



**TUGAS AKHIR - TF 181801**

**PERANCANGAN RASIO KONTROL PADA RUANG  
BAKAR GENSET BERBAHAN BAKAR BIOGAS**

**NADYA SARI NASTITI**  
NRP. 02311740000115

Dosen Pembimbing  
Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2021

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**FINAL PROJECT - TF 181801**

***DESIGN OF RATIO CONTROL IN COMBUSTION CHAMBER  
GENERATOR SET BIOGAS***

NADYA SARI NASTITI  
NRP. 02311740000115

Supervisors  
Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.

*DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS  
Faculty of Industrial Technology and System Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2021*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Nadya Sari Nastiti  
NRP : 0231174000115  
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)  
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "**PERANCANGAN RASIO KONTROL PADA RUANG BAKAR GENSET BERBAHAN BAKAR BIOGAS**" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 15 Maret 2021

Yang membuat pernyataan,



Nadya Sari Nastiti

NRP. 0231174000115

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**LEMBAR PENGESAHAN  
TUGAS AKHIR**

**PERANCANGAN RASIO KONTROL PADA RUANG BAKAR GENSET  
BERBAHAN BAKAR BIOGAS**

Oleh:



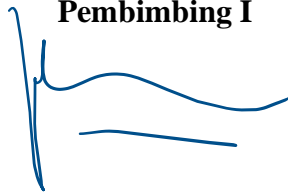
**Nadva Sari Nastiti**

**NRP. 02311740000115**

**Surabaya,**

**Menyetujui,**

**Pembimbing I**



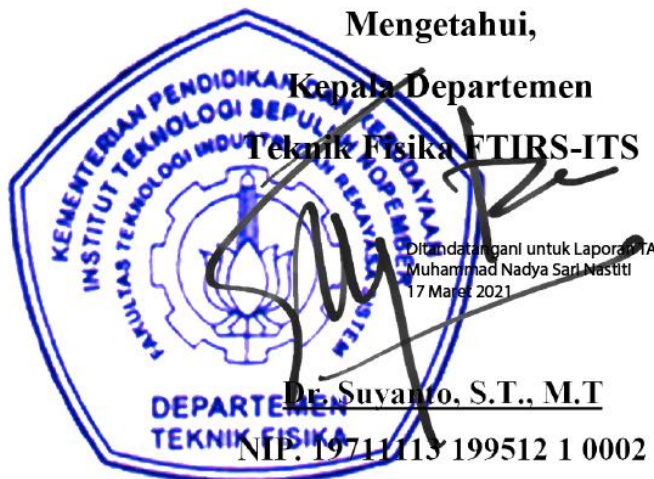
**Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.**

**NIP. 19660116 198903 2 001**

**Mengetahui,**

**Kepala Departemen**

**Teknik Fisika FTIRS-ITS**



**Dr. Suwanto, S.T., M.T.**

**NIP. 19711113 199512 1 0002**

Ditandatangani untuk Laporan TA  
Muhammad Nadya Sari Nastiti  
17 Maret 2021

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



# LEMBAR PENGESAHAN

## PERANCANGAN RASIO KONTROL PADA RUANG BAKAR GENSET BERBAHAN BAKAR BIOGAS

### TUGAS AKHIR





Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**NADYA SARI NASTITI**

**NRP. 02311740000115**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.  (Pembimbing I)
2. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.  (Ketua Penguji)
3. Dr.rer.nat. Ruri Agung Wahyuono, S.T., M.T.  (Penguji I)
4. Irwansyah, S.T., M.T., M.Phil., Ph.D  (Penguji II)

**SURABAYA**

**2021**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# PERANCANGAN RASIO KONTROL PADA RUANG BAKAR GENSET BERBAHAN BAKAR BIOGAS

**Nama** : Nadya Sari Nastiti  
**NRP** : 02311740000115  
**Departemen** : Teknik Fisika FTIRS - ITS  
**Dosen Pembimbing** : Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.

## ABSTRAK

Biogas yang dihasilkan dari peruraian berbagai macam senyawa organik memiliki kadar metana yang berbeda-beda, sehingga mempengaruhi nilai panas dan karakteristik dari biogas tersebut. Biogas dalam tugas akhir ini digunakan sebagai bahan bakar pada genset dengan pembebanan 100-600 watt, kandungan metana 50%, 60%, dan 70%, serta nilai HHV sebesar 22350 kJ/kg, 24220 kJ/kg, dan 26590 kJ/kg. Perancangan rasio kontrol dilakukan untuk menghasilkan pembakaran yang sempurna dengan menjaga temperatur pembakaran sesuai kebutuhan kandungan metana menggunakan Simulink Matlab. Langkah awal pengujian menggunakan AFR stoikiometri sebesar 9,52, 10,09, dan 11,25 menghasilkan temperatur pembakaran sebesar 983,4°C, 975,3°C, dan 969,6°C, kemudian dilakukan uji penambahan *excess air* untuk kandungan metana 50%, 60%, dan 70% sebesar 73% 50%, dan 32% menghasilkan Nilai AFR sebesar 15,87, 15,08, dan 14,87. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan PID *controller*, diperoleh karakteristik respon daya *output* sebagai berikut : *settling time* 26,7 s, 33,4 s, dan 34,45 s, *error steady state* (ess) 0,2%, 0,1%, dan 0,1%, *rise time* (tr) 1,76 s, 1,146 s, dan 1,648 s, *maximum overshoot* (Mp) 6,989%, 8,21%, dan 8,152%. Untuk karakteristik respon temperatur pembakaran sebagai berikut : *settling time* 38,2 s, 36,85 s, dan 47,15 s, *error steady state* (ess) 0,05%, 0,2%, dan 0,2%, *rise time* (tr) 8,228 s, 8,832 s, dan 13,589 s, *maximum overshoot* (Mp) 0,499%, 0,5%, dan 0,51.

**Kata kunci** : Genset biogas, AFR, daya *output*, *mass flow rate*, temperatur pembakaran, PID *controller*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **DESIGN OF RATIO CONTROL IN COMBUSTION CHAMBER GENERATOR SET BIOGAS**

**Name** : Nadya Sari Nastiti  
**NRP** : 02311740000115  
**Department** : Engineering Physics FTIRS - ITS  
**Supervisors** : Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.

### **ABSTRACT**

*Biogas that is produced from the decomposition of various organic compounds has different methane levels, thus affecting the heat value and characteristics of the biogas. In this final project, biogas is used as fuel in a generator set with a load of 100-600 watts, methane content of 50%, 60%, and 70%, and HHV values of 22350 kJ/kg, 24220 kJ/kg, and 26590 kJ/kg. The design of the control ratio is carried out to produce perfect combustion by maintaining the combustion temperature according to the needs of the methane content using Matlab Simulink. The initial step of testing using AFR stoichiometry of 9.52, 10.09, and 11.25 resulted in a combustion temperature of 983.4 °C, 975.3 °C, and 969.6 °C, then the excess air addition test was carried out for the content. methane 50%, 60%, and 70% of 73% 50%, and 32% resulted in AFR values of 15.87, 15.08, and 14.87. Based on the simulation results using the PID controller, the output power response characteristics are as follows: settling time 26.7 s, 33.4 s, and 34.45 s, steady state error (ess) 0.2%, 0.1%, and 0.1%, rise time (tr) 1.76 s, 1.146 s, and 1.648 s, maximum overshoot (Mp) 6.989%, 8.21%, and 8.152%. For the characteristics of the combustion temperature response as follows: settling time 38.2 s, 36.85 s, and 47.15 s, steady state error (ess) 0.05%, 0.2%, and 0.2%, rise time (tr) 8,228 s, 8,832 s, and 13,589 s, maximum overshoot (Mp) of 0.499%, 0.5%, and 0.51.*

**Keywords:** *biogas generator, AFR, power, mass flow rate, combustion temperature, PID controller*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat-Nya, penelitian dan penulisan tugas akhir dengan judul “**PERANCANGAN RASIO KONTROL PADA RUANG BAKAR GENSET BERBAHAN BAKAR BIOGAS**” ini dapat diselesaikan dengan baik. Selama melaksanakan tugas akhir ini baik saat simulasi program dan penyusunan buku laporan banyak kendala dan rintangan yang dialami penulis. Tanpa dukungan mereka, sangat sulit bagi penulis untuk menyelesaikan buku laporan tugas akhir ini. Untuk itu, saya ingin mengucapkan terima kasih, kepada:

1. Orang tua tercinta (bapak dan mama), adik dan seluruh kerabat keluarga yang selalu memberi dukungan, semangat dan doa kepada penulis.
2. Ibu Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan ilmu, arahan, bimbingan dan motivasi dalam pengerjaan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc. selaku ketua penguji sidang TA
4. Bapak Dr.rer.nat. Ruri Agung Wahyuono, S.T., M.T. selaku penguj 1 sidang TA
5. Bapak Dr. Irwansyah, S.T., M.T. selaku penguji 2 sidang TA
6. Bapak Dr.rer.nat. Ir. Aulia Muhammad Taufiq Nasution M.Sc selaku dosen wali.
7. Kepala Departemen Teknik Fisika Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T.
8. Seluruh Dosen Departemen Teknik Fisika, yang telah memberi ilmu dan pengetahuan kepada penulis selama delapan semester sehingga penulis dapat mengerjakan tugas akhir ini.
9. Seluruh staf pegawai Tata Usaha Departemen Teknik Fisika yang telah membantu penulis dalam melengkapi administrasi yang berkaitan dengan tugas akhir ini.
10. Bapak-Ibu yang bekerja di lingkungan departemen Teknik Fisika (Pak Sam, *cleaning service*, dan Bapak/Ibu kantin ijo)

11. Teman-teman satu angkatan 2017 “Tiksna Falcata” yang menjadi teman *sharing* selama pengerjaan tugas akhir.
12. Teman-teman kelas B sebagai teman diskusi dalam belajar selama tiga tahun terakhir.
13. Teman-teman bermain (Caca, Thira, Bella, Ferina, Rani, Aulia, Jovan, Fadlul, Endah dll)
14. Mas Khamim, Mas Berel, Mas Nugroho, Mas Bagas, yang bersedia *sharing* selama pengerjaan tugas akhir.
15. Hayyu Rachma Annisa yang selalu memberi semangat dan motivasi kepada penulis.

Serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa laporan tugas akhir ini masih belum sempurna dan masih banyak hal yang harus diperbaiki. Saran, kritik dan masukan yang membangun dari semua pihak sangatlah membantu penulis terutama untuk berbagai kemungkinan pengembangan lebih lanjut. Semoga laporan tugas akhir ini dapat dipergunakan dengan sebaik-baiknya, terima kasih.

Surabaya, 15 Maret 2021

Nadya Sari Nastiti



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
COVER PAGE .....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
LEMBAR PENGESAHAN .....	vii
LEMBAR PENGESAHAN .....	ix
ABSTRAK .....	xi
ABSTRACT .....	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI .....	xviii
DAFTAR GAMBAR.....	xx
DAFTAR TABEL .....	xxiv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	3
1.5 Sistematika Laporan .....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI .....	5
2.1 Biogas .....	5
2.2 Generator Set .....	7
2.3 <i>Spark Ignition Engine</i> .....	7
2.4 Hukum Kesetimbangan Massa .....	11
2.5 <i>Air-Fuel Ratio</i> (AFR).....	11
2.6 Nilai Kalor Pembakaran Biogas .....	12

2.7	Temperatur Ruang Bakar Genset Berbahan Bakar Biogas .....	14
2.8	<i>Excess Air</i> .....	14
2.9	Rasio Kontrol .....	15
2.10	Proportional Integral Derivative.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.11	<i>Control Valve</i> .....	21
2.12	<i>Temperature Transmitter</i> .....	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		25
3.1	Alur Penelitian.....	25
3.2	Pengumpulan Data .....	26
3.3	Perhitungan <i>Air-Fuel Ratio</i> (AFR) Stoikiometri.....	26
3.4	Pemodelan Matematis .....	29
3.5	Perancangan Rasio Kontrol .....	39
3.6	Pembuatan Simulasi Menggunakan Matlab 2020b .....	40
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....		54
4.1	Pengujian Sistem .....	54
4.2	Pengujian Pemodelan Matematis Komponen.....	57
4.3	Pengujian <i>Open Loop</i> .....	68
4.4	Pengujian <i>Close Loop</i> .....	72
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		79
5.1	Kesimpulan.....	79
5.2	Saran.....	80
DAFTAR PUSTAKA .....		82
LAMPIRAN.....		84
BIODATA PENULIS .....		86

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> <i>Plant</i> Biogas ( <a href="https://www.biru.or.id">https://www.biru.or.id</a> ).....	6
<b>Gambar 2.2</b> Generator Set Biogas ( <a href="https://www.google.com">google.com</a> ) .....	7
<b>Gambar 2.3</b> Siklus Kerja Mesin 4 Langkah ( <a href="https://www.wdrfree.com">wdrfree.com</a> ).....	8
<b>Gambar 2.4</b> Diagram P-V Siklus Otto ( <a href="https://eprints.polsri.ac.id">eprints.polsri.ac.id</a> ).....	9
<b>Gambar 2.5</b> Konfigurasi 1 Rasio Kontrol ( <a href="https://sites.chemengr.ucsb.edu">sites.chemengr.ucsb.edu</a> ) .....	15
<b>Gambar 2.6</b> Konfigurasi 2 Rasio Kontrol ( <a href="https://sites.chemengr.ucsb.edu">sites.chemengr.ucsb.edu</a> ) .....	16
<b>Gambar 2.7</b> Diagram Blok Pengendali Proporsional.....	17
<b>Gambar 3.1</b> Diagram Alir Metodologi Penelitian.....	25
<b>Gambar 3. 2</b> Perhitungan AFR Stoikiometri pada Simulink .....	29
<b>Gambar 3.3</b> Diagram Blok Perancangan Rasio Kontrol..... <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
<b>Gambar 3.4</b> Pemodelan Ruang Bakar Generator Set Biogas pada Simulink.....	31
<b>Gambar 3.5</b> Diagram Blok Perancangan Rasio Kontrol pada Ruang Bakar Generator Set Biogas..... <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
<b>Gambar 3.6</b> Pemodelan Generator Set Biogas pada Simulink.....	33
<b>Gambar 3.7</b> Pemodelan Motor Servo Biogas pada Simulink .....	35
<b>Gambar 3.8</b> Pemodelan Motor Servo Udara pada Simulink.....	35
<b>Gambar 3.9</b> Model Simulink Sensor Metana (Mathworks 2020).....	36
<b>Gambar 3.10</b> Model Simulink Sensor Oksigen <i>Excess Air</i> (Mathworks 2020) ..	37
<b>Gambar 3.11</b> Model Simulink Temperatur Transmitter (Mathworks 2020) .....	39
<b>Gambar 3.12</b> Diagram Blok AFR Ruang Bakar Generator Set Biogas..... <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
<b>Gambar 3.13</b> Diagram Blok Perancangan Rasio Kontrol pada Ruang Bakar Generator Set Biogas .....	40
<b>Gambar 3.14</b> Temperatur Pembakaran Hasil Perhitungan Stoikiometri.....	42
<b>Gambar 3.15</b> Temperatur Pembakaran Hasil Penambahan <i>Excess Air</i> .....	42
<b>Gambar 3.16</b> Grafik Perbandingan Laju Aliran Udara Perhitungan Stoikimoteri dengan Penambahan <i>Excess Air</i> .....	43

<b>Gambar 3.17</b> Grafik Perbandingan Laju Aliran Biogas Perhitungan Stoikimoteri dengan Penambahan <i>Excess Air</i> .....	43
<b>Gambar 3.23</b> Grafik Laju Aliran Udara <i>Close Loop</i> <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
<b>Gambar 3.24</b> Grafik Laju Aliran Biogas <i>Close Loop</i> .....	49
<b>Gambar 3.25</b> Temperatur Pembakaran <i>Close Loop</i> .....	50
<b>Gambar 3.26</b> Simulasi <i>Open Loop</i> pada Simulink Matlab.....	51
<b>Gambar 3.27</b> Simulasi <i>Close Loop</i> pada Simulink Matlab .....	52
<b>Gambar 4.1</b> Grafik Perbandingan Laju Aliran Biogas Perhitungan dengan Uji <i>Close Loop</i> .....	57
<b>Gambar 4.2</b> Grafik Perbandingan Laju Aliran Biogas Perhitungan dengan Uji <i>Close Loop</i> .....	58
<b>Gambar 4.3</b> Grafik Perbandingan Temperatur Pembakaran dan Daya <i>Ouput</i> Perhitungan dengan Uji <i>Close Loop</i> .....	58
<b>Gambar 4.4</b> Grafik Uji Step Generator Set Biogas .....	59
<b>Gambar 4.5</b> Grafik Respon Uji Step Generator Set Biogas .....	60
<b>Gambar 4.6</b> Grafik Uji Step Ruang Bakar Generator Set Biogas .....	61
<b>Gambar 4.7</b> Grafik Respon Uji Step Ruang Bakar Generator Set Biogas .....	61
<b>Gambar 4.8</b> Grafik Uji Step <i>Control Valve</i> Biogas .....	62
<b>Gambar 4.9</b> Grafik Respon Uji Step <i>Control Valve</i> Biogas .....	63
<b>Gambar 4.10</b> Grafik Uji Step <i>Control Valve</i> Udara .....	63
<b>Gambar 4.11</b> Grafik Respon Uji Step <i>Control Valve</i> Udara .....	64
<b>Gambar 4.12</b> Grafik Uji Step Sensor Oksigen <i>Excess Air</i> .....	66
<b>Gambar 4.13</b> Grafik Uji Step Sensor Oksigen <i>Excess Air</i> .....	66
<b>Gambar 4.14</b> Grafik Uji Step Temperatur Transmitter .....	67
<b>Gambar 4.15</b> Grafik Respon Uji Step Temperatur Transmitter .....	68
<b>Gambar 4.16</b> Grafik Respon Uji <i>Open Loop</i> Arus (u1) <i>Control Valve</i> Biogas .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Gambar 4.17</b> Grafik Respon Uji <i>Open Loop</i> Arus (u2) <i>Control Valve</i> Udara .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Gambar 4.18</b> Grafik Respon Uji <i>Open Loop</i> Perhitungan Stoikiometri Kandungan Metana 50% .....	69

<b>Gambar 4.19</b> Grafik Respon Uji <i>Open Loop</i> Perhitungan Stoikiometri Kandungan Metana 60% .....	69
<b>Gambar 4.20</b> Grafik Respon Uji <i>Open Loop</i> Perhitungan Stoikiometri Kandungan Metana 70% .....	69
<b>Gambar 4.21</b> Grafik Respon Uji <i>Open Loop</i> Penambahan <i>Excess Air</i> Kandungan Metana 70% .....	70
<b>Gambar 4.22</b> Grafik Respon Uji <i>Open Loop</i> Penambahan <i>Excess Air</i> Kandungan Metana 60% .....	70
<b>Gambar 4.23</b> Grafik Respon Uji <i>Open Loop</i> Penambahan <i>Excess Air</i> Kandungan Metana 50% .....	71
<b>Gambar 4.24</b> Grafik Uji Step Error Temperatur <i>Controller</i> Berbasis Logika .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Gambar 4.25</b> Grafik Uji Step Error Beban <i>Controller</i> Berbasis Logika .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Gambar 4.26</b> Grafik Uji Step Error Udara <i>Controller</i> Berbasis Logika .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Gambar 4.27</b> Grafik Respon Uji Step Error Biogas <i>Controller</i> Berbasis Logika .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Gambar 4.28</b> Grafik Respon Uji Step Udara <i>Controller</i> Berbasis Logika ...	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Gambar 4.29</b> Grafik Respon <i>Close Loop Control Valve</i> Biogas Kandungan Metana 70% Beban 100 Watt .....	72
<b>Gambar 4.30</b> Grafik Respon <i>Close Loop Control Valve</i> Biogas Kandungan Metana 60% Beban 100 Watt .....	72
<b>Gambar 4.31</b> Grafik Respon <i>Close Loop Control Valve</i> Biogas Kandungan Metana 50% Beban 1100 Watt .....	73
<b>Gambar 4.32</b> Grafik Respon <i>Close Loop Control Valve</i> Udara Kandungan Metana 70% Beban 100 Watt .....	73
<b>Gambar 4.33</b> Grafik Respon <i>Close Loop Control Valve</i> Udara Kandungan Metana 60% Beban 100 Watt .....	73
<b>Gambar 4.34</b> Grafik Respon <i>Close Loop Control Valve</i> Udara Kandungan Metana 50% Beban 100 Watt .....	74

<b>Gambar 4.35</b> Grafik Respon <i>Close Loop</i> Daya <i>Output</i> Biogas Kandungan Metana 70% Beban 100 Watt .....	74
<b>Gambar 4.36</b> Grafik Respon <i>Close Loop</i> Daya <i>Output</i> Biogas Kandungan Metana 60% Beban 100 Watt .....	75
<b>Gambar 4.37</b> Grafik Respon <i>Close Loop</i> Daya <i>Output</i> Biogas Kandungan Metana 50% Beban 100 Watt .....	75
<b>Gambar 4.38</b> Grafik Respon <i>Close Loop</i> Temperatur Pembakaran Kandungan Metana 70% Beban 100 Watt .....	76
<b>Gambar 4.39</b> Grafik Respon <i>Close Loop</i> Temperatur Pembakaran Kandungan Metana 60% Beban 100 Watt .....	76
<b>Gambar 4.40</b> Grafik Respon <i>Close Loop</i> Temperatur Pembakaran Kandungan Metana 50% Beban 100 Watt .....	76

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Komposisi Biogas .....	6
Tabel 2.2	Kisaran nilai <i>AFR</i> pada bahan bakar gas .....	12
Tabel 2.3	Nilai Kalor Pembakaran Beberapa Jenis Bahan Bakar.....	13
Tabel 2.4	Nilai HHV dan LHV Biogas .....	13
Tabel 2.5	Temperatur Pembakaran Tiap Tingkatan Kandungan Metana pada Biogas .....	14
Tabel 3.1	Hasil Perhitungan Stoikiometri Kandungan Metana 50% .....	44
Tabel 3.2	Hasil Perhitungan Stoikiometri Kandungan Metana 60% .....	44
Tabel 3.3	Hasil Perhitungan Stoikiometri Kandungan Metana 70% .....	44
Tabel 3.4	Hasil Penambahan <i>Excess Air</i> 73% Kandungan Metana 50% .....	45
Tabel 3.5	Hasil Penambahan <i>Excess Air</i> 50% Kandungan Metana 60% .....	45
Tabel 3.6	Hasil Penambahan <i>Excess Air</i> 32% Kandungan Metana 70% .....	45
Tabel 3.7	Hasil Perhitungan Kandungan Metana 50% <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
Tabel 3.8	Hasil Perhitungan Kandungan Metana 60% <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
Tabel 3.9	Hasil Perhitungan Kandungan Metana 70% <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
Tabel 3.10	Hasil Uji <i>Close Loop</i> Kandungan Metana 50% .....	47
Tabel 3.11	Hasil Uji <i>Close Loop</i> Kandungan Metana 60% .....	47
Tabel 3.12	Hasil Uji <i>Close Loop</i> Kandungan Metana 70% .....	48
Tabel 4.1	Perbandingan <i>flow rate</i> Hasil Simulasi dan Hasil Perhitungan 50% ....	55
Tabel 4.2	Perbandingan <i>Temperatur Pembakaran serta Daya Output</i> Hasil Simulasi dan Hasil Perhitungan 50% .....	56
Tabel 4.3	Perbandingan <i>flow rate</i> Hasil Simulasi dan Hasil Perhitungan 60% ....	56
Tabel 4.4	Perbandingan <i>Temperatur Pembakaran serta Daya Output</i> Hasil Simulasi dan Hasil Perhitungan 60% .....	56
Tabel 4.5	Perbandingan <i>flow rate</i> Hasil Simulasi dan Hasil Perhitungan 70% ....	57



<b>Tabel 4.6</b> Perbandingan <i>Temperatur Pembakaran serta Daya Output Hasil Simulasi dan Hasil Perhitungan 70%</i> .....	57
---	----

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pemanfaatan biogas sebagai pembangkit listrik masih kurang dimanfaatkan secara optimal, oleh karena itu masalah pemurnian serta pengetahuan mengenai kebutuhan biogas pada ruang bakar genset itu sendiri masih sangat rendah, sehingga stabilitas operasional kinerja pada genset masih belum stabil (Faridha, 2018). Faktor yang mempengaruhi stabilitas operasional kinerja pada genset adalah pembakaran di dalam ruang bakar (Khudhori and Setiabudi, 2013), kemudian rasio *supply* udara dan biogas ke *converter kit* genset harus diatur dengan menyesuaikan kondisi dari biogas untuk menghasilkan pembakaran yang sempurna (Cong 2016). Pengaturan bukaan *valve* laju aliran udara dan biogas pada genset juga dapat memengaruhi stabilitas operasional kinerja. Perbandingan antara performa genset dengan laju aliran udara dan biogas dikontrol secara manual dengan otomatis menunjukkan bahwa pengendalian secara otomatis dapat mengurangi emisi gas buang serta meningkatkan efisiensi biogas (Daingade and Yadav, 2013), sehingga rasio kontrol laju aliran udara dan biogas ke ruang bakar genset yang secara otomatis dapat menyesuaikan dengan kondisi biogas sangat berpengaruh terhadap stabilitas operasional ruang bakar genset.

Kandungan gas metana dalam biogas berubah-ubah tergantung dari kondisi cuaca di sekitar bioreaktor anaerob yang memproduksi biogas, pakan ternak, serta jenis bahan baku yang dimanfaatkan sebagai biogas sehingga berdampak terhadap kalor yang dihasilkan dari pembakaran biogas pada ruang bakar genset (Arifin, Saepudin, and Santoso, 2012). Temperatur pembakaran yang sesuai dengan kebutuhan setiap tingkatan metana yang terkandung pada biogas, dikarenakan setiap tingkatan kandungan metana pada biogas memiliki nilai *High Heating Value* (HHV) yang berbeda-beda. Semakin tinggi kandungan metana pada biogas, nilai HHV akan semakin tinggi sehingga nilai kalor pembakaran yang dihasilkan tinggi serta temperatur pembakaran yang dibutuhkan pada ruang bakar juga semakin tinggi (Johns Environmental Pty Ltd, 2017). Rasio *supply* udara dan biogas yang

tepat diperlukan untuk menghasilkan temperatur pembakaran yang sesuai dengan kebutuhan tiap tingkatan kandungan metana dalam biogas. Pemberian beban yang sama dengan tingkatan kandungan metana yang berbeda, kebutuhan rasio *supply* udara dan biogas berbeda. Semakin besar kandungan metana pada biogas nilai rasionya semakin kecil yang berarti laju aliran udara dan biogas lebih sedikit. Hal ini dikarenakan nilai kalor pembakaran yang dihasilkan juga semakin tinggi, sehingga penggunaan biogas pada tingkatan kandungan metana yang tinggi lebih efisien, sehingga diperlukan rasio kontrol pada ruang bakar genset biogas yang sesuai dengan kondisi biogas agar menghasilkan pembakaran yang sempurna (Cong, 2016).

