



TUGAS AKHIR - TM 141585

# STUDI EKSPERIMEN UNJUK KERJA MESIN DIESEL SISTEM DUAL FUEL DENGAN VARIASI TEKANAN PENGINJEKSAN PADA INJEKTOR MESIN YANMAR TF55 R Di

ARIZAL SITA AHMAD  
NRP 2112 100 153

Dosen Pembimbing  
Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017



**TUGAS AKHIR - TM 141585**

**STUDI EKSPERIMEN UNJUK KERJA MESIN DIESEL  
SISTEM DUAL FUEL DENGAN VARIASI TEKANAN  
PENGINJEKSIAN PADA INJEKTOR MESIN YANMAR  
TF 55 R Di**

*(Bahan Bakar Biodiesel Minyak Goreng Sawit dan Syngas Biomassa Sampah  
Perkotaan)*

**ARIZAL SITA AHMAD  
NRP 2112 100 153**

**Dosen Pembimbing  
Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT.**

**JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017**



**FINAL PROJECT - TM 141585**

**EXPERIMENTAL STUDY DIESEL DUAL FUEL  
ENGINE SYSTEM PERFORMANCE WITH VARIATION  
OF INJECTION PRESSURE ON YANMAR TF 55 R Di  
INJECTOR**

*(Palm Oil Biodiesel and Municipal Solid Waste Biomass Syngas Fuel)*

**ARIZAL SITA AHMAD  
NRP 2112 100 153**

**Advisor  
Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT.**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2017**

## LEMBAR PENGESAHAN

### STUDI EKSPERIMEN UNJUK KERJA MESIN DIESEL SISTEM DUAL FUEL DENGAN VARIASI TEKANAN PENGINJEKSIAN PADA INJEKTOR MESIN YANMAR TF 55R Di

*(Bahan Bakar Biodiesel Minyak Goreng Sawit dan Syngas Biomassa Sampah  
Perkotaan)*

#### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Konversi Energi  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**ARIZAL SITA AHMAD**

NRP. 2112100153

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT. ..... (Pembimbing)  
NIP. 197301161997021001
2. Ary Bachtiar K. P., ST, MT, PhD. ..... (Penguji I)  
NIP. 197105241997021001
3. Nur Ikhwan ST., M.Eng. ..... (Penguji II)  
NIP. 196709151995121001
4. Bambang Arip D., ST, M.Eng., PhD. ..... (Penguji III)  
NIP. 197105241997021001

**SURABAYA**

Januari, 2017

**STUDI EKSPERIMEN UNJUK KERJA MESIN DIESEL  
SISTEM DUAL FUEL DENGAN VARIASI TEKANAN  
PENGINJEKSIAN PADA INJEKTOR MESIN YANMAR  
TF 55 R Di**

*(Bahan Bakar Biodiesel Minyak Goreng Sawit dan Syngas  
Biomassa Sampah Perkotaan)*

Nama Mahasiswa : Arizal Sita Ahmad  
NRP : 2112100153  
Dosen Pembimbing : Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT.

***ABSTRAK***

Biodiesel sebagai bahan bakar alternatif dapat menggantikan bahan bakar yang berasal dari fosil yang semakin menipis karena sifatnya yang tidak dapat diperbaharui. Namun biodiesel memiliki nilai viskositas, densitas dan tegangan permukaannya yang lebih tinggi daripada bahan bakar fosil, maka pada pengoperasiannya membutuhkan perlakuan khusus agar proses atomisasi bahan bakar lebih baik. Peningkatan tekanan injeksi pada bahan bakar merupakan salah satu cara untuk meningkatkan kualitas atomisasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan tekanan injeksi bahan bakar terhadap atomisasi dan unjuk kerja mesin sistem dual fuel.

Penelitian ini dilakukan dengan mengoperasikan mesin diesel pada putaran konstan 2000 rpm dan pembebanan dari 200 W hingga 2000 W dengan interval 200 W. Sistem pemasukan syngas menggunakan mixer venturi secara langsung dari reactor syngas. Untuk meningkatkan atomisasi pembakaran maka penulis melakukan variasi terhadap tekanan penginjeksian pada injektor dengan penggantian shim pada injektor. Variasi shim didapat dengan ketebalan 0.075 mm, 0.095 mm, 0.1 mm dan 0.12 mm (standard shim set Yanmar), selanjutnya akan dilakukan pengukuran tekanan injeksi bahan bakar dengan menggunakan injector tester dan didapatkan hasil sesuai dengan ketebalan shim yaitu 190 kg/cm<sup>2</sup>, 210 kg/cm<sup>2</sup>, 230 kg/cm<sup>2</sup> dan 250 kg/cm<sup>2</sup>.

Parameter yang diukur antara lain adalah tegangan (V), arus listrik (I), konsumsi bahan bakar biodiesel dan syngas, serta suhu operasi mesin yang terdiri dari suhu silinder blok, suhu pelumas, suhu air pendingin dan suhu gas buang.

Hasil yang didapatkan setelah dilakukan penelitian adalah daya efektif, torsi dan bmep mengalami kenaikan sebesar 5,02 % terhadap kondisi standar, konsumsi bahan bakar spesifik (sfc) pada dual fuel mengalami penurunan sebesar 13,24% terhadap tekanan injeksi standar mesin, sfc biodiesel mengalami penurunan sebesar 30,776% dibanding dengan kondisi standar, air fuel ratio (afr) mengalami kenaikan sebesar 7,17% %, efisiensi termal mengalami kenaikan sebesar 40,766% terhadap kondisi standard dan hasil atomisasi bahan bakar yang paling baik ditunjukkan pada tekanan injeksi 250 kg/cm<sup>2</sup>, dengan sudut semprotan ( $\theta$ ) yang paling besar yaitu  $\theta = 22^\circ$  dan panjang semprotan (L) yang paling kecil, yaitu L = 52,5 cm.

**Kata kunci : diesel dual fuel, biodiesel, biomassa, shim, syngas, tekanan injeksi**

**EXPERIMENTAL STUDY OF DIESEL DUAL FUEL  
ENGINE SYSTEM PERFORMANCE WITH VARIATION OF  
INJECTION PRESSURE ON YANMAR TF 55 R Di  
INJECTOR**

*(Palm Oil Biodiesel and Municipal Solid Waste Biomass Syngas  
Fuel)*

*Student Name* : Arizal Sita Ahmad  
*NRP* : 2112100153  
*Adviser* : Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT.

**ABSTRACT**

*Biodiesel as an alternative fuel could replace fuels derived from fossil dwindling due to its non-renewable. However, biodiesel has a viscosity, density and surface tension higher than fossil fuels, then the operation requires special treatment to the better fuel atomization. Increased pressure on the fuel injection is one way to improve the quality of atomization. This study aimed to determine the effect of the injection pressure of the fuel atomization and engine performance dual fuel system.*

*This research was conducted by operating the diesel engine at constant speed 2000 rpm and a load of 200 W to 2000 W to 200 W. interval syn-gas entry system using venturi mixer directly from syn-gas reactor. To improve atomization combustion writer has a variation of the pressure of injection of the injector with replacement shim on the injector. Variations shim obtained with a thickness of 0.075 mm, 0,095 mm, 0.1 mm and 0,12 mm (standard shim set Yanmar), will now be measured injection pressure fuel injector tester and the results obtained in accordance with the thickness of the shim is 190 kg/cm<sup>2</sup>, 210 kg/cm<sup>2</sup>, 230 kg/cm<sup>2</sup> and 250 kg/cm<sup>2</sup>. The measured parameters include voltage (V), electric current (I), consumption of biodiesel fuel and syngas, as well as the operating temperature of the engine comprising cylinder block temperature, lubricant temperature, the temperature of the cooling water and exhaust gas temperature.*

*The results obtained after the study is the effective power, torque and bmep increased by 5.02% against the standard conditions, specific fuel consumption (sfc) on dual fuel decreased by 13.24% against the standard injection pressure of the engine, biodiesel sfc experience a decrease of 30.776% compared with standard conditions, air fuel ratio (afr) increased by 7.17%%, thermal efficiency increased by 40.766% of the standard condition and results of fuel atomization is best shown in the injection pressure of 250 kg/cm<sup>2</sup>, with spray angle ( $\theta$ ) the most, namely  $\theta = 22^\circ$  and the length of the spray (L) is the smallest, with value L = 52.5 cm.*

**Keyword : diesel dual fuel, biodiesel, biomass, injection pressure, shim, syngas.**

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Rabbil'alamin. Puji syukur penulis panjatkan kehadirat ALLAH SWT atas limpahan rahmat, hidayah, rizki dan izin-Nya sehingga penyusunan laporan tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penyusunan laporan tugas akhir ini merupakan salah satu syarat akademis untuk kelulusan mahasiswa Program Studi S1 Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis menyadari dalam penyusunan laporan tugas akhir ini bukan semata-mata atas kemampuan penulis sendiri, melainkan dengan adanya dukungan, bimbingan dan dorongan dari berbagai pihak, baik secara langsung, maupun tidak langsung. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Karsita dan Ibu Rosida, orangtua penulis dan keluarga besar yang selalu memberikan semangat dan do'a yang tak henti-henti hingga terselesaikannya tugas akhir ini.
2. Bapak Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan dan nasehat kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Ir. Atok Setiawan, M.Eng.Sc., selaku dosen koordinator laboratorium teknik pembakaran dan bahan bakar.
4. Bapak Nur Ikhwan, ST, M.Eng., Bapak Ary Bachtiar, ST., MT., Ph.D., dan Bapak Bambang Arip Dwiyantoro, ST., M.Eng., Ph.D. selaku dosen penguji yang telah memberikan banyak saran dalam penyusunan tugas akhir ini.
5. Bapak Ir. Bambang Pramujati, M.Eng.Sc., Ph.D., selaku Kepala Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
6. Bapak Nur Ikhwan, ST., M.Eng., selaku dosen wali.
7. Seluruh Dosen beserta staff karyawan Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya yang telah memberikan bekal ilmu

pengetahuan serta sarana dan prasarana kepada penulis selama menjalani perkuliahan.

8. Seluruh rekan-rekan lab. Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar dan Pak Karmono selaku karyawan yang telah memberikan bantuan dan dukungan dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.
9. Seluruh rekan-rekan Teknik Mesin ITS 2012 M55 Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Intitut Teknologi Sepuluh Nopember yang turut membantu dan memberikan dukungan kepada penulis.
10. Seluruh keluarga Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin ITS khususnya Bengkellerz 2012 yang tak henti-hentinya memberikan semangat kepada penulis.
11. Teman-teman FORTRESS IPA 7 SMAN 3 Malang yang selalu memberi dukungan meski sudah berbeda jalan hidup.

Semoga amal dan jasa yang telah diberikan dapat bermanfaat dan mendapat imbalan dari ALLAH SWT.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir ini. Untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun untuk penyempurnaan laporan tugas akhir ini. Dan penulis meminta maaf apabila terdapat kalimat yang kurang berkenan pada laporan tugas akhir ini.

Penulis berharap semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan seluruh pembaca untuk kemajuan yang lebih baik. Akhir kata, penulis mengucapkan TERIMA KASIH.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

## DAFTAR ISI

Abstrak.....	i
Abstract.....	iii
Kata Pengantar.....	v
Daftar Isi.....	vi
Daftar Gambar.....	viii
Daftar Tabel.....	ix
<b>Bab I : Pendahuluan</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Batasan Masalah.....	5
1.4 Tujuan Penelitian.....	6
1.5 Manfaat Penelitian.....	6
<b>Bab II : Dasar Teori</b>	
2.1 Bahan Bakar Mesin Diesel.....	7
2.1.1 Bahan Bakar Biodiesel.....	7
2.1.2 Bahan Bakar Gas.....	9
2.1.3 Parameter Bahan Bakar Mesin Diesel.....	10
2.2 Teori Pembakaran.....	16
2.3 Dasar Teori Mesin Diesel.....	18
2.3 Prinsip Kerja Sistem Bahan Bakar Diesel.....	25
2.4 Penelitian Terdahulu	
2.4.1 Penelitian oleh Prasad.....	28
2.4.2 Penelitian oleh Liu.....	29
<b>Bab III : Metodologi Penelitian</b>	
3.1 Metode Penelitian.....	31
3.2 Alat Uji.....	31
3.3 Bahan Bakar yang Dipakai.....	33
3.4 Prosedur Pengujian.....	37
3.5 Rancangan Eksperimen.....	42
3.6 Flowchart Penelitian.....	43
<b>Bab IV : Analisa dan Pembahasan</b>	
4.1 Perhitungan Unjuk Kerja	
4.1.1 Daya.....	51

4.1.2	Torsi.....	52
4.1.3	bmep.....	52
4.1.4	Konsumsi Bahan Bakar Spesifik.....	53
4.1.5	Biodiesel Tersubstitusi.....	53
4.1.6	Efisiensi Termal.....	54
4.1.7	afr.....	55
<b>4.2 Analisa Unjuk Kerja</b>		
4.2.1	Daya (Ne).....	56
4.2.2	Torsi (Mt).....	58
4.2.3	bmep.....	60
4.2.4	sfc.....	61
4.2.5	Biodiesel Tersubstitusi.....	63
4.2.6	Efisiensi Termal.....	64
4.2.7	Analisa Rasio Bahan Bakar.....	66
4.2.8	Analisa Temperatur Engine.....	67
4.2.9	Analisa Temperatur Exhaust.....	68
4.2.10	Analisa Temperatur Pelumas.....	69
4.2.11	Analisa Temperatur Pendingin.....	71
4.2.12	Analisa Atomisasi Bahan Bakar.....	72
<b>Bab V : Kesimpulan dan Saran</b>		
5.1	Kesimpulan.....	77
5.2	Saran.....	78

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Tahap pembakaran pada mesin diesel.....	19
<b>Gambar 2.2</b>	Bagian-bagian dari injektor.....	27
<b>Gambar 2.3</b>	Bagian-bagian sistem bahan bakar mesin diesel.....	28
<b>Gambar 2.4</b>	Grafik <i>Brake Thermal Efficiency</i> terhadap variasi tekanan penginjeksian dan fungsi beban....	29
<b>Gambar 2.5</b>	Grafik konsumsi bahan bakar spesifik terhadap tekanan injeksi yang divariasikan.....	30
<b>Gambar 3.1</b>	Skema <i>mixer</i> .....	33
<b>Gambar 3.2</b>	<i>Mixing jet</i> .....	33
<b>Gambar 3.3</b>	<i>Pitot Static Tube</i> $\theta = 10^\circ$ .....	35
<b>Gambar 3.4</b>	Shim set standar injektor Yanmar TF 55R.....	38
<b>Gambar 3.5</b>	Drawing Shim Set Yanmar TF 55R Di (dalam ukuran mm).....	38
<b>Gambar 3.6</b>	Skema pengujian tekanan penginjeksian bahan bakar.....	38
<b>Gambar 3.7</b>	Peralatan pengukur densitas.....	39
<b>Gambar 3.8</b>	Peralatan pengukur viskositas.....	40
<b>Gambar 3.9</b>	Skema peralatan generator set dual fuel.....	41
<b>Gambar 4.1</b>	Hasil atomisasi bahan bakar biodiesel pada tekanan 190 kg/cm <sup>2</sup> .....	73
<b>Gambar 4.2</b>	Hasil atomisasi bahan bakar biodiesel pada tekanan 210 kg/cm <sup>2</sup> .....	74
<b>Gambar 4.3</b>	Hasil atomisasi bahan bakar biodiesel pada tekanan 230 kg/cm <sup>2</sup> .....	74
<b>Gambar 4.4</b>	Hasil atomisasi bahan bakar biodiesel pada tekanan 250 kg/cm <sup>2</sup> .....	76

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Komparasi properties bahan bakar solar dan biodiesel.....	8
<b>Tabel 3.1</b> Tabel eksperimen.....	34
<b>Tabel 3.2</b> Properties syngas hasil pembakaran briket biomassa sampah perkotaan.....	34
<b>Tabel 3.3</b> Parameter eksperimen.....	43
<b>Tabel 4.1</b> Hasil pengujian antara kondisi single fuel dan dual fuel pada pembebanan 2000 watt (100%).....	46
<b>Tabel 4.2</b> Tabel kandungan syngas briket sampah perkotaan....	50

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Meningkatnya populasi di bumi dan semakin berkembangnya teknologi, kebutuhan energi khususnya seperti bahan bakar yang berasal dari minyak bumi semakin meningkat, sehingga cadangan sumber daya minyak bumi yang berasal dari fosil ini akan semakin menipis karena sifatnya yang tidak dapat diperbaharui. Bahan bakar diesel adalah contoh bahan bakar fosil yang paling banyak digunakan, sekitar 43,4% dari total pemakaian jenis BBM, maka dari itu dibutuhkan beberapa energi alternatif bahan bakar untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar minyak bumi, seperti biodiesel dan syngas dari biomassa.

Dengan jumlah penduduk yang semakin bertambah (dengan pertumbuhan sebesar 1,13% menurut BPPT Outlook Energi Indonesia 2014)[1] serta perkembangan teknologi yang sangat pesat, limbah yang dihasilkan oleh masyarakat khususnya di daerah perkotaan besar yang padat penduduknya juga semakin meningkat. Limbah yang menumpuk tersebut menjadi masalah besar jika dibiarkan terus menerus dan dapat mengakibatkan bencana bagi masyarakat. Untuk itu diperlukan solusi untuk memanfaatkan limbah tersebut, seperti menampungnya di tempat khusus dan diolah menjadi energy alternatif.

Sampah perkotaan tersebut bisa kita olah menjadi biomassa yang berguna sebagai energy alternatif selain minyak bumi. Keunggulan dari biomassa adalah harganya yang lebih murah daripada sumber energi yang lainnya, mengingat biomassa mudah didapatkan dari sampah perkotaan yang melimpah tadi. Nantinya biomassa ini akan digunakan sebagai bahan bakar yang dapat diaplikasikan pada motor bakar dengan menggunakan berbagai proses, salah satunya gasifikasi.

Sedangkan gasifikasi sendiri adalah teknologi proses termokimia yang mengubah biomassa padat menjadi *combustible gas*. *Combustible gas* ini berarti gas yang dihasilkan dari proses tersebut bersifat mudah terbakar, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif. Beberapa penelitian yang sudah

dilakukan diantaranya adalah penelitian tentang gasifikasi dari biomassa dengan bahan bakar limbah perkotaan (*municipal waste*) yang dilakukan oleh Achmad (2015)[2] untuk menghasilkan *combustible gas* yang dapat dimanfaatkan pada mesin diesel. Komposisi gas yang didapatkan pada hasil penelitian ini yaitu CO sebesar 7,99%; H<sub>2</sub> 7,60%; CH<sub>4</sub> 0,04%; N<sub>2</sub> 61,99% dan O<sub>2</sub> 15,65% dengan kandungan LHV 3489,87 Kj/Kg.l

Pemanfaatan gas hasil pembakaran biomassa (syngas) dapat kita aplikasikan pada motor pembakaran dalam dengan sistem Diesel Dual Fuel. Diesel Dual Fuel atau mesin diesel dengan bahan bakar ganda ini adalah mesin diesel yang dimodifikasi pada intake manifold sehingga memiliki dua sistem penyuplai bahan bakar yang berbeda. Bahan bakar yang pertama bertindak sebagai main fuel dan bahan bakar kedua bertindak sebagai *pilot fuel*. Pemanfaatan syngas hasil pembakaran biomassa tadi pada sistem diesel dual fuel ini dapat meningkatkan unjuk kerja dan efisiensi mesin.

Jika pada sistem bahan bakar tunggal atau single fuel mesin diesel bekerja dengan menghisap udara murni dari luar, sistem dual fuel yang masuk ke dalam ruang bakar tidak hanya udara murni, udara tersebut akan masuk secara bersamaan dengan sejumlah bahan bakar gas. Pencampuran udara dan bahan bakar gas tersebut terjadi dengan mekanisme mixer yang berbentuk seperti venturi. Pada sistem dual fuel mode mesin diesel mereduksi emisi NO<sub>x</sub> hingga 30% dibandingkan dengan mode single fuel.(Jie, 2012)[3].

Pada sistem *dual fuel* terdapat 3 macam teknologi yang di aplikasikan yaitu *Low Pressure Injected Gas (LPIG)*, *High Pressure Injected Gas (HPING)*, dan *Combustion Air Gas Integration*. Ketiganya dapat diaplikasikan untuk mesin yang menggunakan sistem *dual-fuel*.

Pada penelitian kali ini penulis menggunakan teknologi *Combustion Air Gas Integration*. Model ini bekerja dengan mencampur udara-bahan bakar gas sebelum memasuki saluran isap atau sebelum memasuki kompresor-*turbocharger*, apabila mesin diesel yang digunakan adalah *turbocharged sistem*. Tekanan bahan bakar gas yang dibutuhkan diperkirakan sama dengan tekanan

udara luar/sekitar, bahkan untuk menjaga tidak terjadi kebocoran gas saat mesin diesel tidak beroperasi maka tekanan keluaran *gas pressure regulator* diatur sedikit lebih rendah dari tekanan udara sekitar. Sistem pencampuran dilakukan dengan alat yang dinamakan *mixer* yang diletakkan pada saluran isap mesin diesel. Keuntungan dari pemakaian sistem seperti ini antara lain murah secara ekonomis dibandingkan kedua sistem sebelumnya karena tidak menggunakan injektor maupun pompa bertekanan tinggi, tidak membutuhkan model yang rumit sehingga apabila suplai gas habis atau tersendat sistem akan langsung bekerja dengan 100% bahan bakar diesel. Sementara kerugian dari sistem ini adalah adanya kemungkinan gas sebagian keluar bersama gas buang pada saat katup hisap dan buang terbuka bersamaan.

Aplikasi gas hasil pembakaran biomassa ini tidak dapat langsung diaplikasikan pada mesin diesel karena prinsip kerja mesin diesel membutuhkan bahan bakar yang dapat menyala akibat adanya tekanan (compress) tinggi dan memiliki kandungan cetane number. Gas hasil pembakaran biomassa tidak memiliki hal tersebut, sehingga diperlukan bahan bakar penyalu yang disebut pilot fuel, pilot fuel ini berfungsi sebagai penyalu main fuel (syngas). Dalam penelitian ini pilot fuel yang digunakan adalah bahan bakar biodiesel dengan tujuan awal untuk mengurangi ketergantungan akan bahan bakar solar yang berasal dari minyak bumi.

