



SKRIPSI - 141501

**DESAIN DAN ANALISA SISTEM KONTROL BAHAN
BAKAR PADA SEMI-FREE PISTON DIESEL
ENGINE TIPE DUA LANGKAH BER-PISTON
GANDA BERLAWANAN ARAH**

**DIMAS KURNIAWAN
4212100068**

Dosen Pembimbing :

Ir. Aguk Zuhdi Muhammad Fathallah, M.Eng, Ph.D

**JURUSAN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



THESIS - 141501

**DESIGN AND ANALYSIS OF FUEL CONTROL
SYSTEM IN SEMI-FREE PISTON TWO STROKE
DIESEL ENGINE WITH DUAL OPPOSED
PISTON**

**DIMAS KURNIAWAN
4212100068**

Supervisor :

Ir. Aguk Zuhdi Muhammad Fathallah, M.Eng, Ph.D

**DEPARTMENT OF MARINE ENGINEERING
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2016**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

Desain dan Anlaises Sistem Kontrol Bahan Bakar pada Semi-Free Piston Diesel Engine Tipe Dua Langkah Berpiston Ganda Berlawanan Arah

Skripsi

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

pada

Bidang Studi *Marine Power Plant* (MPP)
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Dimas Kurniawan
NRP. 4212 100 068

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Skripsi :

1. Ir. Agung Zuhdi M F, M.Eng, Ph.D
NIP : 1956 0519 1986 10 1001



SURABAYA
Juli, 2016

LEMBAR PENGESAHAN

Desain dan Anlaises Sistem Kontrol Bahan Bakar pada Semi-Free Piston Diesel Engine Tipe Dua Langkah Berpiston Ganda Berlawanan Arah

Skripsi

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

pada

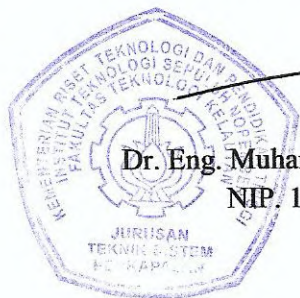
**Bidang Studi Marine Power Plant (MPP)
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh :

**Dimas Kurniawan
NRP. 4212 100 068**

**Disetujui oleh
Ketua Jurusan Teknik Sistem Perkapalan**

**Dr. Eng. Muhammad Badrus Zaman, S.T., M.T.
NIP. 1977 0802 2008 01 1007**



Desain dan Anlaises Sistem Kontrol Bahan Bakar pada *Semi-Free Piston Diesel Engine* Tipe Dua Langkah Ber-*piston* Ganda Berlawanan Arah

Nama Mahasiswa : Dimas Kurniawan
NRP : 4212 100 068
Jurusan : Teknik Sistem Perkapalan
Dosen Pembimbing : Ir. Agus Zuhdi M F, M.Eng, Ph.D

ABSTRAK

Proses suplai bahan bakar pada mesin konvensional memanfaatkan mekanisme kerja *camshaft* dengan gerak putaran. Tipe *semi-free piston diesel engine dual opposed piston* yang tidak memiliki *output* berupa gerak putar, maka perlu didesain sistem bahan bakar tanpa memanfaatkan energi gerak. Pada penelitian ini dibuat desain *3D-drawing* sistem bahan bakar yang berbasis *electronic fuel injection* dengan *Solidwork* 2015 dan simulasi kontrol *Simulink* MATLABR2010a. Desain kontrol *electronic* dibuat dengan sinyal masukan *air intake mass* dan nilai *lamda* serta posisi penyemprotan 15° CA (setara 5 mm) *Before Top Dead Center* (BTDC). Hasil desain berupa *3D-drawing* sistem bahan bakar dilengkapi sistem kontrol bertipe *fuzzy logic*. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa kontrol elektronik lebih akurat pada posisi injeksi yang ditentukan. Terjadi respon *fuzzy* yaitu konsumsi bahan bakar berlebih pada awal simulasi (*starting*), kemudian mencapai suplai bahan bakar yang konstan.

Kata Kunci: *Electronic Fuel Injection, Fuzzy Logic, air intake mass, nilai lamda, jumlah dan posisi injeksi*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Design And Analysis Of Fuel Control System In Semi-Free Piston Two Stroke Diesel Engine With Dual Opposed Piston

Name : Dimas Kurniawan
NRP : 4212 100 068
Department : Teknik Sistem Perkapalan
Supervisor : Ir. Aguk Zuhdi M F, M.Eng, Ph.D

ABSTRACT

The process of supplying fuel on a conventional engine is use to camshaft mechanism system with rotary motion. Semi-free piston diesel engine dual opposed piston that not having an output rotary motion, then a fuel oil system need to be designed by unutilized rotary motion. In this research, fuel oil control system is made with electronic fuel injection system with Solidwork 2015 and simulation control with simulink MATLAB R2010a. Electronic control system is planned with input signal mass air intake, lamda value and of position spraying at 15⁰ CA (equivalent as with 5 mm) Before Top Dead Center (BTDC). The result is a 3D drawing of fuel oil system furnished fuzzy logic control system. The result can be concluded that the position injection with electronic control is more accurate as well as be planned. Fuel oil consumption excess occur at the time of the beginning of the simulation (starting), then the supply of fuel is constant.

Keyword : *Electronic Fuel Injection, Fuzzy Logic, air intake mass, lamda value, position and the number of injeksi*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I	
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat	5
BAB II	
TINJAUAN PUSTAKA	7
BAB III	
METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1. Sketsa alur sistem bahan bakar	21
3.2. Pemilihan Komponen Sistem Bahan Bakar	22
3.3. Desain Sistem Bahan Bakar	23
3.4. Pemodelan Kontrol Suplai Bahan Bakar	23
3.5. Validasi Hasil Desain	25
3.6. Analisa Desain	26
3.7. Flowchart Penelitian	27

BAB IV	
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	29
4.1. Desain Sistem Bahan Bakar	29
4.2. Pemodelan Sistem Kontrol Bahan Bakar	41
4.2.1. Pembuatan Fuzzy Interface System	41
4.2.2. Desain Kontrol Bahan Bakar dan Simulasi.....	46
4.3. Analisa Karakteristik Sistem Kontrol Bahan Bakar dari Hasil Simulasi	55
4.3.1. Analisa Hasil Simulasi Sistem Kontrol Bahan Bakar..	55
4.3.2. Analisa Hasil Simulasi Pola Penyemprotan Bahan Bakar.....	60
BAB V	
PENUTUP.....	65
5.1. Kesimpulan	65
5.2. Saran.....	66
DAFTAR PUSTAKA	67
LAMPIRAN I	
Hasil Desain 3D-Drawing.....	69
LAMPIRAN II	
Hasil Prediksi Performa	73
LAMPIRAN III	
Penginjeksian Bahan Bakar.....	77
LAMPIRAN IV	
Detail Fuzzy Control	83
LAMPIRAN V	
Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar.....	87
BIOGRAFI PENULIS	97

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Single piston hydrolic free piston	8
Gambar 2.2 Dual free piston engine generator	8
Gambar 2.3 <i>Semi-free Piston Linear Diesel Engine</i> Tipe Dua Langkah Ber-piston Ganda Berlawanan Arah	9
Gambar 2.4 Sistem Bahan Bakar YMJET-FI	13
Gambar 2.5 Contoh penyajian dalam loika <i>fuzzy</i>	17
Gambar 2.6 Model "Black Box"	17
Gambar 2.7 Konsep Umum Pembangunan FIS	18
Gambar 3.1 Diagram Sistem Kontrol Bahan Bakar	22
Gambar 3.2 Diagram Logika <i>Fuzzy</i> Kontrol Bahan Bakar	24
Gambar 3.3 <i>Fuel flow rate control block diagram</i>	25
Gambar 3.4 <i>Flowchart</i> Penelitian	27
Gambar 4.1 Sketsa Sistem Bahan Bakar	32
Gambar 4.2 <i>Injector</i>	33
Gambar 4.3 Pompa Bahan Bakar	34
Gambar 4.4 <i>Fuel Flow Control</i>	35
Gambar 4.5 <i>Filter</i> Bahan Bakar	36
Gambar 4.6 Tangki Bahan Bakar	37
Gambar 4.7 <i>Intake Air Flow Rate Sensor</i>	38
Gambar 4.8 <i>O₂ Sensor</i>	39
Gambar 4.9 <i>Layout</i> Sistem Bahan Bakar	40
Gambar 4.10 Grafik Fungsi Keanggotaan Masukan <i>Mass Air Flow Rate</i>	43
Gambar 4.11 Grafik Fungsi Keanggotaan Masukan <i>Lamda</i>	43
Gambar 4.12 Grafik Kurva Fungsi Keanggotaan Keluaran Kontroler Jumlah Bahan Bakar yang Disemprotkan	44
Gambar 4.13 <i>Surface Rules Fuzzy Interface System</i> Kontrol Bahan Bakar	46
Gambar 4.14 Model <i>Sensor</i> Kecepatan	47
Gambar 4.15 Model <i>Sensor</i> Udara Masuk	48
Gambar 4.16 Model <i>Lamda Sensor</i>	49
Gambar 4.17 Model <i>Fuzzy Controller</i>	50

Gambar 4.18 Model <i>Combustion</i>	51
Gambar 4.19 Model Durasi <i>Pulse</i> Injeksi Bahan Bakar	51
Gambar 4.20 Block Diagram Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar	53
Gambar 4.21 Block Diagram Simulasi Pola Penyemprotan Bahan Bakar	54
Gambar 4.22 Grafik Tipe Penyemprotan Bahan Bakar Pada Kecepatan 1200 rpm	56
Gambar 4.23 Grafik Tipe Penyemprotan Bahan Bakar Pada Kecepatan 2400 rpm	56
Gambar 4.24 Grafik Tipe Penyemprotan Bahan Bakar Pada Kecepatan 3600 rpm	57
Gambar 4.25 Grafik Tipe Penyemprotan Bahan Bakar Pada Kecepatan 5400 rpm	57
Gambar 4.26 Grafik Tipe Penyemprotan Bahan Bakar pada Kecepatan <i>Trancient</i>	59
Gambar 4.27 Grafik Pola Penyemprotan Bahan Bakar pada 1200 rpm	61
Gambar 4.28 Grafik Pola Penyemprotan Bahan Bakar pada 2400 rpm	61
Gambar 4.29 Grafik Pola Penyemprotan Bahan Bakar pada 3600 rpm	62
Gambar Lampiran 1. 1 Hasil <i>3D-Drawing</i> Desain Sistem Bahan Bakar Tampak Atas	69
Gambar Lampiran 1. 2 Hasil <i>3D-Drawing</i> Desain Sistem Bahan Bakar Tampak Bawah	69
Gambar Lampiran 1.3 Hasil <i>3D-Drawing</i> Deain Sistem Bahan Bakar Tampak Depan	70
Gambar Lampiran 1.4 Hasil <i>3D-Drawing</i> Desain Sistem Bahan Bakar Tampak Belakang	70
Gambar Lampiran 1.5 Hasil <i>3D-Drawing</i> Desain Sistem Bahan Bakar Tampak Samping Kiri	71
Gambar Lampiran 1.6 Hasil <i>3D-Drawing</i> Desain Sistem Bahan Bakar Tampak Samping Kanan	71

Gambar Lampiran 2.1 Grafik Massa Udara yang Terjebak dalam <i>Cylinder</i>	73
Gambar Lampiran 2.2 Grafik Rata-rata Jumlah Bahan Bakar Setiap Siklus Pembakaran	73
Gambar Lampiran 2.3 Grafik Posisi Mulai Disemprotkan Bahan Bakar	74
Gambar Lampiran 2.4 Grafik Posisi Akhir Disemprotkan Bahan Bakar	74
Gambar Lampiran 2.5 Grafik Nilai Efektif <i>Lamda</i> Saat Mesin Beroperasi.....	75
Gambar Lampiran 2.6 Grafik Nilai Efektif <i>Fuel-Air Ratio</i> Saat Mesin Beroperasi.....	75
Gambar Lampiran 2.7 Grafik Tekanan <i>Injector</i> Saat Beroperasi	76
Gambar Lampiran 3.1 Grafik Perform Kerja <i>Injector</i>	77
Gambar Lampiran 5.1 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 300 rpm	87
Gambar Lampiran 5.2 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 600 rpm	87
Gambar Lampiran 5.3 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 900 rpm	88
Gambar Lampiran 5.4 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 1200 rpm	88
Gambar Lampiran 5.5 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 1600 rpm	89
Gambar Lampiran 5.6 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 1800 rpm	89
Gambar Lampiran 5.7 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 2100 rpm	90
Gambar Lampiran 5.8 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 2400 rpm	90
Gambar Lampiran 5.9 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 2700 rpm	91
Gambar Lampiran 5.10 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 3000 rpm	91

Gambar Lampiran 5.11 Grafik Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 3300 rpm.....	92
Gambar Lampiran 5. 12 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 3600 rpm.....	92
Gambar Lampiran 5.13 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 3900 rpm.....	93
Gambar Lampiran 5.14 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 4200 rpm.....	93
Gambar Lampiran 5.15 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 4300 rpm.....	94
Gambar Lampiran 5. 16 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 4500 rpm.....	94
Gambar Lampiran 5.17 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 4600 rpm.....	95
Gambar Lampiran 5.18 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 4800 rpm.....	95
Gambar Lampiran 5.19 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 5100 rpm.....	96
Gambar Lampiran 5.20 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 5400 rpm.....	96
Gambar Lampiran 3.1 Grafik Perform Kerja Injector.....	77

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Data Spesifikasi Mesin	30
Tabel 4.2 Data Spesifikasi <i>Injector</i>	30
Tabel 4.3 Spesifikasi Pompa Bahan Bakar	31
Tabel 4.4 Kuantisasi Masukan Kontroler	42
Tabel 4.5 Aturan Dasar <i>Fuzzy</i>	45
Tabel Lampiran 3.1 Hasil Perhitungan Durasi Injeksi	78
Tabel Lampiran 3.2 Hasil Simulasi Jumlah Bahan Bakar dan Pulse Injector pada Satu Secon	79
Tabel Lampiran 3.3 Variable Masukan Simulasi Pola Penyemprotan Bahan Bakar	80

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan mesin konvensional yang menghasilkan gerakan rotasi sudah banyak digunakan sebagai penggerak utama alat transportasi darat, laut, maupun udara, serta dimanfaatkan sebagai alat pendukung di industri. Saat ini mesin konvensional masih menjadi pilihan utama karena masih belum adanya mesin baru yang memiliki tingkat efisiensi yang lebih tinggi dalam berbagai hal. Khususnya pada mesin konvensional penyalaan kompresi (*diesel*) yang sudah mencapai efisiensi maksimal pada sekitar lima puluh hingga enam puluh persen saja. Hal tersebut menjadi dasar pemikiran utama untuk membuat desain-desain mesin yang baru, guna untuk mencapai efisiensi yang lebih tinggi.

Linear engine merupakan salah satu inovasi yang dapat menjadi *alternative* dalam mencapai tingkat efisiensi yang lebih tinggi. Pada jenis *linear engine* memanfaatkan gerakan *linear* sebagai gerakan keluaran dari mesin yang dapat dimanfaatkan sebagai penggerak. Dengan menghilangkan *crankshaft* sebagai konversi gerakan *linear* menjadi putaran serta sebagai pembatas gerakan *piston* diharapkan mampu menghasilkan efisiensi yang lebih baik karena sebegaiian *losses* energi mekanis sudah tidak ada, serta mudah dalam perawatannya karena komponen *linear engine* yang semakin ringkas.

Beberapa tahun terakhir ini, *linear engine* dikembangkan dalam beberapa jenis seperti *free piston linear engine* dengan satu/*single piston* dan *free piston linear engine* dengan dua/*dual piston*. Pada tipe *free piston linear engine dual piston* dikembangkan dengan posisi kedua *piston* yang saling berlawanan arah untuk membuat momen balik pada *piston* setelah langkah kerja atau sebagai pembatas gerakan *piston*.

Semi-free piston diesel engine tipe dua langkah ber-*piston* ganda berlawanan arah merupakan salah satu jenis dari *linear engine dual piston* yang dibuat pada tugas skripsi dari Andre Dwi Putra Barus dari Jurusan Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember tahun 2013. Namun pada penelitiannya lebih terfokus pada desain mesin dan analisa gesekan serta *moment angular* yang terjadi pada *piston*.

Sistem pendukung pada semi-free piston diesel engine tersebut masih belum direncanakan, seperti sistem *starting*, sistem bahan bakar, sistem perndingin, dan sistem pelumasan. Namun sistem pendukung tersebut sedikit berbeda dengan sistem yang ada pada mesin konvensional dengan prinsip dasar sistem yang sama. Pada penelitian ini lebih terfokus pada perencanaan dari bagian sistem pendukung *engine* yaitu pada sistem bahan bakar.

Pada umumnya sistem bahan bakar yang ada di mesin konvensional menggunakan perhitungan dari derajat putaran yang dihasilkan oleh mesin sebagai acuan pergerakan piston. Pada jenis *linear engine* yang tidak memiliki sumber energi putaran sebagai acuan pergerakan posisi *piston*, menjadi salah satu permasalahan dalam perencanaan sistem pembakaran. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada *opposed-piston two-stroke diesel engine*, pengaturan bahan bakar menggunakan metode *combustion duration* (Hofbauer, 2015).

Untuk mencapai tingkat akurasi suplai bahan bakar pada *semi-free piston diesel engine* tipe dua langkah ber-*piston* ganda berlawanan arah perlu adanya perencanaan sistem bahan lebih lanjut. Sehingga pada penelitian ini direncanakan sistem bahan bakar akurat berbasis elektronik pada jenis *semi-free piston diesel engine* tipe dua langkah ber-*piston* ganda berlawanan arah dengan metode simulasi.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disebutkan, sehingga penulis dapat merumuskan permasalahan sebagai berikut :

1. Bagaimana perancangan *3D-drawing* sistem bahan bakar dari *semi-free piston diesel engine* tipe dua langkah ber-*piston* ganda berlawanan arah?
2. Bagaimana perancangan sistem kontrol elektronik pada sistem bahan bakar *semi-free piston diesel engine* tipe dua langkah ber-*piston* ganda berlawanan arah?
3. Bagaimana karakteristik sistem kontrol elektronik pada sistem bahan bakar *semi-free piston diesel engine* tipe dua langkah ber-*piston* ganda berlawanan arah?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Membuat desain *3D-drawing* sistem bahan bakar pada *semi-free piston linear diesel engine dual piston*.
2. Membuat perencanaan kerangka sistem kontrol elektronik untuk sistem pembakaran pada *semi-free piston linear diesel engine dual piston*.
3. Menganalisa karakteristik sistem kontrol elektronik pada sistem bahan bakar *semi-free piston linear diesel engine dual piston*.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Desain yang dibuat pada penelitian ini hanya pada sistem bahan bakar *semi-free piston linear diesel engine dual piston*.
2. Menentukan variasi penginjeksian bahan bakar pada *semi-free piston linear diesel engine dual piston*.
3. Hanya terfokus pada desain pemodelan kontrol elektronik sesuai dengan hasil perencanaan sistem pembakaran pada *semi-free piston linear diesel engine dual piston*.
4. Menganalisa karakteristik sistem kontrol bahan bakar *semi-free piston linear diesel engine dual piston*.

1.5 Manfaat

Manfaat yang diperoleh pada penelitian ini adalah desain sistem kontrol bahan bakar yang akurat. Sehingga dapat meningkatkan pembakaran yang akan terjadi semakin optimal dan kerja mesin yang lebih baik.

