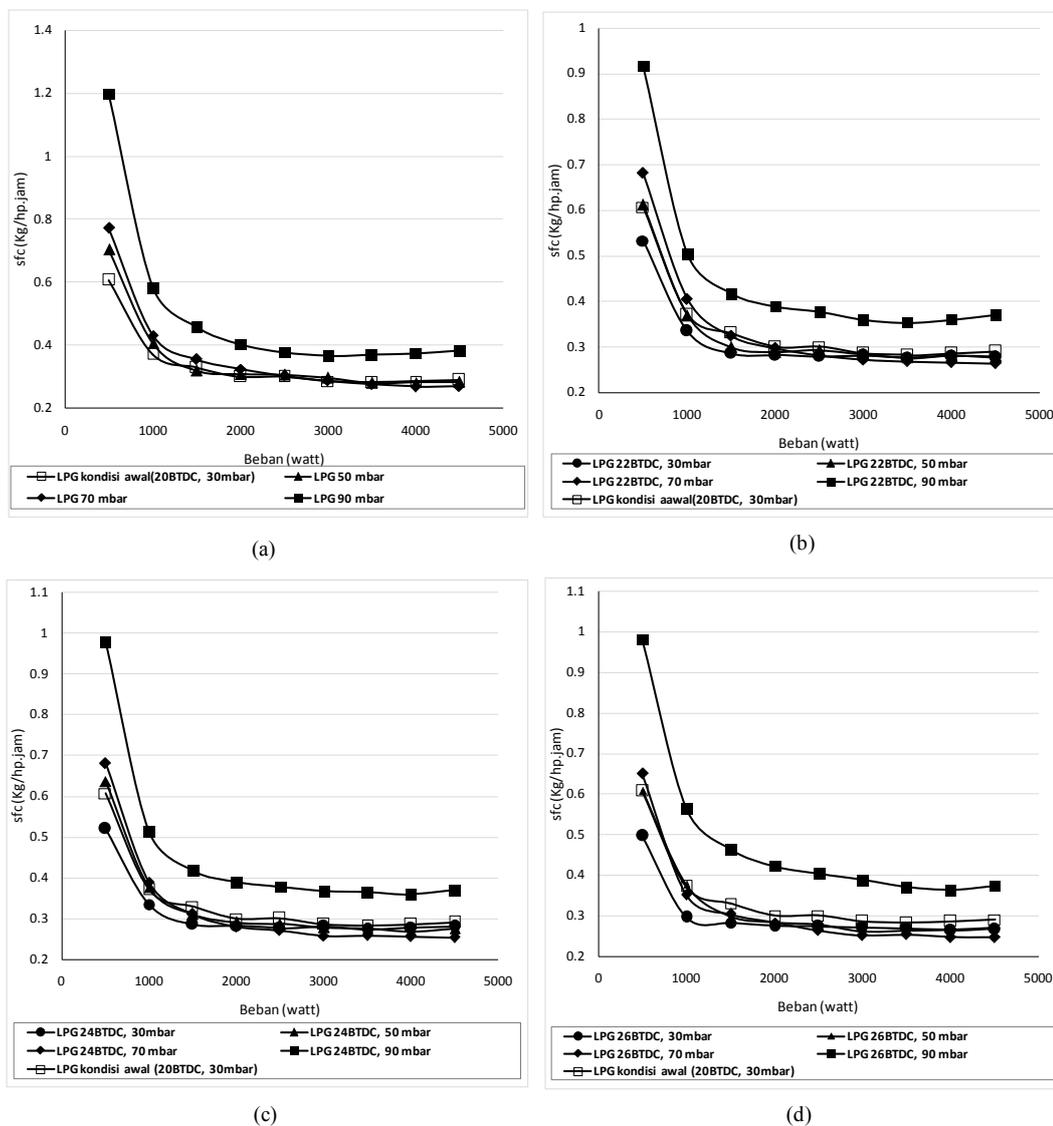
4.3.4 Analisa *Specific Fuel Consumption* (Sfc)

Specific fuel consumption (Sfc) didefinisikan sebagai laju aliran bahan bakar untuk memperoleh daya efektif. Besar kecilnya sfc bergantung pada sempurna atau tidaknya campuran udara dan bahan bakar yang terbakar di dalam ruang bakar.

Pada gambar 4.7 secara umum menunjukkan Sfc semakin turun seiring dengan penambahan beban yang semakin tinggi, hal ini karena semakin besar beban maka *engine* akan semakin banyak memerlukan konsumsi bahan bakar pada putaran motor yang konstan. Gambar 4.7(a) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 m bar sampai 90 m bar pada derajat pengapian 20° sebelum TMA, memiliki nilai Sfc terkecil terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 70 mbar yaitu sebesar 0,27 kg/hp.jam saat *engine* diberi beban lampu 4500 watt. Gambar 4.7(b) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 22° sebelum TMA, memiliki nilai Sfc terkecil terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 70 mbar yaitu sebesar 0,263 kg/hp.jam saat *engine* diberi beban lampu 4500 watt. Gambar 4.7(c) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 24° sebelum TMA,



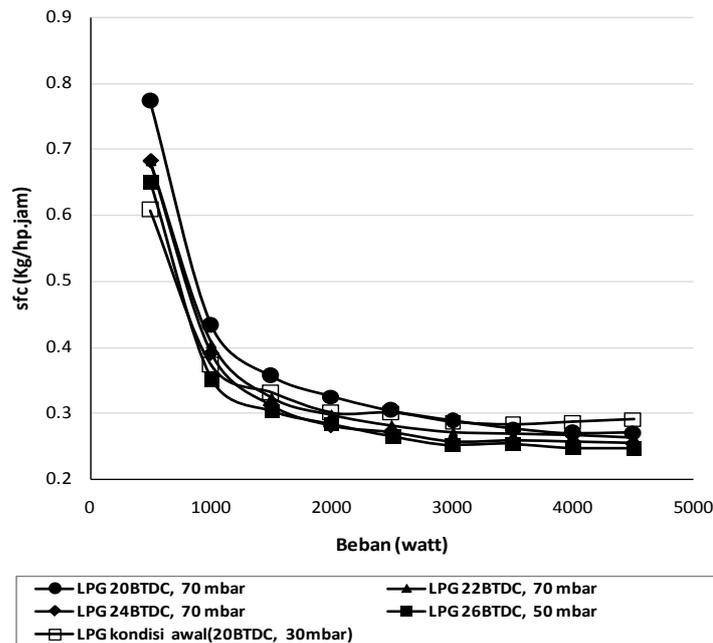
memiliki nilai Sfc terkecil terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 70 mbar yaitu sebesar 0,254 kg/hp.jam saat *engine* diberi beban lampu 4500 watt. Gambar 4.7(d) juga menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, memiliki nilai Sfc terkecil terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 70 mbar yaitu sebesar 0,247 kg/hp.jam saat *engine* diberi beban lampu 4500 watt. Dari semua variasi derajat pengapian yang dilakukan, menunjukkan nilai Sfc terkecil terjadi pada tekanan masuk bahan bakar sebesar 70 mbar.



Gambar 4.7 Grafik sfc fungsi beban *engine* pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20° , (b) 22° , (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat *engine* berbahan bakar LPG.



Dari gambar 4.7 menunjukkan bahwa jika tekanan bahan bakar dari 70 mbar dinaikkan lagi, justru Sfc akan mengalami kenaikan. Hal ini karena pada ruang bakar terlalu banyak bahan bakar yang masuk, sedangkan daya yang dihasilkan tidak sebanding atau tidak meningkat dengan kenaikan suplai bahan bakar tersebut. Secara keseluruhan terjadi kenaikan nilai Sfc secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi, pada derajat pengapian 20° sebelum TMA dan variasi tekanan masuk bahan bakar yaitu 4,5% pada tekanan masuk 50 mbar, 7,8% pada tekanan masuk 70 mbar dan 48,1% pada tekanan masuk 90 mbar. Sehingga secara keseluruhan Sfc rata-rata terkecil terjadi pada tekanan masuk 30 mbar. Sedangkan pada derajat pengapian 22° sebelum TMA dan variasi tekanan masuk bahan bakar, menunjukkan secara keseluruhan terjadi penurunan nilai Sfc secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi yaitu 7,4% pada tekanan masuk 30 mbar dan 2,3% pada tekanan masuk 50 mbar. Sedangkan terjadi kenaikan nilai Sfc secara rata-rata sebesar 0,08% pada tekanan masuk 70 mbar dan 32,4% pada tekanan masuk 90 mbar. Sehingga secara keseluruhan Sfc rata-rata terkecil pada tekanan masuk 30 mbar. Dan pada derajat pengapian 24° sebelum TMA dan variasi tekanan masuk bahan bakar, menunjukkan secara keseluruhan terjadi penurunan nilai Sfc secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi yaitu 7,9% pada tekanan masuk 30 mbar, 1,7% pada tekanan masuk 50 mbar dan 3,1% pada tekanan masuk 70 mbar. Sedangkan terjadi kenaikan nilai Sfc secara rata-rata sebesar 35,5% pada tekanan masuk 90 mbar. Sehingga secara keseluruhan Sfc rata-rata terkecil pada tekanan masuk 30 mbar. Pada derajat pengapian 26° sebelum TMA dan variasi tekanan masuk bahan bakar, menunjukkan secara keseluruhan terjadi penurunan nilai Sfc secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi yaitu 11,8% pada tekanan masuk 30 mbar, 4,8% pada tekanan masuk 50 mbar dan 6,7% pada tekanan masuk 70 mbar. Sedangkan terjadi kenaikan nilai Sfc secara rata-rata sebesar 41,7% pada tekanan masuk 90 mbar. Sehingga secara keseluruhan Sfc rata-rata terkecil pada tekanan masuk 30 mbar. Sehingga pada tiap variasi derajat pengapian yang dilakukan, memiliki nilai Sfc rata-rata terkecil terjadi pada tekanan masuk 30 mbar.



Gambar 4.8 Grafik perbandingan Sfc terbaik (rata-rata terkecil) terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat *engine* berbahan bakar LPG.

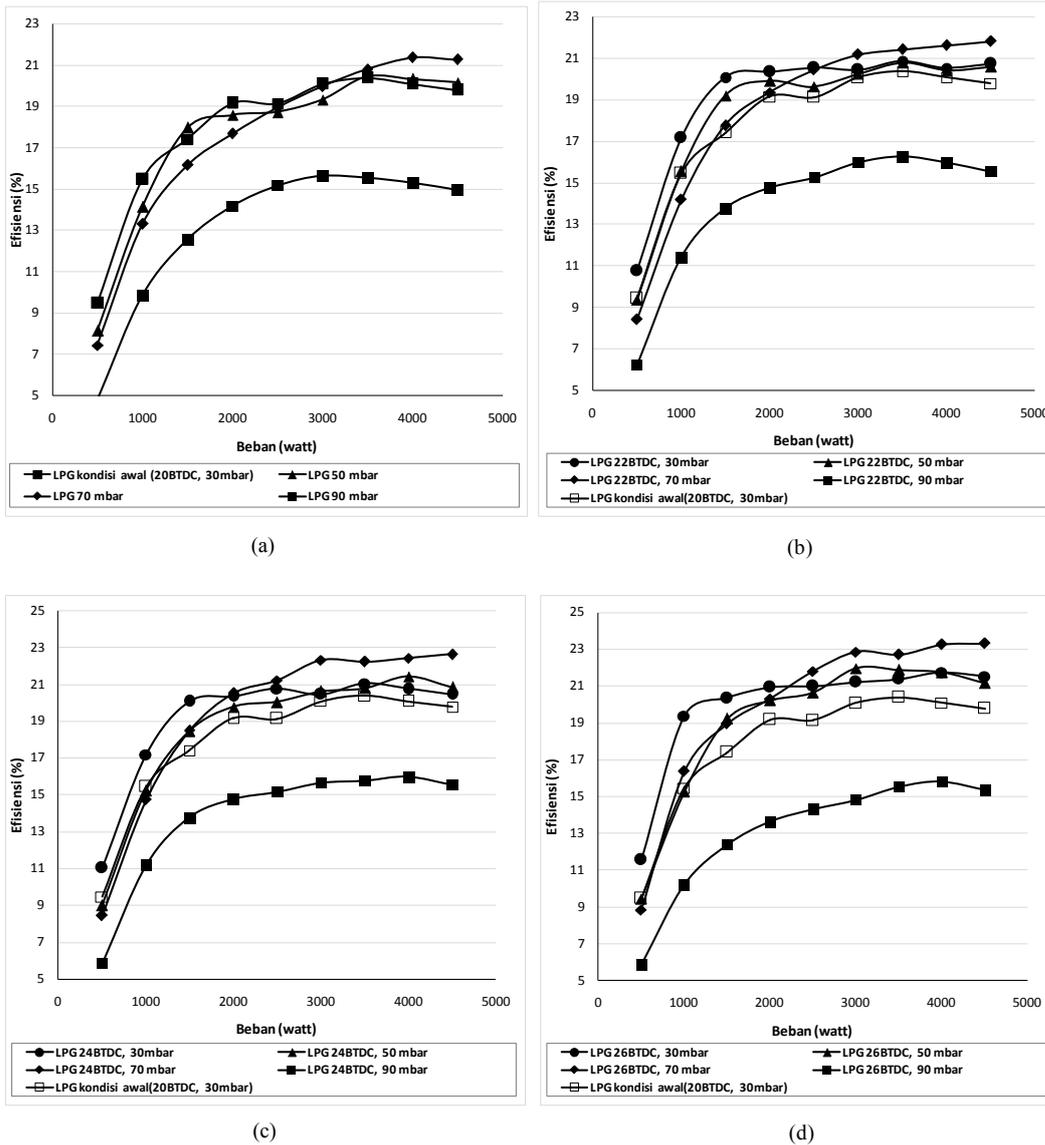
Pada gambar 4.8 menunjukkan bahwa Sfc mengalami penurunan seiring penambahan beban pada *engine*. Dari variasi derajat pengapian dan tekanan masuk bahan bakar LPG, menunjukkan bahwa Sfc rata-rata terkecil terjadi pada tekanan masuk 30 mbar dengan derajat pengapian sebesar 26° sebelum TMA. Dimana penurunan nilai Sfc rata-rata terhadap kondisi belum divariasikan, pada derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan masuk 30 mbar sebesar 11,8%.

Dari variasi derajat pengapian sebesar 20° sampai 26° sebelum TMA, menunjukkan sfc menurun seiring pemajuan derajat pengapian. Dimana derajat pengapian yang optimum untuk menghasilkan Sfc maksimal terjadi pada 26° sebelum TMA. Turunnya Sfc seiring dengan waktu pengapian yang semakin maju, disebabkan semakin banyak tersedianya waktu pembakaran sehingga campuran udara-bahan bakar akan terbakar lebih banyak sehingga energi hasil pembakaran yang dihasilkan akan lebih besar. Energi hasil pembakaran yang besar juga didapatkan dari laju pembakaran yang cepat karena semakin banyak campuran udara dan bahan bakar yang dapat terbakar maka bmep akan bertambah.



4.3.5 Analisa Efisiensi *Thermal* (η_{th})

Efisiensi *thermal* (η_{th}) adalah ukuran besarnya pemanfaatan energi panas yang tersimpan dalam bahan bakar untuk diubah menjadi daya efektif oleh motor pembakaran dalam. Berikut ini adalah grafik Efisiensi *thermal* (η_{th}) terhadap beban saat *engine* menggunakan bahan bakar LPG :



Gambar 4.9 Grafik efisiensi *thermal* fungsi beban *engine* pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat *engine* berbahan bakar LPG.

Pada gambar 4.9 menunjukkan bahwa efisiensi *thermal* (η_{th}) naik seiring dengan penambahan beban, namun pada beban tinggi kenaikannya tidak



signifikan lagi atau bahkan ada kecenderungan turun. Hal ini berarti bahwa pada keadaan tertentu nilai efisiensi terbaik dari *engine* tidak terjadi pada beban puncak. Besar efisiensi *thermal* (η_{th}) maksimum pada *LPG engine-generator set* saat menggunakan bahan bakar LPG pada kondisi belum divariasikan sebesar 20,4% pada beban 3500 watt. Sedangkan ketika dilakukan variasi tekanan masuk bahan bakar dengan derajat pengapian tidak dirubah atau konstan, menunjukkan kenaikan efisiensi *thermal* (η_{th}) seiring peningkatan tekanan masuk bahan bakar. Gambar 4.9(a) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 20° sebelum TMA, memiliki nilai efisiensi *thermal* (η_{th}) terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 70 mbar yaitu sebesar 21,36% saat *engine* diberi beban lampu 4000 watt. Gambar 4.9(b) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 22° sebelum TMA, memiliki nilai efisiensi *thermal* (η_{th}) terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 70 mbar yaitu sebesar 21,83% saat *engine* diberi beban lampu 4500 watt. Gambar 4.9(c) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 24° sebelum TMA, memiliki nilai efisiensi *thermal* (η_{th}) terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 70 mbar yaitu sebesar 20,64% saat *engine* diberi beban lampu 4500 watt. Gambar 4.9(d) juga menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, memiliki nilai efisiensi *thermal* (η_{th}) terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 70 mbar yaitu sebesar 23,30% saat *engine* diberi beban lampu 4500 watt. Dari semua variasi derajat pengapian yang dilakukan, menunjukkan nilai efisiensi terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar sebesar 70 mbar. Hal ini disebabkan dengan penambahan tekanan masuk maka semakin banyak jumlah bahan bakar yang dapat dibakar sehingga energi pembakaran lebih besar dan nilai efisiensi *thermal* (η_{th}) semakin meningkat.

Dari gambar 4.9 juga menunjukkan bahwa jika tekanan bahan bakar dari 70 mbar dinaikkan lagi, justru nilai efisiensi akan mengalami penurunan. Hal ini karena pada ruang bakar terlalu banyak bahan bakar yang masuk, sedangkan daya yang dihasilkan tidak sebanding atau tidak meningkat dengan kenaikan suplai

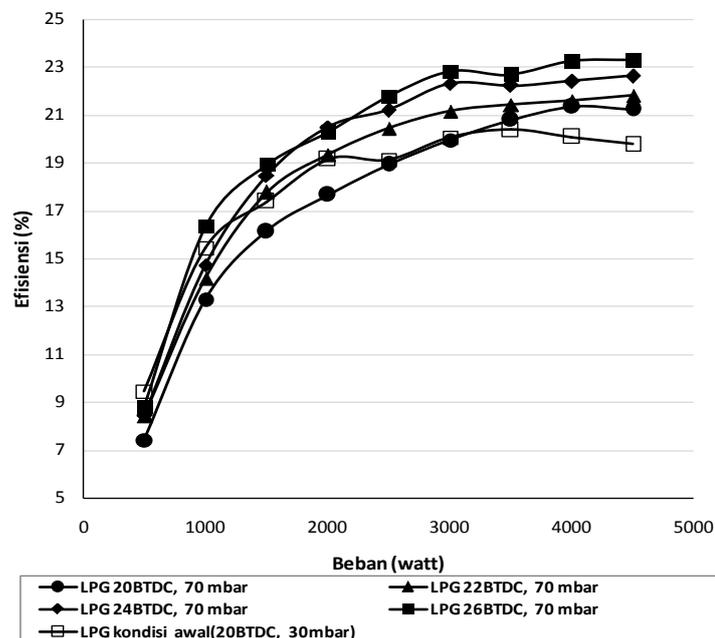


bahan bakar tersebut. Secara keseluruhan nilai efisiensi *thermal* (η_{th}) secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi, pada derajat pengapian 20° sebelum TMA terjadi penurunan yaitu sebesar 1,9% pada tekanan masuk 50 m bar, 2,5% pada tekanan masuk 70 m bar dan 26,7% pada tekanan masuk 90 m bar. Sehingga efisiensi *thermal* (η_{th}) rata-rata maksimum yang dihasilkan *engine* terjadi pada tekanan 30 mbar. Untuk menaikkan efisiensi *thermal* (η_{th}) secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi, pada derajat pengapian 22° sebelum TMA adalah sebesar 6,6% pada tekanan masuk 30 mbar, 2,95% pada tekanan masuk 50 mbar dan 3,3% pada tekanan masuk 70 mbar. Sedangkan pada tekanan masuk 90 terjadi penurunan efisiensi sebesar 22,1%, sehingga efisiensi *thermal* (η_{th}) rata-rata maksimum terjadi pada tekanan 30 mbar. Dan menaikkan efisiensi *thermal* (η_{th}) secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi pada derajat pengapian 24° sebelum TMA adalah sebesar 6,96% pada tekanan masuk 30 mbar, 3,3% pada tekanan masuk 50 mbar dan 7,5% pada tekanan masuk 70 mbar. Sedangkan saat tekanan masuk bahan bakar 90 m bar terjadi penurunan efisiensi sebesar 23,1, sehingga efisiensi *thermal* (η_{th}) rata-rata maksimum terjadi pada tekanan 70 mbar. Sedangkan menaikkan efisiensi *thermal* (η_{th}) secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi, pada derajat pengapian 26° sebelum TMA adalah sebesar 11,3% pada tekanan masuk 30 mbar, 6,6% pada tekanan masuk 50 mbar dan 10,8% pada tekanan masuk 70 mbar. Pada tekanan masuk 90 terjadi penurunan efisiensi sebesar 26,8%, sehingga efisiensi *thermal* (η_{th}) rata-rata maksimum terjadi pada tekanan 30 mbar. Sehingga pada tiap variasi derajat pengapian yang dilakukan, memiliki nilai efisiensi rata-rata terbesar terjadi pada tekanan masuk 30 mbar.

Pada gambar 4.10 menunjukkan bahwa efisiensi *thermal* (η_{th}) mengalami peningkatan seiring penambahan beban pada *engine*. Dari variasi derajat pengapian dan tekanan masuk bahan bakar LPG, dari gambar 4.10 menunjukkan efisiensi *thermal* (η_{th}) terbaik terjadi pada tekanan masuk 30 mbar dengan derajat pengapian sebesar 26° sebelum TMA. Dimana menaikkan efisiensi *thermal* (η_{th}) secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi, pada derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan masuk 30 mbar sebesar 11,3%. Hal ini menunjukkan bahwa besar derajat pengapian yang optimum untuk menghasilkan efisiensi



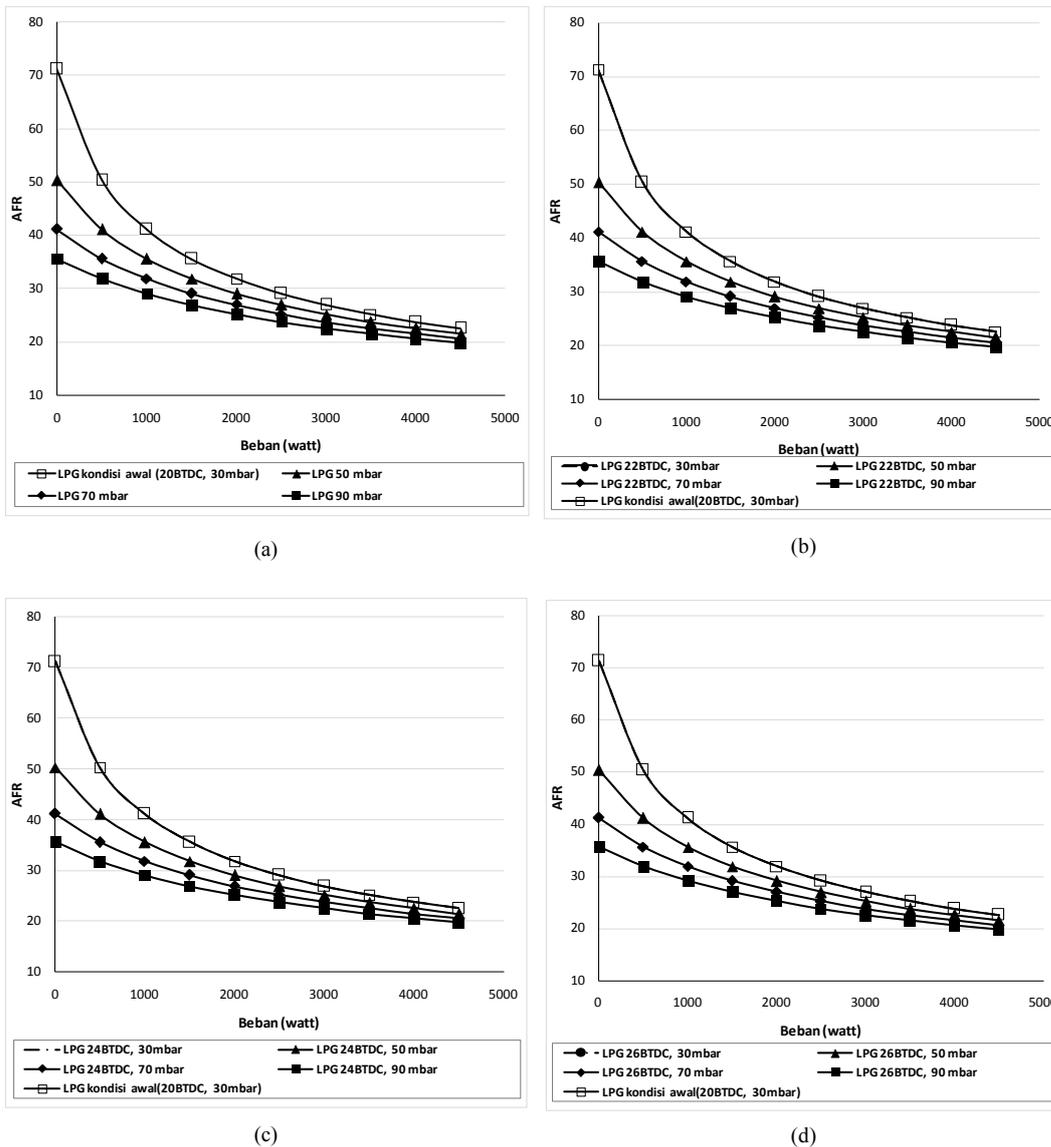
maksimal ketika menggunakan bahan bakar LPG sebesar 26° sebelum TMA. Naiknya efisiensi *thermal* (η_{th}) seiring dengan waktu pengapian yang semakin maju, hal ini disebabkan semakin banyak tersedianya waktu pembakaran sehingga campuran udara-bahan bakar akan terbakar lebih banyak dimana energi hasil pembakaran yang dihasilkan akan lebih besar. Energi hasil pembakaran yang besar juga didapatkan dari laju pembakaran yang cepat karena semakin banyak campuran udara dan bahan bakar yang dapat terbakar maka efisiensi *thermal* (η_{th}) akan bertambah.



Gambar 4.10 Grafik fungsi perbandingan efisiensi *thermal* (η_{th}) terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat *engine* berbahan bakar LPG.

4.3.6 Analisa Rasio Udara-Bahan Bakar (AFR)

AFR didefinisikan sebagai perbandingan antara udara dengan bahan bakar yang masuk ke ruang bakar. Besar kecilnya nilai AFR sangatlah bergantung pada banyaknya jumlah udara atau bahan bakar yang memasuki ruang bakar. LPG memiliki AFR *stoichiometry* sebesar 15,5 seperti yang terlihat pada tabel 2.4. Berikut ini adalah grafik AFR terhadap beban saat *engine* menggunakan bahan bakar LPG :



Gambar 4.11 Grafik AFR fungsi beban *engine* pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat *engine* berbahan bakar LPG.

Pada gambar 4.11 menunjukkan besarnya rasio udara-bahan bakar (AFR) turun seiring dengan penambahan beban. Hal ini disebabkan dengan meningkatnya beban *engine*, maka kebutuhan bahan bakar semakin meningkat. Peningkatan suplai bahan bakar seiring dengan kenaikan beban, yang pada pengoperasiannya ditunjukkan bahwa setiap beban lampu dinaikkan maka bukaan *pressure regulator* perlu ditambah untuk menjaga tekanan yang masuk ruang bakar tetap konstan. Pada saat *LPG engine-generator set* menggunakan bahan



bakar LPG belum divariasi menunjukkan besarnya AFR yaitu 22,5 pada saat *engine* menerima beban 4500 w att. Sedangkan AFR *stoikiometri* LPG sebesar 15,5 sehingga terjadi kenaikan AFR sebesar 45,4%. Saat dilakukan variasi tekanan masuk bahan bakar dengan derajat pengapian tidak dirubah atau konstan pada derajat pengapian 20° sebelum TMA, menunjukkan besarnya AFR yang mendekati kondisi *stoikiometri* yaitu sebesar 19,8 pada saat *engine* menerima beban 4500 w att dengan tekanan masuk bahan bakar 90 mbar, sedangkan AFR *stoikiometri* LPG sebesar 15,5 maka terjadi kenaikan sebesar 27,5%. Saat dilakukan variasi tekanan masuk bahan bakar dengan derajat pengapian tidak dirubah atau konstan pada derajat pengapian 22° sebelum TMA, menunjukkan bahwa besarnya AFR yang mendekati kondisi *stoikiometri* yaitu sebesar 19,8 pada saat *engine* menerima beban 4500 w att dengan tekanan masuk bahan bakar 90 mbar, sedangkan AFR *stoikiometri* LPG sebesar 15,5 maka terjadi kenaikan sebesar 27,5%. Saat dilakukan variasi tekanan masuk bahan bakar dengan derajat pengapian tidak dirubah atau konstan pada derajat pengapian 24° sebelum TMA, menunjukkan bahwa besarnya AFR yang mendekati kondisi *stoikiometri* yaitu sebesar 19,8 pada saat *engine* menerima beban 4500 w att dengan tekanan masuk bahan bakar 90 mbar, sedangkan AFR *stoikiometri* LPG sebesar 15,5 maka terjadi kenaikan sebesar 27,5%. Saat dilakukan variasi tekanan masuk bahan bakar dengan derajat pengapian tidak dirubah atau konstan pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, menunjukkan bahwa besarnya AFR yang mendekati kondisi *stoikiometri* yaitu sebesar 19,8 pada saat *engine* menerima beban 4000 w att dengan tekanan masuk bahan bakar 90 mbar, sedangkan AFR *stoikiometri* LPG sebesar 15,5 maka terjadi kenaikan sebesar 27,5%. Sehingga pada tiap variasi derajat pengapian yang dilakukan, memiliki AFR yang mendekati kondisi *stoikiometri* terjadi pada tekanan masuk 90 mbar.

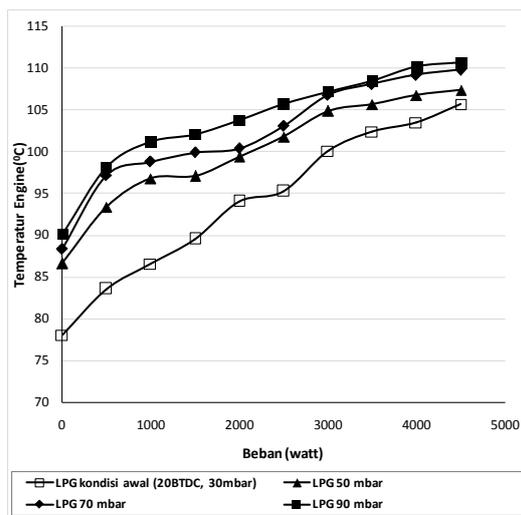
Secara umum nilai AFR mengalami penurunan seiring kenaikan beban, hal ini disebabkan pada saat beban tinggi dimana udara yang masuk ke ruang bakar rendah dan bahan bakar yang masuk keruang bakar tinggi sehingga menyebabkan rasio udara-bahan bakar (AFR) menjadi rendah hingga pada putaran tertentu. Semakin meningkatnya beban, membuat massa campuran yang



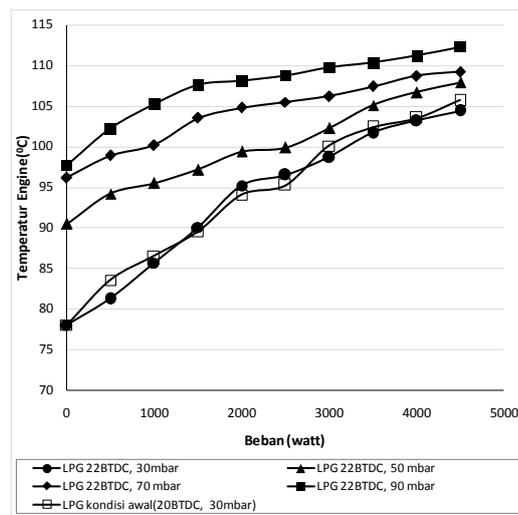
masuk ke ruang bakar semakin besar dan turbulensi aliran campuran juga lebih besar sehingga proses pembakaran dapat berlangsung lebih sempurna dan tekanan yang dihasilkan menjadi lebih besar. Namun, pada putaran tinggi kerugian gesekan (*friction lose*) dan adanya kenaikan temperatur *engine* yang cukup signifikan menyebabkan tekanan efektif rata-rata kembali mengalami penurunan. Kenaikan temperatur *engine* menyebabkan efisiensi volumetris *engine* menjadi berkurang.