Biodiesel merupakan salah satu alternatif bahan bakar dari sumber minyak nabati untuk menggantikan bahan bakar dari minyak bumi. Biodiesel ini dapat dibuat dari bahan dasar minyak kelapa sawit, minyak biji jarak, minyak dari kedelai, minyak biji bunga matahari, dan sebagainya. Biodiesel juga lebih ramah lingkungan karena menghasilkan emisi/gas buang yang jauh lebih baik dibandingkan diesel/solar dan angka setana (cetane number) berkisar antara 57-62 sehingga efisiensi pembakaran lebih baik. Namun, bila dibandingkan dengan diesel fuel dari minyak bumi, biodiesel memiliki nilai viskositas, densitas dan tegangan permukaan yang lebih tinggi, inilah yang mengakibatkan biodiesel membutuhkan treatment tertentu pada engine supaya bekerja

seoptimal bahan bakar minyak bumi, salah satunya adalah meningkatkan tekanan injeksi bahan bakar diesel.

Sedangkan untuk penelitian tentang pengaruh variasi tekanan penginjeksian oleh injektor juga sudah dilakukan oleh Prasad[4], variasi yang dilakukan adalah dengan melakukan penggantian shim atau adjusting washer dengan tekanan yang berbeda, yaitu 190 bar, 210 bar dan 230 bar dengan persentase beban 25%, 50%, 75% dan 100% serta debit LPG yang berbeda beda (dalam liter per menit). Didapatkan hasil efisiensi thermal paling baik pada tekanan penginjeksian 230 bar dengan debit LPG sebesar 2 liter per menit pada beban 100%. Untuk emisi gas buang (HC, CO dan NO<sub>x</sub>) juga didapatkan konsentrasi gas buang terendah pada tekanan penginjeksian 230 bar dengan debit LPG sebesar 2 liter per menit dengan beban penuh 100%.

Penelitian yang sudah dilakukan juga antara lain oleh Ismanto[5], variasi yang dilakukan adalah dengan cara menambah atau mengurangi shim pada delivery spring, variasi tekanan yang dilakukan adalah 13 MPa, 16 MPa dan 18 MPa dengan putaran mesin (rpm) yang divariasikan antara 1000 rpm sampai dengan 1980 rpm. Hasil yang didapatkan adalah nilai torsi tertinggi pada tekanan 18 MPa pada putaran maksimum 1980 rpm sebesar 9,81 Nm dan daya tertinggi didapatkan pada putaran maksimum 1980 rpm sebesar 1,275 kW.

Berdasarkan uraian diatas akan dilakukan penelitian tentang pengaruh tekanan injeksi bahan bakar dengan variasi shim pada injektor terhadap karakterisasi unjuk kerja pada mesin Yanmar TF-55 Di dengan sistem dual fuel. Ketebalan shim divariasikan dengan tekanan injeksi yang dihasilkan sesuai dengan ketebalan shim. Pengujian dilakukan dengan variasi beban mulai 200 watt sampai 2000 watt dengan interval 200 watt. Parameter yang diukur antara lain adalah tegangan (V), arus listrik (I), konsumsi bahan bakar biodiesel dan syngas, serta suhu operasi mesin yang terdiri dari suhu silinder blok, suhu pelumas, suhu air pendingin, dan suhu gas buang. Hasil yang diharapkan dari penelitian ini adalah karakterisasi unjuk kerja mesin diesel sistem dual fuel dengan variasi tekanan injeksi bahan bakar, substitusi bahan bakar biodiesel oleh syngas serta kondisi operasi mesin.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Dalam penelitian ini, permasalahan dirumuskan sebagai berikut :

1. Bagaimana atomisasi semprotan biodiesel bila dibandingkan dengan bahan bakar fosil pada kondisi kamar (suhu 25°C dan tekanan 1 atm) ?
2. Bagaimana pengaruh peningkatan tekanan injeksi bahan bakar terhadap karakterisasi unjuk kerja mesin diesel Yanmar TF 55R Di sistem dual fuel ?
3. Bagaimana perubahan kondisi operasional mesin dengan variasi tekanan injeksi bahan bakar pada mesin diesel Yanmar TF 55R Di sistem dual fuel?

## **1.3 Batasan Masalah**

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Percobaan menggunakan mesin diesel satu silinder empat langkah yang telah dimodifikasi pada saluran isap untuk menyuplai syngas dari biomassa dan dilakukan variasi terhadap tekanan injektor.
2. Kondisi mesin diesel dalam keadaan standar.
3. Kondisi udara dalam keadaan ideal.
4. Proses pembuatan biodiesel tidak dibahas pada penelitian ini.
5. Penelitian tidak membahas mengenai pembuatan reactor gasifikasi serta reaksi kimia yang terjadi.
6. Variasi tekanan pada injektor dilakukan dengan cara mengganti shim atau adjusting washer sebagai pengatur tekanan injektor
7. Bahan bakar yang digunakan adalah biodiesel minyak sawit dan gas hasil gasifikasi dari bahan baku sampah perkotaan.
8. Untuk atomisasi bahan bakar hanya dilihat melalui visualisasi mata (tidak memakai perangkat lunak khusus).

## **1.4 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan penelitian dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui atomisasi semprotan biodiesel bila dibandingkan dengan bahan bakar fosil pada kondisi kamar (suhu 25°C dan tekanan 1 atm).
2. Mengetahui pengaruh variasi tekanan injektor terhadap karakteristik unjuk kerja sistem dual fuel syngas sampah dengan biodiesel pada mesin diesel stasioner.
3. Mengetahui perubahan kondisi operasional mesin dengan variasi tekanan injeksi bahan bakar pada mesin diesel Yanmar TF 55R Di sistem dual fuel.

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat penelitian yang bisa didapatkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Dapat mengetahui bahan bakar alternatif yang dapat digunakan pada motor diesel.
2. Dapat menghasilkan teknologi yang memanfaatkan hasil dari limbah yang sudah tidak dimanfaatkan lagi.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Bahan Bakar Mesin Diesel**

Produk hasil industri minyak bumi terdiri dari berbagai macam jenis dengan karakteristik dan sifat yang berbeda-beda, minyak mentah yang diperoleh dari perut bumi harus diolah melalui tahap pengilangan (distilasi bertingkat) agar diperoleh produk-produk yang dapat digunakan. Salah satu produk yang dihasilkan adalah bahan bakar untuk mesin diesel.

Bahan bakar mesin diesel yang dihasilkan dari pengolahan minyak bumi mentah terdiri dari senyawa hidrokarbon dan senyawa non hidrokarbon. Senyawa hidrokarbon yang dapat ditemukan dalam bahan bakar diesel antara lain adalah parafinik, naftenik, olefin dan aromatic. Sedangkan untuk senyawa non hidrokarbon terdiri dari senyawa yang mengandung unsur non logam yaitu S (sulfur), N (nitrogen), O (oksigen) dan unsur logam seperti Vanadium, Nikel dan Besi (Suhartanta, 2008)[6]. Bahan bakar diesel secara umum adalah bahan bakar yang dapat digunakan di mesin diesel.

##### **2.1.1. Bahan Bakar Biodiesel**

Biodiesel merupakan bahan bakar mesin diesel yang terdiri dari ester-ester monoalkil dari minyak nabati dan lemak hewani. Biodiesel dari proses pembuatannya mempunyai rantai karbon yang panjang, lebih panjang dari rantai karbon solar dan sedikit lebih pekat dibanding dengan bahan bakar diesel dari minyak bumi. Bentuknya yang cair dan kemampuan dicampurkan dengan solar pada segala perbandingan merupakan salah satu keunggulan dari biodiesel.

Campuran biodiesel dan solar dapat memberikan unjuk kerja pada mesin yang lebih baik daripada menggunakan biodiesel murni. Pemakaian biodiesel murni dapat menimbulkan masalah seperti, kesulitan saat start-up, penyumbatan pada filter dan masalah lain dalam saluran bahan bakar, hal ini karena meskipun hasil dari biodiesel terlihat sangat jernih namun pada dasarnya masih terdapat partikel-

partikel pengotor yang tidak terlihat oleh mata dan oleh karena hal inilah semua mesin diesel setelah bahan bakar kemudian akan disaring oleh filter guna memastikan tidak ada kotoran atau benda asing yang nantinya menyebabkan penyumbatan pada lobang nosel. Sehingga bahan bakar dengan kondisi bersih akan dipompakan dengan pompa bertekanan tinggi (fuel injection pump) menuju nosel atau injektor (Kawano, 2011)[7]

Biodiesel dapat dihasilkan dari proses transesterifikasi minyak atau lemak. Proses transesterifikasi tersebut pada prinsipnya dilakukan dengan maksud mengeluarkan gliserin dari minyak dan mereaksikan asam lemak bebasnya dengan alkohol menjadi alcohol ester (Fatty Acid Methyl Ester / FAME). Dalam prakteknya transesterifikasi dilakukan dengan mencampur minyak nabati / hewani dengan alcohol (methanol, etanol dan lain sebagainya) dengan menggunakan katalisator KOH atau NaOH. Proses transesterifikasi dilakukan selama 1 sampai 3 jam pada suhu kamar atau pada suhu yang lebih tinggi, campuran yang terjadi didiamkan sehingga terbentuk dua lapisan, yaitu lapisan bawah (gliserin) dan lapisan atas adalah metil ester.

Agar dapat digunakan sebagai bahan bakar pengganti solar, biodiesel harus mempunyai kemiripan sifat fisik dan kimia dengan minyak solar. Salah satu sifat fisik yang penting adalah viskositas. Biodiesel dapat dijadikan bahan bakar, namun viskositasnya yang lebih tinggi daripada bahan bakar fosil diesel mengakibatkan adanya perlakuan khusus pada bahan bakar biodiesel agar bahan biodiesel dapat bekerja seoptimal bahan bakar fosil diesel.

**Tabel 2.1** Komparasi Properties Bahan Bakar Solar dan Biodiesel

Sifat – sifat	Solar	Biodiesel Palm Oil	Biodiesel Standar SNI
Specific gravity (kg/cm <sup>3</sup> ) pada 40°C (mm <sup>2</sup> /s)	844	868	850-890

Viskositas kinematis pada 40°C (mm <sup>2</sup> /s)	3,32	5,3	2,3 – 6
Tegangan permukaan (dyne/cm)	66	68	-
Angka Cetane	42	52	<51
Flash point (°C)	70	174	Min. 100

### 2.1.2. Bahan Bakar Gas

Bahan bakar gas memiliki banyak jenis tergantung dari asal gas tersebut dan proses pembuatannya. Jenis-jenis gas tersebut antara lain :

1. Bahan bakar yang secara alami didapatkan dari alam :
  - Gas alam
  - Metan dari penambangan batu bara
2. Bahan bakar gas yang terbuat dari bahan bakar padat :
  - Gas yang terbentuk dari batu bara
  - Gas yang terbentuk dari limbah dan biomassa
  - Dari proses industri lainnya (*gas blast furnace*)
3. Gas yang terbuat dari minyak bumi :
  - Gas petroleum cair (LPG)
  - Gas hasil penyulingan
  - Gas dari gasifikasi minyak
4. Gas-gas dari proses fermentasi.

Gasifikasi adalah proses yang menggunakan panas, tekanan, dan uap untuk mengkonversi bahan langsung menjadi gas terutama terdiri dari karbon monoksida dan hidrogen. Ada 3 produk yang dihasilkan oleh gasifikasi : gas hidrokarbon (syngas), hidrokarbon cairan (minyak) dan char (ash). Syngas dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk menghasilkan listrik atau uap, atau sebagai sebuah blok bangunan dasar untuk banyak bahan kimia. Bila dicampur dengan udara, syngas dapat

digunakan dalam bensin atau mesin diesel dengan beberapa modifikasi mesin. (van der Burgt, 2003)[8].

Municipal waste (sampah perkotaan) merupakan limbah yang dapat dimanfaatkan untuk dijadikan sebagai umpan pada reaktor gasifikasi. Bukan hanya dapat digunakan sebagai umpan tetapi yang lebih baiknya dapat mengurangi penumpukan di tempat pembuangan sampah yang nantinya dapat menghasilkan sebuah yang disebut juga gas synthesis (syngas).

Keuntungan dari gasifikasi adalah penerapannya dapat dilakukan untuk berbagai macam bahan baku. Hampir semua zat karbon dapat digasifikasi: bahan bakar fosil seperti batubara, minyak, atau gas alam, biomassa (yaitu setiap jenis limbah pertanian seperti bongkol jagung atau berbagai tanaman), aspal, atau bahkan limbah, plastik, dan sampah kota. Gasifikasi dapat digunakan untuk menghasilkan berbagai produk, termasuk listrik, gas alam, bahan bakar cair (seperti bensin, solar, dan bahan bakar jet), hidrogen, dan berbagai bahan kimia.

### **2.1.3. Parameter Bahan Bakar Mesin Diesel**

Beberapa karakteristik bahan bakar motor diesel yang paling utama diantaranya adalah berat jenis (specific gravity), viskositas (viscosity), nilai kalori (calorific value), kandungan sulfur (sulphur content), daya pelumasan, titik tuang (pour point), titik nyala (flash point), angka cetane (cetane number), kandungan arang dan kadar abu (ash content).

Agar bahan bakar yang diujikan pada mesin diesel memiliki kinerja yang baik, maka diperlukan spesifikasi bahan bakar yang sesuai dengan standar Dirjen Migas sehingga analisa masih dalam range yang dianjurkan. Karakteristik umum yang perlu diketahui untuk menilai bahan bakar mesin diesel antara lain adalah sebagai berikut :

#### **a. Density, Specific Gravity dan API Gravity**

Density didefinisikan sebagai perbandingan massa bahan bakar terhadap volume bahan bakar pada suhu acuan 15°C. Sedangkan Specific Gravity (SG) didefinisikan sebagai

perbandingan berat dari sejumlah volume minyak bakar terhadap berat air untuk volume yang sama pada suhu tertentu densitas bahan bakar, relatif terhadap air. Specific Gravity dinyatakan dalam persamaan :

$$SG_{\text{terhadap air}} = \frac{\text{densitas}_{\text{bahan bakar}}}{\text{densitas}_{\text{air}}} \dots\dots\dots (2.1)$$

Sementara hubungan antara Specific Gravity dan API Gravity adalah untuk mencari nilai API Gravity itu sendiri. API Gravity / Berat Jenis adalah suatu angka yang menyatakan perbandingan berat bahan bakar minyak pada temperatur tertentu terhadap air pada volume dan temperatur yang sama. Penggunaan specific gravity adalah untuk mengukur berat/massa minyak bila volumenya telah diketahui (Kawano, 2011). Nilai API Gravity dapat dicari sebagai berikut :

$$API \text{ Gravity} = \frac{141,5}{SG \text{ at } 60^{\circ}C} - 131,5 \dots\dots\dots (2.2)$$

## **b. Viskositas**

Viskositas atau kekentalan dari suatu cairan adalah salah satu sifat cairan yang menyatakan besarnya perlawanan atau hambatan dari suatu bahan cair untuk mengalir atau ukuran besarnya tahanan geser dari bahan cair. Viskositas terjadi terutama karena adanya interaksi antara molekul-molekul cairan. Viskositas mempengaruhi derajat pemanasan awal yang diperlukan untuk handling, penyimpanan dan atomisasi yang memuaskan.

Viskositas bahan bakar minyak sangat penting, terutama bagi mesin-mesin diesel maupun ketel-ketel uap, karena viskositas minyak sangat berkaitan dengan suplai konsumsi bahan bakar ke dalam ruang bakar dan juga sangat berpengaruh terhadap kesempurnaan proses pengabutan (atomizing) bahan bakar melalui injektor.

Jika viskositas terlalu tinggi maka akan menyulitkan dalam pemompaan dan sulit untuk diinjeksi karena bahan bakar akan semakin kental dan lebih sulit mengalir, sehingga atomisasi

bahan bakar menjadi jelek. Sedangkan untuk bahan bakar yang mempunyai viskositas rendah dapat menimbulkan gesekan (abrasive) dalam ruang bakar karena gerakan piston dalam ruang bakar membutuhkan pelumasan, sehingga viskositas juga menggambarkan tingkat pelumasan dari bahan bakar. Secara logika, viskositas bahan bakar yang lebih tinggi memiliki tingkat pelumasan yang lebih baik.

Maka dari itu, solar sebagai bahan bakar mesin diesel diusahakan memiliki nilai viskositas yang tidak terlalu tinggi, secara umum bahan bakar solar memiliki viskositas yang relative rendah, karena dengan viskositas maka bahan bakar akan lebih mudah teratomisasi pada saat diinjeksikan ke dalam ruang bakar dan tidak mengalami hambatan di dalam sistem pompa dan injeksi. Akan tetapi nilai viskositasnya juga tidak boleh rendah, karena akan menyebabkan panas berlebihan yang ditimbulkan oleh kurangnya pelumasan pada dinding silinder dan piston sehingga membuat komponen mesin menjadi cepat aus. Oleh sebab inilah karakteristik ini sangat penting karena mempengaruhi kinerja injektor pada mesin diesel.

#### **c. Titik Nyala Bahan Bakar ( Flash Point )**

Titik nyala suatu bahan bakar adalah suhu terendah dimana bahan bakar dapat menyala pada saat dipanaskan, uap yang bercampur dengan udara dari hasil pemanasan tersebut akan menyala bila diberikan api kecil berupa kilatan api. Hal ini penting diketahui untuk mengatasi masalah yang berkaitan dengan keamanan pada saat penyimpanan dan penanganan bahan bakar.

Titik nyala sebaiknya harus cukup tinggi untuk menghindari bahaya kebakaran pada suhu ambient yang normal. Titik nyala ini bisa digunakan sebagai salah satu indikasi bilamana bahan bakar tercampur dengan fraksi-fraksi ringan dari suatu hidrokarbon, dimana bila bahan bakar tercampur dengan fraksi ringan seperti kerosene, wash solvent maka kecenderungan angka flash point akan semakin turun.

#### **d. Pour Point**

Pour point atau titik tuang suatu bahan bakar adalah suhu terendah dimana bahan bakar masih dapat mengalir karena gaya gravitasi. Ini merupakan indikasi yang sangat kasar untuk suhu terendah dimana bahan bakar minyak siap untuk dipompakan.

Penentuan pour point ini menentukan cocok tidaknya jenis pompa untuk memindahkan bahan bakar pada suhu tertentu. Dengan mengetahui titik tuang bahan bakar tersebut maka dapat diketahui pada suhu berapakah bahan bakar tersebut dapat dialirkan dengan pompa baik itu dari dalam sumur maupun saat proses transportasi.

**e. Kandungan Belerang (Sulphur Content)**

Sulphur content atau kandungan belerang dalam bahan bakar diesel dari hasil penyulingan sangat tergantung pada asal minyak mentah yang akan diolah. Keberadaan belerang tidak diharapkan karena sifatnya merusak yaitu apabila oksida belerang bereaksi dengan air menjadi belerang dioksida ( $\text{SO}_2$ ) dan belerang trioksida ( $\text{SO}_3$ ) merupakan bahan yang korosif terhadap logam di ruang bakar. Selain itu menimbulkan polusi lingkungan akibat oksidasi belerang dengan oksigen selama proses pembakaran.

**f. Distillation atau Destilasi**

Karakteristik destilasi dari bahan bakar menunjukkan kemampuan bahan bakar berubah menjadi uap (*volatility recovery*) pada suhu tertentu, angka destilasi ini dapat digunakan untuk menghitung nilai cetane index. Destilasi juga dapat digunakan untuk mengetahui potongan fraksi dari suatu bahan bakar solar. Nilai tersebut dilihat dari nilai *Initial Boiling Point* (IBP), apabila nilai *Initial Boiling Point* terlalu rendah maka ada kemungkinan solar tercampur dengan fraksi-fraksi ringan.

**g. Cetane Number**

Cetane number atau angka setana merupakan bilangan yang menyatakan prosentase volume dari normal cetane ( $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$ ) yang memiliki kualitas penyalaan tinggi dalam campurannya

dengan  $\alpha$ -methylnaphthalene ( $C_{10}H_7CH_3$ ) yang memiliki kualitas penyalaaan rendah.

Apabila nilai setana semakin tinggi dalam suatu bahan bakar, kemampuan auto ignitionnya akan semakin baik dan pada temperatur yang relatif rendah bahan bakar dapat dengan mudah menyala.

Sedangkan apabila nilai setana yang rendah bahan bakar baru akan menyala pada suhu yang tinggi. Maka pada mesin akan terjadi knocking yang menyebabkan performa mesin turun dan asap hasil pembakaran menjadi berwarna hitam karena pembakaran di ruang bakar tidak sempurna, sehingga untuk mengatasi knocking dapat dikurangi dengan menaikkan angka setana itu sendiri.

#### **h. Calorific Value**

Calorific value atau nilai kalor merupakan suatu angka yang menyatakan jumlah panas atau kalori yang dihasilkan dari proses pembakaran sejumlah tertentu bahan bakar dengan udara atau oksigen. Dari bahan bakar yang dibakar, nilai kalor yang terkandung akan diubah menjadi energy mekanik melalui kerja komponen mesin. Nilai kalor dinyatakan dalam 2 ukuran besaran, yaitu nilai kalor atas, NKA (jika air hasil pembakaran dalam phase cair) dan nilai kalor bawah, NKB (jika air hasil pembakaran dalam phase uap). Besarnya nilai kalor atas diuji dengan *bomb calorimeter*, dan nilai kalor bawah dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$NKB = NKA - \left( \frac{m_{air}}{m_{sample}} \times LH \right) \quad \dots\dots(2.5)$$

Keterangan :

NKB = Nilai Kalor Bawah (kal/gram)

NKA = Nilai Kalor Atas (kal/gram)

$m_{air}$  = Massa air yang berbentuk dalam proses pembakaran (gram)

$m_{sampel}$  = Massa sampel yang uji bahan bakar (gram)

LH = Panas laten penguapan air (kal/gram)

#### **h. Water Content**

Kadar air menjadi salah satu parameter penting dalam penentuan kualitas bahan bakar, karena jika kadar air terlalu besar maka akan muncul kendala seperti : nilai kalori akan turun, tumbuhnya mikroorganisme, terbentuknya deposit dari unsur-unsur anorganik yang terdapat di air dan terjadinya karat atau korosi.