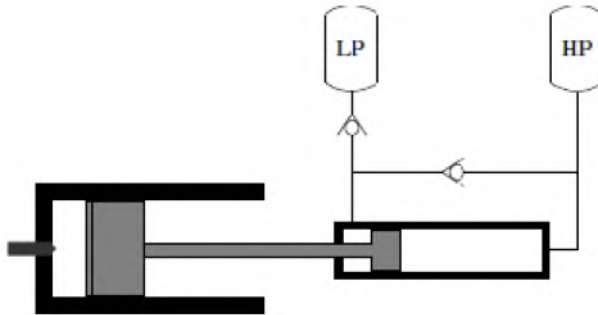
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Teknologi mesin konvensional yang semakin modern dengan tujuan untuk mencapai efisiensi yang paling tinggi sehingga muncul berbagai jenis *engine*. Efisiensi tertinggi yang masih belum bisa tercapai menyebabkan perlunya terus berinovasi untuk memperbaiki kekurangan-kekurangan yang masih mungkin untuk kondisi yang lebih baik. Salah satu bentuk inovasi yang telah dibuat adalah jenis *linear engine*. *Linear engine* merupakan salah satu penelitian yang dianggap dapat menutupi beberapa kekurangan dari jenis mesin konvensional yang lain. Penelitian terhadap *linear engine* ini telah banyak dilakukan. *Linear engine* dapat meningkatkan efisiensi mesin dan juga menghasilkan gesekan yang lebih rendah dibandingkan mesin konvensional lainnya. (Mikalsen & Roskilly, 2007)

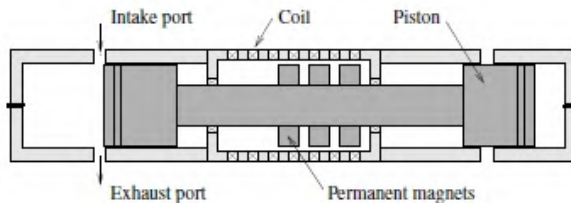
Perkembangan *linear engine* memunculkan beberapa tipe *linear engine* yang diteliti, yaitu dari tipe *spark ignition engine* dan *compression ignition engine*. Sampai saat ini *linear engine* masih dikembangkan pada *free piston linear engine* dan *dual piston linear engine*. *Free piston linear engine* adalah yang pertama kali digunakan oleh Raul Pateras Pescara pada tahun 1928. Pada *linear engine* tidak memiliki poros engkol, sehingga tidak punya batasan gerakan yang dilakukan oleh *piston*. Sehingga muncul beberapa pembatas gerakan piston dengan menggunakan berbagai jenis seperti *spring*, *pneumatic* serta *hydraulic*. (Mikalsen & Roskilly, 2007)



Gambar 2.1 Single piston hydraulic free piston

Sumber : Mikalsen & Roskilly, 2007

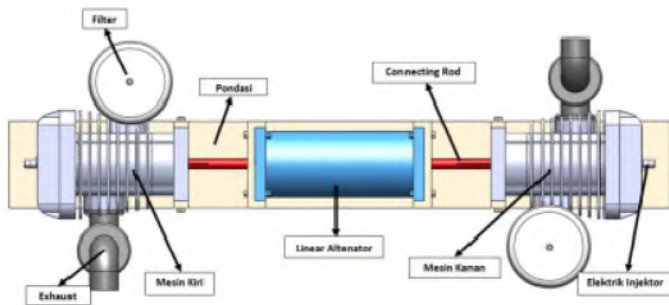
Seiring berjalannya waktu hingga dikembangkan pada jenis *dual piston* dengan posisi *piston* yang berlawanan arah. Posisi *piston* berlawanan yang dirancang bertujuan untuk mendapatkan momen balik pada gerakan *piston*. Hal tersebut membuat engine berpiston bebas mempunyai perbedaan karakteristik pada (2.1) variasi panjang langkah dan (2.2) kebutuhan pengontrol aktif dari gerakan piston. Keuntungan lainnya dari engine berpiston bebas adalah pengurangan potensi kerugian akibat gesekan (Mikalsen & Roskilly, 2007).



Gambar 2.2 Dual free piston engine generator

Sumber : Mikalsen & Roskilly, 2007

Semi-free piston diesel engine adalah salah satu tipe *dual piston linear engine* yang termasuk dalam kelompok *linear diesel engine* tipe dua langkah. *Linear diesel engine* merupakan bagian dari mesin pembakaran dalam dengan tipe pembakaran penyalaan kompresi. *Semi-free piston linear diesel engine* tipe dua langkah ber-piston ganda berlawanan arah merupakan hasil pengembangan desain dari *opposed-piston linear diesel engine* dan *dual free piston linear diesel engine* (Fathallah & Barus, 2015).



Gambar 2.3 *Semi-free Piston Linear Diesel Engine* Tipe Dua Langkah Ber-piston Ganda Berlawanan Arah

Sumber : Fathallah & Barus, 2015

Desain *Semi-free piston linear diesel engine* tipe dua langkah ber-piston ganda berlawanan arah dibuat untuk mengurangi gesekan dan *moment angular* yang terjadi pada *piston* yang sedang bergerak pada *cylinder liner*. Dengan metode penambahan pasak yang diletakkan pada ujung batang torak yang terhubung dengan kepala torak. Pasak yang dipasang pada batang torak dapat mengurangi *moment angular* yang terjadi pada torak yang sedang bergerak *linear*. Desain *semi-free piston* ini mengadopsi bentuk desain *shaft propeller* dengan *propeller* yakni

menggunakan sejenis *keyway*/pasak. Namun pada penelitian tersebut hanya mendesain model, tanpa memperhatikan hasil performance dari model yang didesain. (Barus, 2013)

Sistem bahan bakar injeksi merupakan sebuah sistem penyemprotan bahan bakar yang dalam kerjanya dikontrol secara elektronik agar didapatkan nilai campuran udara dan bahan bakar yang selalu sesuai dengan kebutuhan motor bakar, maka proses pembakaran yang terjadi diruang bakar akan terjadi secara sempurna sehingga didapatkan daya motor yang optimal serta didapatkan gas buang yang ramah lingkungan (Ruswid, 2008).

Dual free piston linear engine dengan posisi *piston* yang berlawanan memiliki kontrol gerak *piston*, khususnya panjang *stroke* dan rasio kompresi telah terbukti sulit. Hal ini karena dengan fakta bahwa proses pembakaran di satu silinder mengatur proses kompresi yang lain, variasi kecil dalam pembakaran akan memiliki pengaruh yang besar terhadap proses kompresi berikutnya. Percobaan yang dilakukan oleh Mikalsen R. dan Roskilly A. P. tahun 2010 pada kerja *dual piston linear engine* menunjukkan bahwa untuk beban *engine* memiliki tingkat sensitivitas yang tinggi dan tingkat *cycle-to-cycle* yang tinggi (Xiaoqin, 2011).

Misfiring adalah kondisi dimana mesin gagal dalam melakukan pembakaran yang sempurna atau mesin pada kondisi tidak dapat mencapai energi maksimal pada suatu proses pembakaran. Hal tersebut dapat menunjukkan salah satu masalah di *free piston linear engine*, karena pada saat *misfiring* tidak memiliki energi penyimpanan yang mampu mendorong engine untuk beberapa putaran *flywheel* pada mesin konvensional. Oleh karena itu jika mesin tidak dapat membuat kompresi yang cukup atau jika terjadi kegagalan oleh faktor lain yang mempengaruhi

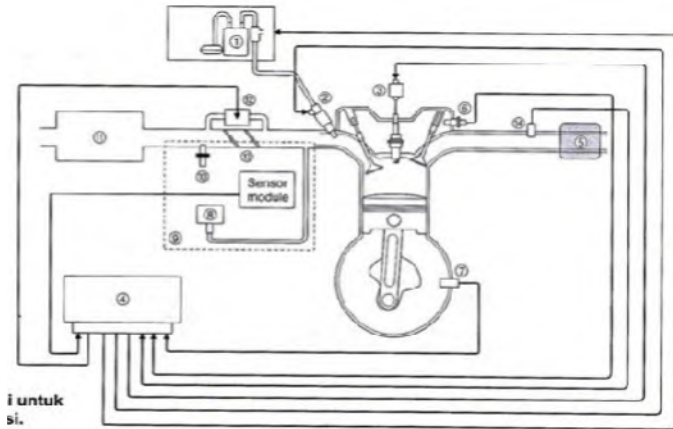
injeksi/pengapian dan pembakaran, mesin dapat mati. Hal ini juga akan terjadi jika terjadi *mistiming* pada penginjeksian bahan bakar atau *mistiming* pada pengapian (Mikalsen & Roskilly, 2007).

Pengurangan mekanisme *crankshaft* menyebabkan tidak dapat dilakukannya kontrol pada sinyal *crankshaft* untuk menjadi referensi *timing*. Strategi yang dilakukan pada linear engine dapat hanya dengan mengikuti prinsip mesin konvensional. Berdasarkan kecepatan rotasi dan posisi *crankshaft* pada mesin konvensional, posisi dan frekuensi gerakan piston sebagai referensi kontrol operasi pada linear engine. secara matematis pergerakan piston pada mesin konvensional dapat diterjemahkan dengan derajat *crankshaft*. Satu langkah piston pada linear engine sama dengan setengah putaran pada mesin konvensional yaitu 180 derajat sudut *crankshaft*. Sehingga jika menggunakan pulsa sinyal diartikan setiap satu pulsa sinyal dihasilkan selama satu sudut *crankshaft* (Xiaoqin, 2011).

Berdasarkan mekanisme kerja pada linear engine, sistem kontrol bahan bakar tidak dapat dikendalikan dengan sistem kendali penyalan CDI (*Condenser Diode Ignite*) dan *carburetor*. Sehingga perlu adanya pengaturan *langkah piston* dan *rasio kompresi* yang akurat untuk mencapai sistem yang terkendali secara handal. Selain itu penggunaan sistem kontrol elektronik sebagai pengatur penginjeksian bahan bakar berdasarkan durasi pembakaran pada setiap kondisi putaran. *Electronic controlled digital ignition* yang harus diintegrasikan dalam sistem *linear engine* telah dilakukan dengan menggunakan *sensor* pada gerakan *linear* (Xiaoqin, 2011).

Dari mekanisme dasar kerja mesin dapat dibuat sebuah kontrol yang berbasis elektronik. Sistem pengaturan ini bertujuan untuk membuat sistem pengaturan berupa logika kontrol, penyesuaian karakteristik operasional mesin pada berbagai beban, dan secara dinamis mengoptimalkan pengoperasian mesin menurut beberapa kriteria efisiensi panas termasuk hambatan pada emisi dan beban termal. Selain itu sinkronisasi gerakan piston diperlukan untuk menjaga getaran berada pada tingkat yang nyaman (Johansen, 2001).

Salah satu teknologi sistem bahan bakar injeksi dengan kontrol elektronik dibuat oleh Yamaha dengan teknologi penginjeksian yang diberi nama YMJET-FI. Sistem YMJET-FI bekerja dengan cara menyuplai bahan bakar untuk proses pembakaran pada mesin dengan menyesuaikan kondisi kerja mesin. Dari komponen sistem *fuel pump* menyuplai bahan bakar ke *injector* melalui *fuel filter* dan *pressure regulator* yang berfungsi untuk menjaga tekanan yang masuk ke *injector* tetap konstan. Durasi injeksi dan *timing* injeksi semuanya dikontrol oleh ECU (*Engine Control Unit*), berdasarkan masukan dari sinyal-sinyal yang diperoleh dari *throttle position sensor*, *crankshaft position sensor*, *intake air pressure sensor*, *intake air temperature sensor*, O_2 *sensor* dan *engine temperature sensor* yang memungkinkan ECU menentukan durasi (lamanya) injeksi dan *timing* injeksi. (Service Manual Yamaha MIO J, 2012:1-4)



Gambar 2.4 Sistem Bahan Bakar YMJET-FI

Sumber : *Service Manual Yamaha MIO J*, 2012:1-4

Pada kontrol bahan bakar linear engine sama dengan kontrol pada mesin konvensional. Proses pemberian bahan bakar dari ECU (*Engine Control Unit*) ke *injector* yang didasarkan pada sinyal-sinyal dari *sensor-sensor*, antara lain *sensor* suhu udara masuk (*Intake Air Temperature Sensor*), *sensor* tekanan udara masuk (*Intake Air Pressure Sensor*), *sensor* posisi katup gas (*Throttle Position Sensor*), *sensor* posisi poros engkol (*Crankshaft Position Sensor*), *sensor* suhu mesin (*Engine Temperature Sensor*), dan *sensor* O₂ (*O₂Sensor*) (Saifuddin, 2013).

Sensor suhu udara masuk (*Intake Air Temperature Sensor*) berfungsi untuk memberikan sinyal ke ECU berupa informasi (deteksi) tentang suhu udara yang masuk ke intake *manifold*. Tegangan referensi/suplai dari ECU selanjutnya akan berubah menjadi tegangan sinyal yang nilainya dipengaruhi oleh suhu udara masuk (Hidayatullah & Salamulloh, 2012).

Sensor tekanan udara masuk (*Intake Air Pressure Sensor*) memiliki saluran udara yang terhubung ke *intake manifold* dan terletak setelah katup gas. *Sensor* tekanan udara masuk merupakan *sensor* yang berfungsi untuk mendeteksi beban mesin melalui tekanan udara yang masuk ke *intake manifold* dan memberikan sinyal hasil deteksi ke ECU berupa referensi tegangan yang selanjutnya digunakan ECU untuk menentukan durasi penginjeksian bahan bakar atau banyaknya bahan bakar yang di injeksikan. (Saifuddin, 2013)

Crankshaft Position Sensor digunakan sebagai sensor utama untuk mendeteksi putaran mesin, output signal dari *Crankshaft Position Sensor* dikirim ke ECU untuk menentukan *injection timing* dan besarnya *basic injection volume*. Sensor ini bekerja atas deteksi tonjolan atau perbedaan permukaan. *Sensor* suhu mesin berfungsi untuk mendeteksi suhu mesin dan memberikan input sinyal deteksi ke ECU berupa referensi tegangan yang berbeda-beda berdasarkan suhu mesin yang terdeteksi yang akan digunakan ECU untuk menentukan banyaknya bahan bakar yang di injeksikan. (Saifuddin, 2013)

Sensor O₂ dipasang di *exhaust manifold* yang berfungsi untuk mendeteksi konsentrasi oksigen pada gas buang kendaraan, menghitung perbandingan udara dan bensin, dan menginformasikan hasilnya pada ECU (PT. Indomobil Suzuki International, 2004). *Sensor* O₂ juga bisa disebut dengan lamda sensor, karena dari percampuran udara dan bahan bakar dapat diketahui perbandingan rasio udara bahan bakar yang actual dengan stokiometri yang disebut dengan nilai lamda.

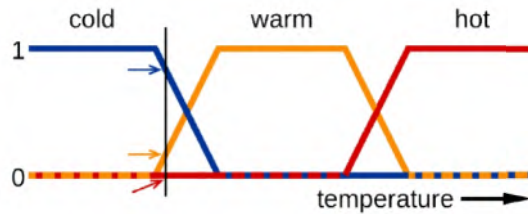
Nilai lamda dari suatu pembakaran yang terjadi kisaran antara 0 – 1,5. Nilai lamda (λ) = 1, berarti massa udara dan bahan bakar yang dicampurkan sudah sesuai dengan teori. Jika nilai lamda (λ) < 1, berarti massa udara yang dicampurkan dengan bahan bakar lebih sedikit dibanding kondisi stokiometri atau disebut dengan campuran kaya. Jika nilai lamda (λ) > 1, berarti massa udara yang dicampurkan dengan bahan bakar lebih banyak dibanding kondisi stokiometrin atau disebut dengan campuran miskin. Jika nilai lamda (λ) > 1,5, berarti campuran udara dan bahan bakar tidak dapat dibakar dengan sempurna atau mesin akan tersendat-sendat. (Puthut, 2012)

Johansen, Olav, dkk. (2001) telah melakukan penelitian pada sistem kontrol bahan bakar pada *free piston diesel engine* dengan *metode eksperimen* secara mekanisme dasar sistem. Pada penelitian tersebut menggunakan prinsip kerja *electronic crankshaft*. Mekanisme kerja *crankshaft* pada mesin konvensional diubah menjadi *electronic control system* pada gerak *piston*. Dan pada eksperimen tersebut menggunakan *diesel engine* tipe dua langkah, sehingga untuk mekanisme kerja *cam-* digantikan dengan *electronic timing system*. *Electronic timing system* dapat digunakan untuk mengontrol buka-tutup katup karena pada sistem katup menggunakan sistem hidrolis. Sistem kontrol dibuat dalam bentuk *block diagram* yang mendeteksi logaritma dari jalannya sistem kontrol tersebut berdasarkan deteksi gerak piston. dan kemudian semua alur logika yang telah dihitung dapat dibuat sistem kontrol elektronik.

Saat ini teknologi kontrol berbasis elektronik (*sensor, actuator, dan computer technology*) bukan *factor* yang terbatas dan masih menyediakan pengolahan yang diperlukan untuk memproses kapasitas dan resolusi untuk membuat fungsi sistem kontrol *modern high speed free piston diesel engine* yang memiliki kehandalan sistem kontrol yang tinggi pada desain yang telah dibuat (Johansen, 2001).

Untuk mengetahui karakteristik sistem kontrol bahan bakar elektronik dapat menggunakan beberapa perangkat lunak (*software*), salah satunya adalah *MATLAB*. *MATLAB* merupakan sebuah lingkungan komputasi numerical dan bahasa pemrograman computer generasi keempat yang dikembangkan oleh *The Mathwork*. *MATLAB* memungkinkan manipulasi matriks, *plot-an* fungsi dan data, implementasi algoritma, pembuatan antarmuka pengguna, dan pengantarmukaan dengan bahasa program lainnya. (Richard, 2004)

Dalam pemodelan sistem kontrol secara umum terdapat beberapa tipe kontrol yang dapat dipakai, salah satunya adalah menggunakan metode *fuzzy logic*. Logika *fuzzy* adalah peningkatan dari logika Boolean yang berhadapan dengan konsep kebenaran sebagian. Saat logika klasik menyatakan bahwa segala hal dapat diekspresikan dalam istilah *biner* (0 atau 1, hitam atau putih, ya atau tidak), logika *fuzzy* menggantikan kebenaran Boolean dengan tingkat kebenaran seperti ditunjukkan pada gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 Contoh penyajian dalam loika *fuzzy*

Sumber : Fullofstars, 2007

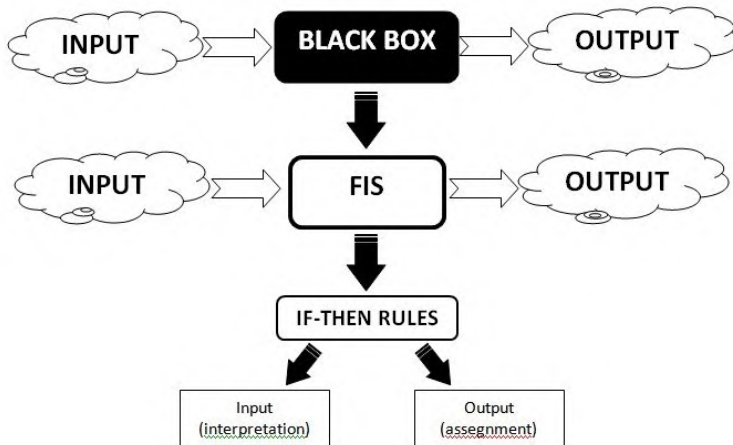
Secara definisi kata logika *fuzzy* adalah sebuah metodologi “berhitung” dengan variable kata-kata (*linguistic variable*), sebagai pengganti berhitung dengan bilangan. Dengan kata-kata sistem *fuzzy* dapat menjadi pendekatan yang lebih akurat dengan penalaran otak manusia dan *naturalness* pendekatannya dalam memecahkan masalah. (Naba, 2009) Untuk mengilustrasikan sistem *fuzzy* secara sederhana dapat menggunakan diagram *black box* seperti pada gambar 6 dibawah ini. Dimana diantara *input* dan *output* diberi *black box* yang bertugas untuk melakukan sistem pemetaan.



Gambar 2.6 Model "Black Box

Sumber : Naba, 2009

Sehingga tujuan utama teori fuzzy logic adalah memetakan ruang input ke dalam ruang output dengan menggunakan IF-THEN rules. Pemetaan dilakukan dalam suatu *Fuzzy Inference System* (FIS). Didalam FIS terdapat kumpulan beberapa IF-THEN *rules* yang menginterpretasikan *vector input* dan kemudian dapat ditarik kesimpulan untuk menghasilkan *vector output*. Proses rancang bangun sebuah FIS dapat diilustrasikan pada gambar 7 dibawah ini. (Naba, 2009)



Gambar 2.7 Konsep Umum Pembangunan FIS

Sumber : Naba, 2009

Aplikasi logika *fuzzy* dapat diterapkan untuk mengatur proses kontrol suatu sistem. Salah satunya pada pengaturan injeksi bahan bakar pada mesin konvensional. Jumlah bahan bakar yang disemprotkan oleh *injector* tergantung pada durasi *injector* tersebut diaktifkan. Ketika *injector* diaktifkan, *solenoid* yang ada di dalam *injector* akan menarik katup *injector (nozzle)*, sehingga bahan bakar bertekanan akan mengalir melalui celah sempit pada ujung *injector*.

