



**PENGARUH VARIASI BAHAN BAKU BIOGAS TERHADAP
KARAKTERISTIK API PEMBAKARAN PADA
*MESO SCALE COMBUSTOR***

SKRIPSI

Oleh

Agung Kusuma Putra

191910101078

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS JEMBER
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK MESIN
JEMBER
2023**



**PENGARUH VARIASI BAHAN BAKU BIOGAS TERHADAP
KARAKTERISTIK API PEMBAKARAN PADA
*MESO SCALE COMBUSTOR***

SKRIPSI

diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana pada
program studi S1 Teknik Mesin

Oleh

Agung Kusuma Putra

191910101078

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS JEMBER
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK MESIN**

JEMBER

2023

PERSEMBAHAN

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala limpahan Rahmat serta hidayah-Nya dan sholawat serta salam senantiasa tertuju kepada Nabi Besar Muhammad SAW. Saya sembahkan skripsi ini dengan segala cinta dan kasih sayang kepada :

1. Ayahanda tersayang Relawan dan Ibunda tercinta Juhariyah, yang selalu mendoakan dan memberi semangat untuk keberhasilan dan kesuksesan putranya di dunia maupun akhirat.
2. Ketiga adik saya yaitu : Ariel Putra Ramadhan, Arsyah Achmad Putra Abinaya, dan Almeer Hiko Ibrahim yang selalu membuat saya termotivasi dan semangat selama melakukan penelitian ini.
3. Guru-guru saya dari TK sampai SMA seluruh dosen, khususnya Dosen Program Studi Strata Satu Teknik Mesin, Universitas Jember yang telah mencurahkan segenap ilmunya serta memberikan bimbingan dengan penuh keiklasan dan kesabaran.
4. Teman-temanku khususnya Angkatan 2019 Teknik Mesin, Universitas Jember yang selalu memberikan dukungan dan selalu Bersama dalam suka dan duka.
5. Almamater Program Studi Strata Satu Teknik Mesin, Universitas Jember yang menjadi kebanggaan
6. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan

MOTTO

“Semua boleh gagal, kecuali doa orang tua”

“jangan terjebak oleh dogma, yaitu hidup dengan hasil pemikiran orang lain”

(Steve Jobs)



PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Agung Kusuma Putra

NIM : 191910101078

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya tulis ilmiah yang berjudul “*Pengaruh Variasi Bahan Baku Biogas Terhadap Karakteristik Api Pembakaran Pada Meso Scale Combustor*” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang telah saya sebutkan sumbernya dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 08 Juli 2023

yang menyatakan,

(Agung Kusuma Putra)

NIM. 191910101078

HALAMAN PERSETUJUAN

Skripsi berjudul *Pengaruh Variasi Bahan Baku Biogas Terhadap Karakteristik Api Pembakaran Pada Meso Scale Combustor* telah diuji dan disahkan oleh Fakultas Teknik Universitas Jember pada:

Hari :

Tanggal :

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Pembimbing

Tanda Tangan

1. Pembimbing Utama

Nama : Ir. Aris Zainul Muttaqin S.T., M.T. (.....)

NIP : 196812071995121002

2. Pembimbing Anggota

Nama : Dr. Ir Salahuddin Junus S.T., M.T., IPM. (.....)

NIP : 197510062002121002

Penguji

1. Penguji Utama

Nama : Dr. Muh. Nurkoyim Kustanto S.T., M.T. (.....)

NIP : 196911221997021001

2. Penguji Anggota 1

Nama : Ir. Dwi Djumhariyanto M.T. (.....)

NIP : 196008121998021001

ABSTRAK

Pada saat ini perkembangan terkait peralatan *Micro Elektro Mechanical System* (MEMS) sedang giat-giatnya diteliti. Salah satunya adalah perkembangan *Micro Power Generator* yang berbasis pada pembakaran skala kecil (*Micro/Meso Combustion*). Namun sampai saat ini, banyak permasalahan yang terjadi pada pembakaran skala *Micro/Meso* tersebut. Agar api saat pembakaran dapat stabil maka upaya yang dilakukan adalah meningkatkan *fuel residence time*, kecepatan reaksi pembakaran dan mengurangi *heat loss*. Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian menggunakan variasi biogas dengan bahan baku kotoran sapi dan baglog untuk melihat karakteristik api pembakaran pada *meso scale combustor*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi bahan baku biogas terhadap karakteristik nyala api pada *meso scale combustor*. Pada penelitian ini bervariasi bahan baku biogas dan variasi debit bahan bakar – udara. Bahan baku yang digunakan adalah biogas kotoran sapi, biogas baglog, dan biogas campuran kotoran sapi - baglog dengan variasi debit bahan bakar - udara pada *meso scale combustor* dengan rasio *combustor* D1/D2 0,9. Adapun hasil yang didapati yaitu biogas campuran kotoran sapi – baglog menghasilkan kualitas api yang lebih stabil dibandingkan dengan biogas kotoran sapi dan biogas baglog. Biogas campuran kotoran sapi – baglog memiliki *flame stability limit* yang lebih luas, *flame mode map* yang lebih terdistribusi luas, dan temperatur nyala api yang lebih tinggi yaitu 713,07°C dan pada dinding *combustor* memiliki temperatur 209,84°C yang lebih tinggi daripada biogas kotoran sapi dan biogas baglog.

Kata Kunci : Biogas, api, *meso scale combustor*, pembakaran

ABSTRACT

Currently, developments related to Micro Electro Mechanical System (MEMS) equipment are being actively researched. One of them is the development of Micro Power Generators based on small-scale combustion (Micro/Meso Combustion). But until now, many problems have occurred in the Micro / Meso scale combustion. In order for the fire during combustion to be stable, the efforts made are to increase the fuel residence time, the speed of the combustion reaction and reduce heat loss. In this study, tests will be carried out using variations of biogas with cow dung and baglog raw materials to see the characteristics of the combustion fire on the meso scale combustor. This study aims to determine the effect of variations in biogas raw materials on the characteristics of the flame on the meso scale combustor. In this study varying biogas raw materials and variations in fuel - air discharge. The raw materials used are cow dung biogas, baglog biogas, and mixed cow dung - baglog biogas with variations in fuel - air discharge at the meso scale combustor with a $D1 / D2$ combustor ratio of 0.9. The results obtained are cow dung - baglog mixed biogas produces a more stable flame quality compared to cow dung biogas and baglog biogas. Cow dung - baglog mixed biogas has a wider flame stability limit, a more widely distributed flame mode map, and a higher flame temperature of $713.07\text{ }^{\circ}\text{C}$ and at the combustor wall has a temperature of $209.84\text{ }^{\circ}\text{C}$ which is higher than cow dung biogas and baglog biogas.

Keywords: Biogas, flame, meso scale combustor, combustion

RINGKASAN

Pengaruh Variasi Bahan Baku Biogas Terhadap Karakteristik Api Pembakaran Pada *Meso Scale Combustor*; Agung Kusuma Putra, 191910101078; 2023; 36 halaman; Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Pada saat ini perkembangan terkait peralatan *Micro Elektro Mechanical System* (MEMS) sedang giat-giatnya diteliti. Salah satunya adalah perkembangan *Micro Power Generator* yang berbasis pada pembakaran skala kecil (*Micro/Meso Combustion*). Namun sampai saat ini, banyak permasalahan yang terjadi pada pembakaran skala *Micro/Meso* tersebut. Terutama pada laju aliran campuran bahan bakar dan udara tinggi, karena mengakibatkan *fuel residence time* (waktu tinggal bahan bakar) di dalam *micro/meso-scale combustor*, waktu reaksi pembakaran menurun dan meningkatnya *heat loss*. Agar api saat pembakaran dapat stabil maka upaya yang dilakukan adalah meningkatkan *fuel residence time*, kecepatan reaksi pembakaran dan mengurangi *heat loss*. Penurunan diameter *combustor* dapat mengakibatkan peningkatan *surface to volume ratio*, sehingga meningkatkan *heat loss* dan mengurangi stabilitas nyala api di dalam *combustor*. pada penelitian ini akan dilakukan pengujian menggunakan variasi biogas dengan bahan baku kotoran sapi dan baglog untuk melihat karakteristik api pembakaran pada *meso scale combustor*.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi bahan baku biogas terhadap karakteristik nyala api pada *meso scale combustor*. Pada penelitian ini bervariasi bahan baku biogas dan variasi debit bahan bakar – udara. Bahan baku yang digunakan adalah biogas kotoran sapi, biogas baglog, dan biogas campuran kotoran sapi - baglog dengan variasi debit bahan bakar - udara pada *meso scale combustor* dengan rasio *combustor* $D1/D2$ 0,9.