Ketika temperatur pembakaran di ruang bakar genset terlalu rendah akan menyebabkan panas yang dihasilkan di dalam ruang bakar juga rendah sehingga pembakaran biogas tidak berlangsung secara sempurna dan mempengaruhi kerja sistem pembakaran, sebaliknya, jika temperatur pembakaran pada ruang bakar genset terlalu tinggi akan menyebabkan biogas sangat cepat menguap dan tidak sesuai dengan kebutuhan *engine*. Penguapan biogas yang terlalu cepat akan menyebabkan perbandingan campuran biogas dan udara menjadi kurus yang akan membuat kadar CO dan HC akan berkurang dan NO<sub>x</sub> akan bertambah. Salah satu penyebab terbentuknya CO yaitu saat temperatur tinggi, karbon dioksida terurai menjadi karbon monoksida dan oksida (Panjaitan Aulia Rahma, 2014). Kandungan gas metana dalam biogas yang digunakan pada tugas akhir kali ini adalah sebesar 50%, 60%, dan 70% yang memiliki temperatur pembakaran ideal sebesar 595°C, 675°C, dan 750°C.

Oleh karena itu pada tugas akhir ini akan dilakukan perancangan rasio kontrol pada ruang bakar genset biogas berdasarkan perbandingan laju aliran massa Bahan biogas dan udara (AFR) menggunakan *PID controller* yang diharapkan dapat menjaga stabilitas dari temperatur pembakaran dan daya *output* yang dihasilkan oleh genset.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, maka permasalahan pada Tugas Akhir ini adalah:

- a) Bagaimana pengaruh kondisi biogas dengan kandungan metana 50%, 60%, dan 70% pada sistem pembakaran di ruang bakar genset berbahan bakar biogas terhadap stabilitas operasional genset biogas?
- b) Bagaimana kinerja sistem rasio kontrol pada ruang bakar genset berbahan bakar biogas berbasis *PID controller* yang dirancang?

## 1.3 Tujuan

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah:

- a) Mengetahui pengaruh kondisi biogas dengan kandungan metana 50%, 60%, dan 70% pada sistem pembakaran di ruang bakar genset berbahan bakar biogas terhadap stabilitas operasional genset biogas
- b) Mengetahui kinerja sistem rasio kontrol pada ruang bakar genset berbahan bakar biogas berbasis *PID controller*

## 1.4 Batasan Masalah

Pada tugas akhir ini, cakupan bahasan yang akan dikaji akan dibatasi oleh beberapa batasan sebagai berikut:

- a) Data biogas yang digunakan memiliki kandungan metana diasumsikan sebesar 50%, 60%, dan 70%.
- b) Biogas yang digunakan adalah hasil purifikasi, sehingga yang digunakan untuk pembakaran adalah gas metana yang terkandung dalam biogas.
- c) Nilai *High Heating Value* (HHV) yang digunakan sebesar 22350 kJ/kg, 24220 kJ/kg, dan 26590 kJ/kg
- d) Bahan bakar yang digunakan adalah biogas dan udara sebagai campuran bahan bakar agar terjadi pembakaran sempurna.
- e) Pada tugas akhir ini hanya dilakukan simulasi tidak pada *real plan*.
- f) Pengendali yang dipergunakan pada sistem pengendalian ini berbasiskan *PID controller* dibangun dengan mempergunakan *software* MATLAB-Simulink

## **1.5 Sistematika Laporan**

Laporan tugas akhir ini terdiri dari lima bab, dilengkapi dengan daftar pustaka dan lampiran. Secara garis besar, sistematika dari penulisan laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

### a) BAB I PENDAHULUAN

Pada bab I ini terdiri atas latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah dan sistematika laporan.

### b) BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab II ini dibahas mengenai teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan.

### c) BAB III METODOLOGI

Pada bab III ini berisi alur penelitian yang dilakukan, metode, dan langkah-langkah dalam penelitian.

### d) BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab IV ini berisi tentang hasil penelitian, analisa data dan pembahasan

### e) BAB V PENUTUP

Pada bab V ini berisi tentang kesimpulan dari keseluruhan penelitian dan saran yang dapat diberikan.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

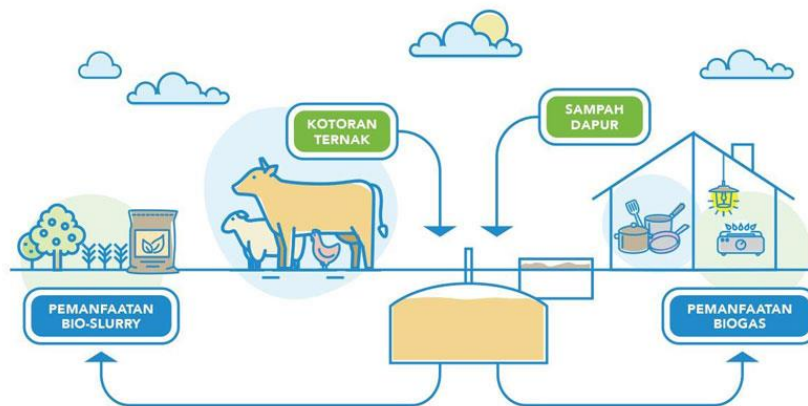
#### **2.1 Biogas**

Biogas merupakan energi alternatif yang dihasilkan melalui proses fermentasi anaerob menggunakan biomassa seperti kotoran ternak, limbah pabrik, sampah organik, namun kebanyakan biogas dibuat dari kotoran ternak (Mulyati, 2009). Biogas sangat cocok untuk digunakan pada daerah tertinggal, terdepan, dan terluar (3T) karena ketersediaan bahan baku yang melimpah. Pemanfaatan biogas dalam skala kecil adalah sebagai pengganti minyak tanah, kayu bakar, atau elpiji yang digunakan untuk memasak dan pada skala besar, biogas dapat digunakan sebagai pembangkit listrik. Biogas bersifat ramah lingkungan karena relatif lebih sedikit menghasilkan polusi serta tidak menyebabkan penumpukan limbah karena limbah dari biogas dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik pada tanaman.

Proses pembuatan biogas dilakukan secara fermentasi yaitu terbentuknya gas metana dalam kondisi anaerob dengan bantuan bakteri seperti *Methanobacterium*, *Methanobacillus*, *Methanococcus*, dan *Methanosarcina*. Proses fermentasi terjadi di dalam digester yang nantinya akan menghasilkan metana ( $\text{CH}_4$ ), karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), gas hidrogen ( $\text{H}_2$ ), gas nitrogen ( $\text{N}_2$ ), dan hidrogen sulfida ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Proses fermentasi memerlukan waktu 7 sampai 10 hari, namun semakin lama proses fermentasi dilakukan, maka semakin banyak biogas yang dihasilkan. Biogas dapat dihasilkan dengan memerlukan suhu yang optimum sebesar  $35^\circ\text{C}$  dan pH dengan *range* 6,4-7,9 (Artayana, Kusum, and Adnyana 2014). Kegiatan pengadukan pada proses pembuatan biogas sangat bermanfaat bagi bahan yang berada di dalam digester karena potensi material mengendap di dasar digester semakin kecil, sehingga seluruh material mengalami proses fermentasi anaerob secara merata.

Biogas tersusun dari beberapa senyawa yaitu metana ( $\text{CH}_4$ ), karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), hidrogen sulfida ( $\text{H}_2\text{S}$ ), amonia ( $\text{NH}_3$ ), hidrogen ( $\text{H}_2$ ), oksigen ( $\text{O}_2$ ), dan nitrogen ( $\text{N}_2$ ). Komposisi biogas yang dihasilkan tergantung pada jenis bahan baku yang akan digunakan sehingga berpengaruh pada tingkat konsentrasi dari metana ( $\text{CH}_4$ ) (Hamidi, Wardana, and Widhiyanuriyawan 2011). Semakin tinggi

kandungan metana ( $\text{CH}_4$ ) maka semakin besar nilai kalor pada biogas. Sebaliknya, semakin rendah kandungan metana ( $\text{CH}_4$ ) semakin rendah nilai kalor. Bahan baku biogas yang mengandung karbohidrat tinggi akan menghasilkan metana ( $\text{CH}_4$ ) yang rendah dan karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) yang tinggi, jika dibandingkan dengan yang mengandung protein dan lemak dalam jumlah tinggi. Biogas memiliki nilai kalor dengan kisaran 4800 – 6700 kkal/m<sup>3</sup> pada kandungan gas metana 50%, pada gas metana murni (100%) mempunyai nilai kalor 8900 kkal/m<sup>3</sup>. Pemurnian diperlukan untuk dapat menghilangkan senyawa berbahaya yang bersifat beracun dan korosif diantaranya adalah hidrogen sulfida ( $\text{H}_2\text{S}$ ), air ( $\text{H}_2\text{O}$ ), dan karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), serta dapat digunakan untuk menghasilkan kalor yang tinggi serta keselamatan pada penggunaan biogas (Rozaq 2016).



**Gambar 2.1** Plant Biogas (<https://www.biru.or.id>)

**Tabel 2.1** Komposisi Biogas

Jenis Gas	Volume (%)
Metana ( $\text{CH}_4$ )	50-70
Karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ )	25-50
Hidrogen sulfida ( $\text{H}_2\text{S}$ )	0-3
Oksigen ( $\text{O}_2$ )	1-3
Hidrogen ( $\text{H}_2$ )	1-5
Nitrogen ( $\text{N}_2$ )	0-0.3

(Sumber : Asmiarti, 2019)



## 2.2 Genset

Genset adalah suatu mesin listrik yang merubah energi kimia pada bahan bakar ke bentuk energi listrik dan panas. Gabungan antara *engine*, generator, dan kontrolernya disebut juga generator set (genset). Dalam sebuah pembangkit, putaran *engine* harus konstan agar frekuensi yang dikeluarkan generator selalu konstan 50 Hz atau 60 Hz. *Engine* merubah campuran udara dan bahan bakar (energi kimia) ke dalam energi mekanik. Dalam tugas akhir ini, genset yang digunakan adalah sebuah generator yang pada awalnya berbahan bakar utama bensin yang kemudian dilakukan modifikasi sedemikian rupa hingga generator ini bisa menggunakan bahan bakar biogas.

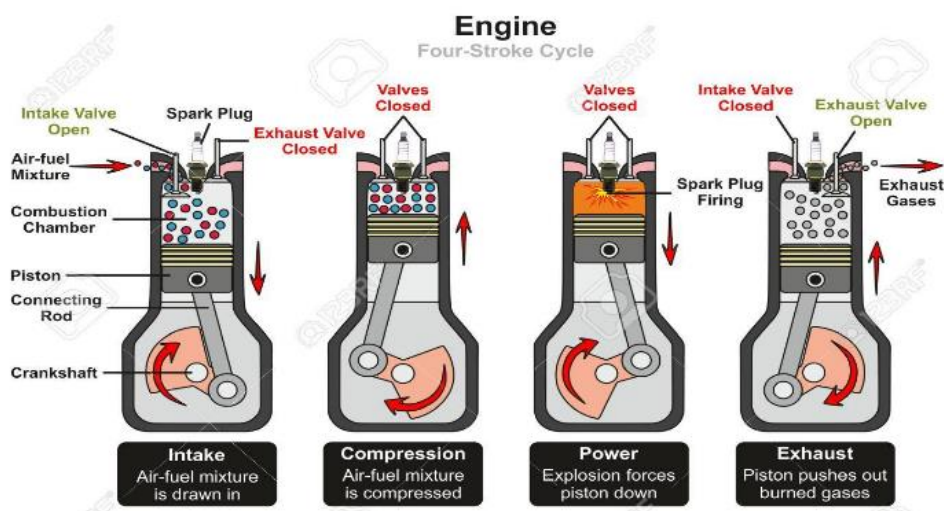


**Gambar 2.2** Genset Biogas (google.com)

## 2.3 Spark Ignition Engine

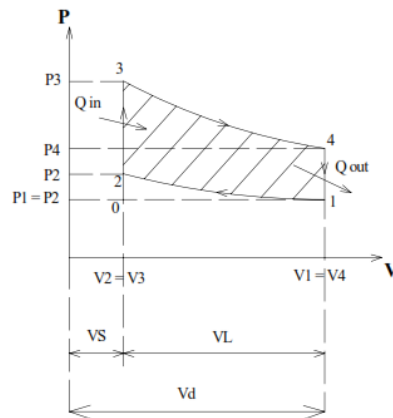
*Spark ignition Engine* adalah salah satu jenis mesin bakar yang membutuhkan pemicu berupa percikan bunga api untuk membakar campuran bahan bakar dan udara dalam ruang bakarnya. Penerapan biogas umumnya cenderung menggunakan mesin diesel dibandingkan mesin bensin, namun penerepan biogas relatif lebih mudah dikembangkan pada mesin bensin karena modifikasi untuk menyesuaikan sifat bahan bakar biogas dari kontruksi standar tidak banyak yaitu pada bagian pencampuran bahan bakar dan udara, rasio kompresi, dan sistem pengapian. Bahan bakar biogas pada mesin bensin dapat digunakan 100% hal ini dikarenakan adanya busi sehingga bahan bakar biogas akan cepat terbakar. Perubahan biogas menjadi

energi listrik dilakukan dengan memasukkan biogas ke dalam *conversion kit* yang berfungsi menurunkan tekanan gas dari plastik penyimpanan sesuai dengan tekanan operasional mesin dan mengatur laju aliran massa udara dan biogas sesuai dengan nilai stoikiometri *air-fuel ratio* (AFR) agar menghasilkan pembakaran yang sempurna. Kecepatan pembakaran biogas adalah 290 m/s, sedangkan kemampubakarannya adalah 4% hingga 14%, yang kemudian dua hal ini menjadikan biogas dapat memiliki efisiensi pembakaran yang tinggi. Nilai oktan sangat mempengaruhi dalam peningkatan rasio kompresi pada motor bensin. Biogas memiliki angka oktan yang tinggi yaitu 130, sebagai perbandingan, bensin memiliki angka oktan 90 hingga 94, sementara alkohol terbaik hanya 105. Rata-rata efisiensi pada mesin bensin untuk penggunaan biogas sebagai bahan bakar adalah sekitar 25%. Gambar 2.3 merupakan siklus kerja mesin 4 langkah yang terdiri dari siklus hisap (*intake*), siklus kompresi (*compression*), siklus pembakaran (*combustion*) atau siklus kerja (*power*), dan siklus buang (*exhaust*). Energi yang dihasilkan oleh reaksi pembakaran akan menyebabkan piston terdorong dan memutar poros mesin (Nuralamsyah, Triwiyatno, and Setiyono 2013).



**Gambar 2.3** Siklus Kerja Mesin 4 Langkah (wdrfree.com)

Berikut merupakan diagram P-V siklus :



**Gambar 2.4** Diagram P-V Siklus Otto (eprints.polsri.ac.id)

Gambar 2.4 merupakan diagram P-V siklus otto, yang menjelaskan proses – proses yang terjadi diantaranya sebagai berikut:

- a. Proses (0 – 1) = Langkah isap (udara murni) pada tekanan konstan.  
Selama langkah isap torak bergerak dari TMA menuju TMB, katup masuk terbuka dan katup buang tertutup. Gerakan torak memperbesar volume ruang bakar dan menciptakan ruang hampa (vacum) dalam ruang bakar. Akibatnya campuran udara dan bahan bakar terisap masuk ke dalam ruang bakar melalui katup masuk. Langkah isap berakhir ketika torak telah mencapai TMB.

$$W_{0-1} = P_0(V_1 - V_2) \quad (2.1)$$

- b. Proses (1 – 2) = Langkah kompresi isentropik  
Selama langkah kompresi katup isap tertutup dan torak bergerak kembali ke TMA dengan katup buang masih dalam keadaan tertutup. Gerakan torak tersebut mengakibatkan campuran udara dan bahan bakar yang ada di dalam ruang bakar tertekan akibat volume ruang bakar yang diperkecil, sehingga tekanan dan temperatur di dalam silinder meningkat.

$$W_{1-2} = (P_1V_1 - P_2V_2) \quad (2.2)$$

- c. Proses (2 – 3) = Proses pembakaran

Pada akhir langkah kompresi, busi pijar menyala sehingga campuran udara-bahan bakar yang telah memiliki tekanan dan temperatur tinggi terbakar. Pembakaran yang terjadi mengubah komposisi campuran udara bahan bakar menjadi produk pembakaran dan menaikkan temperatur dan tekanan dalam ruang bakar secara drastis.

$$Q_{in} = C_v(T_3 - T_2) \quad (2.3)$$

- d. Proses (3 – 4) = Langkah ekspansi (kerja)

Tekanan tinggi hasil dari proses pembakaran campuran udara-bahan bakar mengakibatkan torak terdorong menjauhi TMA. Dorongan ini merupakan kerja keluaran dari siklus mesin Otto. Dengan Bergeraknya torak menuju TMB, volume silinder meningkat sehingga temperatur dan tekanan dalam ruang bakar turun.

$$W_3 - W_4 = P_3V_3 - P_4V_4)k - 1 \quad (2.4)$$

- e. Proses (4 – 1)

Proses ini disebut sebagai proses pembuangan (pengeluaran kalor) pada volume konstan. Pada proses ini katup isap tertutup dan katup buang terbuka. Posisi piston berada di TMB.

$$Q_{out} = C_v(T_4 - T_1) \quad (2.5)$$

- f. Proses (1 – 0) = Langkah buang pada tekanan konstan

Katup buang terbuka ketika torak telah mencapai TMB. Torak terus bergerak kembali menuju TMA sehingga gas hasil pembakaran tertekan keluar dari ruang bakar melalui katup buang.

$$W_{1-0} = P_1(V_2 - V_1) \quad (2.6)$$

## 2.4 Hukum Keseimbangan Massa

Dasar yang digunakan untuk memodelkan ruang bakar dan genset biogas adalah hukum keseimbangan energi. Segala proses yang terjadi pada ruang bakar genset dimodelkan dalam bentuk persamaan matematika, sehingga proses yang terjadi di dalam *plant* bisa diartikan secara fisis. Hukum keseimbangan energi menyatakan bahwa laju perubahan energi yang tersimpan di dalam suatu sistem adalah sebanding dengan laju perubahan energi yang masuk ke dalam sistem dijumlahkan dengan energi yang dibangkitkan oleh sistem itu sendiri kemudian dikurangi dengan laju perubahan energi yang keluar dari sistem.

$$E_{sh} = E_{in} - E_{out} + Q \quad (2.7)$$

Dimana,

$$E_{sh} = \rho V c \frac{dT}{dt}$$

= Laju perubahan energi yang tersimpan (*storage*) dalam sistem (kJ/Kg)

$$E_{in} = m_{in} C_{in} T_{in}$$

= Laju perubahan energi yang masuk sistem (kJ/Kg)

$$E_{out} = m_{out} C_{out} T_{out}$$

= Laju perubahan energi yang keluar sistem (kJ/Kg)

$$Q = \dot{m}_{biogas} \times HHV_{biogas}$$

= Nilai kalor biogas (Joule)

## 2.5 Air-Fuel Ratio (AFR)

Laju aliran massa udara dan biogas berpengaruh pada karakteristik pembakaran. Udara dan bahan bakar merupakan bagian paling penting yang dibutuhkan agar terjadi pembakaran, kedua zat ini akan bereaksi di dalam ruang bakar sehingga pembakaran terjadi (Rahmawati, Stiyabudi, and Agustiani 2009). Semakin besar tingkat pembebanan yang diberikan, maka genset membutuhkan bahan bakar yang semakin banyak. Rasio atau perbandingan antara udara dan biogas sesuai dengan kondisi biogas diperlukan dalam menghasilkan pembakaran yang sempurna, yang mana dapat dituliskan sebagai berikut:

$$AFR_{sto} = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \quad (2.8)$$

Dimana,

$AFR = \text{Air-Fuel Ratio}$

$\dot{m}_a = \text{Laju aliran massa udara} \left( \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right)$

$\dot{m}_f = \text{Laju aliran massa bahan bakar} \left( \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right)$

Pada proses pembakaran, nilai AFR yang digunakan memiliki nilai yang berbeda-beda. Hal ini bergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan. Adapun kisaran nilai AFR pada berbagai jenis gas dapat dilihat pada tabel 2.2 di bawah ini

**Tabel 2.2** Kisaran nilai *AFR* pada bahan bakar gas

<b>Jenis Gas</b>	<b>Stoichiometric AFR</b>
CO	2.87
H <sub>2</sub>	2.82
CH <sub>4</sub>	10.42
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	12.43
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	18.14
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	26.11
Natural Gas	8.43

(Sumber : *Combustion Booklet*, 2013)

## 2.6 Nilai Kalor Pembakaran Biogas

Panas pembakaran dari satu bahan bakar adalah panas yang dihasilkan dari pembakaran sempurna bahan bakar pada volume konstan dalam kalorimeter dan dinyatakan dalam *High Heating Value* (HHV) dan *Lower Heating Value* (LHV). *High Heating Value* adalah panas dari bahan bakar yang masih termasuk *latent heat* dari uap air hasil pembakaran. *Lower Heating Value* adalah panas pembakaran dari bahan bakar setelah dikurangi panas laten (*latent heat*) dari uap air hasil pembakaran. Nilai kalor pembakaran untuk beberapa jenis bahan bakar dapat dilihat pada tabel 2.3 di bawah ini

**Tabel 2.3** Nilai Kalor Pembakaran Beberapa Jenis Bahan Bakar

Komponen	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
HHV (kJ/Nm <sup>3</sup> )	12475	12633	39819	70293	63414
LHV (kJ/Nm <sup>3</sup> )	10783	12633	35883	64345	59457

(Sumber : Trisnayanti, 2017)

Gas metana (CH<sub>4</sub>) pada biogas merupakan unsur primer dan menjadi parameter utama dalam menentukan kualitas hasil produksi pengolahan biogas. Hal ini dikarenakan energi yang ada dalam biogas bergantung dari konsentrasi gas metana (CH<sub>4</sub>). Kisaran biogas yang ideal adalah mengandung 50-70% gas metana dan 30-40% karbondioksida. Semakin tinggi kandungan gas metana, maka semakin besar kandungan energi kalor pada biogas, begitu pula sebaliknya. Jika dibandingkan dengan bahan bakar lainnya biogas memiliki nilai kalor yang lebih sehingga panas yang dihasilkan lebih banyak. Reaksi pembakaran sempurna pada gas metana menghasilkan gas karbondioksida dan uap air. Berikut merupakan reaksi pembakaran metana (CH<sub>4</sub>)



Gas metana (CH<sub>4</sub>) dalam penggunaannya akan terjadi proses penguraian bahan organik sehingga bau dari bahan baku biogas berkurang, selain itu, biogas menghasilkan sedikit asap jika dibandingkan dengan kayu bakar dan tidak menimbulkan efek pencemaran lingkungan yang serius atau bisa dikatakan penggunaan biogas ramah lingkungan. 1 m<sup>3</sup> biogas setara dengan 0,56 kg gas elpiji, 0,62 liter minyak tanah, 0,52 liter minyak solar atau 3,50 kg kayu bakar. Tabel 2.4 menunjukkan nilai HHV dan LHV dari masing-masing kandungan metana pada biogas.

**Tabel 2.4** Nilai HHV dan LHV Biogas

Kandungan Metana pada Biogas	HHV (kJ/kg)	LHV (kJ/kg)
50%	22.350	
60%	24.220	17.650
70%	26.590	

(Sumber : Rozaq, 2016)

## 2.7 Temperatur Ruang Bakar Genset Berbahan Bakar Biogas

Temperatur yang sesuai dibutuhkan untuk menghasilkan pembakaran yang sempurna dengan kebutuhan pembakaran biogas di ruang bakar genset. Semakin besar kandungan metana dalam biogas, temperatur yang dibutuhkan untuk pembakaran semakin tinggi, sehingga nilai AFR rendah. Namun pada perubahan beban temperatur pembakaran tidak mengalami perubahan meskipun di setiap penambahan beban laju aliran biogas dan udara meningkat, selama AFR yang digunakan masih tetap nilai temperatur pembakaran tidak berubah. Kenaikan temperatur akan membuat biogas menjadi lebih mudah terbakar, namun jika temperatur yang dihasilkan terlalu tinggi atau rendah akan mengakibatkan pembakaran menjadi tidak sempurna. Biogas dengan kandungan metana sebesar 50% ,60%, dan 70% memiliki temperatur pembakaran sebesar 595°C, 675°C, 750°C.

**Tabel 2.5** Temperatur Pembakaran Tiap Tingkatan Kandungan Metana pada Biogas

<b>Kandungan Metana pada Biogas</b>	<b>Temperatur (°C)</b>
50%	595
60%	675
70%	750

(Sumber : Johns Environmental Pty Ltd, 2017)

## 2.8 *Excess Air*

Rasio kontrol pada ruang bakar genset biogas ini memiliki peranan yang sangat penting dalam meningkatkan efisiensi dari genset serta berfungsi menjaga komposisi udara dan biogas yang tepat sehingga terjadi proses pembakaran sempurna. Ketika jumlah udara yang digunakan terlalu sedikit, maka akan menyebabkan tidak terbakarnya bahan bakar di ruang bakar, rendahnya efisiensi pembakaran, dan tingginya emisi gas karbon dioksida, sebaliknya, jika jumlah udara yang digunakan berlebih, maka akan menyebabkan menurunnya temperatur produk dan berkurangnya emisi pembakaran. Jarang sekali proses pembakaran sempurna akibat tidak tepatnya rasio kontrol udara dan bahan bakar yang



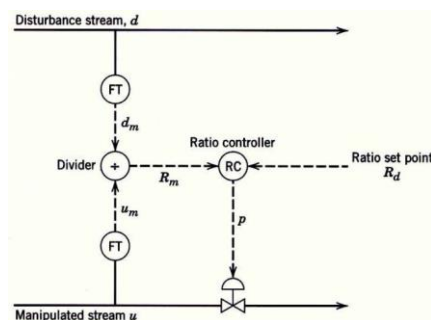
direaksikan, sehingga timbul *excess air*. Berdasarkan kondisi stoikiometri atau secara teoritis, jumlah oksigen dan bahan bakar yang dicampurkan untuk proses pembakaran diasumsikan terkonsumsi habis, tanpa ada sisa oksigen yang tidak terkombinasi. Berdasarkan kondisi sesungguhnya, diperlukan *excess air* atau udara berlebih untuk menghasilkan proses pembakaran yang sempurna. Jumlah udara yang *disupply* biasanya lebih besar atau lebih kecil dari udara teoritis (Pradana, 2016).

## 2.9 Rasio Kontrol

Dalam proses yang berhubungan dengan reaksi kimia seringkali membutuhkan perbandingan massa antara satu reaktan dengan reaktan lain-lain, maka pengendalian rasio dari laju alir massa dua reaktan sangatlah diperlukan. Rasio kontrol dapat diaplikasikan pada berbagai fase zat, dengan syarat laju alir zat tersebut tetap kontinu selama dilakukan pengendalian, contoh penerapan dari rasio kontrol adalah untuk menjaga rasio stoikiometri dari dua umpan reaktan yang masuk ke reaktor (Pradana, 2016). Pada genset biogas dimana reaktan adalah udara dan biogas, sedangkan reaktor adalah ruang bakar yang akan mereaksikan kedua reaktan menjadi produk yaitu daya. Umumnya kedua variabel tersebut merupakan laju alir, kemudian variabel yang dimanipulasi diberikan simbol  $u$  dan variabel gangguan  $d$ .

$$R = \frac{u}{d}$$

Variabel yang dikontrol akan dibandingkan dengan variabel lain yang individual yaitu variabel gangguan  $d$ . Berdasarkan persamaan diatas  $u$  dan  $d$  adalah variabel fisik bukan variabel deviasi. Rasio control dapat diimplementasikan dalam 2 konfigurasi dasar seperti pada gambar 2.5 dan 2.6 berikut.