Pada sistem kontrol *fuzzy* terdapat tahapan yang disebut dengan defuzzifikasi. Tahap defuzzifikasi merupakan tahap untuk memvalidasi hasil desain kontrol *fuzzy*. Fungsi keanggotaan yang telah ditentukan bersama aturan dasar *fuzzy* sebagai kontrol sistem dapat dijalankan dengan baik sesuai desain pada tahap defuzzifikasi. Jika pada saat tahap defuzzifikasi sistem tidak berjalan sesuai dengan desain yang direncanakan, maka dapat dipastikan terjadi kesalahan dalam perencanaan fungsi keanggotaan dan aturan dasar *fuzzy*. (Naba,2009)

Injector mampu bekerja sebagai penyemprot bahan bakar karena didalamnya terdapat *solenoid* yang memiliki *armature* yang dapat bergerak naik turun jika ada tegangan yang diberikan. Gerakan *armature* ini mengakibatkan katup jarum dari injektor *needle valve* membuka dan menutup, sehingga jika ada bahan bakar bertekanan didalamnya bisa tersemprotkan. Dalam hal ini pengaturan campuran udara dan bahan bakar juga termasuk dalam kontrol dari *electronic control unit*. (Tri & Rusdhianto, 2012)

BAB III

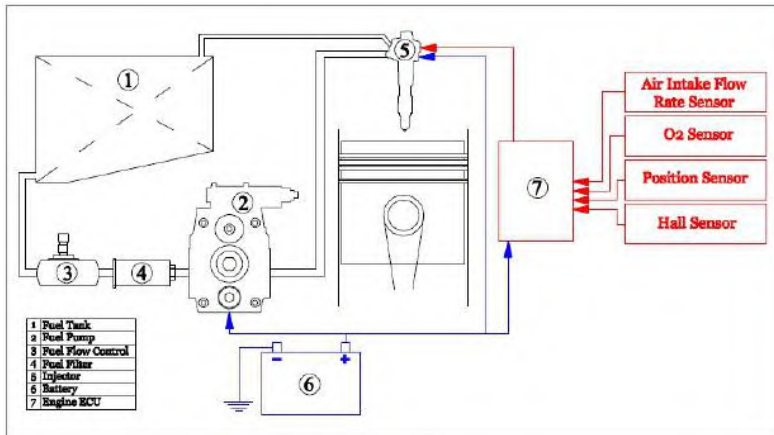
METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian menggunakan metode desain/ pemodelan, simulasi *software*, dan analisa desain. Secara khusus penelitian ini terfokus pada dua bagian yaitu desain sistem bahan bakar dan desain sistem pengendali atau kontrol pembakaran yang berbasis elektronik. Pada desain sistem dan desain sistem pengendali serta simulasinya menggunakan perangkat lunak *Simulink MATLAB R2010a* dari *The Mathwork*. Dalam bagian metodologi penelitian ini menjelaskan beberapa tahap yang tempuh pada penelitian sesuai dengan ruang lingkup dan batasan masalah yang telah disebutkan. Penjelasan secara detail dari tahapan metodologi pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Skesa alur sistem bahan bakar
2. Pemilihan komponen pada sistem bahan bakar
3. Desain sistem bahan bakar
4. Pemodelan kontrol suplai bahan bakar
5. Validasi hasil desain
6. Analisa desain

3.1. Sketsa alur sistem bahan bakar

Untuk mengetahui alur distribusi bahan bakar secara jelas, terlebih dahulu dibuat sketsa desain dari sistem bahan bakar *semi-free piston linear diesel engine dual piston* ini. Sketsa desain yang akan dibuat berupa gambar dua dimensi sistem bahan bakar secara keseluruhan, namun lebih terfokus pada desain sistem bahan bakar.



Gambar 3.1 Diagram Sistem Kontrol Bahan Bakar

3.2. Pemilihan Komponen Sistem Bahan Bakar

Tahap ini dilakukan pemilihan komponen sistem bahan bakar yaitu *injector* dan pompa bahan bakar. Komponen bahan bakar yang akan dipilih diprioritaskan menggunakan peralatan *electronic*. Sehingga *injector* dan pompa nantinya yang akan dipilih berupa *electric injector* dan *electric fuel pump*. Pemilihan pompa dan *injector* berdasarkan pada data hasil penelitian tentang *performance characteristic* dari *semi-free piston linear diesel engine* yang telah dilakukan. Data yang diambil adalah tentang banyaknya bahan bakar (*flow rate*) yang dimasukkan kedalam ruang bakar serta hasil tekanan ruang bakar pada saat pembakaran sesuai dengan desain. Sehingga dapat dipilih *injector* dan pompa bahan bakar dari kedua data tersebut.

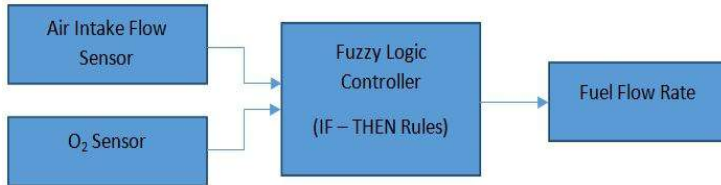
3.3. Desain Sistem Bahan Bakar

Desain sistem pada tahap ini adalah perencanaan sistem bahan bakar dalam bentuk gambar tiga dimensi yang meliputi seluruh komponen sistem bahan bakar. Beberapa komponen sistem bahan bakar yang dibuat gambar tiga dimensi adalah *fuel injector*, pompa bahan bakar, tangki bahan bakar, *sensor* jumlah udara masuk (*Air Intake Flow Rate Sensor*), *sensor* kandungan O_2 pada lubang *exhaust* dan jalur fluida minyak atau pipa bahan bakar. Desain gambar tiga dimensi dibuat dengan menggunakan perangkat lunak (*software*) *Solidwork* 2015 sesuai dengan yang digunakan pada desain sebelumnya. Sehingga gambar komponen tiga dimensi dari sistem bahan bakar dapat disatukan (*assembly*) dengan desain gambar tiga dimensi *semi-free piston linear diesel engine* yang telah ada pada penelitian sebelumnya. Dan tahap ini didapat desain *semi-free piston linear diesel engine* yang lengkap dengan sistem bahan bakarnya dalam bentuk gambar tiga dimensi sebagai tahap perencanaan awal.

3.4. Pemodelan Kontrol Suplai Bahan Bakar

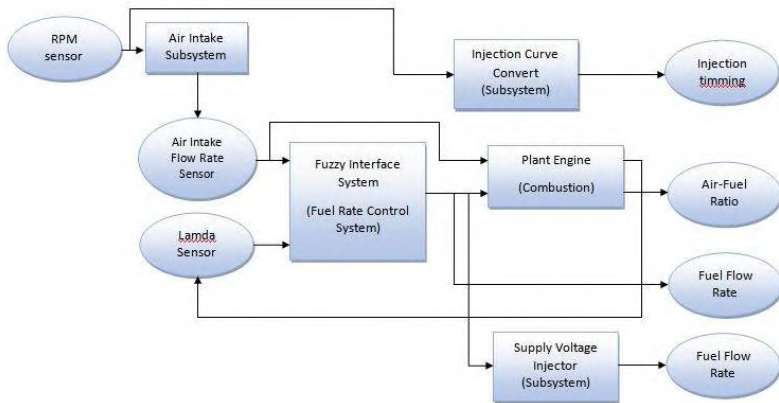
Pemodelan sistem kontrol bahan bakar pada penelitian ini menggunakan perangkat lunak (*software*) kontrol dari *The Mathwork* yaitu *MATLAB Simulink R2010a*. Untuk metode kontrol yang dipakai adalah *fuzzy logic* yang memiliki *multi-input* dan *multi-output*. *Input data* yang dipakai adalah hasil dari penelitian tentang prediksi *performancesemi-free piston diesel engine* yang telah dilakukan pada penelitian lainnya. *Input* yang dipakai adalah jumlah udara yang masuk dari *intake port*, posisi *piston*, dan lamda. Dengan data *air-fuel rasio*, derajat penginjeksian, dan jumlah bahan bakar yang diinjeksikan ke

ruang bakar adalah sebagai acuan untuk membuat proses *fuzzy logic*. Sehingga didapat *output* berupa jumlah bahan bakar yang akan keluar dari *injector* pada setiap kecepatan mesin. Dan berikut adalah digram blok pemodelan sistem kontrol bahan bakar menggunakan metode logika *fuzzy*



Gambar 3.2 Diagram Logika *Fuzzy* Kontrol Bahan Bakar

Dari *diagram block* diatas dibuat dalam bentuk *Fuzzy Interface System (FIS)* yang terdapat pada *MATLAB*. Dari kotak FIS tersebut dibuat sistem kontrol berupa simulasi menggunakan *Simulink MATLAB 2010a* dengan berbagai *input* dan *output* sistem yang direncanakan.



Gambar 3.3 Fuel flow rate control block diagram

3.5. Validasi Hasil Desain

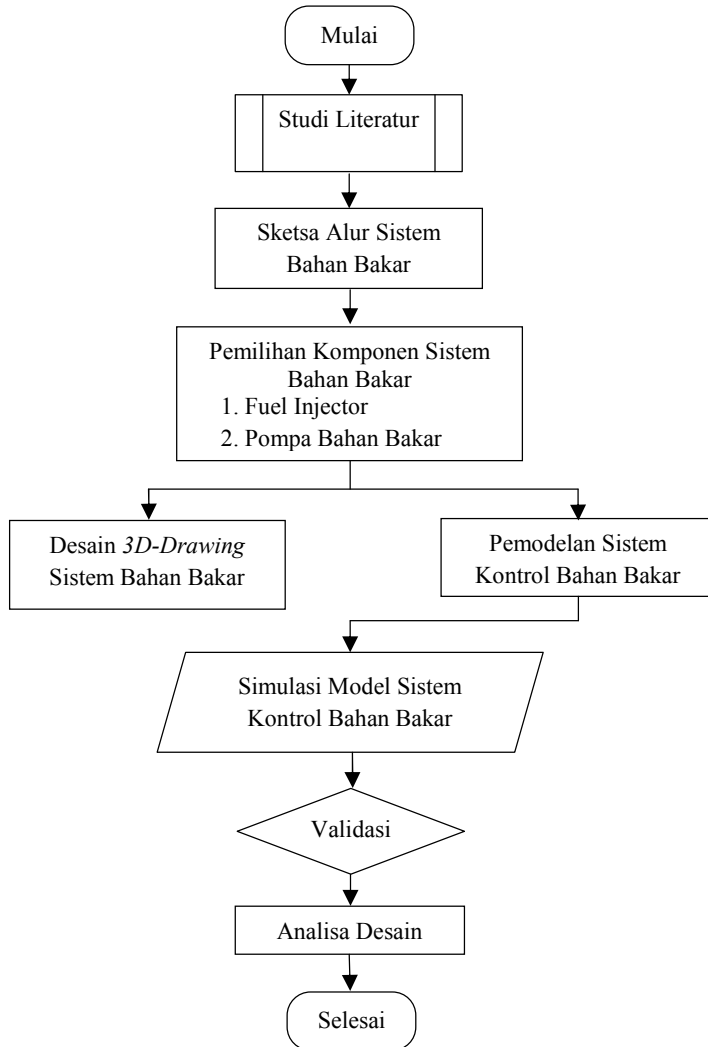
Validasi hasil desain yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan metode simulasi yang menggunakan *MATLAB Simulink R2010a*. Dari desain sistem suplai bahan bakar dijalankan untuk mengetahui adanya kesalahan desain atau kesalahan input data sehingga didapatkan desain yang dapat dijalankan dengan baik dan diperoleh data berupa grafik yang diinginkan. Dimana grafik yang seharusnya terjadi sesuai dengan *input* dari penelitian sebelumnya yaitu prediksi performa pada *semi-free piston linear diesel engine dual piston*. Jika *trendline* grafik yang dihasilkan sudah mendekati sama dengan hasil dari prediksi performa maka langkah selanjutnya untuk analisa data dapat dilakuakn.

3.6. Analisa Desain

Analisa yang dilakukan adalah dari data grafik yang didapat dari hasil simulasi desain sistem suplai bahan bakar. Grafik *injection timmig*, jumlah bahan bakar, dan suplai tegangan ke *injector* yang dihasilkan dari simulasi menggunakan *Simulink MATLAB 2010a* pada setiap kecepatan mesin dianalisa sehingga didapat karakteristik sistem kontrol bahan bakar berupa jumlah bahan bakar pada setiap kecepatan, tipe penyemprotan bahan bakar menggunakan *electric injector*, dan tipe penyemprotan yang terjadi pada *semi-free piston diesel engine* tipe dua langkah ber-*piston* ganda berlawanan arah.

3.7. Flowchart Penelitian

Diagram alur penelitian ditunjukkan seperti pada Gambar 3.4 dibawah ini:



Gambar 3.4 Flowchart Penelitian

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas tentang data hasil penelitian beserta analisisnya yang dimulai dari desain sistem bahan bakar menggunakan gambar tiga dimensi, desain dan pemodelan sistem kontrol bahan bakar menggunakan MATLAB R2010a *Simulink* hingga analisa data yang didapat dari hasil simulasi. Pemodelan yang dibuat berdasarkan desain pembakaran yang telah dirancang pada penelitian lainnya tentang prediksi performa berbasis simulasi yang dilakukan Ian Bimantara dari Jurusan Teknik Sistem Perkapalan FTK – ITS Surabaya.

4.1. Desain Sistem Bahan Bakar

Desain sistem bahan bakar dibuat dengan perangkat lunak untuk menggambar tiga dimensi yaitu *Solidwork* 2015. Sebelum melakukan desain gambar tiga dimensi terlebih dahulu menentukan pompa dan injector sesuai dengan kebutuhan yang direncanakan. *Injector* dipilih berdasarkan data hasil prediksi performa yang telah dibuat pada penelitian lainnya (oleh Ian Bimantara dari Jurusan Teknik Sistem Perkapalan FTK – ITS Surabaya). Berikut adalah data *injector* yang dipilih sesuai dengan desain yang direncanakan

Tabel 4.1 Data Spesifikasi Mesin

Spesifikasi Mesin	
Model	Semi-Free Piston
Jenis	Diesel Engine
Tipe	Dua Langkah
Jumlah Cylinder	2
Bore (mm)	53
Stroke (mm)	60
Displacement (cc)	284
Daya Nominal (kW)	8,12
Torsi Nominal (Nm)	15,38
Kecepatan Nominal (rpm)	4300
SFOC (g/kW-h)	201.8
Rasio kompresi	1 : 21

Tabel 4.2 Data Spesifikasi *Injector*

Spesifikasi Data Injector	
Tipe	Electric Injector
Tekanan Max.	1000 bar
Jumlah <i>Hole</i>	4
Dimensi :	
- Panjang	82,31 mm
- Diameter	12,76 mm

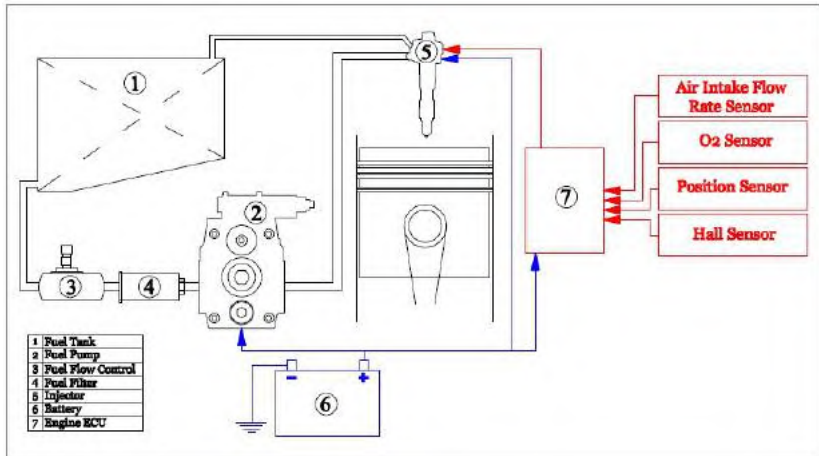
Pada tipe *direct injection electric injector* menggunakan input variasi tegangan untuk dapat menyemprotkan bahan bakar sesuai dengan jumlah yang diinginkan. Semakin banyak bahan bakar yang disemprotkan maka pemberian tegangan pada *injector* semakin lama, durasi ini yang selanjutnya disebut dengan durasi penginjeksian.

Berdasarkan data *injector* yang dipilih, maka dapat memilih pompa bahan bakar yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan injeksi bahan bakar ke ruang bakar. Sehingga pompa bahan bakar yang dibutuhkan dapat dipilih dengan data sebagai berikut :

Tabel 4.3 Spesifikasi Pompa Bahan Bakar

Spesifikasi Data Pompa	
Tipe	Electric Bosch Pump
Tekanan Maksimum	1000 Bar
Putaran	3000 rpm
Kapasitas	0,6 cm ³ / rev
Suplai Tegangan	10,5 – 16 V
Dimensi :	
Panjang	43,44 mm
Lebar	54,47 mm
Tinggi	49,9 mm

Dari data pompa dan *injector* yang sudah dipilih dapat dilakukan pembuatan gambar sistem dengan tiga dimensi, namun terlebih dahulu dibuat perancangan dasar sistem bahan bakar dengan gambar dua dimensi seperti pada gambar 4.1 dibawah ini :



Gambar 4.1 Sketsa Sistem Bahan Bakar

Untuk membuat *layout* sistem bahan bakar pada *semi-free piston linear diesel engine* dalam gambar tiga dimensi dibuat part-part dari sketsa gambar sistem diatas, berikut beberapa part yang dibuat pada gambar tiga dimensi menggunakan *Solidwork 2015* :

1. *Fuel Injector*

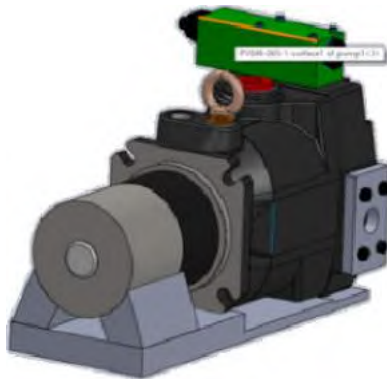
Pembuatan komponen *injector* hanya dengan penyatuan atau *assembly* menggunakan *Solidwork* 2015. *Part-part injector* sudah didapat dari referensi. Gamaba tiga dimensi dari *injector* disesuaikan dengan spesifikasi data yang telah disebut pada Tabel 4.2. Berikut adalah gambar *injector* hasil dari *assembly* menggunakan *Solidwork* 2015 :



Gambar 4.2 *Injector*

2. Pompa Bahan Bakar (*Injection Pump*)

Untuk pembuatan gambar tiga dimensi pompa bahan bakar sama halnya dengan pembuatan *injector* dalam gambar tiga dimensi. gambar tiga dimensi pompa bahan bakar disesuaikan dengan data spesifikasi yang telah disebutkan pada Tabel 4.3 Berikut adalah hasil gambar hasil *assembly* menggunakan *Solidwork 2015* :



Gambar 4.3 Pompa Bahan Bakar

3. *Flow Control*

Flow control digunakan untuk mengatur bukaan suplai bahan bakar dari tangki ke *suction* pompa. Berikut gambar 4.4 merupakan desain *3D-drawing flow control* yang direncanakan :



Gambar 4.4 *Fuel Flow Control*

4. *Filter*

Filter digunakan untuk menyaring bahan bakar yang memungkinkan terjadi kontaminasi kotoran pada saat bahan bakar berada di tangki bahan bakar. Berikut gambar 4.5 merupakan desain 3D-drawing dari *filter* yang direncanakan :



Gambar 4.5 *Filter* Bahan Bakar

5. Tangki Bahan Bakar

Tangki bahan bakar digunakan untuk menyimpan bahan bakar yang akan disuplai untuk injeksi ke ruang bakar. Perencanaan tangki bahan bakar memiliki ukuran panjang 148,82 mm, lebar 95,00 mm, dan tinggi 93,93 mm. Sehingga didapat gambar tangki bahan bakar sebagai berikut :



Gambar 4.6 Tangki Bahan Bakar

6. *Air Intake Flow Rate Sensor*

Jumlah udara yang masuk ruang bakar melalui lubang *intake* harus diketahui massa udaranya sebagai referensi untuk menentukan jumlah bahan bakar yang perlu disemprotkan ke ruang bakar untuk mencapai terjadinya pembakaran. Maka perlu dipasang *air intake flow rate sensor* sebagai pendeteksi massa udara yang masuk ke ruang bakar. Gambar 4.7 adalah hasil desain gambar tiga dimensi menggunakan *Solidwork 2015* dari *air intake flow rate sensor*.