Pada hasil penelitian didapati bahwa biogas campuran kotoran sapi – baglog menghasilkan *flame stability limit*, *flame mode map*, *visualisasi api*, dan temperatur yang bagus dibandingkan biogas kotoran sapi dan biogas baglog.



PRAKATA

Puji Syukur atas keharidrat Allah SWT atas karunia-Nya sehingga penulisan skripsi yang berjudul “*Pengaruh Variasi Bahan Baku Biogas Terhadap Karakteristik Api Pembakaran Pada Meso Scale Combustor*” dapat terselesaikan dengan baik. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember. Penyusunan Skripsi ini tidak lepas dari bantuan beberapa pihak. Oleh karena itu dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Allah SWT pencipta alam semesta yang telah memberikan kemudahan, kelancaran, kenikmatan, dan kebaikan dalam seluruh proses penyusunan Tugas Akhir dari awal hingga akhir.
2. Ir. Aris Zainul Muttaqin S.T., M.T. dan Dr. Ir Salahuddin Junus S.T., M.T., IPM., selaku Dosen Pembimbing yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam menyusun skripsi ini.
3. Dr. Muh. Nurkoyim Kustanto S.T., M.T dan Ir. Dwi Djumhariyanto M.T., selaku Dosen Penguji yang telah memberi masukan, saran, dan kritik sehingga penyusunan skripsi ini menjadi lebih baik.
4. Segenap dosen Program Strata Satu Teknik Mesin Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember atas segala ilmu yang telah diberikan selama saya menjadi mahasiswa.
5. Teman-teman angkatan 2019 Program Strata Satu Teknik Mesin Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember yang telah membantu dan memberikan motivasi satu sama lain.
6. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

DAFTAR ISI

PERSEMBAHAN	iii
MOTTO	iv
PERNYATAAN ORISINALITAS	v
HALAMAN PERSETUJUAN	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
RINGKASAN	ix
PRAKATA	xi
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
DAFTAR NOTASI	xviii
DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN	xix
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah	3
1.6 Hipotesis	3
BAB 2 TINJAUAN TEORI	4
2.1 Energi Terbarukan	4
2.1.1 Biogas.....	4
2.1.2 Pembentukan Biogas.....	4
2.1.3 Faktor Yang Mempengaruhi Produksi Biogas.....	5
2.2 Bahan Pembuatan Biogas	7
2.2.1 Kotoran Sapi	7
2.2.2 Baglog	7
2.3 Pembakaran	8

2.3.1	Debit Bahan Bakar dan Udara.....	8
2.3.2	<i>Air Fuel Ratio</i> (AFR)	9
2.3.3	<i>Equivalence Ratio</i> (ϕ).....	10
2.3.4	<i>Flame Mode Map</i>	10
2.3.5	<i>Flame Stability Limit</i>	11
2.4	<i>Meso Scale Combustor</i>	11
2.4.1	<i>Backward Facing Step</i>	12
2.4.2	Karakteristik nyala api	12
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		16
3.1	Metode Penelitian	16
3.2	Waktu dan Tempat	16
3.3	Alat dan Bahan	16
3.3.1	Alat.....	16
3.3.2	Bahan.....	16
3.4	Variasi Penelitian	17
3.4.1	Variabel Bebas	17
3.4.2	Variabel Terikat	17
3.4.3	Variabel Kontrol.....	17
3.5	Skema Alat Uji	18
3.6	Prosedur Penelitian	18
3.7	Tahap Pengambilan Data	19
3.7.1	Pengambilan Data <i>Flame Stability Limit</i>	19
3.7.2	Pengambilan Data <i>Visualisasi Flame Mode</i>	20
3.7.3	Pengambilan data <i>Flame Mode Map</i>	20
3.7.4	Pengambilan Data Temperatur Nyala Api	21
3.7.5	Pengambilan Data Temperatur Dinding <i>Combustor</i>	21
3.8	Diagram Penelitian	22
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN		23
4.1	Hasil Penelitian	23
4.1.1	Kadar CH ₄ Dan CO ₂ Pada Biogas Yang Dihasilkan.....	23
4.1.2	<i>Flame Stability Limit</i>	23
4.1.3	<i>Flame Mode Map</i>	24

4.1.4	Visualisasi Nyala Api.....	26
4.1.5	Temperatur api dan dinding <i>combustor</i>	28
4.2	Pembahasan	30
4.2.1	Kadar CH ₄ dan CO ₂	30
4.2.2	<i>Flame Stability Limit</i>	31
4.2.3	Visualisasi <i>Flame Mode</i>	31
4.2.4	<i>Flame Mode Map</i>	32
4.2.5	Temperatur	33
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN		33
5.1	Kesimpulan	33
5.2	Saran.....	33
DAFTAR PUSTAKA		34
LAMPIRAN-LAMPIRAN		35

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 data Visualisasi Flame Mode	20
Tabel 4. 1 kadar CH ₄ dan CO ₂	23
Tabel 4. 2 Visualisasi nyala api rasio <i>combustor</i> 0,9.....	27
Tabel 4. 3 Persentase Kadar CH ₄ dan CO ₂	30