Kadar air pada bahan bakar diesel juga salah satu factor yang mempengaruhi kinerja mesin. Adanya kandungan air pada bahan bakar meskipun dalam jumlah sedikit akan menyebabkan terjadinya penyumbatan pada saluran dan filter bahan bakar, terutama untuk negara yang memiliki musim dingin. Kandungan air yang terkandung dalam bahan bakar dapat menyumbat aliran bahan bakar. Selain itu keberadaan air dapat menyebabkan korosi dan pertumbuhan mikroorganisme yang juga dapat menyumbat aliran bahan bakar dan kerusakan mesin.

#### **i. Kadar Abu (Ash Content)**

Ash content atau kadar abu adalah jumlah sisa-sisa dari minyak yang tertinggal, apabila suatu minyak dibakar sampai habis. Kadar abu erat kaitannya dengan bahan inorganic atau garam dalam bahan bakar minyak. Garam-garam tersebut mungkin dalam bentuk senyawa sodium, vanadium, kalsium, magnesium, silicon, besi, aluminium, nikel, dll. Selain itu kadar abu dapat berasal dari minyak bumi sendiri atau akibat proses korosi dalam sistem penyimpanan atau penimbunan (adanya partikel logam yang tidak bisa terbakar).

#### **j. Carbon Residue**

Banyaknya deposit atau kerak pada dinding ruang bakar mengindikasikan tingginya kandungan carbon residue suatu bahan bakar. Carbon residue atau residu karbon dalam ruang pembakaran dapat mengurangi kinerja mesin, karena pada suhu tinggi karbon ini dapat membara sehingga menaikkan suhu ruang bakar.

Residu karbon sendiri juga merupakan salah satu factor penyebab terjadinya knocking. Hal ini karena adanya partikel karbon yang membara didalam ruang bakar dapat menyebabkan

bahan bakar dapat menyala dengan sendirinya sebelum waktunya (self ignition). Sehingga pemeriksaan karbon atau arang pada minyak solar dan minyak diesel diperlukan untuk memperkirakan kemungkinan terbentuknya karbon/arang pada proses pembakaran yang berasal dari bahan bakar minyak tersebut.

## 2.2 Teori Pembakaran

Pembakaran adalah suatu runtutan reaksi kimia antara suatu bahan bakar dan suatu oksigen, disertai dengan produksi panas dalam bentuk api. Dalam suatu reaksi pembakaran lengkap, suatu senyawa bereaksi dengan zat pengoksidasi dan produknya adalah senyawa dari tiap elemen dalam bahan bakar dengan zat pengoksidasinya. Pada aplikasinya, oksidan pada pembakaran adalah oksigen pada udara. Tiga unsur kimia utama dalam elemen mampu bakar (combustible) pada bahan bakar adalah karbon, hidrogen dan sulfur.

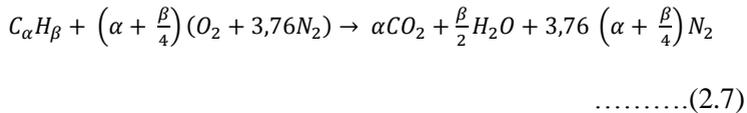
### 2.2.1. Perhitungan Stoikometri Kebutuhan Udara

Jika ketersediaan oksigen untuk oksidasi mencukupi, maka bahan bakar hidrokarbon akan dioksidasi secara menyeluruh, yaitu karbon dioksidasi menjadi karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan hidrogen dioksidasi menjadi uap air ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Pembakaran yang demikian disebut sebagai pembakaran stoikiometri dan selengkapnya persamaan reaksi kimia untuk pembakaran stoikiometri dari suatu bahan bakar hidrokarbon ( $\text{C}_\alpha\text{H}_\beta$ ) dengan udara dituliskan sebagai berikut :



- Kesetimbangan C :  $\alpha = \beta$
- Kesetimbangan H :  $\beta = 2c \rightarrow c = \beta/2$
- Kesetimbangan O :  $2a = 2b + c \rightarrow a = b + c/2 \rightarrow a = \alpha + \beta/4$
- Kesetimbangan N :  $2(3.76)a = 2d \rightarrow d = 3.76a \rightarrow d = 3.76 (\alpha + \beta/4)$

Substitusi persamaan-persamaan kesetimbangan di atas ke dalam persamaan reaksi pembakaran reaksi pembakaran  $C_\alpha H_\beta$  menghasilkan persamaan sebagai berikut :



Jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mendapatkan pembakaran stoikiometri adalah :

$$m_{O_2} = \frac{m_{atom O_2}}{m_{atom C_\alpha H_\beta}} X \% C_\alpha H_\beta \frac{kg}{kg \text{ bahan bakar}} \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

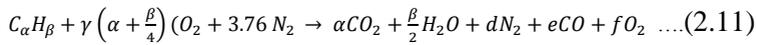
Stoikiometri massa yang didasarkan pada rasio udara dan bahan bakar (*air fuel ratio* ) untuk bahan bakar hidrokarbon ( $C_\alpha H_\beta$ ) adalah sebagai berikut :

$$\left(\frac{A}{F}\right)_s = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{(\sum n_i M_i)_{air}}{(\sum n_i M_i)_{fuel}} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{\left(\alpha + \frac{\beta}{4}\right)M_{O_2} + 3,76\left(\alpha + \frac{\beta}{4}\right)M_{N_2}}{\alpha M_C + \beta M_H} \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

### 2.2.2. Pembakaran Non Stoikiometri

Menurut Heywood[9], dalam aplikasinya, mekanisme pembakaran dituntut dapat berlangsung secara cepat sehingga sistem-sistem pembakaran dirancang dengan kondisi udara berlebih. Hal ini dimaksudkan untuk mengantisipasi kekurangan udara akibat tidak sempurnanya proses pencampuran antara udara dan bahan bakar. Pembakaran yang demikian disebut sebagai pembakaran non stoikiometri dan selengkapnya persamaan reaksi kimia untuk pembakaran non stoikiometri dari suatu bahan bakar hidrokarbon ( $C_\alpha H_\beta$ ) dengan udara dituliskan sebagai berikut:



- a. Pembakaran dengan komposisi campuran stoikiometri  
Pada proses ini terjadi perpindahan panas yang maksimum dengan kehilangan panas yang minimum. Hasil pembakaran berupa CO<sub>2</sub>, uap air, dan N<sub>2</sub>.
- b. Pembakaran dengan komposisi campuran miskin  
Pada proses ini terjadi perpindahan panas yang maksimum tetapi diikuti dengan bertambahnya kehilangan 15 panas karena udara berlebih. Hasil pembakaran berupa CO<sub>2</sub>, uap air, O<sub>2</sub> dan N<sub>2</sub>.
- c. Pembakaran dengan komposisi campuran kaya  
Pada proses ini terjadi perpindahan panas yang kurang maksimum karena ada bahan bakar yang belum terbakar. Hasil pembakaran berupa HC, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, dan N<sub>2</sub>. Sedangkan fraksi karbon terbentuk dari reaksi sekunder antara CO dan H<sub>2</sub>O. Rasio udara-bahan bakar ideal untuk pembakaran dalam ruang bakar *CI* mesin berada pada kisaran  $18 \leq AFR \leq 80$ .

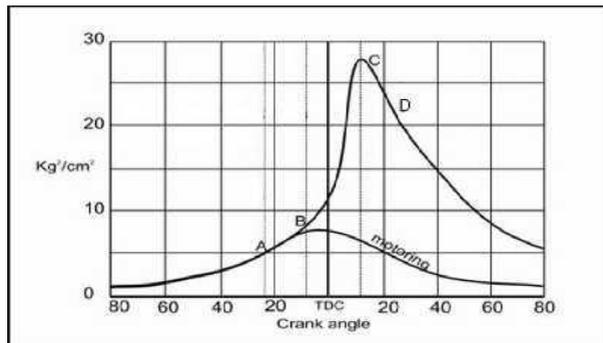
### 2.3 Dasar Teori Mesin Diesel

Mesin diesel bekerja dengan menghisap udara luar murni, kemudian dikompresikan sehingga mencapai tekanan dan temperatur yang tinggi. Sesaat sebelum mencapai TMA, bahan bakar diinjeksikan dengan tekanan yang sangat tinggi dalam bentuk butiran-butiran halus dan lembut. Kemudian butiran-butiran lembut bahan bakar tersebut bercampur dengan udara bertemperatur tinggi dalam ruang bakar dan menghasilkan pembakaran, Kawano [7].

#### 2.3.1 Tahapan pembakaran pada mesin diesel

Untuk terjadinya pembakaran pada ruang bakar, ada beberapa syarat yang harus dipenuhi, antara lain: adanya campuran yang dapat terbakar, adanya sesuatu yang menyulut terjadinya pembakaran, stabilisasi dan propagasi dari api dalam ruang bakar.

Proses pembakaran pada mesin diesel memiliki beberapa tahapan yang digambarkan dalam diagram P- $\theta$  seperti pada gambar 2.1. Tahapan pembakarannya, Kawano [7] yaitu:



**Gambar 2.1** Tahapan pembakaran pada mesin diesel

a. Tahap Pertama

*Ignition delay period* yakni waktu dimana bahan bakar siap terbakar namun belum dinyalakan. Ignition delay dihitung dari awal injeksi sampai titik dimana pada kurva p- $\theta$  berpisah dengan kurva tekanan udara saja. *Delay period* ditunjukkan oleh titik A-B.

b. Tahap kedua

*Rapid* atau *uncontrolled combustion* (dapat digolongkan sebagai *pre-mixed flame*) terjadi setelah pengapian. Dalam tahap kedua ini kenaikan tekanan cepat karena selama dalam periode tunda butiran lembut bahan bakar telah mempunyai waktu untuk menyebarkan dirinya sendiri pada daerah yang luas dan mereka telah mendapatkan udara segar disekelilingnya. Periode *rapid* atau *uncontrolled combustion* dihitung mulai dari akhir dari periode tunda sampai dengan tekanan tertinggi pada diagram indikator. Kira-kira sepertiga dari panas terlibat sampai tahap ini.

c. Tahap Ketiga

*Controlled combustion*, periode kedua dari *rapid* atau *uncontrolled combustion* diikuti oleh tahap ketiga yakni *controlled combustion*. Pada akhir tahap kedua temperatur dan tekanan membuat butiran lembut bahan bakar yang terinjeksikan pada tahap akhir injeksi terbakar seketika, dan kenaikan tekanan dapat dikontrol dengan cara mekanisme murni yakni pengaturan laju injeksi. Periode *controlled combustion* diasumsi sampai akhir pada temperatur maksimum siklus. Panas yang terlibat sampai akhir *controlled combustion* sekitar 70 %-80 % dari total panas dari bahan bakar yang disuplai selama siklus.

d. Tahap Keempat

Tahap keempat ini tidak terjadi pada semua kasus pembakaran pada motor CI, *After burning*. Secara teoritis diharapkan proses pembakaran berakhir setelah selesainya tahap ketiga. Namun karena distribusi partikel bahan bakar kurang baik, pembakaran berlanjut pada sisa langkah ekspansi. Dari itulah nama *after burning* atau tahap keempat dikembangkan. Panas total yang terlibat sampai akhir pembakaran adalah 95%-97% sedangkan sisa panas, 3%-5% keluar ke sistim ekshause sebagai *unburnt fuel*.

### 2.3.2. Prinsip Kerja Sistem Dual Fuel

Bahan bakar gas ini dicampur dengan udara dalam silinder mesin baik melalui pencampuran langsung di intake manifold dengan udara atau melalui *direct injection* ke dalam silinder. Sebuah mesin dual fuel pada dasarnya adalah mesin diesel yang dimodifikasi di mana bahan bakar gas, disebut bahan bakar utama, yang dicampur bersama dengan udara dengan menggunakan mixing yang berbentuk venturi yang akan masuk melalui *intake manifold*. Bahan bakar ini adalah sumber utama energi input ke mesin. Bahan bakar gas utama dikompresi dengan udara, bahan bakar gas memiliki temperatur terbakar sendiri lebih tinggi dibandingkan minyak solar. Sedangkan bahan bakar diesel, biasanya disebut pilot fuel, di

injeksi seperti pada mesin diesel biasa di dekat akhir kompresi primer campuran bahan bakar udara. Bahan bakar pilot diesel merupakan yang melakukan pengapian pertama dan bertindak sebagai sumber pengapian untuk pembakaran dari campuran bahan bakar udara gas. Bahan bakar pilot diesel, yang diinjeksi ke ruang bakar hanya menyumbang sebagian kecil dari tenaga mesin yang dihasilkan.

### 2.3.3. Unjuk Kerja Mesin Diesel (Sistem Dual Fuel)

Karakteristik operasi dan unjuk kerja dari mesin diesel dengan sistem dual fuel biasanya berhubungan dengan :

#### 1. Daya

Daya mesin merupakan daya yang diberikan untuk mengatasi beban yang diberikan. Untuk pengukuran diberikan beban lampu dengan daya 200 watt – 2000 watt. Daya yang dihasilkan pada mesin diesel yang dikopel dengan generator listrik dapat dihitung berdasarkan beban pada generator listrik dan dinyatakan sebagai daya efektif pada generator ( $Ne$ ). Hubungan tersebut dinyatakan dengan rumus:

$$Ne = \frac{V \times I \times \cos \phi}{\eta_{generator} \times \eta_{transmisi}} \text{ (Watt)} \quad \dots\dots(2.12)$$

Keterangan :

- $Ne$  : Daya mesin (W)
- $V$  : Tegangan listrik (Volt)
- $I$  : Arus listrik (Ampere)
- $\eta_{gen}$  : Effisiensi mekanisme generator (0,9)
- $\eta_{trmsm}$  : Effisiensi transmisi (0,95)
- $\cos \theta$  : Faktor daya listrik ( $\cos \phi$ ) = 1

#### 2. Torsi

Torsi merupakan ukuran kemampuan mesin untuk menghasilkan kerja. Torsi adalah hasil perkalian gaya tangensial dengan lengannya sehingga memiliki satuan Nm (SI) atau *ft.lb* (British). Dalam prakteknya, torsi dari mesin

berguna untuk mengatasi hambatan sewaktu berkendara, ataupun terperosok. Momen torsi dihitung dengan persamaan seperti berikut :

$$Mt = \frac{60 \times Ne}{n} (N.m) \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

Keterangan :

- $Mt$  : Torsi (N.m)  
 $Ne$  : Daya (W)  
 $n$  : Putaran mesin (rev/min)

Dari persamaan tersebut, torsi sebanding dengan daya yang diberikan dan berbanding terbalik dengan putaran mesin. Semakin besar daya yang diberikan mesin, maka torsi yang dihasilkan akan mempunyai kecenderungan untuk semakin besar. Semakin besar putaran mesin, maka torsi yang dihasilkan akan semakin kecil.

### 3. *Brake Measured Effective Pressure (bmep)*

Proses pembakaran campuran udara-bahan bakar menghasilkan tekanan yang bekerja pada piston sehingga melakukan langkah kerja. Besarnya tekanan ini berubah-ubah sepanjang langkah piston tersebut. Bila diambil tekanan yang berharga konstan yang bekerja pada piston dan menghasilkan kerja yang sama, maka tekanan tersebut dikatakan sebagai kerja per siklus per volume langkah piston. Tekanan efektif rata-rata teoritis yang bekerja sepanjang volume langkah piston sehingga menghasilkan daya yang besarnya sama dengan daya efektif.

Perumusan *bmep* adalah :

$$bmep = \frac{Ne \times Z \times 60}{A \times l \times n \times i} (N/m^2) \quad \dots\dots (2.14)$$

Keterangan:

- $Ne$  : Daya poros mesin (Watt)  
 $A$  : Luas penampang piston (m<sup>2</sup>)

L	: Panjang langkah piston (m)
i	: Jumlah silinder
n	: putaran mesin diesel (rpm)
z	: 1 (mesin 2 langkah) atau 2 (mesin 4 langkah)

#### 4. *Specific Fuel Consumption (sfc)*

*Specific fuel consumption (Sfc)* adalah jumlah bahan bakar yang dipakai mesin untuk menghasilkan daya efektif 1 (satu) *hp* selama 1 (satu) jam. Apabila dalam pengujian diperoleh data mengenai penggunaan bahan bakar *m* (kg) dalam waktu *s* (detik) dan daya yang dihasilkan sebesar *bhp* (*HP*) maka pemakaian bahan bakar perjam  $m_{bb}$  adalah :

$$\dot{m}_{bb} = \frac{\dot{m}_{bb}}{s} (kg/s) \quad \dots\dots (2.15)$$

Sedangkan besarnya pemakaian bahan bakar spesifik untuk sistem single fuel adalah:

$$sfc_{single} = \frac{\dot{m}_{bb}}{Ne} \left( \frac{kg}{kW.jam} \right) \quad \dots\dots (2.16)$$

Untuk penggunaan dua bahan bakar yaitu syngas-biodiesel. Besar pemakaian bahan bakar spesifiknya yaitu :

$$sfc_{dual} = \frac{3600x(\dot{m}_{syngas} + \dot{m}_{biodiesel})}{Ne} \left( \frac{kg}{kW.jam} \right) \quad ..(2.17)$$

Keterangan :

- $m_{bb}$  : Massa bahan bakar yang dikonsumsi mesin (kg/s).
- $m_{syngas}$  : Pemakaian bahan bakar syngas per jam (kg/s) .
- $m_{biodiesel}$  : Pemakaian bahan bakar biodiesel per jam (kg/s)  
1 jam = 3600 s

#### 5. Substitusi Biodiesel

Substitusi solar adalah jumlah bahan bakar solar pengujian single yang dikurang dengan jumlah bahan bakar solar

pengujian dual yang dibandingkan dengan jumlah bahan bakar solar single , agar mengetahui jumlah solar yang tersubstitusi.

$$substitusi = \frac{\dot{m}_{biodiesel\ single} - \dot{m}_{biodiesel\ dual}}{\dot{m}_{biodiesel\ single}} \times 100\% \dots(2.15)$$

Keterangan :

$\dot{m}_{biodiesel\ single}$  : Pemakaian biodiesel pengujian single (kg/s)

$\dot{m}_{biodiesel\ dual}$  : Pemakaian biodiesel pengujian dual (kg/s)

## 6. Efisiensi Thermal ( $\eta_{th}$ )

Efisiensi termal adalah ukuran besarnya pemanfaatan energi panas yang tersimpan dalam bahan bakar untuk diubah menjadi daya efektif oleh mesin pembakaran dalam. Secara teoritis dituliskan dalam persamaan :

$$\eta_{th} = \frac{\text{Daya efektif yang dihasilkan}}{\text{Mass flow rate bahan bakar} \times \text{Nilai kalor bawah bahan bakar}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.16)$$

Untuk sistem *single fuel* dapat ditulis :

$$\eta_{th\ single\ fuel} = \left( \frac{Ne}{(m_{solar} \cdot Q_{solar})} \right) \times 100\% \dots\dots (2.17)$$

Untuk efisiensi thermal mesin diesel yang menggunakan bahan bakar kombinasi Syngas-minyak solar, persamaannya adalah :

$$\eta_{th\ dual\ fuel} = \left( \frac{Ne}{(m_{dual\ solar} \cdot Q_{solar} + m_{syngas} \cdot Q_{syngas})} \right) \times 100\% \dots(2.18)$$

Dengan Q adalah nilai kalor bawah (*Lower Heating Value, LHV*) atau panas pembakaran bawah bahan bakar [Kcal/kg bahan bakar]. Nilai kalor adalah jumlah energi panas maksimum yang dibebaskan oleh suatu bahan bakar melalui reaksi pembakaran sempurna per satuan massa atau volume bahan bakar. LHV dapat

dinyatakan dengan rumus empiris (bahan bakar solar) sebagai berikut:

$$\text{LHV} = [16280 + 60(\text{API})] \text{ Btu/lb} \quad \dots\dots (2.19)$$

Keterangan :

$$1 \text{ Btu/lb} = 2,326 \text{ kJ/kg}$$

$$1 \text{ kJ/kg} = \left[ \frac{1}{4187} \right] \text{ kkal/kg}$$

### 7. API Gravity

API Gravity adalah suatu pernyataan yang menyatakan densitas dari suatu material. *API Gravity* diukur pada temperatur minyak bumi 60°F. Harga *API Gravity* dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{API} = \frac{141,5}{\text{Spesific Gravity pada } 60^\circ\text{F}} - 131,5 \quad \dots\dots (2.20)$$

Dengan *specific gravity* untuk bahan bakar mesin diesel adalah 0,84.

### 2.3. Prinsip Kerja Sistem Bahan Bakar Diesel

Pada prinsip kerja sistem pemasukan bahan bakar mesin diesel, bahan bakar disemprotkan setelah udara bersih dihisap dan dikompresikan. Bahan bakar dan udara dicampur di dalam silinder sehingga terjadi pembakaran. Bahan bakar harus dikabutkan halus, oleh pompa injeksi pada tekanan (100-250 bar).

Ada dua cara penyemprotan bahan bakar kedalam ruang bakar yaitu injeksi langsung (*direct injection*) dimana *injection nozzle* menyemprotkan bahan bakar langsung keruang bakar utama (*main combustion chamber*) pada akhir langkah kompresi. Udara tertekan dan menerima pusaran cepat akibatnya suhu dan tekanannya naik bahan bakar cepat menguap dan menyala dengan sendirinya setelah disemprotkan.