Gambar 4.7 *Intake Air Flow Rate Sensor*

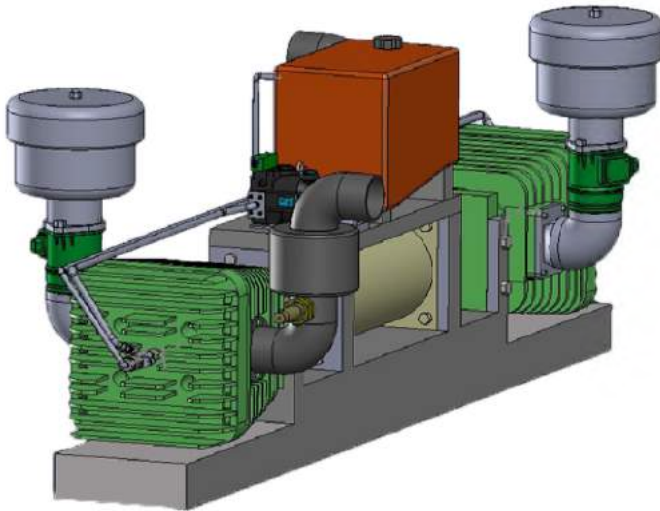
7. O_2 Sensor

O_2 Sensor dipasang berfungsi untuk mengetahui kandungan oksigen yang terkandung dalam udara hasil pembakaran yang keluar dari ruang bakar melalui lubang *exhaust*. Kandungan oksigen pada udara hasil oksigen digunakan sebagai referensi untuk mengetahui besar nilai *lamda* (λ) pada campuran udara dan bahan bakar proses sebelumnya. Dari nilai *lamda* ini digunakan sebagai referensi untuk menentukan berapa bahan bakar yang perlu disemprotkan untuk proses pembakaran selanjutnya. Berikut adalah hasil desain gambar tiga dimensi menggunakan *Solidwork* 2015 yang direncanakan pada sistem bahan bakar ini.



Gambar 4.8 O_2 Sensor

Dari semua komponen-komponen diatas digabungkan dengan *fitures assembly* pada *Solidwork 2015* dengan *layout* gambar tiga dimensi dari *semi-free piston linear diesel engine* dengan menggunakan penghantar aliran fluida bahan bakar berupa pipa. Diameter pipa yang direncanakan disesuaikan dengan diameter masukan dari *injector* yaitu 6 mm, dan diameter pipa *overflow* 5 mm. Sehingga didapatkan gambar *layout* sistem bahan bakar dalam bentuk gambar tiga dimensi menggunakan *Solidwork 2015* sebagai berikut :



Gambar 4.9 *Layout* Sistem Bahan Bakar

4.2. Pemodelan Sistem Kontrol Bahan Bakar

Pemodelan sistem kontrol bahan bakar pada penelitian ini menggunakan kontrol metode *fuzzy logic* dan disimulasikan menggunakan *Simulink MATLAB R2010a*, sehingga memiliki beberapa tahapan perancangan yaitu pertama pembuatan *fuzzy interface system*, kedua membuat model kontrol bahan bakar di *Simulink*. Berikut penjelasan kedua tahapan tersebut.

4.2.1. Pembuatan Fuzzy Interface System

Fuzzy Interface System (FIS) adalah sebuah kotak perintah untuk menyusun sebuah kontrol *fuzzy logic*. Untuk penyusunan *fuzzy logic* langkah pertama harus menentukan *input* dan *output data* yang akan dipakai dalam proses kontrol *fuzzy*. Pada penelitian ini dipakai dua *input* dan satu *output* pada proses *fuzzy logic*-nya. Dua *input* terdiri dari jumlah udara yang masuk melalui *intake port* dan besar *lamda* pada proses pembakaran sebelumnya. Dan *output* dari sistem *fuzzy logic* pada penelitian ini yaitu jumlah bahan bakar yang disemprotkan ke ruang bakar.

Sebagai referensi data input untuk membuat FIS pada penelitian ini menggunakan data hasil penelitian prediksi performa semi-free piston linear diesel engine tipe dua langkah ber-piston ganda berlawanan arah yang dilakukan oleh Ian Bimantara dari Jurusan Teknik Sistem Perkapalan FTK – ITS Surabaya tahun 2016. Data yang dipakai sebagai input ada tiga data yaitu udaram masuk melalui *intake port*, *air-fuel ratio* yang

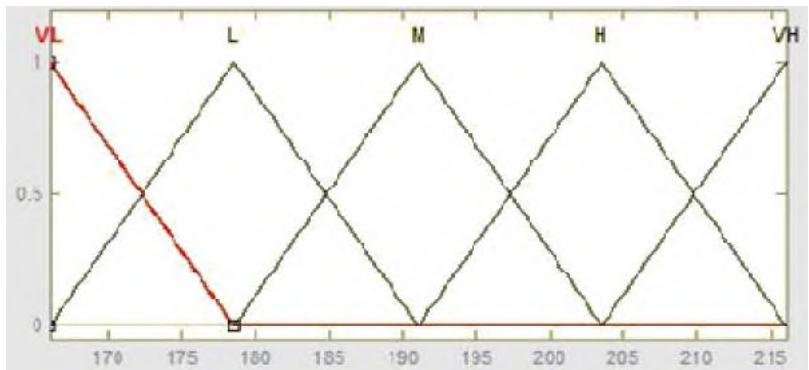
terjadi setiap putaran, dan lamda dari setiap variasi putaran. Data tersebut akan dicantumkan pada lampiran.

Setelah *input* dan *outputdata* sudah diketahui, langkah kedua yaitu menentukan *membership fuction* dari setiap himpunan data *input* dan *output*. Dalam penyusunan *membersip fuction* diperlukan penentuan *variabel* linguistik dan *level* pada kasus ini *membership fuction* dibagi menjadi lima variabel linguistik yaitu : VL (*Very low*), L (*Low*), M (*Medium*), H (*High*), dan VH (*Very High*). Dari pembagian kelima variabel linguistik tersebut dibuat *level* sesuai dengan *range* masukan. Semakin banyak *level* yang dibuat maka semakin peka respon dari *controller* terhadap perubahan masukan. Berikut tabel *level* kuantisasi masukan *air intake flow rate* dan *lamda*.

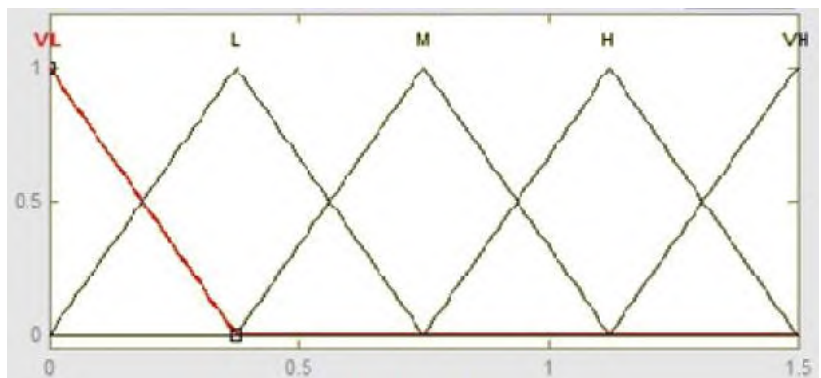
Tabel 4.4 Kuantisasi Masukan Kontroler

Tingkat Kuantisasi	Variasi Input Air Mass (Intake) (A_n)	Variasi Input Lamda (B_n)
1	$166 \leq A_n < 172$	$0,1 \leq B_n < 0,26$
2	$172 \leq A_n < 177$	$0,26 \leq B_n < 0,42$
3	$177 \leq A_n < 183$	$0,42 \leq B_n < 0,58$
4	$183 \leq A_n < 188$	$0,58 \leq B_n < 0,74$
5	$188 \leq A_n < 194$	$0,74 \leq B_n < 0,90$
6	$194 \leq A_n < 199$	$0,90 \leq B_n < 1,06$
7	$199 \leq A_n < 205$	$1,06 \leq B_n < 1,22$
8	$205 \leq A_n < 210$	$1,22 \leq B_n < 1,38$
9	$210 \leq A_n < 216$	$1,38 \leq B_n < 1,5$

Langkah selanjutnya adalah menentukan derajat keanggotaan atau tipe fungsi keanggotaan. Pada kasus ini dipilih tipe fungsi keanggotaan segitiga (*trimf*). Sehingga fungsi keanggotaan masukan *controller* dalam sembilan *level* dan lima variabel linguistik dapat dilihat seperti pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11.

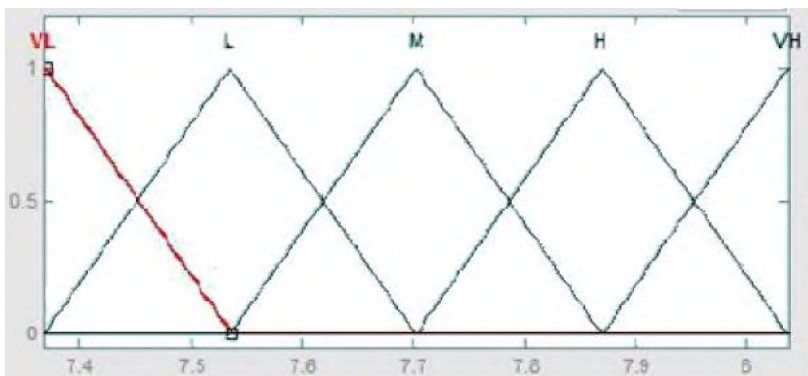


Gambar 4.10 Grafik Fungsi Keanggotaan Masukan *Mass Air Flow Rate*



Gambar 4.11 Grafik Fungsi Keanggotaan Masukan *Lamda*

Variabel masukan (*input*) dari *fuzzy logic* kontroler sudah ditentukan, selanjutnya menentukan fungsi keanggotaan dari variabel keluaran (*output*) dalam hal ini adalah jumlah bahan bakar yang disemprotkan oleh *injector*. Penentuan keanggotaan dari variabel keluaran ini berdasarkan data hasil penelitian prediksi performa *semi-free piston linear diesel engine* tipe dua langkah ber-*piston* ganda berlawanan arah yang dilakukan oleh Ian Bimantara (Jurusan Teknik Sistem Perkapalan FTK – ITS tahun 2016) berbasis simulasi. Data yang diperoleh dari penelitian tersebut adalah berupa jumlah bahan bakar yang diperlukan pada setiap kecepatan yang diberikan di lampiran. Kurva fungsi keanggotaan variabel keluaran dengan lima variabel linguistik dalam sembilan level kuantisasi dari sistem ini ditunjukkan oleh gambar 4.12



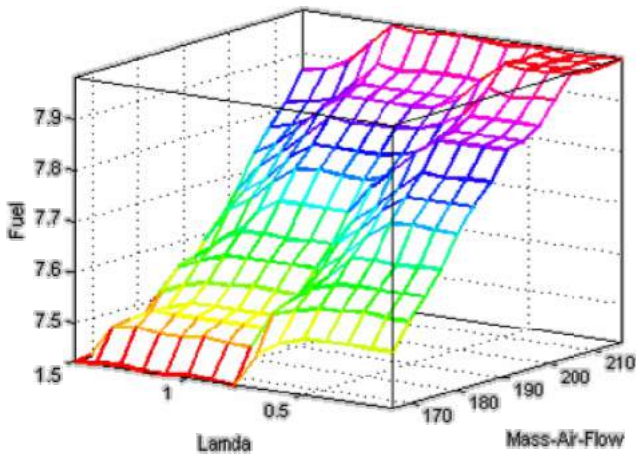
Gambar 4.12 Grafik Kurva Fungsi Keanggotaan Keluaran Kontroler Jumlah Bahan Bakar yang Disemprotkan

Fuzzy logic merupakan sebuah kontrol menggunakan prinsip aturan dasar IF – THEN. Setelah didapat fungsi keanggotaan masukan (*input*) dan keluaran (*output*) *fuzzy controller*, maka dibuat aturan dasar *fuzzy* sebagai kendali untuk menentukan jumlah bahan bakar yang akan disemprotkan oleh *injector*. Berikut adalah tabel aturan dasar *fuzzy* pada desain kontrol ini.

Tabel 4.5 Aturan Dasar *Fuzzy*

Air Mass Lamda	VL	L	M	H	VH
VL	L	M	H	VH	VH
L	L	M	H	VH	VH
M	VL	L	M	H	VH
H	VL	L	M	H	VH
VH	VL	VL	L	M	H

Proses selanjutnya adalah *defuzzifikasi*. *Defuzzifikasi* adalah metode pengambilang keputusan dalam proses kontrol logika *fuzzy*. Dari proses *defuzzifikasi* ini akan didapat nilai keluaran dari setiap variasi masukan. Pada tugas akhir ini menggunakan metode *defuzzifikasi* berupa *center of area* (COA). Proses *defuzzifikasi* ini berdasarkan dari sinyal masukan berupa massa udara masuk dan nilai lamda dalam bentuk level satu sampai dengan sembilan. Hasil dari proses *defuzzifikasi* dapat ditunjukkan dalam bentuk grafik tiga dimensi seperti pada Gambar 4.13.

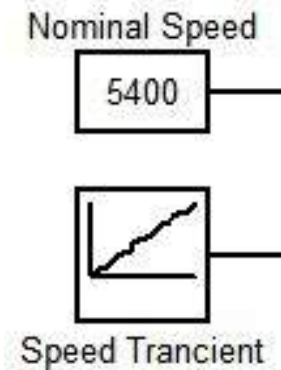


Gambar 4.13 *Surface Rules Fuzzy Interface System* Kontrol Bahan Bakar

4.2.2. Desain Kontrol Bahan Bakar dan Simulasi

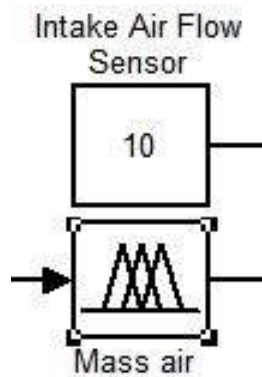
Perancangan sistem kontrol bahan bakar pada tugas akhir ini menggunakan metode simulasi model menggunakan *Simulink* MATLAB R2010a. Seluruh sistem yang mendukung untuk kontrol bahan bakar dimodelkan pada *simulink*. Dari diagram blok yang sudah dicantumkan pada metodologi penelitian akan diturunkan menjadi diagram blok pada *simulink* sehingga dapat disimulasikan.

Langkah pertama memodelkan masukan (*input*) dari *fuzzy controller*, dimana pada perancangan ini menggunakan dua masukan yaitu berupa jumlah udara yang masuk melalui *intake port* dan nilai *lamda* yang dihasilkan dari pembakaran sebelumnya. Untuk masukan jumlah udara yang masuk dibuat bervariasi tergantung kecepatan gerak piston dalam satuan *radian per minute* (rpm). Sehingga perlu dimodelkan juga masukan berupa sinyal kecepatan. Sinyal kecepatan pada simulasi ini dibuat dua model untuk sinyal kecepatan nominal (konstan) dan kecepatan *trancient* (berubah berdasarkan waktu) seperti pada Gambar 4.14.



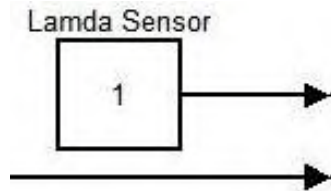
Gambar 4.14 Model *Sensor* Kecepatan

Sinyal keluar dari *sensor* kecepatan menjadi input untuk menentukan jumlah massa udara yang masuk melalui *intake port* untuk model sensor massa udara yang pertama. Model *sensor* massa udara yang kedua dibuat konstan tidak berdasarkan kecepatan, sehingga dapat desain ini dapat disimulasikan pada kondisi massa udara yang masuk melalui *intake port* berjumlah konstan. Kedua model tersebut ditunjukkan seperti pada Gambar 4.15.



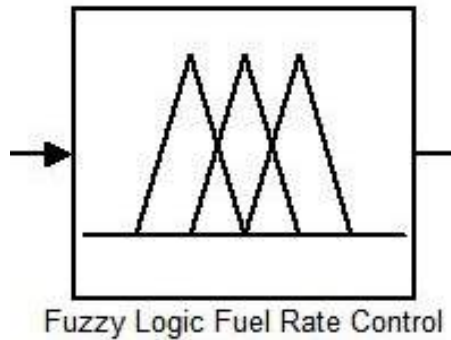
Gambar 4.15 Model *Sensor* Udara Masuk

Masukan yang kedua untuk *fuzzy controller* adalah berupa nilai lamda. Nilai lamda bergantung dari hasil pembakaran sebelumnya yang dibaca oleh O_2 *sensor* atau lamda *sensor*. Pada simulasi ini sensor nilai lamda dibuat dua model untuk kondisi masukan lamda konstan dan bervariasi sesuai dengan hasil pembakaran yang dimodelkan pada simulasi ini. Kedua model masukan nilai lamda yang dibuat adalah seperti pada Gambar 4.16.



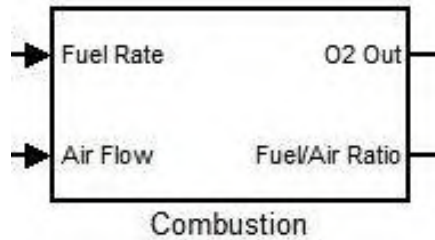
Gambar 4.16 Model *Lamda Sensor*

Langkah kedua adalah membuat *fuzzy controller* pada *simulink*. Kotak *fuzzy controller* diisi dengan data *Fuzzy Interface System* (FIS) kontrol bahan bakar *linear engine* yang telah dibuat pada sub-bagian sebelumnya. *Fuzzy controller* pada *simulink* memiliki satu masukan, namun dapat terdiri dari beberapa sinyal. Dua sinyal dari masukan sensor massa udara masuk dan sensor lamda dijadikan satu *line* menggunakan *toolbox* “*demux*”, sehingga kedua sinyal dapat diberikan kepada kotak *fuzzy controller*. Kotak *fuzzy controller* pada hal ini akan memproses kedua sinyal yang masuk menggunakan sistem *fuzzy logic* hingga didapat keluaran berupa jumlah bahan bakar dalam satuan massa. *Fuzzy controller* pada *simulink* dapat dilihat seperti ditunjukkan pada Gambar 4.17.



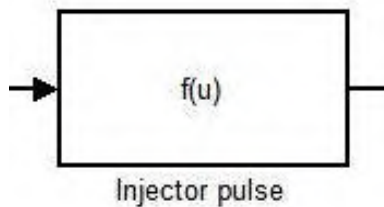
Gambar 4.17 Model *Fuzzy Controller*

Langkah ketiga adalah pembuatan model untuk pencampuran bahan bakar dan udara pada ruang bakar selanjutnya dalam simulasi ini disebut pembakaran (*combustion*). Dari model ini akan didapat keluaran berupa rasio bahan bakar dan udara (*air-fuel ratio*) dan nilai lamda, dimana nilai lamda akan digunakan sebagai sinyal masukan *fuzzy controller*. Sehingga kotak *sub-system* berikut memiliki dua sinyal masukan berupa massa bahan bakar dan massa udara masuk, dan memiliki sinyal keluaran berupa nilai lamda dan *air-fuel ratio*. Berikut adalah model *sub-system* “*combustion*” seperti pada Gambar 4.18.