4.3.7 Analisa Temperatur *Engine*

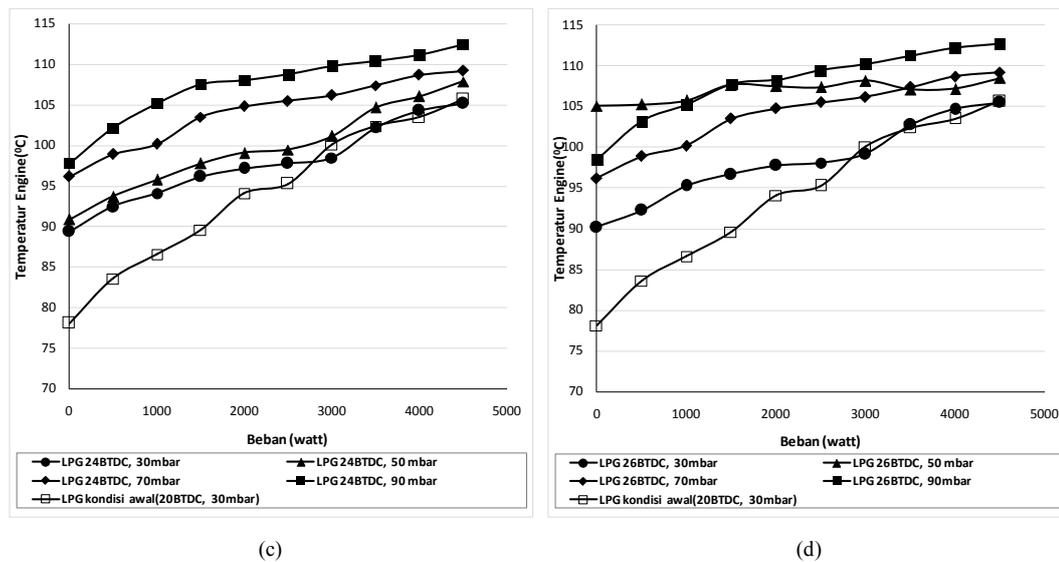
Temperatur *engine* menunjukkan temperatur pada ruang bakar yang diukur pada dinding *head* bagian luar. Pada Gambar 4.12 dapat dilihat bahwa temperatur *engine* naik seiring naiknya beban. Hal ini senada dengan penelitian yang dilakukan oleh Syarifudin (2013) yang menyatakan dengan naiknya pembebanan pada *engine* maka jumlah bahan bakar yang masuk kedalam ruang bakar semakin banyak, sehingga panas pembakaran yang dilepas ke dinding silinder juga semakin banyak dan menyebabkan temperatur *engine* juga meningkat. Berikut ini adalah grafik temperatur *engine* terhadap beban saat *engine* menggunakan bahan bakar LPG :



(a)



(b)



Gambar 4.12 Grafik temperatur *engine* fungsi beban *engine* pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat *engine* berbahan bakar LPG.

Pada gambar 4.12 menunjukkan temperatur *engine* mengalami kenaikan seiring dengan penambahan beban pada *engine*. Nilai temperatur *engine* saat LPG *engine-generator set* menggunakan bahan bakar LPG yang belum divariasi sebesar 105,7 °C saat diberi beban lampu 4500 watt. Saat dilakukan variasi tekanan masuk bahan bakar dengan derajat pengapian konstan, menunjukkan kenaikan nilai temperatur *engine* seiring peningkatan tekanan masuk bahan bakar. Gambar 4.12(a) menunjukkan peningkatan tekanan masuk dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 20° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur *engine* rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 90 mbar yaitu meningkat temperatur sebesar 10,5%. Gambar 4.12(b) menunjukkan peningkatan tekanan masuk dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 22° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur *engine* rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 90 mbar yaitu meningkat temperatur sebesar 11,3%. Gambar 4.12(c) menunjukkan peningkatan tekanan masuk dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 24° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur *engine* rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 90 mbar yaitu meningkat temperatur sebesar 14,3%.

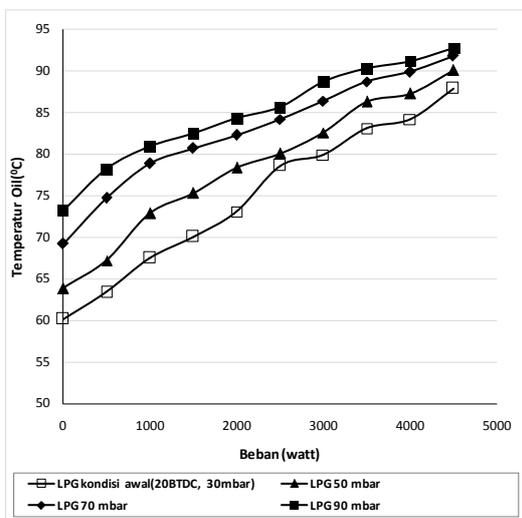


Gambar 4.12(d) menunjukkan peningkatan tekanan masuk dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur *engine* rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 90 mbar yaitu meningkat temperatur sebesar 14,9%.

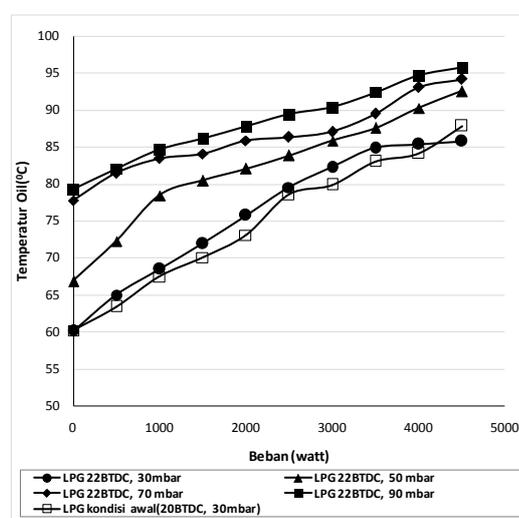
Sehingga pada variasi yang dilakukan, peningkatan temperatur rata-rata *engine* terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk 90 mbar dan derajat pengapian 26° sebelum TMA, yaitu sebesar 14,9%. Hal ini disebabkan dengan penambahan tekanan masuk maka semakin banyak jumlah bahan bakar yang dapat dibakar sehingga nilai temperatur *engine* semakin meningkat. Dan derajat pengapian yang semakin maju menyebabkan waktu pembakaran semakin lama sehingga energi yang dihasilkan semakin besar sekaligus menyebabkan temperatur *engine* meningkat seiring dengan pemajuan derajat pengapian.

4.3.8 Analisa Temperatur Oli Pelumas

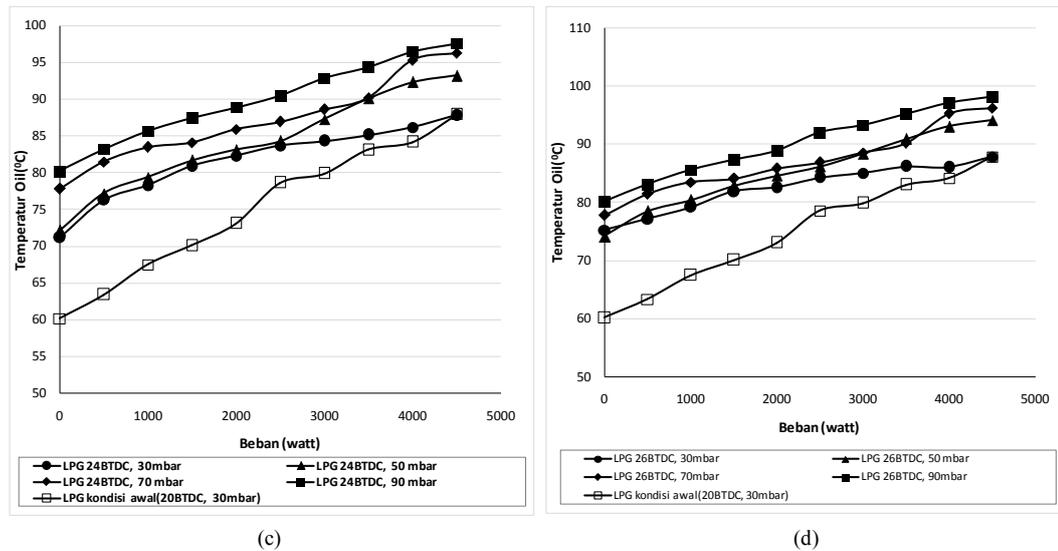
Oli pelumas merupakan cairan yang berfungsi untuk mengurangi terjadinya gesekan antar komponen mesin, selain itu juga oli berfungsi untuk mengurangi panas dari *engine*. Seiring dengan semakin meningkatnya temperatur *engine* karena kenaikan beban pada *LPG engine-generator set*, maka temperatur oli pelumas juga akan semakin meningkat. Berikut ini adalah grafik temperatur oli pelumas terhadap beban saat *engine* menggunakan bahan bakar LPG :



(a)



(b)



Gambar 4.13 Grafik temperatur oli fungsi beban *engine* pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat *engine* berbahan bakar LPG.

Pada gambar 4.13 menunjukkan bahwa secara umum, temperatur oli pelumas mengalami kenaikan seiring dengan penambahan beban pada *engine*. Nilai terbesar temperatur oli pelumas saat *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar LPG yang belum divariasikan sebesar 87,9 °C saat diberi beban lampu 4500 watt. Saat dilakukan variasi tekanan masuk bahan bakar dengan derajat pengapian tidak dirubah atau konstan, menunjukkan kenaikan nilai temperatur oli pelumas seiring peningkatan tekanan masuk bahan bakar. Pada gambar 4.13(a) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 20° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur oli pelumas rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 90 mbar yaitu meningkat temperatur sebesar 13,3%. Gambar 4.13(b) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 22° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur oli pelumas rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 90 mbar yaitu meningkat temperatur sebesar 18,0%. Pada gambar 4.13(c) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar

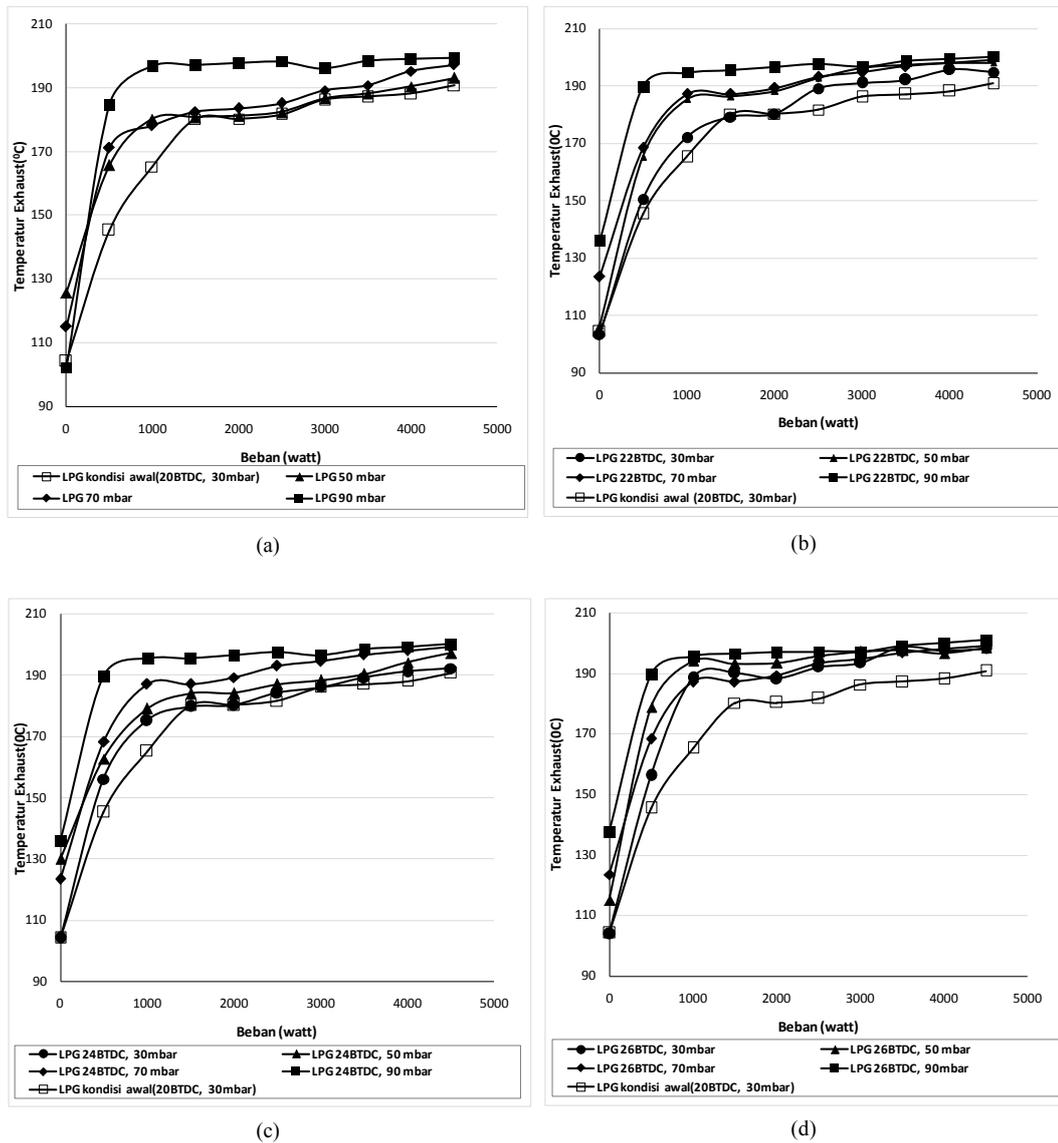


sampai 90 mbar pada derajat pengapian 24° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur oli pelumas rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 90 m bar yaitu meningkat temperatur sebesar 14,3%. Di gambar 4.13(d) juga menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 m bar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur oli pelumas rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 90 mbar yaitu meningkat temperatur sebesar 20,5%.

Sehingga pada variasi yang dilakukan yang memiliki peningkatan temperatur oli pelumas rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk 90 mbar dan derajat pengapian 26° sebelum TMA, yaitu sebesar 20,5%. Hal ini disebabkan dengan penambahan tekanan masuk maka semakin banyak jumlah bahan bakar yang dapat dibakar dan nilai temperatur *engine* semakin meningkat yang menyebabkan temperatur oli pelumas juga meningkat. Dan derajat pengapian yang semakin maju menyebabkan waktu pembakaran semakin lama sehingga energi yang dihasilkan semakin besar sekaligus menyebabkan temperatur oli meningkat seiring dengan pemajuan derajat pengapian.

4.3.9 Analisa Temperatur *Exhaust*

Temperatur *exhaust* merupakan temperatur yang timbul dari adanya proses pembakaran didalam ruang bakar, temperatur *exhaust* diukur pada lubang *exhaust* dengan menggunakan *thermocoupe*l. Secara umum grafik temperatur *exhaust* fungsi putaran *engine* menunjukkan semakin tinggi, hal ini senada dengan penelitian yang dilakukan oleh Syarifudin (2013) yang menyatakan bahwa grafik temperatur *exhaust* semakin meningkat seiring dengan putaran *engine*. Dengan naiknya putaran *engine* maka jumlah bahan bakar yang masuk ke ruang bakar semakin banyak, sehingga panas pembakaran yang timbul juga semakin besar dimana menyebabkan temperatur *exhaust* semakin meningkat. Berikut ini adalah grafik temperatur *exhaust* terhadap beban saat *engine* menggunakan bahan bakar LPG :



Gambar 4.14 Grafik temperatur *exhaust* fungsi beban *engine* pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat *engine* berbahan bakar LPG.

Pada gambar 4.14 menunjukkan bahwa secara umum, temperatur *exhaust* mengalami kenaikan seiring dengan penambahan beban pada *engine*. Nilai terbesar temperatur *exhaust* saat *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar LPG yang belum divariasi sebesar 190,8 °C saat diberi beban lampu 4500 watt. Saat dilakukan variasi tekanan masuk bahan bakar dengan derajat pengapian tidak dirubah atau konstan, menunjukkan kenaikan nilai temperatur oli pelumas



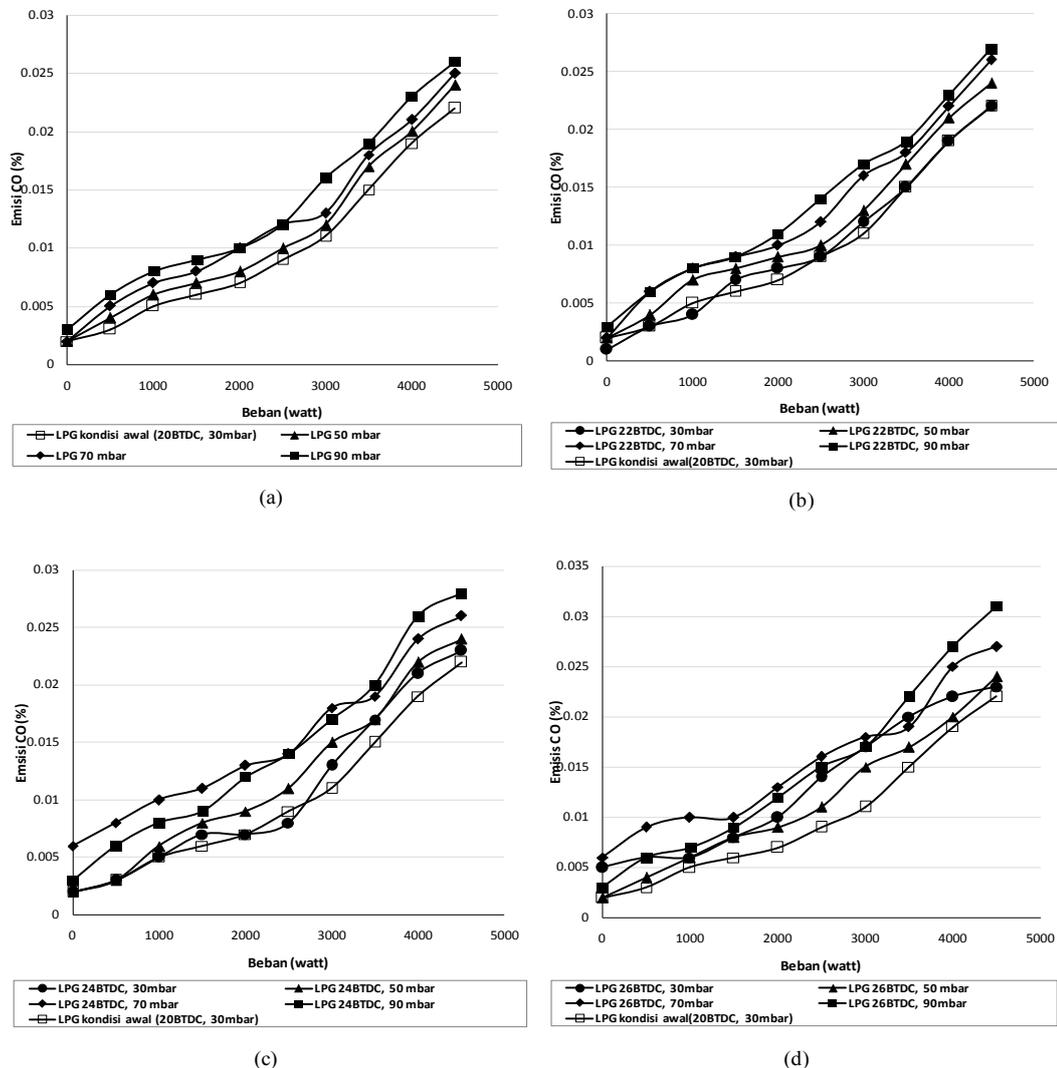
seiring peningkatan tekanan masuk bahan bakar. Gambar 4.14(a) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 20° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur *exhaust* rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 90 mbar yaitu meningkat temperatur sebesar 9,4%. Gambar 4.14(b) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 22° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur *exhaust* rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 90 mbar yaitu meningkat temperatur sebesar 11,4%. Gambar 4.14(c) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 24° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur *exhaust* rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 90 mbar yaitu meningkat temperatur sebesar 11,5%. Gambar 4.14(d) juga menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur *exhaust* rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 90 mbar yaitu meningkat temperatur sebesar 11,8%.

Sehingga pada variasi yang dilakukan yang memiliki peningkatan temperatur *exhaust* rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk 90 mbar dan derajat pengapian 26° sebelum TMA, yaitu sebesar 11,8%. Hal ini disebabkan dengan penambahan tekanan masuk maka semakin banyak jumlah bahan bakar yang dapat dibakar sehingga nilai temperatur *exhaust* semakin meningkat. Dan derajat pengapian yang semakin maju menyebabkan waktu pembakaran semakin lama sehingga energi yang dihasilkan semakin besar sekaligus menyebabkan temperatur *exhaust* meningkat seiring dengan pemajuan derajat pengapian.



4.3.10 Analisa Emisi karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida pada gas buang diakibatkan oleh pembakaran yang terjadi didalam ruang bakar yang tidak terbakar secara sempurna, dikarenakan kurangnya jumlah udara dalam campuran bahan bakar-udara yang masuk kedalam ruang bakar atau bisa juga disebabkan oleh waktu yang tersedia untuk menyelesaikan proses pembakaran. Emisi karbon monoksida juga sangat ditentukan oleh kualitas campuran, homogenitas dan perbandingan udara-bahan bakar. Kurangnya pasokan oksigen dalam campuran menyebabkan karbon tidak bereaksi dengan sempurna sehingga terbentuk CO.



Gambar 4.15 Grafik emisi CO fungsi beban *engine* pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat *engine* berbahan bakar LPG.



Pada gambar 4.15 merupakan grafik emisi CO fungsi beban *engine*, menunjukkan *trendline* grafik yang naik seiring kenaikan beban pada *engine*. Nilai emisi CO saat *engine* menggunakan bahan bakar LPG sebelum dilakukan variasi memiliki nilai rata-rata kandungan CO sebesar 0,0099%. Gambar 4.15(a) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 20° sebelum TMA, memiliki nilai rata-rata terbesar kandungan CO pada tekanan masuk bahan bakar 90 mbar yaitu sebesar 0,013%, sedangkan kenaikannya kandungan nilai CO rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi sebesar 33,3%. Gambar 4.15(b) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 22° sebelum TMA, memiliki nilai rata-rata terbesar kandungan CO pada tekanan masuk bahan bakar 90 mbar yaitu sebesar 0,0137%, sedangkan kenaikannya kandungan nilai CO rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi sebesar 38,4%. Gambar 4.15(c) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 24° sebelum TMA, memiliki nilai rata-rata terbesar kandungan CO pada tekanan masuk bahan bakar 90 mbar yaitu sebesar 0,015%, sedangkan kenaikannya kandungan nilai CO rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi sebesar 44,4%. Gambar 4.15(d) juga menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, memiliki nilai rata-rata terbesar kandungan CO pada tekanan masuk bahan bakar 90 mbar yaitu sebesar 0,015%, sedangkan kenaikannya kandungan nilai CO rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi sebesar 50,5%.

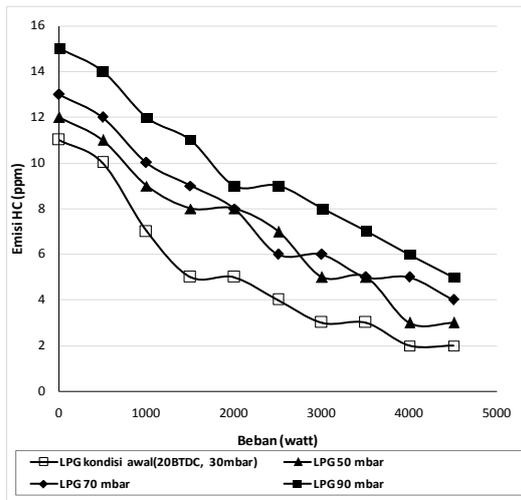
Sehingga pada variasi yang dilakukan yang memiliki peningkatan nilai emisi CO rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk 90 mbar dan derajat pengapian 26° sebelum TMA, yaitu sebesar 50,5%. Hal ini disebabkan dengan penambahan tekanan masuk maka semakin banyak jumlah bahan bakar yang dapat dibakar menyebabkan emisi CO semakin meningkat. Dan derajat pengapian yang semakin maju menyebabkan waktu pembakaran semakin lama sehingga energi yang dihasilkan semakin besar sekaligus menyebabkan emisi CO meningkat seiring dengan pemajuan derajat pengapian.



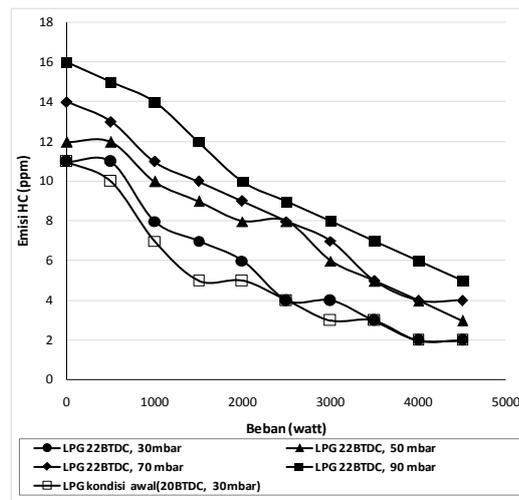
4.3.11 Analisa Emisi Hydro Carbon (HC)

Hidrokarbon yang tidak terbakar adalah akibat langsung dari ketidaksempurnaan pembakaran, yang erat kaitannya dengan desain mesin dan variabel operasi. Secara umum kadar emisi HC akan menurun seiring dengan meningkatnya putaran *engine* diakibatkan ketika putaran bertambah tinggi maka homogenitas campuran bahan bakar dan udara semakin baik, namun hal itu terjadi hingga putaran *engine* tertentu. Bila putaran bertambah cepat, maka waktu pembakaran akan semakin sempit sehingga kadar bahan bakar yang belum terbakar akan lebih besar lagi.

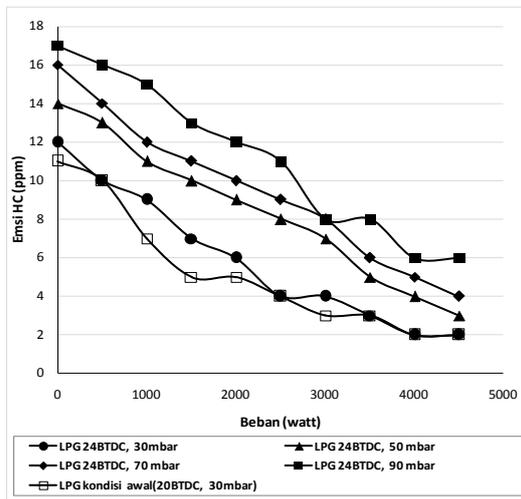
Pada gambar 4.16 merupakan grafik emisi HC fungsi beban *engine*, menunjukkan *trendline* grafik yang turun seiring kenaikan beban pada *engine*. Nilai emisi HC saat *engine* menggunakan bahan bakar LPG sebelum dilakukan variasi memiliki nilai rata-rata kandungan HC sebesar 5 ppm. Gambar 4.16(a) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 20° sebelum TMA, memiliki nilai rata-rata terbesar kandungan HC pada tekanan masuk bahan bakar 90 mbar yaitu sebesar 10 ppm, sedangkan kenaikannya kandungan nilai HC rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi sebesar 84,5%. Gambar 4.16 (b) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 22° sebelum TMA, memiliki nilai rata-rata terbesar kandungan HC pada tekanan masuk bahan bakar 90 mbar yaitu sebesar 10 ppm, sedangkan kenaikannya kandungan nilai HC rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi sebesar 96,2%. Gambar 4.16 (c) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 24° sebelum TMA, memiliki nilai rata-rata terbesar kandungan HC pada tekanan masuk bahan bakar 90 mbar yaitu sebesar 11 ppm, sedangkan kenaikannya kandungan nilai HC rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi sebesar 115%. Gambar 4.16 (d) juga menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 30 mbar sampai 90 mbar pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, memiliki nilai rata-rata terbesar kandungan HC pada tekanan masuk bahan bakar 90 mbar yaitu sebesar 12 ppm, sedangkan kenaikannya kandungan nilai HC rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi sebesar 128,8%.



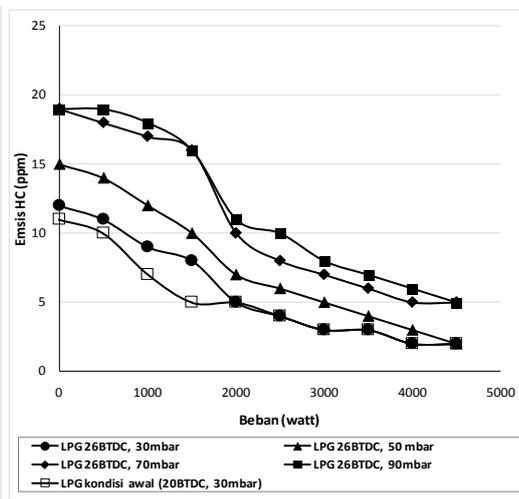
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.16 Grafik emisi HC fungsi beban *engine* pada tekanan masuk 30, 50, 70 dan 90 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20° , (b) 22° , (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat *engine* berbahan bakar LPG.

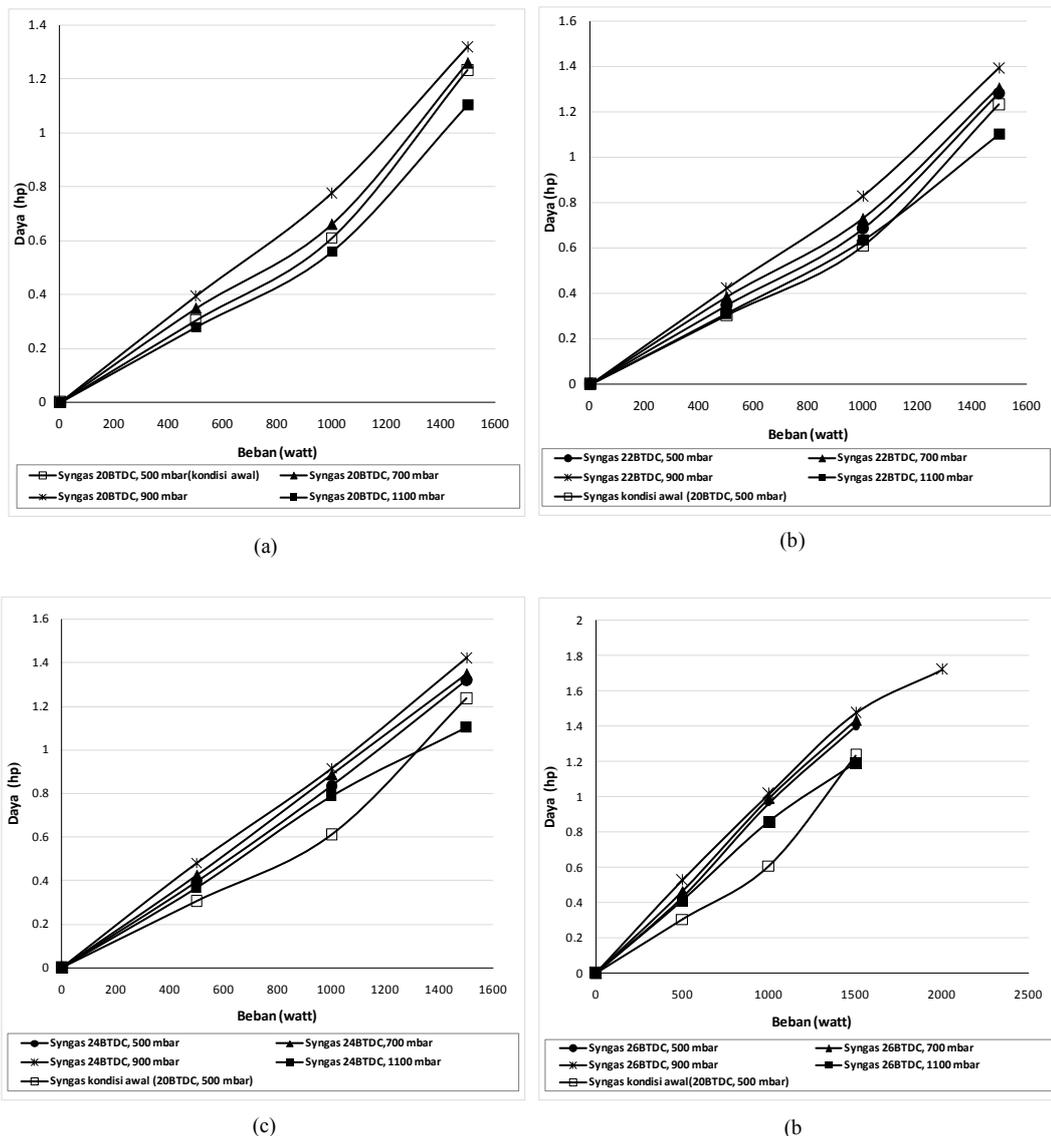
Pada variasi yang dilakukan, peningkatan nilai emisi HC rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk 90 mbar dan derajat pengapian 26° sebelum TMA, yaitu sebesar 128,8%. Hal ini disebabkan dengan penambahan tekanan masuk maka semakin banyak jumlah bahan bakar yang dapat dibakar menyebabkan peningkatan kandungan HC pada emisi. Dan derajat pengapian yang semakin maju menyebabkan waktu pembakaran semakin lama sehingga energi yang dihasilkan semakin besar sekaligus menyebabkan kandungan HC meningkat seiring dengan pemajuan derajat pengapian.