Cara menyemprotan yang kedua ialah injeksi tidak langsung dimana bahan bakar disemprotkan oleh *injection nozzle* ke kamar

depan (*precombustion chamber*). Udara yang dikompresikan oleh torak memasuki kamar pusar dan membentuk aliran *turbulensi* ditempat bahan bakar yang diinjeksikan. Tetapi sebagian bahan bakar yang belum terbakar akan mengalir ke ruang bakar utama melalui saluran *transfer* untuk menyelesaikan pembakaran.

Pada sistem bahan bakar mesin diesel, *feed pump* menghisap bahan bakar dari tangki bahan bakar. Bahan bakar disaring oleh *fuel filter* dan kandungan air yang terdapat pada bahan bakar dipisahkan oleh *fuel sedimenter* sebelum dialirkan ke pompa injeksi bahan bakar. Dari pompa injeksi selanjutnya melalui pipa injeksi bahan bakar dialirkan ke *injektor* untuk diinjeksikan ke ruang bakar.

### 2.3.1. Injektor

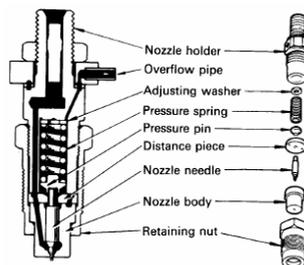
Pada mesin diesel, alat yang berfungsi untuk menyuplai bahan bakar disebut injektor. Fungsi dari injektor tersebut adalah menyemprotkan bahan bakar yang telah menjadi kabut kedalam ruang pembakaran. Beberapa persyaratan yang harus dipenuhi oleh sistem injeksi adalah sebagai berikut :

- a. Pengaturan waktu yang layak dari injeksi bahan bakar pada saat yang diperlukan untuk mendapatkan daya maksimum dari bahan bakar dan penghematan bahan bakar serta pembakaran yang sempurna.
- b. Kecepatan yang sesuai dari injeksi bahan bakar adalah banyaknya bahan bakar yang diinjeksikan ke dalam ruang silinder dalam satuan waktu atau satu derajat dari perjalanan poros engkol. Jika kecepatan tinggi, maka jumlah bahan bakar tertentu akan diinjeksikan dalam waktu yang singkat atau dalam jumlah derajat yang kecil dari poros engkol.
- c. Pengkabutan yang baik dari bahan bakar disesuaikan dengan bentuk ruang bakar, karena setiap bentuk ruang bakar berbeda, ada yang memerlukan kabut yang sangat halus dan ada yang memerlukan kabut kasar. Pengkabutan yang baik akan mempermudah pengawalan pembakaran dan menjamin bahwa setiap butiran kecil dari bahan bakar

dikelilingi oleh partikel oksigen yang dapat bercampur dengan bahan bakar.

- d. Distribusi yang baik dari bahan bakar dalam ruang pembakaran harus sedemikian rupa sehingga bahan bakar akan menyusup keseluruhan bagian ruang bakar yang berisi oksigen untuk pembakaran, kalau bahan bakar tidak didistribusikan dengan baik, maka sebagian dari oksigen yang tersedia tidak akan dimanfaatkan dan keluaran daya mesin akan rendah.

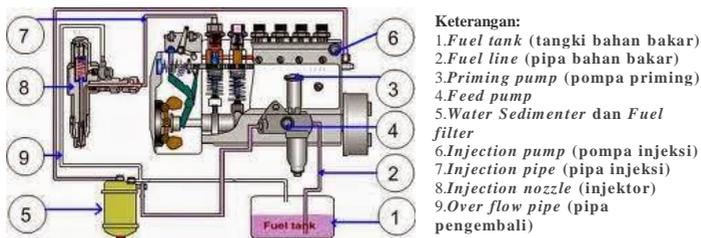
Cara kerja injektor pada umumnya adalah sebagai berikut : Bahan bakar bertekanan tinggi mengalir dari pompa injeksi melalui saluran minyak pada *nozzle holder* menuju ke *oil pool* pada bagian bawah *nozzle body*. Penginjeksian bahan bakar terjadi bila tekanan bahan bakar pada *oil pool* naik, sehingga menekan permukaan ujung *needle*. Bila tekanan bahan bakar melebihi kekuatan pegas, maka *nozzle needle* akan terdorong ke atas dan menyebabkan *nozzle needle* akan terlepas dari *nozzle body*. Kejadian ini menyebabkan nosel menyemprotkan bahan bakar ke dalam ruang bakar. Jika pompa penginjeksi berhenti mengalirkan bahan bakar, maka tekanan bahan bakar turun dan tekanan pegas mengembalikan *nozzle needle* ke posisi semula. Pada saat *needle* tertekan kuat, *nozzle body seat* akan menutup saluran bahan bakar, sehingga proses penginjeksian akan berhenti. Sebagian bahan bakar yang tersisa diantara *nozzle needle* dan *nozzle body* antara *pressure pin* dan *nozzle holder* akan melumasi semua komponen dan kembali pada keadaan awal.



**Gambar 2.2.** Bagian-bagian dari injektor

### 2.3.2. Alur Penyemprotan Bahan Bakar Diesel

Pada sistem bahan bakar mesin diesel, alur bahan bakar sebelum akhirnya disemprotkan melalui injektor akan melalui beberapa bagian pada bagian mesin diesel. Bahan bakar yang berada pada tangki bahan bakar (fuel tank) akan disedot oleh pompa bahan bakar (feed pump) dan dipompakan untuk disaring pada saringan bahan bakar (fuel filter) dan water sedimenter untuk dipisahkan kandungan air pada bahan bakar tersebut. Lalu bahan bakar akan menuju ke pompa injeksi (injection pump) untuk diinjeksikan melalui injektor melalui pipa injeksi (injection pipe) ke dalam ruang bakar. Sisa bahan bakar yang tidak tersemprot oleh injektor akan dikembalikan ke dalam tangki bahan bakar melalui overflow pipe.

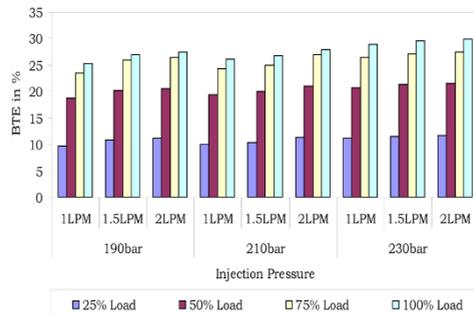


**Gambar 2.3** Bagian-bagian sistem bahan bakar mesin diesel

## 2.4. Penelitian Terdahulu

### 2.4.1. Penelitian oleh Prasad [4]

Penelitian yang dilakukan oleh Prasad menggunakan sistem dual fuel LPG dan biodiesel dengan tekanan penginjeksian yang bervariasi dengan penggantian shim atau adjusting washer pada injektor mesin tersebut.



**Gambar 2.5** *Grafik Brake Thermal Efficiency terhadap variasi tekanan penginjeksian dan fungsi beban*

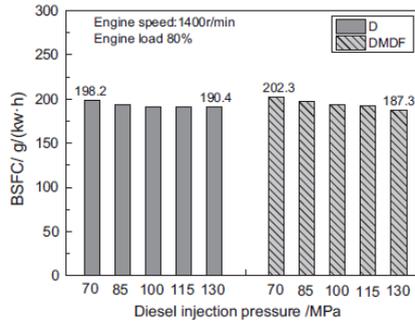
Dapat dilihat pada grafik bahwa *Brake Thermal Efficiency* yang paling tinggi terdapat pada tekanan penginjeksian 230 bar dengan fungsi beban dan variasi laju massa LPG bila dibandingkan dengan tekanan 190 bar dan 210 bar. Baik pada laju massa LPG 1 liter per menit, 1,5 liter per menit maupun 2 liter per menit dapat dilihat tekanan injeksi 230 bar menghasilkan *Brake Thermal Efficiency* yang tertinggi dengan fungsi beban (25%; 50%; 75%; 100%) bila dibandingkan dengan tekanan injeksi 210 bar dan 230 bar.

#### 2.4.2. Penelitian oleh Liu [10]

Penelitian yang dilakukan oleh Liu ini menggunakan mesin diesel dual fuel yang telah dimodifikasi dengan bahan bakar solar dan gas metanol. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan tekanan penginjeksian pada injektor dengan memutar screw pada nosel.

Dapat dilihat pada grafik bahwa kondisi putaran mesin 1400 rpm dan beban mesin 80%, konsumsi bahan bakar spesifik semakin menurun dengan semakin meningkatnya tekanan penginjeksian. Pada tekanan injeksi 130 MPa didapat konsumsi bahan bakar spesifik yang terkecil bila dibandingkan dengan tekanan 70 MPa, 85 MPa, 100 MPa dan 115 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa semakin meningkatnya

tekanan penginjeksian maka konsumsi bahan bakar spesifik juga semakin menurun.



**Gambar 2.6 Grafik Konsumsi Bahan Bakar Spesifik terhadap fungsi tekanan injeksi yang divariasikan**

## **BAB III METODE PENELITIAN**

### **3.1 Metode Penelitian**

Pengujian dilakukan oleh penulis pada diesel engine constant speed merk Yanmar tipe TF-55R Di sebagai alat uji memiliki poros utama yang telah terkopel langsung dengan electrical generator sebagai electrical dynamometer. Pengujian dilakukan penulis di gedung teknik mesin ITS.

### **3.2 Alat Uji**

Alat uji yang akan digunakan dalam penelitian ini antara lain sebagai berikut :

1. Mesin diesel dengan spesifikasi :

- Merk : Yanmar
  - Model : TF 55 R Di
  - Kerja mesin : 4 langkah, pendingin air
  - Sistem pembakaran : *Direct Injection*
  - Jumlah silinder : 1 silinder
  - Saat pengabutan : 17° sebelum TMA
  - Diameter x panjang langkah : 75 x 80 (mm)
  - Volume silinder : 353 (cc)
  - Daya kontinu : 4,5/2200 (hp/rpm)
  - Daya maksimum : 5,5/2200 (hp/rpm)
  - Perbandingan kompresi : 17,9 : 1
  - Pompa bahan bakar : Tipe Bosch
  - Tekanan injektor : 200 kg/cm<sup>2</sup>
  - Sistem pelumasan : pelumas paksa
  - Kapasitas minyak pelumas : 1,8 liter
  - Kapasitas tangki bahan bakar : 7,1 liter
  - Jenis minyak pelumas : SAE 40 kelas CC atau CD
  - Sistem pendingin : Radiator
- Dimensi Mesin
- Panjang : 607,5 (mm)
  - Lebar : 311,5 (mm)

- Tinggi : 469,0 (mm)

2. Generator listrik/*electrical dynamometer* dengan spesifikasi :

- Merk : Noqiwa
- Model : ST-3
- Frekuensi (Hz) : 50
- RPM : 1500
- *Voltage* (V) : 220
- *Phase* : 1
- Base (kW) : 3
- Ev Volt (V) : 42
- Ex Curr (A) : 2

3. Beban Listrik.

Beban lampu terdiri atas lampu pijar sebanyak 10 buah dengan konsumsi daya masing-masing lampu sebesar 200 Watt. Lampu-lampu tersebut disusun secara paralel dengan masing-masing lampu dilengkapi dengan tombol stop/kontak untuk pengaturan beban bahan bakar *biodiesel*.

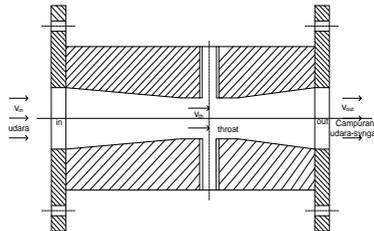
4. Bahan Bakar Gas Hasil Gasifikasi MSW.

Bahan bakar gas yang digunakan adalah *syngas* hasil gasifikasi MSW dari *gasifier* tipe *downdraft*. MSW adalah singkatan dari Municipal Solid Waste yang artinya Sampah Padat Perkotaan, disini penulis membuat briket dari hasil sampah perkotaan diubah menjadi briket biomassa yang digunakan sebagai bahan bakar penghasil *syngas*.

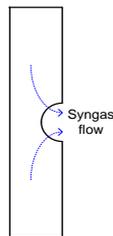
5. Mixer

Mixer digunakan untuk mencampur/memasukkan *syngas* MSW ke dalam saluran *intake*. Proses pemasukan *syngas* dengan sistem *dual fuel* menggunakan *mixer* sebagai tempat udara dan *syngas*

dicampur sebelum masuk ke dalam ruang bakar, *mixer* dibuat dengan bentuk venturi. *Mixer* dipasang pada saluran masuk (*intake manifold*) udara.



**Gambar 3.1** Skema *mixer*



**Gambar 3.2** *Mixing jet*

## 6. Shim Set Merk Yanmar

Shim atau bisa juga disebut dengan adjusting washer digunakan untuk mengatur tekanan penginjeksian bahan bakar yang melalui injektor. Penulis melakukan variasi tekanan penginjeksian bahan bakar yang melalui injektor ini dengan melakukan penggantian shim / adjusting washer ini dengan ketebalan yang berbeda-beda.

## 3.3 Bahan Bakar yang Dipakai

### 3.3.1 Biodiesel

Bahan bakar biodiesel yang dipakai adalah biodiesel yang berbahan dasar minyak goreng sawit. Minyak goreng sawit ini telah melewati proses esterifikasi dan transesterifikasi serta dilakukan penambahan katalis KOH

untuk diolah lebih lanjut menjadi bio diesel. Berikut properties dari bahan bakar biodiesel hasil pengolahan minyak goreng sawit.

**Tabel 3.1 Komparasi Properties Bahan Bakar Solar dan Biodiesel**

Sifat – sifat	Solar	Biodiesel Palm Oil	Biodiesel Standar SNI
Specific gravity (kg/cm <sup>3</sup> ) pada 40°C (mm <sup>2</sup> /s)	844	868	850-890
Viskositas kinematis pada 40°C (mm <sup>2</sup> /s)	3,32	5,3	2,3 – 6
Tegangan permukaan (dyne/cm)	66	68	-
Angka Cetane	42	52	<51
Flash point (°C)	70	174	Min. 100

### 3.3.2 Synthetic Gas

Bahan bakar syngas yang dipakai adalah gas hasil pembakaran dari briket biomassa dari sampah perkotaan, sebelumnya sudah diuji oleh Achmad [5], dengan properties sebagai berikut :

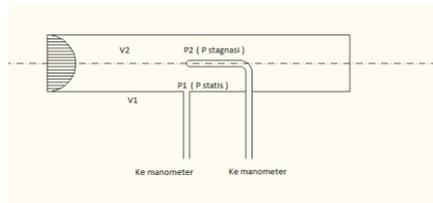
**Tabel 3.2 Properties Syngas Hasil Pembakaran Briket Biomassa Sampah Perkotaan**

Komposisi	Persentase volume (%)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> ), pada T = 305 K [15]	$\mu$ (10 <sup>-5</sup> Pa S ), pada T = 20 ° C [15]
CO	7,99	1,087	1,74
H <sub>2</sub>	7,60	0,078	0,88
CH <sub>4</sub>	0,04	0,502	0,99
CO <sub>2</sub>	6,74	1,722	1,47
N <sub>2</sub>	61,99	1,092	1,76
O <sub>2</sub>	15,65	1,248	2,04

### 3.3 Alat Ukur

Adapun alat ukur yang digunakan dalam pengambilan data percobaan adalah sebagai berikut :

1. Pipet volumetrik  
Alat ini digunakan untuk mengukur jumlah bahan bakar *biodiesel* yang dikonsumsi oleh mesin diesel.
2. Stopwatch  
Alat ini digunakan untuk mengukur waktu yang dibutuhkan mesin diesel untuk mengkonsumsi bahan bakar *bio diesel*.
3. Pitot Static Tube dan Manometer V  
Alat ini dipergunakan untuk mengukur jumlah bahan bakar *syngas* masuk yang disuplai keruang bakar.



**Gambar 3.3 Pitot Static Tube  $\theta = 10^\circ$**

*Pitot static tube* dihubungkan dengan manometer untuk mengetahui besarnya perbedaan ketinggian cairan pada manometer yang nantinya akan digunakan untuk mengetahui *syngas* yang masuk ke ruang bakar dengan menggunakan persamaan Bernoulli.

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

Dimana :

- $P_2$  = Tekanan stagnasi (pada titik 2) ( $P_0$ )  
 $P_1$  = Tekanan statis (pada titik 1) ( $P_a$ )  
 $\rho$  = Massa jenis ( $\text{kg/m}^3$ )

- $V_1$  = Kecepatan di titik 1 (m/s)  
 $V_2$  = Kecepatan di titik 2, kecepatan pada P stagnasi  
 = 0 (m/s)

Dengan mengansumsikan  $\Delta z = 0$  maka persamaan menjadi:

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

Untuk mencari kecepatan udara yang masuk dari persamaan diatas menjadi:

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

Dimana:

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

#### 4. Amperemeter dan Voltmeter

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

#### 5. Tachometer digital

Alat ini digunakan untuk mengukur putaran engine. Caranya adalah mengarahkan sinar inframerah pada poros engkol engine dan nantinya kecepatan putaran engine akan terukur pada alat.

#### 6. Omega-meter

Alat ini digunakan untuk mengukur mass flowrate syngas yang mengalir dari reactor menuju engine diesel.

### 3.4 Prosedur pengujian

Secara garis besar penulis melakukan pengujian dengan cara melakukan variasi tekanan penginjeksian bahan bakar melalui injektor dengan mengganti shim / adjusting washer yang terdapat pada injektor dengan berbeda ketebalan. Sebelumnya penulis menguji tekanan pada injektor tersebut dengan menggunakan injektor tester sesuai dengan tebal shim yang bervariasi tadi.

Pengujian dilakukan dengan sistem dual fuel yang diaplikasikan pada engine diesel.

Berikut ini adalah gambar skema pengujian yang akan dilakukan:

#### 3.4.1 Persiapan Pengujian

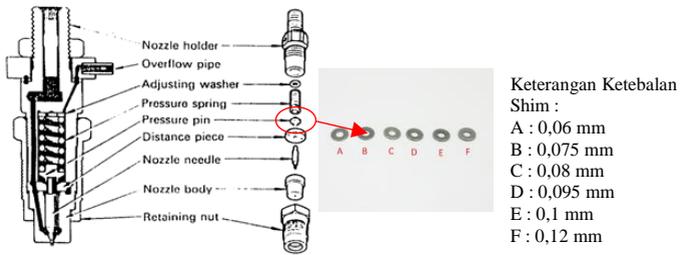
Hal-hal yang diperlukan dalam persiapan pengujian ini adalah sebagai berikut:

1. Memeriksa kondisi kesiapan mesin yang meliputi kondisi fisik mesin, pelumas, sistem pendinginan, sistem bahan bakar, sistem udara masuk, Melihat *flameability* syngas dari reaktor dan kesiapan generator listrik.
2. Memeriksa kondisi sistem pembebanan, sistem kelistrikan dan sambungan-sambungan listrik yang ada.
3. Memeriksa kesiapan alat-alat ukur.
4. Mempersiapkan alat tulis dan tabel untuk pengambilan data.

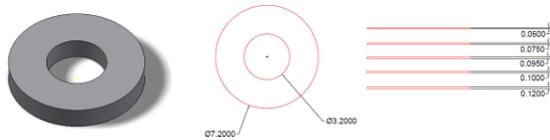
#### 3.4.2 Pengaturan Tekanan Injeksi Bahan Bakar

Dalam pengaturan tekanan injeksi bahan bakar ini diperlukan persiapan sebagai berikut :

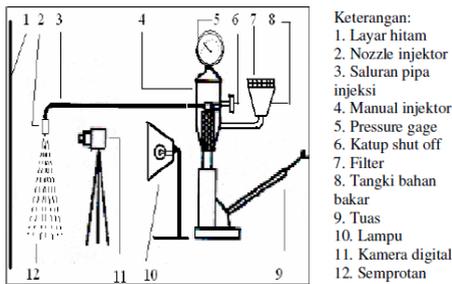
1. Melepas injektor dari mesin diesel
2. Membongkar injektor dengan hati-hati, usahakan agar part dari injektor tetap utuh
3. Ganti shim injektor dengan ketebalan tertentu yang terdapat pada shim set yang sudah ada.
4. Ukur ketebalan shim atau adjusting washer dengan jangka sorong.
5. Uji tekanan dari injektor dengan menggunakan injektor tester. Usahakan agar bahan bakar tidak bocor dari saluran pipa injeksi agar pengujian lebih akurat.
6. Catat tekanan injektor yang terukur pada pressure gage sesuai dengan ketebalan yang telah diukur di awal tadi.



**Gambar 3.4 Shim set standar injektor Yanmar TF 55R**



**Gambar 3.5 Drawing Shim Set Yanmar TF 55 R Di (ukuran dalam mm)**



**Gambar 3.6 Skema Pengujian Tekanan Penginjeksian Bahan Bakar**

### 3.4.3. Pengujian Properties Bahan Bakar

Berikut adalah pengujian properties bahan bakar yang dilakukan, antara lain :

## 1) Densitas

Pengujian densitas dilakukan di di laboratorium Termodinamika Pembakaran dan Bahan Bakar, ITS Surabaya, dengan menggunakan picno meter. Dengan berat picnometer 17,259 g dan volume picnometer 10,194 ml. prosedur pengujian:

- Timbang berat picnometer kosong dengan tombangan digital dan ditetapkan sebagai  $W_0$  (berat awal).
- Isi picnometer dengan sampel uji yang telah dipanaskan hingga nampak cairan sampel yang keluar dari lubang teratas pada tutup picnometer, kemudian bersihkan dengan tisu pembersih permukaan picno meter yang basah.
- Timbang kembali dengan menggunakan timbangan sebelumnya berat picnometer yang telah terisi sampel dan ditetapkan sebagai  $w_1$ .
- Menghitung nilai density dengan menggunakan rumus:

$$\Delta w = \frac{w_1 - w_0}{\text{volume picnometer}} \text{ (g/ml)}$$



**Gambar 3.7 Peralatan pengukur densitas.**

## 2) Viscositas

Pengujian nilai viscositas dilakukan di laboratorium Termodinamika Pembakaran dan Bahan Bakar ITS Surabaya. Proses pengambilan nilai viscositas diawali dengan memanaskan sampel uji hingga temperatur tertentu, dalam pengujian ini temperature divariasikan dari 25°C, 40°C, 55°C, dan 70°C. kemudian menuangkan sampel tersebut kedalam gelas uji sampai mencapai garis pembatas gelas. kemudian pasang viscotester, pastikan bagian pengaduk terendam oleh

sampel uji. Nyalakan viscotester dan tunggu putaran stabil dan hasil pengukuran dapat terbaca. Satuan yang dipakai adalah Cst atau  $\text{mm}^2/\text{s}$ .