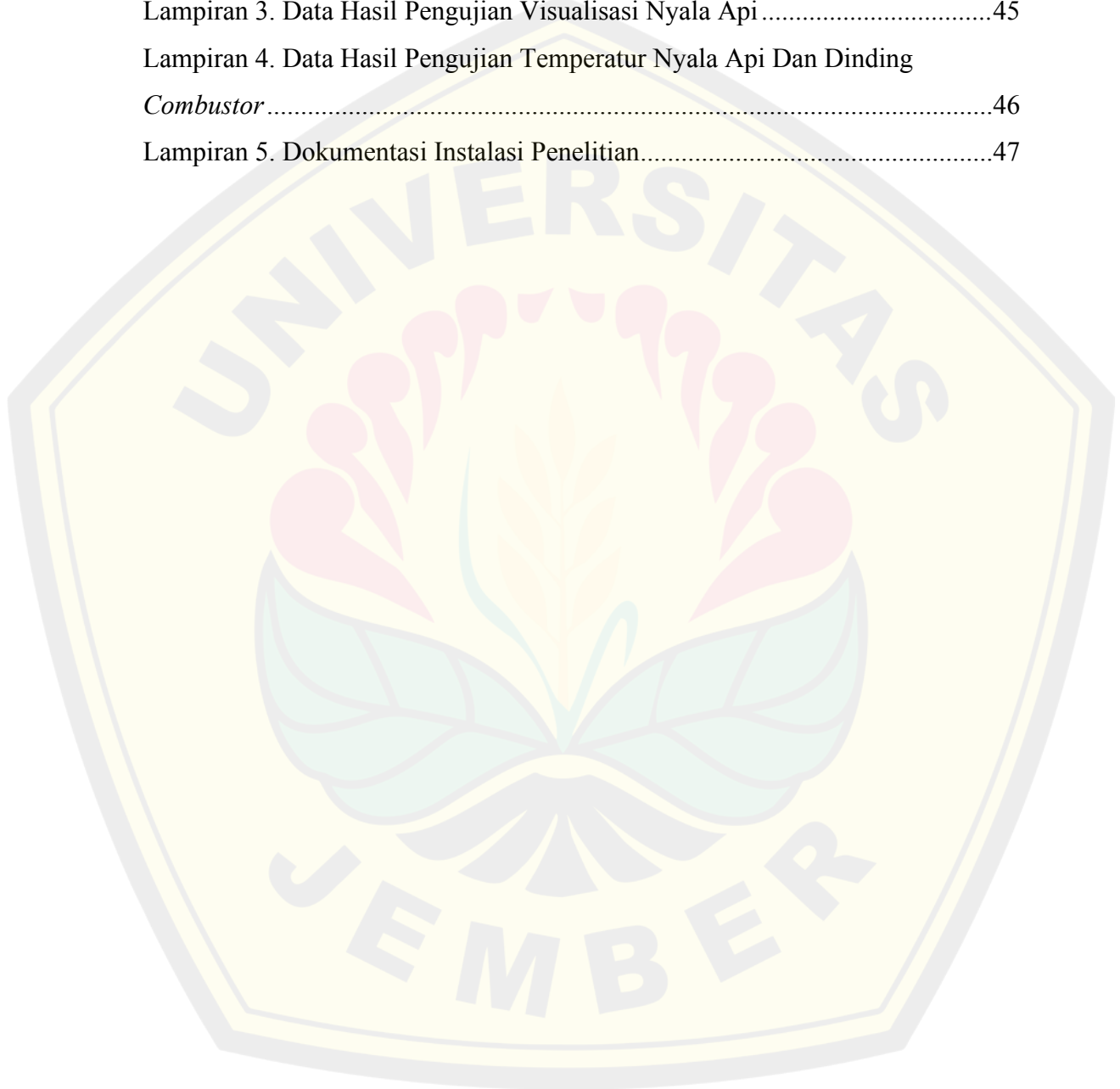


DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Siklus <i>anaerobic digestion</i>	5
Gambar 2. 2 segitiga pembakaran	8
Gambar 2. 3 <i>Flame mode map</i> pada rasio $D1/D2 = 0,7$	11
Gambar 2. 4 <i>Flame Stability Limit</i> rasio <i>combustor</i> 0,9	11
Gambar 2. 5 <i>Meso scale combustor</i> dengan <i>backward facing step</i>	12
Gambar 2. 6 <i>Blowout</i>	13
Gambar 2. 7 Marginal	13
Gambar 2. 8 Simetri	14
Gambar 2. 9 Asimetri	14
Gambar 2. 10 <i>spinning flame</i>	14
Gambar 2. 11 <i>Repetive extinction and re-ignition</i>	15
Gambar 2. 12 <i>Flashback</i>	15
Gambar 3. 1 Skema alat uji	18
Gambar 3. 2 Data <i>Flame Stability Limit</i>	19
Gambar 3. 3 Data <i>Flame Mode Map</i>	20
Gambar 3. 4 data Temperatur Nyala Api	21
Gambar 3. 5 Data Temperatur Dinding <i>Combustor</i>	21
Gambar 4. 1 <i>Flame stability limit</i>	24
Gambar 4. 2 <i>Flame mode map</i> biogas kotoran sapi	25
Gambar 4. 3 <i>Flame mode map</i> biogas baglog	25
Gambar 4. 4 <i>Flame mode map</i> biogas kotoran sapi - baglog	26
Gambar 4. 5 Temperatur nyala api pada rasio <i>combustor</i> 0,9	28
Gambar 4. 6 Grafik temperatur rata rata dinding <i>combustor</i>	29

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Perhitungan Pembakaran Bahan Bakar Pada <i>Meso Scale</i> <i>Combustor</i>	37
Lampiran 2. Data Hasil Pengujian <i>Flame Stability Limit</i>	42
Lampiran 3. Data Hasil Pengujian Visualisasi Nyala Api	45
Lampiran 4. Data Hasil Pengujian Temperatur Nyala Api Dan Dinding <i>Combustor</i>	46
Lampiran 5. Dokumentasi Instalasi Penelitian.....	47

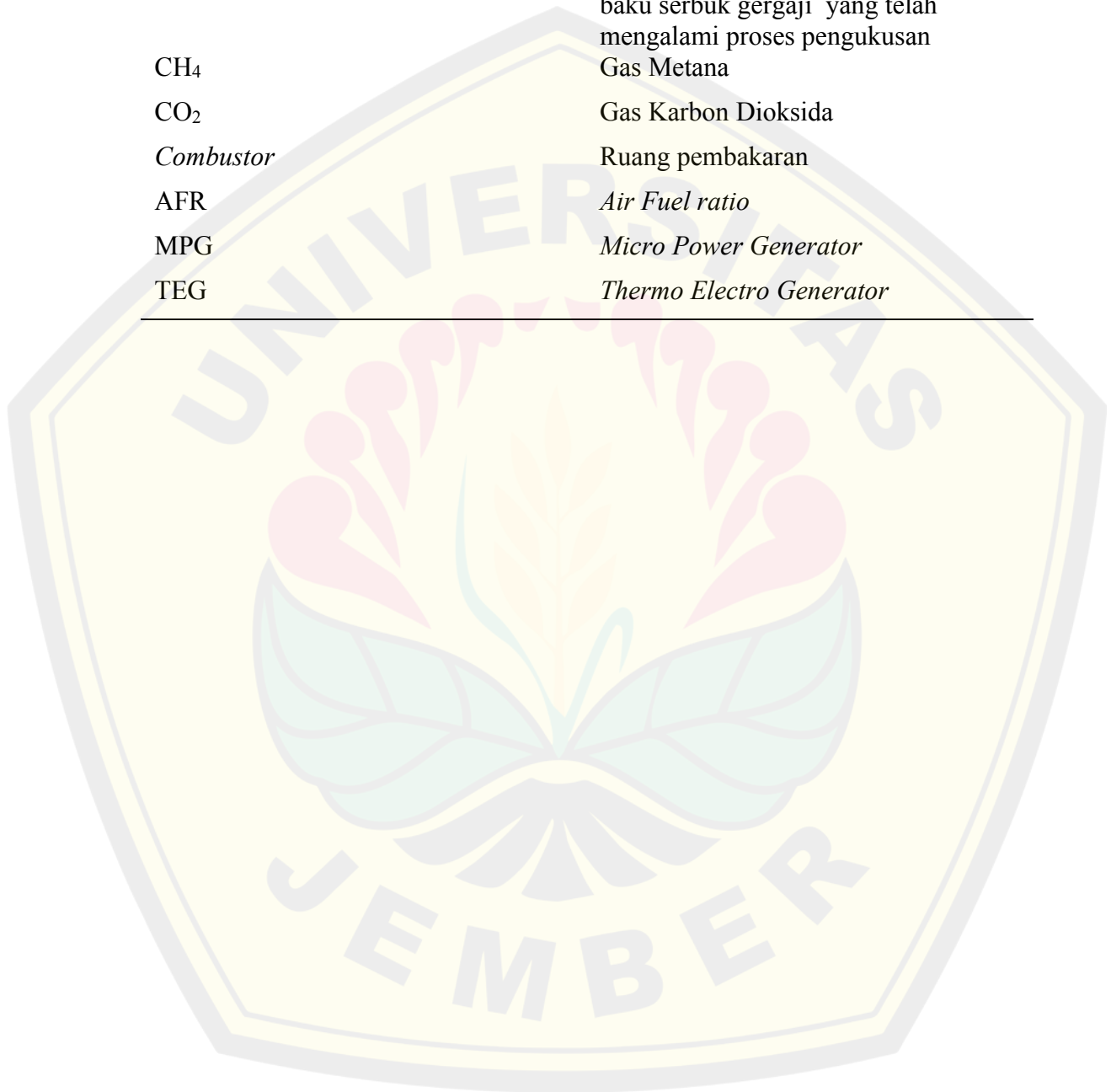


DAFTAR NOTASI

v_r	: Kecepatan Reaktan (M/S)
Q_a	: Debit Udara (Ml/Min)
Q_f	: Debit Bahan Bakar (Ml/Min)
A	: Penampang <i>Combustor</i> (M^2)
AFR	: <i>Air Fuel Ratio</i> (Rasio Bahan Bakar Dan Udara)
M_a	: Laju Massa Udara (Kg/Detik)
M_f	: Laju Massa Bahan Bakar (Kg/Detik)
M_a	: Massa Molekul Reaktif Udara (G/Mol)
M_f	: Massa Molekul Reaktif Bahan Bakar (G/Mol)
N_a	: Jumlah Mol Udara (Mol)
N_f	: Jumlah Mol Bahan Bakar (Mol)
Φ	: <i>Equivalence Ratio</i>
$(AFR)_s$: Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi stokiometrik
$(AFR)_a$: Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi aktual

DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN

Singkatan/Istilah	Arti dan keterangan
MEMS	<i>Micro Elektro Mechanical System</i>
Baglog	Media tanam jamur tiram berbahan baku serbuk gergaji yang telah mengalami proses pengukusan
CH ₄	Gas Metana
CO ₂	Gas Karbon Dioksida
<i>Combustor</i>	Ruang pembakaran
AFR	<i>Air Fuel ratio</i>
MPG	<i>Micro Power Generator</i>
TEG	<i>Thermo Electro Generator</i>



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Akhir-akhir ini perkembangan terkait miniaturisasi peralatan (MEMS) sedang giat-giatnya diteliti. Salah satunya adalah perkembangan *Micro Power Generator* yang berbasis pada pembakaran skala kecil (*Micro/Meso Combustion*). Komponen penting dalam *Micro Power Generator* (MPG) yaitu *Combustor* dalam skala *Micro/Meso*, dan modul pengkonversi energi panas menjadi energi listrik (*Thermo Electric Generator / Thermophotovoltaic* (Aravind et al., 2018; Fanciulli et al., 2018; Li et al., 2010; Meng et al., 2017)

Namun sampai saat ini, banyak permasalahan yang terjadi pada pembakaran skala *Micro/Meso* tersebut. Terutama pada laju aliran campuran bahan bakar dan udara tinggi, karena mengakibatkan *fuel residence time* (waktu tinggal bahan bakar) di dalam *micro/meso-scale combustor*, waktu reaksi pembakaran menurun dan meningkatnya *heat loss*. Agar api saat pembakaran dapat stabil maka upaya yang dilakukan adalah meningkatkan *fuel residence time*, kecepatan reaksi pembakaran dan mengurangi *heat loss* (Mikami et al., 2013). Penurunan diameter *combustor* dapat mengakibatkan peningkatan *surface to volume ratio*, sehingga meningkatkan *heat loss* dan mengurangi stabilitas nyala api di dalam *combustor* (Maruta, 2011).