**Gambar 2.5** Konfigurasi 1 Rasio Kontrol (sites.chemengr.ucsb.edu)

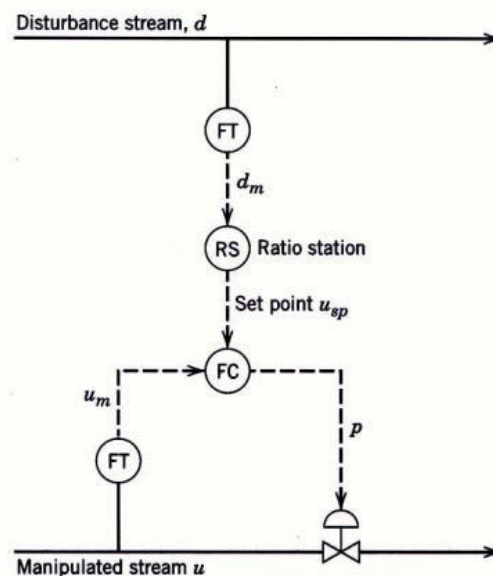
Pada konfigurasi pertama kedua aliran yaitu aliran *disturbance* dan aliran yang dimanipulasi diukur. Perhitungan rasio adalah sebagai berikut:

$$R = \frac{u_m}{d_m}$$

*Output* dari elemen divider dikirim ke *ratio controller* (RC) yang akan membandingkan perhitungan  $R_m$  dengan rasio yang diinginkan atau rasio *set point*  $R_d$ . Hasil perbandingan digunakan sebagai *set point* untuk mengatur aliran manipulasi ( $u$ ). Keuntungan utama dari konfigurasi 1 adalah pengukuran rasio  $R_m$  dihitung, sedangkan kekurangannya adalah elemen pembagi harus berada dalam *loop* sehingga akan membuat *process gain* menjadi nonlinear.

$$R_m = \left( \frac{\partial m}{\partial m} \right) d = \frac{1}{d}$$

Proses gain diatas berbanding terbalik dengan laju aliran *disturbance*  $d$  sehingga menjadi nonlinear. Karena itu konfigurasi rasio kontrol yang lebih sering dipakai adalah konfigurasi 2 yaitu sebagai berikut



**Gambar 2.6** Konfigurasi 2 Rasio Kontrol (sites.chemengr.ucsb.edu)

Konfigurasi ke 2 rasio kontrol digunakan untuk menjaga agar rasio dua laju alir tetap, dalam konfigurasi ke 2, laju aliran yang dimanipulasi dan laju aliran gangguan diukur dan dikirimkan ke ratio station (RS), yang mana akan mengalikan sinyal ini dan mengatur gain  $K_r$ , yang menghasilkan nilai rasio yang ditentukan. Sinyal keluaran dari *ratio station* kemudian digunakan menjadi setpoint ( $U_{sp}$ ) untuk *flow controller* yang mengatur laju aliran termanipulasi. Keuntungan utama dengan konfigurasi 2 ini adalah proses gain tetap konstan.

## 2.10 Proportional Integral Derivative

Pengendali PID merupakan pengendali konvensional yang banyak digunakan di industri. Pengendali ini terdiri atas pengendali Proportional (P), pengendali Integral (I) dan pengendalian *Differential* (D). Masing-masing pengendali memiliki karakter yang berbeda dan akan bekerja sesuai dengan keadaan *plan* atau sistem yang dikendalikan.

### 2.10.1 Pengendali Proportional

Pengendali proporsional memiliki 2 parameter utama yaitu pita proporsional (*proportional band*) dan konstanta proporsional. Sistem kerja kontroler ditunjukkan oleh pita proporsional, sedangkan faktor faktor penguatan terhadap nilai *error* ditunjukkan oleh konstanta proporsional  $K_p$ . Berikut adalah persamaan yang menunjukkan hubungan antara pita proporsional (PB) dengan konstanta proporsional ( $K_p$ ):

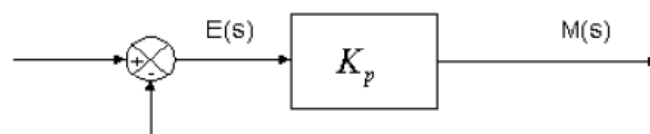
$$PB = \frac{1}{K_p} \times 100\%$$

Dengan :

$$PB = \text{Proportional Band}$$

$$K_p = \text{Gain Proses}$$

Diagram blok pengendali proportional ditunjukkan seperti pada gambar 2.7.



**Gambar 2.7** Diagram Blok pengendali Proportional

Penggunaan pengendali proporsional harus memperhatikan hal – hal berikut:

- Nilai  $K_p$  kecil, kontroler proporsional hanya mampu melakukan koreksi kesalahan yang kecil, sehingga akan menghasilkan respon sistem yang lambat.
- Nilai  $K_p$  dinaikkan, respon sistem menunjukkan semakin cepat mencapai keadaan *steady*.
- Jika nilai  $K_p$  diperbesar sehingga mencapai harga yang berlebihan, akan mengakibatkan sistem bekerja tidak stabil, atau respon sistem akan berosilasi

### 2.10.2 Pengendali Integral

Pengendali integral memiliki karakteristik seperti halnya sebuah integral. *Output* dari *controller* dapat dipengaruhi oleh perubahan yang sebanding dengan nilai sinyal *error*. *Output* dari *controller* ini merupakan jumlah yang berkelanjutan dari perubahan masukannya. Jika sinyal *error* tidak mengalami perubahan, nilai *output* tidak akan berubah seperti sebelum terjadinya perubahan *input*. *Transfer function* dari *unit control* integral adalah sebagai berikut :

$$U = \frac{1}{T_I} K_c \int e. dt$$

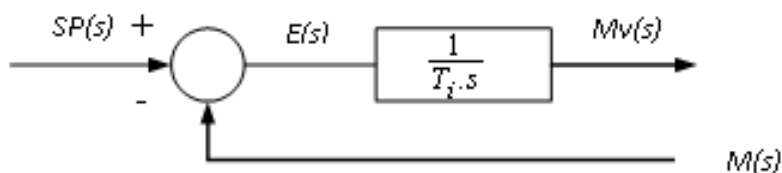
Dimana,

$T_I =$  Integral time

$e =$  Error (input dari unit control)

$K_c =$  Gain dari controller

Diagram blok pengendali integral ditunjukkan oleh gambar 2.8 dibawah ini :



**Gambar 2.8** Diagram Blok Pengendali Integral

Pengendali integral memiliki beberapa karakteristik sebagai berikut :

- *Output* dari *controller* membutuhkan jeda waktu tertentu, sampai *controller* integral melakukan aksi memperlambat respon.
- Saat sinyal *error* bernilai 0, *output* dari kontroler integral akan bertahan pada nilai sebelumnya.
- Apabila sinyal *error* tidak bernilai 0, *output* akan menunjukkan kenaikan atau penurunan yang dipengaruhi oleh besarnya sinyal *error* dan nilai  $K_i$
- Konstanta integral  $K_i$  yang bernilai besar akan mempercepat hilangnya *offset*. Tetapi apabila nilai konstanta  $K_i$  terlalu besar, maka akan mengakibatkan peningkatan osilasi dari sinyal *output controller*.

### 2.10.3 Pengendali *Derivative*

*Output* dari pengendali *derivative* memiliki sifat seperti halnya suatu operasi derivatif. Perubahan yang mendadak pada *input controller*, akan mengakibatkan perubahan yang sangat besar dan cepat. *Transfer function* dari kontrol *derivative* adalah sebagai berikut :

$$U = K_c T_D \frac{de}{dt}$$

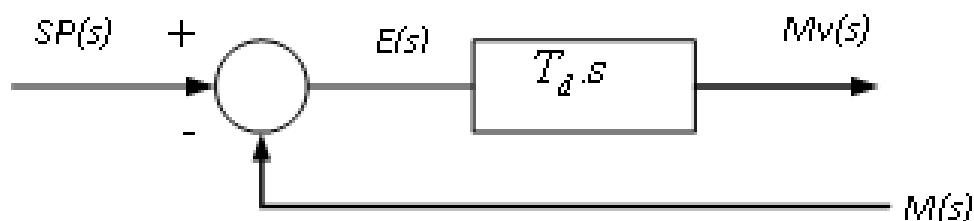
Dimana,

$K_c = \text{gain}$

$e = \text{error}$

$T_D = \text{derivative time}$

Diagram blok pengendali differensial ditunjukkan oleh gambar 2.9 dibawah ini :



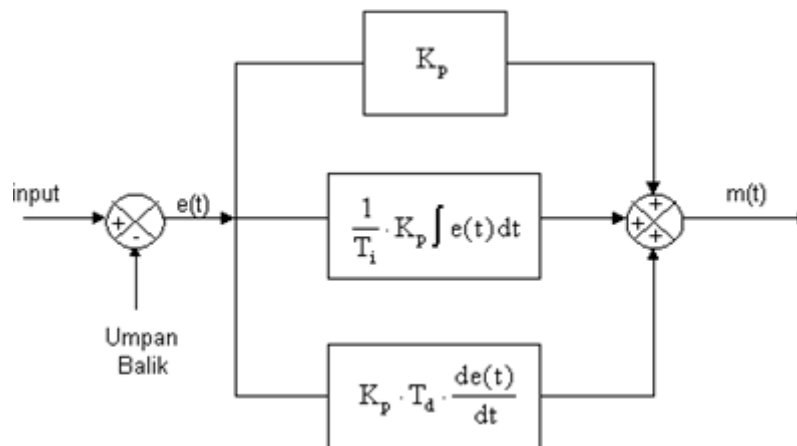
**Gambar 2.9** Diagram Blok Pengendali *Derivative*

Adapun untuk karakteristik *controller derivative* adalah sebagai berikut:

- *Controller* ini tidak dapat menghasilkan keluaran bila tidak ada perubahan pada masukannya (berupa sinyal *error*).
- Apabila sinyal *error* berubah terhadap waktu, maka *output* yang dihasilkan *controller* tergantung pada nilai  $T_D$  dan laju perubahan sinyal *error*.
- *Controller derivative* memiliki karakter untuk mendahului, sehingga *controller* ini dapat menghasilkan koreksi yang signifikan sebelum *error* menjadi sangat besar. *Controller derivative* dapat meredam adanya osilasi pada keadaan *steady*. Jadi *controller* ini apabila diterapkan pada suatu sistem yang tidak stabil, maka cenderung akan memperbesar osilasi dari respon sistem.

Untuk menutupi kekurangan dari masing – masing mode *control*, maka ketiga mode *control* tersebut dapat saling dikombinasikan menjadi mode *control* PI, PD atau PID. Dalam kombinasi tersebut, nilai *error*  $e(t)$  yang dihasilkan dari pengurangan antara *Set Variable* (SV) dengan *Process Variable* (PV) dikalikan dengan *gain* proporsional, *gain* integral, dan *gain derivative*. Dari hasil perkalian tersebut, dikombinasikan dan dihasilkan aksi *control* untuk memanipulasi bukaan dari aktuator.

Diagram blok kombinasi *mode* kontrol PID ditunjukkan seperti pada gambar 2.10 dibawah ini.



**Gambar 2.10** Diagram Blok Pengendali PID

*Output controller* PID merupakan jumlahan dari *output controller* proporsional, *output controller* integral dan *output controller derivative*. Gambar 2.10 menunjukkan hubungan *input* dan *output* pada pengendalian PID

$$u(t) = K_c(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t)dt + T_D \frac{de}{dt})$$

Dimana,

$u(t)$  = sinyal *control*

$e(t)$  = *error*

$K_c$  = *gain* *kontroller*

$T_I$  = *integral time*

$T_D$  = *derivative time*

Karakteristik *controller* PID sangat dipengaruhi oleh kontribusi besar dari ketiga parameter P, I dan D. Proses *tuning* konstanta  $K_p$ ,  $T_i$ , dan  $T_d$  akan mengakibatkan penonjolan sifat dari masing-masing elemen. Satu atau dua dari ketiga konstanta tersebut dapat di-*tuning* lebih menonjol dibanding yang lain. Konstanta yang menonjol itulah akan memberikan pengaruh pada respon sistem secara keseluruhan.

### 2.11 *Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)*

Suatu sistem yang mengumpulkan data dan menganalisisnya secara *real time*. Fokus SCADA adalah pada tingkat pengawasan dan pemantauan. Sistem ini merupakan kombinasi antara *monitoring* (pengawasan), *controlling* (pengendalian), dan *Data Acquisition* (pengambilan dan perekaman data). Ketiga fungsi tersebut dapat dipenuhi dengan mewujudkan dalam bentuk *hardware* maupun *software*. Pengaplikasiannya SCADA membutuhkan *display* untuk menyalurkan informasi data yang didapatkan kepada operator yang biasa disebut *Human Machine Interface (HMI)*. Operator dapat mengawasi dan mengendalikan plan dengan mudah. Untuk mewujudkan suatu HMI yang baik, diperlukan batasan standar dalam pembuatannya.

### 2.12 Control Valve

Aktuator yang digunakan yaitu *control valve* dengan penggerak motor servo. Aktuator berfungsi untuk membuka atau menutup *valve* yang dilalui oleh bahan bakar biogas. Besar ataupun kecilnya bukaan *valve* akan mempengaruhi besar atau kecilnya laju aliran pada biogas. Persamaan matematis untuk *control valve* dengan penggerak motor servo adalah sebagai berikut :

Untuk menghitung *Gain Control Valve* ( $K_{CV}$ ) dapat menggunakan persamaan berikut:

$$K_{CV} = \frac{\text{kadar metana maksimum} - \text{kadar metana minimum}}{\text{perubahan maksimum}} \quad (2.10)$$

Untuk menghitung *Gain I/P* ( $G_t$ )

$$G_t = \frac{\text{span output (Psi)}}{\text{span input (mA)}} \quad (2.11)$$

Hasil dari persamaan di atas dikalikan untuk mendapatkan *gain total* ( $K_v$ )

$$K_v = G_t \times K_{CV} \quad (2.12)$$

*Time constant control valve* ( $\lambda$ ) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$\lambda = TV(\Delta Q + R) \quad (2.13)$$

Sehingga, didapatkan persamaan fungsi transfer dari *control valve*:

$$G_{CV} = \frac{K_v}{\lambda s + 1} \quad (2.14)$$

### 2.13 Sensor Gas Metana

Sensor berfungsi untuk mendeteksi gas metana yang dihasilkan oleh sistem biogas. Prinsip kerja dari sensor adalah nilai HHV di tingkatan kandungan metana menjadi *input* dan konsentrasi pada tiap tingkatan kandungan metana menjadi *output*. Keluaran dari sensor gas metana digunakan untuk perhitungan AFR stoikiometri. Berikut merupakan model matematis dari sensor gas metana.

$$\frac{u(s)}{HHV(s)} = \frac{K_{metana}}{t_{metana} s + 1} \quad (2.15)$$



Dengan,

$HHV(s)$  = HHV yang terbaca (kJ/kg)

$u(s)$  = Sinyal *output* temperatur sensor gas metana (mol)

$K_{\text{metana}}$  = Gain sensor gas metana

$t_{\text{metana}}$  = *Time constant* sensor gas metana

#### 2.14 Sensor Oksigen *Excess Air*

Sensor berfungsi untuk mendeteksi oksigen *excess air* yang dibutuhkan oleh sistem pembakaran biogas. Prinsip kerja dari sensor adalah nilai temperatur pembakaran yang dihasilkan dari perhitungan stoikiometri menjadi *input* dan tambahan udara sesuai kebutuhan tiap tingkatan kandungan metana menjadi *output*. Berikut merupakan model matematis dari sensor gas metana.

$$\frac{u(s)}{T(s)} = \frac{K_{O_2}}{t_{O_2}s+1} \quad (2.16)$$

Dengan,

$T(s)$  = Temperatur yang terbaca (°C)

$u(s)$  = Sinyal *output* temperatur sensor oksigen *excess air* (%)

$K_T$  = Gain temperatur sensor oksigen *excess air*

$t_{O_2}$  = *Time constant* sensor oksigen *excess air*

#### 2.15 *Temperature Transmitter*

*Temperature transmitter* diperlukan sebagai acuan bukaan dari motor servo untuk mengalirkan udara dan biogas sesuai kebutuhan temperatur dan dapat digunakan untuk dapat mengatur temperatur pembakaran yang dibutuhkan oleh ruang bakar genset biogas serta mentransmisikan sinyal pembacaan menuju ruang bakar genset. Apabila temperatur sesuai dengan *set point* maka pembakaran yang dihasilkan sempurna sehingga rasio kontrol pada ruang bakar genset berbahan bakar biogas dikatakan berhasil. Input dari *temperature transmitter* ini berupa besaran fisis temperatur dengan *range* 0-1000°C untuk dikonversi menjadi arus

listrik dengan *range* 0-5 volt. Berikut merupakan model matematis dari *temperature transmitter*:

$$\frac{u(s)}{T(s)} = \frac{K_T}{t_T s + 1} \quad (2.17)$$

Dengan,

$T(s)$  = Temperatur yang terbaca ( $^{\circ}\text{C}$ )

$u(s)$  = Sinyal *output* temperatur *temperature transmitter* (volt)

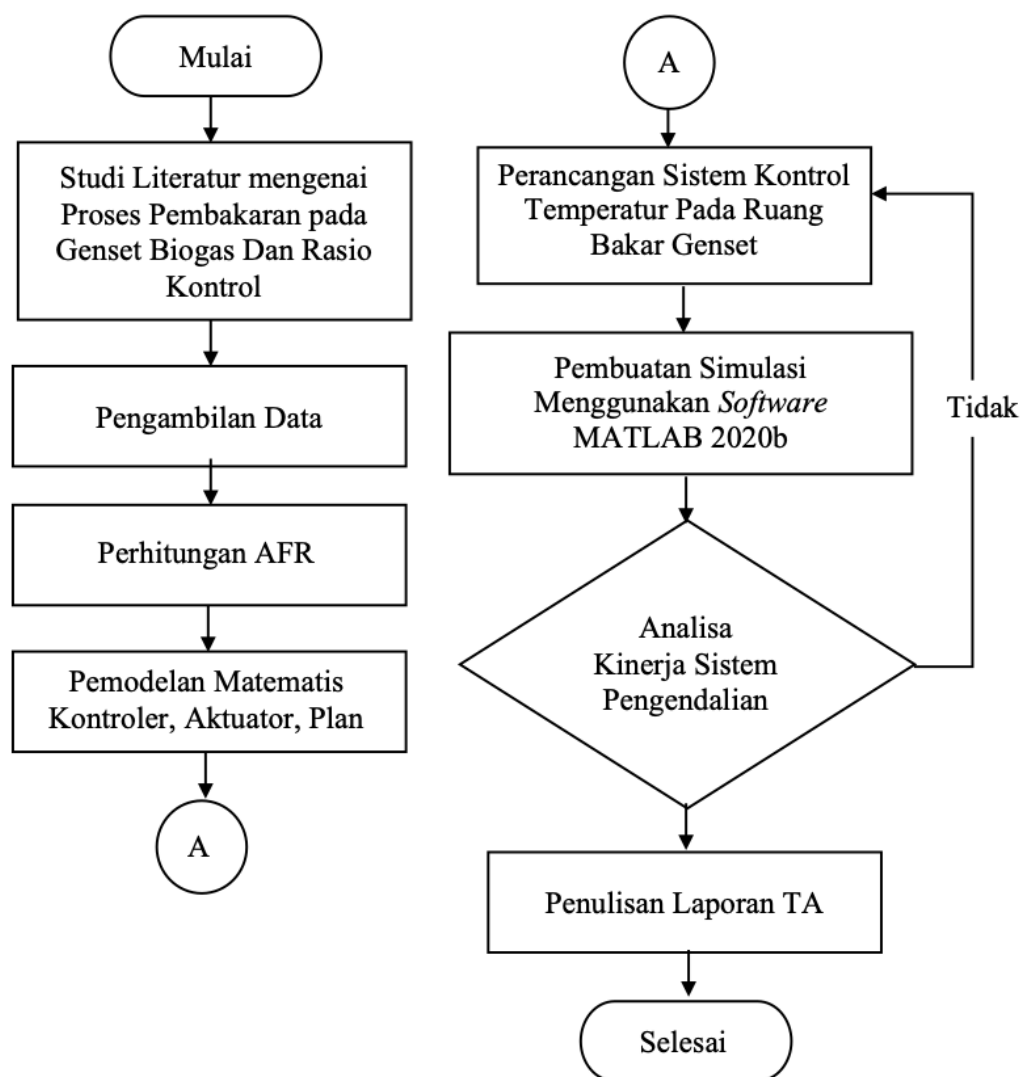
$K_T$  = Gain temperatur *temperature transmitter*

$t_T$  = *Time constant temperature transmitter*

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Alur Penelitian

Agar tujuan penelitian dapat dicapai, maka digunakan metodologi penelitian sesuai dengan diagram alir yang ditampilkan sebagai berikut:



**Gambar 3.1** Diagram Alir Metodologi Penelitian

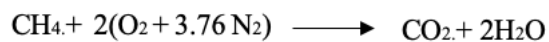
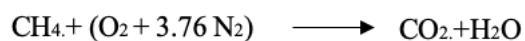
Pada tahap awal dimulai dari studi literatur mengenai wawasan dan pengetahuan yang berhubungan dengan sistem rasio kontrol pada ruang bakar genset berbahan bakar biogas. Sebelumnya harus diketahui terlebih dahulu nilai *set point*, *process variable* dan *manipulated variable*. Pada penelitian ini telah ditentukan *set point* yaitu standar temperatur pembakaran yang digunakan serta beban yang diberikan ke genset biogas. *Process variable* nya adalah temperatur ruang bakar genset biogas. Sedangkan *manipulated variable* adalah *mass flow rate* biogas dan udara. Langkah awal untuk mendapatkan pembakaran yang sempurna adalah melakukan perhitungan perbandingan biogas dan udara menggunakan persamaan stoikiometri untuk melihat temperatur pembakaran yang dihasilkan apakah membutuhkan penambahan atau pengurangan *excess air* untuk menghasilkan temperatur pembakaran yang sesuai dengan kebutuhan pada kandungan metana 50%, 60%, dan 70%.

### 3.2 Pengumpulan Data

Setelah melakukan studi literatur, selanjutnya dilakukan pengambilan data pada jurnal dan penelitian terdahulu yang sudah dipelajari yaitu nilai HHV pada kandungan metana biogas 50%, 60%, dan 70% sebesar 22350 kJ/kg, 24220 kJ/kg, dan 26590 kJ/kg dengan temperatur pembakaran sebesar 595°C, 675°C, dan 750°C, serta *mass flow rate* udara dan biogas pada pembebanan 100-1200 watt. Data kandungan metana dan temperatur pembakaran dibutuhkan sebagai *set point* dari plan, sedangkan data *mass flow rate* udara dan biogas pada pembebanan 100-1200 watt digunakan untuk pemodelan aktuator serta perhitungan temperatur pembakaran melalui persamaan hukum kesetimbangan energi.

### 3.3 Perhitungan *Air-Fuel Ratio* (AFR) Stoikiometri

Perhitungan nilai AFR (*Air Fuel Ratio*) digunakan untuk mengetahui perbandingan antara *mass flow rate* udara dan biogas yang dibutuhkan pada kandungan metana 50%, 60%, dan 70% melalui persamaan berikut.



a. Biogas

Massa atom C dalam  $\text{CH}_4$

$$\begin{aligned} \text{C} &= \text{MW C} \times 1 & (3.1) \\ &= 12 \times 1 \\ &= 12 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

Massa atom H dalam  $\text{CH}_4$

$$\begin{aligned} \text{H} &= \text{MW H} \times 4 & (3.2) \\ &= 1 \times 4 \\ &= 4 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

Sehingga kandungan metana sebagai berikut :

$$\text{CH}_4 = 12 + 4 = 16 \text{ g/mol}$$

b. Udara

Massa atom O dalam  $\text{O}_2$

$$\begin{aligned} \text{O} &= \text{MW O} \times 2 & (3.3) \\ &= 16 \times 2 \\ &= 32 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

Massa atom N dalam  $\text{N}_2$

$$\begin{aligned} \text{N} &= \text{MW N} \times 2 & (3.4) \\ &= 14 \times 2 \\ &= 28 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

Karena udara mengandung  $3.76 \text{ N}_2$  maka :

$$\text{N} \times 3.76 = 28 \times 3.76$$

$$\text{N} = 105.28 \text{ g/mol}$$

Sehingga kandungan udara total sebagai berikut :

$$2(\text{O}_2 + 3.76 \text{ N}_2) = 2 ( 32 + 105.28) = 274.56 \text{ g/mol}$$

c. AFR Stoikiometri Kandungan Metana 50%

$$\text{CH}_4 = 16 \times 0,5 + 44 \times 0,5 = 30 \text{ g/mol}$$

$$\text{O} = 16 \times 2 = 64 \text{ g/mol}$$

$$\text{Udara Total} = 2(\text{O}_2 + 3.76 \text{ N}_2) = 2 (32 + 105.28) = 274.56 \text{ g/mol}$$

$$\begin{aligned} AFR_{sto} &= \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} & (3.5) \\ &= \frac{30}{274.56} \\ &= \frac{1}{9,152} \end{aligned}$$

d. AFR Stoikiometri Kandungan Metana 60%

$$\text{CH}_4 = 16 \times 0,6 + 44 \times 0,4 = 27,2 \text{ g/mol}$$

$$\text{O} = 16 \times 2 = 64 \text{ g/mol}$$

$$\text{Udara Total} = 2(\text{O}_2 + 3.76 \text{ N}_2) = 2 (32 + 105.28) = 274.56 \text{ g/mol}$$

$$\begin{aligned} AFR_{sto} &= \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} & (3.6) \\ &= \frac{27,2}{274.56} \\ &= \frac{1}{10,09} \end{aligned}$$

e. AFR Stoikiometri Kandungan Metana 70%

$$\text{CH}_4 = 16 \times 0,7 + 44 \times 0,3 = 24,4 \text{ g/mol}$$

$$\text{O} = 16 \times 2 = 64 \text{ g/mol}$$

$$\text{Udara Total} = 2(\text{O}_2 + 3.76 \text{ N}_2) = 2 (32 + 105.28) = 274.56 \text{ g/mol}$$

$$\begin{aligned} AFR_{sto} &= \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} & (3.7) \\ &= \frac{24,4}{274.56} \\ &= \frac{1}{11,25} \end{aligned}$$