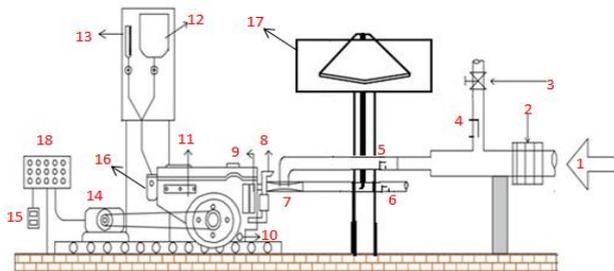
**Gambar 3.8** Peralatan Pengukur Viskositas

### 3.4.4 Pengujian dengan bahan bakar kombinasi *Syngas–Biodiesel*

Berikut adalah pengujian dengan bahan bakar kombinasi syngas-biodiesel

1. Melepas injektor dari engine dan membongkar injektor.
2. Mengganti shim / adjusting washer pada injektor sesuai ketebalan shim itu sendiri agar menghasilkan tekanan yang diinginkan dan menyusunnya seperti keadaan awal.
3. Memasang kembali injektor pada engine.
4. Memastikan kembali kondisi kesiapan mesin diesel, pembebanan dan kelistrikan, serta sistem penyuplai bahan bakar gas (*syngas*) dan *Biodiesel*.
5. Menghidupkan mesin diesel dengan menggunakan minyak *biodiesel* sebagai bahan bakar, tanpa memberikan beban dan membiarkannya hingga  $\pm 20$  menit.
6. Mengatur *mass flowrate* udara dengan cara mengatur kecepatan *fan blower* menggunakan *dimmer*.
7. Memberikan beban mulai dari 200 w sampai dengan 2000 w dengan interval kenaikan setiap 200 w.
8. Setiap variasi beban dan udara masuk, putaran engine harus tetap dijaga konstan 2000 rpm.

9. Setiap kenaikan beban, maka dilakukan pencatatan terhadap:
  - Waktu konsumsi *biodiesel* setiap 10 ml.
  - Debit masukan udara (dengan mengukur beda ketinggian manometer V).
  - Temperatur oli, cairan pendingin, gas buang.
  - Tegangan listrik (V) dan arus listrik (I).
10. Setelah pengambilan data seluruhnya selesai dilakukan, kemudian beban listrik diturunkan secara bertahap dan kemudian mengurangi jumlah aliran *syngas* yang masuk ke ruang bakar hingga tidak ada lagi suplai gas yang masuk ke *mixer*.
11. Membiarkan mesin diesel dalam kondisi tanpa beban kira-kira 5 menit, lalu mesin diesel dimatikan.
12. Mengulangi langkah 1 sampai dengan 10 dengan variasi tekanan penginjeksian



**Gambar 3.9** Skema peralatan generator set *dual fuel*

Keterangan :

- |   |                              |
|---|------------------------------|
| 1. Gas <i>syngas</i> hasil gasifier               | 12. Tank solar               |
| 2. Saringan <i>syngas</i>                         | 13. Gelas ukur               |
| 3. Valve <i>syngas</i> yang <i>dibypass</i>       | 14. Generator set            |
| 4. Pitot tube <i>syngas</i> yang di <i>bypass</i> | 15. Voltage dan ampere meter |
| 5. Pitot tube <i>syngas</i> yang ke mesin         | 16. Alat pemanas bahan bakar |
| 6. Pitot tube udara ke mesin                      | 17. Manometer V              |
| 7. Mixer  | 18. Pembebanan Lampu         |
| 8. Temperatur gas buang                           |                              |
| 9. Temperatur air pendingin                       |                              |
| 10. Temperatur oli                                |                              |
| 11. Temperatur mesin                              |                              |

### 3.5 Rancangan Eksperimen

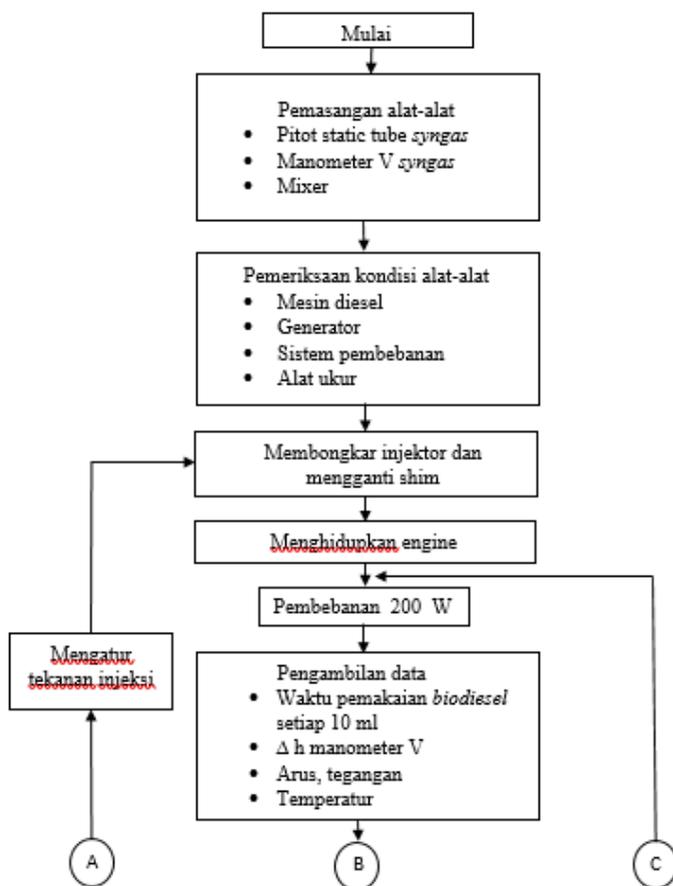
Dalam perancangan eksperimen ini ada beberapa parameter yang ingin didapatkan dalam percobaan ini dengan menetapkan parameter input dan parameter output yang dinyatakan dalam tabel 3.1 yaitu :

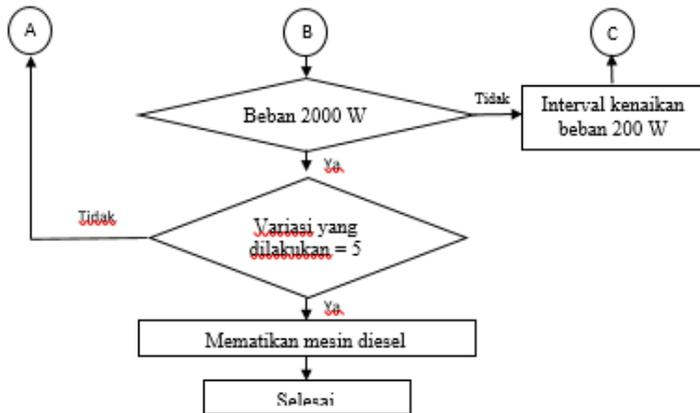
Dari percobaan ini data-data yang didapatkan dihitung, dan kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik fungsi beban listrik terhadap :

- Daya efektif
- Torsi
- BMEP
- SFC Biodiesel
- SFC Dual Fuel
- AFR
- Temperatur gas buang
- Temperatur pendingin
- Temperatur oli
- Efisiensi *thermal*
- Biodiesel tersubstitusi (%)
- Atomisasi bahan bakar (panjang  $L$  dan sudut  $\theta$ ) terhadap tekanan injeksi bahan bakar ( $\text{kg/cm}^2$ )

Tabel 3.3 Parameter Eksperimen

Parameter Input			Parameter Output	
Konstan	Bervariasi		Diukur	Dihitung
	Tekanan Injeksi	Beban Listrik		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipe generator set mesin diesel</li> <li>• Putaran mesin diesel 2000 rpm</li> <li>• Bahan bakar biodiesel</li> <li>• Bahan bakar minyak briket MSW</li> <li>• Mixer</li> </ul>	• 190kg/cm <sup>2</sup>	• 200 W hingga 2000 W dengan interval 200 W	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Konsumsi bahan bakar biodiesel 10 ml (s)</li> <li>• <math>\Delta h</math> pada pitot static tube (mm)</li> <li>• Temp. diesel (oli, pendingin, gas buang) °C</li> <li>• Arus (I)</li> <li>• Tegangan (V)</li> <li>• Flow udara (m)</li> <li>• Visualisasi semprotan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Daya</li> <li>• Torsi</li> <li>• Bmep</li> <li>• SFC</li> <li>• Efisiensi <i>thermal</i></li> <li>• AFR</li> <li>• Biodiesel tersubstitusi (%)</li> </ul>
	• 210kg/cm <sup>2</sup>	• 200 W hingga 2000 W dengan interval 200 W		
	• 230kg/cm <sup>2</sup>	• 200 W hingga 2000 W dengan interval 200 W		
	• 250kg/cm <sup>2</sup>	• 200 W hingga 2000 W dengan interval 200 W		





*Gambar 3.10 Skema Penelitian*

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai perhitungan-perhitungan yang diperlukan dalam penelitian. Perhitungan yang dimaksud adalah perhitungan unjuk kerja mesin antara lain daya, torsi, bmep, sfc, afr, efisiensi termal, substitusi solar serta kondisi operasi mesin. Adapun data hasil penelitian seluruhnya dapat dilihat pada lampiran.

### 4.1 Perhitungan Unjuk Kerja

Perhitungan yang dihitung dibawah ini adalah sebagai perbandingan antara kondisi single fuel dan dual fuel. Untuk sistem dual fuel dilakukan dengan pemasukan secara langsung dari hasil reaktor gasifikasi pada pembebanan lampu dari 0% sampai dengan 100% dengan data-data yang dimiliki sebagai berikut :

**Tabel 4.1 Hasil Pengujian Antara Kondisi Single Fuel dan Dual Fuel pada Pembebanan 2000 Watt (100%)**

Data	V	I	$\omega$	$\dot{m}$ biodiesel	$\dot{m}$ syngas	Temperatur (°C)			
						Engine	Exhaust	Pelumas	Pendingin
Single Fuel	220 V	9 A	2000	0.0003625	-	60	339	70	66
Dual Fuel	220 V	9 A	2000	0.0002719	0.000029	64	381	73	72

- a. Massa aliran udara masuk ( $\dot{m}$  udara) :

Pengukuran aliran udara masuk dilakukan dengan pitot-static tube yang dihubungkan dengan incline manometer menggunakan persamaan berikut, yaitu :

$$V = \sqrt{\frac{2 \times \rho_{H_2O} \times SG_{red\ oil} \times g \times 2 \Delta y \sin \alpha}{\rho_{udara}}}$$

dengan keterangan :

- $SG_{red\ oil}$  : Specific gravity red oil (0.827).

- $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$  : Massa jenis air ( $997 \text{ kg/m}^3$ ,  $T = 25^\circ$ ).
- $\rho_{\text{udara}}$  : Massa jenis udara ( $1.1447 \text{ kg/m}^3$ ,  $T = 25^\circ$ ).
- $\Delta y$  : Selisih ketinggian cairan pada *manometer*.
- $\alpha$  : Besar sudut incline manometer ( $10^\circ\text{C}$ )

Maka, kecepatan aliran udara dapat dihitung sebagai berikut

$$V = \sqrt{\frac{2 \times 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.827 \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 2 \cdot 0.0015 \sin 10^\circ}{1,1447 \text{ kg/m}^3}}$$

$$V = 2,718 \text{ m/s}$$

Kecepatan fluida yang diukur dengan menggunakan pitot static tube merupakan kecepatan maksimal dari fluida yang melewati pipa. Dalam kasus ini fluida yang dimaksud adalah syngas dan udara. Untuk memperoleh kecepatan rata-rata dari fluida tersebut digunakan perumusan sebagai berikut :

$$Re = \frac{\rho_{\text{udara}} V D}{\mu}$$

dengan keterangan :

- $\rho_{\text{udara}}$  : massa jenis udara ( $1,144 \text{ kg/m}^3$ )
- $V$  : kecepatan maksimal udara melalui pitot
- $D$  : diameter pipa ( $0,028 \text{ m}$ )
- $\mu$  : viskositas absolut udara ( $0,018 \times 10^{-3} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}$ )

Maka nilai bilangan Reynolds yang diperoleh adalah :

$$Re = \frac{1,144 \frac{kg}{m^3} \times 2,718 \frac{m}{s} \times 0,028 m}{0,018 \times 10^{-3} \frac{Ns}{m^3}}$$

$$Re = 4838,2 \text{ (aliran turbulents)}$$

Faktor koreksi berdasarkan bilangan turbulents diatas, menurut Pritchard [11], yaitu :

$$\begin{aligned} n &= -1,7 + 1,8 \log Re \\ n &= -1,7 + 1,8 \log 4838,2 \\ n &= 4,932 \end{aligned}$$

Maka, besar kecepatan rata-rata dari udara adalah sebagai berikut :

$$\frac{\bar{V}}{V_{max}} = \frac{2 n^2}{(n + 1)(2n + 1)}$$

dengan keterangan :

- $\bar{V}$  : kecepatan rata-rata udara
- $V_{max}$  : kecepatan maksimal udara
- $n$  : faktor koreksi (4,392)

$$\frac{\bar{V}}{V_{max}} = \frac{2 \times (4,932)^2}{(4,932 + 1)(2 \times 4,932 + 1)}$$

$$\frac{\bar{V}}{V_{max}} = \frac{2 \times (4,932)^2}{(4,932 + 1)(2 \times 4,932 + 1)}$$

$$\frac{\bar{V}}{V_{max}} = 0,755$$

$$\bar{V} = 0,755 \times 2,718 m/s$$

$$\bar{V} = 2,05 \text{ m/s}$$

Dengan mengetahui kecepatan udara maka nilai dari laju massa aliran udara (air mass flowrate) dapat diketahui dengan persamaan sebagai berikut :

$$\dot{m}_{udara} = \rho_{udara} \times A_{manometer} \times \bar{V}$$

$$\dot{m}_{udara} = 1,1447 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.00203 \text{ m}^2 \times 2,05 \text{ m/s}$$

$$\dot{m}_{udara} = 0,004766 \text{ kg/s}$$

- b. Massa aliran bahan bakar biodiesel ( $\dot{m}_{biodiesel}$ ) pada system dual fuel adalah sebagai berikut:

$$\dot{m}_{biodiesel} = \frac{m_{biodiesel}}{t_{biodiesel}}$$

Sedangkan untuk menghitung  $m_{biodiesel}$  digunakan rumus :

$$m_{biodiesel} = \rho_{biodiesel} \times V_{buret}$$

$$m_{biodiesel} = 0,87 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times 10 \text{ cm}^3$$

$$m_{biodiesel} = 8,7 \text{ gram} = 0,0087 \text{ kg}$$

Pada tekanan injeksi  $250 \text{ kg/cm}^2$  dan beban  $2000 \text{ watt}$  waktu yang digunakan untuk konsumsi biodiesel  $10 \text{ ml}$  adalah  $50 \text{ detik}$ , maka  $\dot{m}_{biodiesel}$  yang didapat adalah sebagai berikut :

$$\dot{m}_{biodiesel} = \frac{0,0087 \text{ kg}}{50 \text{ s}}$$

$$\dot{m}_{biodiesel} = 0,000174 \text{ kg/s}$$

- c. Massa aliran bahan bakar syngas ( $\dot{m}_{syngas}$ ) pada system dual fuel adalah sebagai berikut :

$$\dot{m}_{syngas} = \dot{Q}_{syngas} \times \rho_{syngas}$$

Dengan adalah  $\dot{Q}_{syngas}$  debit aliran syngas yang terukur pada alat omegameter, sedangkan  $\rho_{syngas}$  dapat dihitung dari kandungan syngas yang telah diuji.

Berdasarkan hasil uji kandungan yang ada dalam gas yang berasal dari briket municipal solid waste yang sudah dilakukan oleh Achmad, et al.[5] adalah sebagai berikut :

**Tabel 4.2** Tabel Kandungan Syngas Briket Sampah Perkotaan

Komposisi	Persentase Volume (%)	P (Kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$ (10 <sup>-5</sup> Pa.S)
CO	7,99	1,087	1,74
H <sub>2</sub>	7,60	0,078	0,88
CH <sub>4</sub>	0,04	0,502	0,99
CO <sub>2</sub>	6,74	1,722	1,47
N <sub>2</sub>	61,99	1,092	1,76
O <sub>2</sub>	15,65	1,248	2,04

Dari hasil pengujian tersebut, maka nilai massa jenis syngas municipal solid waste dapat diketahui, yaitu sebagai dengan menjumlahkan massa jenis dari setiap unsur kimia yang ada dengan prosentasenya, sehingga didapatkan massa jenis syngas untuk tekanan 1 atm sebagai berikut :

$$\rho_{syngas} = \sum_{i=1}^n (X_i \times \rho_i)$$

Dengan keterangan :

$X_i$  = Persentase volume unsur kimia yang terkandung dalam syngas (%)

$\rho_i$  = Massa jenis masing-masing unsur kimia yang terkandung dalam syngas ( $\text{kg/m}^3$ )

$$\rho_{\text{syngas}} = \sum_{i=1}^n (0,799 \times 1,165) + (0,076 \times 0,88) + (0,0004 \times 0,688) + (0,0674 \times 1,47) + (0,6199 \times 1,76) + (0,1565 \times 2,04)$$

$$\rho_{\text{syngas}} = 1,1548 \text{ kg/m}^3$$

Nilai  $\dot{Q}_{\text{syngas}}$  yang terukur pada alat omegameter adalah  $\dot{Q}_{\text{syngas}} = 2,04 \frac{\text{l}}{\text{min}}$ , maka nilai  $\dot{m}_{\text{syngas}}$  yang dihitung adalah sebagai berikut :

$$\dot{m}_{\text{syngas}} = 2,04 \frac{\text{l}}{\text{min}} \times 1,1548 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{\text{min}}{60\text{s}} \times \frac{\text{m}^3}{1000 \text{ dm}^3}$$

$$\dot{m}_{\text{syngas}} = 0,000029443 \text{ kg/s}$$

#### 4.1.1 Daya

Daya mesin merupakan daya yang dihasilkan mesin untuk mengatasi beban yang diberikan. Daya yang dihasilkan pada mesin diesel yang dikopel dengan generator listrik dapat dihitung berdasarkan beban pada generator listrik dan dinyatakan sebagai daya efektif pada generator ( $N_e$ ). Hubungan tersebut dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$N_e = \frac{V \times I \times \text{Cos}\phi}{\eta_{\text{generator}} \times \eta_{\text{transmisi}}}$$

Daya untuk percobaan dual-fuel dengan tekanan penginjeksian  $250 \text{ kg/cm}^2$  pada beban 2000 watt, adalah sebagai berikut :

$$Ne = \frac{220 \times 9,1 \times 1}{0,95 \times 0,9}$$

$$Ne = 2341,5 \text{ Watt}$$

$$Ne = 2,341 \text{ kWatt}$$

#### 4.1.2 Torsi

Torsi merupakan gaya yang bekerja pada poros engkol (crankshaft). Torsi pada penelitian ini dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$Mt = \frac{60 \times Ne}{n}$$

Daya untuk percobaan dual-fuel dengan tekanan penginjeksian 250 kg/cm<sup>2</sup> pada beban 2000 watt, adalah sebagai berikut :

$$Mt = \frac{60 \times Ne}{n}$$

$$Mt = \frac{2341,5 \left(\frac{\text{watt}}{\text{min}}\right)}{2000 \left(\frac{\text{rev}}{\text{min}}\right)} \times \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ W} \cdot \text{s}} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \times \frac{1 \text{ rev}}{2\pi} \times \frac{1 \text{ Nm}}{1 \text{ J}}$$

$$Mt = 11,185 \text{ Nm}$$

#### 4.1.3 BMEP (Brake Measured Effective Pressure)

Brake Mean Effective Pressure atau tekanan efektif rata-rata teoritis bekerja sepanjang volume langkah piston sehingga menghasilkan daya yang besarnya sama dengan daya efektif. BMEP dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$bmep = \frac{Ne (kW) \times Z}{V \times n \left(\frac{rev}{sec}\right) \times i}$$

Daya untuk percobaan dual-fuel dengan tekanan penginjeksian 250 kg/cm<sup>2</sup> pada beban 2000 watt, adalah sebagai berikut :

$$bmep = \frac{2,341 kW \times 2 rev}{0,411711 \times 33,33 \times i}$$

$$bmep = 3793,26 N/m^2$$

#### 4.1.3 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik

Konsumsi bahan bakar spesifik adalah jumlah bahan bakar yang dikonsumsi per satuan daya kali waktu, yang dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$sfc_{dual} = \frac{3600 \times (\dot{m}_{syngas} + \dot{m}_{biodiesel})}{Ne} \left( \frac{kg}{kW \cdot jam} \right)$$

Konsumsi bahan bakar spesifik untuk percobaan dual-fuel dengan tekanan penginjeksian 250 kg/cm<sup>2</sup> pada beban 2000 watt, adalah sebagai berikut :

$$sfc_{dual} = \frac{3600 \times (0,000029 + 0,000207)}{2,341}$$

$$sfc_{dual} = 0,3637 \left( \frac{kg}{hp \cdot h} \right)$$

#### 4.1.4 Biodiesel Tersubstitusi

Substitusi biodiesel pada system dual-fuel dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$\text{substitusi biodiesel} = \frac{\dot{m}_{\text{biodiesel single}} - \dot{m}_{\text{biodiesel dual}}}{\dot{m}_{\text{biodiesel single}}} \times 100\%$$