Dalam penelitian yang telah dilakukan (Yang et al., 2002), untuk meningkatkan stabilitas pembakaran dalam sebuah *micro* atau *meso-scale combustor* dilakukan dengan menggunakan *backward facing step* atau pembesaran diameter *combustor* untuk meningkatkan proses pencampuran bahan bakar dan udara, serta untuk memperpanjang *fuel residence time* reaktan dalam daerah reaksi pembakaran. *Meso scale combustor* dengan *backward facing step* dalam penelitian ini sangat efektif dalam mengontrol posisi api, meningkatkan laju aliran, dan mampu mensirkulasikan pencampuran reaktan pada *combustor*. Penelitian lain menunjukkan bahwa penggunaan variasi bahan bakar metana dan propana akan menghasilkan karakteristik stabilitas nyala api yang berbeda-beda pada *meso scale combustor* dengan *backward facing step* (DuttaRoy et al., 2018). Pada penelitian penggunaan bahan bakar biogas-hidrogen menggunakan *bunsen burner*

mendapatkan karakteristik nyala api yang meningkat, berkat adanya pencampuran bahan bakar biogas dengan hidrogen dibandingkan jika hanya menggunakan biogas murni (Zhen et al., 2014).

Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan pengujian menggunakan variasi biogas dengan bahan baku kotoran sapi dan baglog untuk melihat karakteristik api pembakaran pada *meso scale combustor*.

1.2 Rumusan Masalah

Untuk mempermudah penelitian serta pembahasan dalam penelitian ini maka diberikan batasan masalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh variasi bahan bakar biogas dari 100% kotoran sapi, campuran 50% kotoran sapi dan 50% baglog, dan 100% baglog terhadap *flame stability limit* pada *meso scale combustor*?
2. Bagaimana pengaruh variasi bahan bakar biogas dari 100% kotoran sapi, campuran 50% kotoran sapi dan 50% baglog, dan 100% baglog terhadap visualisasi api pembakaran *meso scale combustor*?
3. Bagaimana pengaruh variasi bahan bakar biogas dari 100% kotoran sapi, campuran 50% kotoran sapi dan 50% baglog, dan 100% baglog terhadap temperatur nyala api pembakaran *meso scale combustor*?

1.3 Tujuan penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan sebagai berikut.

1. Untuk mengetahui pengaruh variasi bahan bakar biogas dari 100% kotoran sapi, campuran 50% kotoran sapi dan 50% baglog, dan 100% baglog terhadap *flame stability limit* pada *meso scale combustor*.
2. Untuk mengetahui pengaruh variasi bahan bakar biogas dari 100% kotoran sapi, campuran 50% kotoran sapi dan 50% baglog, dan 100% baglog terhadap visualisasi api pembakaran *meso scale combustor*.

3. Untuk mengetahui pengaruh variasi bahan bakar biogas dari 100% kotoran sapi, campuran 50% kotoran sapi dan 50% baglog, dan 100% baglog terhadap temperatur nyala api pembakaran *meso scale combustor*.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini yaitu :

1. Mampu mengetahui perbedaan karakteristik pembakaran dengan variasi bahan bakar biogas dari 100% kotoran sapi, campuran 50% kotoran sapi dan 50% baglog, dan 100% baglog.
2. Memberikan referensi baru dalam pengembangan teknologi *meso scale combustor* selanjutnya.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini yaitu :

1. Biogas yang digunakan merupakan biogas dari kotoran sapi segar yang diperoleh dari pembibitan sapi perah di Rembangan.
2. Baglog yang digunakan adalah baglog yang sudah tidak menghasilkan jamur.
3. Suhu dan kelembapan udara dianggap konstan.

1.6 Hipotesis

Pembuatan biogas dapat dilakukan dengan mencampurkan kotoran sapi dan limbah pertanian yang mengandung karbohidrat, protein dan lemak karena yang mengandung karbohidrat, lemak, dan protein akan meningkatkan kandungan CH_4 . Hal ini berpengaruh terhadap karakteristik pembakaran pada *meso-scale combustor*. Semakin tinggi kadar CH_4 pada biogas maka akan menghasilkan *flame stability limit* yang luas, warna api yang terang, temperatur api dan temperatur dinding yang lebih tinggi.

BAB 2 TINJAUAN TEORI

2.1 Energi Terbarukan

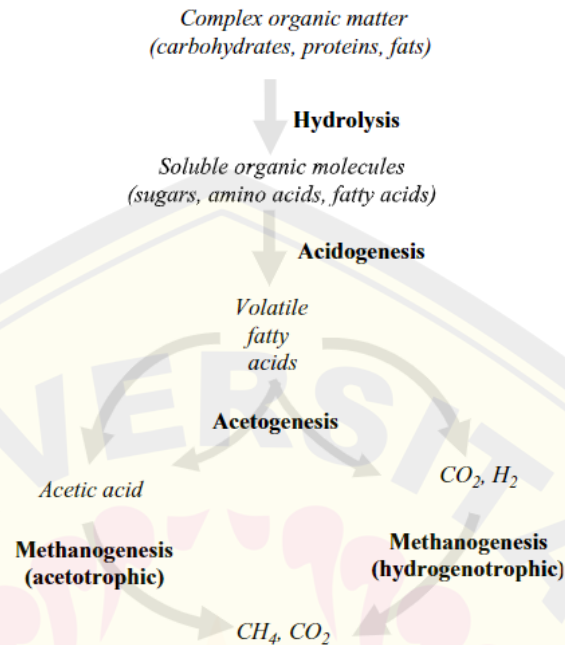
Sebagai negara agraris di garis khatulistiwa, Indonesia merupakan negara dengan potensi bioenergi tinggi yang dapat digunakan sebagai bahan bakar cair (biodiesel, bioethanol), gas (biogas), padat atau bahan bakar untuk produksi listrik (KESDM, 2016).

2.1.1 Biogas

Biogas adalah bahan bakar gas terbaharukan yang diperoleh dari fermentasi anaerob limbah organik dengan bantuan mikroorganisme *methanobacterium sp.* Ketika bahan organik mengalami dekomposisi di tidak adanya oksigen bebas, akan menghasilkan gas yang terkandung dari 40-70% metana, sisanya sebagian besar adalah karbon dioksida dan gas gas lainnya. Jika dinyalakan, gas ini akan terbakar dengan bersih (tidak mengeluarkan bau busuk) mirip dengan *liquefied petroleum gas* (LPG) atau *compressed natural gas* (CNG). Biogas memiliki *calorific value* lebih rendah dari LPG dan CNG (Abbasi et al., 2012).

2.1.2 Pembentukan Biogas

Pembentukan biogas yang menggunakan *anaerobic digestion* memerlukan bakteri dengan tanpa adanya oksigen bebas. Fermentasi ini menggunakan pemecahan organik kompleks *biodegradable*. *Biodegradable* merupakan proses dari bahan organik yang diuraikan oleh organisme hidup dengan menguraikan menggunakan enzim. Pemecahan organik kompleks *biodegradable* dibagi menjadi 4 tahapan, yaitu tahap hidrolisis, acidogenesis, acedogenesis, dan tahap metanogenesis (Abbasi et al., 2012)

Gambar 2. 1 Siklus *anaerobic digestion*

(Sumber : (Abbasi et al., 2012))

2.1.3 Faktor Yang Mempengaruhi Produksi Biogas

a. Jenis Bahan Organik

Jenis bahan organik yang digunakan bisa mempengaruhi hasil dari biogas. Biogas yang kaya metana dihasilkan ketika bahan organik mengandung nitrogen, nutrisi mikro, dan air yang cukup (Abbasi et al., 2012).

b. Rasio C/N

Proporsi relatif karbon dan nitrogen yang ada pada bahan organik disebut sebagai rasio karbon / nitrogen (C/N). nilai optimum untuk pencernaan anaerobik pada rasio C/N berada pada 20-30. Produksi biogas akan menurun, apabila rasio C/N terlalu tinggi. Jika rasio C/N terlalu rendah, nitrogen akan dilepas dan terakumulasi dalam bentuk amonia sehingga menaikkan pH menjadi tinggi. Nilai pH yang melebihi 8,5 akan membuat bakteri metanogeni terganggu (Abbasi et al., 2012).