Dimana,

$\dot{m}_a$  = Laju aliran massa udara  $\left(\frac{Kg}{s}\right)$

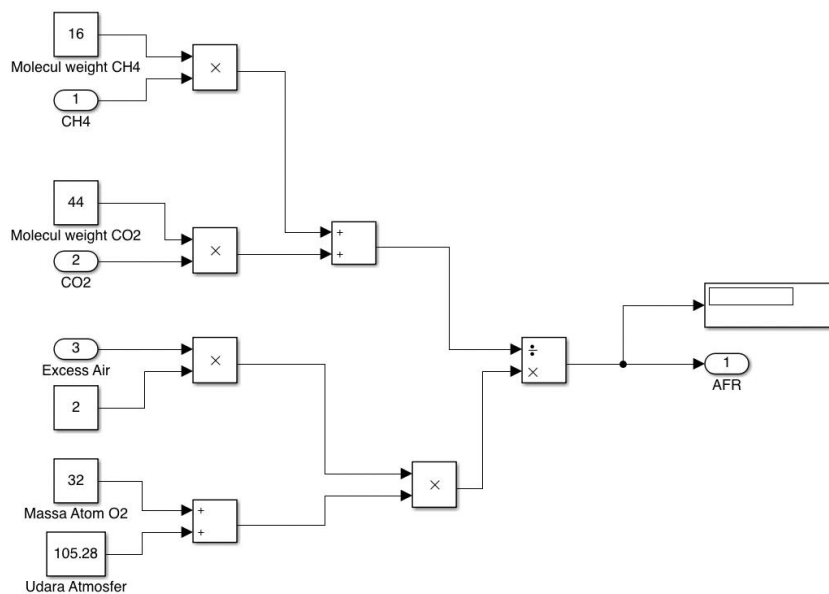
$\dot{m}_f$  = Laju aliran massa biogas  $\left(\frac{Kg}{s}\right)$

MW C = *Molecule Weight* atom C

MW H = *Molecule Weight* atom H

MW N = *Molecule Weight* atom N

MWair = *Molecule Weight* udara



**Gambar 3. 2** Perhitungan AFR Stoikiometri pada Simulink

### 3.4 Pemodelan Matematis

Pemodelan ruang bakar dan genset biogas dilakukan berdasarkan alur diagram blok sistem pengendalian, dalam hal ini aktuator yang digunakan adalah *control valve* untuk mengatur laju aliran udara dan biogas. Temperatur transmitter digunakan untuk memonitor temperatur dari ruang bakar genset, serta sensor kandungan metana dan oksigen *excess air* untuk memonitor kandungan dalam sistem biogas untuk perhitungan stoikiometri. Pemodelan matematis keseluruhan akan secara runtut disajikan sebagai berikut :

### 3.4.1 Pemodelan Ruang Bakar Genset Berbahan Bakar Biogas

Untuk memperoleh hasil pembakaran sempurna, diperlukan temperatur pembakaran yang sesuai dengan kebutuhan biogas dengan kandungan metana yang digunakan yaitu 50%, 60%, dan 70%. Perbandingan antara biogas dan udara yang didapatkan dari perhitungan stoikiometri sesuai dengan tingkatan kandungan metana yang dialirkan ke ruang bakar genset. Berikut merupakan persamaan hukum kesetimbangan energi pada ruang bakar genset biogas:

$$E_{st} = E_{in} - E_{out} + Q \quad (3.6)$$

$$E_{st} = \rho V c \frac{dT}{dt}$$

= Laju perubahan energi yang tersimpan (*storage*) dalam sistem (kJ/Kg)

$$E_{in} = m_{in} \cdot C_{in} \cdot T_{in}$$

= Laju perubahan energi yang masuk sistem (kJ/Kg)

$$E_{out} = m_{out} \cdot C_{out} \cdot T_{out}$$

= Laju perubahan energi yang keluar sistem (kJ/Kg)

$$Q = \dot{m}_{biogas} \times HHV_{biogas}$$

= Nilai kalor biogas (Joule)

Apabila dijabarkan, dapat ditulis lagi sebagai berikut:

$$\rho V c \frac{dT}{dt} = \dot{m}_{in} C_{in} T_{in} - \dot{m}_{out} C_{out} T_{out} + \dot{m}_{biogas} HHV_{biogas} \quad (3.7)$$

Dimana,

$\rho$  = Massa jenis biogas (Kg/m<sup>3</sup>)

$V_{Ruang\ Bakar}$  = Volume ruang bakar genset biogas (m<sup>3</sup>)

$Cv_{Udara}$  = Kalor spesifik udara (kJ/Kg.°C)

$Cv_{Biogas}$  = Kalor spesifik biogas (kJ/Kg.°C)

$T_{in}$  = Temperatur masuk (°C)

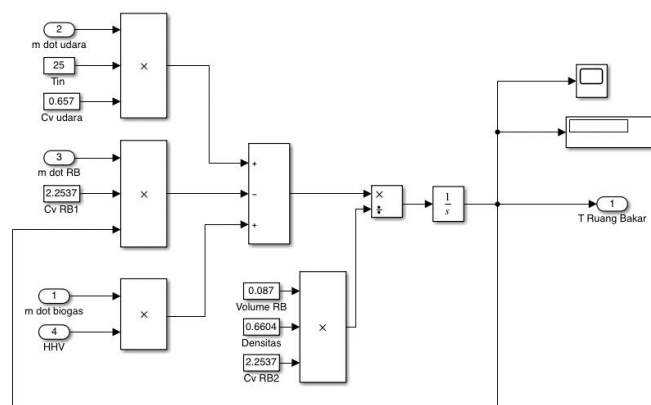
$HHV_{Biogas}$  = *High Heating Value* Biogas (Joule/Kg)



$m_{out}$	= <i>Flow rate</i> udara keluar (Kg/s)
$m_{in}$	= <i>Flow rate</i> udara masuk (Kg/s)
$\dot{m}_{biogas}$	= <i>Flow rate</i> biogas (Kg/s)
$T_{out}$	= Temperatur keluar ruang bakar (°C)
$Q$	= Nilai kalor biogas (Joule)

Dari data operasional diperoleh nilai untuk masing–masing konstanta adalah sebagai berikut. Dengan  $V_{Ruang\ Bakar}$  sebesar 0,087 liter,  $\rho$  sebesar 0,6604 Kg/m<sup>3</sup>, dan  $Cv_{Biogas}$  sebesar 2,2537 kJ/Kg.°C. Untuk konstanta *input* ruang bakar genset biogas,  $m_{in}$  sebfai *flow rate* udara masuk (Kg/s),  $Cv_{Udara}$  sebagai kalor spesifik udara sebesar 0,657 kJ/Kg.°C, dan  $T_{in}$  sebagai temperatur input sebesar 25°C. Untuk konstanta pada ruang bakar,  $m_{ruang\ bakar}$  sebagai *flow rate* udara keluar (Kg/s) yang nilainya diasumsikan sama dengan *flow rate* udara masuk (Kg/s),  $Cv_{Biogas}$  sebesar 2,2537 kJ/Kg.°K, dan  $T_{out}$  sebagai temperatur yang dibutuhkan dalam proses pembakaran di ruang bakar genset. Sedangkan untuk nilai kalor pembakaran, HHV untuk biogas dengan kandungan metana sebesar 50%,60%, dan 70% adalah 22350 kJ/kg, 24220 kJ/kg, dan 26590 kJ/kg, serta  $\dot{m}_{biogas}$  sebagai *flow rate* biogas yang hasilnya didapatkan dari perhitungan *air fuel ratio* (AFR) stoikiometri. Dengan demikian model matematis pada ruang bakar genset biogas dapat ditulis:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{m_{in}C_{in}T_{in} - m_{out}C_{out}T_{out} + \dot{m}_{biogas} HHV_{biogas}}{V_{Ruang\ Bakar} \cdot \rho \cdot Cv_{Biogas}} \quad (3.8)$$



**Gambar 3.3** Pemodelan Ruang Bakar Genset Biogas pada Simulink

### 3.4.2 Pemodelan Genset Biogas

Pembebanan dilakukan untuk mengetahui konsumsi udara dan biogas pada tiap tingkatan kandungan metana dalam biogas di setiap perubahan beban. Berikut merupakan persamaan hukum kesetimbangan energi pada genset biogas dengan temperatur pembakaran yang didapatkan dari pemodelan ruang bakar genset biogas:

$$E_{in} = E_{out} - \text{akumulasi di dalam sistem} \quad (3.9)$$

$$E_{in} = Q_{biogas} \cdot q_{cyl} \quad (3.10)$$

$$E_{out} = P \quad (3.11)$$

$$\text{akumulasi di dalam sistem} = m_{RB} \cdot T_{RB} \cdot \eta_c \quad (3.12)$$

Sehingga, berdasarkan persamaan 3.9, 3.10, 3.11, dan 3.12 didapatkan rumus kesetimbangan energi pada daya *output* sebagai berikut :

$$Q_{biogas} \cdot q_{cyl} = P - m_{RB} \cdot T_{RB} \cdot \eta_c \quad (3.13)$$

$$P = (m_{biogas} \cdot HHV \cdot q_{cyl} - m_{RB} \cdot T_{RB} \cdot \eta_c) \quad (3.14)$$

Rumus di atas nantinya akan menghasilkan daya *output* mesin genset atau bisa disebut daya mekanik. Untuk mengubahnya menjadi daya listrik maka perlu untuk dilakukan perkalian dengan efisiensi genset. Efisiensi genset diketahui bernilai 0.85, maka didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$P_e = (m_{biogas} \cdot HHV \cdot q_{cyl} - m_{RB} \cdot T_{RB} \cdot \eta_c) \eta_e \quad (3.15)$$

Selain daya *output*, pada pemodelan genset biogas menghasilkan torsi yang dihasilkan dari putaran *engine* untuk dilakukan perhitungan RPM sebagai *input* dari genset biogas untuk menghasilkan listrik. Berikut merupakan persamaan untuk menghitung putaran *engine* :

$$Tm = \frac{P_e}{\omega} \quad (3.16)$$

Keterangan

$\eta_c$  = Efisiensi pembakaran (%)

$\eta_e$  = Efisiensi Elektrik *Genset* (%)

$P_e$  = Daya output (watt)

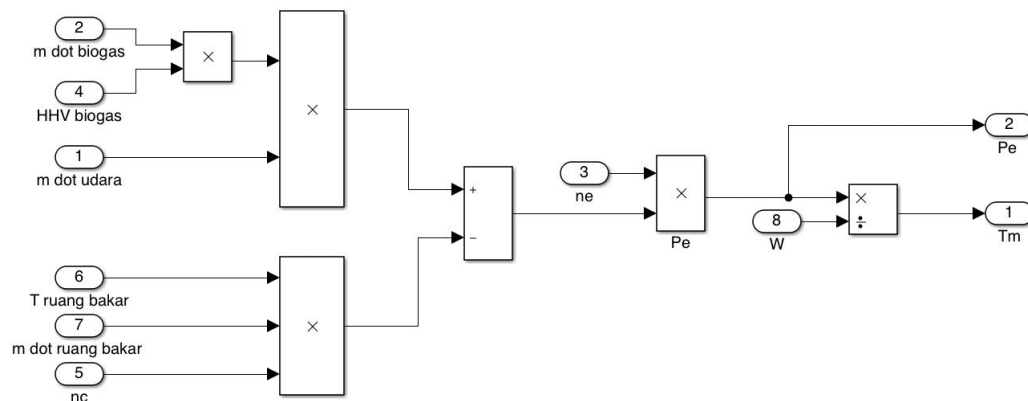
$m_{RB}$  = Flow rate udara ruang bakar (Kg/s)

$T_{RB}$  = Temperatur pembakaran ( $^{\circ}$ C)

$q_{cyl}$  = Mass flowrate udara yang masuk ke ruang bakar (Kg/s)

$\omega$  = Speed (radian per menit)

$T_m$  = Torsi yang dihasilkan oleh putaran *engine* (Nm)



**Gambar 3.5** Pemodelan Genset Biogas pada Simulink

### 3.4.3 Pemodelan Torsi

Pada *engine* dengan jenis *spark ignition*, proses pembakaran terjadi karena ada campuran biogas dengan udara di dalam silinder mesin dan dipantik oleh busi sehingga menimbulkan percikan bunga api dan terjadi pembakaran. Dari proses pembakaran tersebut akan menggerakkan piston dan poros engkol sehingga akan memutar generator dengan torsi yang dihasilkan oleh putaran *engine* dan dapat menghasilkan daya *output*. Berikut ini persamaan torsi yang dihasilkan dari pembakaran dengan perbandingan udara dan biogas.

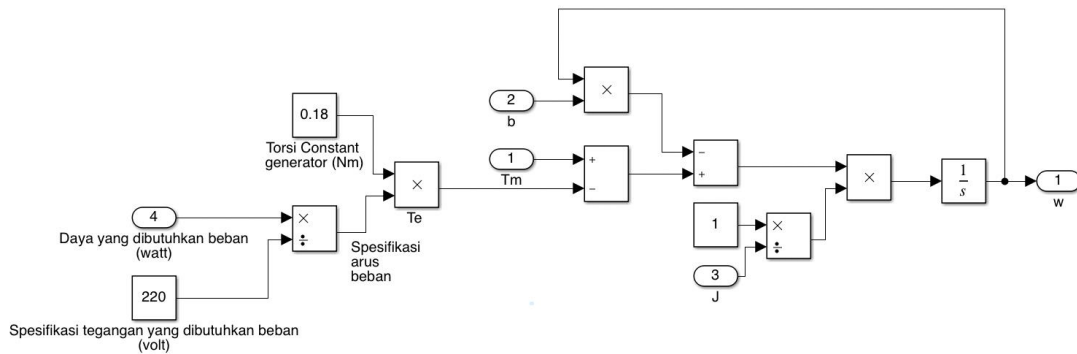
$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} [(T_m - T_e) - b\omega] \quad (3.17)$$

Dengan,

$T_m$  = Torsi yang dihasilkan oleh putaran *engine* (Nm)

$T_e$  = Torsi elektrik atau *load* (Nm)

- $J$  = Inertia  
 $b$  = Damping load  
 $\omega$  = Speed (radian per menit)



**Gambar 3.6 Pemodelan Torsi pada Simulink**

### 3.4.4 Pemodelan Aktuator

Aktuator yang digunakan untuk menggerakkan *valve* adalah *control valve*. *Control valve* ini akan membaca sinyal masukan yang berasal dari keluaran *controller* kemudian melakukan aksi untuk membuka atau menutup *valve* sesuai dengan sinyal yang berasal dari *controller*. Besar dari bukaan *valve* mempengaruhi besar laju aliran pada biogas dan udara.

#### a. Control Valve Biogas

Berikut merupakan data yang digunakan untuk pemodelan motor servo biogas :

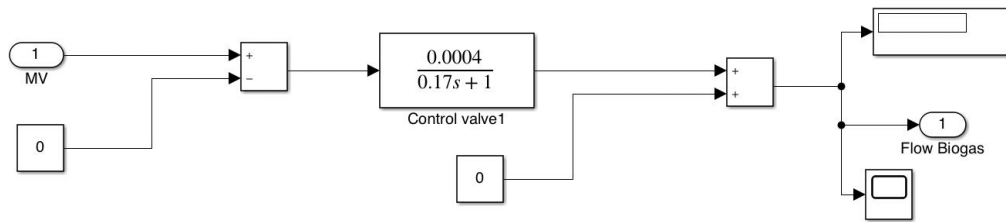
- *Flow Action* = Open
- Laju max = 0,002 kg/s
- Laju min = 0 kg/s
- *Time Constant* = 0,17 Sekon

Sehingga persamaan fungsi transfer dari *control valve* biogas adalah sebagai berikut:

$$\frac{\dot{m}_b(s)}{U(s)} = \frac{K_{cv}}{\lambda s + 1} \quad (3.16)$$

$$K_{cv} = \frac{0,002 - 0}{5 - 0} = 0,0004$$

$$\frac{\dot{m}_b(s)}{U(s)} = \frac{0,0004}{0,17s + 1}$$



**Gambar 3.4** Pemodelan Motor Servo Biogas pada Simulink

b. *Control Valve* Udara

Berikut merupakan data yang digunakan untuk pemodelan motor servo biogas :

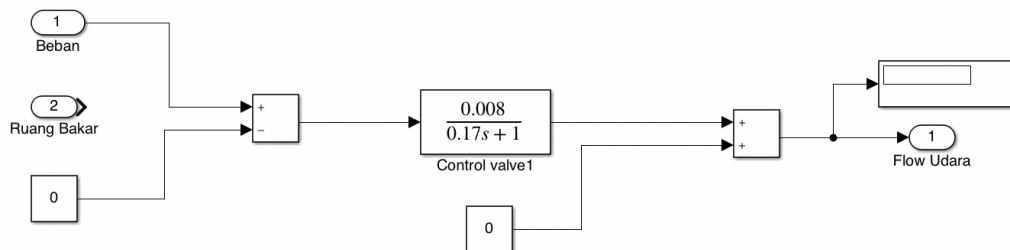
- *Flow Action* = Open
- Laju max = 0,04 kg/s
- Laju min = 0 kg/s
- *Time Constant* = 0,17 Sekon

Sehingga persamaan fungsi transfer dari motor servo biogas adalah sebagai berikut:

$$\frac{\dot{m}_b(s)}{U(s)} = \frac{K_{cv}}{\lambda s + 1} \quad (3.17)$$

$$K_{cv} = \frac{0,04 - 0}{5 - 0} = 0,008$$

$$\frac{\dot{m}_b(s)}{U(s)} = \frac{0,008}{0,17s + 1}$$



**Gambar 3.5** Pemodelan Motor Servo Udara pada Simulink

### 3.4.5 Sensor Kandungan Metana

*Input* dari sensor kandungan metana berupa nilai HHV dengan *range* 0-26590 kJ/kg untuk dikonversi menjadi konsentrasi metana dengan *range* 0-0,7 mol. Dikarenakan hubungan antara *input* sensor kandungan metana dengan *output* bersifat linier, maka untuk menentukan gain dari sensor kandungan metana digunakan persamaan linier yang merubah nilai HHV (kJ/kg) menjadi konsentrasi (mol) seperti pada persamaan berikut:

$$\frac{u(s)}{HHV(s)} = \frac{K_{metana}}{t_{metana}s+1} \quad (3.18)$$

$$K_{metana} = \frac{(\text{Span Output})}{(\text{Span Input})} \quad (3.19)$$

$$K_{metana} = \frac{y-0}{0,7} = \frac{x-0}{26590}$$

$$K_{metana} = 0.00002632 \frac{\text{volt}}{^{\circ}\text{C}}$$

$$\begin{aligned} \frac{u(s)}{HHV(s)} &= \frac{K_{metana}}{t_{metana}s+1} \\ &= \frac{0,00002632}{10s + 1} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Dimana,

$u(s)$  = Sinyal *output* sensor metana (mol)

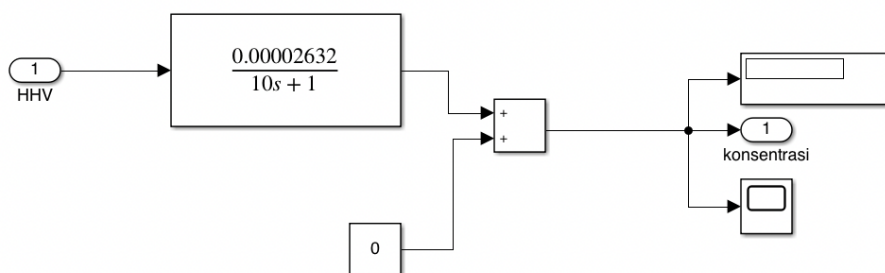
$HHV(s)$  = HHV yang terbaca (kJ/kg)

$K_{metana}$  = Gain sensor metana

$t_{metana}S$  = *Time constant* sensor metana

$y$  =  $u(s)$

$x$  = *Input* sensor metana (kJ/kg)



**Gambar 3.6** Model Simulink Sensor Metana (Mathworks 2020)

### 3.4.6 Sensor Oksigen *Excess Air*

*Input* dari sensor oksigen *excess air* berupa nilai temperatur pembakaran yang dihasilkan dari perhitungan stoikiometri dengan *range* 0-983,4°C untuk dikonversi menjadi oksigen *excess air* dengan *range* 0-1,73 mol. Dikarenakan hubungan antara *input* sensor oksigen *excess air* dengan *output* bersifat linier, maka untuk menentukan gain dari sensor sensor oksigen *excess air* digunakan persamaan linier yang merubah nilai temperatur pembakaran (°C) menjadi oksigen *excess air* seperti pada persamaan berikut:

$$\frac{u(s)}{T(s)} = \frac{K_{O_2}}{t_{T O_2} s + 1} \quad (3.21)$$

$$K_{O_2} = \frac{(\text{Span Output})}{(\text{Span Input})} \quad (3.22)$$

$$K_{O_2} = \frac{y-0}{1,7} = \frac{x-0}{983,4}$$

$$K_{O_2} = 0,001761 \frac{\text{mol}}{^\circ\text{C}}$$

$$\frac{u(s)}{T(s)} = \frac{K_{O_2}}{t_{O_2} s + 1} = \frac{0,001761}{7,2s + 1} \quad (3.23)$$

Dimana,

$u(s)$  = Sinyal *output* sensor oksigen *excess air* (kg/s)

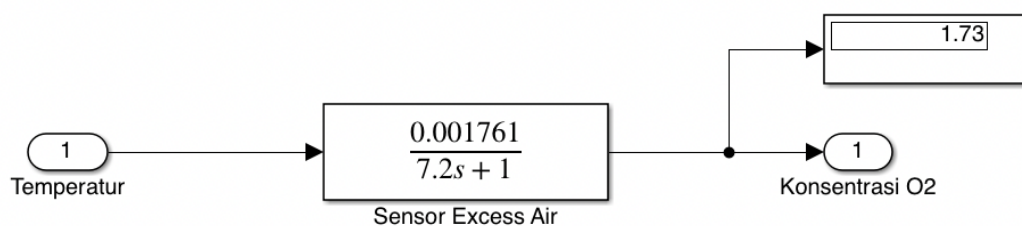
$HHV(s)$  = Temperatur yang terbaca (°C)

$K_{O_2}$  = Gain oksigen *excess air*

$t_{\text{metana}S}$  = *Time constant* sensor oksigen *excess air*

$y$  =  $u(s)$

$x$  = *Input* sensor oksigen *excess air* (°C)



**Gambar 3. 7** Model Simulink Sensor Oksigen *Excess Air* (Mathworks 2020)

### 3.4.7 Temperatur Transmitter

*Input* dari temperatur transmitter ini berupa besaran fisis temperatur dengan *range* 0-1000°C untuk dikonversi menjadi arus listrik dengan *range* 0-5 volt. Dikarenakan hubungan antara *input* temperatur transmitter dengan *output* bersifat linier, maka untuk menentukan gain dari temperatur transmitter digunakan persamaan linier yang merubah besaran fisis (temperatur) menjadi tegangan (volt) seperti pada persamaan berikut:

$$\frac{u(s)}{T(s)} = \frac{K_T}{t_T s + 1} \quad (3.24)$$

$$K_T = \frac{(\text{Span Output})}{(\text{Span Input})} \quad (3.25)$$

$$K_T = \frac{y-0}{5} = \frac{x-0}{1000}$$

$$K_T = 0.005 \frac{\text{volt}}{^\circ\text{C}}$$

Dimana,

$u(s)$  = Sinyal *output* temperatur transmitter (volt)

$T(s)$  = Temperatur yang terbaca (°K)

$K_T$  = Gain temperatur transmitter

$t_T s$  = *Time constant* temperatur transmitter

$y$  =  $u(s)$

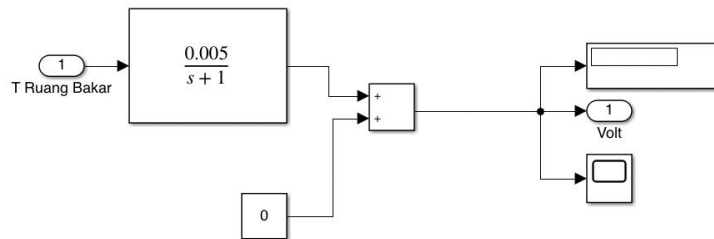
$x$  = *Input* temperatur transmitter (°C)

Besarnya gain dan bias temperatur transmitter dapat ditentukan melalui persamaan linier yang menghubungkan *range input* dan *range output* dari temperatur transmitter. Nilai *settling time* sebesar 1s. Sehingga didapatkan model matematis dari temperatur transmitter dengan karakteristik linier adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{u(s)}{T(s)} &= \frac{K_T}{t_T s + 1} \\ &= \frac{0.005}{s + 1} \end{aligned} \quad (3.26)$$



Dari persamaan (3.18), maka pemodelan temperatur transmitter secara keseluruhan apabila diterapkan pada simulink menjadi seperti pada gambar berikut:

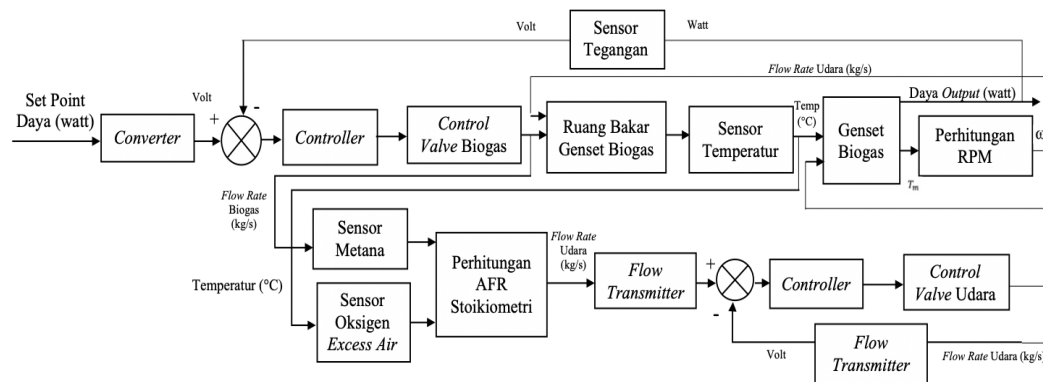


**Gambar 3. 8** Model Simulink Temperatur Transmitter (Mathworks 2020)

### 3.5 Perancangan Rasio Kontrol

Desain rasio kontrol yang akan digunakan pada ruang bakar genset biogas menggunakan metode 2, yaitu *ratio station*. Dengan aliran *disturbance* (d) adalah laju aliran dari biogas, dan aliran yang dimanipulasi (u) adalah laju aliran udara. Hanya saja pada perancangan rasio kontrol ini, aliran *disturbance* yaitu laju aliran dari biogas, juga dikontrol dengan *control valve*. *Input* sinyal menuju *ratio station* adalah hasil pengukuran laju aliran biogas, dan *output* sinyal dari *ratio station* adalah hasil perhitungan AFR stoikiometri yang digunakan sebagai *set point* untuk pengendalian laju aliran udara.

Nilai AFR stoikiometri menyesuaikan dengan kandungan metana dalam biogas yang dibaca oleh sensor metana dengan *input* nilai HHV dan *output* konsentrasi metana. Dari perhitungan AFR stoikiometri menghasilkan temperatur pembakaran yang terlalu tinggi sehingga dibutuhkan penambahan oksigen *excess air*. Pada sensor oksigen *excess air*, temperatur pembakaran yang dihasilkan dari perhitungan AFR stoikiometri dijadikan sebagai *input* dengan *output* adalah penambahan oksigen *excess air* agar temperatur pembakaran sesuai dengan kebutuhan. Dilakukan pembenanan pada 100 watt, 200 watt, 300 watt, 400 watt, 500 watt, dan 600 watt untuk melihat konsumsi biogas dan udara di setiap pembebanan dan tingkatan kandungan metana serta daya *output* yang dihasilkan apakah sesuai dengan beban yang diberikan.