4.4 Analisa Maping Tekanan Masuk Dan Derajat Pengapian Dengan Bahan Bakar Syn-gas

4.4.1 Analisa Daya Poros

Serupa dengan analisa daya poros saat menggunakan bahan bakar LPG, dimana analisa daya merupakan ukuran kemampuan dari suatu *engine* untuk menghasilkan kerja yang berguna per satuan waktu yang dinyatakan dalam daya kuda (dk) atau *horse power* (hp).



Gambar 4.17 Grafik daya fungsi beban *engine* pada tekanan masuk 500, 700, 900 dan 1100 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat *engine* berbahan bakar *syn-gas*.



Pada gambar 4.17 secara umum menunjukkan bahwa daya (N_e) saat menggunakan bahan bakar *syn-gas* mengalami kenaikan seiring dengan penambahan beban. Dari proses pengujian *engine* yang telah dilakukan, menunjukkan bahwa pada setiap kenaikan beban lampu menyebabkan tekanan bahan bakar mengalami penurunan pada sisi keluaran *pressure regulator*. Padahal pada pengoperasiannya, tekanan bahan bakar yang masuk ruang bakar dijaga konstan. Sehingga pada setiap penambahan beban lampu, selalu dilakukan penambahan bukaan pada *pressure regulator* untuk menjaga tekanan yang masuk ruang bakar tidak berubah atau konstan. Hal ini menunjukkan bahwa setiap penambahan beban lampu, menyebabkan peningkatan kebutuhan suplai bahan bakar dimana ditunjukkan dengan selalu dilakukan penambahan bukaan *pressure regulator*. Sehingga daya poros mengalami peningkatan seiring dengan penambahan beban, karena energi yang diberikan oleh bahan bakar juga bertambah. Dengan penambahan tekanan masuk bahan bakar, maka semakin banyak juga bahan bakar yang dapat dibakar sehingga energi hasil proses pembakaran di ruang bakar bertambah besar. Nilai daya terbesar pada *LPG engine-generator set* ketika menggunakan bahan bakar *syn-gas* gasifikasi batubara sebelum divariasikan sebesar 1,23 hp saat diberi beban lampu 1500 watt. Pada gambar 4.17(a) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 20° sebelum TMA, memiliki nilai daya motor terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 900 mbar yaitu sebesar 1,32 hp saat *engine* diberi beban lampu 1500 watt. Gambar 4.17(b) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 22° sebelum TMA, memiliki nilai daya motor terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 900 mbar yaitu sebesar 1,39 hp saat *engine* diberi beban lampu 1500 watt. Pada gambar 4.17(c) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 24° sebelum TMA, memiliki nilai daya motor terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 900 mbar yaitu sebesar 1,42 hp saat *engine* diberi beban lampu 1500 watt. Di Gambar 4.17(d) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, memiliki nilai



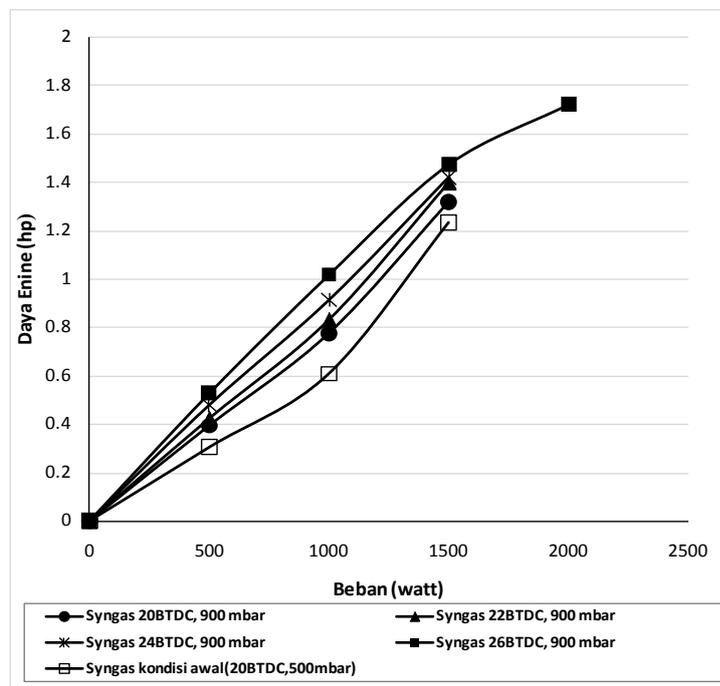
daya motor terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 900 m bar yaitu sebesar 1,72 hp saat *engine* diberi beban lampu 2000 watt.

Dari semua variasi derajat pengapian yang dilakukan, menunjukkan daya poros terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar *syn-gas* sebesar 900 mbar. Sehingga saat dilakukan variasi tekanan masuk bahan bakar pada derajat pengapian yang konstan, akan menyebabkan kenaikan nilai daya seiring dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar ke ruang bakar. Hal ini karena dengan peningkatan tekanan bahan bakar yang masuk ruang bakar, akan menyebabkan suplai bahan bakar ke ruang bakar juga meningkat. Sehingga daya poros mengalami peningkatan seiring peningkatan tekanan masuk bahan bakar.

Dari gambar 4.17 menunjukkan bahwa jika tekanan bahan bakar dari 900 mbar dinaikkan lagi, justru menyebabkan daya poros akan mengalami penurunan pada tekanan masuk 1100 mbar. Hal ini karena pada ruang bakar terlalu banyak bahan bakar dan proses pembakaran yang terjadi kurang sempurna sehingga energi yang dihasilkan dari proses pembakaran tersebut kurang maksimal. Secara keseluruhan kenaikan daya poros secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi, pada derajat pengapian 20° sebelum TMA adalah 5,5% pada tekanan masuk 700 mbar, 16% pada tekanan masuk 900 mbar, sedangkan saat tekanan masuk bahan bakar 1100 mbar terjadi penurunan 9,6%. Sehingga untuk derajat pengapian 20° sebelum TMA dengan variasi tekanan masuk bahan bakar, daya yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 900 mbar. Untuk menaikkan daya poros secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi, pada derajat pengapian 22° adalah 7,9% pada tekanan masuk 500 mbar 12,8% pada tekanan masuk 700 mbar, 23,3% pada tekanan masuk 900 mbar, sedangkan saat tekanan masuk bahan bakar 1100 mbar terjadi penurunan 4,5%. Sehingga untuk derajat pengapian 22° sebelum TMA dengan variasi tekanan masuk bahan bakar, daya yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 900 mbar. Untuk menaikkan daya poros secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi, pada derajat pengapian 24° adalah 18,7% pada tekanan masuk 500 mbar 23,5% pada tekanan masuk 700 mbar, 31% pada tekanan masuk 900 mbar dan 5% pada tekanan masuk 1100 mbar. Sehingga untuk derajat pengapian 24° sebelum TMA dengan variasi tekanan masuk bahan bakar, daya yang dihasilkan *engine*



maksimum terjadi pada tekanan 900 mbar. Kenaikkan daya poros secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi, pada derajat pengapian 26° adalah 30,1% pada tekanan masuk 500 mbar, 34,6% pada tekanan masuk 700 mbar, 76,5% pada tekanan masuk 900 mbar dan 14,9% pada tekanan masuk 1100 mbar. Sehingga untuk derajat pengapian 26° sebelum TMA dengan variasi tekanan masuk bahan bakar, daya yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 900 mbar. Sehingga pada tiap variasi derajat pengapian yang dilakukan, menunjukkan bahwa kenaikan daya rata-rata terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar *syn-gas* sebesar 900 mbar.



Gambar 4.18 Grafik perbandingan daya terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat *engine* berbahan bakar *syn-gas*.

Gambar 4.18 merupakan grafik perbandingan daya terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat *engine* berbahan bakar *syn-gas*, yang menunjukkan bahwa daya terbaik terjadi pada tekanan masuk 900 mbar dengan derajat pengapian sebesar 26° sebelum TMA. Dimana pada derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan masuk 900 m bar, kenaikan daya secara rata-rata terhadap kondisi sebelum divariasi adalah 76,5%. Hal ini

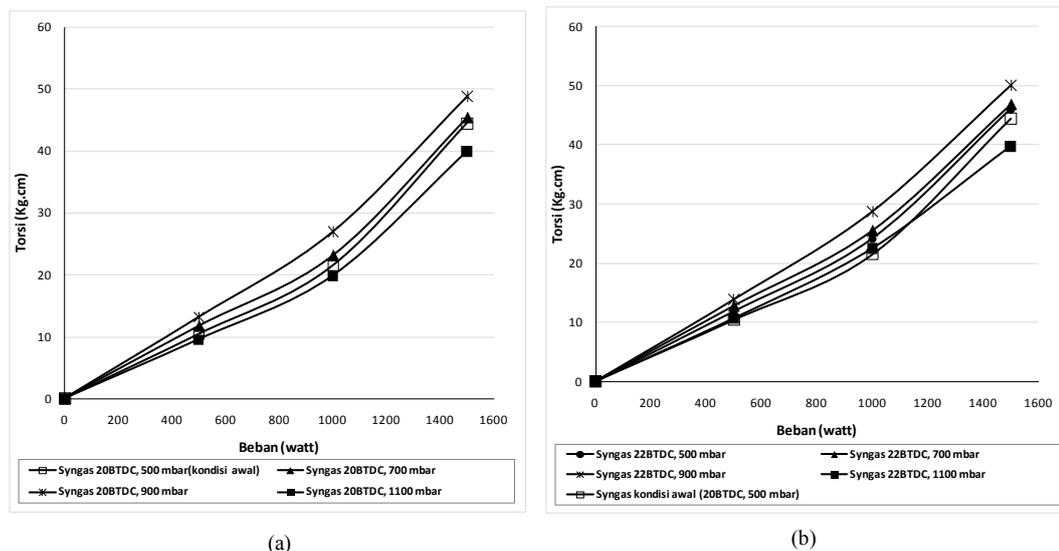


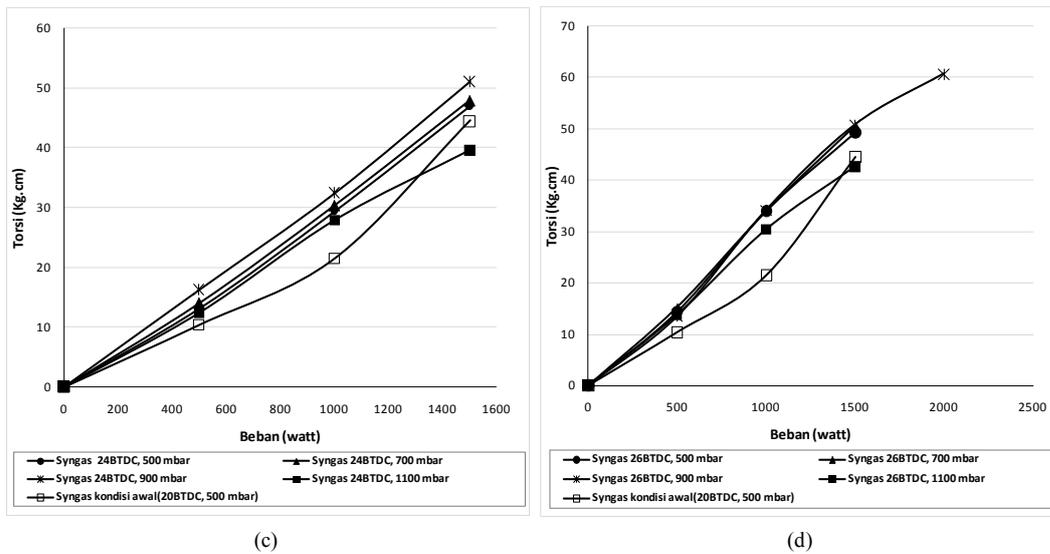
mengindikasikan bahwa semakin meningkatnya tekanan bahan bakar maka masa campuran bahan bakar yang masuk ke ruang bakar semakin besar sehingga energi atau kalor yang dapat dikonversi menjadi kerja akan semakin besar.

Dari variasi derajat pengapian yang dilakukan yaitu 20° sampai 26° sebelum TMA, menunjukkan daya meningkat seiring dengan derajat pengapian yang semakin cepat. Dimana derajat pengapian yang optimum untuk menghasilkan daya maksimal terjadi pada 26° sebelum TMA. Dengan derajat pengapian yang lebih maju maka semakin banyak jumlah udara-bahan bakar yang dapat dibakar sehingga energi pembakaran lebih besar. Energi hasil pembakaran yang besar juga didapatkan dari laju pembakaran yang cepat karena semakin banyak campuran udara dan bahan bakar yang dapat terbakar maka daya poros akan bertambah.

4.4.2 Analisa Torsi

Serupa dengan analisis torsi saat menggunakan bahan bakar LPG, dimana torsi adalah ukuran kemampuan *engine* untuk menghasilkan kerja. Dalam kenyataannya torsi dari *engine* dimanfaatkan untuk mengatasi hambatan sewaktu kendaraan terperosok atau untuk berakselerasi. Besarnya nilai kalor ditentukan oleh tekanan yang dihasilkan di dalam ruang bakar. Jika tekanan di dalam ruang bakar tinggi maka torsi yang dihasilkan juga tinggi. Berikut ini adalah grafik torsi terhadap beban saat *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* :





Gambar 4.19 Grafik torsi fungsi beban *engine* pada tekanan masuk 500, 700, 900 dan 1100 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat *engine* berbahan bakar *syn-gas*.

Pada gambar 4.19 menunjukkan bahwa torsi mengalami kenaikan seiring dengan penambahan beban. Hal ini disebabkan setiap penambahan beban lampu, menyebabkan peningkatan kebutuhan suplai bahan bakar yang ditunjukkan dengan selalu dilakukan penambahan bukaan *pressure regulator*. Semakin besar suplai bahan bakar, maka semakin besar nilai kalor yang masuk ke ruang bakar. Sehingga energi yang dihasilkan pada proses pembakaran di ruang bakar akan meningkat, dimana menyebabkan nilai torsi meningkat seiring penambahan beban. Dengan pengujian menggunakan pembebanan lampu didapatkan nilai torsi pada *LPG engine-generator set* ketika menggunakan bahan bakar *syn-gas* pada kondisi sebelum divariasikan sebesar 44,4 kg.cm saat diberi beban lampu 1500 watt. Saat dilakukan variasi tekanan masuk bahan bakar dengan derajat pengapian tidak dirubah atau konstan, menunjukkan kenaikan nilai torsi seiring peningkatan tekanan masuk bahan bakar. Gambar 4.19(a) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 20° sebelum TMA, memiliki nilai torsi terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 900 mbar yaitu sebesar 48,8 kg.cm saat *engine* diberi beban lampu 1500 watt. Gambar 4.19 (b) menunjukkan dengan peningkatan tekanan

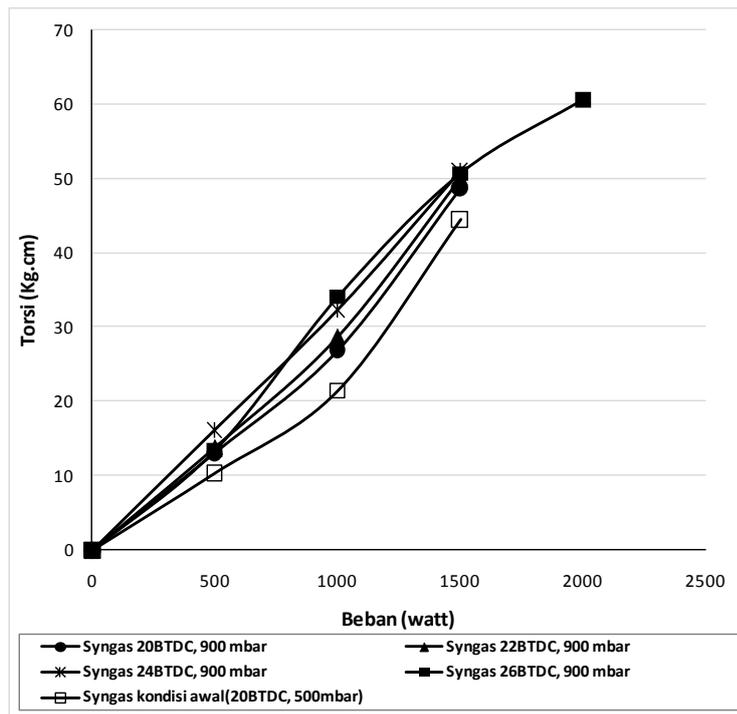


masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 22° sebelum TMA, memiliki nilai torsi terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 900 mbar yaitu sebesar 50,1 kg.cm saat *engine* diberi beban lampu 1500 watt. Gambar 4.19 (c) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 m bar sampai 1100 m bar pada derajat pengapian 24° sebelum TMA, memiliki nilai torsi terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 900 mbar yaitu sebesar 51 kg.cm saat *engine* diberi beban lampu 1500 watt. Gambar 4.19 (d) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, memiliki nilai torsi terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 900 mbar yaitu sebesar 60,7 kg.cm saat *engine* diberi beban lampu 2000 w att. Dari semua variasi derajat pengapian yang dilakukan, menunjukkan nilai torsi terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar sebesar 900 mbar. Dengan penambahan tekanan masuk maka semakin banyak jumlah bahan bakar yang dapat dibakar sehingga energi pembakaran lebih besar menyebabkan nilai torsi semakin meningkat.

Dari gambar 4.19 menunjukkan bahwa jika tekanan bahan bakar dari 900 mbar dinaikkan lagi justru nilai torsi akan mengalami penurunan. Hal ini karena pada ruang bakar terlalu banyak bahan bakar sehingga proses pembakaran yang terjadi kurang sempurna sehingga energi yang dihasilkan dari proses pembakaran tersebut kurang maksimal. Secara keseluruhan kenaikan torsi secara rata-rata terhadap kondisi belum variasi, pada derajat pengapian 20° sebelum TMA adalah 5% pada tekanan masuk 700 mbar, 16,4% pada tekanan masuk 900 mbar, sedangkan saat tekanan masuk bahan bakar 1100 mbar terjadi penurunan 9,2%. Sehingga untuk derajat pengapian 20° sebelum TMA dengan variasi tekanan masuk bahan bakar, torsi yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 900 mbar. Untuk kenaikan torsi secara rata-rata terhadap kondisi belum variasi, pada derajat pengapian 22° sebelum TMA adalah 7,4% pada tekanan masuk 500 mbar, 11,6% pada tekanan masuk 700 mbar, 21,3% pada tekanan masuk 900 mbar, sedangkan saat tekanan masuk bahan bakar 1100 mbar terjadi penurunan 4,3%. Sehingga untuk derajat pengapian 22° sebelum TMA dengan variasi tekanan masuk bahan bakar, torsi yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 900 mbar. Untuk kenaikan torsi secara rata-rata terhadap kondisi belum



variasi, pada derajat pengapian 24° sebelum TMA adalah 17,3% pada tekanan masuk 500 mbar, 20,8% pada tekanan masuk 700 mbar, 30,5% pada tekanan masuk 900 mbar dan 4,6% pada tekanan masuk 1100 mbar. Sehingga untuk derajat pengapian 24° sebelum TMA dengan variasi tekanan masuk bahan bakar, torsi yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 900 mbar. Kenaikkan torsi secara rata-rata terhadap kondisi belum variasi, pada derajat pengapian 26° sebelum TMA adalah 27,7% pada tekanan masuk 500 mbar, 30,7% pada tekanan masuk 700 mbar, 66,6% pada tekanan masuk 900 mbar dan 13,9% pada tekanan masuk 1100 mbar. Sehingga untuk derajat pengapian 26° sebelum TMA dengan variasi tekanan masuk bahan bakar, torsi yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 900 mbar. Sehingga pada setiap variasi derajat pengapian yang dilakukan, menunjukkan bahwa nilai kenaikan torsi secara rata-rata terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar *syn-gas* sebesar 900 mbar.



Gambar 4.20 Grafik perbandingan torsi terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat *engine* berbahan bakar *syngas*.

Gambar 4.20 merupakan grafik fungsi perbandingan torsi terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat *engine*

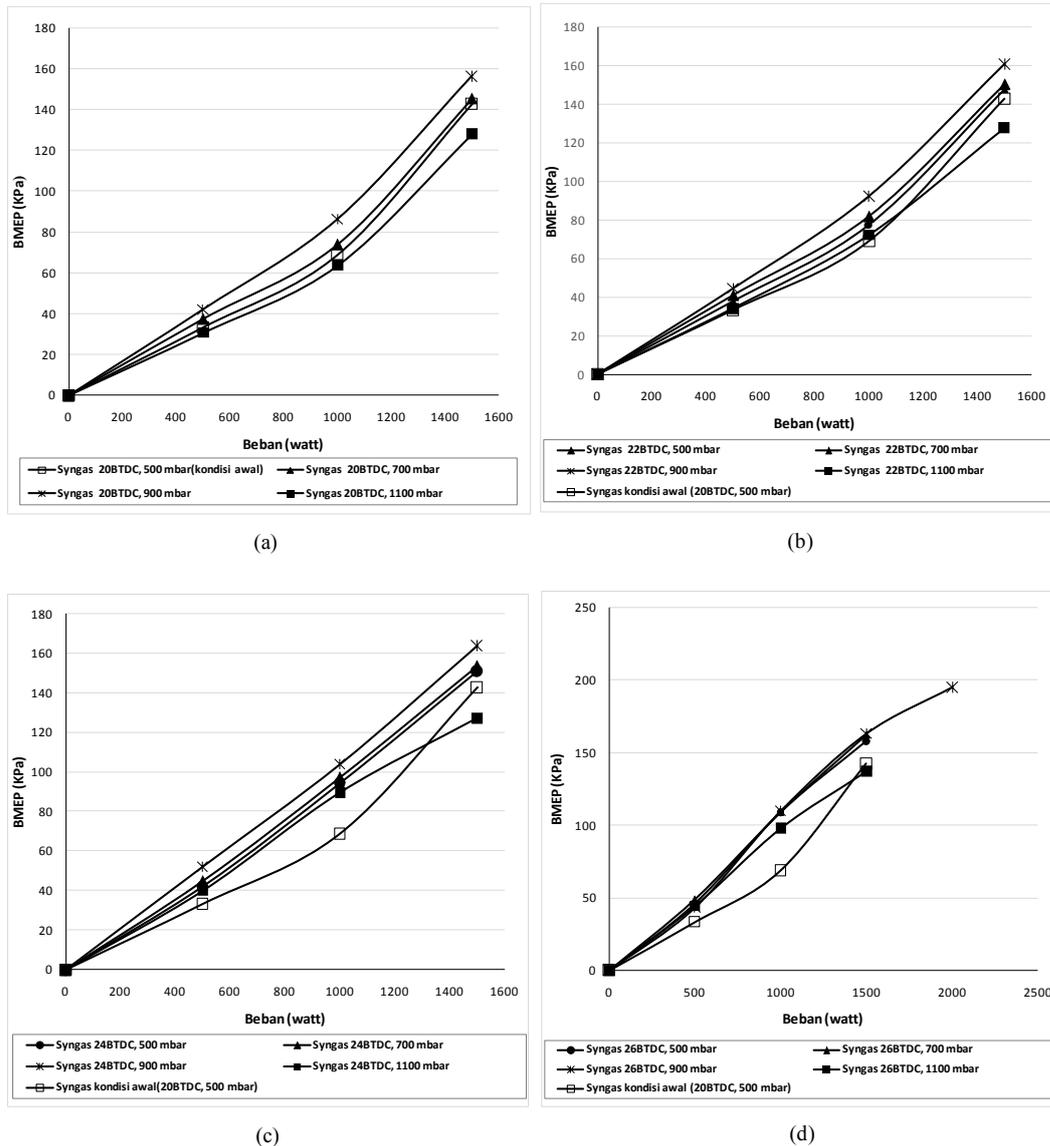


berbahan bakar *syn-gas*, yaitu menunjukkan bahwa torsi mengalami peningkatan seiring penambahan beban pada *engine*. Dari variasi derajat pengapian dan tekanan masuk bahan bakar LPG, pada gambar 4.20 menunjukkan bahwa torsi terbaik terjadi pada tekanan masuk 900 mbar dengan derajat pengapian sebesar 26° sebelum TMA. Dimana pada derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan masuk 900 m bar, kenaikan daya secara rata-rata terhadap kondisi sebelum divariasi adalah 66,6%. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin meningkatnya beban *engine* maka masa campuran bahan bakar yang masuk ke ruang bakar semakin besar sehingga energi atau kalor yang dapat dikonversi menjadi kerja akan semakin besar.

Dari variasi derajat pengapian yang dilakukan yaitu 20° sampai 26° sebelum TMA, menunjukkan peningkatan torsi seiring dengan derajat pengapian yang semakin besar. Dimana derajat pengapian yang optimum untuk menghasilkan torsi maksimal terjadi pada 26° sebelum TMA. Naiknya torsi seiring dengan waktu pengapian yang semakin maju, hal ini disebabkan semakin banyak tersedianya waktu pembakaran sehingga campuran udara-bahan bakar akan terbakar lebih banyak sehingga energi hasil pembakaran yang dihasilkan akan lebih besar. Energi hasil pembakaran yang besar juga didapatkan dari laju pembakaran yang cepat karena semakin banyak campuran udara dan bahan bakar yang dapat terbakar maka torsi akan bertambah.

4.4.3 Analisa Tekanan Efektif Rata-rata (Bmep)

Serupa saat menggunakan bahan bakar LPG, dimana tekanan efektif rata-rata (Bmep) didefinisikan dengan tekanan tetap rata-rata teoritis yang bekerja sepanjang langkah kerja piston. Besarnya tekanan yang dialami piston berubah-ubah sepanjang langkah piston tersebut. Jika diambil tekanan berharga konstan yang bekerja pada piston dan menghasilkan kerja yang sama, maka tekanan tersebut merupakan tekanan efektif rata-rata piston. Torsi dari suatu *engine* sangat dipengaruhi oleh bmep yang dapat dihasilkan dari *engine* tersebut, sehingga grafik bmep identik dengan grafik torsi. Berikut ini adalah grafik bmep terhadap beban saat *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* :



Gambar 4.21 Grafik bmep fungsi beban *engine* pada tekanan masuk 500, 700, 900 dan 1100 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat *engine* berbahan bakar *syngas*.

Dari gambar 4.21 menunjukkan grafik bmep serupa dengan grafik daya poros dan torsi. Secara umum, bmep mengalami kenaikan seiring dengan penambahan beban pada *engine*. Hal ini disebabkan setiap penambahan beban lampu, menyebabkan peningkatan kebutuhan suplai bahan bakar yang ditunjukkan dengan selalu dilakukan penambahan bukaan *pressure regulator*. Semakin besar suplai bahan bakar, maka semakin besar nilai kalor yang masuk ke



ruang bakar. Sehingga energi yang dihasilkan oleh proses pembakaran di ruang bakar akan meningkat, dimana menyebabkan nilai bmep meningkat seiring penambahan beban. Besar bmep saat *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *syn-gas* gasifikasi batubara yang belum divariasi sebesar 35,7 kPa saat diberi beban lampu 1500 watt. Saat dilakukan variasi tekanan masuk bahan bakar dengan derajat pengapian tidak dirubah atau konstan, menunjukkan kenaikan nilai bmep seiring peningkatan tekanan masuk bahan bakar. Pada gambar 4.21(a) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 20° sebelum TMA, memiliki nilai Bmep terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 900 mbar yaitu sebesar 156,88 kPa saat *engine* diberi beban lampu 1500 watt. Gambar 4.21 (b) menunjukkan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 22° sebelum TMA, memiliki nilai Bmep terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 900 mbar yaitu sebesar 160, 87 kPa saat *engine* diberi beban lampu 1500 w att. Gambar 4.21 (c) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 24° sebelum TMA, memiliki nilai Bmep terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 900 mbar yaitu sebesar 164,04 kPa saat *engine* diberi beban lampu 1500 watt. Gambar 4.21 (d) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 m bar sampai 1100 m bar pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, memiliki nilai Bmep terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 900 mbar yaitu sebesar 195,08 kPa saat *engine* diberi beban lampu 2000 w att. Dari semua variasi derajat pengapian yang dilakukan, menunjukkan bahwa nilai bmep terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar *syn-gas* sebesar 900 m bar. Dengan penambahan tekanan masuk maka semakin banyak jumlah bahan bakar yang dapat dibakar sehingga energi pembakaran lebih besar sehingga nilai torsi semakin meningkat.

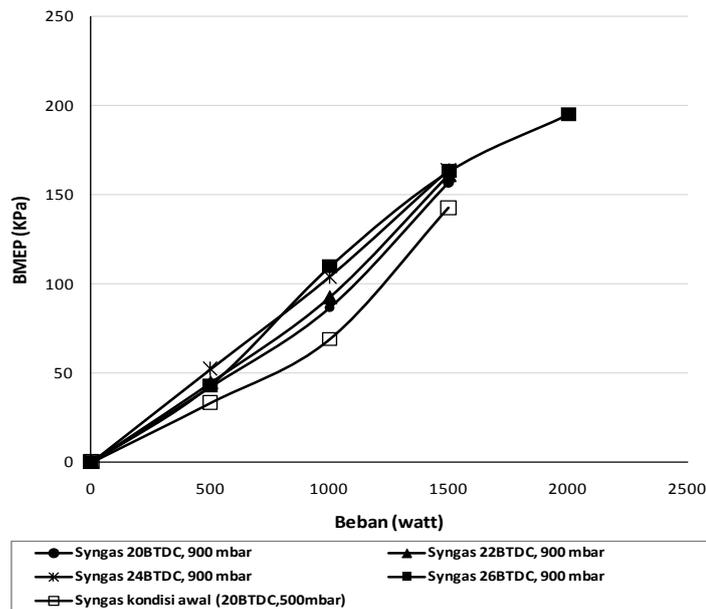
Dari gambar 4.21 menunjukkan bahwa jika tekanan bahan bakar dari 900 mbar di naikkan lagi, justru nilai Bmep akan mengalami penurunan. Hal ini karena pada ruang bakar terlalu banyak bahan bakar sehingga proses pembakaran yang terjadi kurang sempurna sehingga energi yang dihasilkan dari proses pembakaran tersebut kurang maksimal. Secara keseluruhan kenaikan Bmep



secara rata-rata terhadap kondisi belum variasi, pada derajat pengapian 20° sebelum TMA adalah 5% pada tekanan masuk 700 mbar, 16,4% pada tekanan masuk 900 mbar, sedangkan saat tekanan masuk bahan bakar 1100 mbar terjadi penurunan 9,2%. Sehingga untuk derajat pengapian 20° sebelum TMA dengan variasi tekanan masuk bahan bakar, Bmep yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 900 mbar. Untuk menaikkan Bmep secara rata-rata terhadap kondisi belum variasi, pada derajat pengapian 22° sebelum TMA adalah 7,4% pada tekanan masuk 500 mbar, 11,6% pada tekanan masuk 700 mbar, 21,3% pada tekanan masuk 900 mbar, sedangkan saat tekanan masuk bahan bakar 1100 mbar terjadi penurunan 4,3%. Sehingga untuk derajat pengapian 22° sebelum TMA dengan variasi tekanan masuk bahan bakar, bmep yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 900 mbar. Dan menaikkan Bmep secara rata-rata terhadap kondisi belum variasi, pada derajat pengapian 24° sebelum TMA adalah 17,3% pada tekanan masuk 500 mbar, 20,8% pada tekanan masuk 700 mbar, 30,5% pada tekanan masuk 900 mbar dan 4,6% pada tekanan masuk 1100 mbar. Sehingga untuk derajat pengapian 24° sebelum TMA dengan variasi tekanan masuk bahan bakar, Bmep yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 900 mbar. Untuk menaikkan Bmep secara rata-rata terhadap kondisi belum variasi, pada derajat pengapian 24° sebelum TMA adalah 27,7% pada tekanan masuk 500 mbar, 30,7% pada tekanan masuk 700 mbar, 66,6% pada tekanan masuk 900 mbar dan 13,9% pada tekanan masuk 1100 mbar. Sehingga untuk derajat pengapian 26° sebelum TMA dengan variasi tekanan masuk bahan bakar, Bmep yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 900 mbar. Sehingga pada tiap variasi derajat pengapian yang dilakukan, menunjukkan nilai kenaikan bkep secara rata-rata terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar *syn-gas* sebesar 900 mbar.

Gambar 4.22 merupakan grafik fungsi perbandingan bkep terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat *engine* berbahan bakar *syn-gas*, yaitu menunjukkan bahwa bkep mengalami peningkatan seiring penambahan beban pada *engine*. Dari variasi derajat pengapian dan tekanan masuk bahan bakar *syn-gas*, gambar 4.22 menunjukkan

bahwa bmep terbaik terjadi pada tekanan masuk 900 mbar dengan derajat pengapian sebesar 26° sebelum TMA. Dimana kenaikan bmep secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi pada derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan masuk 900 mbar sebesar 66,6%. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin meningkatnya beban *engine* maka masa campuran bahan bakar yang masuk ke ruang bakar semakin besar sehingga energi atau kalor yang dapat dikonversi menjadi kerja akan semakin besar.