Substitusi biodiesel untuk percobaan dual-fuel dengan tekanan penginjeksian 250 kg/cm<sup>2</sup> pada beban 2000 watt, adalah sebagai berikut :

$$\text{substitusi biodiesel} = \frac{\dot{m}_{\text{biodiesel single}} - \dot{m}_{\text{biodiesel dual}}}{\dot{m}_{\text{biodiesel single}}} \times 100\%$$

$$\text{substitusi biodiesel} = \frac{1,064 - 0,3637}{1,064} \times 100\%$$

$$\text{substitusi biodiesel} = 65,79 \%$$

#### 4.1.5 Efisiensi Termal

Efisiensi termal mesin pada system dual-fuel dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$\eta_{\text{th dual fuel}} = \left( \frac{N_e}{(m_{\text{dual solar}} \cdot Q_{\text{solar}} + m_{\text{syngas}} \cdot Q_{\text{syngas}})} \right) \times 100\%$$

Efisiensi termal untuk percobaan dual-fuel dengan tekanan penginjeksian 230 kg/cm<sup>2</sup> pada beban 2000 watt, adalah sebagai berikut :

$$\eta_{\text{th dual fuel}} = \left( \frac{N_e}{(m_{\text{dual solar}} \cdot Q_{\text{solar}} + m_{\text{syngas}} \cdot Q_{\text{syngas}})} \right) \times 100\%$$

$$= \left( \frac{2,34}{(0,000029 \times 4361,66 + 0,000207 \times 37144,73)} \right) \times 100\%$$

$$= 29,93 \%$$

#### 4.1.6 AFR (Air Fuel Ratio)

Air Fuel Ratio (AFR) pada system dual-fuel dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$AFR_{dual} = \frac{\dot{m} \text{ udara}}{\dot{m} \text{ biodiesel} + \dot{m} \text{ syngas}}$$

Air Fuel Ratio untuk percobaan dual-fuel dengan tekanan penginjeksian 250 kg/cm<sup>2</sup> pada beban 2000 watt, adalah sebagai berikut :

$$AFR_{dual} = \frac{\dot{m} \text{ udara}}{\dot{m} \text{ biodiesel} + \dot{m} \text{ syngas}}$$

$$AFR_{dual} = \frac{0,0051}{0,000174 + 0,000029}$$

$$AFR_{dual} = 25,07$$

#### 4.1.7 SFC Dual Fuel

SFC (Specific Fuel Consumption) pada system dual fuel dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$SFC_{dual} = \frac{(\dot{m} \text{ biodiesel} + \dot{m} \text{ syngas})}{Ne} \times 3600$$

SFC dual fuel untuk percobaan dual fuel dengan tekanan penginjeksian 250 kg/cm<sup>2</sup> pada beban 2000 watt adalah sebagai berikut :

$$SFC_{dual} = \frac{(0,000174 + 0,002943)}{2,367} \times 3600$$

$$SFC_{dual} = 0,3094 \frac{kg}{kW.jam}$$

#### 4.1.7 SFC Biodiesel

SFC (Specific Fuel Consumption) biodiesel dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$SFC_{biodiesel} = \frac{\dot{m}_{biodiesel}}{Ne} \times 3600$$

SFC dual fuel untuk percobaan dual fuel dengan tekanan penginjeksian 250 kg/cm<sup>2</sup> pada beban 2000 watt adalah sebagai berikut :

$$SFC_{biodiesel} = \frac{0,000174}{2,367} \times 3600$$

$$SFC_{biodiesel} = 0,2646 \frac{kg}{kW.jam}$$

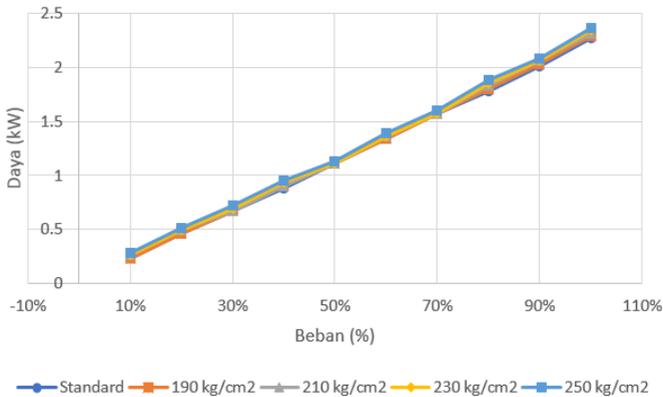
## 4.2 Analisa Unjuk Kerja

### 4.2.1 Daya (Ne)

Daya adalah ukuran kemampuan mesin untuk menghasilkan kerja persatuan waktu yang dinyatakan dalam kilowatt (kW). Unit generator set beroperasi pada putaran stasioner atau konstan pada putaran 2000 rpm, untuk menghasilkan tegangan listrik yang stabil pada besaran 220V. Gambar 4.1 di bawah ini merupakan grafik nilai daya fungsi beban, pada variasi tekanan penginjeksian 190 kg/cm<sup>2</sup>, 210 kg/cm<sup>2</sup>, 230 kg/cm<sup>2</sup> dan 250 kg/cm<sup>2</sup>.

Pada grafik dapat dilihat mempunyai trend nilai daya naik seiring dengan meningkatnya beban yang diterima. Hal

ini karena dengan bertambahnya beban listrik maka jumlah biodiesel yang diinjeksikan ke dalam ruang bakar akan lebih banyak untuk menjaga putaran engine konstan, karena pada saat beban listrik ditambah maka beban putaran generator bertambah berat dan putaran engine turun. Putaran tersebut dinaikkan kembali, dengan melakukan control pada jumlah bahan bakar biodiesel yang diinjeksikan ke dalam ruang bakar melalui mekanisme pada pompa bahan bakar yang diatur oleh governor.



**Grafik 4.1 Grafik Daya Efektif Fungsi Beban Listrik**

Nilai daya efektif yang dihasilkan pada system dual-fuel dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$Ne = \frac{V \times I \times \cos\phi}{\eta_{generator} \times \eta_{transmisi}}$$

Dari perumusan diatas, apabila nilai V (tegangan),  $\cos\phi$ ,  $\eta_{generator}$ ,  $\eta_{transmisi}$  bernilai tetap maka nilai Ne akan sebanding dengan nilai I (arus listrik). Hal ini menunjukkan bahwa dengan nilai V (tegangan),  $\cos\phi$ ,  $\eta_{generator}$ ,

$\eta_{transmisi}$  yang tetap maka dengan semakin bertambahnya beban yang diberikan akan menyebabkan tingginya arus listrik (I) yang dibutuhkan, sehingga daya yang diperlukan juga akan semakin naik.

Pengaruh terhadap peningkatan tekanan injeksi bahan bakar juga dapat dilihat pada grafik, semakin tinggi tekanan injeksi bahan bakar, maka daya yang dihasilkan juga semakin tinggi. Hal ini pada tekanan injeksi bahan bakar yang tinggi atomisasi bahan bakar semakin baik dan pembakaran menjadi lebih sempurna. Hal ini dapat dilihat pada tekanan injeksi 250 kg/cm<sup>2</sup> menghasilkan daya rata-rata yang semakin besar dibanding dengan tekanan injeksi 230 kg/cm<sup>2</sup>, 210 kg/cm<sup>2</sup>, 190 kg/cm<sup>2</sup> dan kondisi standar.

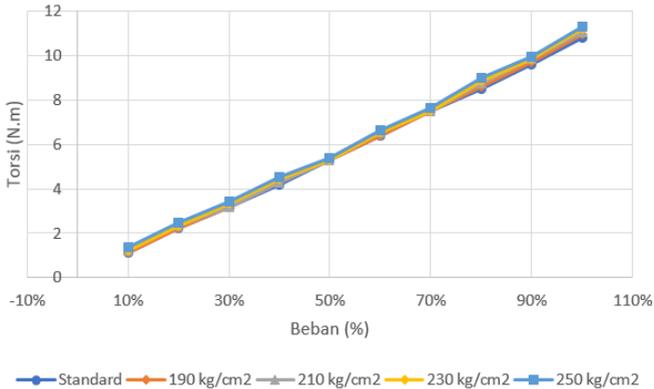
#### 4.2.2 Torsi (Mt)

Torsi merupakan ukuran kemampuan dari mesin untuk menghasilkan kerja. Torsi dari mesin berguna untuk mengatasi hambatan sewaktu beban diberikan ke poros mesin. Di bawah ini adalah grafik torsi fungsi beban dengan variasi tekanan penginjeksian pada injector.

Grafik torsi mesin fungsi beban listrik ini memiliki karakteristik yang sama dengan grafik daya efektif, yaitu nilai torsi meningkat seiring dengan meningkatnya beban yang diterima mesin. Pada pengujian kali ini putaran mesin berputar secara stasioner, maka perubahan nilai torsi bergantung variasi daya efektif yang pada akhirnya bentuk grafik yang ditunjukkan sama dengan bentuk grafik yang ditunjukkan oleh grafik yang ditunjukkan oleh grafik daya efektif fungsi beban listrik.

Perubahan nilai arus dan tegangan yang dihasilkan oleh generator relatif kecil karena putaran mesin yang dijaga konstan di putaran 2000 rpm dengan melakukan kontrol pada pemasukan bahan bakar biodiesel menggunakan mekanisme governor. Torsi yang dihasilkan mesin dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$Mt = \frac{60 \times Ne}{n \times 2\pi}$$



**Grafik 4.2 Grafik Torsi Fungsi Beban Listrik**

Persamaan di atas menunjukkan nilai torsi bergantung pada nilai daya ( $N_e$ ) dan putaran engine ( $n$ ). Karena dalam pengujian ini putaran engine dijaga konstan, maka torsi berbanding lurus dengan daya yang diberikan, semakin besar daya yang diberikan mesin, maka torsi yang dihasilkan akan semakin besar.

Pengaruh terhadap peningkatan tekanan injeksi bahan bakar juga dapat dilihat pada grafik, semakin tinggi tekanan injeksi bahan bakar, maka torsi yang dihasilkan juga semakin tinggi. Hal ini pada tekanan injeksi bahan bakar yang tinggi atomisasi bahan bakar semakin baik dan pembakaran menjadi lebih sempurna sehingga daya efektif yang dihasilkan mesin semakin tinggi yang berakibat pada tingginya nilai torsi yang dihasilkan. Hal ini dapat dilihat pada tekanan injeksi 250 kg/cm<sup>2</sup> menghasilkan torsi rata-rata yang semakin besar dibanding dengan tekanan injeksi 230 kg/cm<sup>2</sup>, 210 kg/cm<sup>2</sup>, 190 kg/cm<sup>2</sup> dan kondisi standar.

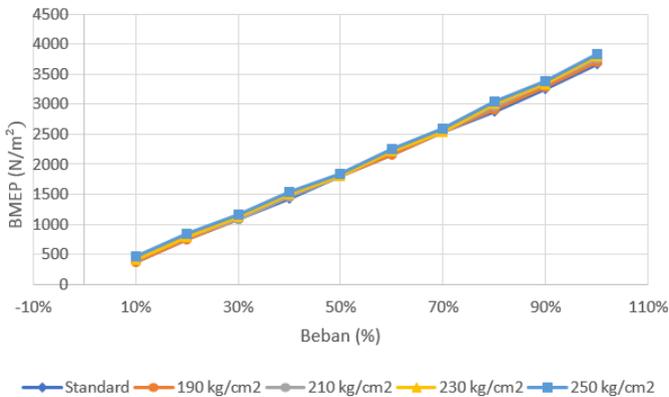
### 4.2.3 *Brake Mean Effective Pressure (BMEP)*

Brake mean effective pressure atau tekanan efektif rata-rata 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.

Grafik bmeop terlihat mempunyai kecenderungan linear naik seiring dengan bertambahnya beban. Apabila ditinjau dari fenomena yang terjadi di dalam mesin, kenaikan beban akan menyebabkan perubahan air-fuel ratio (AFR) kearah campuran kaya bahan bakar. Semakin banyak bahan bakar yang diledakkan di ruang bakar, maka tekanan ekspansi yang dihasilkan juga akan semakin besar. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya kenaikan BMEP seiring dengan kenaikan beban.

Perubahan nilai arus dan tegangan yang dihasilkan oleh generator relatif kecil karena putaran mesin yang dijaga konstan di putaran 2000 rpm dengan melakukan kontrol pada pemasukan bahan bakar biodiesel menggunakan mekanisme governor.

Pengaruh terhadap peningkatan tekanan injeksi bahan bakar juga dapat dilihat pada grafik, semakin tinggi tekanan injeksi bahan bakar, maka daya yang dihasilkan juga semakin tinggi. Hal ini pada tekanan injeksi bahan bakar yang tinggi atomisasi bahan bakar semakin baik dan pembakaran menjadi lebih sempurna. Hal ini dapat dilihat pada tekanan injeksi 250 kg/cm<sup>2</sup> menghasilkan daya rata-rata yang semakin besar dibanding dengan tekanan injeksi 230 kg/cm<sup>2</sup>, 210 kg/cm<sup>2</sup>, 190 kg/cm<sup>2</sup> dan kondisi standar.



**Grafik 4.2 Grafik BMEP Fungsi Beban Listrik**

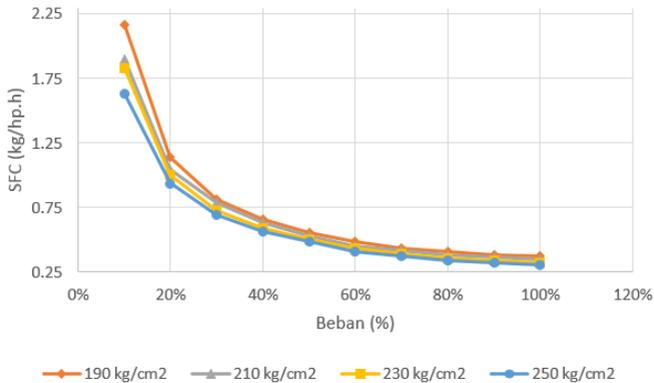
#### 4.2.4 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (sfc) Dual Fuel

Konsumsi bahan bakar spesifik (sfc) adalah jumlah massa bahan bakar yang dibutuhkan mesin untuk menghasilkan daya efektif 1 kW selama 1 jam. Gambar 4.4 di bawah ini merupakan grafik sfc dual-fuel fungsi beban dengan variasi tekanan injeksi bahan bakar pada injector.

Pada grafik ditunjukkan bahwa nilai sfc semakin turun seiring dengan penambahan beban yang semakin tinggi. Hal ini disebabkan karena dengan bertambahnya beban listrik maka jumlah biodiesel yang diinjeksikan ke dalam ruang bakar akan lebih banyak untuk menjaga putaran engine konstan, karena pada saat beban listrik ditambah maka beban putaran generator bertambah berat dan putaran engine turun. Putaran mesin tersebut dinaikkan kembali, dengan melakukan control pada jumlah bahan bakar biodiesel yang diinjeksikan ke dalam ruang bakar melalui mekanisme pada pompa injeksi bahan bakar yang diatur oleh governor.

Pengaruh terhadap peningkatan tekanan injeksi bahan bakar juga dapat dilihat pada grafik, semakin tinggi tekanan injeksi bahan bakar, maka BMEP yang dihasilkan juga semakin tinggi. Hal ini pada tekanan injeksi bahan bakar yang tinggi

atomisasi bahan bakar semakin baik dan pembakaran menjadi lebih sempurna. Hal ini dapat dilihat pada tekanan injeksi 250 kg/cm<sup>2</sup> menghasilkan daya rata-rata yang semakin besar dibanding dengan tekanan injeksi 230 kg/cm<sup>2</sup>, 210 kg/cm<sup>2</sup>, 190 kg/cm<sup>2</sup> dan kondisi standar.



**Grafik 4.4 Grafik SFC Dual-Fuel Fungsi Beban Listrik**

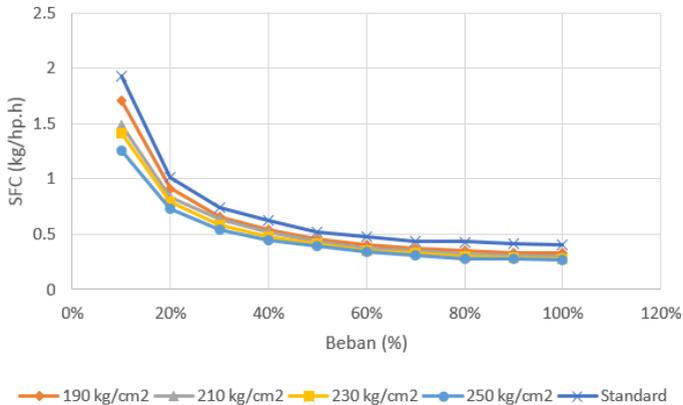
#### 4.2.5 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (sfc) Biodiesel

Konsumsi bahan bakar spesifik (sfc) adalah jumlah massa bahan bakar yang dibutuhkan mesin untuk menghasilkan daya efektif 1 kW selama 1 jam. Gambar 4.5 di bawah ini merupakan grafik sfc biodiesel fungsi beban dengan variasi tekanan injeksi bahan bakar pada injector.

Pada grafik ditunjukkan bahwa nilai sfc semakin turun seiring dengan penambahan beban yang semakin tinggi. Hal ini disebabkan karena dengan bertambahnya beban listrik maka jumlah biodiesel yang diinjeksikan ke dalam ruang bakar akan lebih banyak untuk menjaga putaran engine konstan, karena pada saat beban listrik ditambah maka beban putaran generator bertambah berat dan putaran engine turun. Putaran mesin tersebut dinaikkan kembali, dengan melakukan control pada jumlah bahan bakar biodiesel yang diinjeksikan ke dalam ruang

bakar melalui mekanisme pada pompa injeksi bahan bakar yang diatur oleh governor.

Pada grafik juga ditunjukkan semakin naik tekanan injeksi bahan bakar maka nilai sfc juga semakin turun, hal ini dikarenakan karena bahan bakar biodiesel yang disemprotkan memiliki butiran yang lebih halus seiring dengan kenaikan tekanan injeksi bahan bakar, yang mengakibatkan pembakaran dalam ruang bakar menjadi lebih sempurna. Dapat dilihat pada tekanan injeksi 250 kg/cm<sup>2</sup> menghasilkan SFC rata-rata yang lebih kecil dibanding dengan tekanan injeksi 230 kg/cm<sup>2</sup>, 210 kg/cm<sup>2</sup>, 190 kg/cm<sup>2</sup> dan tekanan standar injektor mesin.

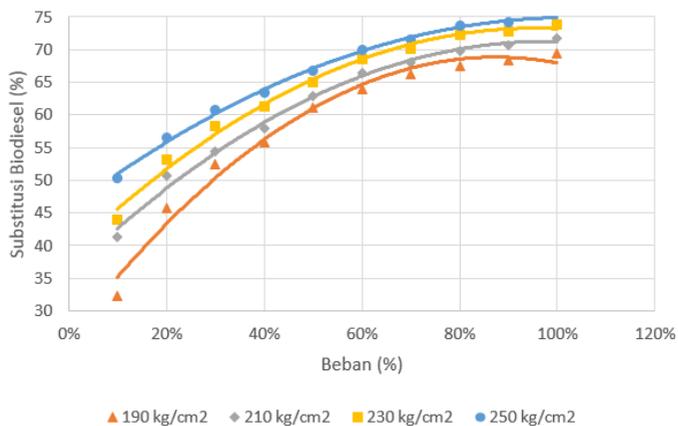


**Grafik 4.5 Grafik SFC Biodiesel Fungsi Beban Listrik**

#### 4.2.6 Biodiesel Tersubstitusi

Pada gambar 4.6 dapat dilihat jumlah persentase biodiesel yang digantikan oleh syngas setiap penambahan syngas dan beban listrik. Setiap kenaikan laju alir massa syngas, maka besarnya jumlah persentase biodiesel yang diinjeksikan ke dalam ruang bakar untuk menjaga putaran mesin konstan akan semakin turun, sehingga jumlah persentase biodiesel yang digantikan akan semakin besar.

Pada grafik juga dapat dilihat bahwa semakin tinggi tekanan injeksi bahan bakar maka persentase bahan bakar biodiesel yang tersubstitusi juga semakin tinggi. Hal ini disebabkan syngas memiliki peran sebagai secondary fuel dengan baik, meskipun perannya tidak dapat menggantikan biodiesel 100%. Biodiesel dibutuhkan tidak hanya sebagai pilot fuel tetapi juga sebagai pelumas pada bagian pompa bahan bakar.



**Grafik 4.6 Grafik Biodiesel Tersubstitusi Fungsi Beban Listrik**

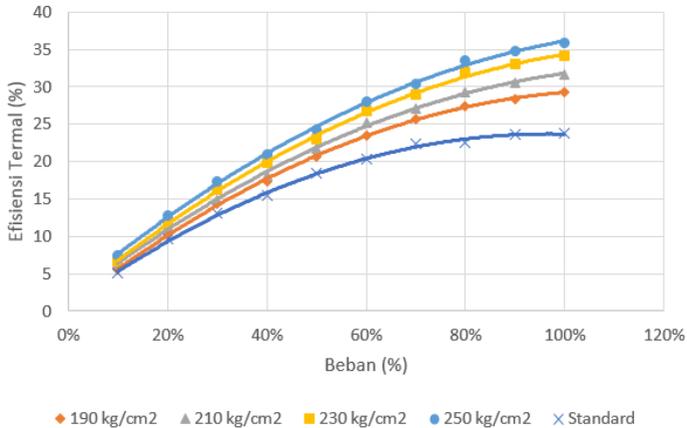
#### 4.2.7 Efisiensi Thermal ( $\eta_{th}$ )

Efisiensi termal adalah perbandingan antara bahan bakar yang dapat diubah menjadi energi. Efisiensi termal dapat dihitung dengan rumus berikut ini :

$$\eta_{thdual\ fuel} = \left( \frac{Ne}{(m_{dual\ solar} \cdot Q_{solar} + m_{syngas} \cdot Q_{syngas})} \right) \times 100\%$$

Dapat dilihat bahwa faktor yang membuat nilai efisiensi termal semakin naik adalah nilai laju alir massa syngas, nilai ini mempengaruhi nilai efisiensinya yang semakin

naik. Dan nilai dari LHV mass flowrate syngas yang rendah dan LHV biodiesel dengan mass flowrate yang tinggi mengakibatkan nilai perbandingan dari rumus diatas mengalami kenaikan. Gambar 4.7 merupakan grafik dari efisiensi termal engine fungsi beban listrik.