**Gambar 3. 12** Diagram Blok Perancangan Rasio Kontrol pada Ruang Bakar Genset Biogas

### 3.6 Pembuatan Simulasi Menggunakan Matlab 2020b

Adapun pemrograman dilakukan dengan simulasi Simulink menggunakan Matlab R2020b yang akan disajikan yaitu *open loop* dan *close loop* dari rasio kontrol pada ruang bakar genset biogas sehingga nanti akan dianalisa dan dibahas hasil responnya pada bab berikutnya

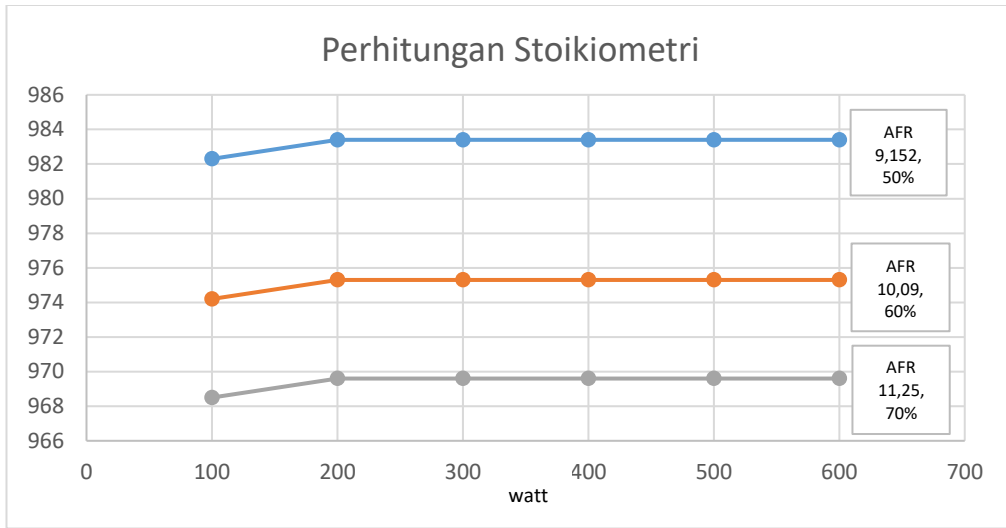
#### 3.6.1 Simulink Sistem *Open Loop*

Pada sistem *Open loop* akan dilakukan variasi HHV, oksigen *excess air*, dan beban. Dengan variasi tersebut menyebabkan perubahan laju aliran udara dan biogas yang menyesuaikan dengan beban yang diberikan serta kebutuhan tingkatan kandungan metana dalam biogas agar menghasilkan pembakaran sempurna dengan menjaga temperatur pembakaran.

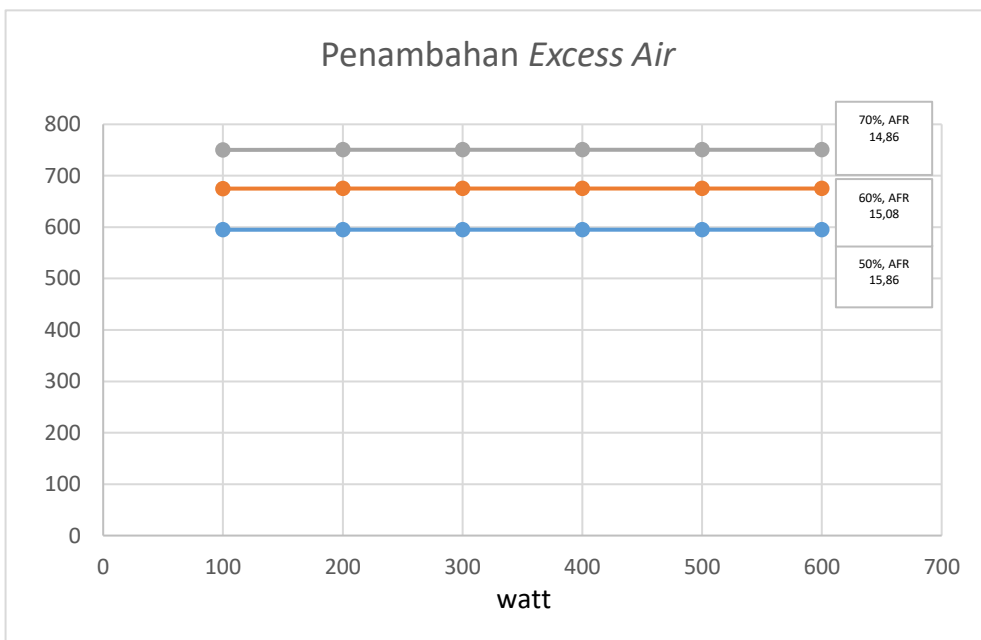
Langkah awal untuk mendapatkan temperatur pembakaran sesuai dengan *set point* adalah dengan menguji kandungan metana 50%, 60%, dan 70% dalam biogas menggunakan nilai AFR stoikiometri yang didapatkan dari perhitungan sebesar 9,152, 10,09, dan 11,25 dengan pembebanan 100 watt, 200 watt, 300 watt, 400 watt, 500 watt, dan 600 watt. Dari pengujian tersebut didapatkan nilai temperatur pembakaran yang lebih tinggi dari *set point* sebesar 983,4°C, 975,3°C, dan 969,6°C sehingga diperlukan penambahan *excess air*. Didapatkan nilai AFR yang menghasilkan temperatur pembakaran sesuai kebutuhan dengan penambahan *excess air* sebesar 6,718 kg/s atau 73% dari perhitungan AFR stoikiometri untuk kandungan metana 50%, 4,99 kg/s atau 60% dari perhitungan AFR stoikiometri

untuk kandungan metana 60%, 3,62 kg/s atau 32% dari perhitungan AFR stoikiometri untuk kandungan metana 70%.

Semakin besar beban yang diberikan semakin besar laju aliran udara dan biogas yang dibutuhkan, namun semakin tinggi tingkatan kandungan metana pada biogas kebutuhan laju aliran udara dan biogas di setiap pembebanan semakin kecil dikarenakan kalor yang dihasilkan pada biogas dengan kandungan metana yang lebih tinggi memiliki nilai kalor yang lebih besar sehingga konsumsi biogas lebih efisien. Untuk hubungan antara temperatur pembakaran dengan penambahan beban bahwa semakin besar beban yang diberikan tidak berpengaruh terhadap besarnya nilai temperatur pembakaran. Hal ini dikarenakan rasio kontrol membuat temperatur yang merupakan produk pembakaran sangat dipengaruhi oleh nilai AFR walaupun dengan adanya gangguan berupa perubahan laju aliran udara dan biogas dikarenakan penambahan beban. Namun terdapat hubungan antara laju aliran biogas dengan temperatur pembakaran, dapat dilihat pada tabel 3.1 sampai 3.6 bahwa pada temperatur pembakaran yang dihasilkan dari perhitungan stoikiometri sangat tinggi sehingga konsumsi biogas lebih banyak dibandingkan temperatur pembakaran yang sesuai kebutuhan dengan penambahan *excess air* dikarenakan pada temperatur yang sangat tinggi menyebabkan biogas cepat menguap sehingga konsumsi bahan bakar lebih banyak dibandingkan dengan temperatur pembakaran yang dibutuhkan. Selain laju aliran udara dan biogas serta temperatur pembakaran, *input* yang dibutuhkan genset biogas adalah RPM karena pada genset agar menghasilkan energi listrik dibutuhkan energi putar. Hasil menunjukkan bahwa di setiap pembebanan RPM yang dibutuhkan berbeda-beda, serta pada perubahan AFR, nilai RPM dan torsi mekanik menurun seiring dengan menurunnya AFR. Hal ini dikarenakan laju aliran biogas yang juga menurun seiring menurunnya AFR sehingga mengakibatkan putaran genset yang diperlukan lebih sedikit. Laju aliran udara dan biogas yang dihasilkan pada uji *open loop* masih terdapat sedikit perbedaan dengan nilai AFR yang digunakan, hal tersebut dapat mempengaruhi hasil temperatur pembakaran. Sehingga diperlukan PID *controller* pada Simulink Matlab untuk mendapatkan hasil yang sesuai. Berikut merupakan tabel dan grafik perbandingan temperatur pembakaran yang dihasilkan dari uji *open loop* perhitungan stoikiometri dengan penambahan *excess air*.



**Gambar 3. 9** Temperatur Pembakaran Hasil Perhitungan Stoikiometri



**Gambar 3. 10** Temperatur Pembakaran Hasil Penambahan *Excess Air*



**Gambar 3. 11** Grafik Perbandingan Laju Aliran Udara Perhitungan Stoikimoteri dengan Penambahan *Excess Air*



**Gambar 3. 12** Grafik Perbandingan Laju Aliran Biogas Perhitungan Stoikimoteri dengan Penambahan *Excess Air*

**Tabel 3.1** Hasil Perhitungan Stoikiometri Kandungan Metana 50%

<b>Uji Open Loop 50% AFR 9,152</b>							
<b>Beban (watt)</b>	<b>Laju Aliran Udara (kg/s)</b>	<b>Laju Aliran Biogas (kg/s)</b>	<b>Laju Aliran Ruang Bakar (kg/s)</b>	<b>AFR</b>	<b>Nilai Kalor (kJ)</b>	<b>Temperatur (°C)</b>	<b>Daya Output (watt)</b>
100	0,007077	0,000776	0,00785	9,12	17,3436	982,3	98,16
200	0,009952	0,00109	0,01104	9,13	24,3615	983,4	197,4
300	0,01216	0,001335	0,01350	9,11	29,83725	983,4	297,1
400	0,01402	0,001534	0,01555	9,14	34,2849	983,4	396,4
500	0,01566	0,001719	0,01738	9,11	38,41965	983,4	497,2
600	0,01714	0,001881	0,01902	9,11	42,04035	983,4	600,1

**Tabel 3.2** Hasil Perhitungan Stoikiometri Kandungan Metana 60%

<b>Uji Open Loop 60% AFR 10,09</b>							
<b>Daya</b>	<b>Laju Aliran Udara (kg/s)</b>	<b>Laju Aliran Biogas (kg/s)</b>	<b>Laju Aliran Ruang Bakar (kg/s)</b>	<b>AFR</b>	<b>Nilai Kalor (Joule)</b>	<b>Temperatur (°C)</b>	<b>Daya Output (watt)</b>
100	0,007144	0,000709	0,007852	10,08	17171,98	974,2	98,26
200	0,01004	0,000997	0,011037	10,07	24147,34	975,3	197,6
300	0,01227	0,00122	0,013490	10,06	29548,4	975,3	298,3
400	0,01415	0,001405	0,015555	10,07	34029,1	975,3	396,6
500	0,0158	0,001568	0,017368	10,08	37976,96	975,3	497
600	0,01729	0,001718	0,019008	10,06	41609,96	975,3	604,9

**Tabel 3.3** Hasil Perhitungan Stoikiometri Kandungan Metana 70%

<b>Uji Open Loop 70% AFR 11,25</b>							
<b>Daya</b>	<b>Laju Aliran Udara (kg/s)</b>	<b>Laju Aliran Biogas (kg/s)</b>	<b>Laju Aliran Ruang Bakar (kg/s)</b>	<b>AFR</b>	<b>Nilai Kalor (Joule)</b>	<b>Temperatur (°C)</b>	<b>Daya Output (watt)</b>
100	0,007203	0,0006406	0,007844	11,24	17033,554	968,5	98,45
200	0,01013	0,0009013	0,011031	11,24	23965,567	969,6	198,1
300	0,01237	0,001104	0,013474	11,20	29355,36	969,6	298,1
400	0,01426	0,001269	0,015529	11,24	33742,71	969,6	397
500	0,01592	0,001421	0,017341	11,20	37784,39	969,6	498,8
600	0,01743	0,001553	0,018983	11,22	41294,27	969,6	596,5

**Tabel 3.4** Hasil Penambahan *Excess Air* 73% Kandungan Metana 50%

<b>Uji Open Loop 50% AFR 15,86</b>							
<b>Beban (watt)</b>	<b>Laju Aliran Udara (kg/s)</b>	<b>Laju Aliran Biogas (kg/s)</b>	<b>Laju Aliran Ruang Bakar (kg/s)</b>	<b>AFR</b>	<b>Nilai Kalor (kJ)</b>	<b>Temperatur (°C)</b>	<b>Daya Output (watt)</b>
100	0,009274	0,0005847	0,00986	15,86	13,068045	594,9	98,54
200	0,01306	0,000826	0,01388	15,86	18,40299	595	198
300	0,01596	0,001006	0,01697	15,85	22,50645	595	297,5
400	0,0184	0,001161	0,01957	15,84	25,9707	595	397,2
500	0,02056	0,001297	0,02187	15,82	29,057235	595	496,9
600	0,02251	0,001425	0,02394	15,84	31,7817	595	596,5

**Tabel 3.5** Hasil Penambahan *Excess Air* 50% Kandungan Metana 60%

<b>Uji Open Loop 60% AFR 15,08</b>							
<b>Beban (watt)</b>	<b>Laju Aliran Udara (kg/s)</b>	<b>Laju Aliran Biogas (kg/s)</b>	<b>Laju Aliran Ruang Bakar (kg/s)</b>	<b>AFR</b>	<b>Nilai Kalor (kJ)</b>	<b>Temperatur (°C)</b>	<b>Daya Output (watt)</b>
100	0,008701	0,0005781	0,00928	15,05	14,001582	674,9	98,76
200	0,01225	0,000813	0,01306	15,07	19,69086	675,1	198,3
300	0,01497	0,000995	0,01597	15,05	24,0989	675,1	297,8
400	0,01726	0,001147	0,01841	15,05	27,78034	675,1	397,4
500	0,01928	0,001282	0,02056	15,04	31,05004	675,1	496,9
600	0,02111	0,001403	0,02251	15,05	33,98066	675,1	596

**Tabel 3.6** Hasil Penambahan *Excess Air* 32% Kandungan Metana 70%

<b>Uji Open Loop 70% AFR 14,87</b>							
<b>Beban (watt)</b>	<b>Laju Aliran Udara (kg/s)</b>	<b>Laju Aliran Biogas (kg/s)</b>	<b>Laju Aliran Ruang Bakar (kg/s)</b>	<b>AFR</b>	<b>Nilai Kalor (kJ)</b>	<b>Temperatur (°C)</b>	<b>Daya Output (watt)</b>
100	0,008257	0,000556	0,00881	14,85	14,78404	750,2	98,6
200	0,01162	0,000784	0,01240	14,82	20,84656	750,5	198
300	0,01419	0,000955	0,01515	14,86	25,39345	750,5	297,8
400	0,01637	0,001105	0,01748	14,81	29,38195	750,5	397,4
500	0,01828	0,00123	0,01951	14,86	32,7057	750,5	497,5
600	0,02001	0,00135	0,02136	14,82	35,8965	750,5	597,7

**Tabel 3.7** Hasil Uji *Open Loop* 50% Torsi Mekanik dan RPM

<b>Uji Open Loop 50%</b>			
<b>Beban (watt)</b>	<b>Temperatur (°C)</b>	<b>Torsi Mekanik (Nm)</b>	<b>RPM</b>
100	594,9	17,07	55,69
200	595	27,16	70,15
300	595	35,59	80,26
400	595	43,15	88,37
500	595	50,08	94,8
600	595	56,3	100,9

**Tabel 3.8** Hasil Uji *Open Loop* 60% Torsi Mekanik dan RPM

<b>Uji Open Loop 60%</b>			
<b>Beban (watt)</b>	<b>Temperatur (°C)</b>	<b>Torsi Mekanik (Nm)</b>	<b>RPM</b>
100	674,9	13,3	55,1
200	675,1	23,53	62,5
300	675,1	33,58	74,53
400	675,1	41,29	80,3
500	675,1	48,11	89,43
600	675,1	52,95	95,47

**Tabel 3.9** Hasil Uji *Open Loop* 70% Torsi Mekanik dan RPM

<b>Uji Open Loop 70%</b>			
<b>Beban (watt)</b>	<b>Temperatur (°C)</b>	<b>Torsi Mekanik (Nm)</b>	<b>RPM</b>
100	750,2	12,97	54,23
200	750,5	22,37	61,36
300	750,5	31,22	69,34
400	750,5	39,5	72,29
500	750,5	41,84	86,87
600	750,5	50,84	85,27



### 3.6.2 Simulink Sistem *Close Loop*

Pada tugas akhir ini pembuatan simulasi *close loop* digunakan untuk mengetahui performa dari *system control* temperatur pembakaran pada ruang bakar genset biogas secara keseluruhan. Pada sistem *close loop* ini temperatur ruang bakar genset biogas sebagai *process variable* (PV) serta laju aliran udara dan biogas sebagai *manipulated variable* (MV). Dengan perubahan kandungan metana maka akan menyebabkan perubahan temperatur pembakaran yang membutuhkan sistem kontrol untuk menjaga stabilitas sistem. Berikut merupakan hasil dari uji *close loop*

**Tabel 3.10** Hasil Uji *Close Loop* Kandungan Metana 50%

<i>Close Loop 50% AFR 15,86</i>							
Beban	Laju Aliran Udara (kg/s)	Laju Aliran Biogas (kg/s)	Laju Aliran Ruang Bakar (kg/s)	AFR	Nilai Kalor (Joule)	Temperatur (°C)	Daya Output (watt)
100	0,009341	0,000589	0,00993	15,86	13164,15	594,9	100
200	0,01313	0,0008276	0,01396	15,87	18496,86	595	200
300	0,01603	0,001011	0,01704	15,86	22595,85	595	300
400	0,01848	0,001165	0,01965	15,86	26037,75	595	400
500	0,02063	0,001301	0,02193	15,86	29077,35	595	500
600	0,02258	0,001424	0,02400	15,86	31826,4	595	600

**Tabel 3.11** Hasil Uji *Close Loop* Kandungan Metana 60%

<i>Close Loop 60% AFR 15,08</i>							
Beban	Laju Aliran Udara (kg/s)	Laju Aliran Biogas (kg/s)	Laju Aliran Ruang Bakar (kg/s)	AFR	Nilai Kalor (Joule)	Temperatur (°C)	Daya Output (watt)
100	0,008763	0,0005811	0,009344	15,08	14074,242	674,9	100
200	0,01231	0,0008161	0,013126	15,08	19765,942	675,1	200
300	0,01503	0,0009965	0,016027	15,08	24135,23	675,1	300
400	0,01732	0,001149	0,018469	15,07	27828,78	675,1	400
500	0,01934	0,001282	0,020622	15,09	31050,04	675,1	500
600	0,02117	0,001404	0,022574	15,08	34004,88	675,1	600

**Tabel 3.12** Hasil Uji *Close Loop* Kandungan Metana 70%

<i>Close Loop 70% AFR 14,87</i>							
Beban	Laju Aliran Udara (kg/s)	Laju Aliran Biogas (kg/s)	Laju Aliran Ruang Bakar (kg/s)	AFR	Nilai Kalor (Joule)	Temperatur (°C)	Daya Output (watt)
100	0,008314	0,0005593	0,008874	14,87	14869,128	750,1	100
200	0,01167	0,0007852	0,012455	14,86	20875,809	750,5	200
300	0,01425	0,0009586	0,015208	14,87	25483,856	750,3	300
400	0,01642	0,001105	0,017535	14,87	29381,95	750,3	400
500	0,01834	0,001234	0,019573	14,87	32785,47	750,3	500
600	0,02007	0,00135	0,021420	14,87	35896,5	750,3	600

**Tabel 3.13** Hasil Uji *Close Loop* 50% Torsi Mekanik dan RPM

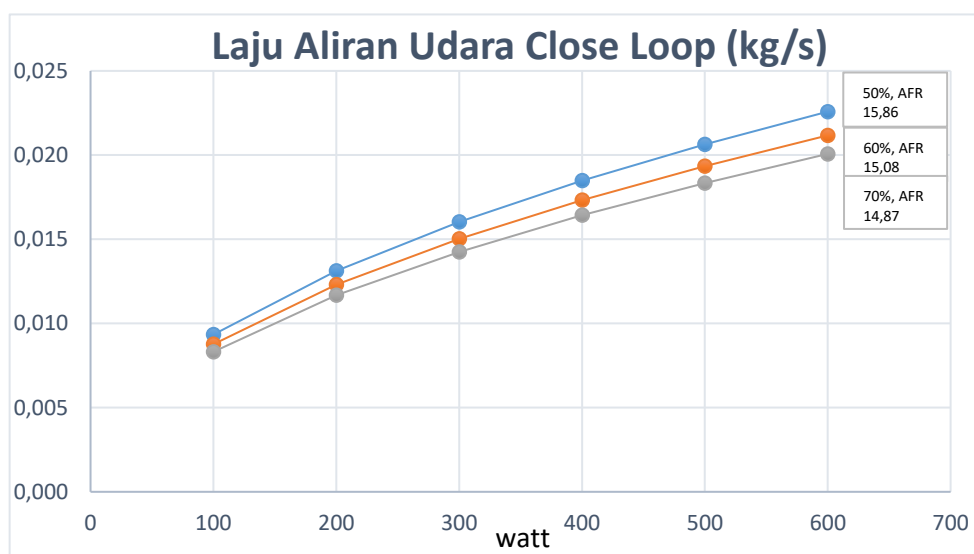
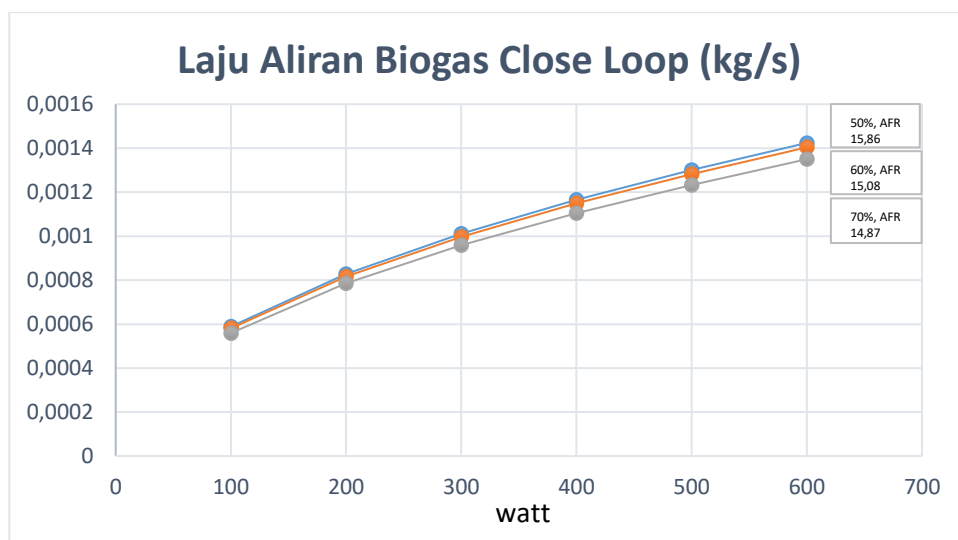
<i>Uji Close Loop 50%</i>			
Beban (watt)	Temperatur (°C)	Torsi Mekanik (Nm)	RPM
100	594,9	17	55,4
200	595	26,2	69,29
300	595	34,5	80,1
400	595	42,8	87,8
500	595	49,63	94,2
600	595	56,14	100,3

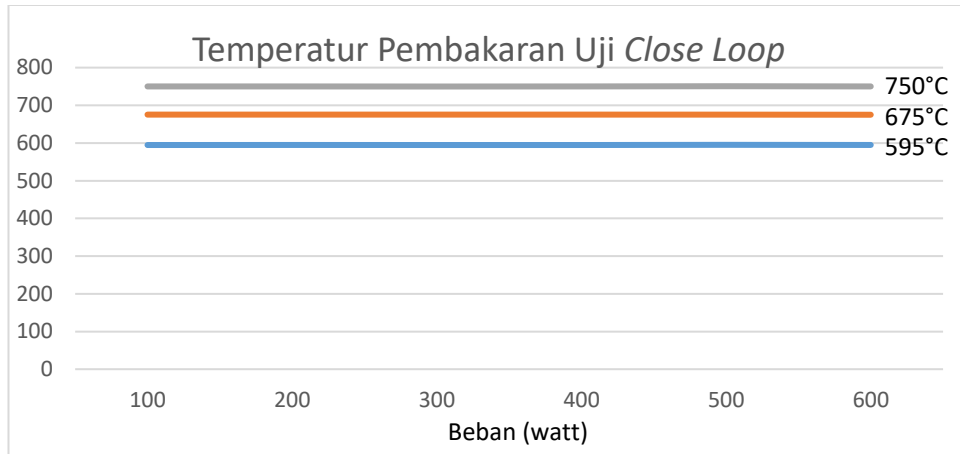
**Tabel 3.14** Hasil Uji *Close Loop* 60% Torsi Mekanik dan RPM

<i>Uji Close Loop 60%</i>			
Beban (watt)	Temperatur (°C)	Torsi Mekanik (Nm)	RPM
100	594,9	13,2	55
200	595	23,35	61,98
300	595	31,9	69,8
400	595	41,08	80,18
500	595	48,03	89,2
600	595	52,43	95,2

**Tabel 3.15** Hasil Uji *Close Loop* 70% Torsi Mekanik dan RPM

<b>Uji <i>Close Loop</i> 70%</b>			
<b>Beban (watt)</b>	<b>Temperatur (°C)</b>	<b>Torsi Mekanik (Nm)</b>	<b>RPM</b>
100	594,9	13,26	59,8
200	595	22,5	61,8
300	595	32,54	70,31
400	595	39,5	73,3
500	595	41,21	86,44
600	595	50,3	85,1

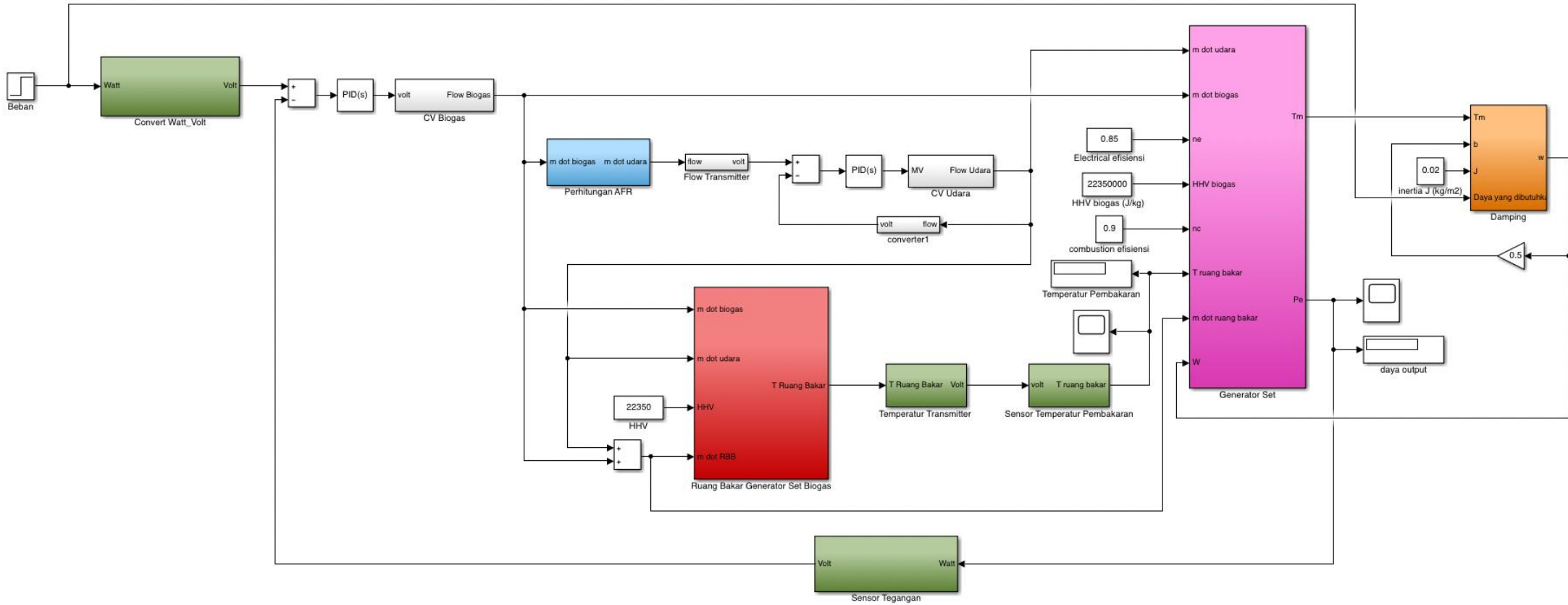
**Gambar 3. 13** Grafik Laju Aliran Udara *Close Loop***Gambar 3. 14** Grafik Laju Aliran Biogas *Close Loop*



**Gambar 3. 15** Temperatur Pembakaran *Close Loop*

Dari hasil uji *close loop* dapat dilihat bahwa laju aliran biogas dan udara yang dihasilkan sesuai dengan nilai AFR penambahan *excess air* sebesar 15,86, 15,08, dan 14,87. Temperatur pembakaran sesuai dengan kebutuhan kandungan metana 50%, 60%, dan 70% sebesar 595°C, 675°C, dan 750°C dengan daya *output* yang dihasilkan 100 watt, 200 watt, 300 watt, 400 watt, 500 watt, dan 600 watt. Dapat dikatakan bahwa *controller* PID pada rasio kontrol ruang bakar genset biogas bekerja dengan baik.