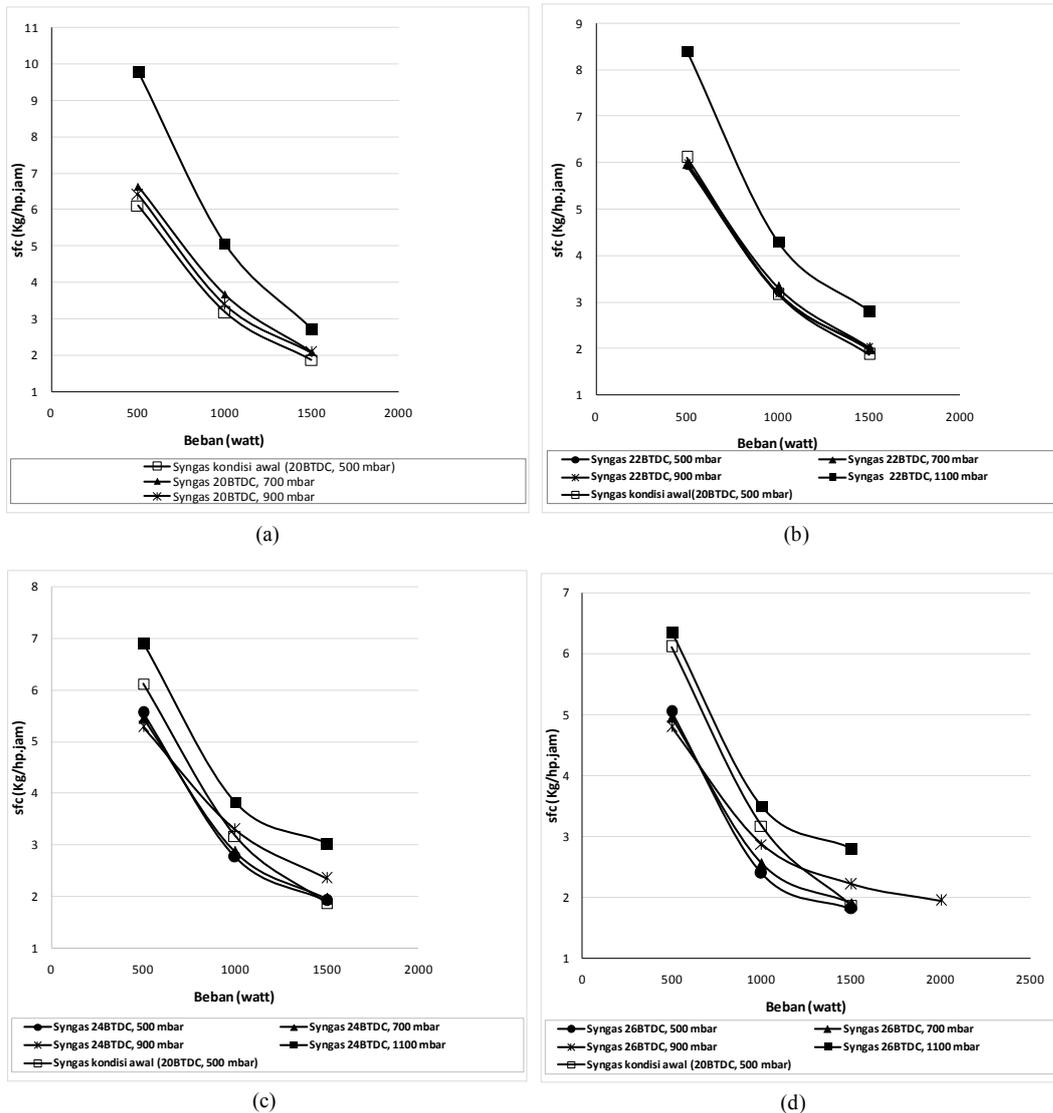
Gambar 4.22 Grafik perbandingan bmep terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat *engine* berbahan bakar *syn-gas*.

Dari variasi derajat pengapian dari 20° sampai 26° sebelum TMA, menunjukkan peningkatan bmep seiring dengan pemajuan derajat pengapian. Dimana derajat pengapian optimum untuk menghasilkan bmep optimum terjadi pada 26° sebelum TMA. Naiknya Bmep seiring dengan waktu pengapian yang semakin maju, hal ini disebabkan semakin banyak tersedianya waktu pembakaran sehingga campuran udara-bahan bakar akan terbakar lebih banyak dan energi hasil pembakaran yang dihasilkan akan lebih besar. Energi hasil pembakaran yang besar juga didapatkan dari laju pembakaran yang cepat karena semakin banyak campuran udara dan bahan bakar yang dapat terbakar maka bmep akan bertambah.



4.4.4 Analisa *Specific Fuel Consumption* (Sfc)

Serupa dengan saat menggunakan bahan bakar LPG, dimana nilai *Specific fuel consumption* (sfc) didefinisikan sebagai laju aliran bahan bakar untuk memperoleh daya efektif. Besar kecilnya sfc bergantung pada sempurna atau tidaknya campuran udara dan bahan bakar yang terbakar di dalam ruang bakar. Berikut ini adalah grafik sfc terhadap beban saat *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* :



Gambar 4.23 Grafik sfc fungsi beban *engine* pada tekanan masuk 500, 700, 900 dan 1100 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20° , (b) 22° , (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat *engine* berbahan bakar *syn-gas*.

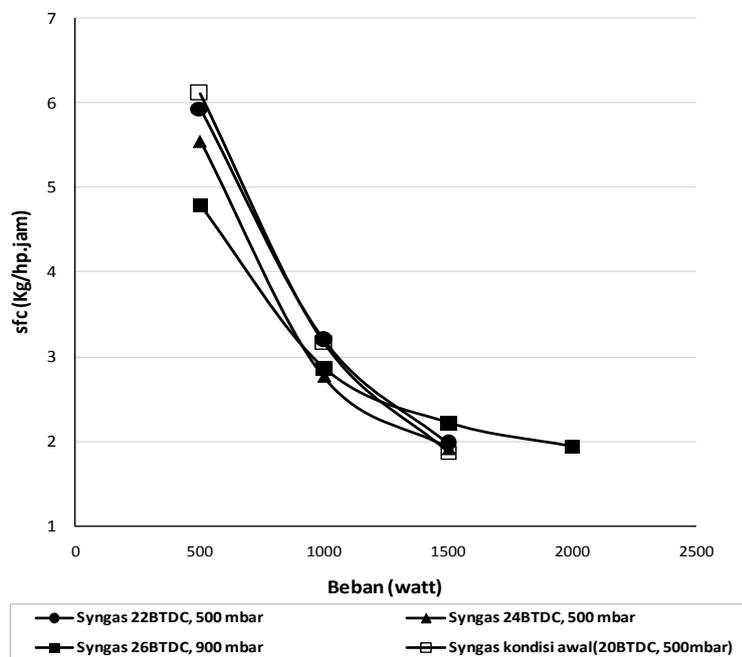


Pada gambar 4.23 secara umum menunjukkan bahwa Sfc semakin turun seiring dengan penambahan beban yang semakin tinggi, hal ini karena semakin besar beban maka *engine* akan semakin banyak memerlukan konsumsi bahan bakar pada putaran motor yang konstan. Gambar 4.23(a) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 20° sebelum TMA, memiliki nilai Sfc terkecil terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 500 mbar yaitu sebesar 1,871 kg/hp.jam saat *engine* diberi beban lampu 1500 watt. Gambar 4.23(b) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 m bar sampai 1100 m bar pada derajat pengapian 22° sebelum TMA, memiliki nilai Sfc terkecil terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 500 mbar yaitu sebesar 1,971 kg/hp.jam saat *engine* diberi beban lampu 1500 w att. Gambar 4.23(c) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 m bar sampai 1100 m bar pada derajat pengapian 24° sebelum TMA, memiliki nilai Sfc terkecil terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 500 mbar yaitu sebesar 1,916 kg/hp.jam saat *engine* diberi beban lampu 1500 watt. Gambar 4.23(d) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 m bar sampai 1100 m bar pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, memiliki Sfc terkecil terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 500 mbar yaitu sebesar 1,812 kg/hp.jam saat *engine* diberi beban lampu 1500 w att. Dari semua variasi derajat pengapian yang dilakukan, menunjukkan bahwa nilai Sfc terkecil terjadi pada tekanan masuk bahan bakar sebesar 500 mbar.

Dari gambar 4.23 menunjukkan bahwa jika tekanan bahan bakar dari 900 mbar dinaikkan lagi, justru Sfc akan mengalami kenaikan. Hal ini karena pada ruang bakar terlalu banyak bahan bakar yang masuk, sedangkan daya yang dihasilkan tidak sebanding atau tidak meningkat dengan kenaikan suplai bahan bakar tersebut. Secara keseluruhan terjadi kenaikan Sfc secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi, pada derajat pengapian 20° sebelum TMA adalah 11,08 % pada tekanan masuk 700 mbar, 6,4% pada tekanan masuk 900 mbar dan 57,6 % pada tekanan masuk 1100 m bar. Sehingga secara keseluruhan Sfc rata-rata terkecil terjadi pada tekanan masuk 500 mbar Untuk kenaikan Sfc secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi, pada derajat pengapian 22° sebelum TMA



adalah 1,5 % pada tekanan masuk 700 mbar, 0,185 pada tekanan masuk 900 mbar dan 39,2 % pada tekanan masuk 1100 m bar, tetapi terjadi penurunan pada tekanan 500 m bar sebesar 0,5%. Sehingga secara keseluruhan Sfc rata-rata terkecil terjadi pada tekanan masuk 500 mbar. Sedangkan penurunan Sfc secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi, pada derajat pengapian 24° sebelum TMA adalah 8,3% pada tekanan masuk 500 mbar, 7,87 % pada tekanan masuk 700 mbar dan 2,06% pada tekanan masuk 900 mbar, tetapi terjadi kenaikan 23,4 % pada tekanan masuk 1100 m bar. Sehingga secara keseluruhan Sfc rata-rata terkecil terjadi pada tekanan masuk 500 mbar. Dan penurunan Sfc secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi, pada derajat pengapian 26° sebelum TMA adalah 17,08 % pada tekanan masuk 500 mbar, 15,6 % pada tekanan masuk 700 mbar, 20,5% pada tekanan masuk 900 m bar, tetapi terjadi kenaikan sebesar 13,4 % pada tekanan masuk 1100 mbar. Sehingga secara keseluruhan Sfc rata-rata terkecil terjadi pada tekanan masuk 900 mbar. Sehingga pada setiap variasi derajat pengapian yang dilakukan, memiliki nilai Sfc rata-rata terkecil terjadi pada tekanan masuk 500 mbar dan tekanan 900 mbar.



Gambar 4.24 Grafik perbandingan sfc terbaik (rata-rata terkecil) terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat *engine* berbahan bakar *syn-gas*.

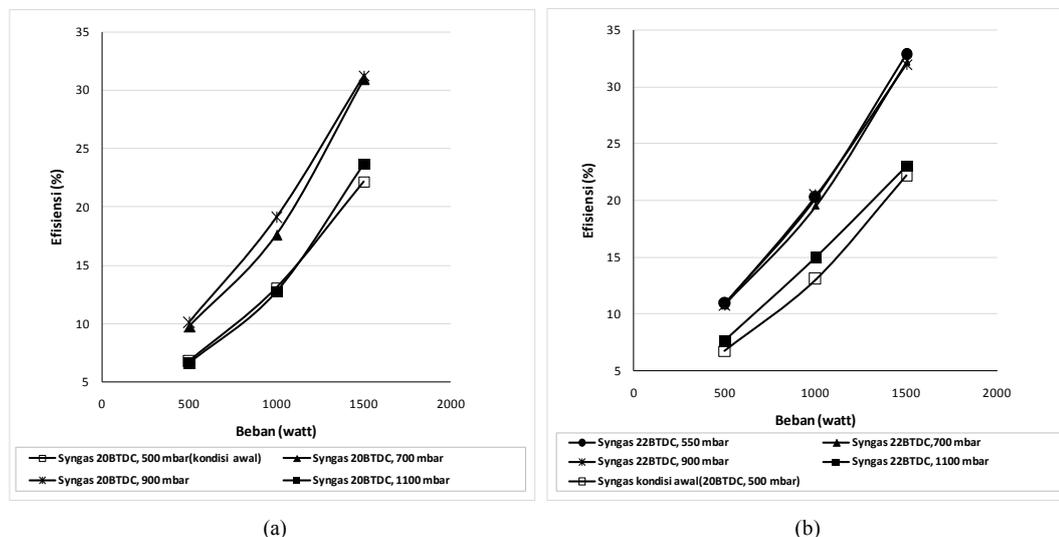


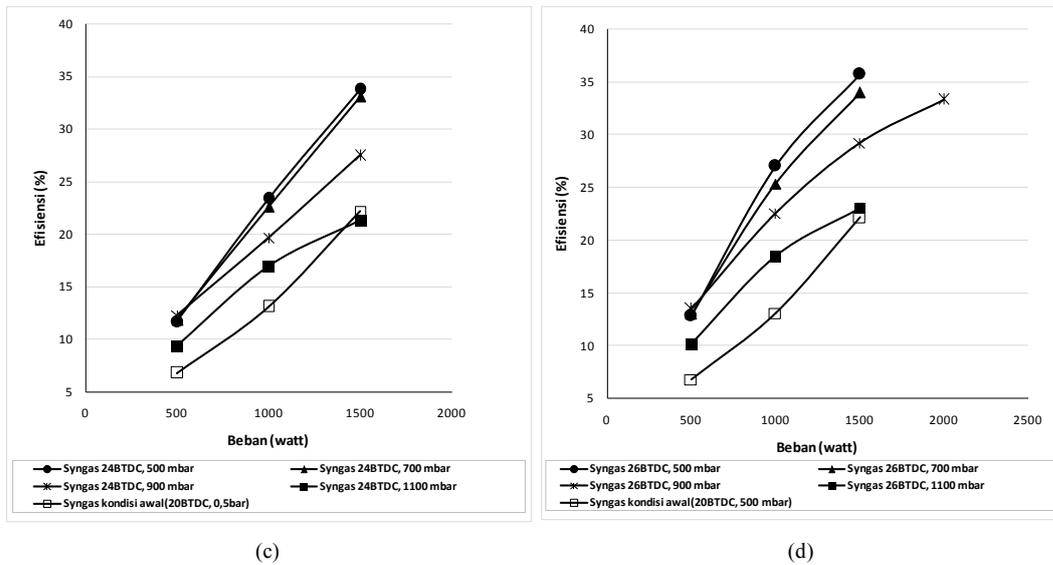
Pada gambar 4.24 menunjukkan bahwa Sfc mengalami penurunan seiring penambahan beban pada *engine*. Dari variasi derajat pengapian dan tekanan masuk bahan bakar *syn-gas*, menunjukkan bahwa Sfc rata-rata terkecil terjadi pada tekanan masuk 900 m bar dengan derajat pengapian 26° sebelum TMA. Dimana penurunan nilai Sfc rata-rata terhadap kondisi belum divariasikan, pada derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan masuk 900 mbar sebesar 20,5%.

Dari variasi derajat pengapian 20° sampai 26° sebelum TMA, menunjukkan penurunan sfc seiring dengan derajat pengapian yang semakin maju. Dimana derajat pengapian optimum untuk menghasilkan Sfc maksimal terjadi pada 26° sebelum TMA. Turunnya Sfc seiring dengan waktu pengapian yang semakin maju, disebabkan semakin banyak tersedianya waktu pembakaran sehingga campuran udara-bahan bakar akan terbakar lebih banyak sehingga energi hasil pembakaran yang dihasilkan akan lebih besar. Energi hasil pembakaran yang besar juga didapatkan dari laju pembakaran yang cepat karena semakin banyak campuran udara dan bahan bakar yang dapat terbakar.

4.4.5 Analisa Efisiensi *Thermal* (η_{th})

Serupa dengan saat menggunakan bahan bakar LPG, dimana analisa efisiensi *thermal* (η_{th}) adalah ukuran besarnya pemanfaatan energi panas yang terimpan dalam bahan bakar untuk diubah menjadi daya efektif oleh motor pembakaran dalam.





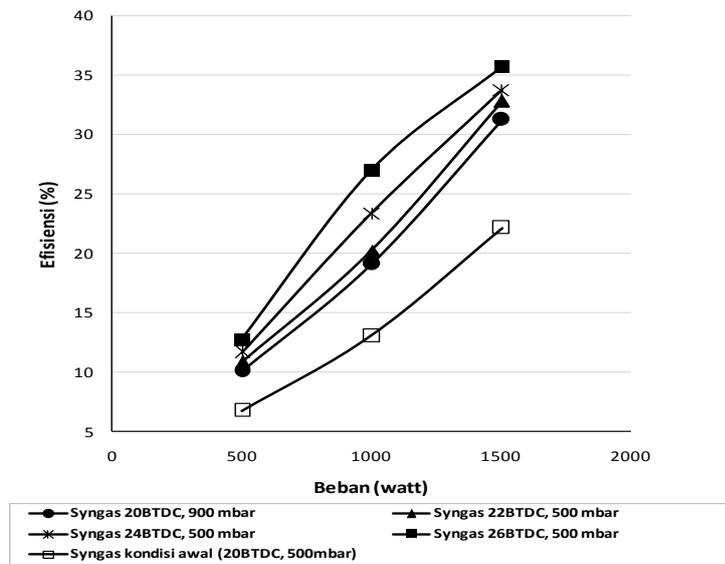
Gambar 4.25 Grafik efesiensi fungsi beban *engine* pada tekanan masuk 500, 700, 900 dan 1100 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat *engine* berbahan bakar *syn-gas*.

Dari gambar 4.25 menunjukkan bahwa efisiensi *thermal* (η_{th}) naik seiring dengan penambahan beban. Besar efisiensi *thermal* (η_{th}) maksimum pada *LPG engine-generator set* saat belum divariasikan dengan menggunakan bahan bakar *syn-gas* mencapai 22,16% pada beban 1500 w att. Sedangkan ketika dilakukan variasi tekanan masuk bahan bakar dengan derajat pengapian tidak dirubah atau konstan, menunjukkan kenaikan efisiensi *thermal* (η_{th}) seiring peningkatan tekanan masuk bahan bakar. Pada gambar 4.25(a) menunjukkan dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 20° sebelum TMA, memiliki nilai efisiensi *thermal* (η_{th}) terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 900 mbar yaitu sebesar 31,25% saat *engine* diberi beban lampu 1500 watt. Gambar 4.25 (b) menunjukkan bahwa dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 22° sebelum TMA, memiliki nilai efisiensi *thermal* (η_{th}) terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 500 mbar yaitu sebesar 32,8% saat *engine* diberi beban lampu 1500 watt. Gambar 4.25 (c) menunjukkan bahwa dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 24° sebelum TMA, memiliki nilai efisiensi *thermal* (η_{th})



terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 500 mbar yaitu sebesar 33,7% saat *engine* diberi beban lampu 1500 watt. Gambar 4.25 (d) menunjukkan bahwa dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, memiliki nilai efisiensi *thermal* (η_{th}) terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar 500 mbar yaitu sebesar 35,7% saat *engine* diberi beban lampu 1500 watt. Dari semua variasi yang dilakukan, menunjukkan bahwa nilai efisiensi terbesar terjadi pada tekanan masuk 500 mbar dan derajat pengapian 24° sebelum TMA yaitu sebesar 33,7%.

Secara keseluruhan kenaikan efisiensi *thermal* (η_{th}) secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi, pada derajat pengapian 20° sebelum TMA adalah 38,7% pada tekanan masuk 700 mbar, 43,8% pada tekanan masuk 900 mbar dan 2,5% pada tekanan masuk 1100 mbar. Sehingga efisiensi *thermal* (η_{th}) yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 900 mbar. Untuk kenaikan efisiensi *thermal* (η_{th}) secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi, pada derajat pengapian 22° sebelum TMA adalah 52,2% pada tekanan masuk 500 mbar, 48,6% pada tekanan masuk 700 mbar, 50,3% pada tekanan masuk 900 mbar dan 8,8% pada tekanan masuk 1100 mbar. Sehingga efisiensi *thermal* (η_{th}) yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 500 mbar. Dan besarnya kenaikan efisiensi *thermal* (η_{th}) secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi, pada derajat pengapian 24° sebelum TMA adalah 63,7% pada tekanan masuk 500 mbar, 60,7% pada tekanan masuk 700 mbar, 41,3% pada tekanan masuk 900 mbar dan 13,3% pada tekanan masuk 1100 mbar. Sehingga efisiensi *thermal* (η_{th}) yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 500 mbar. Sedangkan kenaikan efisiensi *thermal* (η_{th}) secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi, pada derajat pengapian 26° sebelum TMA adalah 79,8% pada tekanan masuk 500 mbar, 72,2% pada tekanan masuk 700 mbar, 75,8% pada tekanan masuk 900 mbar dan 23,1% pada tekanan masuk 1100 mbar. Sehingga efisiensi *thermal* (η_{th}) yang dihasilkan *engine* maksimum terjadi pada tekanan 500 mbar. Sehingga pada tiap variasi derajat pengapian yang dilakukan, menunjukkan nilai efisiensi rata-rata terbesar terjadi pada tekanan masuk bahan bakar *syn-gas* sebesar 500 mbar, kecuali pada derajat pengapian 20° sebelum TMA terjadi pada tekanan masuk 900 mbar.



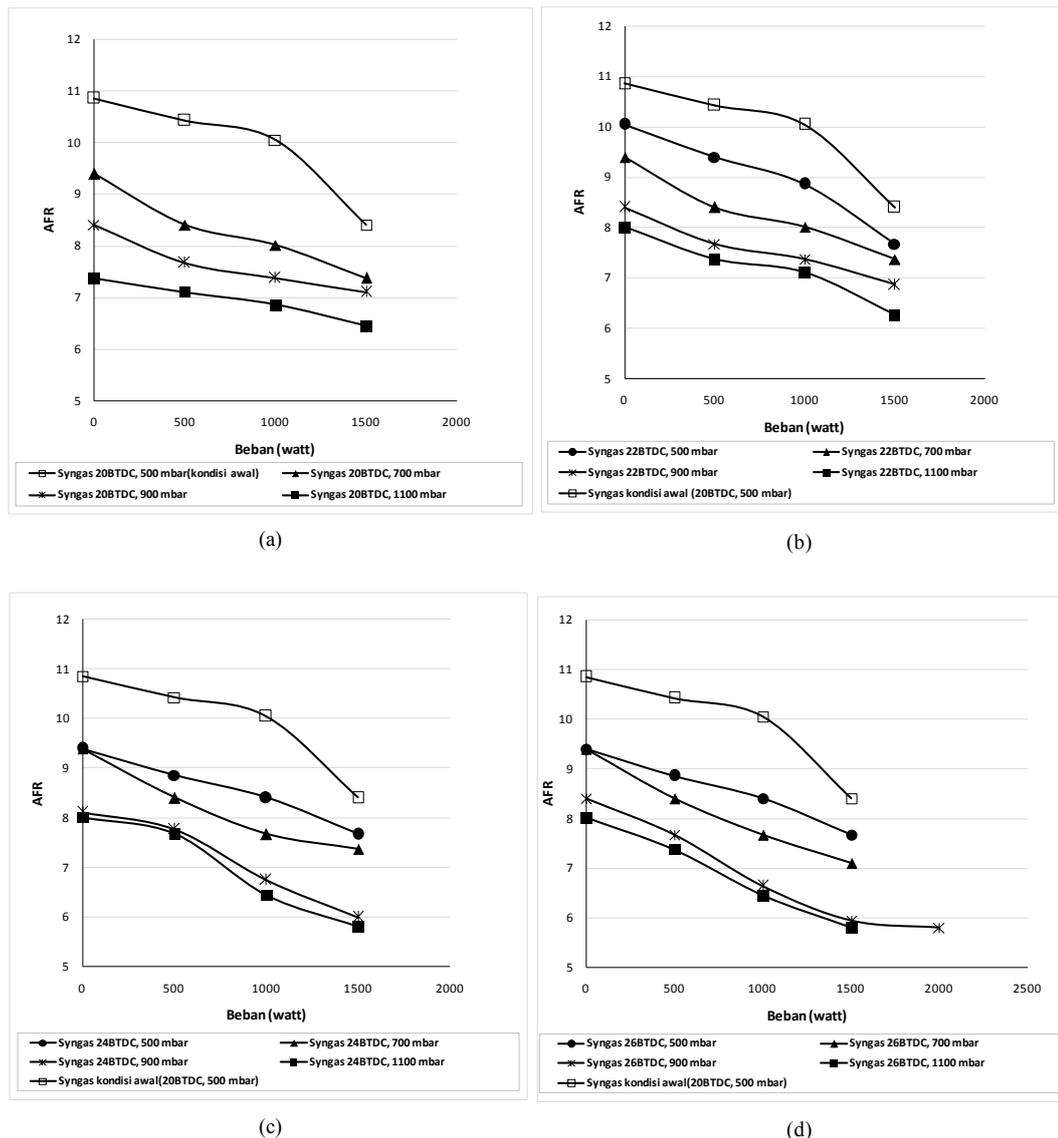
Gambar 4.26 Grafik fungsi perbandingan efesiensi thermal (η_{th}) terbaik terhadap fungsi beban dari variasi tekanan masuk dan derajat pengapian saat engine berbahan bakar *syn-gas*.

Pada gambar 4.26 menunjukkan bahwa efesiensi *thermal* (η_{th}) mengalami peningkatan seiring penambahan beban pada *engine*. Dari variasi derajat pengapian dan tekanan masuk bahan bakar *syn-gas*, dari gambar 4.26 menunjukkan bahwa efesiensi *thermal* (η_{th}) terbaik terjadi pada tekanan masuk 500 mbar dengan derajat pengapian sebesar 26° sebelum TMA. Dimana kenaikan efesiensi *thermal* (η_{th}) secara rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi, pada derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan masuk 500 mbar sebesar 79,8%. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin meningkatnya beban *engine* maka masa campuran bahan bakar yang masuk ke ruang bakar semakin besar sehingga energi atau kalor yang dapat dikonversi menjadi kerja akan semakin besar.

Naiknya efesiensi *thermal* (η_{th}) seiring dengan waktu pengapian yang semakin maju, hal ini disebabkan semakin banyak tersedianya waktu pembakaran sehingga campuran udara-bahan bakar akan terbakar lebih banyak dan energi hasil pembakaran yang dihasilkan akan lebih besar. Energi hasil pembakaran yang besar juga didapatkan dari laju pembakaran yang cepat karena semakin banyak campuran udara dan bahan bakar yang dapat terbakar maka efesiensi *thermal* (η_{th}) akan bertambah.

4.4.6 Analisa Rasio Udara-Bahan Bakar (AFR)

Rasio udara-bahan bakar (AFR) didefinisikan sebagai perbandingan antara udara dengan bahan bakar yang masuk ke ruang bakar. Besar kecilnya nilai AFR sangatlah bergantung pada banyaknya jumlah udara atau bahan bakar yang memasuki ruang bakar. *Syn-gas* memiliki AFR stoichiometry sebesar 1,4 seperti yang terlihat pada tabel 2.4. Berikut ini adalah grafik AFR terhadap beban saat *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* :



Gambar 4.27 Grafik AFR fungsi beban *engine* pada tekanan masuk 500, 700, 900 dan 1100 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat *engine* berbahan bakar *syn-gas*.



Dari gambar 4.28 menunjukkan bahwa besarnya rasio udara-bahan bakar (AFR) turun seiring dengan penambahan beban. Hal ini disebabkan dengan meningkatnya beban *engine*, maka kebutuhan bahan bakar semakin meningkat. Peningkatan suplai bahan bakar seiring dengan kenaikan beban, yang pada pengoperasiannya ditunjukkan bahwa setiap beban lampu dinaikkan maka bukaan *pressure regulator* perlu ditambah untuk menjaga tekanan yang masuk ruang bakar tetap konstan. Pada saat *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *syn-gas* belum divariasikan menunjukkan besarnya AFR yaitu 8,4 pada saat *engine* menerima beban 1500 watt, sedangkan AFR *stoikiometri syn-gas* sebesar 1,4 sehingga terjadi kenaikan AFR sebesar 500%. Saat dilakukan variasi tekanan masuk bahan bakar dengan derajat pengapian tidak dirubah atau konstan yaitu pada derajat pengapian 20° sebelum TMA, menunjukkan bahwa besarnya AFR yang mendekati kondisi *stoikiometri* yaitu sebesar 6,4 pada saat *engine* menerima beban 1500 watt dengan tekanan masuk bahan bakar 1100 mbar, sedangkan AFR *stoikiometri syn-gas* sebesar 1,4 maka terjadi kenaikan sebesar 360%. Dan ketika dilakukan variasi tekanan masuk bahan bakar dengan derajat pengapian tidak dirubah atau konstan yaitu pada derajat pengapian 22° sebelum TMA, menunjukkan bahwa besarnya AFR yang mendekati kondisi *stoikiometri* yaitu sebesar 6,2 pada saat *engine* menerima beban 1500 watt dengan tekanan masuk bahan bakar 1100 mbar, sedangkan AFR *stoikiometri syn-gas* sebesar 1,4 maka terjadi kenaikan sebesar 347%. Saat dilakukan variasi tekanan masuk bahan bakar dengan derajat pengapian tidak dirubah atau konstan yaitu pada derajat pengapian 24° sebelum TMA, menunjukkan bahwa besarnya AFR yang mendekati kondisi *stoikiometri* yaitu sebesar 5,8 pada saat *engine* menerima beban 4000 watt dengan tekanan masuk bahan bakar 1100 mbar, sedangkan AFR *stoikiometri syn-gas* sebesar 1,4 maka terjadi kenaikan sebesar 314%. Sedangkan pada variasi tekanan masuk bahan bakar dengan derajat pengapian tidak dirubah atau konstan yaitu pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, menunjukkan bahwa besarnya AFR yang mendekati kondisi *stoikiometri* yaitu sebesar 5,8 pada saat *engine* menerima beban 4000 watt dengan tekanan masuk bahan bakar 1100 mbar, sedangkan AFR *stoikiometri syn-gas* sebesar 1,4 maka terjadi kenaikan sebesar 314%. Sehingga pada tiap variasi derajat pengapian yang dilakukan,



memiliki AFR yang mendekati kondisi *stoikiometri* terjadi pada tekanan 1100 mbar.

Secara umum bahwa AFR saat *engine* menggunakan *syn-gas*, mengalami penurunan seiring kenaikan beban. Hal ini disebabkan pada saat beban tinggi dimana udara yang masuk ke ruang bakar rendah dan bahan bakar yang masuk ke ruang bakar tinggi sehingga menyebabkan rasio udara-bahan bakar (AFR) menjadi rendah hingga pada putaran tertentu. Semakin meningkatnya beban, membuat massa campuran yang masuk ke ruang bakar semakin besar dan turbulensi aliran campuran juga lebih besar sehingga proses pembakaran dapat berlangsung lebih sempurna dan tekanan yang dihasilkan menjadi lebih besar. Namun, pada saat putaran tinggi kerugian gesekan (*friction lose*) dan adanya kenaikan temperatur *engine* yang cukup signifikan menyebabkan tekanan efektif rata-rata kembali mengalami penurunan. Kenaikan temperatur *engine* menyebabkan efisiensi volumetris *engine* menjadi berkurang.

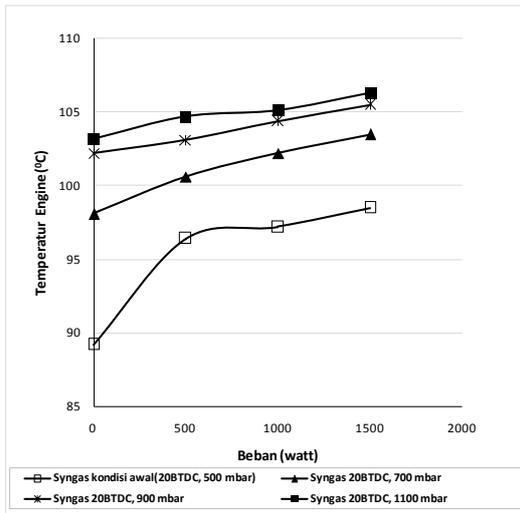
4.4.7 Analisa Temperatur *Engine*

Temperatur *engine* menunjukkan temperatur pada ruang bakar yang diukur pada dinding *engine* bagian luar. Pada Gambar 4.28 dapat dilihat bahwa temperatur *engine* naik seiring naiknya beban. Hal ini senada dengan penelitian yang dilakukan oleh jefri (2010) yang menyatakan dengan naiknya pembebanan pada *engine* maka jumlah bahan bakar yang masuk ke dalam ruang bakar semakin banyak, sehingga panas pembakaran yang dilepas ke dinding silinder juga semakin banyak, yang menyebabkan temperatur *engine* juga meningkat. Gambar 4.28 merupakan grafik temperatur *engine* terhadap beban saat *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas*.