Gambar 4.18 Model *Combustion*

Langkah keempat adalah pembuatan model untuk penentuan durasi injeksi atau lama pemberian *pulse* tagangan pada *injector*. Dari hasil kontrol *fuzzy* berupa nilai massa bahan bakar yang diinjeksikan dikonversikan menurut kerja *injector* sehingga didapat waktu yang diperlukan untuk memberikan tegangan pada *injector*. Model ini menggunakan *toolbox* “*fuction*” pada *simulink MATLAB* 2010a, dan hasil model seperti pada gambar 4.15.



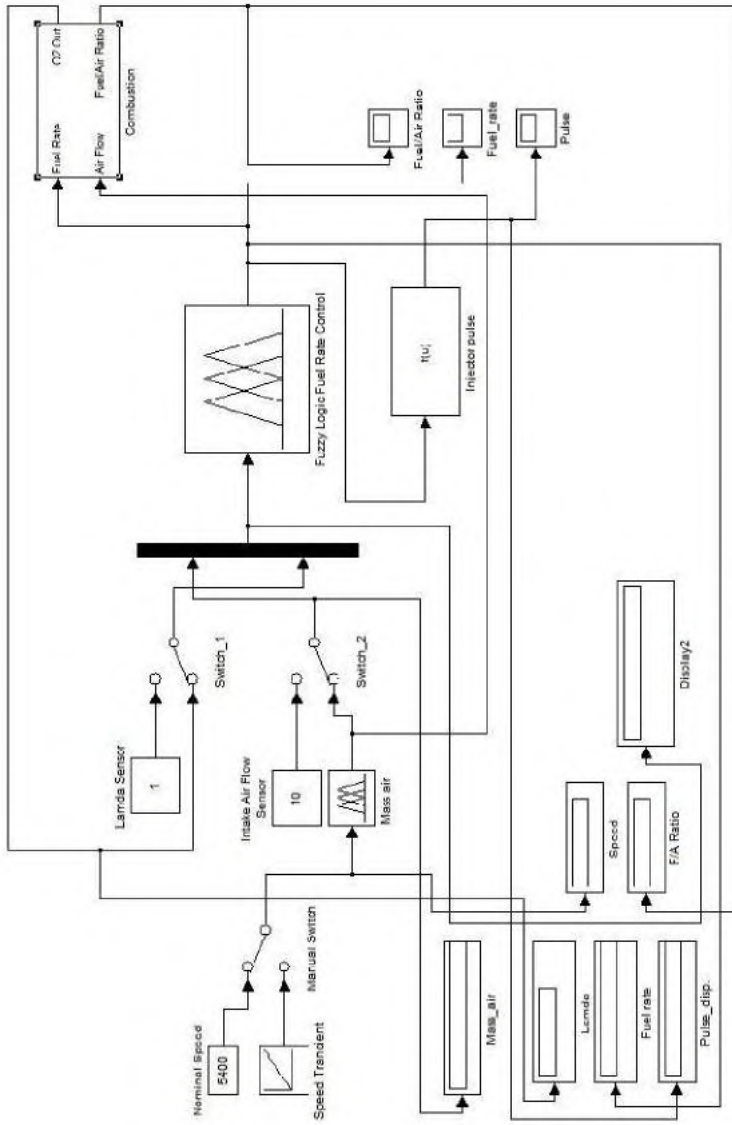
Gambar 4.19 Model Durasi *Pulse* Injeksi Bahan Bakar

Berdasarkan pembacaan kurva kerja *injector* dan perhitungan didapat fungsi konversi massa dalam kerja *injector* berupa waktu injeksi seperti pada persamaan berikut.

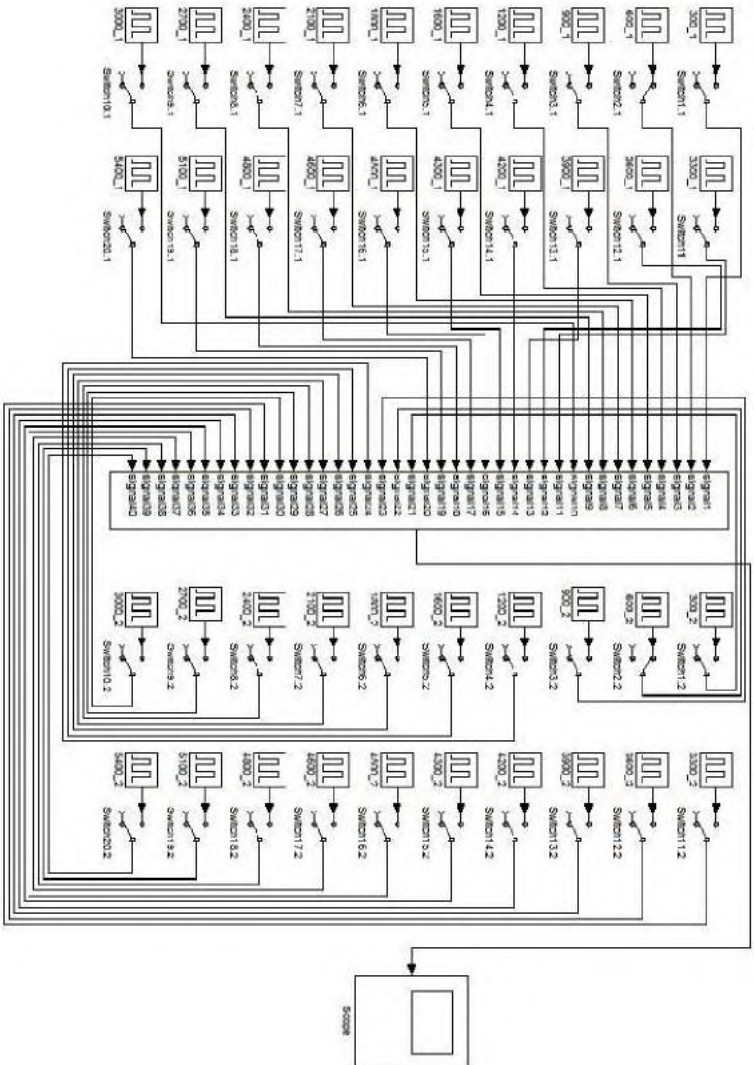
$$y = 1E-05x^4 - 8E-05x^3 - 0.055x^2 + 20.07x + 207.1$$

Langkah keempat adalah membuat sistem simulasi untuk mengetahui pola injeksi pada *semi-free piston linear diesel engine* tipe dua langkah ber-*piston* ganda berlawanan arah pada setiap kecepatan dalam bentuk grafik. Hasil dari simulasi ini adalah berupa grafik durasi injeksi terhadap waktu, sehingga dapat diketahui saat *injector* satu dan *injector* dua saat menyemprotkan bahan bakar dari grafik tersebut.

Dari seluruh langkah langkah yang telah dijelaskan diatas berikut adalah block diagram dari simulasi sistem kontrol bahan bakar beserta simulasi tipe penginjeksiannya menggunakan *simulink MATLAB* 2010a. Sehingga akan didapatkan hasil simulasi berupa grafik-grafik tipe dan pola penginjeksian bahan bakar pada *semi-free piston linear diesel engine* tipe dua langkah ber-*piston* ganda berlawanan arah. Dan berikut adalah gambar model yang akan digunakan untuk simulasi menggunakan simulink MATLAB R2010a.



Gambar 4.20 Block Diagram Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar



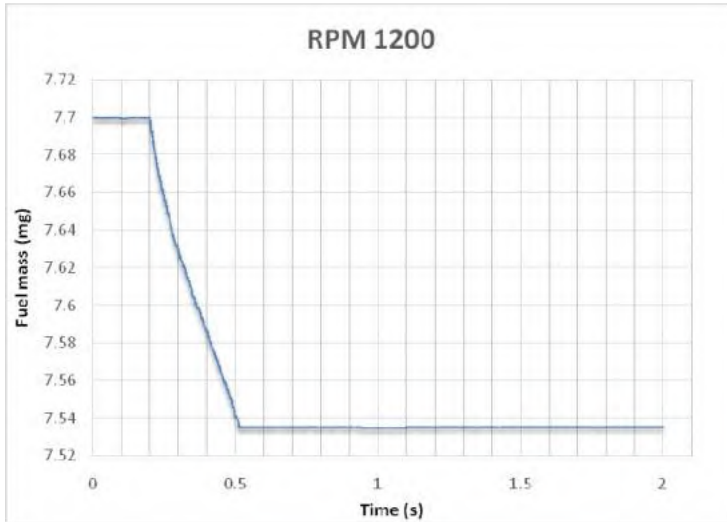
Gambar 4.21 Block Diagram Simulasi Pola Penyemprotan Bahan Bakar

4.3. Analisa Karakteristik Sistem Kontrol Bahan Bakar dari Hasil Simulasi

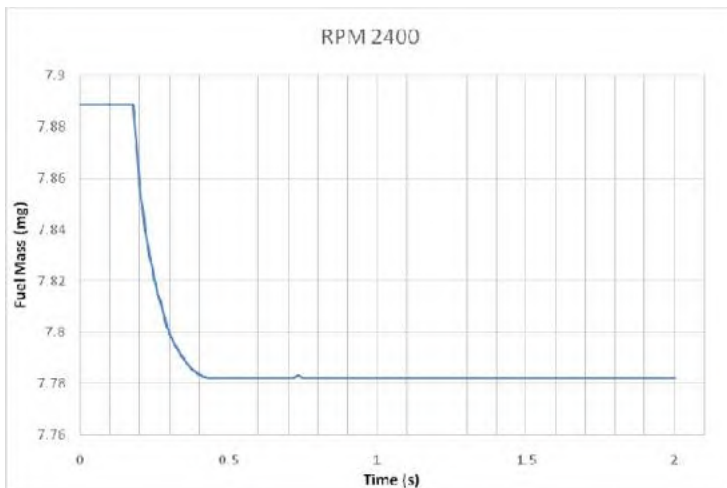
Simulasi sistem kontrol bahan bakar dari *semi-free piston linear diesel engine* tipe dua langkah ber-*piston* ganda berlawanan arah menggunakan *simulink* MATLAB R2010a yang telah dibahas prosedur dan cara desainnya dengan menggunakan metode *fuzzy logic* pada bagian sebelumnya. Sehingga pada bagian ini akan dibahas hasil dari simulasi dengan analisa desainnya dari grafik-grafik hasil simulasi tersebut sebagai karakteristik kontrol elektronik bahan bakar dari *semi-free piston linear diesel engine* tipe dua langkah ber-*piston* ganda berlawanan arah. Analisa desain hasil simulasi dibagi menjadi dua bagian yaitu analisa tentang tipe kontrol bahan bakar yang didesain dan pola penginjeksian bahan bakar pada *semi-free piston linear diesel engine* tipe dua langkah ber-*piston* ganda berlawanan arah.

4.3.1. Analisa Hasil Simulasi Sistem Kontrol Bahan Bakar

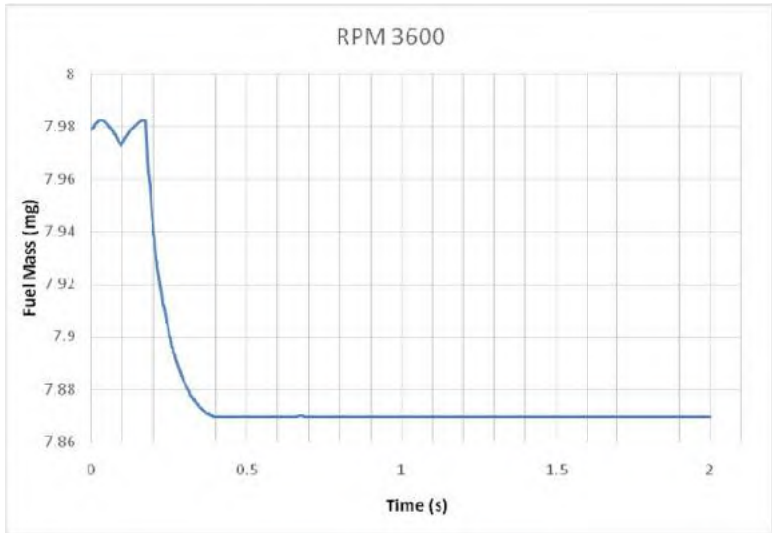
Berdasarkan hasil simulasi menggunakan *simulink* MATLAB R2010a didapatkan tipe penyemprotan bahan bakar pada kecepatan 1200 rpm, 2400 rpm, 3600 rpm, dan 5400rpm yang terlihat pada grafik berikut.



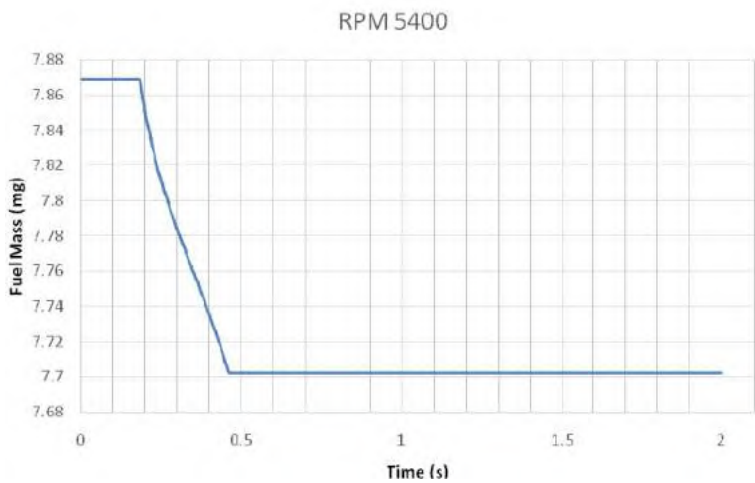
Gambar 4.22 Grafik Tipe Penyemprotan Bahan Bakar Pada Kecepatan 1200 rpm



Gambar 4.23 Grafik Tipe Penyemprotan Bahan Bakar Pada Kecepatan 2400 rpm



Gambar 4.24 Grafik Tipe Penyemprotan Bahan Bakar Pada Kecepatan 3600 rpm

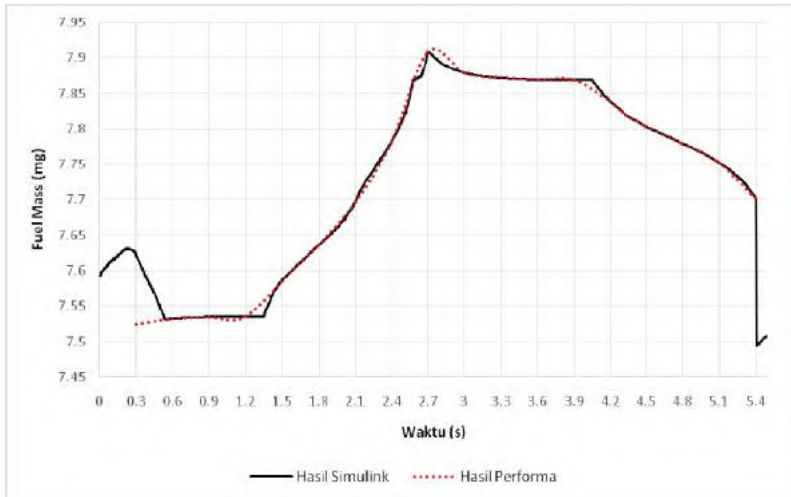


Gambar 4.25 Grafik Tipe Penyemprotan Bahan Bakar Pada Kecepatan 5400 rpm

Berdasarkan empat grafik tipe penyemprotan bahan bakar pada *sample* empat kecepatan pada 1200 rpm, 2400 rpm, 3600 rpm dan 5400 rpm hasil dari simulasi menggunakan *simulink*. Keempat grafik tersebut terjadi konsumsi bahan bakar berlebih diawal respon kontrol *fuzzy logic*. Konsumsi bahan bakar berlebih yang terjadi sebesar 0,165 miligram selama 0.514 detik saat kecepatan 1200 rpm, 0.106 miligram selama 0,437 detik saat kecepatan 2400 rpm, 0.107 miligram selama 0.438 detik saat kecepatan 3600 rpm, dan 0,167 miligram pada 0.462 detik saat kecepatan 5400 rpm.

Konsumsi bahan bakar berlebih terjadi karena respon *fuzzy logic control* mereferensi pada hasil keluaran model plant. Namun setelah itu konsumsi bahan bakar mulai konstan (*steady state*) sesuai dengan perencanaan. Pola konsumsi bahan bakar berlebih yang fluktuatif terjadi pada saat kecepatan 3600 rpm. Hal tersebut berbeda dengan pola yang terjadi pada kecepatan lainnya yaitu konstan.

Untuk mengetahui tipe penyemprotan bahan bakar pada setiap kecepatan, maka dilakukan juga simulasi pada kecepatan yang *trancient*. Kecepatan *trancient* yang dimaksud adalah variasi kecepatan pada setiap detiknya. Dimana semakin lama kecepatan akan dinaikkan. Naikannya kecepatan di setting sesuai dengan *matrix* [0 300 600 900 1200 1600 1800 2100 2400 2700 3000 3300 3600 3900 4200 4300 4500 4600 4800 5100 5400] = [0 0,3 0,6 0,9 1,2 1,6 1,8 2,1 2,4 2,7 3 3,3 3,6 3,9 4,2 4,3 4,5 4,6 4,8 5,1 5,4].



Gambar 4.26 Grafik Tipe Penyemprotan Bahan Bakar pada Kecepatan *Trancient*

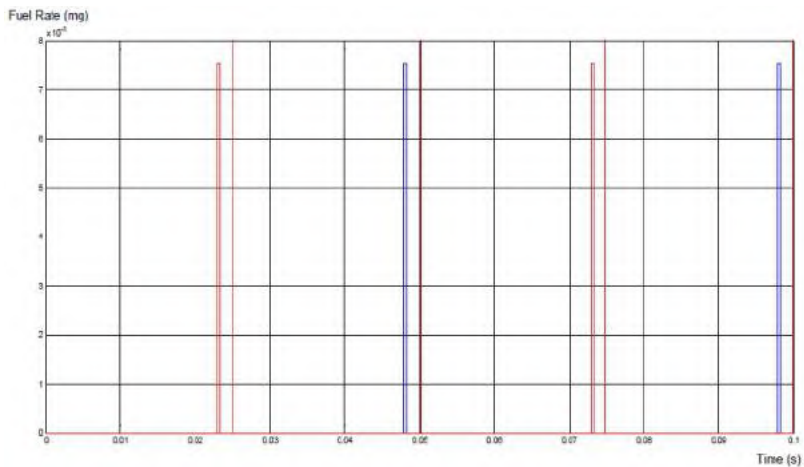
Gambar 4.26 menunjukkan banyaknya bahan bakar per siklus kerja pada setiap kecepatan yang didapat dari simulasi menggunakan *simulink* dan hasil prediksi performa mesin. Untuk validasi hasil desain dilakukan perbandingan terhadap hasil perhitungan berdasarkan data hasil prediksi performa *semi-free piston linear diesel engine* yang dilakukan pada penelitian perbandingan.

Berdasarkan Gambar 4.26 terjadi perbandingan *trindline* grafik yang mendekati sama. Pada hasil simulasi menggunakan *simulink* terjadi sedikit lonjakan jumlah bahan bakar berbeda dengan hasil prediksi performa yang lebih stabil pada kecepatan rendah. Lonjakan yang terjadi diawal simulasi menggunakan *simulink* dikarenakan adanya respon yang ditimbulkan oleh keluaran *sensor* nilai lamda. Pada kecepatan 1500 rpm mulai terjadi

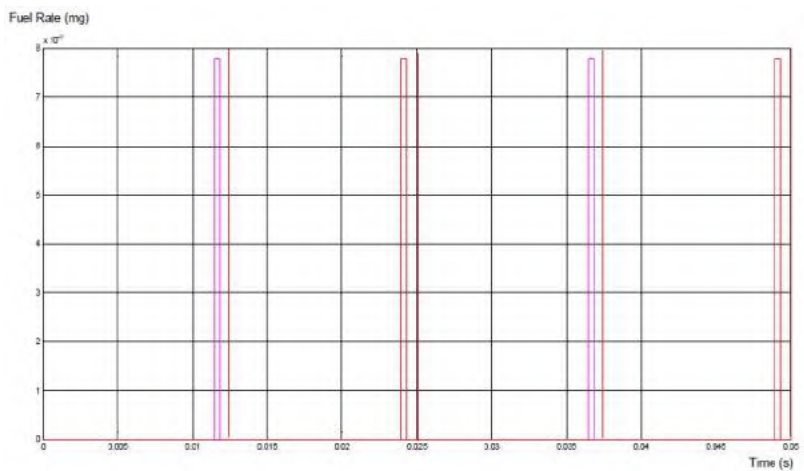
kenaikan bahan bakar yang cukup drastis. Konsumsi bahan bakar per siklus terbanyak terjadi pada saat kecepatan 2700 rpm dan mulai terjadi penurunan diatas kecepatan 2700 rpm hingga kecepatan makasimal mesin pada 5400 rpm. Hal ini menunjukkan bahwa respon *fuzzy controller* yang didesain telah bekerja sesuai dengan kerja *Fuzzy System Interface* yang direncanakan pada tahap pertama.