c. Kadar Air

Bakteri penghasil biogas membutuhkan substrat dengan kandungan air 90% dan kandungan padatan 8-10% agar bakteri dapat berfungsi secara normal. Air harus ditambahkan jika bahan yang digunakan berjenis bahan kering, tetapi apabila substratnya berbentuk lumpur maka penambahan banyak air tidak diperlukan. Proses pembuatan biogas dengan pemberian air sangat dianjurkan. Dalam pembuatan biogas jika bahan baku terlalu padat, asam asetat akan menumpuk sehingga menghambat proses fermentasi dan produksi, namun jika bahan terlalu banyak air akan menyebabkan tidak terdegradasinya campuran dengan baik.

d. Derajat Keasaman (pH)

Produksi biogas yang paling optimal Ketika nilai pH 6-7. Pada tahap awal pencampuran, sebagian besar bahan organik akan diubah menjadi asam dan menyebabkan pH menurun. Ketika fermentasi berlangsung, pH meningkat disebabkan karena munculnya nitrogen sehingga konsentrasi ammonia dalam bahan akan meningkat (Abbasi et al., 2012).

e. Suhu

Spesies bakteri metanogenik dibagi menjadi tiga, yaitu : termofilik, mesofilik, dan psikrofilik. Setiap spesies bakteri memiliki suhu yang berbeda-beda dalam pengoptimalan perubahan gas metana. Bakteri termofilik berada pada suhu 45-60°C, bakteri mesofilik disuhu 20-40°C, sedangkan bakteri psikrofilik < 20°C (Abbasi et al., 2012).

f. Zat Toksik

Didalam proses *anaerobic* ada zat-zat yang dapat menghambat proses yang bersifat racun bagi mikroorganismenya. Zat penghambat mikroba yaitu amonia, sulfida, asam lemak rantai Panjang, garam, logam berat, senyawa fenolik, dan xenobiotic. Dua zat penghambat mikroba yang paling umum dalam proses *anaerobic* adalah nitrogen sulfida dan amonia (Akunna, 2018).

g. Pengadukan

Pencampuran diperlukan untuk menjaga homogenitas cairan, sehingga terjadi stabilitas proses dalam digester. Tujuan pencampuran adalah untuk menghubungkan bahan yang masuk dalam bakteri. Bahan yang sudah masuk dan

tercampur bakteri akan menghentikan pembentukan buih, dan untuk menghindari perbedaan suhu yang mencolok didalam digester (Abbasi et al., 2012).

h. Waktu Retensi

Waktu retensi adalah durasi dimana bahan organik dan mikroorganisme harus tetap tercampur dalam digester untuk mencapai tingkat degradasi yang diinginkan (Abbasi et al., 2012).

2.2 Bahan Pembuatan Biogas

2.2.1 Kotoran Sapi

Kotoran sapi adalah limbah peternakan yang merupakan buangan dari usaha peternakan sapi yang bersifat padat dan dalam proses pembuangannya sering bercampur dengan *urine* dan gas seperti metana dan amoniak. Kandungan unsur hara dalam kotoran sapi bervariasi tergantung pada keadaan tingkat produksinya, macam, jumlah makanan yang dimakannya, serta individu ternak sendiri. Kandungan unsur hara dalam kotoran sapi antara lain nitrogen (0,29 %), P_2O_5 (0,17 %), dan K_2O (0,35%) (Sucipto, 2009).

2.2.2 Baglog

Pembuatan biogas dapat dilakukan dengan pencampuran substrat kotoran sapi dengan limbah pertanian yang mengandung karbohidrat, protein, dan lemak (Pernanda, 2021). Saat ini pemanfaatan bahan organik sebagai bahan baku pembuatan biogas masih sedikit. Disisi lain limbah media tanam jamur (baglog) yang dihasilkan dari proses budidaya jamur dengan baku serbuk gergaji semakin mengalami peningkatan baik mutu maupun jumlahnya. Peningkatan jumlah budidaya jamur dari bahan baku serbuk gergaji akan berdampak pada peningkatan limbah baglog yang dihasilkan. Penelitian biogas dengan memanfaatkan limbah baglog masi jarang dilakukan, padahal limbah baglog berpotensi untuk dijadikan sebagai bahan baku biogas karena masih mengandung bahan organik (Mulyadi et al., 2016).

2.3 Pembakaran

Pembakaran merupakan proses oksidasi bahan bakar dengan oksidator, yang menimbulkan nyala api dan panas yang berlangsung dengan cepat. Bahan bakar ialah suatu zat yang apabila terbakar akan melepaskan kalor ketika dioksidasi, umumnya zat pengoksidasinya mengandung oksigen, hidrogen, dan belerang. Sementara oksidan adalah zat apa pun yang bereaksi dengan bahan bakar, umumnya mengandung oksigen (Mahandari, 2010).



Gambar 2. 2 segitiga pembakaran
(Sumber : (Subiyanto, 2020))

2.3.1 Debit Bahan Bakar dan Udara

Debit bahan bakar dan udara merupakan jumlah volume bahan bakar dan udara yang mengalir tiap satuan waktu. Besarnya debit bahan bakar dan udara sangat mempengaruhi karakteristik nyala api dan temperatur pada *meso scale combustor*, karena debit aliran berhubungan dengan kecepatan aliran campuran bahan bakar dan udara. Semakin tinggi kecepatan reaktan maka akan semakin baik nyala api, namun kecepatan reaktan yang terlalu tinggi akan mengurangi *fuel residence time* (Ju & Maruta, 2011). Debit bahan bakar dan udara dapat dicari menggunakan persamaan berikut :

$$v_r = \frac{Q_a + Q_f}{A} \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan :

- v_r = kecepatan reaktan (m/s)
- Q_a = debit udara (ml/min)
- Q_f = Debit bahan bakar (ml/min)
- A = Penampang *combustor* (m²)

2.3.2 Air Fuel Ratio (AFR)

Perbandingan jumlah udara dengan bahan bakar disebut dengan *Air Fuel Ratio* (AFR). Perbandingan ini dapat dibandingkan baik dalam jumlah massa ataupun dalam jumlah volume.

$$AFR = \frac{ma}{mf} = \frac{Ma Na}{Mf Nf} \dots\dots\dots(2.2)$$

AFR = *Air fuel ratio* (rasio bahan bakar dan udara)

ma = Laju massa udara (kg/detik)

mf = Laju massa bahan bakar (kg/detik)

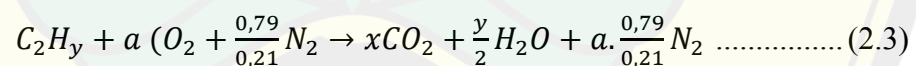
Ma = Massa molekul reaktif udara (g/mol)

Mf = Massa molekul reaktif bahan bakar (g/mol)

Na = Jumlah mol udara (mol)

Nf = Jumlah mol bahan bakar (mol)

Pembakaran merupakan reaksi kimia antara bahan bakar dan oksidan yang menghasilkan energi berupa panas. Untuk oksidan adalah zat yang mengandung oksigen (udara bebas) yang dapat bereaksi dengan bahan bakar. Komponen udara bebas itu sendiri terdiri dari Oksigen (O₂), Nitrogen (N₂), Karbondioksida (CO₂), Argon (Ar), Helium (He), Neon (Ne) dll, dalam presentase jumlah Oksigen (O₂) hanya 20 % sedangkan Nitrogen (N₂) dan serta gabungan gas yang lainnya sekitar 79 %(Widodo et al., 2014).



Untuk dapat mengetahui nilai AFR, maka harus dihitung jumlah keseimbangan atom C, H dan O dalam suatu reaksi pembakaran. Rumus diatas adalah rumus umum reaksi pembakaran yang menggunakan udara kering.

2.3.3 Equivalence Ratio (ϕ)

Equivalence Ratio (ϕ) merupakan perbandingan antara rasio udara-bahan bakar (AFR) stoikiometri dengan rasio udara-bahan bakar (AFR) aktual. Metode ini digunakan untuk mendefinisikan perbandingan antara massa dari udara dengan bahan bakar pada titik tinjau.

$$\phi = \frac{(AFR)_s}{(AFR)_a} \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan:

ϕ = *Equivalence ratio*

(AFR)_s = Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi stoikiometrik

(AFR)_a = Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi aktual

Dimana jika nilai *Equivalence Ratio* tersebut :

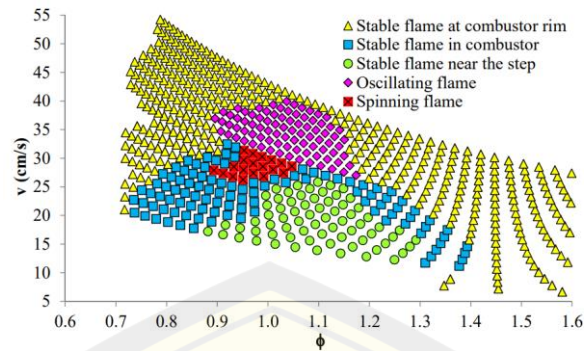
$\phi > 1$ → Terdapat kelebihan bahan bakar dan campuran disebut campuran kaya bahan bakar (*fuel-rich-mixture*).