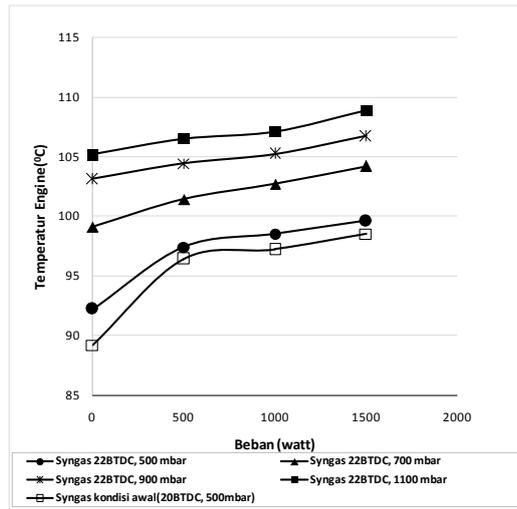
Pada gambar 4.28 menunjukkan bahwa secara umum, temperatur *engine* mengalami kenaikan seiring dengan penambahan beban pada *engine*. Nilai temperatur *engine* saat *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *syn-gas* yang belum divariasikan sebesar 98,5 °C saat diberi beban lampu 1500 watt. Saat dilakukan variasi tekanan masuk bahan bakar dengan derajat pengapian tidak dirubah atau konstan, menunjukkan kenaikan nilai temperatur *engine* seiring



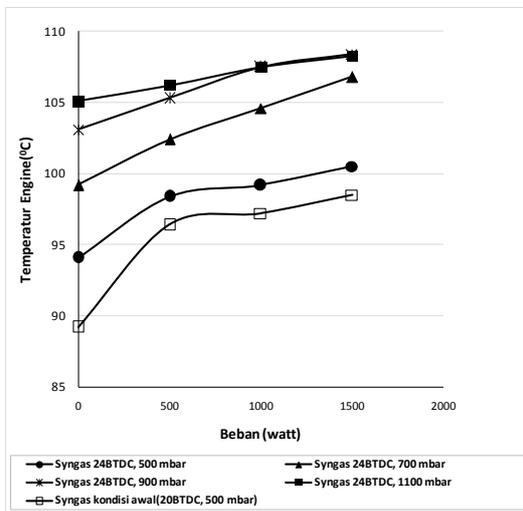
peningkatan tekanan masuk bahan bakar. Pada gambar 4.28(a) menunjukkan bahwa dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 20° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur *engine* rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk 1100 mbar yaitu temperatur meningkat sebesar 9,97%.



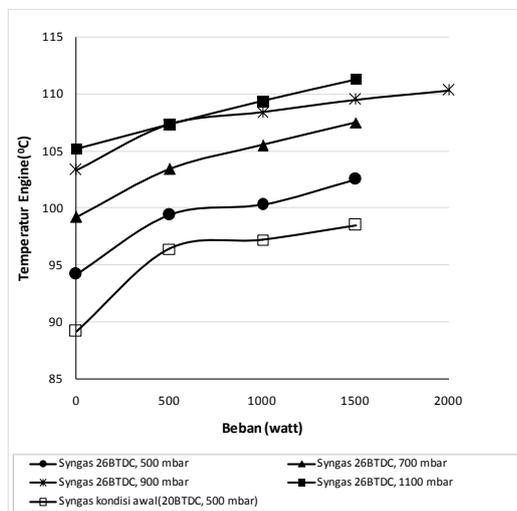
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.28 Grafik temperatur *engine* fungsi beban *engine* pada tekanan masuk 500, 700, 900 dan 1100 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20° , (b) 22° , (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat *engine* berbahan bakar *syn-gas*.

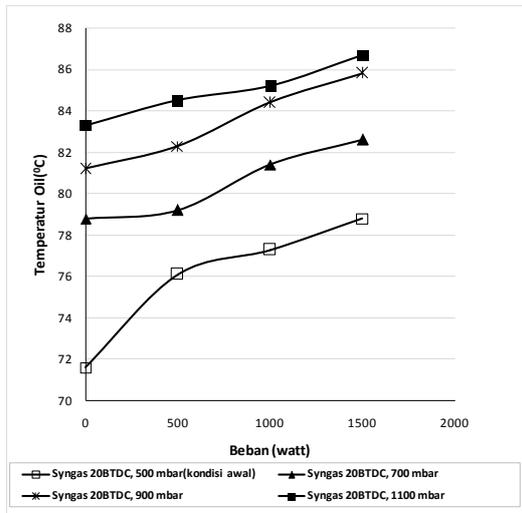


Pada gambar 4.8(b) menunjukkan bahwa dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 22° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur *engine* rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk 1100 mbar yaitu temperatur meningkat sebesar 11,1%. Pada gambar 4.8(c) menunjukkan bahwa dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 240° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur *engine* rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk 1100 mbar yaitu temperatur meningkat sebesar 12%. Pada gambar 4.8(d) menunjukkan bahwa dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur *engine* rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk 1100 mbar yaitu temperatur meningkat sebesar 13,6%.

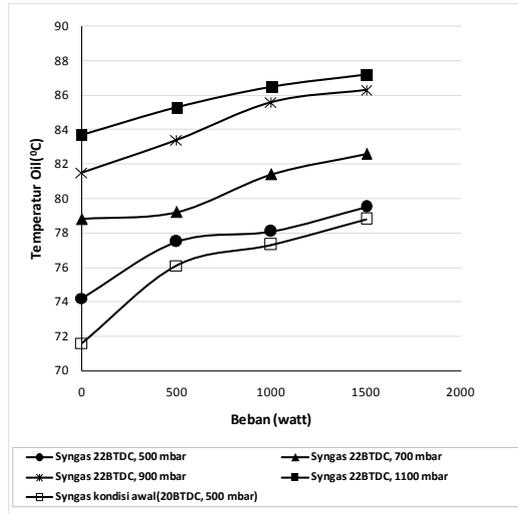
Sehingga pada variasi yang dilakukan yang memiliki peningkatan temperatur rata-rata *engine* terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk 1100 mbar dan derajat pengapian 26° sebelum TMA, yaitu sebesar 13,6%. Hal ini disebabkan dengan penambahan tekanan masuk maka semakin banyak jumlah bahan bakar yang dapat dibakar sehingga nilai temperatur *engine* semakin meningkat. Dan derajat pengapian yang semakin maju menyebabkan waktu pembakaran semakin lama sehingga energi yang dihasilkan semakin besar sekaligus menyebabkan temperatur *engine* meningkat seiring dengan pemajuan derajat pengapian.

4.4.8 Analisa Temperatur Oli Pelumas

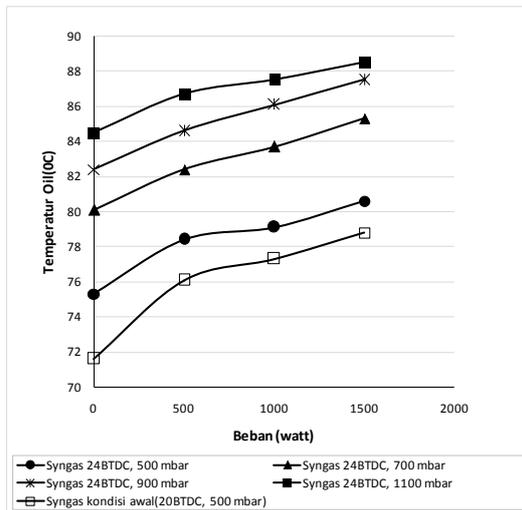
Oli pelumas merupakan cairan yang berfungsi untuk mengurangi terjadinya gesekan antar komponen mesin, selain itu juga oli berfungsi untuk mengurangi panas dari *engine*. Seiring dengan semakin meningkatnya temperatur *engine* karena kenaikan beban pada *LPG engine-generator set*, maka temperatur oli pelumas juga akan semakin meningkat. Berikut ini adalah grafik temperatur oli pelumas terhadap beban saat *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* :



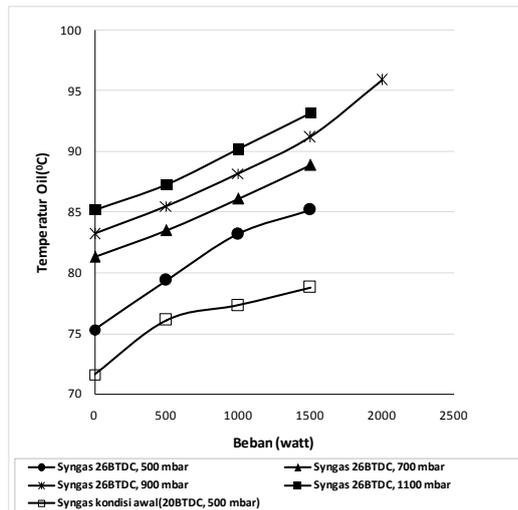
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.29 Grafik temperatur oli fungsi beban *engine* pada tekanan masuk 500, 700, 900 dan 1100 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat *engine* berbahan bakar *syn-gas*.

Pada gambar 4.29 menunjukkan bahwa secara umum, temperatur oli pelumas mengalami kenaikan seiring dengan penambahan beban pada *engine*. Nilai temperatur oli pelumas saat *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *syn-gas* yang belum divariasikan sebesar 78,8 °C saat diberi beban lampu 1500 watt. Saat dilakukan variasi tekanan masuk bahan bakar dengan derajat pengapian tidak dirubah atau konstan, menunjukkan kenaikan nilai temperatur *engine* seiring peningkatan tekanan masuk bahan bakar. Pada gambar 4.29(a) menunjukkan



bahwa dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 20° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur oli pelumas rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk 1100 mbar yaitu temperatur meningkat sebesar 11,8%. Pada gambar 4.29 (b) menunjukkan bahwa dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 m bar pada derajat pengapian 22° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur oli pelumas rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk 1100 m bar yaitu temperatur meningkat sebesar 12,8%. Pada gambar 4.29 (c) menunjukkan bahwa dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 24° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur oli pelumas rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk 1100 mbar yaitu temperatur meningkat sebesar 14,2%. Pada gambar 4.29 (d) menunjukkan bahwa dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 m bar pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur oli pelumas rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk 1100 m bar yaitu temperatur meningkat sebesar 15,2%.

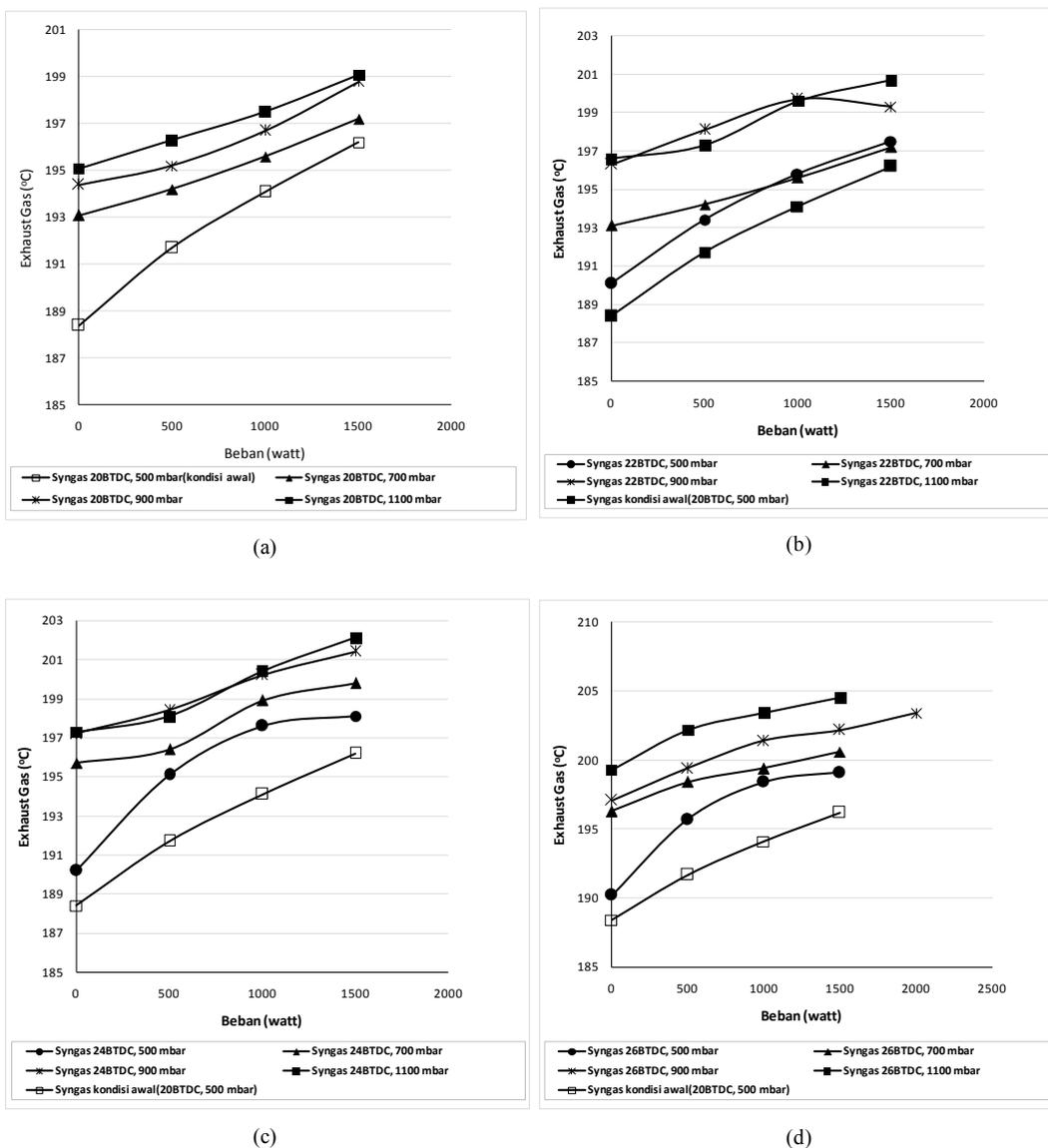
Sehingga pada variasi yang dilakukan, peningkatan temperatur oli pelumas rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk 1100 mbar dan derajat pengapian 26° sebelum TMA, yaitu sebesar 25,2%. Hal ini disebabkan dengan penambahan tekanan masuk maka semakin banyak jumlah bahan bakar yang dapat dibakar sehingga nilai temperatur *engine* semakin meningkat yang menyebabkan temperatur oli pelumas juga meningkat. Dan derajat pengapian yang semakin maju menyebabkan waktu pembakaran semakin lama sehingga energi yang dihasilkan semakin besar sekaligus menyebabkan temperatur oli pelumas meningkat seiring dengan pemajuan derajat pengapian.

4.4.9 Analisa Temperatur *Exhaust*

Temperatur *exhaust* merupakan temperatur yang timbul dari adanya proses pembakaran didalam ruang bakar, temperatur *exhaust* diukur pada lubang *exhaust* dengan menggunakan thermokopel. Secara umum grafik temperatur *exhaust*



fungsi putaran *engine* menunjukkan semakin tinggi, hal ini senada dengan penelitian yang dilakukan oleh jefri (2010) yang menyatakan bahwa grafik temperatur *exhaust* semakin meningkat seiring dengan putaran *engine*. Dengan naiknya putaran *engine* maka jumlah bahan bakar yang masuk ke ruang bakar semakin banyak, sehingga panas pembakaran yang timbul juga semakin besar, sehingga menyebabkan temperatur *exhaust* semakin meningkat. Berikut ini adalah grafik temperatur *exhaust* terhadap beban saat *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* :



Gambar 4.30 Grafik temperatur *exhaust* fungsi beban *engine* pada tekanan masuk 500, 700, 900 dan 1100 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat *engine* berbahan bakar *syn-gas*.



Pada gambar 4.30 menunjukkan bahwa secara umum, temperatur *exhaust* mengalami kenaikan seiring dengan penambahan beban pada *engine*. Nilai temperatur *exhaust* saat *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *syn-gas* yang belum divariasikan sebesar $196,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ saat diberi beban lampu 1500 watt. Saat dilakukan variasi tekanan masuk bahan bakar dengan derajat pengapian tidak dirubah atau konstan, menunjukkan kenaikan nilai temperatur *engine* seiring peningkatan tekanan masuk bahan bakar. Pada gambar 4.30(a) menunjukkan bahwa dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 20° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur *exhaust* pelumas rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk 1100 mbar yaitu temperatur meningkat sebesar 2,2%. Pada gambar 4.30(b) menunjukkan bahwa dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 22° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur *exhaust* pelumas rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk 1100 mbar yaitu temperatur meningkat sebesar 3,1%. Pada gambar 4.30(c) menunjukkan bahwa dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 240° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur *exhaust* pelumas rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk 1100 mbar yaitu temperatur meningkat sebesar 3,57%. Pada gambar 4.30(d) menunjukkan bahwa dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, memiliki peningkatan nilai temperatur *exhaust* pelumas rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk 1100 mbar yaitu temperatur meningkat sebesar 5,06%.

Sehingga pada variasi yang dilakukan yang memiliki peningkatan temperatur *exhaust* rata-rata terbesar terhadap kondisi sebelum variasi terjadi pada tekanan masuk 1100 mbar dan derajat pengapian 26° sebelum TMA, yaitu sebesar 5,06%. Hal ini disebabkan dengan penambahan tekanan masuk maka semakin banyak jumlah bahan bakar yang dapat dibakar sehingga nilai temperatur *exhaust* semakin meningkat. Dan temperatur *exhaust* meningkat seiring dengan pemajuan derajat pengapian.



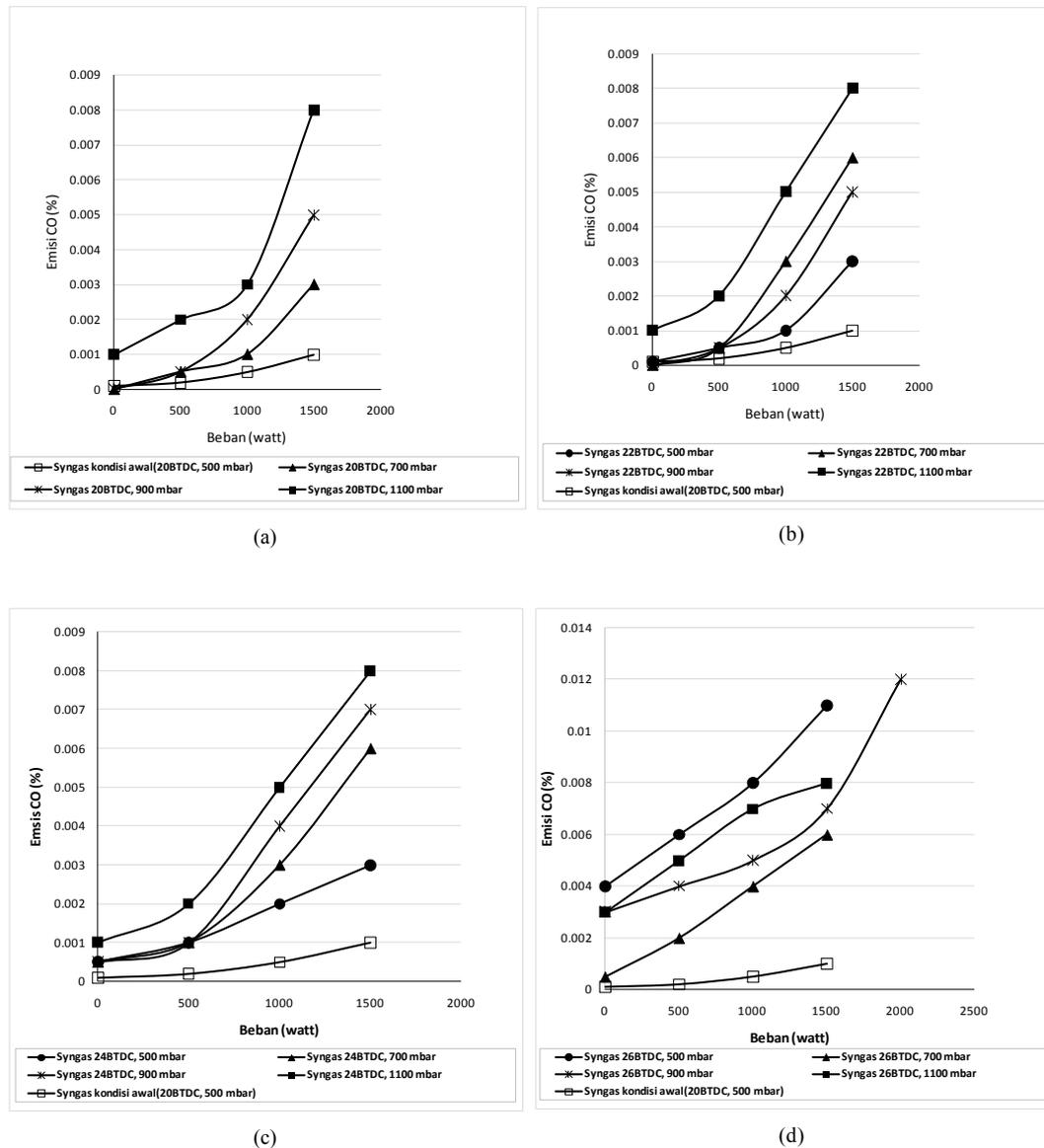
4.4.10 Analisa Emisi karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida pada gas buang diakibatkan oleh pembakaran yang terjadi didalam ruang bakar yang tidak terbakar secara sempurna, dikarenakan kurangnya jumlah udara dalam campuran bahan bakar-udara yang masuk kedalam ruang bakar atau bisa juga disebabkan oleh waktu yang tersedia untuk menyelesaikan proses pembakaran. Emisi karbon monoksida juga sangat ditentukan oleh kualitas campuran, homogenitas dan perbandingan udara-bahan bakar. Kurangnya pasokan oksigen dalam campuran menyebabkan karbon tidak bereaksi dengan sempurna sehingga terbentuk CO.

Pada gambar 4.31 merupakan grafik emisi CO fungsi beban *engine* , menunjukkan *trendline* grafik yang naik seiring kenaikan beban pada *engine*. Nilai emisi CO saat *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* sebelum dilakukan variasi memiliki nilai rata-rata kandungan CO sebesar 0,00025%. Pada gambar 4.33(a) menunjukkan bahwa dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 20° sebelum TMA, memiliki nilai rata-rata terbesar kandungan CO pada tekanan masuk bahan bakar 1100 mbar yaitu sebesar 0,0035%, sedangkan kenaikannya kandungan nilai CO rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi sebesar 1300%. Gambar 4.33(b) menunjukkan bahwa dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 22° sebelum TMA, memiliki nilai rata-rata terbesar kandungan CO pada tekanan masuk bahan bakar 1100 mbar yaitu sebesar 0,004%, sedangkan kenaikannya kandungan nilai CO rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi sebesar 1500%. Di gambar 4.33(c) menunjukkan bahwa dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 24° sebelum TMA, memiliki nilai rata-rata terbesar kandungan CO pada tekanan masuk bahan bakar 1100 mbar yaitu sebesar 0,004%, sedangkan kenaikannya kandungan nilai CO rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi sebesar 1500%. Pada gambar 4.33(d) juga menunjukkan bahwa dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, memiliki nilai rata-rata terbesar kandungan CO pada tekanan masuk bahan bakar 900 mbar yaitu sebesar 0,006%, sedangkan



kenaikkannya kandungan nilai CO rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi sebesar 2300%.



Gambar 4.31 Grafik emisi CO fungsi beban *engine* pada tekanan masuk 500, 700, 900 dan 1100 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat *engine* berbahan bakar *syn-gas*.

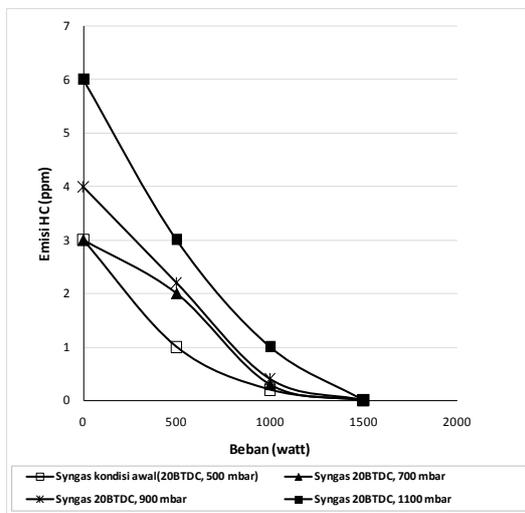
Sehingga pada variasi yang dilakukan yang memiliki peningkatan nilai emisi CO rata-rata terbesar terjadi pada tekanan masuk 900 mbar dan derajat pengapian 26° sebelum TMA, yaitu emisi CO sebesar 0,006% dengan peningkatan 2300% terhadap kondisi sebelum variasi. Hal ini disebabkan dengan penambahan tekanan masuk maka semakin banyak jumlah bahan bakar yang



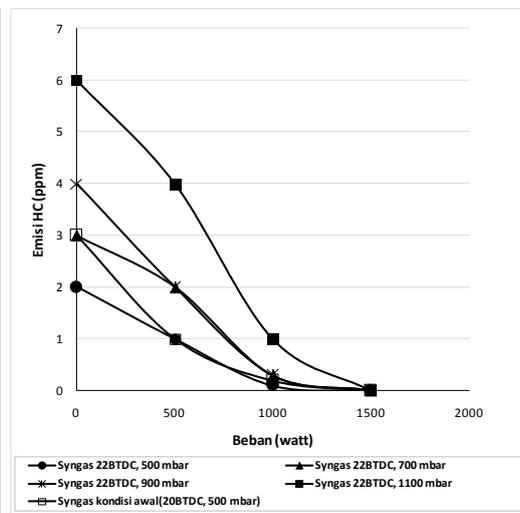
dapat dibakar menyebabkan emisi CO semakin meningkat. Dan derajat pengapian yang semakin maju menyebabkan waktu pembakaran semakin lama sehingga energi yang dihasilkan semakin besar sekaligus menyebabkan emisi CO meningkat seiring dengan pemajuan derajat pengapian.

4.4.11 Analisa Emisi Hydro Carbon (HC)

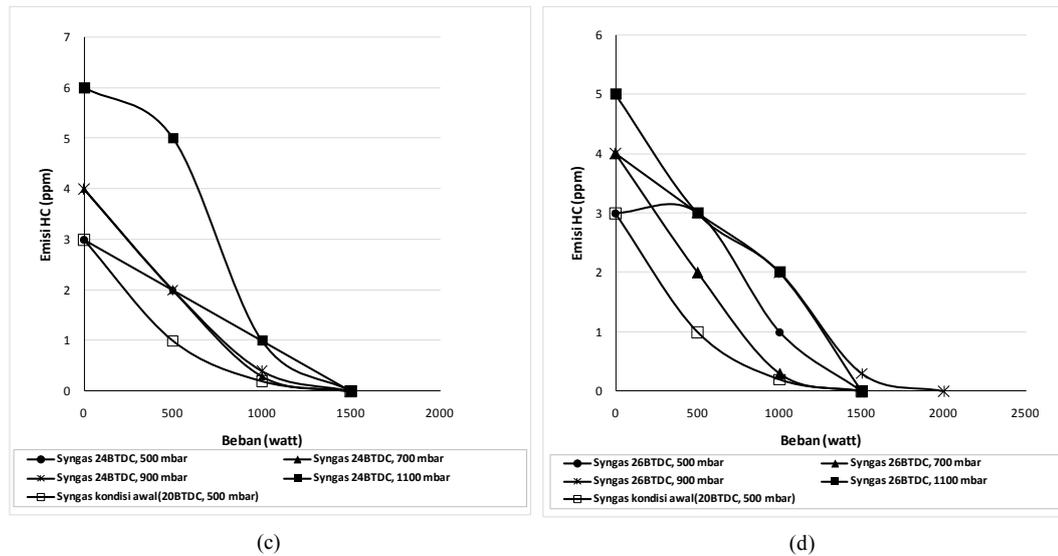
Hidrokarbon yang tidak terbakar adalah akibat langsung dari ketidaksempurnaan pembakaran, yang erat kaitannya dengan desain mesin dan variabel operasi. Selama proses kompresi dan pembakaran, kenaikan tekanan pada ruang bakar memaksa sejumlah gas untuk masuk ke celah-celah kecil dalam ruang bakar. Gas ini akan keluar pada langkah ekspansi dan langkah buang dan merupakan salah satu sumber hidrokarbon pada gas buang *engine*. Sumber yang lain adalah lapisan pelumas yang menempel pada dinding piston atau silinder head. Lapisan oli ini bisa menyerap kembali komponen hidrokarbon dalam campuran (sebelum dan sesudah pembakaran) sehingga memungkinkan sejumlah bahan bakar lolos ketika terjadi pembakaran. Secara umum kadar emisi HC akan menurun seiring dengan meningkatnya putaran *engine* yang diakibatkan ketika putaran bertambah tinggi maka homogenitas campuran bahan bakar dan udara semakin baik, namun hal itu terjadi hingga putaran *engine* tertentu. Bila putaran bertambah cepat, maka waktu pembakaran akan semakin sempit sehingga kadar bahan bakar yang belum terbakar akan lebih besar lagi.



(a)



(b)



Gambar 4.32 Grafik emisi HC fungsi beban *engine* pada tekanan masuk 500, 700, 900 dan 1100 mbar dengan derajat pengapian sebesar (a) 20°, (b) 22°, (c) 24° dan (d) 26° sebelum TMA saat *engine* berbahan bakar *syn-gas*

Pada gambar 4.32 merupakan grafik emisi HC fungsi beban *engine*, menunjukkan tren grafik yang turun seiring kenaikan beban pada *engine*. Nilai emisi HC saat *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* sebelum dilakukan variasi memiliki nilai rata-rata kandungan CO sebesar 1ppm. Pada gambar 4.32(a) menunjukkan bahwa dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 20° sebelum TMA, memiliki nilai rata-rata terbesar kandungan HC pada tekanan masuk bahan bakar 1100 mbar yaitu sebesar 2,5ppm, sedangkan kenaikannya kandungan nilai CO rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi sebesar 150%. Gambar 4.32(b) menunjukkan bahwa dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 22° sebelum TMA, memiliki nilai rata-rata terbesar kandungan HC pada tekanan masuk bahan bakar 1100 mbar yaitu sebesar 2,75ppm, sedangkan kenaikannya kandungan nilai CO rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi sebesar 175%. Di gambar 4.32(c) menunjukkan bahwa dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 24° sebelum TMA, memiliki nilai rata-rata terbesar kandungan



HC pada tekanan masuk bahan bakar 1100 mbar yaitu sebesar 3ppm, sedangkan kenaikannya kandungan nilai CO rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi sebesar 200%. Pada gambar 4.32(d) juga menunjukkan bahwa dengan peningkatan tekanan masuk bahan bakar dari 500 mbar sampai 1100 mbar pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, memiliki nilai rata-rata terbesar kandungan HC pada tekanan masuk bahan bakar 1100 mbar yaitu sebesar 2,5ppm, sedangkan kenaikannya kandungan nilai CO rata-rata terhadap kondisi sebelum variasi sebesar 150%.

Sehingga pada variasi yang dilakukan yang memiliki peningkatan nilai emisi HC rata-rata terbesar terjadi pada tekanan masuk 90 mbar dan derajat pengapian 26° sebelum TMA, yaitu emisi HC 3ppm dengan kenaikan sebesar 200% terhadap kondisi sebelum variasi. Hal ini disebabkan dengan penambahan tekanan masuk maka semakin banyak jumlah bahan bakar yang dapat dibakar menyebabkan peningkatan kandungan HC pada emisi. Dan derajat pengapian yang semakin maju menyebabkan waktu pembakaran semakin lama sehingga energi yang dihasilkan semakin besar sekaligus menyebabkan emisi HC meningkat seiring dengan pemajuan derajat pengapian.

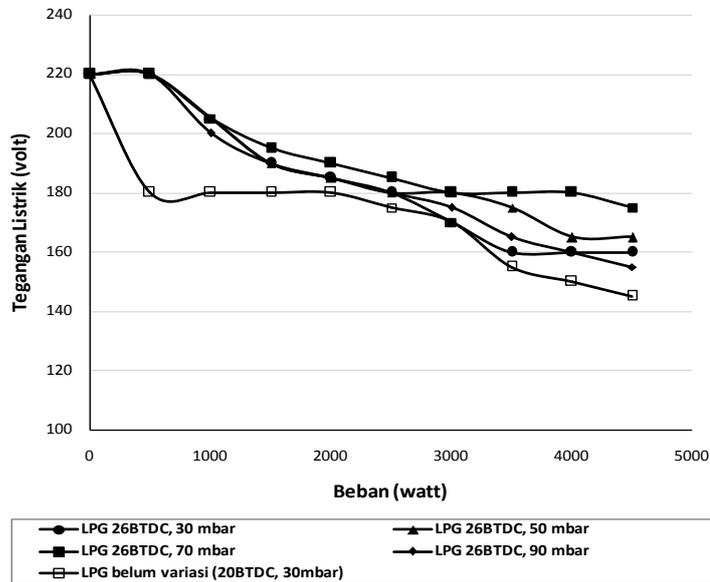
4.5 Komparasi Unjuk Kerja *LPG engine-generator set* saat Menggunakan Bahan Bakar LPG dan *Syn-gas*

4.5.1 Analisa Komparasi Daya Dari *LPG engine-generator set* Saat Menggunakan bahan Bakar LPG dan *Syn-gas*

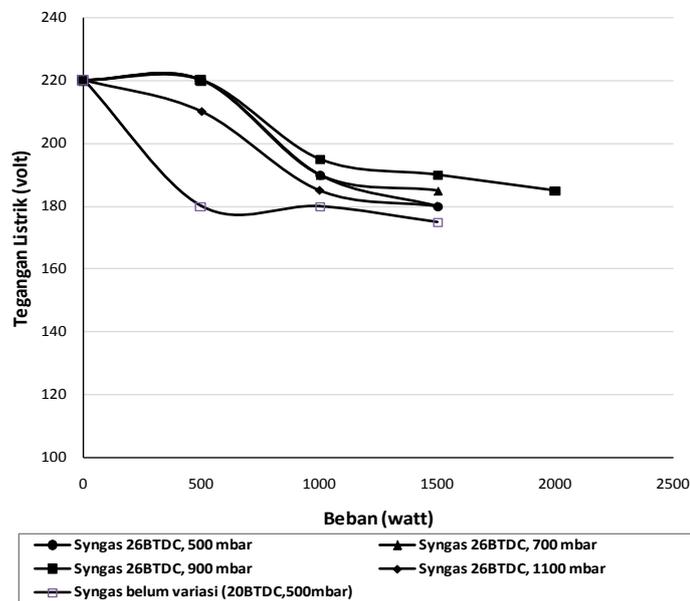
Pada penelitian ini, bahan bakar yang digunakan untuk *LPG engine-generator set* adalah LPG dan *syn-gas* gasifikasi batubara. Dari variasi derajat pengapian yang telah dilakukan, menunjukkan bahwa *engine* dengan bahan bakar LPG maupun *syn-gas* menghasilkan daya poros terbaik pada derajat pengapian 26° sebelum TMA. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Ajay et al (2010) menyebutkan bahwa tegangan listik yang dihasilkan oleh sebuah generator tidak boleh kurang 80% dari spesifikasi tegangan generator. Sehingga untuk generator dengan spesifikasi tegangan sebesar 220 vol t, maka tegangan listrik yang



dihasilkan minimal sebesar 180 vol t. Gambar 3.3 m erupakan grafik hasil eksperimen yang menunjukkan hubungan beban terhadap tegangan listrik yang dihasilkan pada derajat pengapian 26° sebelum TMA.