**Grafik 4.7 Grafik Efisiensi Termal Engine Fungsi Beban Listrik**

Pada grafik dapat dilihat bahwa semakin tinggi tekanan injeksi bahan bakar maka efisiensi termal pada engine juga semakin meningkat, hal ini dikarenakan daya yang dihasilkan oleh mesin juga semakin meningkat akibat tekanan injeksi bahan bakar yang juga semakin meningkat. Nilai sfc yang semakin turun seiring dengan kenaikan tekanan injeksi bahan bakar juga mempengaruhi kenaikan dari efisiensi termal, karena semakin banyak bahan bakar yang dikonversi menjadi daya efektif yang dihasilkan oleh mesin. Pada tekanan injeksi 250 kg/cm<sup>2</sup> menghasilkan nilai efisiensi termal rata-rata yang lebih besar dibanding dengan tekanan injeksi 230 kg/cm<sup>2</sup>, 210 kg/cm<sup>2</sup>, 190 kg/cm<sup>2</sup> dan kondisi standar.

#### 4.2.8 Analisa Rasio Udara-Bahan Bakar

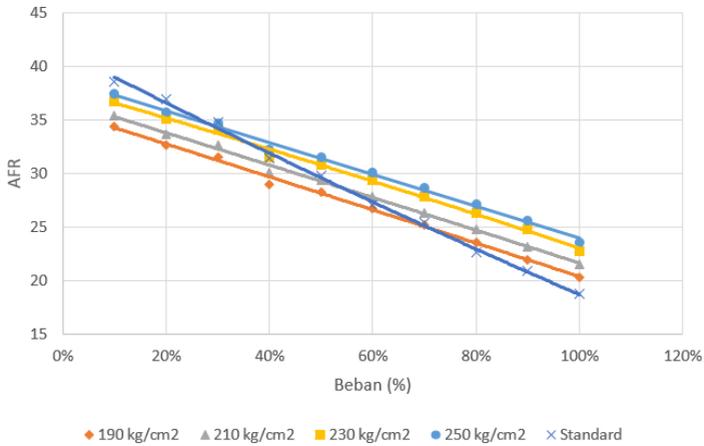
Pada grafik 4.8 dapat dilihat trend grafik afr fungsi beban listrik yang semakin menurun pada setiap kenaikan beban, hal ini dikarenakan penambahan mass flow rate syngas pada system dual fuel.

Bertambahnya beban listrik menyebabkan nilai afr juga semakin menurun karena pada ruang bakar bahan bakar menjadi semakin kaya dan kekurangan asupan udara semakin bertambahnya beban, maka dari itu untuk mengatasi penambahan beban, mesin harus menghasilkan daya yang besar pula. Daya yang membesar ini dihasilkan dari pembakaran bahan bakar yang terjadi antara campuran udara dan bahan bakar.

Dapat dilihat juga semakin meningkat tekanan injeksi maka nilai afr akan semakin meningkat, hal ini dikarenakan semakin meningkat tekanan injeksi maka nilai laju massa aliran biodiesel pada system dual fuel semakin menurun, yang mengakibatkan nilai afr semakin besar. Pada rumus perhitungan afr pada system dual fuel nilai afr berbanding terbalik dengan nilai laju massa aliran biodiesel, yang dapat dilihat pada rumus berikut :

$$AFR_{dual} = \frac{\dot{m} \text{ udara}}{\dot{m} \text{ biodiesel} + \dot{m} \text{ syngas}}$$

Nilai laju massa aliran biodiesel pada system dual fuel berbanding terbalik dengan nilai afr, akibatnya dengan semakin turunnya nilai laju massa aliran biodiesel, nilai afr pada system dual fuel akan semakin meningkat.

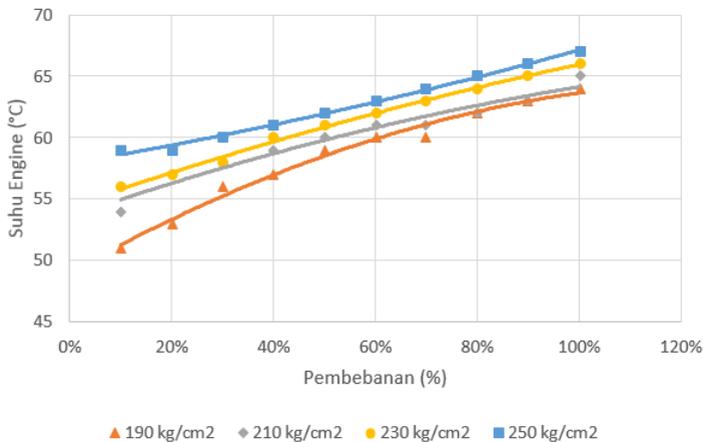


**Gambar 4.7** Grafik nilai AFR Dual Fuel Fungsi Beban Listrik

#### 4.2.9 Analisa Temperatur Engine

Pada penelitian ini didapatkan data temperature engine yang diukur dengan thermocouple yang ditempelkan pada blok mesin. Didapatkan grafik 4.9 yang menjelaskan temperature engine fungsi beban yang didapat selama penelitian berlangsung.

Pada grafik temperature engine fungsi beban yang telah didapat menunjukkan tren yang sama, yaitu semakin naik nilai temperature engine seiring dengan kenaikan beban listrik dan kenaikan tekanan injeksi bahan bakar. Hal ini disebabkan karena semakin meningkatnya beban maka jumlah bahan bakar yang masuk ke ruang bakar akan semakin banyak, sehingga panas pembakaran yang dilepas ke dinding silinder mesin juga semakin banyak, sehingga temperature engine pun juga naik. Ketika dimasukkan bahan bakar syngas hasil pembakaran biomassa juga mengakibatkan pembakaran diruang bakar menjadi lebih besar, dan mengakibatkan pelepasan kalor akan menjadi lebih besar ke dinding silinder.



**Grafik 4.8 Grafik Temperatur Engine Fungsi Beban Listrik**

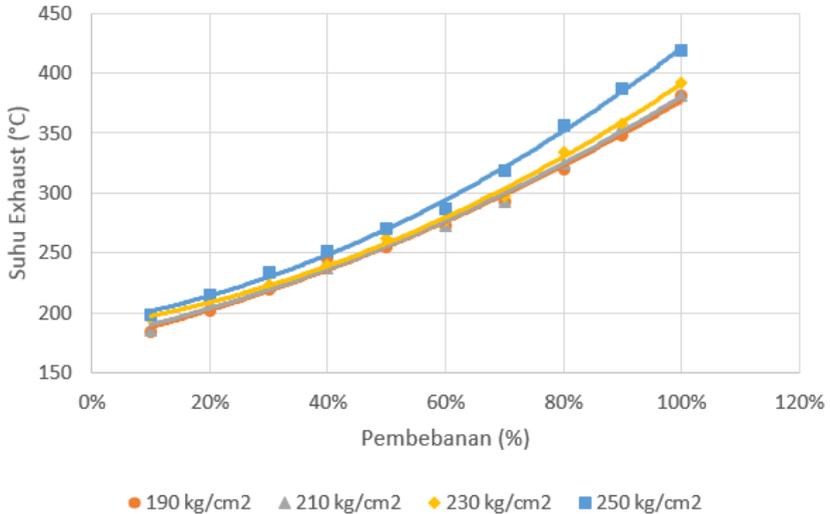
Nilai temperature engine juga semakin meningkat dengan semakin meningkatnya tekanan injeksi bahan bakar biodiesel, hal ini dikarenakan bahan bakar yang diinjeksikan teratomisasi dengan baik sehingga daya efektif yang dihasilkan juga semakin besar, mesin diesel akan bekerja lebih berat seiring dengan pertambahan beban yang mengakibatkan suhu engine akan semakin meningkat.

#### **4.2.10 Analisa Temperatur Exhaust**

Pada penelitian ini didapatkan data temperature exhaust yang diukur dengan thermocouple yang ditempelkan pada blok mesin. Didapatkan grafik 4.10 yang menjelaskan temperature exhaust fungsi beban yang didapat selama penelitian berlangsung.

Pada grafik temperature exhaust fungsi beban yang telah didapat menunjukkan tren yang sama, yaitu semakin naik nilai temperature exhaust seiring dengan kenaikan beban listrik. Hal ini dikarenakan bahan bakar yang disemprotkan oleh injektor juga semakin banyak sehingga semakin banyak kalor selama proses pembakaran. Dengan ditambahkannya bahan

bakar syngas juga mengakibatkan pelepasan kalor yang terjadi selama proses pembakaran pada ruang bakar akan semakin besar, dimana hasil pembakaran tersebut akan keluar melalui katup exhaust.



**Grafik 4.9 Grafik Temperatur Exhaust Fungsi Beban Listrik**

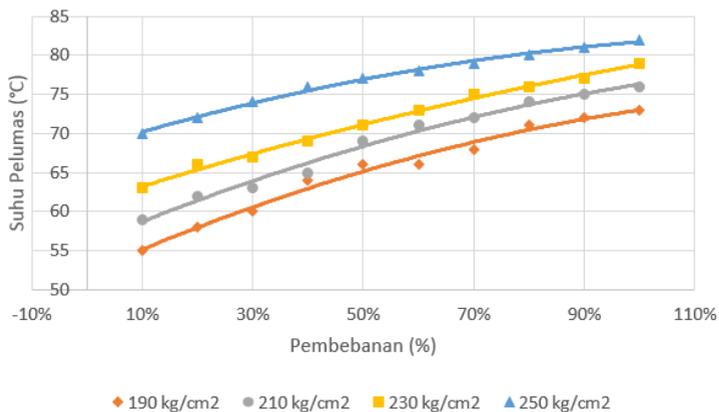
Nilai temperature exhaust juga semakin meningkat dengan semakin meningkatnya tekanan injeksi bahan bakar biodiesel, hal ini dikarenakan bahan bakar yang diinjeksikan teratomisasi dengan baik sehingga pembakaran lebih sempurna dan daya efektif yang dihasilkan juga semakin besar, mesin diesel akan bekerja lebih berat seiring dengan pertambahan beban yang mengakibatkan gas buang yang keluar pada lubang exhaust akan semakin meningkat.

#### 4.2.11 Analisa Temperatur Pelumas

Pada penelitian ini didapatkan data temperature pelumas yang diukur dengan thermocouple yang ditempelkan

pada blok mesin. Didapatkan grafik 4.11 yang menjelaskan temperature pelumas fungsi beban yang didapat selama penelitian berlangsung.

Pada grafik temperature pelumas fungsi beban yang telah didapat menunjukkan tren yang sama, yaitu semakin naik nilai temperature engine seiring dengan kenaikan beban listrik. Hal ini dikarenakan bahan bakar yang disemprotkan oleh injektor juga semakin banyak sehingga semakin banyak kalor selama proses pembakaran. Dengan ditambahkannya bahan bakar syngas juga mengakibatkan pelepasan kalor yang terjadi selama proses pembakaran pada ruang bakar akan semakin besar, yang mengakibatkan suhu pelumas mesin akan semakin naik.



**Grafik 4.10 Grafik Temperatur Pelumas Fungsi Beban Listrik**

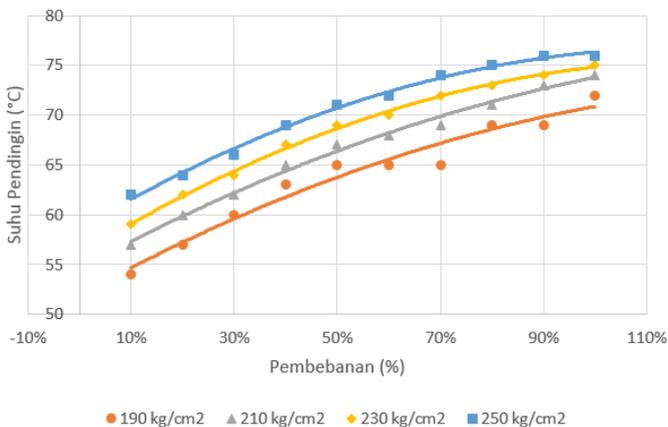
Nilai temperature pelumas juga semakin meningkat dengan semakin meningkatnya tekanan injeksi bahan bakar biodiesel, hal ini dikarenakan bahan bakar yang diinjeksikan teratomisasi dengan baik sehingga pembakaran lebih sempurna dan daya efektif yang dihasilkan juga semakin besar, mesin diesel akan bekerja lebih berat seiring dengan pertambahan

beban yang mengakibatkan suhu pelumas dalam blok mesin akan semakin meningkat.

#### 4.2.12 Analisa Temperatur Pendingin

Pada penelitian ini didapatkan data temperature pendingin yang diukur dengan thermocouple yang ditempelkan pada blok mesin. Didapatkan grafik 4.12 yang menjelaskan temperature pendingin fungsi beban yang didapat selama penelitian berlangsung.

Pada grafik temperature pelumas fungsi beban yang telah didapat menunjukkan tren yang sama, yaitu semakin naik nilai temperature engine seiring dengan kenaikan beban listrik. Hal ini dikarenakan bahan bakar yang disemprotkan oleh injektor juga semakin banyak sehingga semakin banyak kalor selama proses pembakaran. Dengan ditambahkannya bahan bakar syngas juga mengakibatkan pelepasan kalor yang terjadi selama proses pembakaran pada ruang bakar akan semakin besar, yang mengakibatkan suhu cairan pendingin akan semakin naik.



**Grafik 4.11 Grafik Temperatur Pendingin Fungsi Beban Listrik**

Nilai temperature engine juga semakin meningkat dengan semakin meningkatnya tekanan injeksi bahan bakar biodiesel, hal ini dikarenakan bahan bakar yang diinjeksikan teratomisasi dengan baik sehingga pembakaran lebih sempurna dan daya efektif yang dihasilkan juga semakin besar, mesin diesel akan bekerja lebih berat seiring dengan penambahan beban yang mengakibatkan suhu engine akan semakin meningkat.

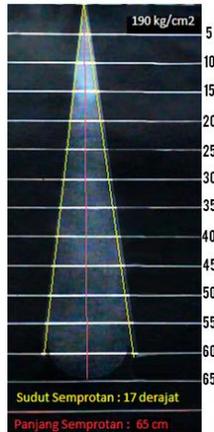
#### 4.2.13 Analisa Atomisasi Bahan Bakar

Proses atomisasi adalah proses mengubah bahan bakar cair yang terinjeksi oleh injektor mesin menjadi sheet (lembaran tipis yang nantinya membentuk ligament (ikatan) dan pecah menjadi bentuk droplet dengan pola dan arah tertentu. Atomisasi yang lebih sempurna akan menghasilkan unjuk kerja mesin yang lebih baik pula, hal ini dikarenakan droplet bahan bakar yang diinjeksikan semakin halus seiring dengan meningkatnya tekanan injeksi bahan bakar yang berakibat pada semakin sempurna pembakaran dalam ruang bakar.

Parameter yang dapat mempengaruhi atomisasi bahan bakar adalah properties bahan bakar biodiesel itu sendiri, hasil uji properties biodiesel minyak sawit yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.3.

**Tabel 4.3 Hasil Pengujian Properties Biodiesel Minyak Sawit**

Sifat – sifat	Nilai
Specific gravity ( $\text{kg}/\text{cm}^3$ ) pada $40^\circ\text{C}$ ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )	868
Viskositas kinematis pada $40^\circ\text{C}$ ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )	5,3
Tegangan permukaan ( $\text{dyne}/\text{cm}$ )	68
Angka Cetane	52
Flash point ( $^\circ\text{C}$ )	174

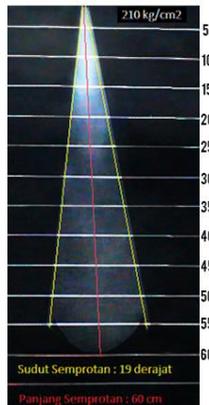


**Gambar 4.1 Hasil Atomisasi Bahan Bakar Biodiesel Pada Tekanan 190 kg/cm<sup>2</sup>**

Pada gambar 4.1 ditunjukkan hasil semprotan untuk tekanan injeksi bahan bakar biodiesel oleh injektor mesin Yanmar TF 55R Di pada tekanan injeksi 190 kg/cm<sup>2</sup>, ditunjukkan bahwa hasil atomisasi bahan bakar pada tekanan injeksi 190 kg/cm<sup>2</sup> diperoleh panjang semprotan (L) dengan panjang 65 cm dan sudut semprotan ( $\emptyset$ ) dengan besar 17°.

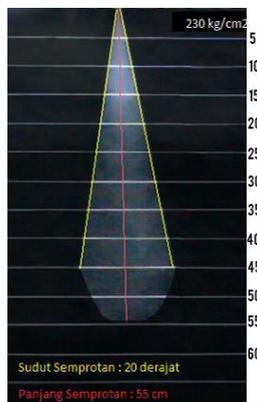
Dapat dilihat proses atomisasi bahan bakar kurang sempurna dikarenakan penetrasi dari semprotan dapat dinilai panjang karena proses droplet breakup yang terjadi kurang baik sehingga bahan bakar biodiesel yang terinjeksi tidak teratomisasi dengan baik.

Pada gambar 4.2 ditunjukkan hasil semprotan untuk tekanan injeksi bahan bakar biodiesel oleh injektor mesin Yanmar TF 55R Di pada tekanan injeksi 210 kg/cm<sup>2</sup>, ditunjukkan bahwa hasil atomisasi bahan bakar pada tekanan injeksi 210 kg/cm<sup>2</sup> diperoleh panjang semprotan (L) dengan panjang 60 cm dan sudut semprotan ( $\emptyset$ ) dengan besar 19°.



**Gambar 4.2 Hasil Atomisasi Bahan Bakar Biodiesel Pada Tekanan 210 kg/cm<sup>2</sup>**

Dapat dilihat proses atomisasi lebih baik daripada tekanan injeksi 190 kg/cm<sup>2</sup>, hal ini dapat dilihat pada panjang penetrasi semprotan yang diperoleh lebih pendek dan sudut semprotan yang diperoleh lebih besar, yang berarti proses droplet breakup yang terjadi saat terjadi saat penginjeksian lebih baik.



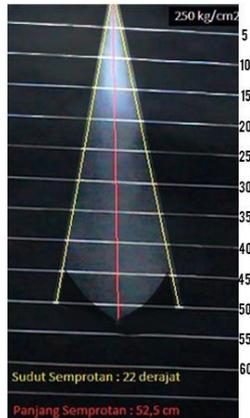
**Gambar 4.3 Hasil Atomisasi Bahan Bakar Biodiesel Pada Tekanan 230 kg/cm<sup>2</sup>**

Pada gambar 4.3 ditunjukkan hasil semprotan untuk tekanan injeksi bahan bakar biodiesel oleh injektor mesin Yanmar TF 55R Di pada tekanan injeksi  $230 \text{ kg/cm}^2$ , ditunjukkan bahwa hasil atomisasi bahan bakar pada tekanan injeksi  $230 \text{ kg/cm}^2$  diperoleh panjang semprotan (L) dengan panjang 55 cm dan sudut semprotan ( $\emptyset$ ) dengan besar  $20^\circ$ .

Dapat dilihat proses atomisasi lebih baik daripada tekanan injeksi  $190 \text{ kg/cm}^2$  dan  $210 \text{ kg/cm}^2$ , hal ini dapat dilihat pada panjang penetrasi semprotan yang diperoleh lebih pendek dan sudut semprotan yang diperoleh lebih besar, yang berarti proses droplet breakup yang terjadi saat terjadi saat penginjeksian lebih baik yang berarti atomisasinya semakin baik pula.

Sedangkan hasil atomisasi untuk tekanan injeksi bahan bakar biodiesel oleh injektor mesin Yanmar TF 55R Di pada tekanan injeksi  $250 \text{ kg/cm}^2$  ditunjukkan pada gambar 4.4, hasil atomisasi menunjukkan bahwa bahan bakar yang terinjeksi pada tekanan injeksi  $250 \text{ kg/cm}^2$  diperoleh panjang semprotan (L) dengan panjang 52,5 cm dan sudut semprotan ( $\emptyset$ ) dengan besar  $22^\circ$ .

Dapat dilihat proses atomisasi lebih baik daripada tekanan injeksi  $190 \text{ kg/cm}^2$ ,  $210 \text{ kg/cm}^2$  dan  $230 \text{ kg/cm}^2$ , hal ini dapat dilihat pada panjang penetrasi semprotan yang diperoleh lebih pendek dan sudut semprotan yang diperoleh lebih besar, yang berarti proses droplet breakup yang terjadi saat terjadi saat penginjeksian lebih baik yang berarti atomisasinya semakin baik pula.