$\phi < 1$ → Terdapat kelebihan udara dan campurannya disebut miskin bahan bakar (*fuel-lean-mixture*).

$\phi = 1$ → Merupakan campuran stoikiometri.

2.3.4 Flame Mode Map

Flame behavior dalam bentuk *flame mode* dipetakan sebagai *flame mode map* dalam grafik kecepatan aliran reaktan (v) terhadap *equivalence ratio* (ϕ) yang terdiri dari beberapa *flame mode* seperti api stabil di *combustor rim*, api stabil dalam *combustor*, api stabil dekat *step*, api *osilasi*, api *spinning oscillating*, api *spinning*, *flashback*, dan kondisi *no-ignition*. *Flame mode map* yang terbentuk pada grafik kecepatan reaktan (v) terhadap *equivalence ratio* (ϕ) tergantung pada kecepatan aliran reaktan dan *equivalence ratio* pada masing-masing variasi rasio pada setiap *combustor* (Sanata et al., 2020).

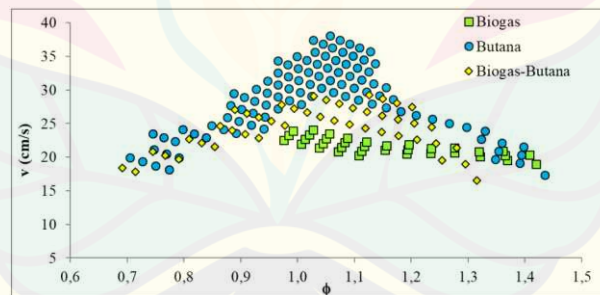


Gambar 2. 3 *Flame mode map* pada rasio $D1/D2 = 0,7$

(Sumber : Sanata et al., 2020)

2.3.5 *Flame Stability Limit*

Flame stability limit adalah suatu kondisi dimana nyala api dapat menyala terus menerus tanpa padam pada lokasi dekat dengan *backward facing step* di dalam *combustor*. Kecepatan reaktan dihitung berdasarkan diameter *combustor* di dalam zona reaksi ($D2$). Meningkatkan rasio $D1/D2$ dari 0,7 menuju ke 0,9 akan membuat *backward facing step* di dalam *combustor* semakin kecil. Dengan semakin kecilnya ukuran *backward facing step*, terjadi kesetimbangan resirkulasi massa dan panas yang lebih baik dan akan memberikan peningkatan stabilitas nyala api.



Gambar 2. 4 *Flame Stability Limit* rasio *combustor* 0,9

(Sumber : Nugraha, 2022)

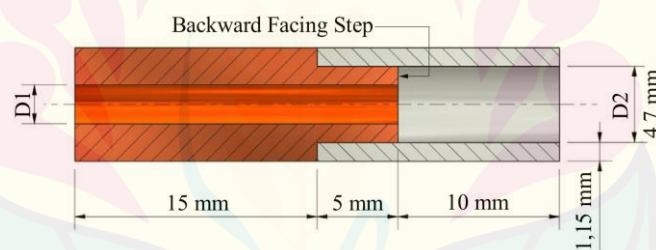
2.4 *Meso Scale Combustor*

Ada berbagai jenis dan ukuran *combustor*, dan secara umum *micro combustor* dapat dibagi menjadi dua bagian. Bagian-bagian ini pada dasarnya ditentukan oleh ukuran celah ruang bakar. Untuk *combustor* skala mikro, ukuran celah ruang bakar adalah 1-1.000 μm , dan untuk *combustor* skala meso, ukuran

celah adalah 1-10 mm. Karakteristik dari kedua ruang bakar tersebut merupakan karakteristik pembakaran pada *micro combustion*. *Meso-scale combustor* berfungsi sebagai penghasil energi termal dari pembakaran, lalu dikonversi modul pengkonversi menjadi energi listrik. *Meso scale combustor* dapat diaplikasikan pada sensor, actuator, perangkat listrik *portable*, perangkat pemanas industri, sumber daya cadangan panas mekanis pada kendaraan *hybrid*, dan lainnya (Ju & Maruta, 2011; Sanata et al., 2019).

2.4.1 Backward Facing Step

Yang et al., (2002) menyatakan bahwa pembakaran stabil dapat dilakukan dalam *meso scale combustor* dengan *backward facing step* untuk meningkatkan proses pencampuran udara dan bahan bakar yang terjadi di dalam *combustor*, dan untuk memperpanjang (*residence time*) dalam daerah reaksi pembakaran. *Backward facing step* ialah penambahan *sudden expansion* pada diameter *combustor* $D1/D2$ dengan $D1 < D2$ dan terletak pada sisi ujung *combustor*.



Gambar 2. 5 *Meso scale combustor* dengan *backward facing step*

(Sumber : Sanata et al., 2020)

Backward facing step pada *meso scale combustor* sangat efektif tidak hanya untuk mengontrol posisi api tetapi juga untuk meningkatkan laju aliran dan rasio bahan bakar/udara serta mampu mensirkulasikan campuran reaktan pada pembakaran.

2.4.2 Karakteristik nyala api

Reaksi pembakaran akan menghasilkan stabilitas nyala api yang dipengaruhi oleh debit udara dan bahan bakar. Baigmohammadi et al., (2015), telah melakukan penelitian dengan menemukan bahwa terdapat tujuh karakteristik nyala

api akibat dari variasi geometri, *equivalence ratio* dan bilangan Reynold. Berikut tujuh karakteristik nyala api pada *meso scale combustor* diantaranya:

a. *Blowout*

Nyala api yang terbentuk diluar ruang bakar karena kecepatan reaktan lebih tinggi daripada kecepatan nyala api, sehingga menyebabkan api terdorong keluar dari ruang bakar seperti Gambar 2.6. Nyala api terjadi pada *equivalence ratio* yang tinggi pada bilangan reynolds konstan.

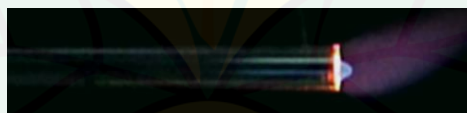


Gambar 2. 6 *Blowout*

(Sumber : Baigmohammadi et al., 2015)

b. *Marginal*

Nyala api yang terbentuk di saluran luar ruang bakar, ciri utamanya adalah distorsi kecil pada nyala api seperti Gambar 2.7. Hal tersebut mengakibatkan nyala api tidak stabil dan dipengaruhi oleh penurunan *equivalence ratio* dari nilai bahan bakar yang kaya menuju nilai stoikiometri. Nyala api ini dapat dihasilkan dengan menurunkan *equivalence ratio* dari nyala api *blow-out*.



Gambar 2. 7 *Marginal*

(Sumber : Baigmohammadi et al., 2015)

c. *Stationary*

Nyala api *stationary* yaitu nyala api pada posisi depan yang memiliki kestabilan di ruang bakar karena penurunan secara berkala pada *equivalence ratio* hingga bahan bakar dan oksidator tercampur secara ideal, ketika nilai kecepatan reaktan dan kecepatan nyala api seimbang. Nyala api *stationary* terbagi menjadi tiga yaitu:

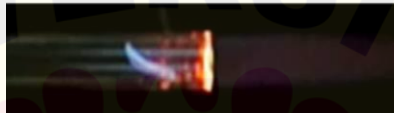
1) Simetri

Gambar 2. 8 *Simetri*

(Sumber : Sanata et al., 2019)

2) Asimetri

Bentuk nyala api asimetri yaitu miring keatas dan kebawah yang dipengaruhi oleh *preheating zone* dan efek *buoyancy* seperti Gambar 2.9.

Gambar 2. 9 *Asimetri*

(Sumber : Baigmohammadi et al., 2015)

3) *Spinning flame*

Spinning flame terdiri dari nyala api simetris atas dan bawah yang berputar cepat disekitar ruang bakar yang membentuk huruf X yang disebabkan kehilangan stabilitas, pergerakan fluida disekitar step, dan laju aliran seperti Gambar 2.10.

Gambar 2. 10 *spinning flame*

(Sumber : Deshpande & Kumar, 2013)

d. *Repetive extinction and re-ignition (RERI)*

Bentuk nyala api *repetive extinction and re-ignition* yaitu nyala api tidak stabil dan menyebar disepanjang ruang bakar secara berkala seperti Gambar 2.11. Nyala api campuran pada luar ruang bakar akan padam karena area *heatloss* yang luas. Setelah nyala api padam di ujung reaktor, campuran baru dapat dinyalakan kembali Ketika dinding *reactor* dipanaskan atau sumber pengapian eksternal

digunakan. Nyala api ini terjadi ketika *equivalence ratio* turun dari titik stabil sehingga meningkatkan laju perambatan api.