(a)

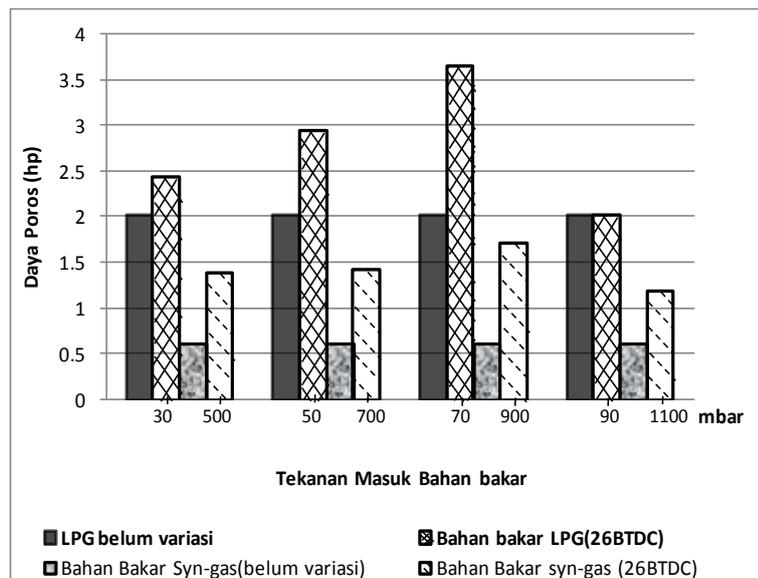


(b)

Gambar 3.33 Grafik hasil eksperimen yang menunjukkan hubungan beban terhadap tegangan listrik yang dihasilkan pada derajat pengapian 26° sebelum TMA, saat menggunakan bahan bakar (a) LPG, (b) *syn-gas*



Maka grafik daya poros yang dihasilkan oleh *LPG engine-generator set* dengan bahan bakar LPG dan *syn-gas*, ditampilkan pada beban maksimal dengan tegangan listrik sebesar 180-185 volt. Gambar 4.34 merupakan daya poros yang dihasilkan oleh *LPG engine-generator set* pada beban elektrik maksimum, saat menggunakan bahan bakar LPG dan *syn-gas* sebagai fungsi tekanan masuk bahan bakar.



Gambar 4.34 Grafik komparasi daya poros *LPG engine-generator set* fungsi tekanan masuk bahan bakar, saat menggunakan bahan bakar LPG dan *syn-gas*

Beban maksimum yang dihasilkan oleh *LPG engine-generator set* dengan bahan bakar LPG adalah sebesar 4000 w att dengan tegangan listrik 180 volt, dimana terjadi pada derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan masuk bahan bakar 70 m bar. Sedangkan beban maksimum yang dihasilkan oleh *LPG engine-generator set* dengan bahan bakar *syn-gas* adalah sebesar 4000 w att dengan tegangan listrik 185 vol t, dimana terjadi pada derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan masuk bahan bakar 900 m bar. Dari gambar 4.34 menunjukkan daya poros yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar LPG saat kondisi belum divariasikan, dengan tegangan listrik 180 adalah sebesar 2 hp. Sedangkan daya poros pada beban elektrik maksimal yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar LPG, dengan tegangan listrik 180 adalah sebesar 3,7 hp . Sehingga setelah



dilakukan variasi, daya poros yang dihasilkan oleh *LPG engine-generator set* dengan menggunakan bahan bakar LPG mengalami kenaikan sebesar 80%.

Sedangkan daya poros yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *syn-gas* saat kondisi belum divariasikan, dengan tegangan listrik 180 adalah sebesar 0,6 hp. Dan daya poros pada beban elektrik maksimal yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *syn-gas*, dengan tegangan listrik 185 adalah sebesar 1,7 hp. Sehingga setelah dilakukan variasi, daya poros yang dihasilkan oleh *LPG engine-generator set* dengan menggunakan bahan bakar *syn-gas* mengalami kenaikan sebesar 182,6%.

Gambar 4.34 menunjukkan *engine* dengan bahan bakar LPG dan *syn-gas*, mengalami peningkatan daya poros setelah dilakukan variasi derajat pengapain dan tekanan masuk bahan bakar. Saat *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* pada beban elektrik maksimal, memiliki daya poros yang lebih rendah jika dibandingkan saat menggunakan bahan bakar LPG pada kondisi sebelum variasi. Dimana *LPG engine-generator set* saat menggunakan bahan bakar LPG sebelum divariasikan (2hp) jika dibandingkan saat menggunakan bahan bakar *syn-gas* pada beban maksimal (1,7hp) akan terjadi penurunan daya poros sebesar 15,2%. Walaupun demikian dengan pengaturan tekanan masuk bahan bakar dan settingan derajat pengapain, *LPG engine-generator set* dengan bahan bakar *syn-gas* dapat menghasilkan *power output* yang sama dengan saat menggunakan bahan bakar LPG pada kondisi belum divariasikan yaitu sebesar 2000 watt, seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.1.

Beban elektrik maksimum yang dihasilkan *LPG engine-generator set* saat menggunakan bahan bakar *syn-gas* (2000 watt) lebih rendah jika dibandingkan saat *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar LPG (4000 watt), hal ini dikarenakan nilai kalor dari *syn-gas* gasifikasi batubara ($LHV_{syn-gas} : 5,3 \text{ MJ/m}^3$) lebih rendah dari kalor bahan bakar LPG ($LHV_{LPG} : 45,7 \text{ MJ/m}^3$). Sehingga beban elektrik maksimum dari *LPG engine-generator set* saat menggunakan *syn-gas* yaitu setengah dari beban elektrik maksimal saat menggunakan LPG. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Ajay et al (2010), yaitu



menyebutkan bahwa *engine* akan mengalami *de-rating* ketika *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas*.

Tabel 4.1 Komparasi Unjuk Kerja *LPG engine-generator set* saat menggunakan bahan bakar *LPG* dan *Syn-gas*, pada beban maksimum dengan tegangan listrik 180 - 185 volt.

Bahan Bakar	No.	Beban Maksimal	Terjadi Pada Variasi		Voltase	Ne	Sfc	$\eta_{thermal}$	
		(watt)	Tekanan Masuk	Sudut Pengapian	(volt)	(hp)	(kg/hp.jam)	(%)	
LPG		2000	30 (belum variasi)	mbar	20 ° BTDC	180	2.0	0.300	19.16
	1	2500	30	mbar	26 ° BTDC	180	2.4	0.274	20.99
	2	3000	50	mbar	26 ° BTDC	180	2.9	0.262	21.97
	3	4000	70	mbar	26 ° BTDC	180	3.7	0.247	23.26
	4	2500	90	mbar	26 ° BTDC	180	2.0	0.402	14.28
	Kenaikkan/penurunan pada beban elektrik maksimal								
Terhadap kondisi belum variasi (%)						80.0	-17.6	21.4	
Syn-gas		1000	500 (belum variasi)	mbar	20 ° BTDC	180	0.6	3.171	13.08
	1	1500	500	mbar	26 ° BTDC	180	1.4	1.871	35.71
	2	1500	700	mbar	26 ° BTDC	185	1.4	1.904	33.97
	3	2000	900	mbar	26 ° BTDC	185	1.7	1.943	33.29
	4	1500	1100	mbar	26 ° BTDC	180	1.2	2.805	23.06
	Kenaikkan/penurunan pada beban elektrik maksimal								
Terhadap kondisi belum variasi (%)						182.6	-38.7	154.5	
Kenaikkan/penurunan saat menggunakan bahan bakar <i>syn-gas</i> pada beban elektrik maksimal terhadap saat menggunakan bahan bakar <i>LPG</i> kondisi belum variasi (%)						-15.2	548.0	73.7	

4.5.2 Analisa Komparasi Sfc Dari *LPG engine-generator set* Saat Menggunakan Bahan Bakar *LPG* dan *Syn-gas*

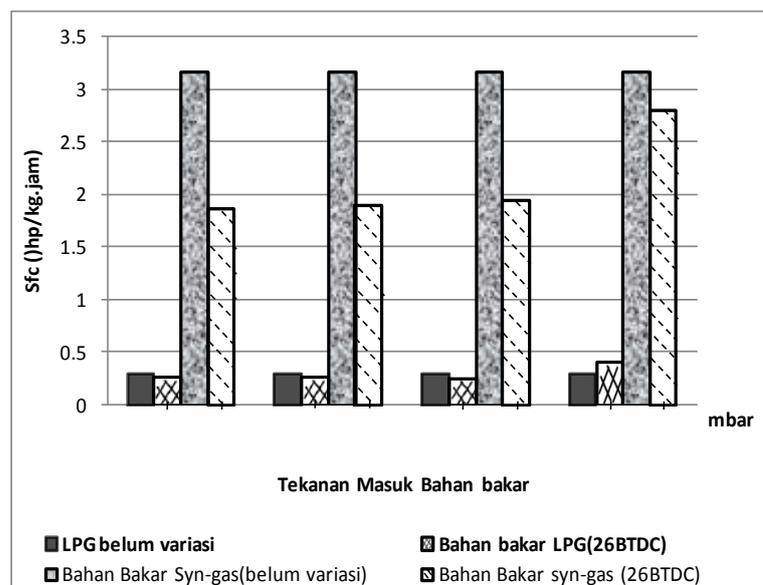
Dari gambar 4.35 menunjukkan Sfc yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *LPG* saat kondisi belum divariasikan, dengan tegangan listrik 180 a dalah sebesar 0,3 kg/hp.jam. Sedangkan Sfc pada beban elektrik maksimal yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *LPG*, dengan tegangan listrik 180 adalah sebesar 0,247 k g/hp.jam. Sehingga setelah dilakukan variasi, Sfc yang dihasilkan oleh *LPG engine-generator set* dengan menggunakan bahan bakar *LPG* mengalami penurunan sebesar 17,6%.

Sedangkan Sfc yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *syn-gas* saat kondisi belum divariasikan, dengan tegangan listrik 180 adalah sebesar 3,17 k g/hp.jam. Dan Sfc pada beban elektrik maksimal yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *syn-gas*, dengan tegangan listrik 185 a dalah sebesar 1,94 k g/hp.jam. Sehingga setelah dilakukan



variasi, Sfc yang dihasilkan oleh *LPG engine-generator set* dengan menggunakan bahan bakar *syn-gas* mengalami penurunan sebesar 38,7%.

Gambar 4.35 menunjukkan *engine* dengan bahan bakar LPG dan *syn-gas*, mengalami penurunan Sfc setelah dilakukan variasi derajat pengapain dan tekanan masuk bahan bakar. Saat *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* pada beban elektrik maksimal, memiliki Sfc yang lebih tinggi jika dibandingkan saat menggunakan bahan bakar LPG pada kondisi sebelum variasi. Dimana *LPG engine-generator set* saat menggunakan bahan bakar LPG sebelum divariasikan (0,3 kg/hp.jam) jika dibandingkan saat menggunakan bahan bakar *syn-gas* pada beban maksimal (1,94 kg/hp.jam) akan terjadi kenaikan Sfc sebesar 548%, seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.1.



Gambar 4.35 Grafik komparasi Sfc *LPG engine-generator set* fungsi tekanan masuk bahan bakar, saat menggunakan bahan bakar LPG dan *syn-gas*

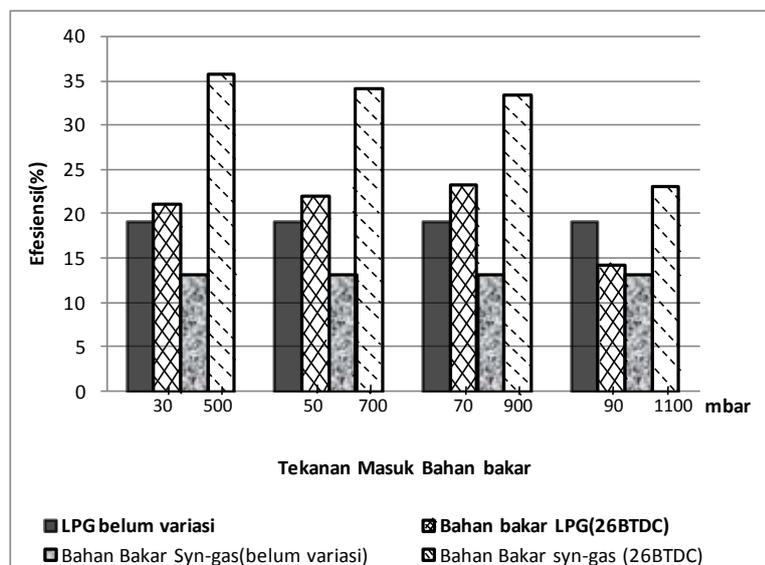
Pada gambar 4.35 menunjukkan Sfc *engine* dengan bahan bakar *syn-gas* lebih besar dibandingkan dengan saat menggunakan bahan bakar LPG. Naiknya Sfc dengan menggunakan *syn-gas* gasifikasi batubara sebagai bahan bakar disebabkan karena nilai kalor yang rendah ($LHV_{syn-gas} : 5,3 \text{ MJ/m}^3$) dibandingkan dengan LPG ($LHV_{LPG} : 45,7 \text{ MJ/m}^3$), sehingga untuk menghasilkan daya yang sama dibutuhkan konsumsi bahan bakar *syn-gas* lebih banyak.



4.5.3 Analisa Komparasi Efisiensi *Thermal* Dari *LPG engine-generator set* Saat Menggunakan Bahan Bakar LPG dan *Syn-gas*

Dari gambar 4.36 menunjukkan efisiensi yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar LPG saat kondisi belum divariasikan, dengan tegangan listrik 180 adalah sebesar 19,16%. Sedangkan efisiensi pada beban elektrik maksimal yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar LPG, dengan tegangan listrik 180 adalah sebesar 23,26%. Sehingga setelah dilakukan variasi, efisiensi yang dihasilkan oleh *LPG engine-generator set* dengan menggunakan bahan bakar LPG mengalami peningkatan sebesar 21,4%.

Sedangkan efisiensi yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *syn-gas* saat kondisi belum divariasikan, dengan tegangan listrik 180 adalah sebesar 13,08%. Dan efisiensi pada beban elektrik maksimal yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *syn-gas*, dengan tegangan listrik 185 adalah sebesar 33,09%. Sehingga setelah dilakukan variasi, efisiensi yang dihasilkan oleh *LPG engine-generator set* dengan menggunakan bahan bakar *syn-gas* mengalami peningkatan sebesar 154,5%.



Gambar 4.36 Grafik komparasi efisiensi pada *LPG engine-generator set* fungsi tekanan masuk bahan bakar, saat menggunakan bahan bakar LPG dan *syn-gas*.



Gambar 4.36 menunjukkan *engine* dengan bahan bakar LPG dan *syn-gas*, mengalami penurunan efisiensi setelah dilakukan variasi derajat pengapian dan tekanan masuk bahan bakar. Saat *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* pada beban elektrik maksimal, memiliki efisiensi yang lebih tinggi jika dibandingkan saat menggunakan bahan bakar LPG pada kondisi sebelum variasi. Dimana *LPG engine-generator set* saat menggunakan bahan bakar LPG sebelum divariasikan (19,16%) jika dibandingkan saat menggunakan bahan bakar *syn-gas* pada beban maksimal (33,09%) akan terjadi kenaikan efisiensi sebesar 73,7%, seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.1.

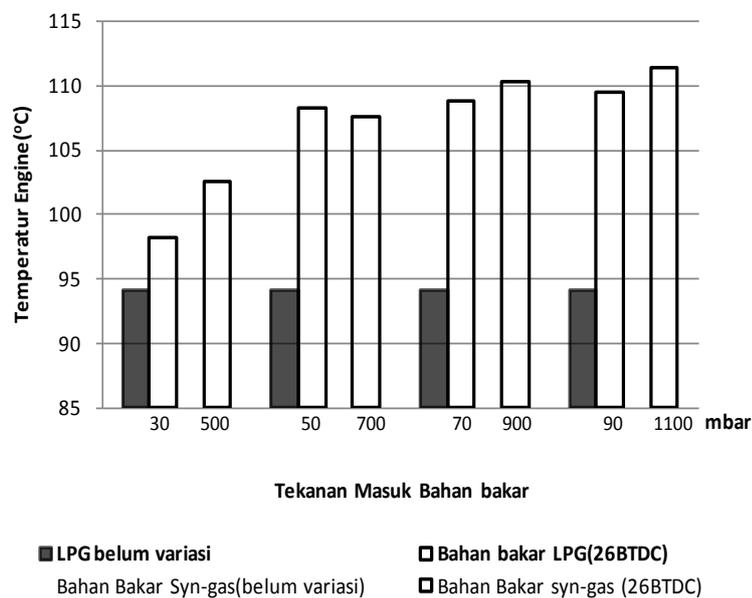
Pada gambar 4.36 menunjukkan bahwa *engine* dengan bahan bakar LPG dan *syn-gas*, mengalami peningkatan efisiensi *thermal* setelah dilakukan variasi derajat pengapian dan tekanan masuk bahan bakar. Efisiensi *thermal engine* pada beban elektrik maksimal, saat menggunakan bahan bakar *syn-gas* lebih tinggi jika dibandingkan saat *engine* menggunakan bahan bakar LPG. Hal ini dikarenakan nilai kalor dari *syn-gas* gasifikasi batubara ($LHV_{syn-gas} : 5,3 \text{ MJ/m}^3$) lebih rendah dari kalor bahan bakar LPG ($LHV_{LPG} : 45,7 \text{ MJ/m}^3$). Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Ajay et al (2010), yaitu menyebutkan bahwa *engine* akan mengalami peningkatan efisiensi *thermal* jika menggunakan bahan bakar *syn-gas*.

4.5.4 Analisa Komparasi Temperatur *Engine* Dari *LPG engine-generator set* Saat Menggunakan Bahan Bakar LPG dan *Syn-gas*

Dari gambar 4.37 menunjukkan temperatur *engine* yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar LPG saat kondisi belum divariasikan, dengan tegangan listrik 180 adalah sebesar $94,1^{\circ}\text{C}$. Sedangkan temperatur *engine* pada beban elektrik maksimal yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar LPG, dengan tegangan listrik 180 adalah sebesar $108,7^{\circ}\text{C}$. Sehingga setelah dilakukan variasi pada beban maksimum, temperatur *engine* yang dihasilkan oleh *LPG engine-generator set* dengan menggunakan bahan bakar LPG mengalami peningkatan sebesar 15,5%.



Sedangkan temperatur *engine* yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *syn-gas* saat kondisi belum divariasikan, dengan tegangan listrik 180 adalah sebesar $97,2^{\circ}\text{C}$. Dan temperatur *engine* pada beban elektrik maksimal yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *syn-gas*, dengan tegangan listrik 185 adalah sebesar $110,3^{\circ}\text{C}$. Sehingga setelah dilakukan variasi pada beban maksimum, temperatur *engine* yang dihasilkan oleh *LPG engine-generator set* dengan menggunakan bahan bakar *syn-gas* mengalami peningkatan sebesar 13,5%.



Gambar 4.37 Grafik komparasi temperatur *engine* pada *LPG engine-generator set fungsi* tekanan masuk bahan bakar, saat menggunakan bahan bakar LPG dan *syn-gas*

Gambar 4.37 menunjukkan *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* memiliki temperatur *engine* yang lebih tinggi jika dibandingkan saat menggunakan bahan bakar LPG. Dimana temperatur secara rata-rata *engine* menggunakan bahan bakar LPG saat beban maksimum sebesar $106,1^{\circ}\text{C}$ dan temperatur secara rata-rata *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* saat beban maksimum sebesar ($107,9^{\circ}\text{C}$), sehingga terjadi kenaikan temperatur *engine* sebesar 1,7%, seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.2.



Tabel 4.2 Komparasi temperatur dan emisi *LPG engine-generator set* saat menggunakan bahan bakar LPG dan *Syn-gas*, pada beban maksimum dengan tegangan listrik 180 - 185 volt.

Bahan Bakar	No.	Beban Maksimal	Terjadi Pada Variasi		Voltase	Emisi		Temperatur (°C)			
		(watt)	Tekanan Masuk	Sudut Pengapian	(volt)	CO (%)	HC (ppm)	engine	oli	gas buang	
LPG		2000	30 (belum variasi) mbar	20° BTDC	180	0.007	5	94.1	73.1	180.3	
	1	2500	30 mbar	26° BTDC	180	0.014	4	98.1	84.3	192.1	
	2	3000	50 mbar	26° BTDC	180	0.015	5	108.2	88.4	197.2	
	3	4000	70 mbar	26° BTDC	180	0.025	5	108.7	95.3	198.1	
	4	2500	90 mbar	26° BTDC	180	0.015	10	109.5	92.1	197.2	
	Rata-rata pada beban elektrik maksimal di sudut pengapian 26° sebelum TMA						0.0173	6	106.1	90.0	196.2
	Kenaikkan/penurunan pada beban elektrik maksimal terhadap kondisi belum variasi (%)						257.1	0.0	15.5	30.4	9.9
Syn-gas		1000	500 (belum variasi) mbar	20° BTDC	180	0.001	0	97.2	77.3	194.1	
	1	1500	500 mbar	26° BTDC	180	0.011	0	102.5	85.2	199.1	
	2	1500	700 mbar	26° BTDC	185	0.006	0	107.5	88.9	200.6	
	3	2000	900 mbar	26° BTDC	185	0.012	0	110.3	95.9	203.4	
	4	1500	1100 mbar	26° BTDC	180	0.008	0	111.3	93.2	204.5	
	Rata-rata pada beban elektrik maksimal di sudut pengapian 26° sebelum TMA						0.0093	0.0	107.9	90.8	201.9
	Kenaikkan/penurunan pada beban elektrik maksimal terhadap kondisi belum variasi (%)						2300.0	-	13.5	24.1	4.8
Kenaikkan/penurunan secara rata-rata saat menggunakan bahan bakar <i>syn-gas</i> terhadap saat menggunakan bahan bakar LPG pada beban elektrik maksimal di sudut pengapian 26° sebelum TMA (%)						-46.4	-100.0	1.7	0.9	2.9	

Pada umumnya semakin besar jumlah *syn-gas* yang masuk ke ruang bakar menyebabkan temperatur *engine* meningkat. Hal ini dikarenakan kecepatan perambatan nyala api (*flame speed*) bahan bakar *syn-gas* yang lebih rendah dibandingkan bahan bakar LPG. Ketika terjadi perambatan api yang rendah selama proses pembakaran didalam ruang bakar, maka kalor atau energi yang terdapat pada bahan bakar *syn-gas* tidak dapat dikonversi menjadi kerja secara maksimal dan sebagian besar hilang pada dinding silinder. Peristiwa hilangnya kalor atau energi pada dinding silinder menyebabkan temperatur dinding silinder akan semakin meningkat.

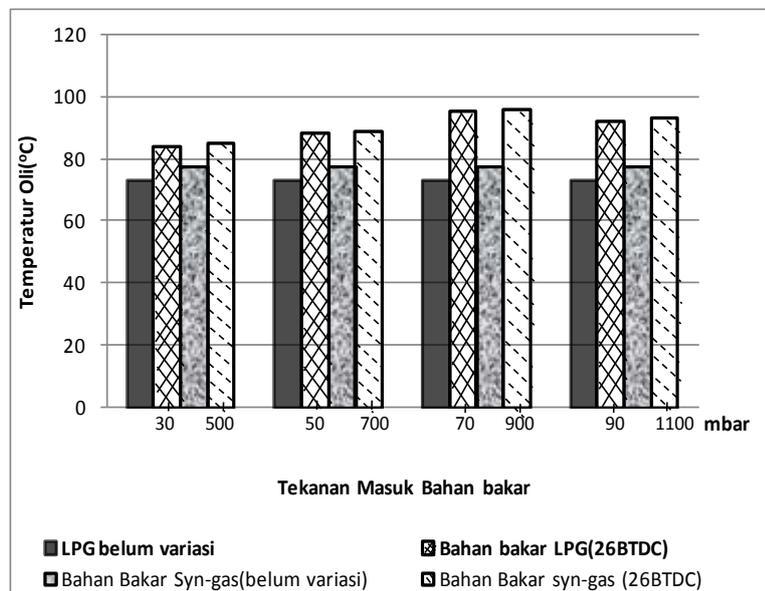
4.5.5 Analisa Komparasi Temperatur Oli Pelumas dari *LPG engine-generator set* Saat Menggunakan Bahan Bakar LPG dan *Syn-gas*

Dari gambar 4.38 menunjukkan temperatur oli pelumas yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar LPG saat kondisi belum divariasikan, dengan tegangan listrik 180 adalah sebesar 73,1°C. Sedangkan temperatur oli pelumas pada beban elektrik maksimal yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar LPG, dengan tegangan listrik 180 adalah sebesar 95,3°C. Sehingga setelah dilakukan variasi pada beban maksimum,



temperatur oli pelumas yang dihasilkan oleh *LPG engine-generator set* dengan menggunakan bahan bakar LPG mengalami peningkatan sebesar 30,4%.

Sedangkan temperatur oli pelumas yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *syn-gas* saat kondisi belum divariasikan, dengan tegangan listrik 180 adalah sebesar 77,3°C. Dan temperatur oli pelumas pada beban elektrik maksimal yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *syn-gas*, dengan tegangan listrik 185 adalah sebesar 95,9°C. Sehingga setelah dilakukan variasi pada beban maksimum, temperatur oli pelumas yang dihasilkan oleh *LPG engine-generator set* dengan menggunakan bahan bakar *syn-gas* mengalami peningkatan sebesar 24,1%.



Gambar 4.38 Grafik komparasi temperatur oli pelumas pada *LPG engine-generator set* fungsi tekanan masuk bahan bakar, saat menggunakan bahan bakar LPG dan *syn-gas*

Gambar 4.38 menunjukkan *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* memiliki temperatur oli pelumas yang lebih tinggi jika dibandingkan saat menggunakan bahan bakar LPG. Dimana temperatur secara rata-rata *engine* menggunakan bahan bakar LPG saat beban maksimum sebesar 90°C dan temperatur secara rata-rata *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* saat beban maksimum sebesar 90,8°C, sehingga terjadi kenaikan temperatur oli pelumas sebesar 0,9%, seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.2.



Pada umumnya semakin besar jumlah *syn-gas* yang masuk ke ruang bakar menyebabkan temperatur oli pelumas meningkat. Hal ini dikarenakan kecepatan perambatan nyala api (*flame speed*) bahan bakar *syn-gas* yang lebih rendah dibandingkan bahan bakar LPG. Ketika terjadi perambatan api yang rendah selama proses pembakaran didalam ruang bakar, maka kalor atau energi yang terdapat pada bahan bakar *syn-gas* tidak dapat dikonversi menjadi kerja secara maksimal dan sebagian besar hilang pada dinding silinder. Peristiwa hilangnya kalor atau energi pada dinding silinder menyebabkan temperatur dinding silinder akan semakin meningkat, sehingga menimbulkan kenaikan temperatur oli pelumas meningkat.

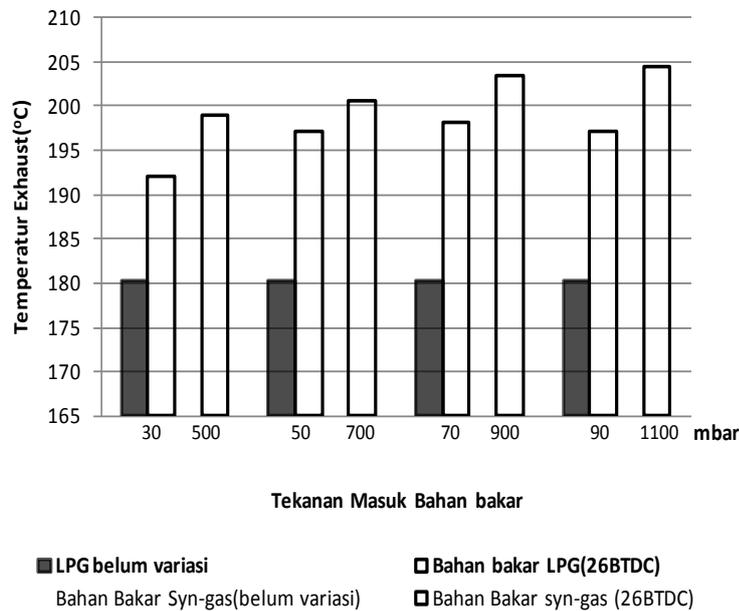
4.5.6 Analisa Komparasi Temperatur *Exhaust* dari *LPG engine-generator set* Saat Menggunakan Bahan Bakar LPG dan *Syn-gas*

Dari gambar 4.39 menunjukkan temperatur *exhaust* yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar LPG saat kondisi belum divariasikan, dengan tegangan listrik 180 adalah sebesar 180,3°C. Sedangkan temperatur *exhaust* pada beban elektrik maksimal yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar LPG, dengan tegangan listrik 180 adalah sebesar 198,1°C. Sehingga setelah dilakukan variasi pada beban maksimum, temperatur *exhaust* yang dihasilkan oleh *LPG engine-generator set* dengan menggunakan bahan bakar LPG mengalami peningkatan sebesar 9,9%.

Sedangkan temperatur *exhaust* yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *syn-gas* saat kondisi belum divariasikan, dengan tegangan listrik 180 adalah sebesar 194,1°C. Dan temperatur *exhaust* pada beban elektrik maksimal yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *syn-gas*, dengan tegangan listrik 185 adalah sebesar 203,4°C. Sehingga setelah dilakukan variasi pada beban maksimum, temperatur *exhaust* yang dihasilkan oleh *LPG engine-generator set* dengan menggunakan bahan bakar *syn-gas* mengalami peningkatan sebesar 4,8%.



Gambar 4.39 menunjukkan *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* memiliki temperatur *exhaust* yang lebih tinggi jika dibandingkan saat menggunakan bahan bakar LPG. Dimana temperatur secara rata-rata *engine* menggunakan bahan bakar LPG saat beban maksimum sebesar 196,2°C dan temperatur secara rata-rata *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* saat beban maksimum sebesar 201,9°C, sehingga terjadi kenaikan temperatur *exhaust* sebesar 2,9%, seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.2.



Gambar 4.39 Grafik komparasi temperatur *exhaust* pada *LPG engine-generator set* fungsi tekanan masuk bahan bakar, saat menggunakan bahan bakar LPG dan *syn-gas*

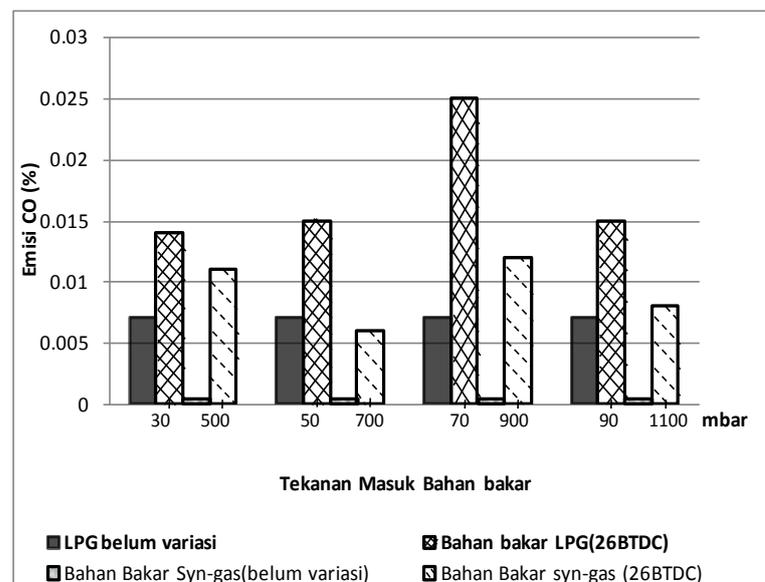
Pada gambar 4.39 menunjukkan bahwa pada dasarnya temperatur *exhaust* ketika *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* selalu lebih tinggi daripada ketika menggunakan bahan LPG. Hal ini dikarenakan nilai HHV lebih rendah daripada LPG, selain itu juga dikarenakan kecepatan rambat (*flame speed*) *syn-gas* yang lebih rendah daripada LPG, sehingga proses pembakaran terjadi pada akhir langkah ekspansi dari torak.