**Gambar 4.4 Hasil Atomisasi Bahan Bakar Biodiesel Pada Tekanan 250 kg/cm<sup>2</sup>**

Dari Analisa gambar yang ditunjukkan, atomisasi terbaik ditunjukkan pada tekanan injeksi 250 kg/cm<sup>2</sup>, dimana pada hasil atomisasi tersebut menghasilkan sudut semprotan ( $\theta$ ) yang paling besar yaitu  $\theta = 22^\circ$  dan panjang semprotan (L) yang paling kecil, yaitu  $L = 52,5$  cm. Pada hasil semprotan tekanan injeksi 250 kg/cm<sup>2</sup>, bahan bakar yang teratomisasi lebih cepat membentuk droplet daripada hasil atomisasi pada tekanan injeksi 190 kg/cm<sup>2</sup>, 210 kg/cm<sup>2</sup> dan 230 kg/cm<sup>2</sup> yang berarti atomisasinya paling baik.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Setelah dilakukan penelitian penulis mendapatkan beberapa kesimpulan yang didapat, antara lain :

- Nilai daya efektif rata-rata yang tertinggi dihasilkan pada tekanan injeksi  $250 \text{ kg/cm}^2$  dengan persentase kenaikan daya 5,02% terhadap kondisi standar.
- Nilai torsi rata-rata yang tertinggi dihasilkan pada tekanan injeksi  $250 \text{ kg/cm}^2$  dengan persentase kenaikan torsi sebesar 5,02% terhadap kondisi standar.
- Nilai BMEP rata-rata yang tertinggi dihasilkan pada tekanan injeksi  $250 \text{ kg/cm}^2$  dengan persentase kenaikan BMEP sebesar 5,02% terhadap kondisi standar.
- Nilai SFC pada system dual fuel mengalami penurunan rata-rata sebesar 13,24% dibanding dengan tekanan injeksi standar mesin ( $170 \text{ kg/cm}^2$ ).
- Nilai SFC biodiesel fuel mengalami penurunan rata-rata sebesar 30,776% dibanding dengan kondisi standar.
- Nilai AFR rata-rata pada sistem dual fuel mengalami peningkatan sebesar 7,17% dibanding dengan kondisi standar.
- Nilai efisiensi termal pada system dual fuel mengalami peningkatan sebesar 40,766% dibanding dengan kondisi standar.
- Hasil atomisasi bahan bakar yang paling baik ditunjukkan pada tekanan injeksi  $250 \text{ kg/cm}^2$ , hasil atomisasi tersebut menghasilkan sudut semprotan ( $\emptyset$ ) yang paling besar yaitu  $\emptyset = 22^\circ$  dan panjang semprotan (L) yang paling kecil, yaitu  $L = 52,5 \text{ cm}$ .

## **5.2 Saran**

Saran yang dapat diberikan oleh penulis setelah melakukan penelitian ini antara lain :

1. Sebelum melakukan penelitian hendaknya memakai peralatan keamanan seperti sarung tangan, masker dan sebagainya untuk mengantisipasi.
2. Mesin yang digunakan untuk penelitian harus dicek dan dilakukan perawatan baik sebelum dan setelah penelitian agar saat digunakan untuk penelitian kembali dapat bekerja dengan baik.
3. Peralatan yang digunakan selama penelitian harus dikembalikan dalam keadaan baik.
4. Setiap akan melakukan penelitian baiknya melapor pada petugas yang bekerja pada laboratorium / workshop.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sugiyono, Agus dkk. (2014). **“Outlook Energi Indonesia 2014”**. Pusat Teknologi Pengembangan Sumberdaya Energi, Jakarta.
- [2] Rizkal, Achmad. (2015). **“Karakterisasi Unjuk Kerja Diesel Engine Generator Set Sistem Dual Fuel Solar-Syngas Hasil Gasifikasi Briket Municipal Solid Waste (MSW) Secara Langsung”**. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [3] Liu, Jie. (2013) **“Effects of pilot fuel quantity on the emissions characteristics of a CNG / diesel dual fuel engine with optimized pilot injection timing”** . State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, China.
- [4] Prasad, Hari. (2013). **“Effects of Injection Pressure on Performance of Dual Fuel Diesel Engine”**. Sree Vidyanikethan Engineering College, India
- [5] Ismanto. (2012). **“Analisis Variasi Tekanan Pada Injektor Terhadap Performance (Torsi dan Daya) Pada Motor Diesel”**. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Janabadra, Yogyakarta.
- [6] Suhartanta. (2011). **“Pemanfaatan Minyak Jarak Pagar Sebagai Bahan Bakar Alternatif Mesin Diesel”**. Fakultas Teknik Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta.
- [7] Kawano, D. Sungkono. (2011). **“Motor Bakar Torak (Diesel)”**. ITS Press, Surabaya.

- [8] *van der Burgt, Higman. (2013). "Gasification" . Elsevier Science, USA.*
- [9] *Heywood, J. B., (1976). "Internal Combustion Engine Fundamentals". McGraw-Hill Book Company, Singapore.*
- [10] *Liu, Junheng. (2013). "Effects of Diesel injection pressure on the performance and emissions of a HD common-rail diesel engine fueled with diesel/methanol dual fuel". State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, China.*
- [11] *Pritchard, Philip J.. (2010) "Fox & McDonald's Fundamentals of Fluid Mechanics 5<sup>th</sup> Edition". Wiley & Sons, USA.*

## LAMPIRAN

**Tabel A1. Daya Efektif Variasi Tekanan Injeksi Bahan Bakar Terhadap Beban**

Beban (%)	Standard	190 kg/cm <sup>2</sup>	210 kg/cm <sup>2</sup>	230 kg/cm <sup>2</sup>	250 kg/cm <sup>2</sup>
10%	0.231578947	0.231578947	0.257309942	0.257309942	0.283040936
20%	0.463157895	0.463157895	0.488888889	0.488888889	0.514619883
30%	0.669005848	0.669005848	0.669005848	0.694736842	0.720467836
40%	0.874853801	0.900584795	0.900584795	0.926315789	0.952046784
50%	1.106432749	1.106432749	1.106432749	1.106432749	1.132163743
60%	1.338011696	1.338011696	1.36374269	1.36374269	1.389473684
70%	1.569590643	1.569590643	1.569590643	1.569590643	1.595321637
80%	1.775438596	1.801169591	1.826900585	1.852631579	1.878362573
90%	2.007017544	2.032748538	2.058479532	2.058479532	2.084210526
100%	2.264327485	2.29005848	2.315789474	2.341520468	2.367251462
Rata-Rata	1.22994152	1.240233918	1.255672515	1.265964912	1.291695906

Perhitungan rata-rata kenaikan daya :

$$\% \text{ kenaikan} = \frac{x_i - x_o}{x_o} \times 100\%$$

Dengan keterangan :

- $x_i$  = nilai akhir
- $x_o$  = nilai awal

Nilai  $x_i$  yang diambil adalah nilai rata-rata variasi dan nilai  $x_o$  adalah nilai rata-rata pada kondisi standar, maka persentase kenaikan yang didapatkan adalah :

$$\% \text{ kenaikan} = \frac{1.2917 - 1.2299}{1.2299} \times 100\%$$

$$\% \text{ kenaikan} = 5,02\%$$

**Tabel A2. Torsi Mesin Variasi Tekanan Injeksi Bahan Bakar Terhadap Beban**

Beban (%)	Standard	190 kg/cm <sup>2</sup>	210 kg/cm <sup>2</sup>	230 kg/cm <sup>2</sup>	250 kg/cm <sup>2</sup>
10%	1.106268857	1.106268857	1.229187619	1.229187619	1.352106381
20%	2.212537714	2.212537714	2.335456476	2.335456476	2.458375237
30%	3.195887809	3.195887809	3.195887809	3.318806571	3.441725332
40%	4.179237904	4.302156666	4.302156666	4.425075427	4.547994189
50%	5.285506761	5.285506761	5.285506761	5.285506761	5.408425522
60%	6.391775617	6.391775617	6.514694379	6.514694379	6.637613141
70%	7.498044474	7.498044474	7.498044474	7.498044474	7.620963236
80%	8.481394569	8.604313331	8.727232093	8.850150855	8.973069617
90%	9.587663426	9.710582188	9.83350095	9.83350095	9.956419712
100%	10.81685104	10.93976981	11.06268857	11.18560733	11.30852609
Rata-Rata	5.875516818	5.924684322	5.998435579	6.047603084	6.170521846

Perhitungan rata-rata kenaikan torsi :

$$\% \text{ kenaikan} = \frac{x_i - x_o}{x_o} \times 100\%$$

Dengan keterangan :

- $x_i$  = nilai akhir
- $x_o$  = nilai awal

Nilai  $x_i$  yang diambil adalah nilai rata-rata variasi dan nilai  $x_o$  adalah nilai rata-rata pada kondisi standar, maka persentase kenaikan yang didapatkan adalah :

$$\% \text{ kenaikan} = \frac{6.1705 - 5.8755}{5.8755} \times 100\%$$

$$\% \text{ kenaikan} = 5,02\%$$

**Tabel A3. BMEP Variasi Tekanan Injeksi Bahan Bakar Terhadap Beban**

Beban (%)	Standard	190 kg/cm <sup>2</sup>	210 kg/cm <sup>2</sup>	230 kg/cm <sup>2</sup>	250 kg/cm <sup>2</sup>
10%	375.1578947	375.1578947	416.8421053	416.8421053	458.5263158
20%	750.3157895	750.3157895	792	792	833.6842105
30%	1083.789474	1083.789474	1083.789474	1125.473684	1167.157895
40%	1417.263158	1458.947368	1458.947368	1500.631579	1542.315789
50%	1792.421053	1792.421053	1792.421053	1792.421053	1834.105263
60%	2167.578947	2167.578947	2209.263158	2209.263158	2250.947368
70%	2542.736842	2542.736842	2542.736842	2542.736842	2584.421053
80%	2876.210526	2917.894737	2959.578947	3001.263158	3042.947368
90%	3251.368421	3293.052632	3334.736842	3334.736842	3376.421053
100%	3668.210526	3709.894737	3751.578947	3793.263158	3834.947368
Rata-Rata	1992.505263	2009.178947	2034.189474	2050.863158	2092.547368

Perhitungan rata-rata kenaikan bmepp :

$$\% \text{ kenaikan} = \frac{x_i - x_o}{x_o} \times 100\%$$

Dengan keterangan :

- $x_i$  = nilai akhir
- $x_o$  = nilai awal

Nilai  $x_i$  yang diambil adalah nilai rata-rata variasi dan nilai  $x_o$  adalah nilai rata-rata pada kondisi standar, maka persentase kenaikan yang didapatkan adalah :

$$\% \text{ kenaikan} = \frac{2092.5 - 1992.5}{1992.5} \times 100\%$$

$$\% \text{ kenaikan} = 5,02\%$$

**Tabel A4. SFC Dual Fuel Variasi Tekanan Injeksi Bahan Bakar Terhadap Beban**

Beban (%)	190 kg/cm <sup>2</sup>	210 kg/cm <sup>2</sup>	230 kg/cm <sup>2</sup>	250 kg/cm <sup>2</sup>	Standard
10%	2.169517143	1.896195758	1.827153835	1.631805978	1.932077922
20%	1.142595321	1.048729187	1.007643	0.939155702	1.009294437
30%	0.817759011	0.79102753	0.730488483	0.690466354	0.743106893
40%	0.661052466	0.636721261	0.59060373	0.561947065	0.628074866
50%	0.552333697	0.531261348	0.50601525	0.483221234	0.524207188
60%	0.482775152	0.454192296	0.431023358	0.412689706	0.477711574
70%	0.437030383	0.417581799	0.394626093	0.378043927	0.433787987
80%	0.406601801	0.381466951	0.35378458	0.339022011	0.430261255
90%	0.387076095	0.361986827	0.338551919	0.324061959	0.410664336
100%	0.371900147	0.346300391	0.32391722	0.309370936	0.40682122
Rata-Rata	0.742864122	0.686546335	0.650380747	0.606978487	0.699600768

Perhitungan rata-rata penurunan sfc dual fuel :

$$\% \text{ penurunan} = \frac{x_i - x_o}{x_o} \times 100\%$$

Dengan keterangan :

- $x_i$  = nilai akhir
- $x_o$  = nilai awal

Nilai  $x_i$  yang diambil adalah nilai rata-rata variasi dan nilai  $x_o$  adalah nilai rata-rata pada kondisi standar, maka persentase penurunan yang didapatkan adalah :

$$\% \text{ penurunan} = \frac{0.6069 - 0.6996}{0.6996} \times 100\%$$

$$\% \text{ penurunan} = - 13,2393\%$$

**Tabel A5. SFC Biodiesel Variasi Tekanan Injeksi Bahan Bakar Terhadap Beban**

Beban (%)	190 kg/cm <sup>2</sup>	210 kg/cm <sup>2</sup>	230 kg/cm <sup>2</sup>	250 kg/cm <sup>2</sup>	Standard
10%	1.711967779	1.48440133	1.415359408	1.257447408	1.932077922
20%	0.913820639	0.831995277	0.790909091	0.733258488	1.009294437
30%	0.659376539	0.632645058	0.577972028	0.543396916	0.743106893
40%	0.543396916	0.51906571	0.476216389	0.450651274	0.628074866
50%	0.456567551	0.435495202	0.410249104	0.389631591	0.524207188
60%	0.403583916	0.376495234	0.353326296	0.336431479	0.477711574
70%	0.3695231	0.350074516	0.32711881	0.311625471	0.433787987
80%	0.347774026	0.323467736	0.296590909	0.282611816	0.430261255
90%	0.334950218	0.310512523	0.287077616	0.27322314	0.410664336
100%	0.32563111	0.300545455	0.278665085	0.264610672	0.40682122
Rata-Rata	0.606659179	0.556469804	0.521348474	0.484288826	0.699600768

Perhitungan rata-rata penurunan sfc biodiesel :

$$\% \text{ penurunan} = \frac{x_i - x_o}{x_o} \times 100\%$$

Dengan keterangan :

- $x_i$  = nilai akhir
- $x_o$  = nilai awal

Nilai  $x_i$  yang diambil adalah nilai rata-rata variasi dan nilai  $x_o$  adalah nilai rata-rata pada kondisi standar, maka persentase penurunan yang didapatkan adalah :

$$\% \text{ penurunan} = \frac{0.4842 - 0.6996}{0.6996} \times 100\%$$

$$\% \text{ penurunan} = - 30,7764\%$$

**Tabel A6. AFR Dual Fuel Variasi Tekanan Injeksi Bahan Bakar Terhadap Beban**

Beban (%)	190 kg/cm <sup>2</sup>	210 kg/cm <sup>2</sup>	230 kg/cm <sup>2</sup>	250 kg/cm <sup>2</sup>	Standard
10%	34.3939120	35.41636636	36.75463026	37.41329575	38.62068966
20%	32.6529351	33.70312851	35.0773583	35.7535835	36.96551724
30%	31.5855530	32.65293515	34.04944481	34.73654502	34.75862069
40%	29.0257331	30.13490147	31.58555306	32.29907171	31.44827586
50%	28.2759481	29.39750658	30.86420616	31.58555306	29.79310345
60%	26.7509321	27.89790168	29.39750658	30.13490147	27.03448276
70%	25.1910173	26.36427156	27.89790168	28.65188612	25.37931034
80%	23.5949919	24.79544489	26.36427156	27.13541174	22.62068966
90%	21.9615875	23.19019599	24.79544489	25.58433308	20.96551724
100%	20.289476	21.54724158	22.78304372	23.59499196	18.75862069
Rata-Rata	27.37220	28.50998938	29.9569361	30.68895734	28.63448276

Perhitungan rata-rata kenaikan afr dual fuel :

$$\% \text{ kenaikan} = \frac{x_i - x_o}{x_o} \times 100\%$$

Dengan keterangan :

- $x_i$  = nilai akhir
- $x_o$  = nilai awal

Nilai  $x_i$  yang diambil adalah nilai rata-rata variasi dan nilai  $x_o$  adalah nilai rata-rata pada kondisi standar, maka persentase kenaikan yang didapatkan adalah :

$$\% \text{ kenaikan} = \frac{30.6889 - 28.6344}{28.6344} \times 100\%$$

$$\% \text{ kenaikan} = 7,1748 \%$$

**Tabel A7. Effisiensi Termal Variasi Tekanan Injeksi Bahan Bakar Terhadap Beban**

Beban (%)	190 kg/cm <sup>2</sup>	210 kg/cm <sup>2</sup>	230 kg/cm <sup>2</sup>	250 kg/cm <sup>2</sup>	Standard
10%	5.488954908	6.323133859	6.621389806	7.447191768	5.016267144
20%	10.30294721	11.30313904	11.87201013	12.79556774	9.602568534
30%	14.29525921	14.88203486	16.26468803	17.28625187	13.04229458
40%	17.39340061	18.18757834	19.79343583	20.90015299	15.43099322
50%	20.71730471	21.69452162	22.99395094	24.19197712	18.48852748
60%	23.47353426	25.13316744	26.73975921	28.06083515	20.28801378
70%	25.67709137	27.07201051	28.92685309	30.34149679	22.34229461
80%	27.32539272	29.34441023	31.95384846	33.50837835	22.52542818
90%	28.41583889	30.61636549	33.0641242	34.71371313	23.60034257
100%	29.27474387	31.68108486	34.12867762	35.91337329	23.82328777
Rata-Rata	20.23644677	21.62374462	23.23587373	24.51589382	17.41600179

Perhitungan rata-rata kenaikan afr dual fuel :

$$\% \text{ kenaikan} = \frac{x_i - x_o}{x_o} \times 100\%$$

Dengan keterangan :

- $x_i$  = nilai akhir
- $x_o$  = nilai awal

Nilai  $x_i$  yang diambil adalah nilai rata-rata variasi dan nilai  $x_o$  adalah nilai rata-rata pada kondisi standar, maka persentase kenaikan yang didapatkan adalah :

$$\% \text{ kenaikan} = \frac{24.5158 - 17.4160}{17.4160} \times 100\%$$

$$\% \text{ kenaikan} = 40,77 \%$$

**Tabel A8. Biodiesel Tersubstitusi Variasi Tekanan Injeksi Bahan Bakar Terhadap Beban**

Beban (%)	190 kg/cm2	210 kg/cm2	230 kg/cm2	250 kg/cm2	Standard
10%	32.29801524	41.29742541	44.02777772	50.27261244	23.59347435
20%	45.81117506	50.66335282	53.09973046	56.51836456	40.14965603
30%	52.46635718	54.39339675	58.33470814	60.82718542	46.43033904
40%	55.85930372	57.83575281	61.3164477	63.39312859	48.98082576
50%	61.13418607	62.92799287	65.07709473	66.83218312	55.37628772
60%	63.98849772	66.40560133	68.47294894	69.98046134	57.37414016
70%	66.25117426	68.02742825	70.12399033	71.53900871	60.38181326
80%	67.54203292	69.81055414	72.31898519	73.6236627	59.8434483
90%	68.29821076	70.61114742	72.82917403	74.14044846	61.13215179
100%	69.3818381	71.74057057	73.79791914	75.1194154	61.74776431
Rata-Rata	58.3030791	61.37132224	63.93987764	66.22464707	51.50099007

Perhitungan rata-rata kenaikan afr dual fuel :

$$\% \text{ kenaikan} = \frac{x_i - x_o}{x_o} \times 100\%$$

Dengan keterangan :

- $x_i$  = nilai akhir
- $x_o$  = nilai awal

Nilai  $x_i$  yang diambil adalah nilai rata-rata variasi dan nilai  $x_o$  adalah nilai rata-rata pada kondisi standar, maka persentase kenaikan yang didapatkan adalah :

$$\% \text{ kenaikan} = \frac{66.224 - 51.50}{51.50} \times 100\%$$

$$\% \text{ kenaikan} = 28,59 \%$$

**Tabel A9. Suhu Engine Variasi Tekanan Injeksi Bahan Bakar Terhadap Beban**

Beban (%)	190 kg/cm <sup>2</sup>	210 kg/cm <sup>2</sup>	230 kg/cm <sup>2</sup>	250 kg/cm <sup>2</sup>
10%	51	54	56	59
20%	53	57	57	59
30%	56	58	58	60
40%	57	59	60	61
50%	59	60	61	62
60%	60	61	62	63
70%	60	61	63	64
80%	62	62	64	65
90%	63	63	65	66
100%	64	65	66	67

**Tabel A10. Suhu Exhaust Variasi Tekanan Injeksi Bahan Bakar Terhadap Beban**

Beban (%)	190 kg/cm <sup>2</sup>	210 kg/cm <sup>2</sup>	230 kg/cm <sup>2</sup>	250 kg/cm <sup>2</sup>
10%	184	185	195	199
20%	202	207	211	215
30%	220	224	223	234
40%	246	237	240	251
50%	255	260	262	270
60%	273	273	277	287
70%	293	293	298	319
80%	320	324	334	356
90%	348	355	358	387
100%	381	381	392	419

**Tabel A11. Suhu Pelumas Variasi Tekanan Injeksi Bahan Bakar Terhadap Beban**

Beban (%)	190 kg/cm <sup>2</sup>	210 kg/cm <sup>2</sup>	230 kg/cm <sup>2</sup>	250 kg/cm <sup>2</sup>
10%	55	59	63	70
20%	58	62	66	72
30%	60	63	67	74
40%	64	65	69	76
50%	66	69	71	77
60%	66	71	73	78
70%	68	72	75	79
80%	71	74	76	80
90%	72	75	77	81
100%	73	76	79	82

**Tabel A12. Suhu Pendingin Variasi Tekanan Injeksi Bahan Bakar Terhadap Beban**

Beban (%)	190 kg/cm <sup>2</sup>	210 kg/cm <sup>2</sup>	230 kg/cm <sup>2</sup>	250 kg/cm <sup>2</sup>
10%	54	57	59	62
20%	57	60	62	64
30%	60	62	64	66
40%	63	65	67	69
50%	65	67	69	71
60%	65	68	70	72
70%	65	69	72	74
80%	69	71	73	75
90%	69	73	74	76
100%	72	74	75	76

## BIODATA PENULIS



**Arizal Sita Ahmad** dilahirkan di Malang, 25 Mei 1994 merupakan anak yang terlahir dari orangtua bernama Karsita dan Rosida Eko Wahyuni. Riwayat pendidikan penulis diawali di SDN Banjararum I, Kabupaten Malang pada kelas I-II (2000-2002) dan pindah ke SDN Purwodadi I, Malang pada kelas III-VI (2002-2006). Penulis melanjutkan pendidikannya di SMPN 3 Malang pada tahun 2006-2009, kemudian melanjutkan pendidikannya di SMAN 3 Malang pada tahun 2009-2012. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan jenjang S-1 Jurusan Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi selama perkuliahan. Dalam organisasi kemahasiswaan, penulis aktif menjadi Staff Divisi Kewirausahaan di Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM) ITS pada periode 2013-2015. Di jurusan Teknik Mesin ini penulis mengambil bidang studi Konversi Energi bagian Teknik Pembakaran Bahan Bakar. Penulis memiliki hobby melukis, bermusik dan bersepeda.

Motto hidup penulis adalah “*Stupid but Spirit*” yang selalu menjadikan penulis lebih bersemangat dan berusaha keras. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email [arizal.sitaa@gmail.com](mailto:arizal.sitaa@gmail.com)