Gambar 2. 11 *Repetive extinction and re-ignition*

(Sumber : (Baigmohammadi et al., 2015))

e. *Stationary (stabil) – flashback*

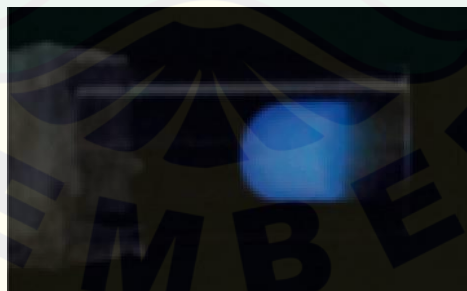
Nyala api *Stationary – flashback* ini merupakan nyala api yang pertamanya stabil lalu kemudian berubah menjadi nyala api *flashback* secara bertahap.

f. *Repetive extinction and re-ignition (RERI) – flashback*

Nyala api *repetive extinction and re-ignition – flashback* ini merupakan nyala api RERI berubah menjadi nyala api flashback secara bertahap.

g. *Flashback*

Nyala api *flashback* ini terbentuk ketika kecepatan rambat api lebih tinggi dari kecepatan reaktan. Nyala api ini terbentuk dengan menurunkan *equivalence ratio* dari campuran kaya atau menaikkan *equivalence ratio* dari campuran miskin ke titik kritis seperti Gambar 2.12.



Gambar 2. 12 *Flashback*

(Sumber : Mikami et al., 2013)

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode eksperimental, yaitu dengan metode pengamatan secara langsung pada karakteristik nyala api *meso scale combustor*. Dalam penelitian ini akan membandingkan karakteristik nyala api *meso scale combustor* dengan variasi bahan bakar biogas yaitu kotoran sapi, campuran kotoran sapi dan baglog, dan baglog. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui *flame stability limit*, *visualisasi flame mode*, *flame mode maps*, temperatur nyala api dan temperatur dinding *combustor* pada pembakaran dari setiap bahan bakar.

3.2 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium konversi Energi Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Jember dan waktu penelitian secara keseluruhan dilaksanakan pada bulan Desember 2022 – Juli 2023.

3.3 Alat dan Bahan

3.3.1 Alat

- | | |
|---|-------------------------------------|
| a. <i>Meso scale combustor</i> dengan <i>backward facing step</i> | f. <i>Pisco tube</i> (selang) |
| b. <i>Combustor holder</i> | g. <i>Mixer</i> |
| c. Kompresor udara | h. <i>Thermocoupe</i> l data logger |
| d. <i>Regulator</i> biogas | i. Korek / pemantik |
| e. <i>Flowmeter</i> udara dan bahan bakar | j. Kamera |
| | k. Laptop |

3.3.2 Bahan

- | | |
|--|------------------|
| a. Biogas kotoran sapi | c. Biogas baglog |
| b. Biogas campuran kotoran sapi dan baglog | |

3.4 Variasi Penelitian

3.4.1 Variabel Bebas

- a. Variasi Bahan Bakar Biogas
 - 1) 100% Kotoran sapi
 - 2) 100% Baglog
 - 3) Campuran kotoran sapi dan baglog dengan komposisi (50%-50%)
- b. Variasi debit bahan bakar (2-20mL/min) dengan interval 0,5 ml/min dan debit udara (50-500ml/min) dengan interval 5 ml/min.

3.4.2 Variabel Terikat

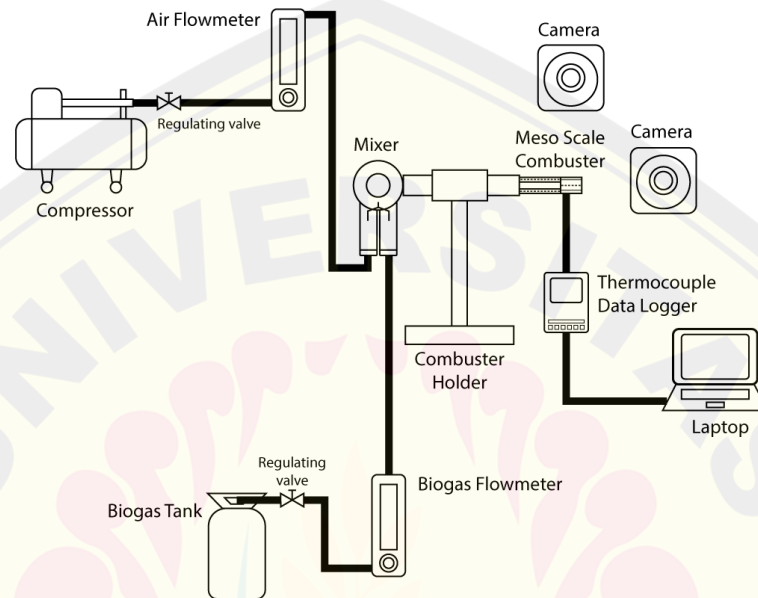
- a. *Flame stability limit*
- b. *Visualisasi flame mode*
- c. *Flame mode map*
- d. temperatur nyala api dan temperatur dinding *combustor*

3.4.3 Variabel Kontrol

- a. Temperatur ruang uji 28 - 30°C
- b. Rasio diameter *meso scale combustor* $D1/D2 \text{ combustor} = 0,9$ dengan penampang inlet (D1) = 4,2 mm dan outlet (D2) = 4,7 mm

3.5 Skema Alat Uji

Berikut adalah skema alat uji yang digunakan dalam penelitian ini :



Gambar 3. 1 Skema alat uji

3.6 Prosedur Penelitian

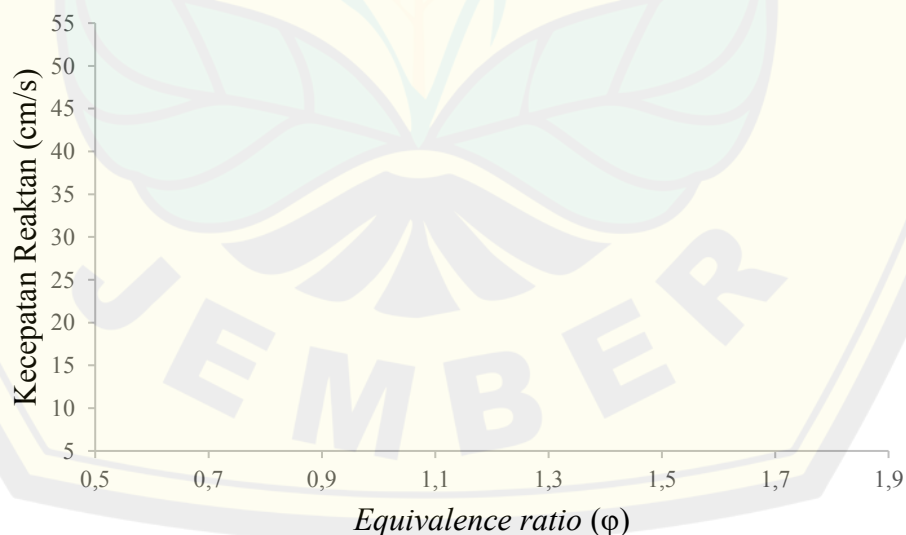
Untuk langkah-langkah dalam melaksanakan penelitian ini dan pengambilan data ialah sebagai berikut

1. Menyiapkan alat dan bahan yang akan di uji.
2. Melakukan instalasi alat dan bahan lalu pastikan terpasang baik dan tidak ada kerusakan atau cacat pada alat dan bahan.
3. Melakukan pengaturan pada *flowmeter* udara dengan membuka kran/katup *flowmeter* secara perlahan, lalu membuka kran/katup *output* kompresor hingga bola indikator pada debit udara *flowmeter* menunjukkan skala yang ingin digunakan.

4. Melakukan pengaturan pada *flowmeter* bahan bakar dengan membuka kran/katup *flowmeter* secara perlahan, lalu membuka kran/katup regulator biogas secara perlahan hingga bola indikator pada debit bahan bakar *flowmeter* menunjukkan skala yang ingin digunakan.
5. Melakukan pemasangan *Thermocoupe*l data logger pada laptop untuk memasukkan data temperatur api secara otomatis.
6. Melakukan penyalaan api pada *combustor* dengan cara memantik api dengan menggunakan pemantik api pada mulut outlet *combustor*.
7. Ketika api menyala, atur debit udara dan bahan bakar dari debit terendah sampai tertinggi hingga mencapai komposisi bahan bakar dan udara yang menghasilkan nyala api yang stabil.
8. Mengambil gambar visualisasi api dengan kamera.
9. Melakukan pengamatan pada *thermocouple* data logger.
10. Melakukan proses pengolahan dan analisa data hasil penelitian, lalu buat laporan hasil penelitian.