4.5.7 Analisa Komparasi Emisi CO dari LPG engine-generator set Saat Menggunakan Bahan Bakar LPG dan Syn-gas

Dari gambar 4.40 menunjukkan emisi CO yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar LPG saat kondisi belum divariasikan, dengan tegangan listrik 180 adalah sebesar 0,007%. Sedangkan emisi CO pada beban elektrik maksimal yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar LPG, dengan tegangan listrik 180 adalah sebesar 0,025%. Sehingga setelah dilakukan variasi pada beban maksimum, emisi CO yang dihasilkan oleh *LPG engine-generator set* dengan menggunakan bahan bakar LPG mengalami peningkatan sebesar 257,1%.

Sedangkan emisi CO yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *syn-gas* saat kondisi belum divariasikan, dengan tegangan listrik 180 adalah sebesar 0,001%. Dan emisi CO pada beban elektrik maksimal yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *syn-gas*, dengan tegangan listrik 185 adalah sebesar 0,012%. Sehingga setelah dilakukan variasi pada beban maksimum, emisi CO yang dihasilkan oleh *LPG engine-generator set* dengan menggunakan bahan bakar *syn-gas* mengalami peningkatan sebesar 2300%.



Gambar 4.40 Grafik komparasi emisi CO pada *LPG engine-generator set* fungsi tekanan masuk bahan bakar, saat menggunakan bahan bakar LPG dan *syn-gas*



Gambar 4.40 menunjukkan *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* memiliki emisi CO yang lebih tinggi jika dibandingkan saat menggunakan bahan bakar LPG. Dimana temperatur secara rata-rata *engine* menggunakan bahan bakar LPG saat beban maksimum sebesar 0,017% dan temperatur secara rata-rata *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* saat beban maksimum sebesar 0,009%, sehingga terjadi penurunan emisi CO sebesar 46,4%, seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.2.

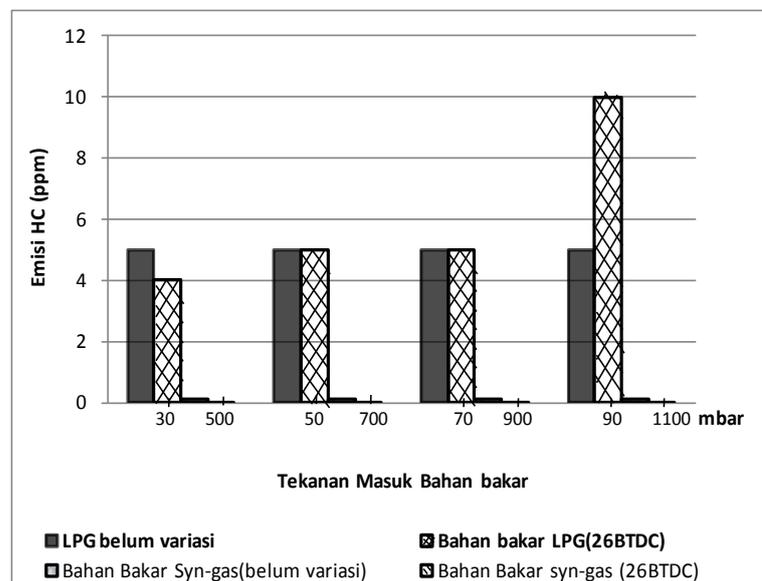
Pada gambar 4.40 dapat disimpulkan bahwa ketika *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* memiliki kadar emisi CO yang lebih rendah daripada saat menggunakan bahan bakar LPG. Dengan semakin meningkatnya jumlah bahan bakar yang masuk kedalam ruang bakar, dalam hal ini semakin meningkatnya tekanan masuk bahan bakar maka emisi CO juga semakin menurun. Hal ini disebabkan proses bahan bakar yang masuk ke ruang bakar semakin homogen, sehingga walaupun *syn-gas* memiliki *flame speed* yang lebih rendah daripada LPG akan tetap terjadi proses pembakaran yang sempurna. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Ajay et al (2010), yaitu menyebutkan bahwa *engine* akan mengalami penurunan nilai emisi CO saat *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas*.

4.5.8 Analisa Komparasi Emisi HC dari LPG engine-generator set Saat Menggunakan Bahan Bakar LPG dan Syn-gas

Dari gambar 4.41 menunjukkan emisi HC yang dihasilkan LPG *engine-generator set* menggunakan bahan bakar LPG saat kondisi belum divariasikan, dengan tegangan listrik 180 adalah sebesar 5ppm. Sedangkan emisi HC pada beban elektrik maksimal yang dihasilkan LPG *engine-generator set* menggunakan bahan bakar LPG, dengan tegangan listrik 180 adalah sebesar 5ppm. Sehingga setelah dilakukan variasi pada beban maksimum, emisi HC yang dihasilkan oleh LPG *engine-generator set* dengan menggunakan bahan bakar LPG cenderung tidak mengalami perubahan atau peningkatan sebesar 0%.

Sedangkan emisi HC yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *syn-gas* saat kondisi belum divariasikan, dengan tegangan listrik 180 adalah sebesar 0ppm. Dan emisi HC pada beban elektrik maksimal yang dihasilkan *LPG engine-generator set* menggunakan bahan bakar *syn-gas*, dengan tegangan listrik 185 a dalah sebesar 0ppm. Sehingga setelah dilakukan variasi pada beban maksimum, emisi HC yang dihasilkan oleh *LPG engine-generator set* dengan menggunakan bahan bakar *syn-gas* cenderung tidak mengalami perubahan atau peningkatan sebesar 0%.

Gambar 4.41 menunjukkan *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* memiliki emisi HC yang lebih tinggi jika dibandingkan saat menggunakan bahan bakar LPG. Dimana temperatur secara rata-rata *engine* menggunakan bahan bakar LPG saat beban maksimum sebesar 5ppm dan temperatur secara rata-rata *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* saat beban maksimum sebesar 0ppm, sehingga cenderung tidak muncul emisi HC atau penurunan emisi HC sebesar 100%, seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.2.



Gambar 4.41 Grafik komparasi HC gas buang pada *LPG engine-generator set* fungsi tekanan masuk bahan bakar, saat menggunakan bahan bakar LPG dan *syn-gas*



Pada gambar 4.41 bahwa ketika *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas* memiliki kadar emisi HC yang jauh lebih rendah daripada saat menggunakan bahan bakar LPG. Hal ini disebabkan *syn-gas* memiliki berat jenis yang lebih ringan daripada LPG, sehingga ketika terjadi proses pencampuran antara bahan bakar dan udara, *syn-gas* lebih homogen daripada LPG. Hal ini menyebabkan proses pembakaran menjadi lebih sempurna, sehingga emisi HC yang dihasilkan oleh *engine* yang menggunakan bahan bakar *syn-gas* lebih rendah daripada ketika menggunakan LPG. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Ajay et al (2010), yaitu menyebutkan bahwa *engine* akan mengalami penurunan nilai emisi HC saat *engine* menggunakan bahan bakar *syn-gas*.



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a. Dengan sistem *ECU programmable*, *gas engine* dengan spesifikasi 4-langkah, 1 buah silinder bertipe *LPG engine-generator set* bisa beroperasi dengan menggunakan bahan bakar 100% *syn-gas* gasifikasi batubara.
- b. Secara operasional *LPG engine-generator set* saat menggunakan bahan bakar *syn-gas* gasifikasi batubara mengalami *de-rating* sebesar 50%, jika dibandingkan saat menggunakan bahan bakar LPG.
- c. Ketika *engine* menggunakan bahan bakar LPG dilakukan variasi tekanan masuk dan derajat pengapian, beberapa kinerja *engine* mengalami beberapa perubahan jika dibandingkan terhadap kondisi awal, antara lain :
 - Peningkatan daya poros sebesar 29,1%.
 - Peningkatan torsi sebesar 20,2%.
 - Peningkatan BMEP 20,2%.
 - Penurunan SFC sebesar 11,8%.
 - Peningkatan efisiensi *thermal* sebesar 11,3%.
- d. Ketika dilakukan variasi tekanan masuk dan derajat pengapian, beberapa kinerja *engine* saat menggunakan bahan bakar *syn-gas* mengalami beberapa perubahan jika dibandingkan terhadap pada kondisi awal saat menggunakan bahan bakar *syn-gas*, antara lain :
 - Peningkatan daya sebesar 76,5%.
 - Peningkatan torsi sebesar 66,6%.
 - Peningkatan BMEP 66,6%.
 - Penurunan SFC sebesar 20,5%.
 - Peningkatan efisiensi *thermal* sebesar 79,8%.



- e. Pada saat penggunaan bahan bakar *syn-gas* gasifikasi batubara, mengalami beberapa perubahan jika dibandingkan terhadap kondisi awal (sebelum dilakukan variasi) saat menggunakan bahan bakar LPG, antara lain :
- Peningkatan temperatur *engine* sebesar 1,7%.
 - Peningkatan temperatur oli pelumas sebesar 0,9%.
 - Peningkatan temperatur *exhaust* sebesar 2,9%.
 - Penurunan emisi karbon monoksida (CO) sebesar 46,4%.
 - Penurunan emisi hydro carbon (HC) sebesar 100%.

5.2 Kritik dan Saran

Dalam pengoperasian *LPG engine-generator set*, selalu perlu mengatur bukaan dari *pressure regulator*. Sehingga agar kinerja dari *LPG engine-generator set* lebih maksimal perlu dipasang *control valve* sebagai pengganti *pressure regulator* tersebut.

LAMPIRAN 1

Data Spesifikasi Bahan Bakar

1.A Data spesifikasi Bahan bakar LPG



SPESIFIKASI LPG

Sesuai SK Dirjen Migas No. 26525.K/10/DJM.T/2009 Tanggal 31 Desember 2009

Properties	Metode Uji	LPG Mix	LPG Propana	LPG Butana
Berat Jenis Relatif pada 60/60 °F	ASTM D -1657	Dilaporkan	Dilaporkan	Dilaporkan
Tekanan Uap pada 100 °F, psig	ASTM D -1267	Max. 145	Max. 210	Max. 70
Weathering Test pada 36 °F, % vol	ASTM D -1837	Min. 95	Min. 95	Min. 95
Korosi Bilah Tembaga, 1 hr pada 100 °F	ASTM D -1838	Max. No. 1	Max. No. 1	Max. No. 1
Total Sulfur, grains/100 cuft	ASTM D -2784	Max. 15	Max. 15	Max. 15
Kandungan Air	Visual	No free water	-	-
Komposisi: - C ₂ , % vol	ASTM D-2163	Max. 0,8	-	-
- C ₃ , % vol		Min. 97,0	Min. 95	-
- C ₄ , % vol			Max. 2,5	Min. 97,5
- C ₅ , % vol		Max. 2,0		Max. 2,5
- C ₆₊ , % vol				Nil
Etil/Butil Merkaptan, ml/1000 AG	-	50	50	50

1.B Data spesifikasi Bahan Bakar *Syn-gas* Gasifikasi Batubara



LEMIGAS

Kelompok Teknologi Analisis Gas

JALAN CILEDUG RAYA KAY. 109 – CIPULIR – KEBAYORAN LAMA – JAKARTA SELATAN 12230
Telepon 021-7394422, 021-7393958 pes. 1661 / 1660 Fax 021-7246150



HASIL UJI TEST RESULT

Nomor Seri / Serial Number : 27/9.2/1/2013
Nomor Laporan (LHU) / Report Number : 24/9.2/LHU/1/2013
Nomor Percontoh / Sample Number : 49/9.2/CA/2013
Halaman / Page : 1 dari / of 1

ANALISIS KOMPOSISI SYN GAS

Hasil laporan ini hanya berlaku untuk percontoh yang diuji dan tidak dapat digunakan sebagai iklan

No	Komposisi	Satuan	Hasil	Metode
1.	Analisa Komposisi Gas			
	☞ Nitrogen	% Mol	45.6989	GPA 2261:2000
	☞ Karbondioksida		6.6083	
	☞ Karbonmonoksida		28.2484	
	☞ Oksigen		2.6204	
	☞ Hidrogen		16.4593	
	☞ Metana		0,0000	
	☞ Etana		0.2010	
	☞ Propana		0.1490	
	☞ Iso Butana		0,0000	
	☞ N-Butana		0.0148	
	☞ Iso Pentana		0,0000	
	☞ N-Pentana		0,0000	
	☞ Heksana plus		0,0000	
	Relatif Density		0.8607	GPA 2172:2009
	Gross Heating Value (GHV)	(BTU/FT ³)	151.6844	
	Net Heating Value (NHV)	(BTU/FT ³)	142.7699	
	Compressibility Factor (Z)		0.9996	

Keterangan:

No. Sampel : 49/9.2/CA/2013

Manager Teknik

Dra. Yayun Andriani, M.Si
NIP 19660424 199103 2 001

Laporan ini hanya berdasarkan percontoh yang diuji, tidak untuk diiklankan dan tidak boleh digandakan
This report relates only to the sample tested, may not be used for advertising purpose and not to be copied.

LAMPIRAN 2

Data Pengujian dan Perhitungan *LPG Engine-Generator Set* dengan Bahan Bakar LPG

2.A. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada variasi derajat pengapian 20° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 30 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
30 mbar	0	2995.36775	0.000	0.000	0.000	-	-	71.261
	500	4236.0897	0.635	51.442	16.006	0.607	9.470	50.389
	1000	5188.12913	1.269	120.990	37.646	0.372	15.464	41.143
	1500	5990.7355	1.650	189.924	59.095	0.330	17.409	35.631
	2000	6697.8459	2.031	239.624	74.559	0.300	19.165	31.869
	2500	7337.12258	2.221	267.855	83.344	0.300	19.135	29.092
	3000	7924.99815	2.518	308.579	96.015	0.286	20.078	26.934
	3500	8472.17939	2.733	338.366	105.283	0.282	20.386	25.195
	4000	8986.10325	2.856	363.824	113.205	0.286	20.088	23.754
	4500	9472.18452	2.966	387.176	120.471	0.290	19.786	22.535
5000								
Rata-rata(LPG belum variasi)		6730.076	1.888	226.778	70.562	0.305	16.098	35.780

2.B. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada variasi derajat pengapian 20° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 50 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
50 mbar	0	4236.0897	0.000	0.000	0.000	-	-	50.389
	500	5188.12913	0.670	54.492	16.955	0.704	8.161	41.143
	1000	5990.7355	1.340	128.083	39.853	0.407	14.136	35.631
	1500	6697.8459	1.904	216.331	67.312	0.320	17.967	31.869
	2000	7337.12258	2.158	252.401	78.535	0.309	18.589	29.092
	2500	7924.99815	2.348	275.371	85.682	0.307	18.728	26.934
	3000	8472.17939	2.592	304.210	94.656	0.297	19.334	25.195
	3500	8986.10325	2.909	350.578	109.083	0.281	20.460	23.754
	4000	9472.18452	3.047	368.502	114.660	0.283	20.327	22.535
	4500	9934.51093	3.170	404.920	125.992	0.285	20.167	21.486
5000								
Rata-rata		7423.99	2.014	235.489	73.273	0.319	15.787	30.803
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap LPG belum variasi		10.311	6.668	3.841	3.841	4.549	-1.933	-13.911

2.C. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada variasi derajat pengapian 20° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 70 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
70 mbar	0	5188.12913	0.000	0.000	0.000	-	-	41.143
	500	5990.7355	0.705	57.665	17.943	0.772	7.440	35.631
	1000	6697.8459	1.410	134.880	41.968	0.432	13.309	31.869
	1500	7337.12258	1.876	210.528	65.506	0.356	16.159	29.092
	2000	7924.99815	2.218	250.625	77.982	0.325	17.688	26.934
	2500	8472.17939	2.539	287.166	89.352	0.303	18.939	25.195
	3000	8986.10325	2.839	323.612	100.692	0.288	19.964	23.754
	3500	9472.18452	3.117	357.139	111.124	0.276	20.798	22.535
	4000	9934.51093	3.357	391.034	121.671	0.269	21.356	21.486
	4500	10376.2583	3.491	411.431	128.018	0.270	21.263	20.571
5000								
Rata-rata		8038.007	2.155	242.408	75.426	0.329	15.691	27.821
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap LPG belum variasi		19.434	14.158	6.892	6.892	7.805	-2.526	-22.245

2.D. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada variasi derajat pengapian 20° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 90 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
90 mbar	0	5990.7355	0.000	0.000	0.000	-	-	35.631
	500	6697.8459	0.508	42.301	13.162	1.199	4.791	31.869
	1000	7337.12258	1.142	119.262	37.109	0.584	9.841	29.092
	1500	7924.99815	1.574	183.545	57.110	0.458	12.553	26.934
	2000	8472.17939	1.904	227.800	70.880	0.405	14.204	25.195
	2500	8986.10325	2.158	267.200	83.140	0.379	15.177	23.754
	3000	9472.18452	2.345	296.236	92.174	0.367	15.646	22.535
	3500	9934.51093	2.444	316.349	98.433	0.370	15.546	21.486
	4000	10376.2583	2.514	329.556	102.542	0.375	15.313	20.571
	4500	10799.952	2.556	337.215	104.925	0.384	14.960	19.764
5000								
Rata-rata		8599.189	1.715	211.946	65.948	0.452	11.803	25.683
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap LPG belum variasi		27.773	-9.182	-6.540	-6.540	48.057	-26.680	-28.220

2.E. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada variasi derajat pengapian 22° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 30 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
30 mbar	0	2995.36775	0.000	0.000	0.000	-	-	71.261
	500	4236.0897	0.723	58.587	18.229	0.533	10.785	50.389
	1000	5188.12913	1.410	134.156	41.743	0.334	17.182	41.143
	1500	5990.7355	1.904	219.143	68.187	0.286	20.088	35.631
	2000	6697.8459	2.158	254.731	79.260	0.282	20.363	31.869
	2500	7337.12258	2.387	287.602	89.488	0.280	20.557	29.092
	3000	7924.99815	2.566	314.123	97.740	0.281	20.460	26.934
	3500	8472.17939	2.798	346.301	107.752	0.275	20.875	25.195
	4000	8986.10325	2.920	371.087	115.465	0.280	20.534	23.754
	4500	9472.18452	3.110	406.051	126.344	0.277	20.751	22.535
5000								
Rata-rata		6730.076	1.998	239.178	74.421	0.283	17.159	35.780
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap LPG belum variasi		0.000	5.809	5.468	5.468	-7.378	6.593	0.000

2.F. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada variasi derajat pengapian 22° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 50 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
50 mbar	0	4236.0897	0.000	0.000	0.000	-	-	50.389
	500	5188.12913	0.770	62.971	19.593	0.613	9.381	41.143
	1000	5990.7355	1.475	140.842	43.823	0.369	15.557	35.631
	1500	6697.8459	2.035	230.211	71.631	0.299	19.205	31.869
	2000	7337.12258	2.310	263.653	82.036	0.289	19.901	29.092
	2500	7924.99815	2.463	287.013	89.305	0.293	19.639	26.934
	3000	8472.17939	2.715	316.117	98.361	0.284	20.254	25.195
	3500	8986.10325	2.956	356.748	111.003	0.276	20.787	23.754
	4000	9472.18452	3.061	368.658	114.709	0.281	20.422	22.535
	4500	9934.51093	3.236	413.298	128.598	0.279	20.584	21.486
5000								
Rata-rata		7423.99	2.102	243.951	75.906	0.298	16.573	30.803
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap LPG belum variasi		10.311	11.341	7.573	7.573	-2.294	2.950	-13.911

2.G. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada variasi derajat pengapian 22° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 70 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
70 mbar	0	5188.12913	0.000	0.000	0.000	-	-	41.143
	500	5990.7355	0.800	66.575	20.715	0.681	8.437	35.631
	1000	6697.8459	1.504	142.774	44.424	0.405	14.187	31.869
	1500	7337.12258	2.064	228.352	71.052	0.323	17.775	29.092
	2000	7924.99815	2.427	272.209	84.698	0.297	19.352	26.934
	2500	8472.17939	2.742	308.622	96.029	0.281	20.454	25.195
	3000	8986.10325	3.011	347.092	107.998	0.271	21.179	23.754
	3500	9472.18452	3.213	378.877	117.888	0.268	21.438	22.535
	4000	9934.51093	3.398	402.521	125.245	0.266	21.616	21.486
	4500	10376.2583	3.584	426.994	132.860	0.263	21.830	20.571
5000								
Rata-rata		8038.007	2.274	257.402	80.091	0.306	16.627	27.821
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap LPG belum variasi		19.434	20.459	13.504	13.504	0.083	3.284	-22.245

2.H. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada variasi derajat pengapian 22° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 90 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
90 mbar	0	5990.7355	0.000	0.000	0.000	-	-	35.631
	500	6697.8459	0.665	54.263	16.884	0.916	6.275	31.869
	1000	7337.12258	1.326	127.529	39.681	0.503	11.420	29.092
	1500	7924.99815	1.726	199.588	62.102	0.417	13.768	26.934
	2000	8472.17939	1.980	237.405	73.869	0.389	14.772	25.195
	2500	8986.10325	2.172	262.728	81.748	0.376	15.277	23.754
	3000	9472.18452	2.398	295.142	91.834	0.359	15.998	22.535
	3500	9934.51093	2.560	319.378	99.375	0.353	16.286	21.486
	4000	10376.2583	2.623	335.479	104.385	0.360	15.979	20.571
	4500	10799.952	2.659	348.110	108.315	0.369	15.559	19.764
5000								
Rata-rata		8599.189	1.811	217.962	67.819	0.404	12.533	25.683
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap LPG belum variasi		27.773	-4.075	-3.887	-3.887	32.398	-22.143	-28.220

2.I. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada variasi derajat pengapian 24° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 30 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
30 mbar	0	2995.36775	0.000	0.000	0.000	-	-	71.261
	500	4236.0897	0.740	60.122	18.707	0.520	11.048	50.389
	1000	5188.12913	1.410	114.882	35.746	0.334	17.182	41.143
	1500	5990.7355	1.904	197.872	61.568	0.286	20.088	35.631
	2000	6697.8459	2.158	236.086	73.459	0.282	20.363	31.869
	2500	7337.12258	2.412	282.526	87.908	0.277	20.775	29.092
	3000	7924.99815	2.566	311.636	96.966	0.281	20.460	26.934
	3500	8472.17939	2.821	339.244	105.557	0.273	21.043	25.195
	4000	8986.10325	2.951	356.798	111.019	0.277	20.757	23.754
	4500	9472.18452	3.068	377.004	117.306	0.281	20.469	22.535
5000								
Rata-rata		6730.076	2.003	227.617	70.824	0.281	17.219	35.780
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap LPG belum variasi		0.000	6.100	0.370	0.370	-7.935	6.960	0.000

2.J. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada variasi derajat pengapian 24° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 50 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
50 mbar	0	4236.0897	0.000	0.000	0.000	-	-	50.389
	500	5188.12913	0.740	60.635	18.867	0.637	9.020	41.143
	1000	5990.7355	1.446	134.454	41.836	0.377	15.252	35.631
	1500	6697.8459	1.957	213.085	66.302	0.311	18.466	31.869
	2000	7337.12258	2.296	254.719	79.256	0.291	19.779	29.092
	2500	7924.99815	2.513	291.162	90.596	0.287	20.044	26.934
	3000	8472.17939	2.765	330.731	102.908	0.279	20.622	25.195
	3500	8986.10325	2.956	352.314	109.623	0.276	20.787	23.754
	4000	9472.18452	3.212	384.622	119.676	0.268	21.429	22.535
	4500	9934.51093	3.279	402.145	125.128	0.275	20.862	21.486
5000								
Rata-rata		7423.99	2.116	242.387	75.419	0.300	16.626	30.803
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap LPG belum variasi		10.311	12.103	6.883	6.883	-1.714	3.281	-13.911

2.K. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada variasi derajat pengapian 24° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 70 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
70 mbar	0	5188.12913	0.000	0.000	0.000	-	-	41.143
	500	5990.7355	0.800	66.002	20.537	0.681	8.437	35.631
	1000	6697.8459	1.561	143.701	44.713	0.390	14.733	31.869
	1500	7337.12258	2.145	235.593	73.305	0.311	18.479	29.092
	2000	7924.99815	2.573	286.767	89.228	0.280	20.517	26.934
	2500	8472.17939	2.844	318.574	99.125	0.271	21.217	25.195
	3000	8986.10325	3.174	365.056	113.588	0.257	22.320	23.754
	3500	9472.18452	3.332	392.328	122.074	0.258	22.233	22.535
	4000	9934.51093	3.525	416.060	129.458	0.256	22.423	21.486
	4500	10376.2583	3.717	441.419	137.349	0.254	22.637	20.571
5000								
Rata-rata		8038.007	2.367	266.550	82.938	0.296	17.300	27.821
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap LPG belum variasi		19.434	25.379	17.538	17.538	-3.084	7.464	-22.245

2.L. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada variasi derajat pengapian 24° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 90 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
90 mbar	0	5990.7355	0.000	0.000	0.000	-	-	35.631
	500	6697.8459	0.622	50.951	15.854	0.979	5.869	31.869
	1000	7337.12258	1.298	124.400	38.707	0.514	11.177	29.092
	1500	7924.99815	1.726	198.889	61.885	0.417	13.768	26.934
	2000	8472.17939	1.980	237.035	73.754	0.389	14.772	25.195
	2500	8986.10325	2.158	259.386	80.709	0.379	15.177	23.754
	3000	9472.18452	2.350	288.468	89.758	0.367	15.679	22.535
	3500	9934.51093	2.482	308.030	95.844	0.364	15.792	21.486
	4000	10376.2583	2.623	334.549	104.096	0.360	15.979	20.571
	4500	10799.952	2.659	347.123	108.008	0.369	15.559	19.764
5000								
Rata-rata		8599.189	1.790	214.883	66.861	0.414	12.377	25.683
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap LPG belum variasi		27.773	-5.192	-5.245	-5.245	35.513	-23.113	-28.220

2.M. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada variasi derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 30 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
30 mbar	0	2995.36775	0.000	0.000	0.000	-	-	71.261
	500	4236.0897	0.776	63.051	19.619	0.497	11.574	50.389
	1000	5188.12913	1.590	144.627	45.001	0.297	19.373	41.143
	1500	5990.7355	1.930	199.162	61.970	0.282	20.356	35.631
	2000	6697.8459	2.218	239.457	74.508	0.275	20.928	31.869
	2500	7337.12258	2.437	275.679	85.778	0.274	20.994	29.092
	3000	7924.99815	2.662	307.081	95.549	0.271	21.225	26.934
	3500	8472.17939	2.866	337.616	105.050	0.269	21.380	25.195
	4000	8986.10325	3.092	367.207	114.257	0.264	21.744	23.754
	4500	9472.18452	3.227	386.480	120.254	0.267	21.532	22.535
5000								
Rata-rata		6730.076	2.080	232.036	72.199	0.269	17.911	35.780
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap LPG belum variasi		0.000	10.161	2.319	2.319	-11.754	11.260	0.000

2.N. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada variasi derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 50 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
50 mbar	0	4236.0897	0.000	0.000	0.000	-	-	50.389
	500	5188.12913	0.776	63.545	19.772	0.608	9.450	41.143
	1000	5990.7355	1.446	131.116	40.797	0.377	15.252	35.631
	1500	6697.8459	2.037	209.662	65.237	0.299	19.218	31.869
	2000	7337.12258	2.348	252.359	78.522	0.284	20.229	29.092
	2500	7924.99815	2.590	291.477	90.694	0.278	20.652	26.934
	3000	8472.17939	2.945	338.603	105.357	0.262	21.969	25.195
	3500	8986.10325	3.110	364.495	113.413	0.263	21.873	23.754
	4000	9472.18452	3.258	385.979	120.098	0.264	21.739	22.535
	4500	9934.51093	3.328	394.656	122.798	0.271	21.172	21.486
5000								
Rata-rata		7423.99	2.184	243.189	75.669	0.291	17.155	30.803
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap LPG belum variasi		10.311	15.671	7.237	7.237	-4.815	6.568	-13.911

2.O. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada variasi derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 70 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{ih} (%)	AVR
70 mbar	0	5188.12913	0.000	0.000	0.000	-	-	41.143
	500	5990.7355	0.838	68.923	21.445	0.650	8.839	35.631
	1000	6697.8459	1.735	158.463	49.306	0.351	16.370	31.869
	1500	7337.12258	2.200	241.059	75.006	0.303	18.953	29.092
	2000	7924.99815	2.546	282.276	87.831	0.283	20.303	26.934
	2500	8472.17939	2.922	325.757	101.360	0.264	21.801	25.195
	3000	8986.10325	3.250	372.144	115.793	0.251	22.856	23.754
	3500	9472.18452	3.402	400.139	124.504	0.253	22.699	22.535
	4000	9934.51093	3.656	428.904	133.455	0.247	23.258	21.486
	4500	10376.2583	3.826	447.475	139.233	0.247	23.303	20.571
5000								
Rata-rata		8038.007	2.437	272.514	84.793	0.285	17.838	27.821
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap LPG belum variasi		19.434	29.111	20.168	20.168	-6.681	10.809	-22.245

2.P. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada variasi derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 90 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{ih} (%)	AVR
90 mbar	0	5990.7355	0.000	0.000	0.000	-	-	35.631
	500	6697.8459	0.621	50.746	15.790	0.981	5.856	31.869
	1000	7337.12258	1.185	112.971	35.151	0.563	10.205	29.092
	1500	7924.99815	1.554	178.707	55.605	0.464	12.395	26.934
	2000	8472.17939	1.827	217.614	67.711	0.422	13.626	25.195
	2500	8986.10325	2.031	242.860	75.566	0.402	14.285	23.754
	3000	9472.18452	2.221	271.265	84.405	0.388	14.822	22.535
	3500	9934.51093	2.444	301.591	93.841	0.370	15.546	21.486
	4000	10376.2583	2.595	327.325	101.848	0.364	15.807	20.571
	4500	10799.952	2.623	340.012	105.796	0.374	15.352	19.764
5000								
Rata-rata		8599.189	1.710	204.309	63.571	0.433	11.789	25.683
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap LPG belum variasi		27.773	-9.417	-9.908	-9.908	41.723	-26.765	-28.220

LAMPIRAN 3

Data Pengujian dan Perhitungan *LPG Engine-Generator Set* dengan Bahan Bakar *Syn-gas*

3.A. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada variasi derajat pengapian 20° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 500 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
500 mbar	0	2725.951	0.000	0.000	0.000	-	-	10.850
	500	2837.259	0.305	33.393	10.390	6.112	6.786	10.425
	1000	2944.363	0.609	69.022	21.476	3.171	13.079	10.045
	1500	3519.187	1.234	142.967	44.484	1.871	22.164	8.405
	2000	-	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-	-	-
Rata-rata (<i>syn-gas</i> belum variasi)		3006.690	0.537	61.345	19.088	3.718	14.010	9.931

3.B. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada variasi derajat pengapian 20° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 700 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
700 mbar	0	3147.657	0.000	0.000	0.000	-	-	9.397
	500	3519.187	0.348	37.648	11.714	6.629	9.759	8.405
	1000	3690.955	0.660	74.298	23.118	3.669	17.629	8.013
	1500	4012.491	1.259	145.826	45.374	2.092	30.926	7.371
	2000	-	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-	-	-
Rata-rata		3592.572	0.567	64.443	20.052	4.130	19.438	8.297
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		19.486	5.548	5.049	5.049	11.084	38.747	-16.460

3.C. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada variasi derajat pengapian 20° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 900 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
900 mbar	0	3519.187	0.000	0.000	0.000	-	-	8.405
	500	3855.076	0.395	42.281	13.156	6.406	10.098	7.672
	1000	4012.491	0.777	86.628	26.954	3.388	19.093	7.371
	1500	4163.958	1.320	156.881	48.814	2.070	31.254	7.103
	2000	-	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-	-
Rata-rata		3887.678	0.623	71.447	22.231	3.955	20.148	7.638
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		29.301	16.021	16.467	16.467	6.365	43.817	-23.093

3.D. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada variasi derajat pengapian 20° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 1100 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
1100 mbar	0	4012.491	0.000	0.000	0.000	-	-	7.371
	500	4163.958	0.279	30.684	9.547	9.785	6.611	7.103
	1000	4310.106	0.559	63.804	19.853	5.064	12.774	6.862
	1500	4588.459	1.103	128.288	39.917	2.730	23.696	6.446
	2000	-	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-	-
Rata-rata		4268.754	0.485	55.694	17.329	5.860	14.360	6.946
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		41.975	-9.652	-9.213	-9.213	57.601	2.504	-30.062

3.E. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada variasi derajat pengapian 22° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 500 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
500 mbar	0	2944.363	0.000	0.000	0.000	-	-	10.045
	500	3147.657	0.348	37.969	11.814	5.929	10.910	9.397
	1000	3338.594	0.685	77.611	24.149	3.196	20.240	8.859
	1500	3855.076	1.284	148.015	46.055	1.971	32.820	7.672
	2000	-	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-	-
Rata-rata		3321.423	0.579	65.899	20.505	3.699	21.323	8.993
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		10.46774	7.879	7.422	7.422	-0.516	52.204	-9.443