4.3.2. Analisa Hasil Simulasi Pola Penyemprotan Bahan Bakar

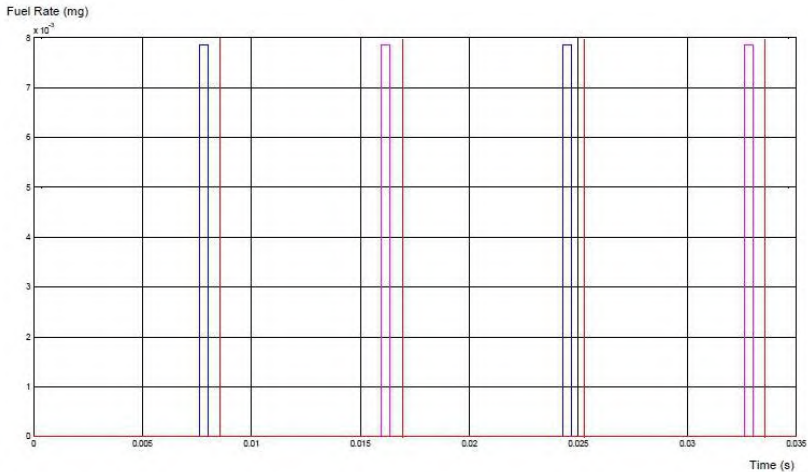
Semi-free piston linea diesel engine tipe dua langkah ber-*piston* ganda berlawanan arah adalah salah satu desain baru dari tipe *linear engine*. Dengan desain bahan bakar menggunakan tipe *direct injection* menggunakan tipe *injector electric* memiliki bentuk penyemprotan berdurasi (*duration injection*). Pada desain ini dibuat penyemprotan bahan bakar dimulai pada posisi *piston* di sudut 15° *crankangle* sebelum titik mati atas pada saat akhir langkah kompresi, atau *piston* pada posisi 55 mm dari titik mati bawah akan langkah kompresi. Dari beberapa hal tersebut dapat dibuat simulasi pola penyemprotan dengan hasil berupa grafik sample tiga kecepatan 1200 rpm, 2400 rpm, dan 3600 rpm adalah sebagai berikut.



Gambar 4.27 Grafik Pola Penyemprotan Bahan Bakar pada 1200 rpm



Gambar 4.28 Grafik Pola Penyemprotan Bahan Bakar pada 2400 rpm



Gambar 4.29 Grafik Pola Penyemprotan Bahan Bakar pada 3600 rpm

Berdasarkan Gambar 4.27, Gambar 4.28 dan Gambar 4.29 dapat dianalisa pola penyemprotan bahan bakar menggunakan tipe *electric injector* pada *semi-free piston linear diesel engine dual piston* tipe dua langkah. Pada grafik tersebut garis merah vertikal menunjukkan sebagai titik mati, dimana garis vertikal paling kiri sebagai titik mati atas *cylinder* pertama atau sebagai titik mati bawah *cylinder* kedua. Hal ini terjadi karena dua piston pada dua silinder yang dirangkai berlawanan arah tanpa poros engkol atau kedua piston berada dalam satu poros.

Terlihat pada ketiga grafik diatas respon *controller* terjadi mendekati titik mati. Respon *pulse* paling kiri pada setiap grafik merupakan respon suplai tegangan pada injector di silinder pertama dan warna respon *pulse* yang berbeda setelahnya menjadi respon suplai tegangan pada injector di *cylinder* kedua. Respon *pulse* yang diberikan

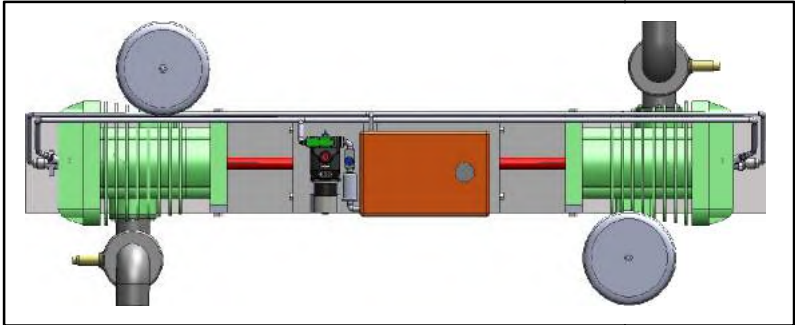
oleh *controller* di simulasi ini telah sesuai dengan penyetelan sudut bahan bakar mulai disemprotkan yaitu 15° atau 55 mm sebelum TMA pada langkah pertama (langkah buang dan hisap).

Panjang *pulse* pada grafik tersebut menunjukkan lama durasi penyemprotan bahan bakar. Pada hasil sebelumnya menunjukkan banyaknya bahan bakar yang disemprotkan pada 1200 rpm, 2400 rpm, dan 3600 rpm selalu meningkat atau lebih banyak. Sehingga pada grafik pola penyemprotan ini terjadi panjang respon *pulse* yang diberikan semakin panjang pada kecepatan yang lebih tinggi. Semakin panjang respon *pulse* yang diberikan maka semakin lama suplai tegangan yang diberikan kepada *injector* untuk mencapai jumlah bahan bakar yang semakin banyak.

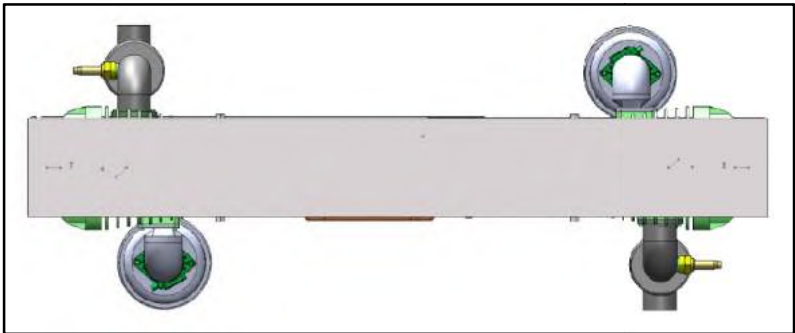
Hal tersebut terjadi karena tipe penyemprotan dari *electric injector* tergantung pada lama suplai tegangan yang diberikan ke *injector*. Suplai tegangan yang diberikan ke *injector* akan menginduksi solenoid didalamnya yang menarik *nozzle* untuk membuka. Sehingga semakin lama suplai tegangan yang diberikan semakin lama *nozzle* membuka, menyebabkan jumlah bahan bakar akan semakin banyak yang disemprotkan melalui lubang *injector*.

LAMPIRAN I

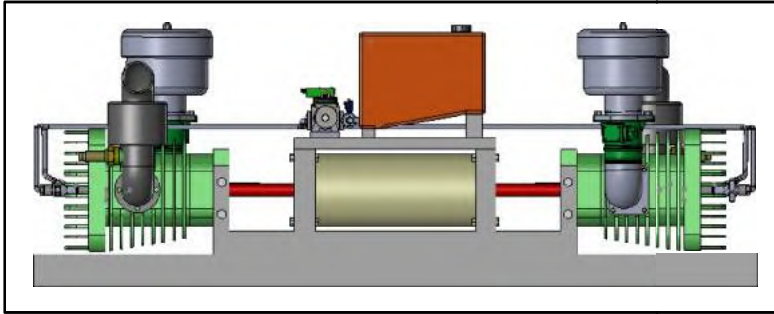
Hasil Desain 3D-Drawing



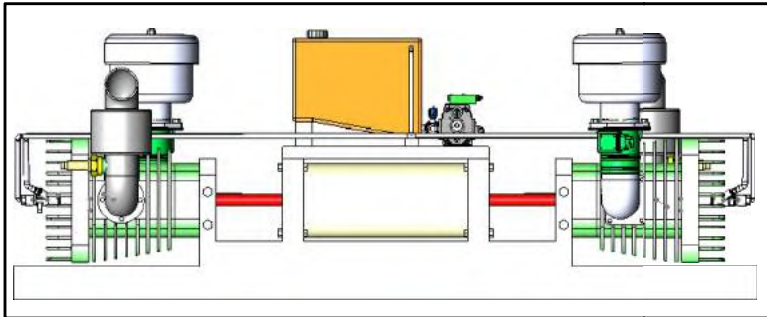
Gambar Lampiran 1. 1 Hasil *3D-Drawing* Desain Sistem Bahan Bakar Tampak Atas



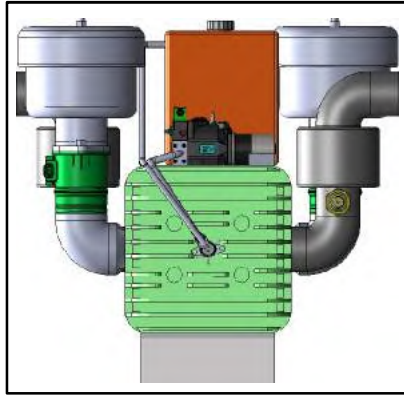
Gambar Lampiran 1. 2 Hasil *3D-Drawing* Desain Sistem Bahan Bakar Tampak Bawah



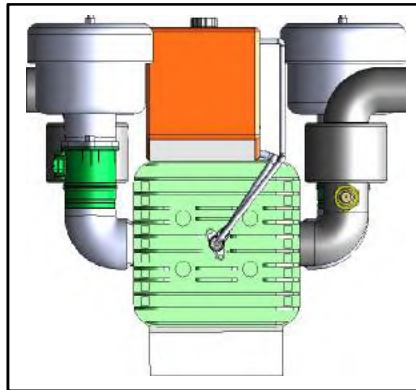
Gambar Lampiran 1.3 Hasil *3D-Drawing* Deain Sistem Bahan Bakar Tampak Depan



Gambar Lampiran 1.4 Hasil *3D-Drawing* Desain Sistem Bahan Bakar Tampak Belakang



Gambar Lampiran 1. 5 Hasil *3D-Drawing* Desain Sistem Bahan Bakar
Tampak Samping Kiri



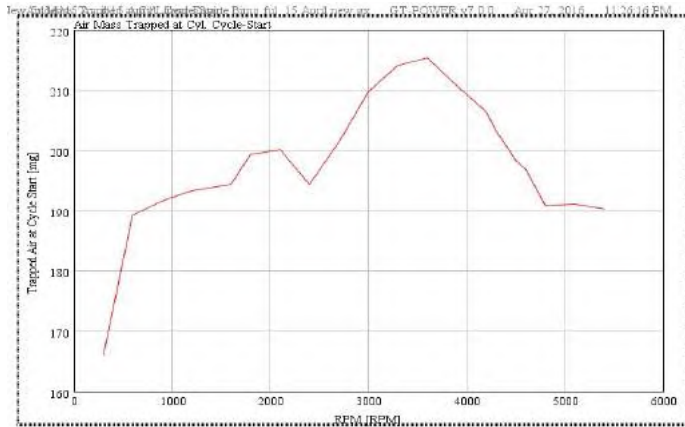
Gambar Lampiran 1. 6 Hasil *3D-Drawing* Desain Sistem Bahan Bakar
Tampak Samping Kanan

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

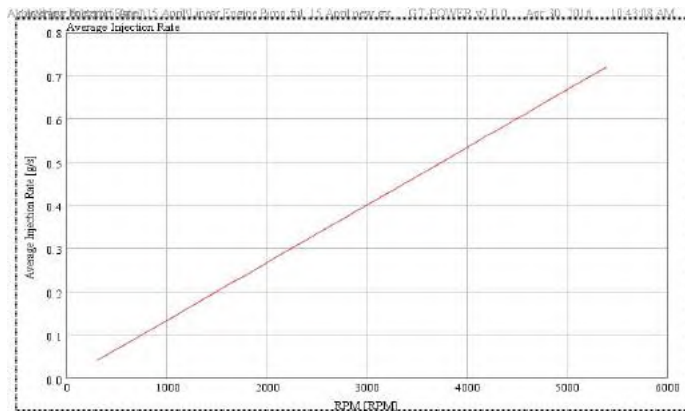
LAMPIRAN II

Hasil Prediksi Performa

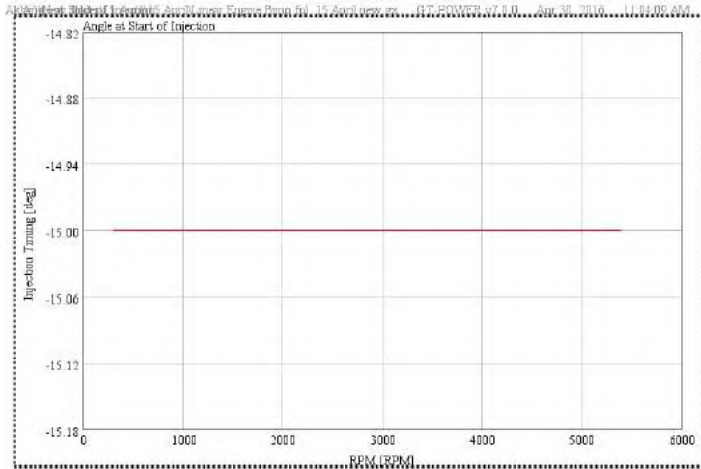
Berikut adalah hasil penelitian prediksi performa yang dilakukan oleh Ian Bimantara dari Jurusan Teknik Sistem Perkapalan FTK – ITS tahun 2016.



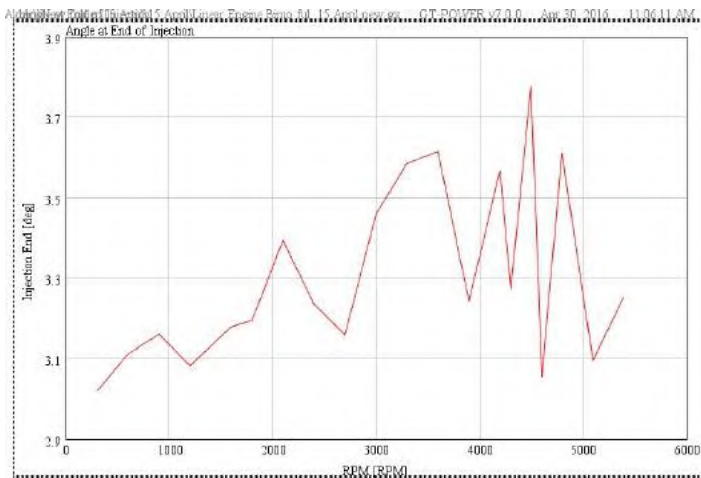
Gambar Lampiran 2.1 Grafik Massa Udara yang Terjebak dalam *Cylinder*



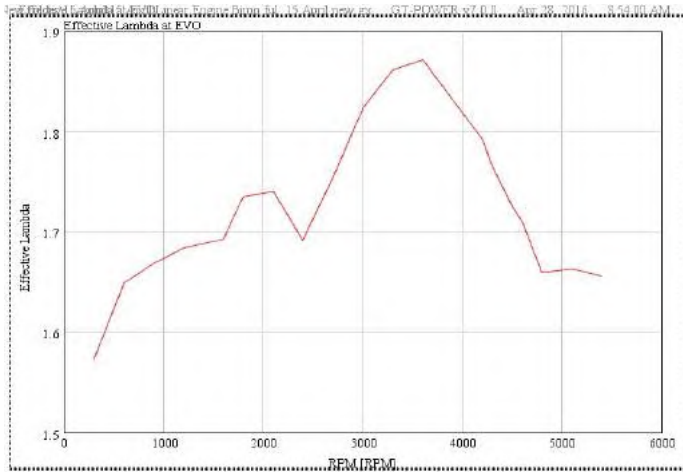
Gambar Lampiran 2.2 Grafik Rata-rata Jumlah Bahan Bakar Setiap Siklus Pembakaran



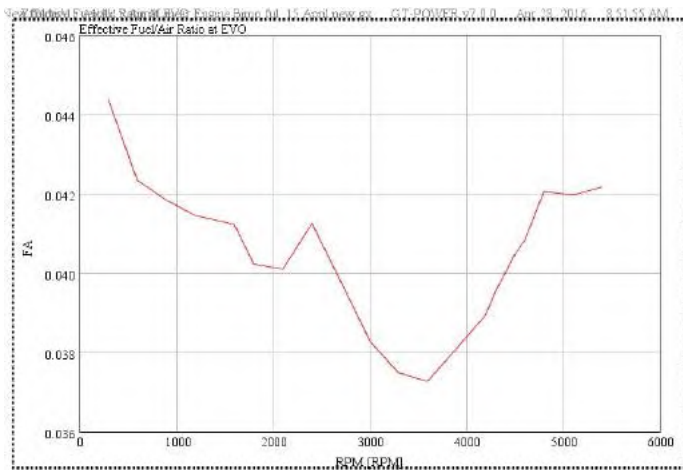
Gambar Lampiran 2.3 Grafik Posisi Mulai Disemprotkan Bahan Bakar



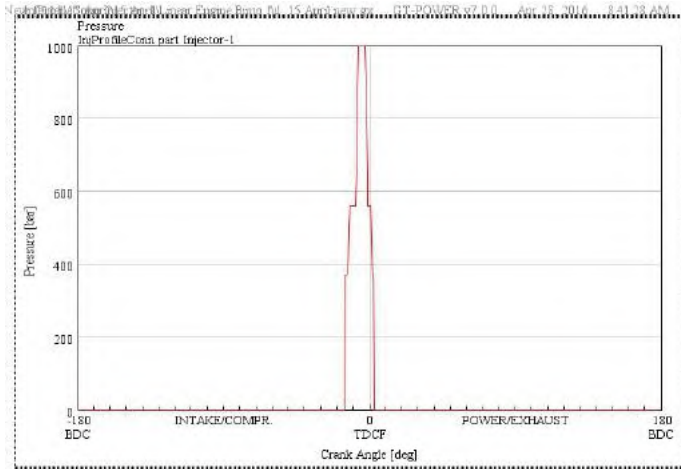
Gambar Lampiran 2.4 Grafik Posisi Akhir Disemprotkan Bahan Bakar



Gambar Lampiran 2.5 Grafik Nilai Efektif *Lambda* Saat Mesin Beroperasi



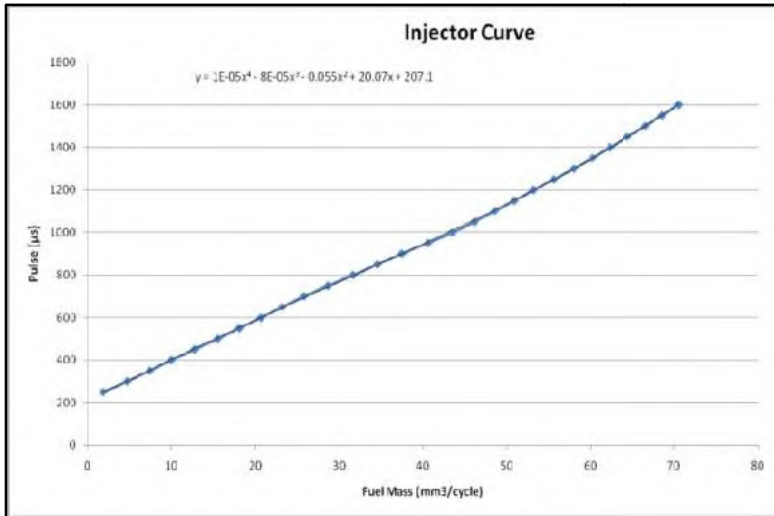
Gambar Lampiran 2.6 Grafik Nilai Efektif *Fuel-Air Ratio* Saat Mesin Beroperasi