Gambar 3.17 Simulasi *Close Loop* pada Simulink Matlab

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada bab IV ini akan dilakukan analisis terhadap hasil simulasi model matematis yang telah dibuat sebelumnya pada bab III. Dari analisis ini kemudian dilakukan pembahasan mengenai hasil dari simulasi model matematis menggunakan Simulink Matlab, baik per komponen maupun secara keseluruhan.

#### **4.1 Pengujian Sistem**

Temperatur pembakaran yang dihasilkan oleh ruang bakar genset biogas merupakan *process variable* (PV) dari sistem yang telah dirancang. Sedangkan *mass flow rate* udara dan biogas merupakan *manipulated variable* (MV). Langkah awal untuk menjaga temperatur pembakaran biogas sesuai kebutuhan di masing-masing tingkatan kandungan metana menggunakan perhitungan *Air Fuel Ratio* (AFR) stoikiometri kandungan metana dalam biogas sebesar 50%, 60%, dan 70%. Sensor metana dengan *input* nilai masing-masing HHV dan *output* konsentrasi yang digunakan untuk perhitungan stoikiometri. Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan 3.6 pada bab sebelumnya, nilai AFR stoikiometri untuk kandungan metana 50%, 60%, dan 70% adalah 9,152, 10,09, dan 11,25 menghasilkan temperatur pembakaran yang terlalu tinggi sebesar 983°C, 974°C, dan 969°C sehingga dilakukan penambahan *excess air* untuk mencapai temperatur pembakaran yang dibutuhkan. Dari uji *open loop* didapatkan AFR yang sesuai dengan kebutuhan temperatur pembakaran biogas di masing-masing tingkatan 50%, 60%, dan 70% sebesar 15,86 dengan penambahan *excess air* 6,718 kg/s atau 73% dari perhitungan AFR stoikiometri, 15,08 dengan penambahan *excess air* 4,99 kg/s atau 60% dari perhitungan AFR stoikiometri, dan 14,87 dengan penambahan *excess air* 3,62 kg/s atau 32% dari perhitungan AFR stoikiometri.



#### 4.1.1 Perbandingan Hasil Perhitungan dengan Simulasi

Untuk mengetahui hasil validasi pemodelan yang disimulasikan menggunakan Simulink Matlab R2020b adalah dengan membandingkan nilai hasil simulasi dengan nilai hasil perhitungan. Perbandingan dari *flow rate* hasil simulasi dan perhitungan sesuai dengan tingkatan kandungan metana dalam biogas diperoleh nilai selisih untuk *mass flow rate* biogas metana 50% sebesar 0,00149%, nilai *flow rate* udara sebesar 0,002183%, temperatur pembakaran sebesar 1,67%, dan daya *output* sebesar 0,92%. Untuk kandungan metana 60% diperoleh nilai selisih untuk *mass flow rate* biogas sebesar 0,0020167%, nilai *flow rate* udara sebesar 0,003050%, temperatur pembakaran sebesar 1,67%, dan daya *output* sebesar 0,54%. Pada kandungan metana 70% diperoleh nilai selisih untuk *mass flow rate* biogas metana sebesar 0,008333%, nilai *flow rate* udara sebesar 0,008334%, temperatur pembakaran sebesar 0,0018948% dan daya *output* 0,405%.

*Flow rate* udara dan biogas pada simulasi kali ini didapatkan dari pemodelan *control valve* sesuai dengan referensi penelitian terdahulu terkait *control* daya *output* pada genset biogas *dual fuel* 1200 watt dengan kandungan metana dalam biogas sebesar 60% dan AFR stoikiometri 15,06. Dari data tersebut dapat diketahui konsumsi udara dan biogas pada pembebanan 100-1200 watt. Nilai *mass flow rate* udara pada simulasi menyesuaikan dengan AFR yang digunakan. Sedangkan *mass flow rate* biogas didapatkan dari hasil pemodelan genset biogas sesuai dengan pembebanan yang diberikan.

**Tabel 4.1** Perbandingan *flow rate* Hasil Simulasi dan Hasil Perhitungan 50%

<b>Kandungan Metana 50% AFR 15,86</b>				
<b>Daya (watt)</b>	<b><i>Flow Rate</i> Biogas (kg/s)</b>		<b><i>Flow Rate</i> Udara (kg/s)</b>	
	<b>Perhitungan</b>	<b>Simulasi</b>	<b>Perhitungan</b>	<b>Simulasi</b>
100	0,0005852	0,000589	0,00928	0,009341
200	0,0008284	0,0008276	0,01314	0,01313
300	0,001013	0,001011	0,01607	0,01603
400	0,001162	0,001165	0,01843	0,01848
500	0,001299	0,001301	0,0206	0,02063
600	0,001421	0,001424	0,02254	0,02258

**Tabel 4.2** Perbandingan *Temperatur Pembakaran* serta *Daya Output* Hasil Simulasi dan Hasil Perhitungan 50%

<b>Kandungan Metana 50% AFR 15,86</b>			
<b>Temperatur (°C)</b>		<b>Daya Output (watt)</b>	
<b>Perhitungan</b>	<b>Simulasi</b>	<b>Perhitungan</b>	<b>Simulasi</b>
594,7	594,9	98,68	100
594,9	595	200,4	200
595	595	301,5	300
595,1	595	397,9	400
595,1	595	498,4	500
595	595	597,6	600

**Tabel 4.3** Perbandingan *flow rate* Hasil Simulasi dan Hasil Perhitungan 60%

<b>Kandungan Metana 60% AFR 15,08</b>				
<b>Daya (watt)</b>	<b>Flow Rate Biogas (kg/s)</b>		<b>Flow Rate Udara (kg/s)</b>	
	<b>Perhitungan</b>	<b>Simulasi</b>	<b>Perhitungan</b>	<b>Simulasi</b>
100	0,0005784	0,0005811	0,00872	0,008763
200	0,0008144	0,0008161	0,01228	0,01231
300	0,0009938	0,0009965	0,01499	0,01503
400	0,001146	0,001149	0,01728	0,01732
500	0,001283	0,001282	0,01935	0,01934
600	0,001401	0,001404	0,02113	0,02117

**Tabel 4.4** Perbandingan *Temperatur Pembakaran* serta *Daya Output* Hasil Simulasi dan Hasil Perhitungan 60%

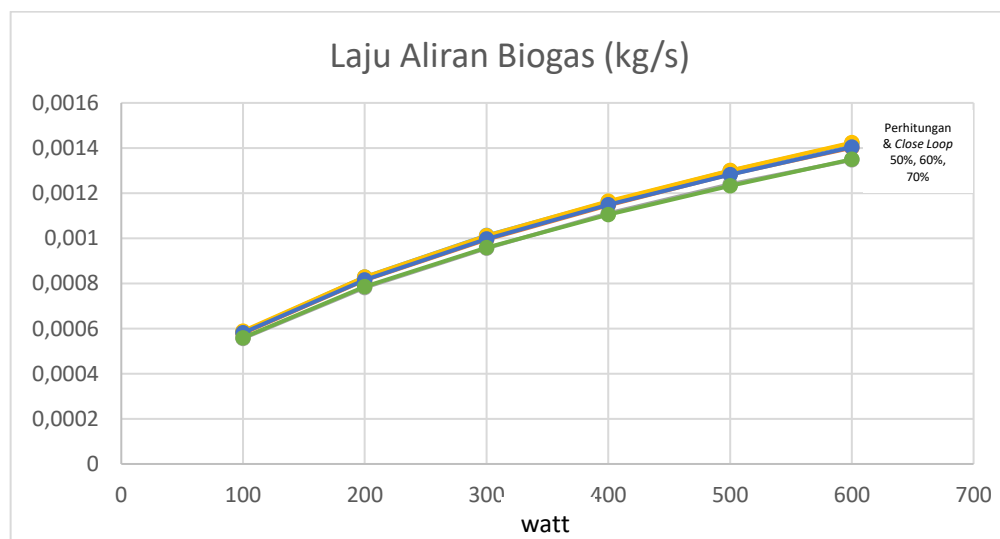
<b>Kandungan Metana 60% AFR 15,08</b>			
<b>Temperatur (°C)</b>		<b>Daya Output (watt)</b>	
<b>Perhitungan</b>	<b>Simulasi</b>	<b>Perhitungan</b>	<b>Simulasi</b>
675	674,9	99,03	100
674,9	675,1	199,1	200
675,2	675,1	298,4	300
675,1	675,1	399,3	400
675,2	675,1	501,7	500
675,1	675,1	599,2	600

**Tabel 4.5** Perbandingan *flow rate* Hasil Simulasi dan Hasil Perhitungan 70%

<b>Kandungan Metana 70% AFR 14,87</b>				
<b>Daya (watt)</b>	<b>Flow Rate Biogas (kg/s)</b>		<b>Flow Rate Udara (kg/s)</b>	
	<b>Perhitungan</b>	<b>Simulasi</b>	<b>Perhitungan</b>	<b>Simulasi</b>
100	0,0005564	0,0005593	0,00827	0,008314
200	0,0007817	0,0007852	0,01162	0,01167
300	0,0009561	0,0009586	0,01422	0,01425
400	0,001111	0,001105	0,01652	0,01642
500	0,001239	0,001234	0,01842	0,01834
600	0,001347	0,00135	0,02003	0,02007

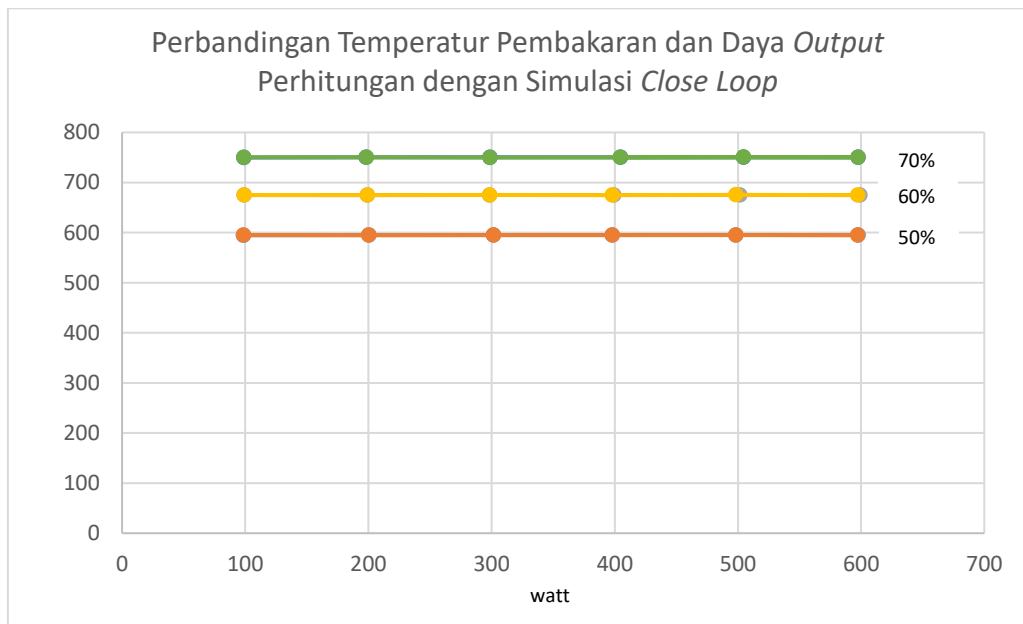
**Tabel 4.6** Perbandingan *Temperatur Pembakaran serta Daya Output* Hasil Simulasi dan Hasil Perhitungan 70%

<b>Kandungan Metana 70% AFR 14,87</b>			
<b>Temperatur (°C)</b>		<b>Daya Output (watt)</b>	
<b>Perhitungan</b>	<b>Simulasi</b>	<b>Perhitungan</b>	<b>Simulasi</b>
749,9	749,8	98,93	100
750	750,2	198,2	200
750,4	750,3	298,6	300
750,3	750,3	404,7	400
750,4	750,3	504,5	500
750,2	750,3	597,5	600

**Gambar 4.1** Grafik Perbandingan Laju Aliran Biogas Perhitungan dengan *Uji Close Loop*



**Gambar 4.2** Grafik Perbandingan Laju Aliran Biogas Perhitungan dengan Uji *Close Loop*



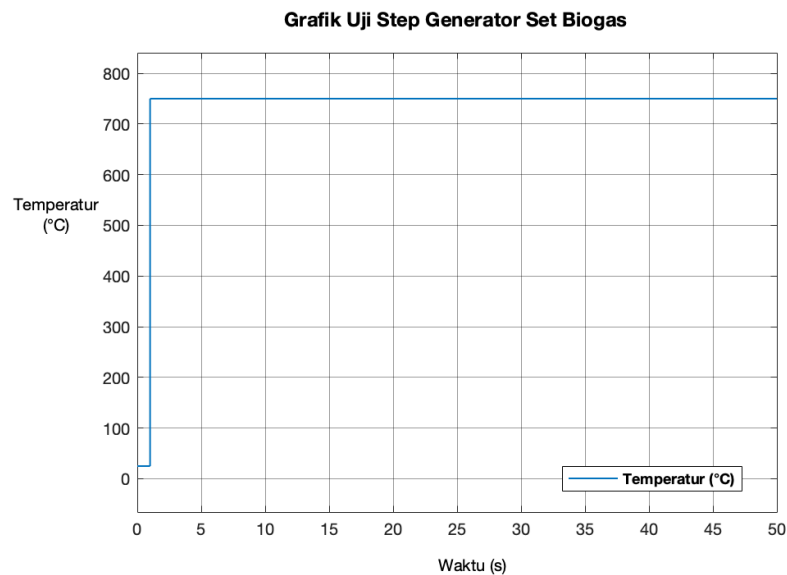
**Gambar 4.3** Grafik Perbandingan Temperatur Pembakaran dan Daya Output Perhitungan dengan Uji *Close Loop*

## 4.2 Pengujian Pemodelan Matematis Komponen

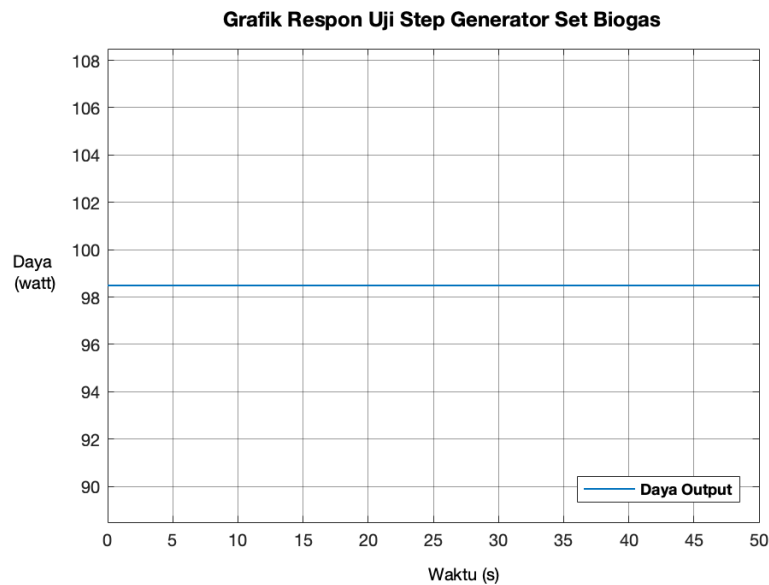
Sebelum dilakukan pengujian secara menyeluruh, dilakukan pengujian untuk masing – masing komponen. Pengujian dilakukan dengan memberikan sinyal uji step. Dari uji step ini akan diperoleh respon dari masing – masing komponen sehingga diketahui tingkat kelogisan dari pemodelan matematis yang telah dibuat.

### 4.2.1 Pengujian Model Matematis Genset Biogas

Pada simulasi sinyal uji step genset biogas, sinyal *input* direpresentasikan sebagai temperatur pembakaran ( $^{\circ}\text{C}$ ) *output* dari ruang bakar yang masuk pada genset biogas. Temperatur ini digunakan untuk membakar udara dan biogas yang masuk ke dalam ruang bakar sesuai dengan ketentuan sehingga dapat menghasilkan pembakaran yang sempurna. Adapun grafik uji step serta grafik respon dari uji step genset biogas dapat ditunjukkan pada gambar berikut.



**Gambar 4.4** Grafik Uji Step Genset Biogas

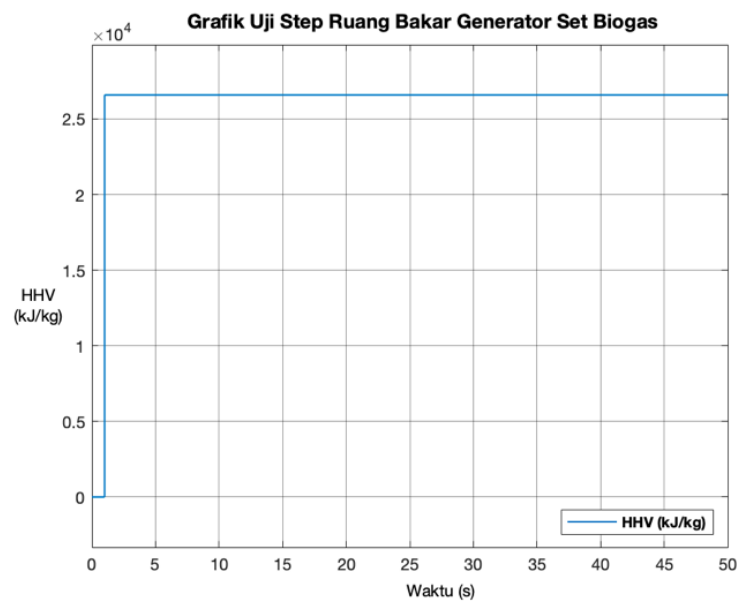


**Gambar 4.5** Grafik Respon Uji Step Genset Biogas

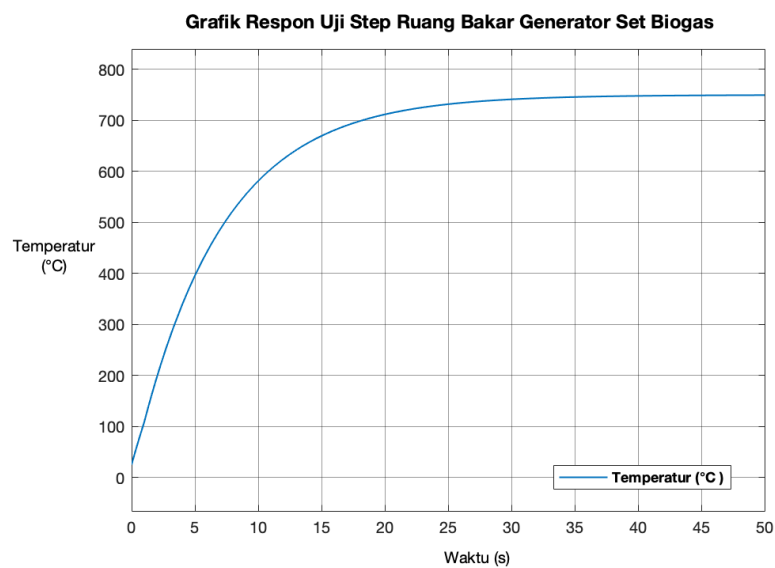
Pada uji step generator biogas kali ini dilakukan pada kandungan metana 70% dan beban 100 watt. Untuk menghasilkan daya sebesar 100 watt, sesuai dengan data yang diperoleh maka dibutuhkan laju aliran udara sebesar 0,008257 kg/s. Dihasilkan nilai laju aliran biogas sebesar 0,0005559 kg/s dari rasio kontrol dengan AFR sebesar 14,87. Temperatur pembakaran sebagai *input* uji step yang ditunjukkan pada gambar 4.1 adalah sebesar 25°C-750°C. Nilai tersebut didapatkan dari jurnal dengan *input* temperatur ruang bakar genset sebesar 25°C dan temperatur pembakaran yang dibutuhkan untuk biogas dengan kandungan metana 70% sebesar 750°C. Dengan besarnya laju aliran udara dan biogas tersebut dapat menghasilkan nilai temperature pembakaran yang dibutuhkan dan respon daya *output* genset biogas yang dihasilkan sebesar 98,69 watt. Hubungan antara temperatur pembakaran terhadap daya *output* yang dihasilkan genset biogas, dapat dikatakan bahwa temperatur pembakaran pada ruang bakar genset biogas tidak berpengaruh terhadap perubahan beban, temperatur tetap berada pada kisaran 750°C. Hal ini dikarenakan setiap perubahan beban, nilai laju aliran udara dan biogas berubah menyesuaikan kebutuhan beban dan kondisi biogas, namun nilai AFR tetap menyesuaikan dengan tingkatan metana dalam biogas.

#### 4.2.2 Pengujian Model Matematis Ruang Bakar Genset Biogas

Pada simulasi uji step ruang bakar genset biogas, sinyal *input* direpresentasikan sebagai *High Heating Value* (HHV) di setiap tingkatan kandungan metana dalam biogas. Dengan simulasi ini nantinya akan diperoleh keluaran temperatur ruang bakar genset biogas. Adapun grafik uji step dan grafik respon dari uji step ruang bakar genset biogas dapat ditunjukkan pada gambar berikut.



**Gambar 4.6** Grafik Uji Step Ruang Bakar Genset Biogas



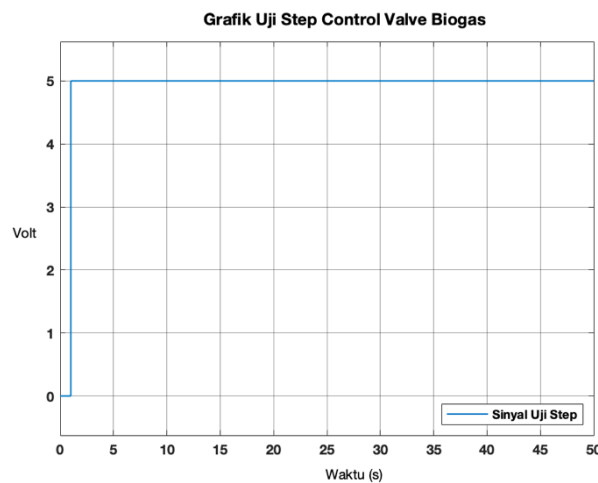
**Gambar 4.7** Grafik Respon Uji Step Ruang Bakar Genset Biogas

Dari hasil simulasi uji step pada ruang bakar genset biogas tampak bahwa HHV (kJ/kg) biogas dengan kandungan metana 70% sebagai *input* uji step yang ditunjukkan pada gambar 4.3 adalah sebesar 26590 kJ/kg. Dengan besarnya HHV tersebut, respon temperatur yang dihasilkan pada ruang bakar genset sebesar 750°C dengan *input* temperatur ke ruang bakar sebesar 25°C yang ditunjukkan pada gambar 4.4. Dari hubungan antara *input* HHV (kJ/kg) terhadap temperatur ruang bakar yang dihasilkan, dapat dikatakan bahwa semakin besar kandungan metana dalam biogas, maka semakin besar kebutuhan temperatur pembakaran yang dibutuhkan oleh ruang bakar genset biogas untuk menghasilkan pembakaran yang sempurna.