3.F. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada variasi derajat pengapian 22° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 700 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
700 mbar	0	3147.657	0.000	0.000	0.000	-	-	9.397
	500	3519.187	0.385	41.128	12.797	5.998	10.786	8.405
	1000	3690.955	0.731	82.075	25.538	3.315	19.513	8.013
	1500	4012.491	1.308	150.710	46.894	2.013	32.139	7.371
	2000	-	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-	-
Rata-rata		3592.572	0.606	68.478	21.307	3.775	20.813	8.297
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		19.486	12.837	11.628	11.628	1.540	48.558	-16.460

3.G. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada variasi derajat pengapian 22° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 900 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
900 mbar	0	3519.187	0.000	0.000	0.000	-	-	8.405
	500	3855.076	0.423	44.535	13.857	5.979	10.820	7.672
	1000	4012.491	0.831	92.334	28.730	3.170	20.409	7.371
	1500	4310.106	1.396	160.866	50.054	2.026	31.936	6.862
	2000	-	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-	-
Rata-rata		3924.215	0.663	74.434	23.160	3.725	21.055	7.578
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		30.516	23.375	21.335	21.335	0.180	50.289	-23.699

3.H. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada variasi derajat pengapian 22° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 1100 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
1100 mbar	0	3690.955	0.000	0.000	0.000	-	-	8.013
	500	4012.491	0.313	34.337	10.684	8.409	7.693	7.371
	1000	4163.958	0.635	72.360	22.515	4.305	15.026	7.103
	1500	4721.485	1.103	127.965	39.816	2.809	23.028	6.264
	2000	-	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-	-
Rata-rata		4147.222	0.513	58.666	18.254	5.175	15.249	7.188
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		37.933	-4.531	-4.368	-4.368	39.178	8.845	-27.621

3.I. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada variasi derajat pengapian 24° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 500 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{ih} (%)	AVR
500 mbar	0	3147.657	0.000	0.000	0.000	-	-	9.397
	500	3338.594	0.395	42.242	13.144	5.548	11.661	8.859
	1000	3519.187	0.835	94.492	29.401	2.766	23.389	8.405
	1500	3855.076	1.320	151.108	47.018	1.916	33.758	7.672
	2000	-	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-	
Rata-rata		3465.129	0.638	71.960	22.391	3.410	22.936	8.583
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		15.247	18.713	17.304	17.304	-8.285	63.714	-13.574

3.J. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada variasi derajat pengapian 24° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 700 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{ih} (%)	AVR
700 mbar	0	3147.657	0.000	0.000	0.000	-	-	9.397
	500	3519.187	0.423	45.050	14.017	5.458	11.852	8.405
	1000	3855.076	0.884	97.537	30.349	2.861	22.613	7.672
	1500	4012.491	1.346	153.938	47.898	1.957	33.057	7.371
	2000	-	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-	
Rata-rata		3633.603	0.663	74.131	23.066	3.425	22.508	8.211
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		20.851	23.506	20.842	20.842	-7.876	60.658	-17.319

3.K. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada variasi derajat pengapian 24° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 900 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{ih} (%)	AVR
900 mbar	0	3690.955	0.000	0.000	0.000	-	-	8.013
	500	3855.076	0.480	52.240	16.255	5.275	12.262	7.672
	1000	4588.459	0.914	104.096	32.390	3.295	19.635	6.446
	1500	5099.787	1.422	164.037	51.040	2.354	27.481	5.800
	2000	-	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-	
Rata-rata		4308.569	0.704	80.093	24.921	3.641	19.793	6.983
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		43.299	31.057	30.561	30.561	-2.062	41.281	-29.688

3.L. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada variasi derajat pengapian 24° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 1100 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
1100 mbar	0	3690.955	0.000	0.000	0.000	-	-	8.013
	500	3855.076	0.367	39.948	12.430	6.899	9.377	7.672
	1000	4588.459	0.787	89.638	27.891	3.826	16.908	6.446
	1500	5099.787	1.103	127.259	39.597	3.034	21.320	5.800
	2000	-	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-	-
Rata-rata		4308.569	0.564	64.211	19.979	4.586	15.868	6.983
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		43.299	5.056	4.672	4.672	23.354	13.267	-29.688

3.M. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada variasi derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 500 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
500 mbar	0	3147.657	0.000	0.000	0.000	-	-	9.397
	500	3338.594	0.434	46.187	14.371	5.043	12.827	8.859
	1000	3519.187	0.965	109.123	33.954	2.394	27.024	8.405
	1500	3855.076	1.396	158.174	49.216	1.812	35.705	7.672
	2000	-	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-	-
Rata-rata		3465.129	0.699	78.371	24.385	3.083	25.185	8.583
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		15.247	30.138	27.754	27.754	-17.079	79.770	-13.574

3.N. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada variasi derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 700 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{th} (%)	AVR
700 mbar	0	3147.657	0.000	0.000	0.000	-	-	9.397
	500	3519.187	0.465	49.078	15.271	4.962	13.038	8.405
	1000	3855.076	0.992	109.150	33.962	2.551	25.354	7.672
	1500	4163.958	1.435	162.568	50.583	1.904	33.975	7.103
	2000	-	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-	-
Rata-rata		3671.470	0.723	80.199	24.954	3.139	24.122	8.144
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		22.110	34.636	30.734	30.734	-15.571	72.183	-17.994

3.O. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada variasi derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 900 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{ih} (%)	AVR
900 mbar	0	3519.187	0.000	0.000	0.000	-	-	8.405
	500	3855.076	0.528	43.257	13.459	4.796	13.489	7.672
	1000	4451.459	1.018	109.714	34.138	2.871	22.535	6.644
	1500	4976.882	1.474	163.109	50.752	2.216	29.194	5.943
	2000	5099.787	1.722	195.082	60.700	1.943	33.289	5.800
	2500	-	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-	
Rata-rata		4380.478	0.948	102.232	31.810	2.956	24.627	6.893
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		45.691	76.573	66.650	66.650	-20.483	75.782	-30.595

3.P. Data kinerja *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada variasi derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan bahan bakar 1100 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Energi (kCal/jam)	Ne (hp)	Bmep (Kpa)	Mt (kg.cm)	Sfc (kg/hp.jam)	η_{ih} (%)	AVR
1100 mbar	0	3690.955	0.000	0.000	0.000	-	-	8.013
	500	4012.491	0.415	44.498	13.846	6.350	10.187	7.371
	1000	4588.459	0.861	97.878	30.455	3.497	18.499	6.446
	1500	5099.787	1.193	137.261	42.709	2.805	23.065	5.800
	2000	-	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-	
Rata-rata		4347.923	0.617	69.909	21.752	4.217	17.250	6.908
Kenaikan/Penurunan (%)								
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		44.608	14.938	13.960	13.960	13.427	23.132	-30.445

LAMPIRAN 4

Data Pengujian Temperatur dan Emisi pada *LPG Engine-Generator Set* dengan Bahan Bakar LPG

4.A. Data temperatur dan emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada derajat pengapian 20° sebelum TMA dan tekanan masuk 30 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
30 mbar	0	220	78.1	60.2	104.2	0.002	11
	500	180	83.6	63.4	145.4	0.003	10
	1000	180	86.6	67.5	165.3	0.005	7
	1500	180	89.6	70.1	180.2	0.006	5
	2000	180	94.1	73.1	180.3	0.007	5
	2500	175	95.3	78.6	181.7	0.009	4
	3000	170	100.1	79.9	186.2	0.011	3
	3500	155	102.4	83.1	187.2	0.015	3
	4000	150	103.5	84.2	188.2	0.019	2
	4500	145	105.7	87.9	190.8	0.022	2
Rata-rata(LPG belum variasi)		174	94	75	171	0.0099	5

4.B. Data Temperatur dan Emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada derajat pengapian 20° sebelum TMA dan tekanan masuk 50 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
50 mbar	0	220	86.7	63.9	125.8	0.002	12
	500	190	93.4	67.2	165.7	0.004	11
	1000	190	96.8	72.9	180.2	0.006	9
	1500	180	97.1	75.3	180.8	0.007	8
	2000	180	99.4	78.4	181.2	0.008	8
	2500	185	101.8	80.1	182.4	0.010	7
	3000	175	104.9	82.6	186.7	0.012	5
	3500	165	105.7	86.3	188.2	0.017	5
	4000	160	106.8	87.3	190.4	0.020	3
	4500	155	107.4	90.1	193.2	0.024	3
Rata-rata		180	100	78	177	0.011	7
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap LPG belum variasi		3.746	6.496	4.826	3.808	11.111	36.538

4.C. Data Temperatur dan Emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada derajat pengapian 20° sebelum TMA dan tekanan masuk 70 mbar

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
70 mbar	0	220	88.4	69.2	115.1	0.002	13
	500	200	97.2	74.7	171.2	0.005	12
	1000	200	98.8	78.9	178.2	0.007	10
	1500	190	99.9	80.7	182.4	0.008	9
	2000	185	100.4	82.3	183.5	0.010	8
	2500	180	103.1	84.2	185.2	0.012	6
	3000	175	106.8	86.4	189.2	0.013	6
	3500	170	108.1	88.7	190.8	0.018	5
	4000	170	109.2	89.9	195.2	0.021	5
	4500	165	109.8	91.8	197.3	0.025	4
Rata-rata		186	102	83	179	0.0121	8
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap LPG belum variasi		6.916	8.807	10.535	4.598	22.222	50.000

4.D. Data Temperatur dan Emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada derajat pengapian 20° sebelum TMA dan tekanan masuk 90 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
90 mbar	0	200	90.2	73.2	102.4	0.003	15
	500	180	98.2	78.2	184.7	0.006	14
	1000	180	101.2	80.9	196.8	0.008	12
	1500	180	102.1	82.5	197.1	0.009	11
	2000	180	103.8	84.3	197.8	0.010	9
	2500	180	105.7	85.7	198.2	0.012	9
	3000	175	107.2	88.7	196.1	0.016	8
	3500	165	108.5	90.3	198.5	0.019	7
	4000	155	110.2	91.2	199.1	0.023	6
	4500	145	110.7	92.8	199.4	0.026	5
Rata-rata		174	104	85	187	0.0132	10
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap LPG belum variasi		0.288	10.522	13.342	9.395	33.333	84.615

4.E. Data Temperatur dan Emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada derajat pengapian 22° sebelum TMA dan tekanan masuk 30 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
30 mbar	0	205	78.1	60.1	103.4	0.001	11
	500	205	81.3	65	150.5	0.003	11
	1000	200	85.7	68.5	172.1	0.004	8
	1500	180	90.1	72	179.2	0.007	7
	2000	180	95.2	75.8	180.3	0.008	6
	2500	180	96.5	79.6	189.1	0.009	4
	3000	170	98.7	82.3	191.1	0.012	4
	3500	160	101.7	84.9	192.1	0.015	3
	4000	150	103.2	85.4	195.7	0.019	2
	4500	150	104.4	85.8	194.8	0.022	2
Rata-rata		178	93	76	175	0	6
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap LPG belum variasi		2.594	-0.437	1.524	2.270	1.010	11.538

4.F. Data Temperatur dan Emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada derajat pengapian 22° sebelum TMA dan tekanan masuk 50 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
50 mbar	0	210	90.5	66.9	106.5	0.002	12
	500	210	94.2	72.3	165.3	0.004	12
	1000	205	95.5	78.5	185.3	0.007	10
	1500	185	97.2	80.5	186.3	0.008	9
	2000	180	99.4	82.1	188.2	0.009	8
	2500	180	99.9	83.9	192.7	0.010	8
	3000	175	102.3	85.9	196.2	0.013	6
	3500	165	105.1	87.6	197.2	0.017	5
	4000	155	106.7	90.3	197.9	0.021	4
	4500	155	107.9	92.6	198.1	0.024	3
Rata-rata		182	100	82	181	0.0115	8
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap LPG belum variasi		4.899	6.358	9.706	6.095	16.162	48.077

4.G. Data Temperatur dan Emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada derajat pengapian 22° sebelum TMA dan tekanan masuk 70 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
70 mbar	0	210	96.2	77.8	123.5	0.002	14
	500	210	98.9	81.5	168.3	0.006	13
	1000	205	100.2	83.5	187.2	0.008	11
	1500	190	103.5	84.1	187.2	0.009	10
	2000	185	104.8	85.9	189.3	0.010	9
	2500	180	105.5	86.4	193.2	0.012	8
	3000	175	106.2	87.1	194.7	0.016	7
	3500	170	107.4	89.5	196.8	0.018	5
	4000	165	108.7	93.1	198.1	0.022	4
	4500	165	109.2	94.2	199.2	0.026	4
Rata-rata		186	104	86	184	0.0129	9
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap LPG belum variasi		6.916	10.820	15.388	7.488	30.303	63.462

4.H. Data Temperatur dan Emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada derajat pengapian 22° sebelum TMA dan tekanan masuk 90 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
90 mbar	0	205	97.8	79.3	135.9	0.003	16
	500	205	102.2	82.1	189.7	0.006	15
	1000	200	105.2	84.7	194.6	0.008	14
	1500	180	107.6	86.2	195.5	0.009	12
	2000	180	108.1	87.8	196.6	0.011	10
	2500	175	108.8	89.5	197.6	0.014	9
	3000	170	109.8	90.4	196.7	0.017	8
	3500	165	110.4	92.4	198.7	0.019	7
	4000	155	111.2	94.7	199.5	0.023	6
	4500	145	112.3	95.8	200.2	0.027	5
Rata-rata		178	107	88	191	0.0137	10
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap LPG belum variasi		2.594	14.313	18.035	11.436	38.384	96.154

4.I. Data Temperatur dan Emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada derajat pengapian 24° sebelum TMA dan tekanan masuk 30 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
30 mbar	0	210	89.4	71.2	104.2	0.002	12
	500	210	92.5	76.3	156.2	0.003	10
	1000	200	94.1	78.3	175.3	0.005	9
	1500	180	96.2	80.9	179.8	0.007	7
	2000	180	97.2	82.3	180.3	0.007	6
	2500	180	97.8	83.7	184.3	0.008	4
	3000	170	98.5	84.3	186.1	0.013	4
	3500	160	102.2	85.1	189.3	0.017	3
	4000	155	104.3	86.2	191.3	0.021	2
	4500	145	105.2	87.8	192.3	0.023	2
5000							
Rata-rata		179	98	82	174	0	6
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap LPG belum variasi		3.170	4.089	9.104	1.732	7.071	13.462

4.J. Data Temperatur dan Emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada derajat pengapian 24° sebelum TMA dan tekanan masuk 50 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
50 mbar	0	210	90.9	72.1	130.1	0.002	14
	500	210	93.7	77.2	162.8	0.003	13
	1000	205	95.8	79.4	179.2	0.006	11
	1500	185	97.8	81.7	184.2	0.008	10
	2000	185	99.1	83.1	184.3	0.009	9
	2500	180	99.5	84.3	187.1	0.011	8
	3000	175	101.2	87.3	188.5	0.015	7
	3500	165	104.7	90.1	190.4	0.017	5
	4000	165	106.1	92.3	194.3	0.022	4
	4500	155	107.9	93.2	197.3	0.024	3
5000							
Rata-rata		184	100	84	180	0.0117	8
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap LPG belum variasi		5.764	6.145	12.393	5.189	18.182	61.538

4.K. Data Temperatur dan Emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada derajat pengapian 24° sebelum TMA dan tekanan masuk 70 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
70 mbar	0	210	96.2	77.8	123.5	0.006	16
	500	210	98.9	81.5	168.3	0.008	14
	1000	205	100.2	83.5	187.2	0.010	12
	1500	195	103.5	84.1	187.2	0.011	11
	2000	190	104.8	85.9	189.3	0.013	10
	2500	185	105.5	86.9	193.2	0.014	9
	3000	180	106.2	88.6	194.7	0.018	8
	3500	175	107.4	90.2	196.8	0.019	6
	4000	170	108.7	95.3	198.1	0.024	5
	4500	170	109.2	96.3	199.2	0.026	4
5000							
Rata-rata		189	104	87	184	0.015	10
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap LPG belum variasi		8.934	10.820	16.324	7.488	50.505	82.692

4.L. Data Temperatur dan Emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada derajat pengapian 24° sebelum TMA dan tekanan masuk 90 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
90 mbar	0	220	97.8	80.2	135.9	0.003	17
	500	210	102.2	83.2	189.7	0.006	16
	1000	200	105.2	85.7	195.6	0.008	15
	1500	180	107.6	87.4	195.7	0.009	13
	2000	180	108.1	88.9	196.6	0.012	12
	2500	180	108.8	90.5	197.6	0.014	11
	3000	170	109.8	92.9	196.7	0.017	8
	3500	160	110.4	94.3	198.7	0.02	8
	4000	155	111.2	96.5	199.5	0.026	6
	4500	145	112.5	97.6	200.2	0.028	6
Rata-rata		180	107	90	191	0.014	11
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap LPG belum variasi		3.746	14.334	19.947	11.506	44.444	115.385

4.M. Data Temperatur dan Emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan masuk 30 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
30 mbar	0	220	90.2	75.3	104	0.005	12
	500	220	92.3	77.2	156.3	0.006	11
	1000	205	95.3	79.2	188.5	0.006	9
	1500	190	96.7	81.9	190.1	0.008	8
	2000	185	97.8	82.6	188.2	0.010	5
	2500	180	98.1	84.3	192.1	0.014	4
	3000	170	99.2	85.1	193.4	0.017	3
	3500	160	102.8	86.2	198.6	0.02	3
	4000	160	104.7	86.1	197.5	0.022	2
	4500	160	105.5	87.9	198.1	0.023	2
Rata-rata		185	98	83	181	0	6
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap LPG belum variasi		6.628	4.643	10.401	5.692	32.323	13.462

4.N. Data Temperatur dan Emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan masuk 50 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
50 mbar	0	220	105.1	74.2	115.1	0.002	15
	500	220	105.3	78.5	178.9	0.004	14
	1000	205	105.8	80.4	194.1	0.006	12
	1500	190	107.7	82.9	193.1	0.008	10
	2000	185	107.5	84.6	193.4	0.009	7
	2500	180	107.4	86.2	195.7	0.011	6
	3000	180	108.2	88.4	197.2	0.015	5
	3500	175	107.1	90.9	197.7	0.017	4
	4000	165	107.2	93.1	196.6	0.020	3
	4500	165	108.5	94.2	198.5	0.024	2
Rata-rata		189	107	85	186	0.01160	8
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap LPG belum variasi		8.646	13.930	14.091	8.821	17.172	50.000

4.O. Data Temperatur dan Emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan masuk 70 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
70 mbar	0	220	96.2	77.8	123.5	0.006	19
	500	220	98.9	81.5	168.3	0.009	18
	1000	205	100.2	83.5	187.2	0.010	17
	1500	195	103.5	84.1	187.2	0.01	16
	2000	190	104.8	85.9	189.3	0.013	10
	2500	185	105.5	86.9	193.2	0.016	8
	3000	180	106.2	88.6	194.7	0.018	7
	3500	180	107.4	90.2	196.8	0.019	6
	4000	180	108.7	95.3	198.1	0.025	5
	4500	175	109.2	96.3	199.2	0.027	5
Rata-rata		193	104	87	184	0.015	11
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap LPG belum variasi		11.239	10.820	16.324	7.488	54.545	113.462

4.P. Data Temperatur dan Emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar LPG pada derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan masuk 90 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
90 mbar	0	220	98.5	80.2	137.6	0.003	19
	500	220	103.2	83.2	189.7	0.006	19
	1000	200	105.2	85.7	195.6	0.007	18
	1500	190	107.8	87.4	196.5	0.009	16
	2000	185	108.3	88.9	196.9	0.012	11
	2500	180	109.5	92.1	197.2	0.015	10
	3000	175	110.2	93.4	197.2	0.017	8
	3500	165	111.3	95.2	199.1	0.022	7
	4000	160	112.2	97.1	200	0.027	6
	4500	155	112.7	98.2	200.9	0.031	5
Rata-rata		185	108	90	191	0.015	12
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap LPG belum variasi		6.628	14.899	20.508	11.770	50.505	128.846

LAMPIRAN 5

Data Pengujian emperatur dan Emisi pada *LPG Engine-Generator Set* dengan Bahan Bakar *Syn-gas*

5.A. Data temperatur dan emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada derajat pengapian 20° sebelum TMA dan tekanan masuk 500 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
500 mbar	0	220	89.2	71.6	188.4	0	3
	500	180	96.4	76.1	191.7	0	1
	1000	180	97.2	77.3	194.1	0	0
	1500	175	98.5	78.8	196.2	0.001	0
	2000	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-	-
Rata-rata (<i>syn-gas</i> belum variasi)		189	95	76	193	0.00025	1

5.B. Data temperatur dan emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada derajat pengapian 20° sebelum TMA dan tekanan masuk 700 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
700 mbar	0	220	98.1	78.8	193.1	0	3
	500	190	100.6	79.2	194.2	0	2
	1000	180	102.2	81.4	195.6	0.001	0
	1500	175	103.5	82.6	197.2	0.003	0
	2000	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-	-
Rata-rata		191	101	81	195	0.0010	1
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		1.325	6.058	5.991	1.259	300	25

5.C. Data temperatur dan emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada derajat pengapian 20° sebelum TMA dan tekanan masuk 900 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
900 mbar	0	220	102.2	81.2	194.4	0	4
	500	200	103.1	82.3	195.2	0	2
	1000	190	104.4	84.4	196.7	0.002	0
	1500	180	105.5	85.8	198.8	0.005	0
	2000	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-
Rata-rata		198	104	83	196	0.00175	2
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		4.636	8.891	9.842	1.908	600	50

5.D. Data temperatur dan emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada derajat pengapian 20° sebelum TMA dan tekanan masuk 1100 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
1100 mbar	0	220	103.2	83.3	195.1	0.001	6
	500	180	104.7	84.5	196.3	0.002	3
	1000	180	105.1	85.2	197.5	0.003	1
	1500	170	106.3	86.7	199.1	0.008	0
	2000	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-
Rata-rata		188	105	85	197	0.0035	3
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		-0.662	9.966	11.817	2.285	1300	150

5.E. Data temperatur dan emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada derajat pengapian 22° sebelum TMA dan tekanan masuk 500 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
500 mbar	0	220	92.2	74.2	190.1	0	3
	500	190	97.4	77.5	193.4	0	2
	1000	180	98.5	78.1	195.8	0.001	0
	1500	175	99.6	79.5	197.5	0.003	0
	2000	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-
Rata-rata		191	97	77	194	0.001	1
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		1.325	1.678	1.810	0.831	300	25

5.F. Data temperatur dan emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada derajat pengapian 22° sebelum TMA dan tekanan masuk 700 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
700 mbar	0	220	99.1	79.3	194.2	0	3
	500	195	101.4	80.1	195.5	0	2
	1000	185	102.7	82.8	197.4	0.003	0
	1500	175	104.2	83.2	198.9	0.006	0
	2000	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-
Rata-rata		194	102	81	197	0.00225	1
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		2.649	6.845	7.110	2.025	800	25

5.G. Data temperatur dan emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada derajat pengapian 22° sebelum TMA dan tekanan masuk 900 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
900 mbar	0	220	103.1	81.5	196.3	0	4
	500	200	104.4	83.4	198.1	0	2
	1000	190	105.2	85.6	199.7	0.002	0
	1500	180	106.7	86.3	199.3	0.005	0
	2000	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-
Rata-rata		198	105	84	198	0.00175	2
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		4.636	9.992	10.862	2.985	600	50

5.H. Data temperatur dan emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada derajat pengapian 22° sebelum TMA dan tekanan masuk 1100 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
1100 mbar	0	220	105.2	83.7	196.6	0.001	6
	500	185	106.5	85.3	197.3	0.002	4
	1000	180	107.1	86.5	199.6	0.005	1
	1500	170	108.9	87.2	200.7	0.008	0
	2000	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-
Rata-rata		189	107	86	199	0.004	3
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		0	12.169	12.804	3.089	1500	175

5.I. Data temperatur dan emisi *LPG engine-generator set* berbahan bakar *syn-gas* pada derajat pengapian 24° sebelum TMA dan tekanan masuk 500 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
500 mbar	0	220	94.1	75.3	190.2	0	3
	500	200	98.4	78.4	195.1	0.001	2
	1000	185	99.2	79.1	197.6	0.002	1
	1500	180	100.5	80.6	198.1	0.003	0
	2000	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-
Rata-rata		196	98	78	195	0.0015	2
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		3.974	2.859	3.160	1.376	500	50

5.J. Data temperatur dan emisi *LPG engine-generator set* bahan bakar *syn-gas* pada derajat pengapian 24° sebelum TMA dan tekanan masuk 700 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
700 mbar	0	220	99.2	80.1	195.7	0	4
	500	200	102.4	82.4	196.4	0.001	2
	1000	190	104.6	83.7	198.9	0.003	0
	1500	180	106.8	85.3	199.8	0.006	0
	2000	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-
Rata-rata		198	103	83	198	0.0025	2
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		4.636	8.314	9.118	2.648	900	50

5.K. Data temperatur dan emisi *LPG engine-generator set* bahan bakar *syn-gas* pada derajat pengapian 24° sebelum TMA dan tekanan masuk 900 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
900 mbar	0	220	103.1	82.4	197.2	0	4
	500	200	105.3	84.6	198.4	0.001	2
	1000	180	107.5	86.1	200.2	0.003	0
	1500	180	108.4	87.5	201.4	0.006	0
	2000	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-
Rata-rata		195	106	85	199	0.0025	2
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		3.311	11.277	12.113	3.479	900	50

5.L. Data temperatur dan emisi *LPG engine-generator set* bahan bakar *syn-gas* pada variasi derajat pengapian 24° sebelum TMA dan tekanan masuk 1100 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
1100 mbar	0	220	105.1	84.5	197.3	0.001	6
	500	200	106.2	86.7	198.1	0.002	5
	1000	180	107.5	87.5	200.4	0.005	1
	1500	170	108.3	88.5	202.1	0.008	0
	2000	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	
Rata-rata		193	107	87	199	0.004	3
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		1.987	12.012	14.286	3.570	1500	200

5.M. Data temperatur dan emisi *LPG engine-generator set* bahan bakar *syn-gas* pada derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan masuk 500 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
500 mbar	0	220	94.2	75.3	190.2	0.004	3
	500	220	99.4	79.4	195.7	0.006	3
	1000	190	100.3	83.2	198.4	0.008	1
	1500	180	102.5	85.2	199.1	0.011	0
	2000	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	
Rata-rata		203	99	81	196	0.00725	2
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		7.285	3.960	6.353	1.687	2800	75

5.N. Data temperatur dan emisi *LPG engine-generator set* bahan bakar *syn-gas* pada derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan masuk 700 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
700 mbar	0	220	99.2	81.3	196.3	0	4
	500	220	103.4	83.5	198.4	0.002	2
	1000	190	105.5	86.1	199.4	0.004	0
	1500	185	107.5	88.9	200.6	0.006	0
	2000	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	
Rata-rata		204	104	85	199	0.003	2
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		7.947	8.996	11.850	3.154	1100	50

5.O.Data temperatur dan emisi *LPG engine-generator set* bahan bakar *syn-gas* pada derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan masuk 900 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
900 mbar	0	220	103.3	83.2	197.1	0.003	4
	500	220	107.3	85.5	199.4	0.004	3
	1000	195	108.4	88.2	201.4	0.004	2
	1500	190	109.5	91.2	202.2	0.007	0
	2000	185	110.3	95.9	203.4	0.012	0
	2500	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-
Rata-rata		202	108	89	201	0.006	2
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		7.0199	13.0448	16.9190	4.2056	2300	80

5.P. Data temperatur dan emisi *LPG engine-generator set* bahan bakar *syn-gas* pada derajat pengapian 26° sebelum TMA dan tekanan masuk 1100 mbar.

Tekanan Bhn Bakar	Beban (watt)	Voltase (Volt)	Temperatur (C)			Gas Analyzer	
			Engine	oil	Gas buang	CO(%)	HC (ppm)
1100 mbar	0	220	105.2	85.2	199.3	0.003	5
	500	210	107.3	87.3	202.2	0.005	3
	1000	185	109.4	90.2	203.4	0.007	2
	1500	180	111.3	93.2	204.5	0.008	0
	2000	-	-	-	-	-	-
	2500	-	-	-	-	-	-
	3000	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	-	-	-
	4000	-	-	-	-	-	-
	4500	-	-	-	-	-	-
Rata-rata		199	108	89	202	0.00575	3
Kenaikan/Penurunan (%)							
Terhadap <i>syn-gas</i> belum variasi		5.298	13.611	17.149	5.062	2200	150

LAMPIRAN 6

Dokumentasi Pengambilan Data

6.A. Foto dokumentasi saat pengambilan data *LPG engine-generator set* dengan bahan bakar LPG di laboratorium motor bakar, teknik mesin-ITS, surabaya.



6.B. Foto dokumentasi saat pengambilan data *LPG engine-generator set* dengan bahan bakar syn-gas gasifikasi batubara di PT. Gending – sidoarjo.



DAFTAR PUSTAKA

- Ajay Shah, Radhakrishnan Srinivanan, Suminto D. Filip To and Eugene P. Columbus (2010). *Perfomance and Emissions of a Spark-Ignited Engine Driven Generator on Biomass Based Syngas*. Department of Agricultural and Biological Engineering, Mississippi State University, Mississippi State, MS 39762, USA.
- ASME PTC 17 (1991). *Reciprocating Internal Combustion Engines*. Performance test code. 345 east 47th street, New York. 10017.
- Balat Mustafa, Balat Mehmet, Kirtay Elif and Balat Havva(2009). *Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and c hemicals*.Part 1: Pyrolysis systems. Sila Science and Energy Company, University Mah, Trabzon, Turkey.
- Brenda, Brevitt (2002). *Alternative Vehicle Fuels*. Science and Evironment Section. House of Commons library. Room 407, 1 D erby Gate, London, hal.46-47.
- Basu, Prabir. (2013). *Handbook of Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction*. second edition.
- Ceviz, M.A (2005). *Cyclic variations on LPG and gasoline-fuelled lean burn SI engine*. Renewable Energy 31 (2005) 1950–1960. Turkey.
- Dabhadkar R.M (2013). *Effect of Ignition Timing on the Performance of LPG Fuelled SI Engine*. International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST).
- ETSAP (Energy Technology System Analysis Programme)(2010). *Automotive LPG and Natural Gas Engines*. Technology Brief T03. www.etsap.org.
- Hagos. Ftwi Yohaness, A. Rashid A. Aziz and Shaharin Anwar Sulaiman (2014). *Trend of Syngas as a Fuel in Internal Combution Engines*. Hindawi Publishing Corporation. Advances in Mechanical Engineering. Volume 2014, Article ID,01587, 10 pages.
- Hasler, P & Nussbaumer, Th. (1999). *Gas Cleaning For IC Engine Aplication From Fixed Bed Biomass gasification*. Journal of Miomass and Bioenergy 16. 385-395.
- Heywood, JB(1998). *Internal Combution Engine Fundamental*. Mc Graw Hill. New York, USA.

- James G, Speight. (2008). *Synthetic Fuels Handbook*. Mc Graw Hill. New York, USA.
- Jeffri, Novrezeki Sauliar (2010). *Desain mekanisme sistem duel-fuel dan uji unjuk kerja motor diesel stationer menggunakan gas hasil gasifikasi dan minyak solar*. Jurusan teknik mesin ITS, surabaya.
- Juan Daniel Martinez, Khamid Mahkamov, Rubenildo V. Andrade and Electo E. Silva Lora. (2012). *Syngas Production in Downdraft Biomass Gasifier and its Application using Internal Combustion Engines*. Journal of Renewable energy 38. Columbia.
- Kawano, D. Sungkono. (2011). *Motor Bakar Torak (Bensin)*. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
- Knoef (2000). *A Review of Fixed Bed Gasification System for Biomass*. School of Energy studies for agriculture, India.
- Laurence.L.C dan Ashenafi.D (2011). *Syngas treatment unit for scale gasification-application to IC engine gas quality requirement*. Journal of applied fluid mechanic, vol 5. No.1.pp 95-103.
- Mathur, M. D, (1986). *A Course in Internal Combustion Engine*. Dhanpatrai & Sons, 3rd edition: Newdehli.
- Mokus.S, Laurencas. R, Arturas. K, Neringa.K and Martynes.S (2013). *Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport*. Renewable and sustainable energy review, no.32, 513-525.
- Porpatham. A, Ramesh. A and Nagalingam. B (2013). *Effect of swirl on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine*. School of Mechanical and Building Sciences, VIT University, Vellore 632 014, India.
- Saraf. R R (2009). *Comparative Emission Analysis of Gasoline/LPG Automotive Bifuel Engine*. International Journal of Civil and Environmental Engineering 1:4 2009.
- Sridhar G H, Sridhar H V, Dasappa S, Paul P J, N K S Rajan and Mukunda H S (2002). *Development of Producer Gas Engines*. Combustion Gasification and Propulsion Laboratory. Department of Aerospace Engineering. Indian Institute of Science , Bangalore, India.
- Sugiono, Agus.(2001). *Prospek Penggunaan Teknologi Bersih untuk Pembangkit Listrik dengan Bahan Bakar Batubara di indonesia*. BPPT.