Gambar Lampiran 2.7 Grafik Tekanan *Injector* Saat Beroperasi

LAMPIRAN III

Penginjeksian Bahan Bakar



Gambar Lampiran 3.1 Grafik Perform Kerja Injector

Tabel Lampiran 3.1 Hasil Perhitungan Durasi Injeksi

RPM	CA	Min/rad	Sec/rad	Sec/CA	Dur. Injection (sec)	Fuel Rate (mg/cycle)
300	18.019	0.003333333	0.2	0.000555556	0.010010556	0.400422222
600	18.11019	0.001666667	0.1	0.000277778	0.005030608	0.402448667
900	18.16067	0.001111111	0.066666667	0.000185185	0.003363087	0.403570444
1200	18.08212	0.000833333	0.05	0.000138889	0.002511406	0.401824889
1600	18.17898	0.000625	0.0375	0.000104167	0.001893644	0.403976702
1800	18.19424	0.000555556	0.033333333	9.25926E-05	0.001684652	0.404316444
2100	18.3928	0.00047619	0.028571429	7.93651E-05	0.001459746	0.408728889
2400	18.23442	0.000416667	0.025	6.94444E-05	0.001266279	0.405209333
2700	18.15751	0.00037037	0.022222222	6.17284E-05	0.001120834	0.403500222
3000	18.45823	0.000333333	0.02	5.55556E-05	0.001025457	0.410182889
3300	18.58562	0.00030303	0.018181818	5.05051E-05	0.000938668	0.413013778
3600	18.61408	0.000277778	0.016666667	4.62963E-05	0.000861763	0.413646222
3900	18.24132	0.00025641	0.015384615	4.2735E-05	0.000779544	0.405362667
4200	18.5668	0.000238095	0.014285714	3.96825E-05	0.000736778	0.412595556
4300	18.27363	0.000232558	0.013953488	3.87597E-05	0.00070828	0.406080431
4500	18.77794	0.000222222	0.013333333	3.7037E-05	0.000695479	0.417287556
4600	18.05395	0.000217391	0.013043478	3.62319E-05	0.000654129	0.401198671
4800	18.60888	0.000208333	0.0125	3.47222E-05	0.000646142	0.413530667
5100	18.09594	0.000196078	0.011764706	3.26797E-05	0.000591371	0.402132
5400	18.25253	0.000185185	0.011111111	3.08642E-05	0.00056335	0.405611778

Tabel Lampiran 3.2 Hasil Simulasi Jumlah Bahan Bakar dan Pulse Injector pada Satu Secon

RPM	Mass Air (mg)	Lambda	Fuel rate (mg)	Pulse (μ sec)	Pulse (sec)
300	174.294	0.9557	7.524	355.117	0.000355117
600	176.501	0.9668	7.532	355.273	0.000355273
900	177.761	1.023	7.534	355.321	0.000355321
1200	178.396	1.027	7.535	355.331	0.000355331
1600	183.317	0.9945	7.603	356.645	0.000356645
1800	186.337	1.007	7.636	357.276	0.000357276
2100	190.781	1.023	7.697	358.467	0.000358467
2400	196.938	1.045	7.782	360.103	0.000360103
2700	211.907	1.107	7.909	362.552	0.000362552
3000	207.713	1.089	7.879	361.973	0.000361973
3300	205.503	1.078	7.872	361.828	0.000361828
3600	204.241	1.072	7.8695	361.788	0.000361788
3900	203.605	1.068	7.869	361.779	0.000361779
4200	201.675	1.063	7.838	361.178	0.000361178
4300	200.6704	1.059	7.824	360.918	0.000360918
4500	198.955	1.053	7.804	360.524	0.000360524
4600	198.183	1.05	7.796	360.3604	0.00036036
4800	196.693	1.044	7.7795	360.052	0.000360052
5100	194.2885	1.034	7.752	359.5275	0.000359528
5400	191	1.023	7.702	358.556	0.000358556

Tabel Lampiran 3.3 Variable Masukan Simulasi Pola Penyemprotan Bahan Bakar

RPM	Amplitude	Periode (sec)	Pulse (sec)	Width (%)	Phase Delay (Piston1)	Phase Delay (Piston2)
300	0.007524	0.2	0.000355117	0.1775585	0.091666667	0.191666667
600	0.007532	0.1	0.000355273	0.355273	0.045833333	0.095833333
900	0.007534	0.066666667	0.000355321	0.5329815	0.030555556	0.063888889
1200	0.007535	0.05	0.000355331	0.710662	0.022916667	0.047916667
1600	0.007603	0.0375	0.000356645	0.951053333	0.0171875	0.0359375
1800	0.007636	0.033333333	0.000357276	1.071828	0.015277778	0.031944444
2100	0.007697	0.028571429	0.000358467	1.2546345	0.013095238	0.027380952
2400	0.007782	0.025	0.000360103	1.440412	0.011458333	0.023958333
2700	0.007909	0.022222222	0.000362552	1.631484	0.010185185	0.021296296
3000	0.007879	0.02	0.000361973	1.809865	0.009166667	0.019166667
3300	0.007872	0.018181818	0.000361828	1.990054	0.008333333	0.017424242
3600	0.0078695	0.016666667	0.000361788	2.170728	0.007638889	0.015972222
3900	0.007869	0.015384615	0.000361779	2.3515635	0.007051282	0.01474359
4200	0.007838	0.014285714	0.000361178	2.528246	0.006547619	0.013690476
4300	0.007824	0.013953488	0.000360918	2.586579	0.006395349	0.013372093
4500	0.007804	0.013333333	0.000360524	2.70393	0.006111111	0.012777778
4600	0.007796	0.013043478	0.00036036	2.762763067	0.005978261	0.0125
4800	0.0077795	0.0125	0.000360052	2.880416	0.005729167	0.011979167
5100	0.007752	0.011764706	0.000359528	3.05598375	0.005392157	0.01127451
5400	0.007702	0.011111111	0.000358556	3.227004	0.005092593	0.010648148

- **Perhitungan Posisi Injeksi**

Data Awal Engine

Tipe Mesin	Linear Diesel Engine
Tipe Langkah	Dua Langkah
Bore	53 mm
Stroke	60 mm
Rasio Kompresi	1:21
Putaran	1500 rpm
Pendinginan	Udara

Interpolasi Sudut Crank terhadap Panjang Stroke

$$\frac{1}{180} = \frac{x}{60}$$

$$\begin{aligned} x &= (60 \times 1) / 180 \\ &= 0.3333333 \text{ mm} \end{aligned}$$

Sehingga 1^0 crank = **0.333333** mm

Posisi Injeksi Bahan Bakar

Penyemprotan Bahan Bakar dibuat pada 15^0 sebelum TMA

Langkah kerja dua langkah yaitu:

Langkah 1 dari TMA ke TMB = Kerja dan Hisap

Langkah 2 dari TMB ke TMA = Buang dan Kompresi

Jika dihitung satu siklus pembakaran dua langkah dengan titik awal 00 pada TMA akan langkah kerja, maka posisi 150 sebelum TMA langkah kompresi adalah pada posisi sudut crank sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{Posisi injeksi} &= 1800 - 150 \\ &= 1650 \text{ crank} \\ &= 335 \times 0.3333 \\ &= 55 \text{ mm}\end{aligned}$$

Jadi posisi penginjeksian dihitung dari titik awal 00 pada TMB akan langkah kompresi sebesar 55 mm atau 5 mm sebelum TMA akan langkah kerja.

LAMPIRAN IV

Detail Fuzzy Control

- **Detail Fuzzy Interface System untuk Simulasi Kontrol Bahan Bakar Menggunakan Fuzzy Controller**

```
[System]
Name='Fuel_flow_rate5'
Type='mandani'
Version=2.0
NumInputs=2
NumOutputs=1
NumRules=25
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'
```

```
[Input1]
Name='Mass-Air-Flow'
Range=[166 216]
NumMFs=5
MF1='VL': 'trimf', [147.5 166 178.5]
MF2='L': 'trimf', [166 178.5 191]
MF3='M': 'trimf', [178.5 191 203.5]
MF4='H': 'trimf', [191 203.5 216]
MF5='VH': 'trimf', [203.5 216 228.5]
```

```
[Input2]
Name='Lamda'
Range=[0.1 1.5]
NumMFs=5
MF1='VL': 'trimf', [-0.25 0.1 0.45]
MF2='L': 'trimf', [0.1 0.45 0.8]
```

```
MF3='M': 'trimf', [0.45 0.8037 1.154]
MF4='H': 'trimf', [0.8 1.15 1.5]
MF5='VH': 'trimf', [1.154 1.493 1.843]
```

```
[Output1]
Name='Fuel'
Range=[7.368 8.036]
NumMFs=5
MF1='VL': 'trimf', [6.837 7.37 7.537]
MF2='L': 'trimf', [7.368 7.535 7.702]
MF3='M': 'trimf', [7.535 7.702 7.869]
MF4='H': 'trimf', [7.702 7.869 8.036]
MF5='VH': 'trimf', [7.869 8.036 8.203]
```

```
[Rules]
1 1, 2 (1) : 1
1 2, 2 (1) : 1
1 3, 1 (1) : 1
1 4, 1 (1) : 1
1 5, 1 (1) : 1
2 1, 3 (1) : 1
2 2, 3 (1) : 1
2 3, 2 (1) : 1
2 4, 2 (1) : 1
2 5, 1 (1) : 1
3 1, 4 (1) : 1
3 2, 4 (1) : 1
3 3, 3 (1) : 1
3 4, 3 (1) : 1
3 5, 2 (1) : 1
4 1, 5 (1) : 1
4 2, 5 (1) : 1
```

```

4 3, 4 (1) : 1
4 4, 4 (1) : 1
4 5, 3 (1) : 1
5 1, 5 (1) : 1
5 2, 5 (1) : 1
5 3, 5 (1) : 1
5 4, 5 (1) : 1
5 5, 4 (1) : 1

```

- **Detail Fuzzy Interface System Untuk Variasi Kontrol Udara Masuk Berdasarkan Kecepatan**

```

[System]
Name='Mass_air_flow'
Type='mandani'
Version=2.0
NumInputs=1
NumOutputs=1
NumRules=5
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'

```

```

[Input1]
Name='RPM'
Range=[0 5400]
NumMFs=5
MF1='VL': 'trimf', [0 0 1350]
MF2='L': 'trimf', [0 1350 2701]
MF3='M': 'trimf', [1350 2701 4050]
MF4='H': 'trimf', [2701 4050 5400]
MF5='VH': 'trimf', [4050 5400 5400]

```

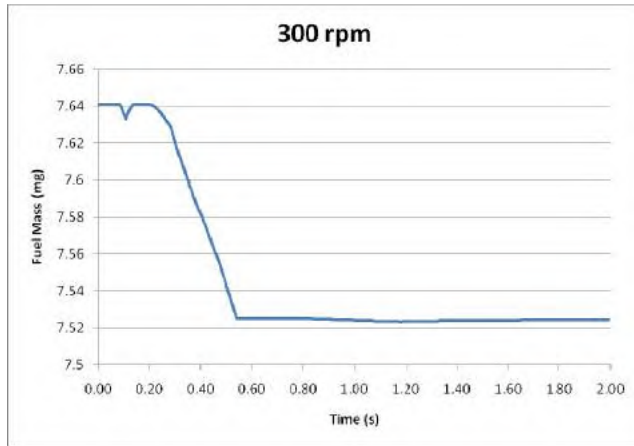


```
[Output1]
Name='Flow-rate'
Range=[166 216]
NumMFs=5
MF1='VL':'trimf',[166 166 178.5]
MF2='L':'trimf',[166 178.5 191]
MF3='M':'trimf',[178.5 191 203.5]
MF4='H':'trimf',[191 203.5 216]
MF5='VH':'trimf',[203.5 216 216]
```

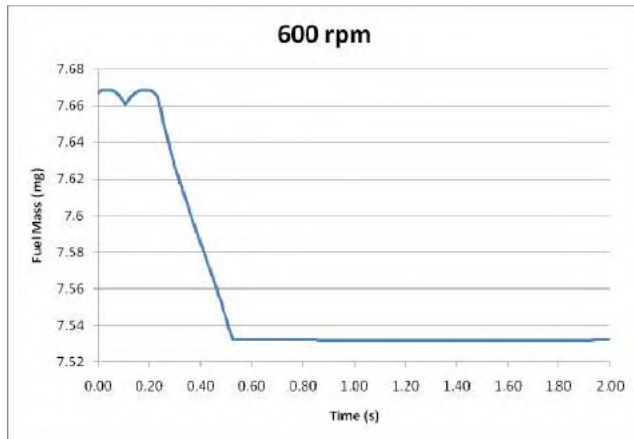
```
[Rules]
1, 1 (1) : 1
2, 2 (1) : 1
3, 5 (1) : 1
4, 4 (1) : 1
5, 3 (1) : 1
```

LAMPIRAN V

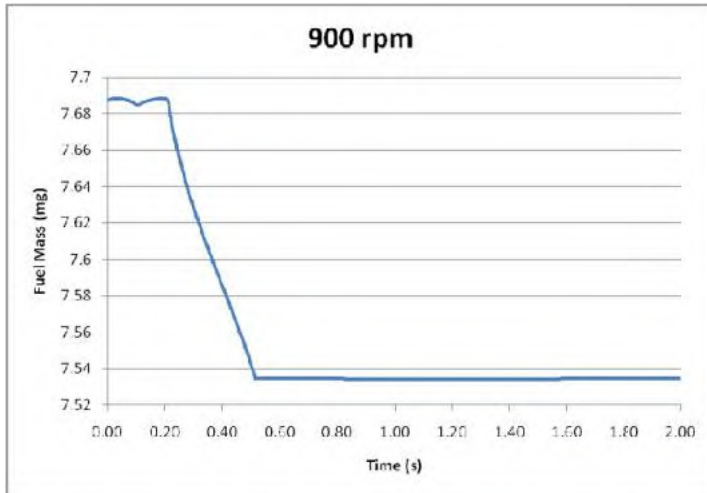
Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar



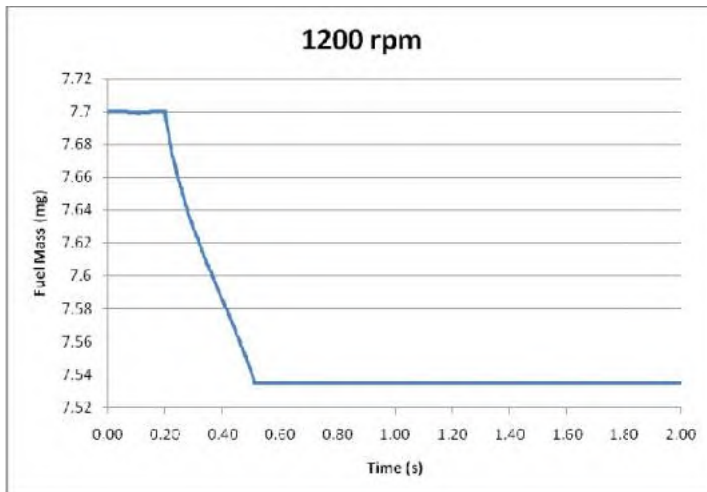
Gambar Lampiran 5.1 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 300 rpm



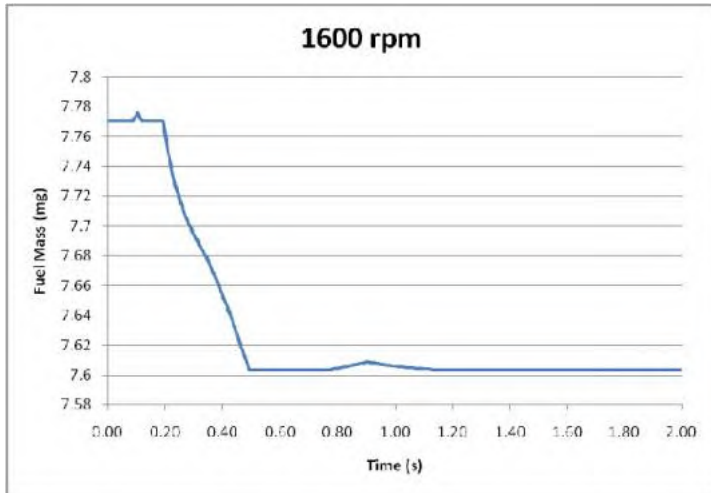
Gambar Lampiran 5.2 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 600 rpm



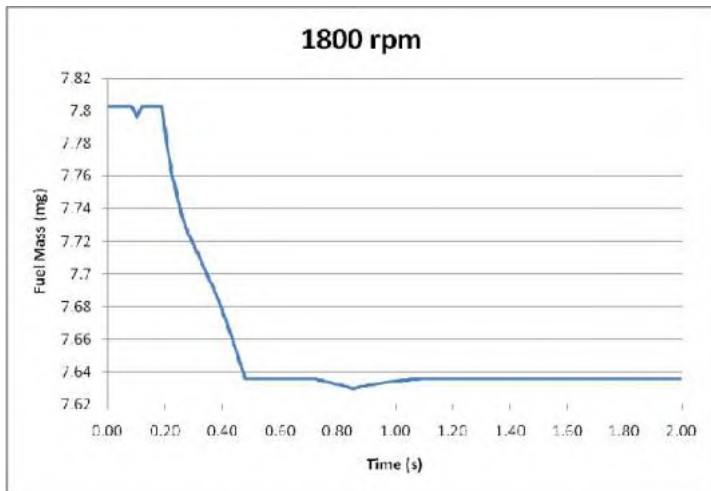
Gambar Lampiran 5.3 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 900 rpm



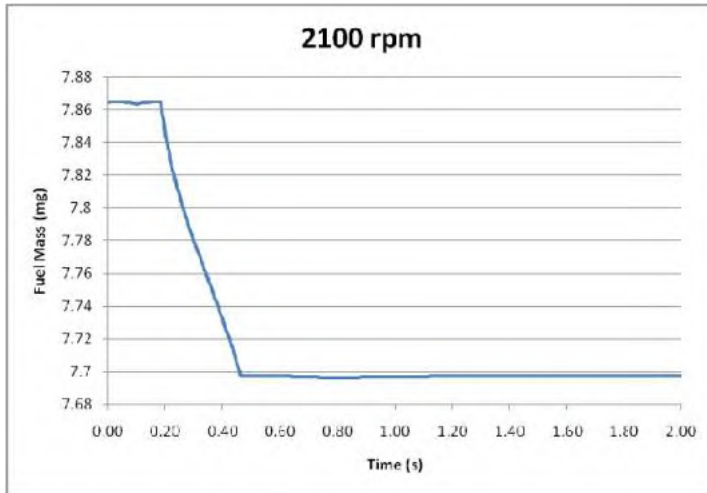
Gambar Lampiran 5.4 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 1200 rpm



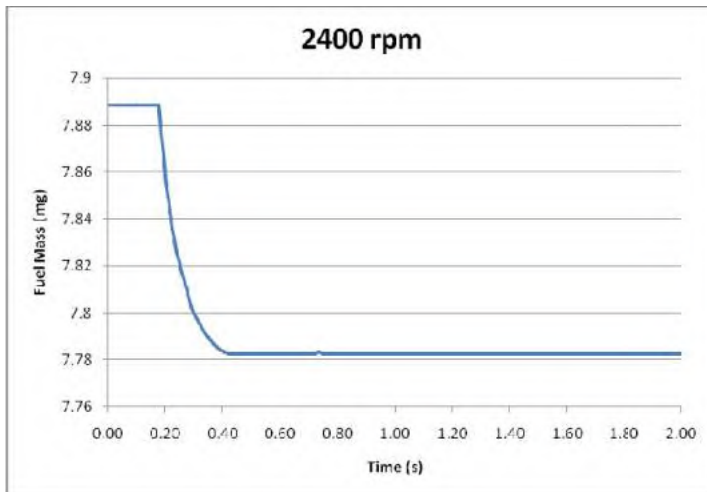
Gambar Lampiran 5.5 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 1600 rpm