#### 4.2.3 Pengujian Model Matematis Aktuator

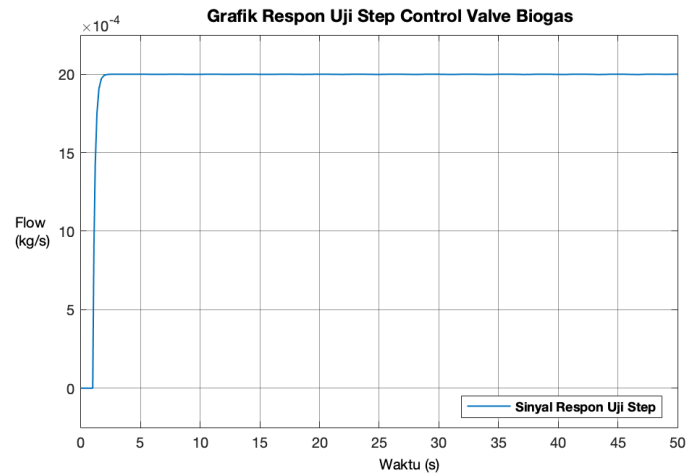
*Control valve* adalah alat yang digunakan untuk memodifikasi aliran fluida atau laju tekanan pada sebuah sistem proses dengan menggunakan daya untuk operasinya. *Control valve* juga merupakan elemen kontrol akhir yang paling umum digunakan untuk mengatur aliran bahan dalam sebuah proses. Pengujian *control valve* ini menggunakan sinyal input 0 – 5 volt. Pengujian ini bertujuan untuk menguji performansi kerja dari *control valve*. Adapun grafik uji step dan grafik respon dari uji step *control valve* dapat ditunjukkan pada gambar berikut :

- a. Pengujian *Control Valve* Biogas



**Gambar 4.8** Grafik Uji Step *Control Valve* Biogas

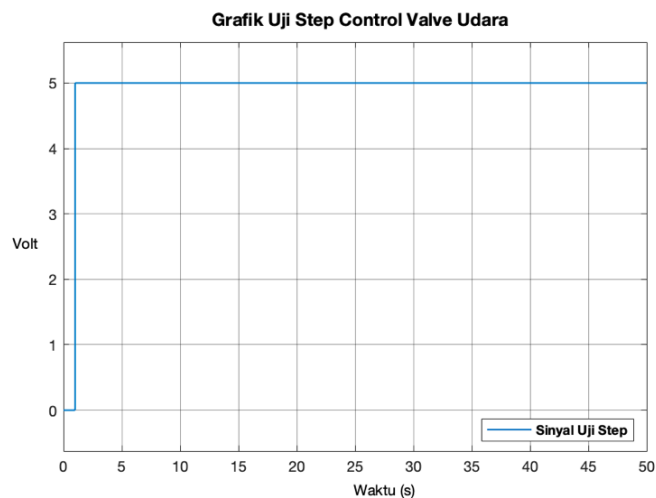




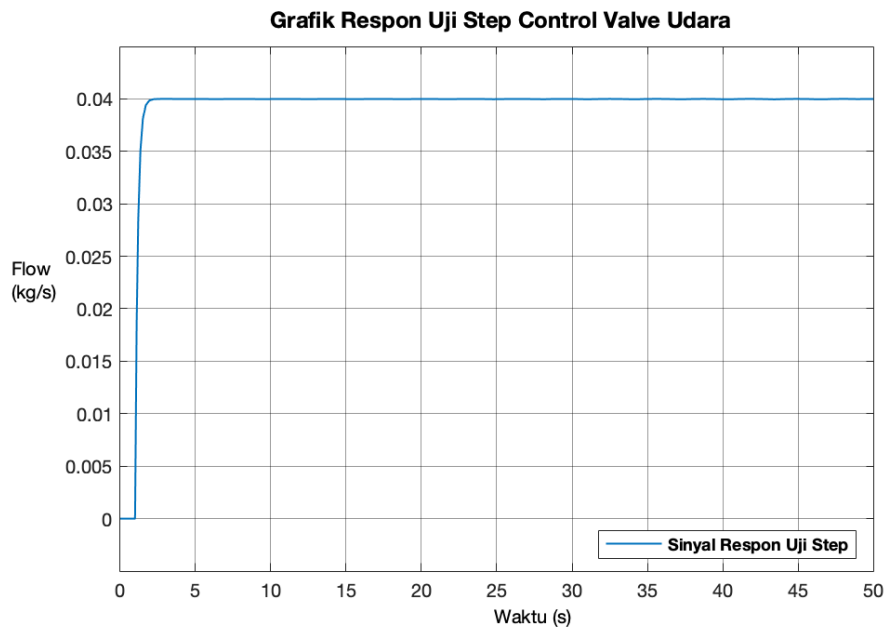
**Gambar 4.9** Grafik Respon Uji Step *Control Valve* Biogas

Dari grafik pada gambar 4.5 dapat dilihat sinyal uji step yang digunakan sebagai sinyal input untuk *control valve*. Sinyal *input* yang diberikan yaitu sebesar 5 volt, artinya *control valve* bekerja membuka penuh dengan bukaan 100%. Sedangkan bila diberikan sinyal input 0 volt, maka *control valve* bekerja untuk menutup penuh dengan bukaan 0%. Kemudian untuk grafik respon laju aliran biogas *control valve* dari sinyal uji step dapat dilihat pada gambar 4.6 dimana dapat diamati bahwa laju biogas maksimum yang keluar dari *control valve* saat bukaannya 100% adalah sebesar 0,002 kg/s.

b. Pengujian *Control Valve* Udara



**Gambar 4.10** Grafik Uji Step *Control Valve* Udara

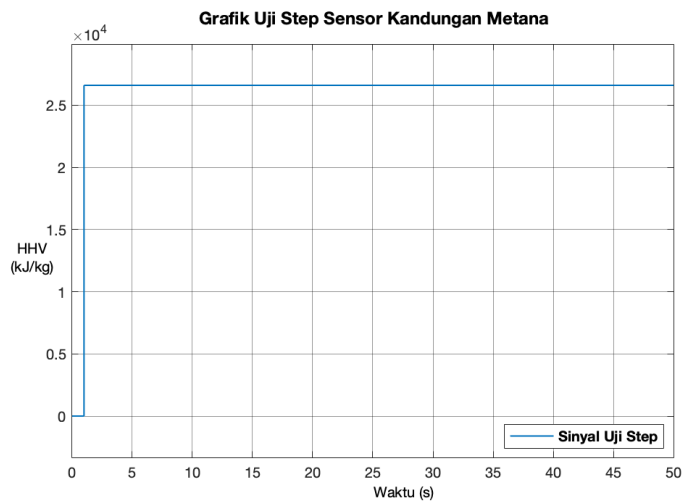


**Gambar 4.11** Grafik Respon Uji Step *Control Valve* Udara

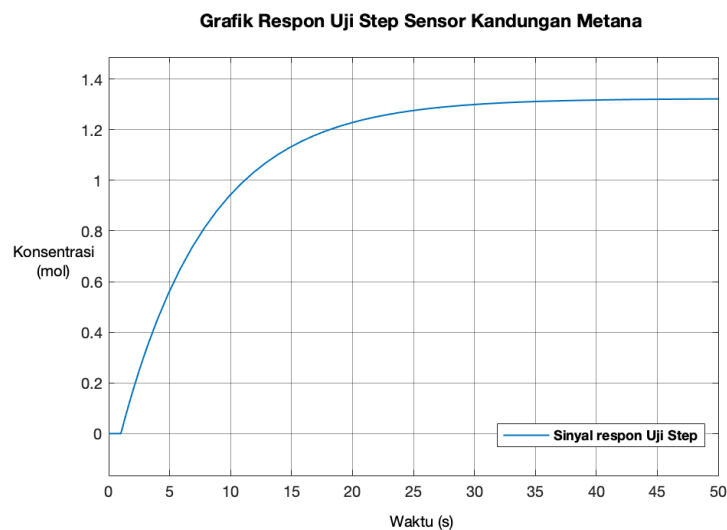
Dari grafik pada gambar 4.7 dapat dilihat sinyal uji step yang digunakan sebagai sinyal input untuk *control valve*. Sinyal *input* yang diberikan yaitu sebesar 5 volt, artinya *control valve* bekerja membuka penuh dengan bukaan 100%. Sedangkan bila diberikan sinyal input 0 volt, maka *control valve* bekerja untuk menutup penuh dengan bukaan 0%. Kemudian untuk grafik respon laju aliran biogas *control valve* dari sinyal uji step dapat dilihat pada gambar 4.8 dimana dapat diamati bahwa laju udara maksimum yang keluar dari *control valve* saat bukaannya 100% adalah sebesar 0,04 kg/s.

#### 4.2.4 Pengujian Model Matematis Sensor Kandungan Metana

Pada simulasi sinyal uji step sensor kandungan metana, sinyal *input* merupakan *range* HHV yang mampu dibaca oleh sensor kandungan metana yaitu sebesar 0 kJ-26590 kJ. Dengan simulasi ini akan diperoleh keluaran konsentrasi kandungan metana 0 sampai dengan 0,7 (mol) sebagai fungsi perhitungan AFR stoikiometri.



**Gambar 4.10** Grafik Uji Step Sensor Kandungan Metana

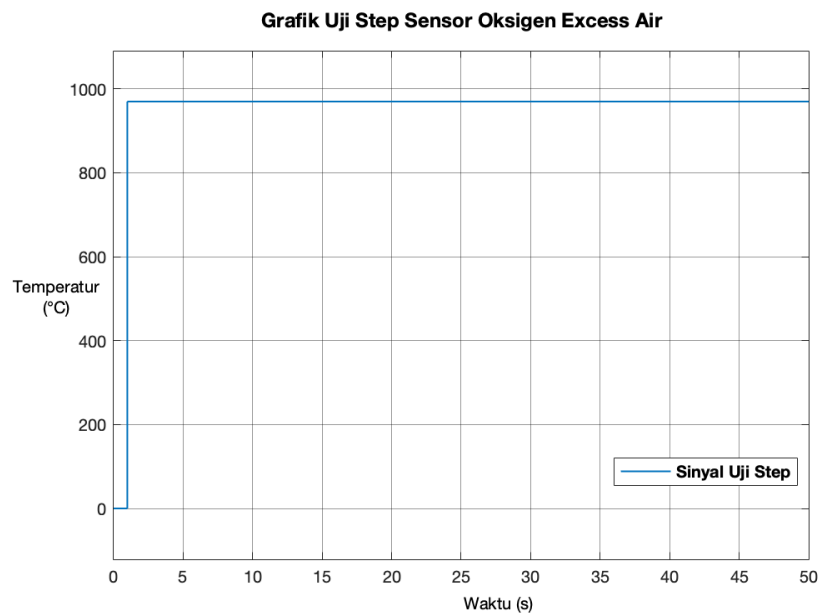


**Gambar 4.11** Grafik Respon Uji Step Sensor Kandungan Metana

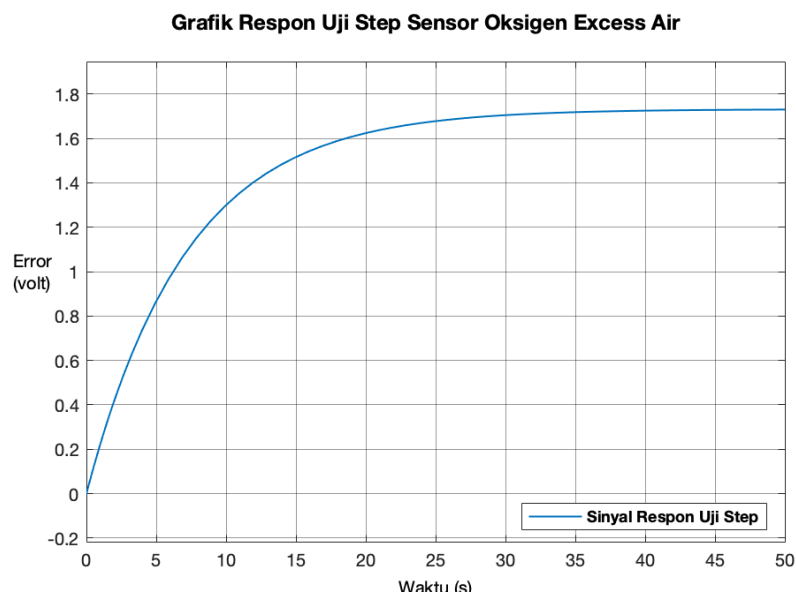
Dari hasil simulasi uji step pada sensor kandungan metana tampak bahwa HHV sebagai *input* uji step yang ditunjukkan pada gambar 4.10 adalah sebesar 26590 kJ/kg. Dengan nilai uji step pada HHV sebesar itu, maka konsentrasi yang ditransmisikan menuju kontroler sebesar 0,7 mol seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.10. Apabila HHV yang dibaca oleh temperatur transmitter 0 kJ/kg, maka sinyal arus kontrol yang ditransmisikan hanya sebesar 0 mol. Dari hubungan antara temperatur pembacaan dan tegangan (volt) yang dihasilkan, dapat dikatakan bahwa semakin besar nilai pembacaan HHV, maka semakin besar pula konsentrasi yang mampu ditransmisikan oleh sensor kandungan metana.

#### 4.2.5 Pengujian Model Matematis Sensor Oksigen *Excess Air*

Pada simulasi sinyal uji step sensor oksigen excess air, sinyal *input* merupakan *range* temperatur pembakaran yang dihasilkan dari perhitungan stoikiometri yang mampu dibaca sebesar  $0^{\circ}\text{C}$ - $983,4^{\circ}\text{C}$ . Dengan simulasi ini akan diperoleh keluaran konsentrasi oksigen *excess air* sebesar 0 sampai dengan 1,73 sebagai fungsi perhitungan AFR stoikiometri.



**Gambar 4.12** Grafik Uji Step Sensor Oksigen *Excess Air*

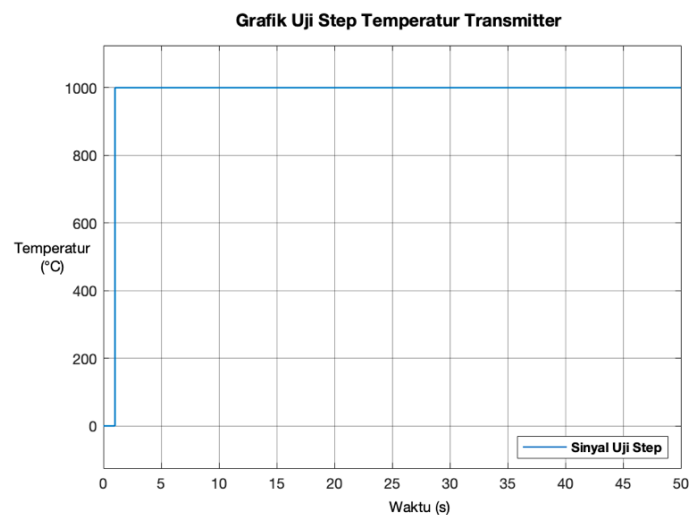


**Gambar 4.13** Grafik Uji Step Sensor Oksigen *Excess Air*

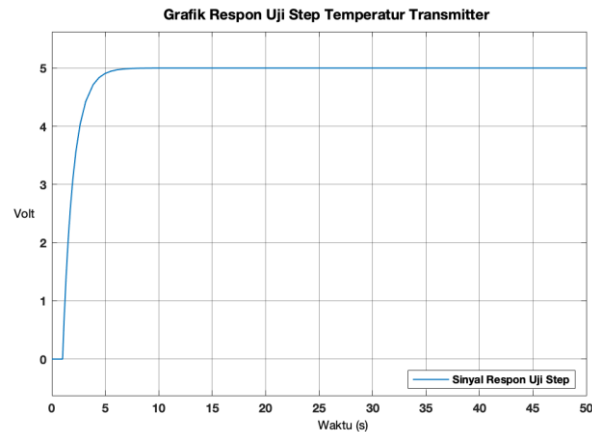
Dari hasil simulasi uji step pada sensor oksigen *excess air* tampak bahwa temperatur pembakaran yang dihasilkan dari perhitungan AFR stoikiometri sebagai *input* uji step yang ditunjukkan pada gambar 4.11 adalah sebesar 983,4°C. Dengan nilai uji step pada temperatur sebesar itu, maka konsentrasi yang ditransmisikan menuju kontroler sebesar 1,73 mol seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.12. Apabila temperatur yang dibaca oleh temperatur transmitter 0°C, maka sinyal arus kontrol yang ditransmisikan hanya sebesar 0 mol. Dari hubungan antara temperatur pembacaan dan konsentrasi oksigen *excess air* yang dihasilkan, dapat dikatakan bahwa semakin besar nilai pembacaan temperatur, maka semakin besar pula konsentrasi yang mampu ditransmisikan oleh sensor oksigen *excess air*.

#### 4.2.6 Pengujian Model Matematis Temperatur Transmitter

Pada simulasi sinyal uji step temperatur transmitter ini, sinyal *input* merupakan *range* temperatur yang mampu dibaca oleh temperatur transmitter yaitu sebesar 0-1000°C. Dengan simulasi ini akan diperoleh keluaran tegangan kontrol (volt) sebagai fungsi temperatur pembacaan pada temperatur transmitter.



**Gambar 4.14** Grafik Uji Step Temperatur Transmitter

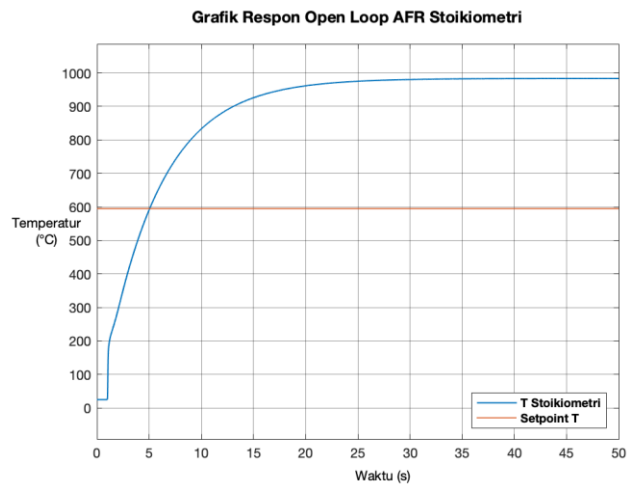


**Gambar 4.15** Grafik Respon Uji Step Temperatur Transmitter

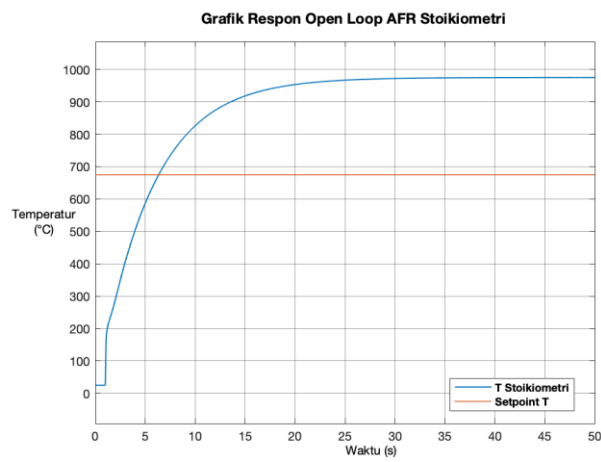
Dari hasil simulasi uji step pada temperatur transmitter tampak bahwa temperatur sebagai *input* uji step yang ditunjukkan pada gambar 4.13 adalah sebesar  $1000^{\circ}\text{C}$ . Temperatur ini merupakan temperatur maksimum yang mampu dibaca oleh temperatur transmitter. Dengan nilai uji step pada temperatur sebesar itu, maka arus yang ditransmisikan menuju kontroler sebesar 5 volt seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.14. Apabila temperatur yang dibaca oleh temperatur transmitter  $0^{\circ}\text{C}$ , maka sinyal arus kontrol yang ditransmisikan hanya sebesar 0 volt. Dari hubungan antara temperatur pembacaan dan tegangan (volt) yang dihasilkan, dapat dikatakan bahwa semakin besar nilai pembacaan temperatur, maka semakin besar pula arus kontrol yang mampu ditransmisikan oleh temperatur transmitter.

### 4.3 Pengujian *Open Loop*

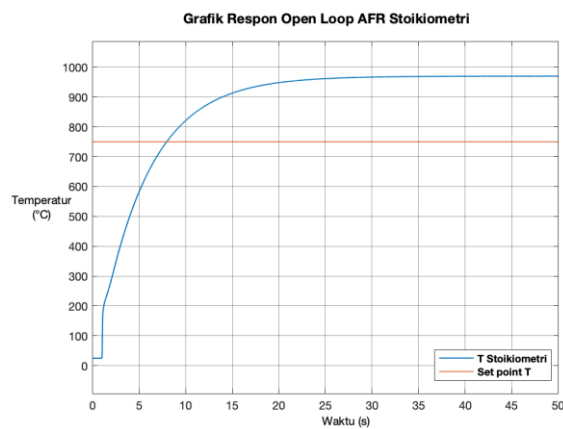
Pada sub bab berikut dilakukan pengujian secara *open loop*, dimana masing-masing komponen yang telah diuji digabung menjadi satu namun dalam kondisi tanpa dikontrol. Sebagai langkah awal, diberikan *set point* pembebanan 600 watt dan temperatur pembakaran  $750^{\circ}\text{C}$  dengan kandungan metana 70% menghasilkan laju aliran biogas dan udara sebesar  $0,0006404\text{ kg/s}$  dan  $0,007203\text{ kg/s}$  serta temperatur pembakaran  $969,6^{\circ}\text{C}$ . Sensor kandungan metana membaca nilai HHV pada tiap tingkatan dengan keluaran konsentrasi metana untuk perhitungan stoikiometri. Dihasilkan nilai AFR stoikiometri sebesar 9,52, 10,09, dan 11,25 sehingga temperatur pembakaran yang dihasilkan sangat tinggi sebesar sebesar  $983,4^{\circ}\text{C}$ ,  $975,3^{\circ}\text{C}$ , dan  $969,6^{\circ}\text{C}$ .



**Gambar 4.16** Grafik Respon Uji *Open Loop* Perhitungan Stoikiometri  
Kandungan Metana 50%

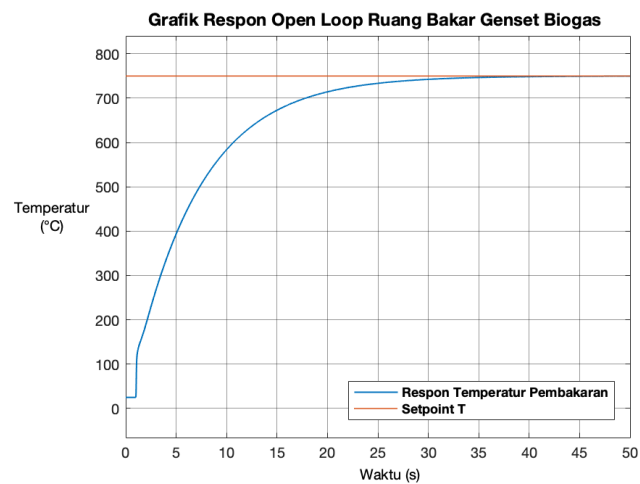


**Gambar 4.17** Grafik Respon Uji *Open Loop* Perhitungan Stoikiometri  
Kandungan Metana 60%

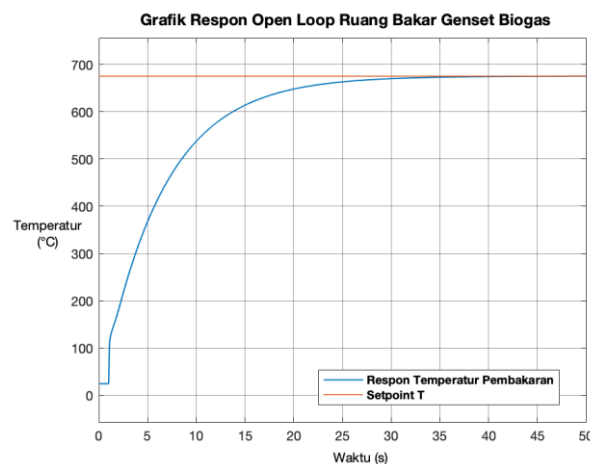


**Gambar 4.18** Grafik Respon Uji *Open Loop* Perhitungan Stoikiometri  
Kandungan Metana 70%

Untuk mendapatkan temperatur pembakaran yang sesuai diperlukan penambahan *excess air*. Terdapat sensor yang digunakan untuk mengontrol penambahan oksigen *excess air*. Dilakukan percobaan penambahan oksigen *excess air* sebesar 6,718 kg/s atau 73% dari perhitungan AFR stoikiometri untuk kandungan metana 50%, 4,99 kg/s atau 50% dari perhitungan AFR stoikiometri untuk kandungan metana 60%, 3,62 kg/s atau 32% dari perhitungan AFR stoikiometri untuk kandungan metana 70%. Dari penambahan oksigen *excess air* dengan jumlah tersebut didapatkan temperatur pembakaran sesuai dengan kebutuhan kandungan metana 50%, 60%, dan 70% sebesar 595°C, 675°C, dan 750°C.

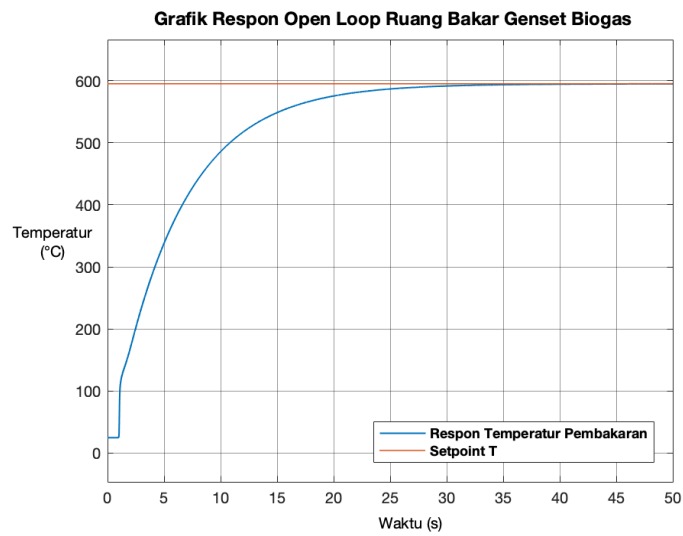


**Gambar 4.19** Grafik Respon Uji *Open Loop* Penambahan *Excess Air* Kandungan Metana 70%



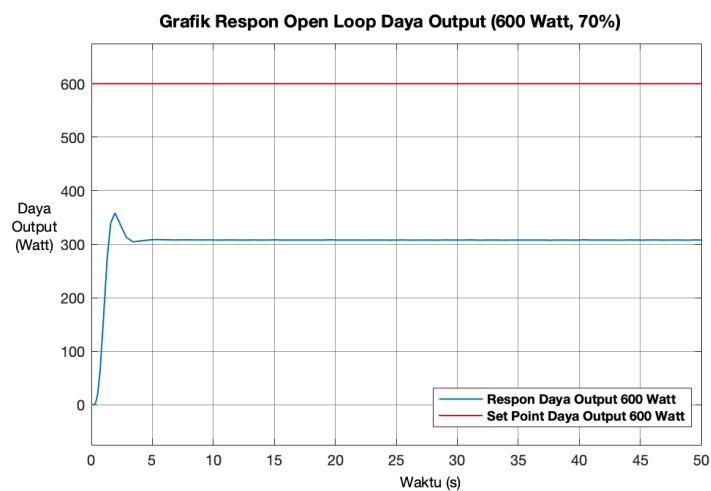
**Gambar 4.20** Grafik Respon Uji *Open Loop* Penambahan *Excess Air* Kandungan Metana 60%





**Gambar 4.21** Grafik Respon Uji *Open Loop* Penambahan *Excess Air* Kandungan Metana 50%

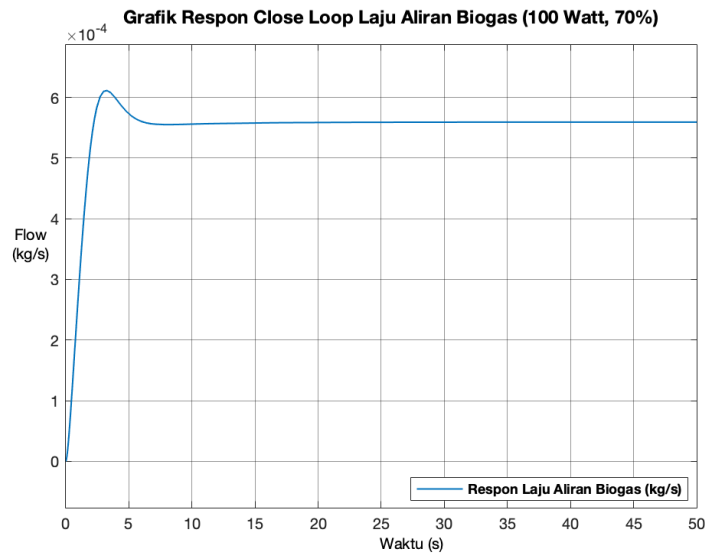
Gambar 4.24 menunjukkan daya *output* yang dihasilkan pada simulasi *open loop* tidak sesuai dengan pembebanan. *Set point* beban 600 watt menghasilkan daya *output* sebesar 307,7 watt sehingga dapat menjadikan acuan dasar mengapa sistem ini perlu dikendalikan.