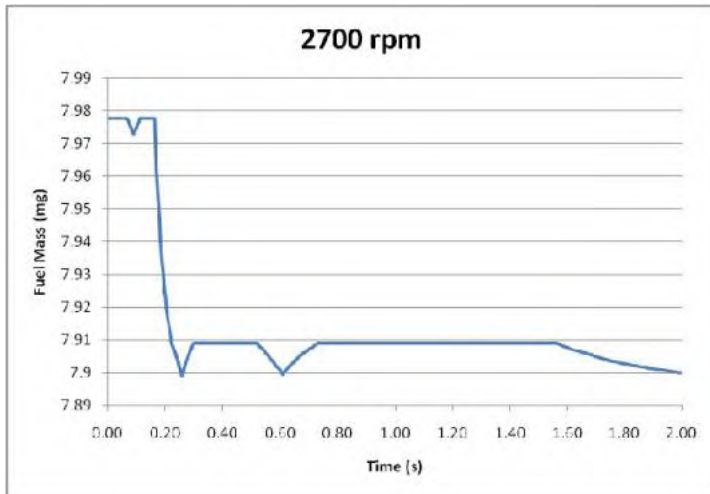
Gambar Lampiran 5.6 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 1800 rpm



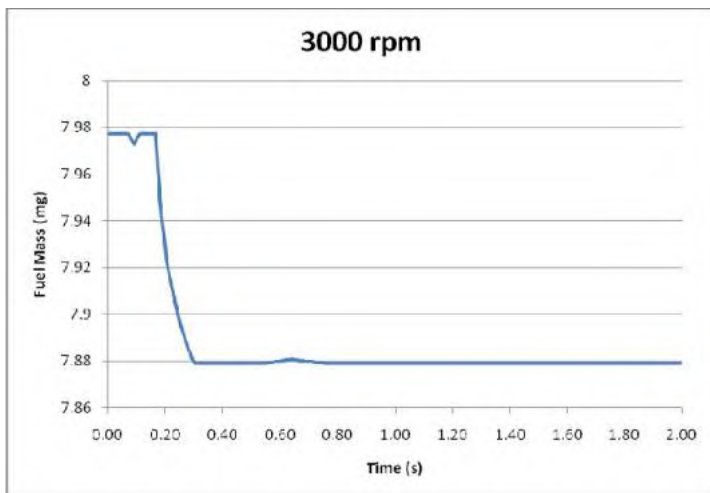
Gambar Lampiran 5.7 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 2100 rpm



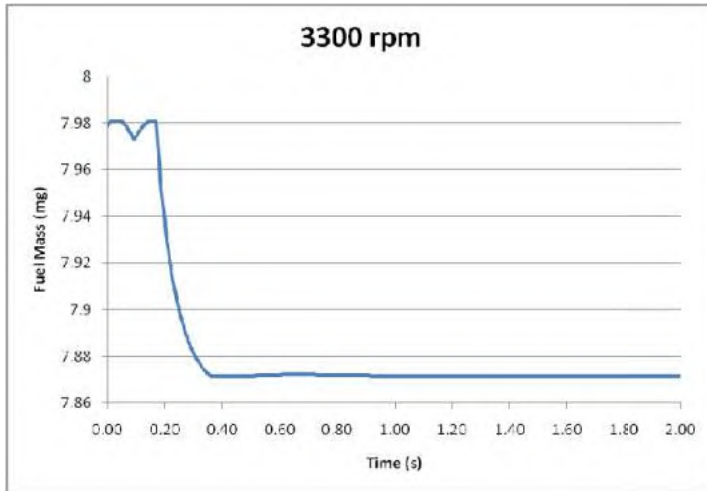
Gambar Lampiran 5.8 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 2400 rpm



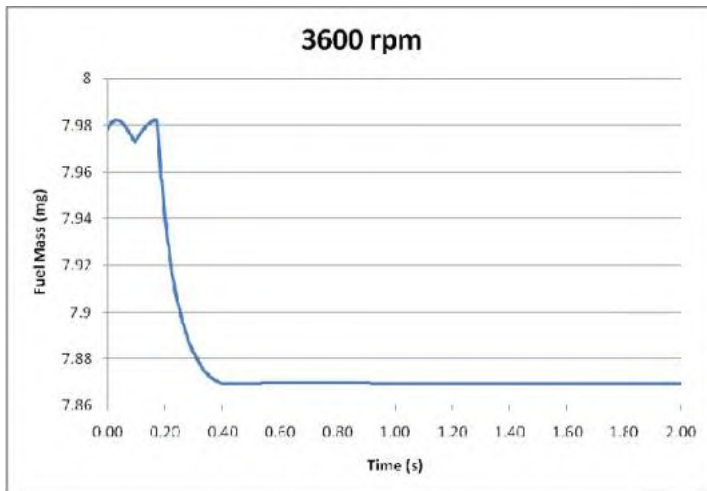
Gambar Lampiran 5.9 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 2700 rpm



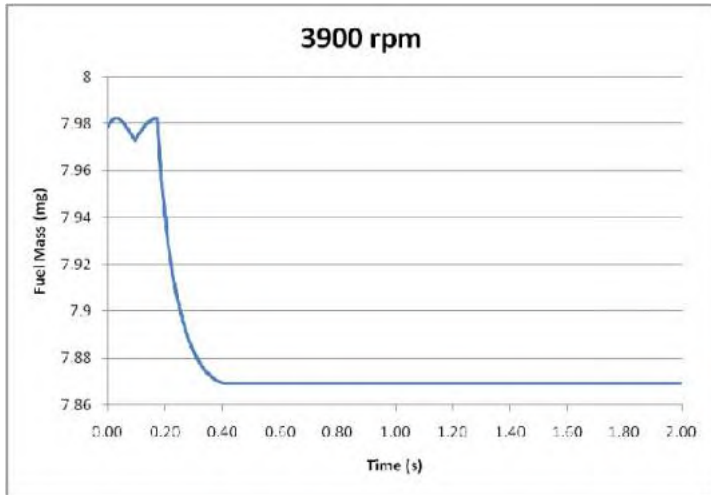
Gambar Lampiran 5.10 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 3000 rpm



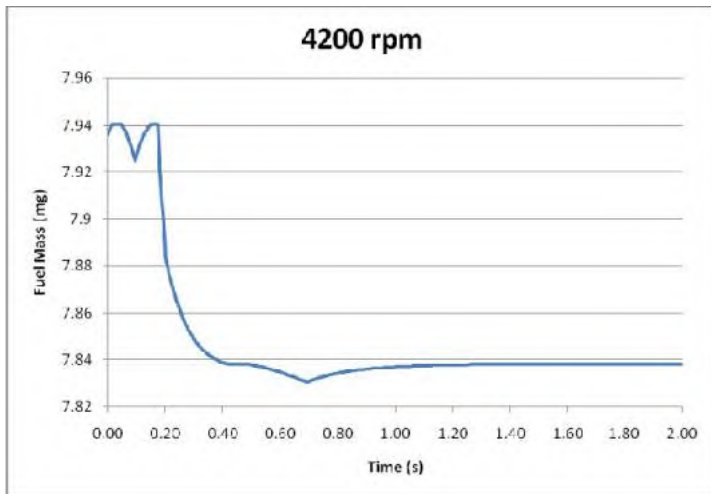
Gambar Lampiran 5.11 Grafik Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 3300 rpm



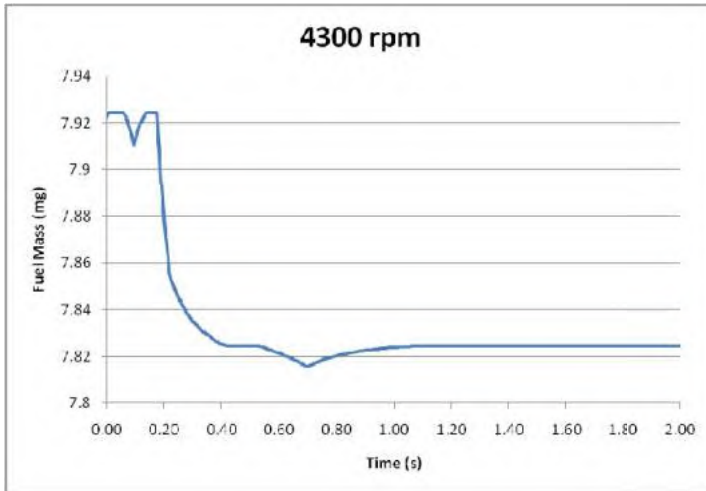
Gambar Lampiran 5.12 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 3600 rpm



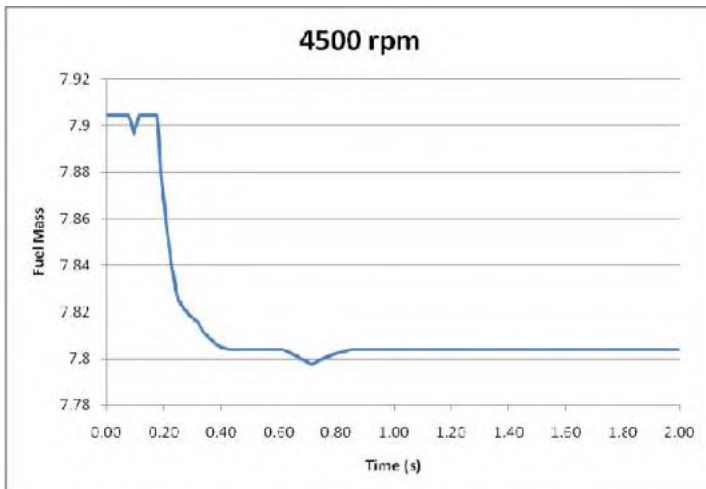
Gambar Lampiran 5.13 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 3900 rpm



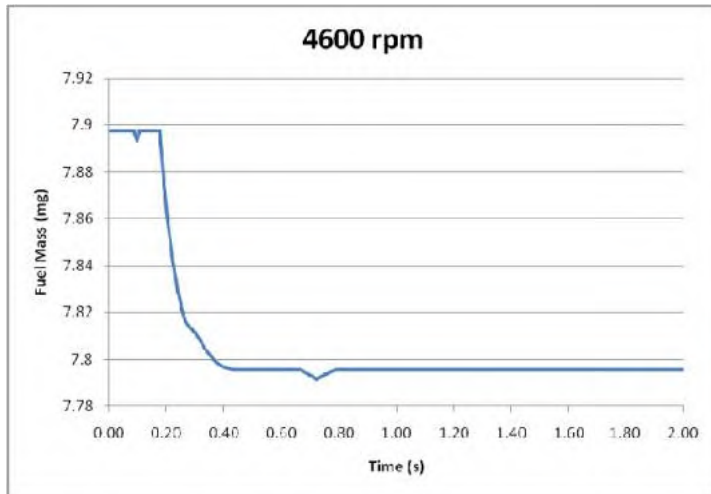
Gambar Lampiran 5.14 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 4200 rpm



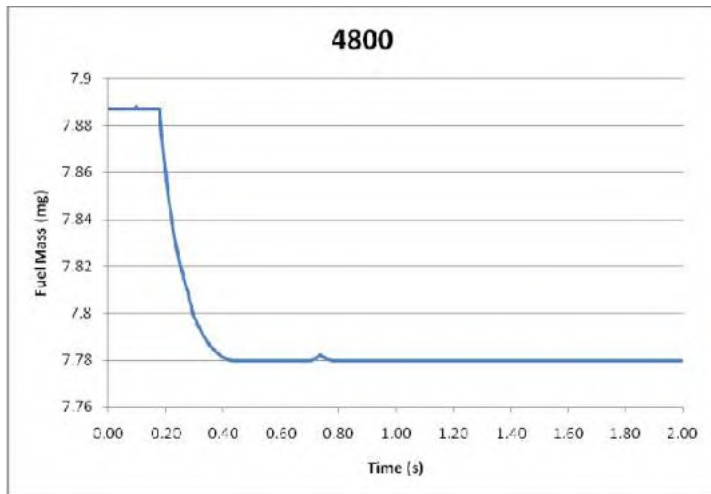
Gambar Lampiran 5.15 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 4300 rpm



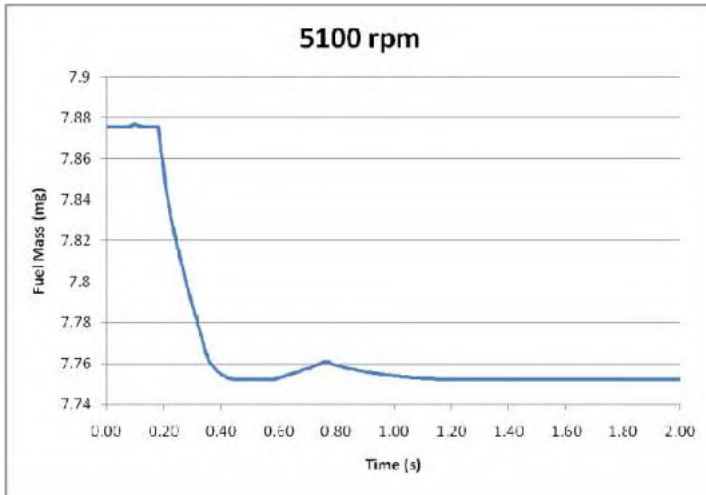
Gambar Lampiran 5.16 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 4500 rpm



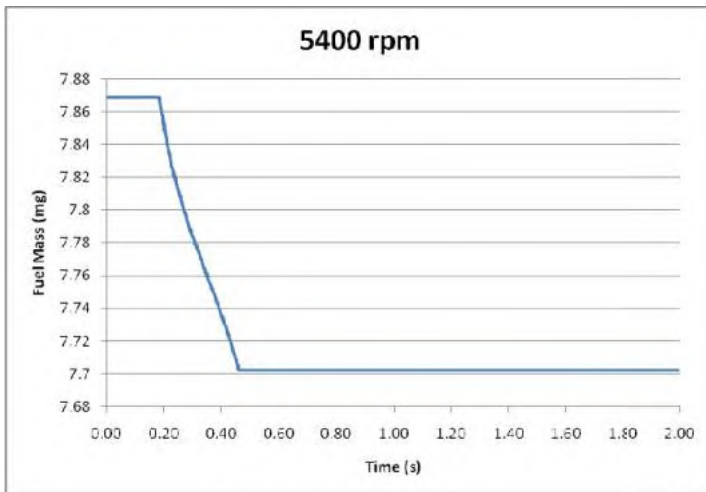
Gambar Lampiran 5.17 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 4600 rpm



Gambar Lampiran 5.18 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 4800 rpm



Gambar Lampiran 5.19 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 5100 rpm



Gambar Lampiran 5.20 Grafik Hasil Simulasi Kontrol Jumlah Bahan Bakar Pada 5400 rpm

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Dari hasil simulasi yang telah dianalisa pada bab sebelumnya, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Desain tiga dimensi (*3D Drawing*) sistem bahan bakar pada *Semi-Free Piston Diesel Engine Dual Piston* menggunakan tipe *electric injector* dengan sistem *direct injection*. Komponen pendukung sistem berupa *sensor* massa udara yang diletakkan pada saluran *scavenge air* dan *sensor lambda* yang diletakkan pada saluran gas buang.
2. Desain sistem kontrol bahan bakar pada *Semi-Free Piston Diesel Engine Dual Piston* menggunakan tipe kontrol *fuzzy logic*. Simulasi desain *fuzzy controller* dapat beroperasi dengan baik sesuai perencanaan.
3. Sistem kontrol *electronic* bahan bakar pada *Semi-Free Piston Diesel Engine Dual Piston* memiliki karakteristik penyemprotan lebih akurat pada posisi 15^0 CA atau setara 5 mm *Before Top Dead Centre* (BTDC) akan langkah kompresi. Respon yang dihasilkan adalah terjadi konsumsi bahan bakar berlebih pada kondisi *start*.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. 2004. *Electronic Petrol Injection*. Jakarta: PT. Indomobil Suzuki International.
- Bimantara, Ian. 2016. *Studi Performa Semi-Free Piston Diesel Engine Tipe Dua Langkah Berpiston Ganda Berlawanan Arah*. Surabaya. SKRIPSI Jurusan Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Fathallah, A & Andre. P. 2015. *Design and Analysis of Semi-Free Piston Two Stroke Diesel Engine Dual Cylinder Opposite System*. Jurnal SENTA 2015.
- Hidayatullah, A & Alaika S. 2012. *Servis Sistem Bahan Bakar Sepeda Motor*. Penerbit PT. PUSTAKA INSAN MADANI. Yogyakarta.
- Johansen, A. Olav E. Erling Aa. Johannessen. Rolf K. 2001. *Free-Piston Diesel Engine Timing and Control Towards Electronic Cam- and Crankshaft*. CiteSeer Archive.
- Ma, F. Changlu Zao. Fujun Z. Zenfeng Z. Zhenyu Z. Zhaoyi X. Hao W. 2015. *An Experimental Investigation on the Combustion and Heat Release Characteristics of an Opposed-Piston Folded-Cranktrain Diesel Engine*. *Energies* 8, 6365-638.
- Mikalsen, R & A. P. Roskylly. 2007. *A Review Of Free-Piston Engine History And Applications*. *Applied Thermal Engineering*. Sir Joseph Swan Institute for Energy Research.

- Naik, S. Redon F. Regner G. Koszewnik J. 2015. *Opposed-Piston 2-Stroke Multi-Cylinder Engine Dynamometer Demonstration*. SAE Technical Paper 2015-26-0038.
- Naba, Agus. 2009. Belajar Cepat *Fuzzy Logic* Menggunakan *MATLAB*. Malang. ANDHI Yogyakarta.
- Puthut, T & Effendie, R. 2012. Desain dan Implementasi Kontroler Prediktif Logika *Fuzzy* Untuk Pemngaturan Injeksi Bahan Bakar *Ignition Engin*. Surabaya. JURNAL TEKNIK ITS Vol. 1.
- Ramadhan, Agoeng dkk. 2011. Sistem Pengaturan Injeksi Bahan Bakar Mesin Mitsubishi 4G63 menggunakan metode *Fuzzy* Aditif. Surabaya. JURNAL TEKNIK ITS Vol. 1.
- Regner, G. 2012. *Mordernizing The Opposed-Piston, Two Stroke Desel Engine For More Efficient Commercial Vehicle Application*. Archates Power Inc.
- Ruswid, 2008. Modul 4 Elektronik *Fuel Injection* EFI. Penerbit SMK AL Hikmah 1 Sirampog.
- Richard Goering, "*Matlab edges closer to electronic design automation world,*" EE Times, 10/04/2004.
- Xiaoqin, W. WU Zhijun. LI Liguang. Deng J. Luan Y. 2011. *Control System of Linear Engine for Hybrid Electric Vehicle*. J Automotive Safety and Energy Vol. 2 No. 4 Shanghai.

BIOGRAFI PENULIS



Dimas Kurniawan, lahir di Kediri pada tanggal 21 Maret 1994. Ia merupakan anak keempat dari empat bersaudara keluarga bapak Djaini dan ibu Munawaroh. Riwayat pendidikan yang telah ditempuh adalah SDN Kampung Dalem III Kediri, SMP Negeri 4 Kediri, SMA Negeri 1 Kediri, dan jenjang S1 di Jurusan Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Rambutnya yang ikal membuat dia mendapatkan julukan dari teman-teman “Ambon” atau kerap dipanggil Dimmbon (Dimas Ambon).

Selama menempuh jenjang kuliah, penulis aktif dalam bidang akademik maupun non-akademik. Pada tahun 2013 Penulis aktif dalam bidang Kewirausahaan HIMASISKAL FTK-ITS, ITS *Marine Solar Boat Team*, dan kegiatan kepanitian lainnya. Pada tahun 2014 berkat keaktifannya dalam ITS *Marine Solar Boat Team*, penulis diberangkatkan ke Belanda untuk mengikuti kontes perlombaan kapal tenaga surya *Dong Energy Solar Challenge*. Selain itu Penulis juga aktif di bidang Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa (PSDM) sebagai *Steering Commite* Kaderisasi HIMASISKAL FTK-ITS. Dengan semangat yang tinggi Penulis mampu menyelesaikan skripsi sebagai sarjana teknik dalam bidang keahlian *Marine Power Plant* Jurusan Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS dengan judul skripsi “Desain dan Analisa *Semi-Free Piston Diesel Engine* Tipe Dua Langkah Ber-*piston* Ganda Berlawanan Arah”.