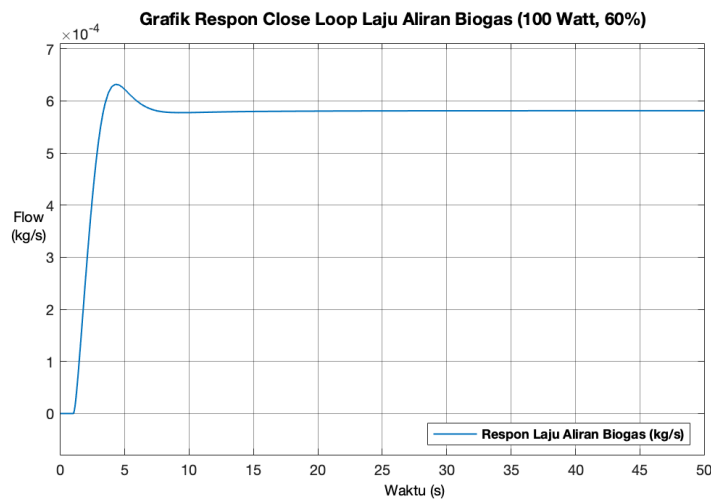
**Gambar 4.24** Grafik Respon Uji *Open Loop* Pembebanan 600 watt pada Kandungan Metana 70%

#### 4.4 Pengujian *Close Loop*

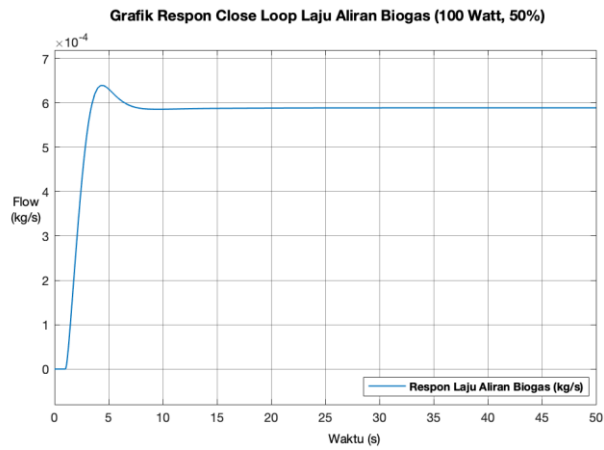
Setelah dilakukan pengujian secara *open loop*, kemudian dilakukan simulasi dengan menggunakan sistem kontrol PID pada Simulink Matlab R2020b sebagai pengendali temperatur pembakaran dan daya *output*. Hasil dari simulasi ini dapat memperlihatkan perbedaan respon sistem sebelum dikontrol dan sesudah dikontrol. Pada hasil uji *close loop* akan diperoleh respon untuk yang menggambarkan performa seperti pada gambar berikut.



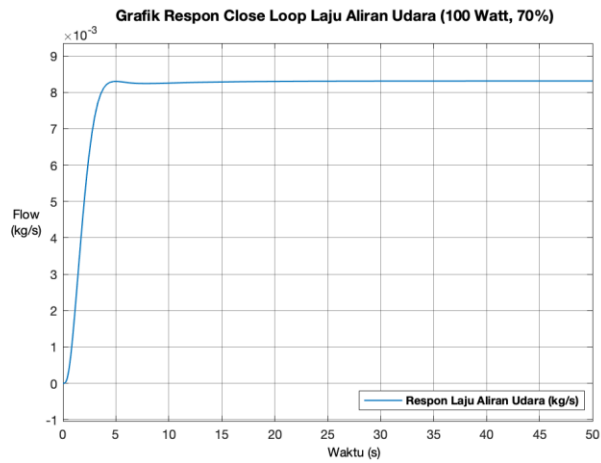
**Gambar 4.22** Grafik Respon *Close Loop Control Valve* Biogas Kandungan Metana 70% Beban 100 Watt



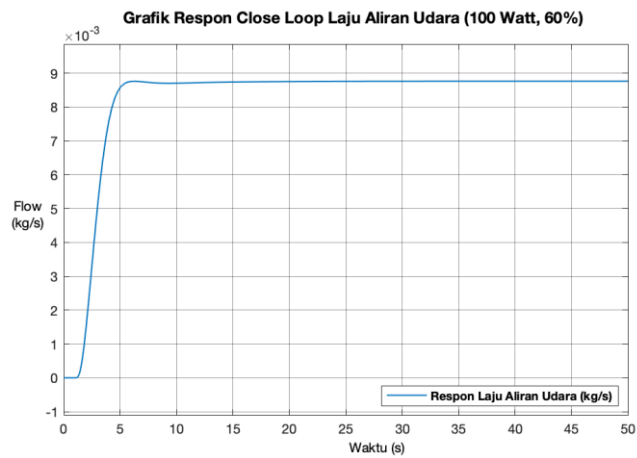
**Gambar 4.23** Grafik Respon *Close Loop Control Valve* Biogas Kandungan Metana 60% Beban 100 Watt



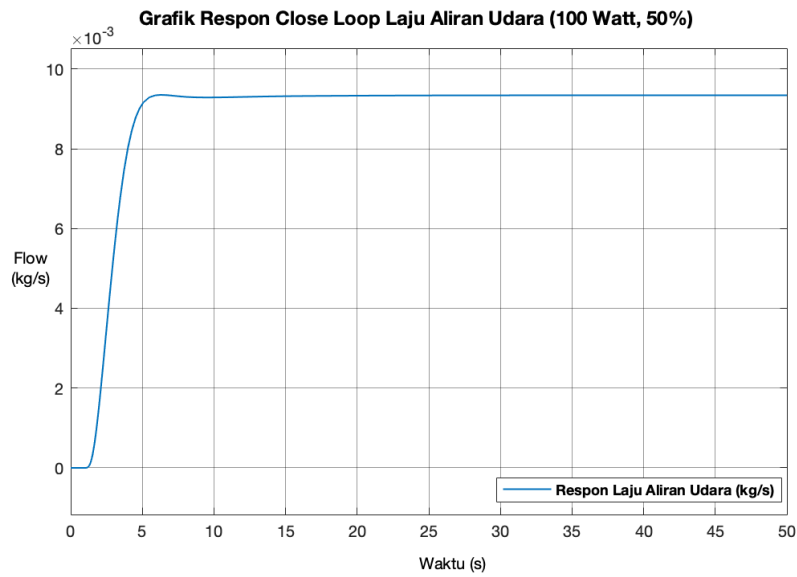
**Gambar 4.24** Grafik Respon *Close Loop Control Valve* Biogas Kandungan Metana 50% Beban 100 Watt



**Gambar 4.25** Grafik Respon *Close Loop Control Valve* Udara Kandungan Metana 70% Beban 100 Watt

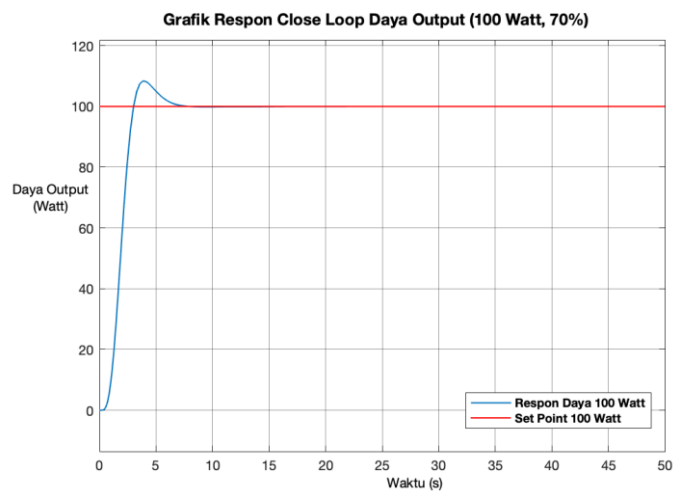


**Gambar 4.26** Grafik Respon *Close Loop Control Valve* Udara Kandungan Metana 60% Beban 100 Watt

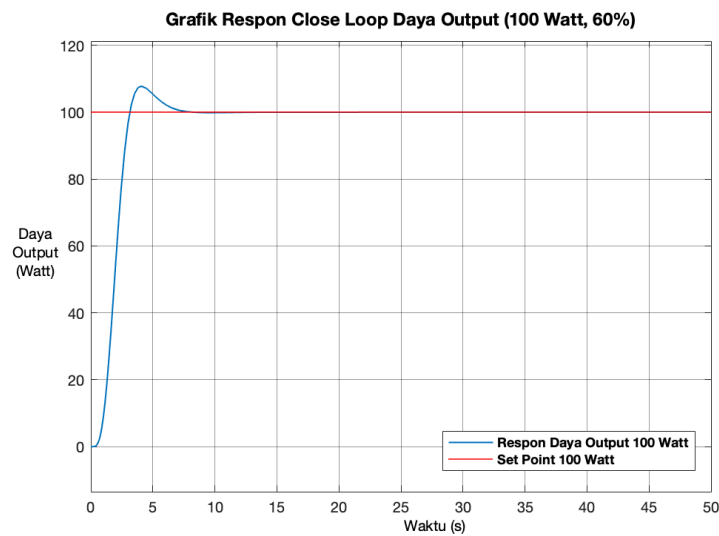


**Gambar 4.27** Grafik Respon *Close Loop Control Valve* Udara Kandungan Metana 50% Beban 100 Watt

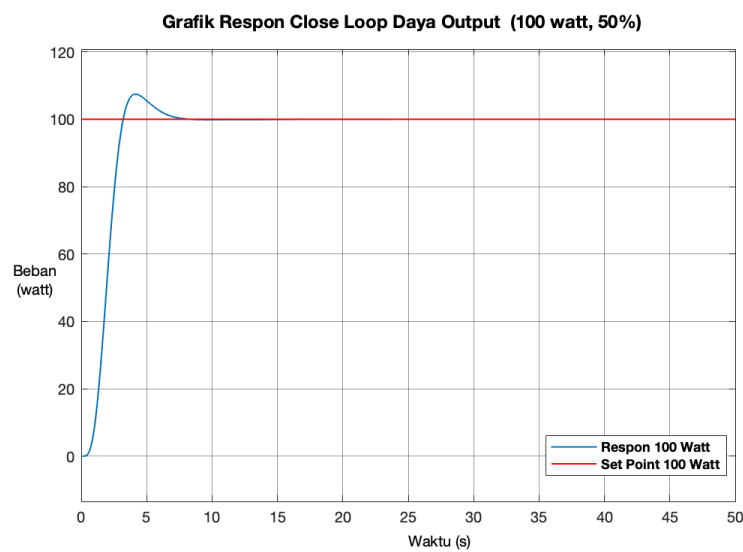
Tampak melalui hasil simulasi *close loop controller* PID, dengan memanipulasi laju aliran bahan bakar gas didapatkan respon *control valve* udara pada tingkatan kandungan metana 50%, 60%, dan 70% dengan pembebanan 100 watt menunjukkan nilai keluaran *flow* biogas sebesar 0,000589 kg/s, 0,0005811 kg/s, 0,0005593 kg/s. Sedangkan untuk *control valve* udara menunjukkan nilai keluaran *flow* udara sebesar 0,009341 kg/s, 0,008763 kg/s, 0,008314 kg/s.



**Gambar 4.28** Grafik Respon *Close Loop Daya Output* Biogas Kandungan Metana 70% Beban 100 Watt

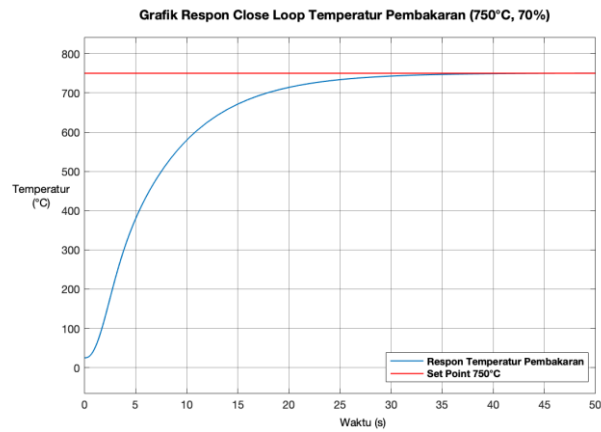


**Gambar 4.29** Grafik Respon *Close Loop* Daya Output Biogas Kandungan Metana 60% Beban 100 Watt

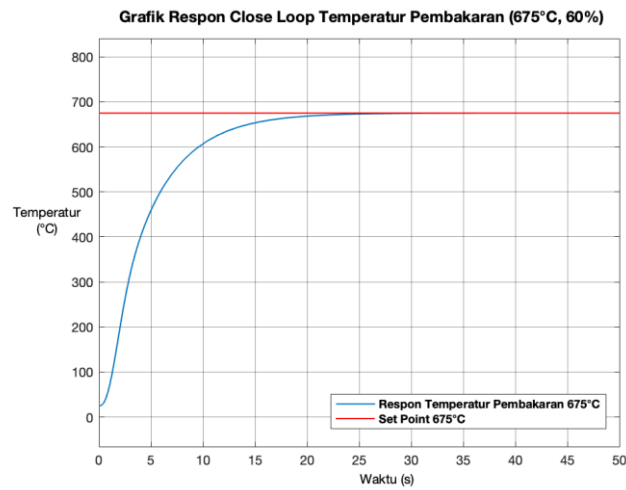


**Gambar 4.30** Grafik Respon *Close Loop* Daya Output Biogas Kandungan Metana 50% Beban 100 Watt

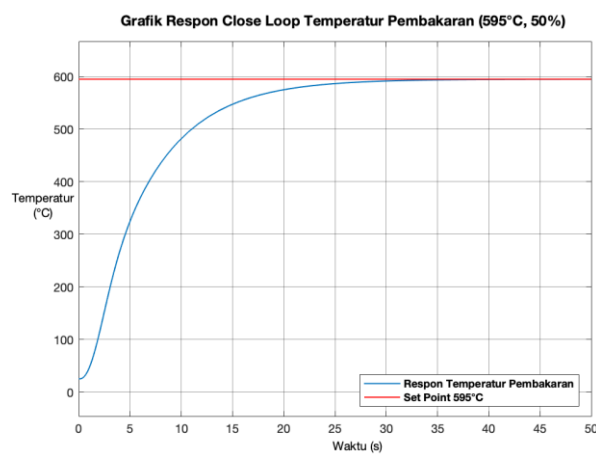
Hasil simulasi *close loop*, diperoleh grafik respon daya *output* dengan pembebanan 100 watt pada gambar 4.34, 4.35, dan 4.36. Injeksi udara *control valve* udara dan biogas memberikan kontribusi pada genset biogas untuk menghasilkan jumlah daya *output* sebesar 100 watt.



**Gambar 4.31** Grafik Respon *Close Loop* Temperatur Pembakaran Kandungan Metana 70% Beban 100 Watt



**Gambar 4.32** Grafik Respon *Close Loop* Temperatur Pembakaran Kandungan Metana 60% Beban 100 Watt



**Gambar 4.33** Grafik Respon *Close Loop* Temperatur Pembakaran Kandungan Metana 50% Beban 100 Watt

Dari simulasi *close loop*, penggunaan sistem kontrol PID dengan temperatur pembakaran, beban, dan laju aliran biogas sebagai referensi diperoleh karakteristik respon untuk daya *output* sebagai berikut : *settling time* 26,7 s, 33,4 s, dan 34,45 s, *error steady state* (ess) 0,2%, 0,1%, dan 0,1%, *rise time* (tr) 1,76 s, 1,146 s, dan 1,648 s, *maximum overshoot* (Mp) 6,989%, 8,21%, dan 8,152%. Dan untuk karakteristik respon temperatur pembakaran sebagai berikut : *settling time* 38,2 s, 36,85 s, dan 47,15 s, *error steady state* (ess) 0,05%, 0,2%, dan 0,2%, *rise time* (tr) 8,228 s, 8,832 s, dan 13,589 s, *maximum overshoot* (Mp) 0,499%, 0,5%, dan 0,51%.

Penggunaan sistem kontrol berbasis kontroler PID ini dapat membuktikan bahwa kontroler dapat mengakomodasi proses variabel temperatur pembakaran dan daya *output* pada genset biogas. Walaupun pada awalnya terdapat osilasi yang kecil dan tidak berdampak signifikan, kontroler ini dapat membantu sistem untuk mencapai *set point* yang diinginkan yaitu sebesar 595°C, 675°C, dan 750°C dan pembebanan 100 watt, 200 watt, 300 watt, 400 watt, 500 watt, 600 watt.

Tujuan utama dari perancangan rasio kontrol pada ruang bakar genset biogas adalah bagaimana sistem kontrol ini mampu mengendalikan laju aliran udara dan biogas sehingga diperoleh respon sistem yang mampu mencapai *set point* daya *output* yang telah ditentukan serta temperatur pembakaran yang sesuai dengan kebutuhan di masing masing tingkatan kandungan metana.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Hasil perancangan rasio kontrol pada ruang bakar genset biogas mampu mengakomodasi kondisi proses variabel untuk mencapai *set point* yang ditentukan. Dari sistem kontrol berbasis PID didapatkan karakteristik respon untuk daya *output* sebagai berikut : *settling time* 26,7 s, 33,4 s, dan 34,45 s, *error steady state* (ess) 0,2%, 0,1%, dan 0,1%, *rise time* (tr) 1,76 s, 1,146 s, dan 1,648 s, *maximum overshoot* (Mp) 6,989%, 8,21%, dan 8,152%. Untuk karakteristik respon temperatur pembakaran sebagai berikut : *settling time* 38,2 s, 36,85 s, dan 47,15 s, *error steady state* (ess) 0,05%, 0,2%, dan 0,2%, *rise time* (tr) 8,228 s, 8,832 s, dan 13,589 s, *maximum overshoot* (Mp) 0,499%, 0,5%, dan 0,51%.
2. Semakin tinggi kandungan metana pada biogas, maka temperatur pembakaran akan meningkat, namun di setiap penambahan beban *flow rate* udara dan biogas akan menurun. Hal ini dikarenakan nilai kalor pada tingkatan metana berbeda, semakin tinggi kandungannya semakin tinggi nilai kalor yang dihasilkan sehingga pada kandungan metana yang tinggi konsumsi biogas lebih efisien. Dapat disimpulkan bahwa setiap tingkatan kandungan metana memiliki nilai AFR yang berbeda.
3. Penambahan oksigen *excess air* berdampak pada perubahan *set point* temperatur pembakaran biogas dengan tingkatan kandungan metana yang berbeda karena pada penggunaan nilai AFR stoikiometri temperatur pembakaran yang dihasilkan lebih tinggi dari *set point*.
4. Hubungan antara temperatur pembakaran terhadap daya *output* yang dihasilkan genset biogas tidak berpengaruh, karena pada perubahan beban 100-600 watt dengan nilai AFR 15,86, 15,08, dan 14,87 menghasilkan temperatur yang tetap berada pada kisaran 595°C, 675°C, dan 750°C.

5. Besarnya nilai temperatur pembakaran dapat menjadi parameter tercapai atau tidaknya pembakaran sempurna. Pada penggunaan AFR stoikiometri menghasilkan temperatur pembakaran yang terlalu tinggi, sehingga mengakibatkan konsumsi biogas lebih banyak dibandingkan AFR dengan penambahan *excess air* yang menghasilkan temperatur pembakaran sesuai kebutuhan. Contoh pada pembebanan 100 watt kandungan metana 70% dengan AFR stoikiometri 11,25, laju aliran biogas yang digunakan sebesar 0,0006406 kg/s dan AFR penambahan *excess air* 14,87 sebesar 0,0005593 kg/s. Hal ini dikarenakan pada temperatur pembakaran yang terlalu tinggi biogas lebih cepat menguap dan terbuang secara sia-sia.

## 5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya, antara lain :

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk sistem rasio kontrol pada ruang bakar genset biogas dengan menggunakan algoritma kontrol cerdas (*artificial intelligent*) untuk mendapatkan hasil yang lebih bagus.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk variabel proses yang lain.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, Maulana, Aep Saepudin, and Arifin Santoso. 2012. "Study of Biogas for Power Generation at Pesantren Saung Balong Al-Barokah, Majalengka, West Java." *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology* 2(2): 73.
- Artayana, Ketut Catur Budi, I Gusti Bagus Wijaya Kusum, and I Wayan Bandem Adnyana. 2014. "Pengaruh Variasi Konverter Biogas Terhadap Unjuk Kerja Pada Mesin Genset Berkapasitas 1200 Watt." *Logic* 14(3): 199–206.
- Cong, Huynh Thanh. 2016. "A Study on Designing of an Electronically Operated Fuel Supply System for a Simulated Biogas SI Single Cylinder Engine A Study on Designing of an Electronically Operated Fuel Supply System for a Simulated Biogas SI Single Cylinder Engine." (October): 3–6.
- Daingade, Prashant S., and S. D. Yadav. 2013. "Electronically Operated Fuel Supply System to Control Air Fuel Ratio of Biogas Engine." *2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability, ICEETS 2013*: 740–43.
- Dengan, Merr, and C N Rasio Yang. 2019. "KUALITAS BAHAN BIOGAS DAN BIOGAS DARI FESES SAPI DAN LIMBAH KULIT NANAS DENGAN C / N RASIO YANG BERBEDA."
- Hamidi, Nurkholis, I N G Wardana, and Denny Widhiyanuriyawan. 2011. "Peningkatan Kualitas Bahan Bakar Biogas Melalui Proses Pemurnian Dengan Zeolit Alam." *Rekayasa Mesin* 2(3): 227–31.
- Johns Environmental Pty Ltd. 2017. "Biogas Capture , Storage and Combustion Guidelines for Meat Processing Plants." : 1–44. <https://www.ampc.com.au/2017/10/Biogas-Capture-Storage-and-Combustion-Guidelines-for-Meat-Processing-Plants>.
- Judul, Halaman et al. 2017. "Analisis Absorpsifitas Gas H<sub>2</sub>S Pada Filter Purifikasi Biogas Dengan Mempergunakan."
- Khudhori, Muhrom, and Dedet Hermawan Setiabudi. 2013. "Optimalisasi Unjuk Kerja Genset Berbahan Bakar Hybrid ( Biogas-Bensin ) Untuk Mendukung Pilot Plant Dme ( Desa Mandiri Energi ) Di Berbah." *Jurnal Teknik* 1: 113–22.

- Kristanto, Dionisius Andy, Teknik Fisika, and Fakultas Teknologi Industri. "Perancangan Rasio Kontrol Pada Burner Miniplant Boiler Di Workshop Instrumentasi." : 1–7.
- Lasmi, Ni Ketut, Alamta Singarimbun, and Wahyu Srigutomo. 2015. "Pengukuran Perbedaan Tekanan Dan Laju Aliran Biogas Pada Pipa Venturi Menggunakan Generator Berbahan Bakar Biogas Untuk Menghasilkan Energi Listrik." *Prosiding Simposium Nasional Inovasi dan Pembelajaran Sains 2015 (SNIPS 2015)* 2015(Snips): 29–32.
- M., Mulyati. 2009. "Desain Alat Biogas Dari Kotoran Sapi Skala Rumah Tangga." *Jurnal Teknik Industri* 9 (1): 1–16.
- Nuralamsyah, Muhammad Danang, Aris Triwiyatno, and Budi Setiyono. 2013. "Desain Sistem Kontrol Rasio Perbandingan Udara Dan Bahan Bakar (AFR) Pada Mesin 4 Langkah Dengan Metode Penalaan PID Berbasis Logika Fuzzy." *Transient* 2(2): 185–92.
- Panjaitan Aulia Rahma. 2014. "BAHAN BAKAR DAN EMISI GAS BUANG PADA ENGINE TOYOTA SERI 4K Oleh AULIA RAHMAN PANJAITAN." *Teknik Industri* 4(2): 1–10.
- Pengendalian, Perancangan Sistem. 2018. *KECEPATAN PUTARAN PADA GENERATOR SET*.
- Rahmawati, Laifa, Rizky Stiyabudi, and Lita Agustiani. 2009. "Pembakaran Biobriket Dari Limbah Penggilingan Padi (Sekam )." : 1–11.
- Rozaq, Abdur. 2016. "Perancangan Filter Purifikasi Biogas Menggunakan Wet Scrubber Design Biogas Purification Filter Using Wet Scrubber."
- Wirateruna, Efendi S, Singgih Hawibowo, and Rachmawan Budiarto. 2014. "Perancangan Karburetor Untuk Bahan Bakar Biogas Pada Generator Set 900 VA." *Teknofisika* 3(2): 52–58.

## LAMPIRAN

### 1. Perhitungan dari Hasil Uji *Open Loop*

<b>Perhitungan 50% AFR 15,86</b>							
<b>Beban (watt)</b>	<b>Laju Aliran Udara (kg/s)</b>	<b>Laju Aliran Biogas (kg/s)</b>	<b>Laju Aliran Ruang Bakar (kg/s)</b>	<b>AFR</b>	<b>Nilai Kalor (kJ)</b>	<b>Temperatur (°C)</b>	<b>Daya Output (watt)</b>
100	0.00928603	0.0005855	0.00987	15.86	13.085925	594.7	98.67
200	0.01310036	0.000826	0.01393	15.86	18.4611	594.9	198.6
300	0.0160186	0.00101	0.01703	15.86	22.5735	595	298.5
400	0.01842932	0.001162	0.01959	15.86	25.9707	595.1	397.3
500	0.02068144	0.001304	0.02199	15.86	29.1444	595.1	499.5
600	0.02255292	0.001422	0.02397	15.86	31.7817	595	597.6

<b>Perhitungan 60% AFR 15,08</b>							
<b>Beban (watt)</b>	<b>Laju Aliran Udara (kg/s)</b>	<b>Laju Aliran Biogas (kg/s)</b>	<b>Laju Aliran Ruang Bakar (kg/s)</b>	<b>AFR</b>	<b>Nilai Kalor (kJ)</b>	<b>Temperatur (°C)</b>	<b>Daya Output (watt)</b>
100	0.008718	0.0005781	0.00930	15.08	14.001582	675	98.76
200	0.01227	0.0008135	0.01308	15.08	19.70297	674.9	198.3
300	0.01498	0.0009935	0.01598	15.08	24.06257	675.2	297.8
400	0.01727	0.001145	0.01841	15.08	27.7319	675.1	397.4
500	0.01939	0.001286	0.02068	15.08	31.14692	675.2	499.9
600	0.02120	0.001406	0.02261	15.08	34.05332	675.1	599

<b>Perhitungan 70% AFR 14,86</b>							
<b>Beban (watt)</b>	<b>Laju Aliran Udara (kg/s)</b>	<b>Laju Aliran Biogas (kg/s)</b>	<b>Laju Aliran Ruang Bakar (kg/s)</b>	<b>AFR</b>	<b>Nilai Kalor (kJ)</b>	<b>Temperatur (°C)</b>	<b>Daya Output (watt)</b>
100	0.0082607	0.0005559	0.00882	14.86	14.781381	749.9	98.69
200	0.0116532	0.0007842	0.01244	14.86	20.851878	750	198.8
300	0.0142047	0.0009559	0.01516	14.86	25.417381	750.4	298
400	0.0164054	0.001104	0.01751	14.86	29.35536	750.3	398.4
500	0.0183075	0.001232	0.01954	14.86	32.75888	750.4	497.7
600	0.0200759	0.001351	0.02143	14.86	35.92309	750.2	598.7

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BIODATA PENULIS



Nadya Sari Nastiti atau sering dipanggil Nadya lahir di Surabaya, 08 April 1999. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis mengawali pendidikannya di SD Al-Hikmah Surabaya, kemudian dilanjutkan di SMP Al-Hikmah Surabaya dan SMAN 15 Surabaya. Pada tahun 2017, penulis diterima sebagai mahasiswa baru Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) di Departemen Teknik Fisika. Selama mengenyam bangku kuliah, penulis menekuni bidang minat instrumentasi dan kontrol.

Email : [nadyanastiti08@gmail.com](mailto:nadyanastiti08@gmail.com)

HP/WA : 081235060519

Line : [nadyasari\\_](#)

Instagram : [nadyabatman](#)

Twitter : [nadyasari](#)