3.7 Tahap Pengambilan Data

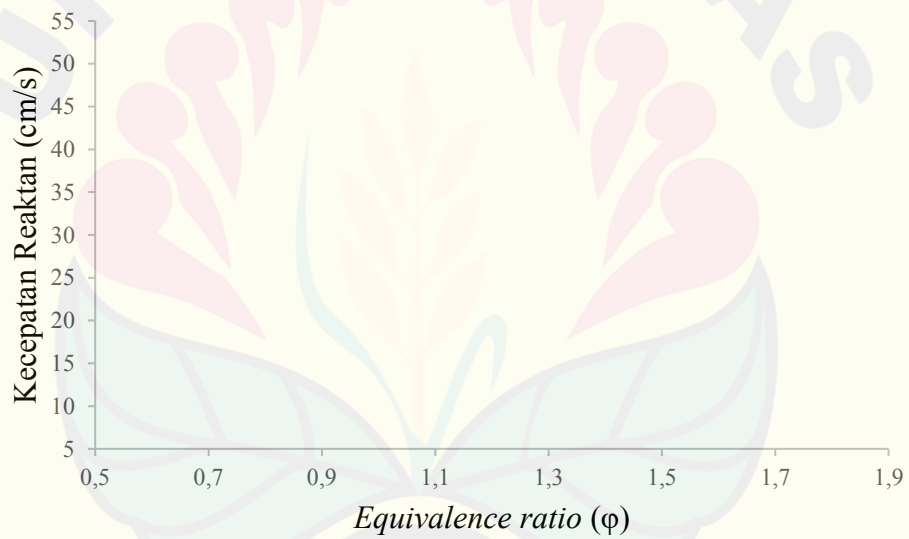
3.7.1 Pengambilan Data *Flame Stability Limit*



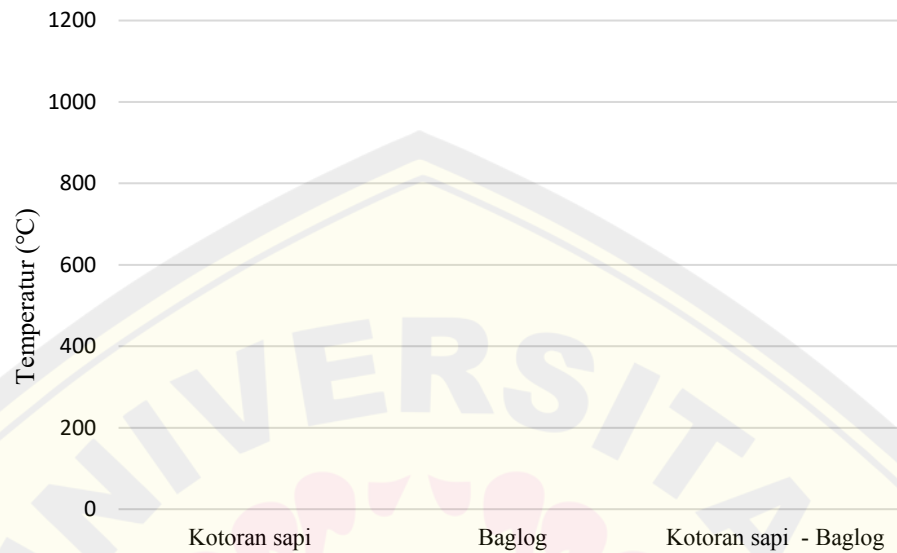
Gambar 3. 2 Data *Flame Stability Limit*

3.7.2 Pengambilan Data *Visualisasi Flame Mode*Tabel 3. 1 data *Visualisasi Flame Mode*

No.	Flame Mode	Kotoran sapi	Baglog	Kotoran sapi - Baglog
1				
2				
3				
4				
5				

3.7.3 Pengambilan data *Flame Mode Map*Gambar 3. 3 Data *Flame Mode Map*

3.7.4 Pengambilan Data Temperatur Nyala Api



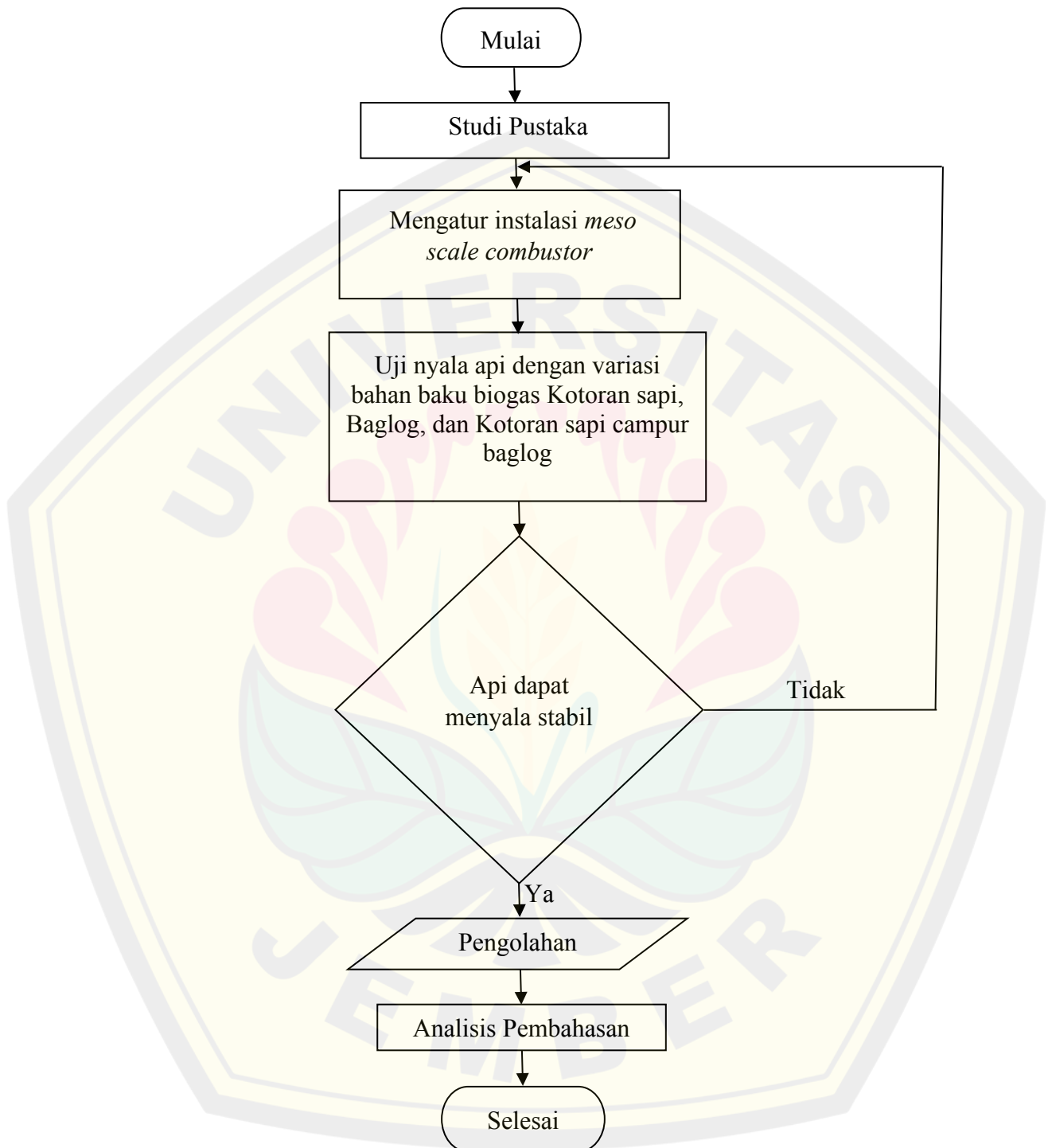
Gambar 3. 4 data Temperatur Nyala Api

3.7.5 Pengambilan Data Temperatur Dinding *Combustor*



Gambar 3. 5 Data Temperatur Dinding *Combustor*

3.8 Diagram Penelitian



Gambar 3. 6 Diagram Penelitian

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan cara mengamati karakteristik nyala api pembakaran campuran biogas (CH_4) dan udara di dalam *combustor* dengan *backward facing step*. Perlakuan ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik nyala api pembakaran dengan memvariasikan diameter *inlet combustor* (D1) terhadap diameter *outlet combustor* (D2). Untuk variasi D1/D2 yaitu 0,9 mm.

Pengambilan data dalam pengujian karakteristik api pembakaran pada *meso scale combustor* dengan bahan bakar variasi biogas terdiri dari beberapa parameter, antara lain *flame stability limit*, visualisasi nyala api, *flame mode map*, temperatur api dan dinding *combustor*.

4.1.1 Kadar CH_4 Dan CO_2 Pada Biogas Yang Dihasilkan

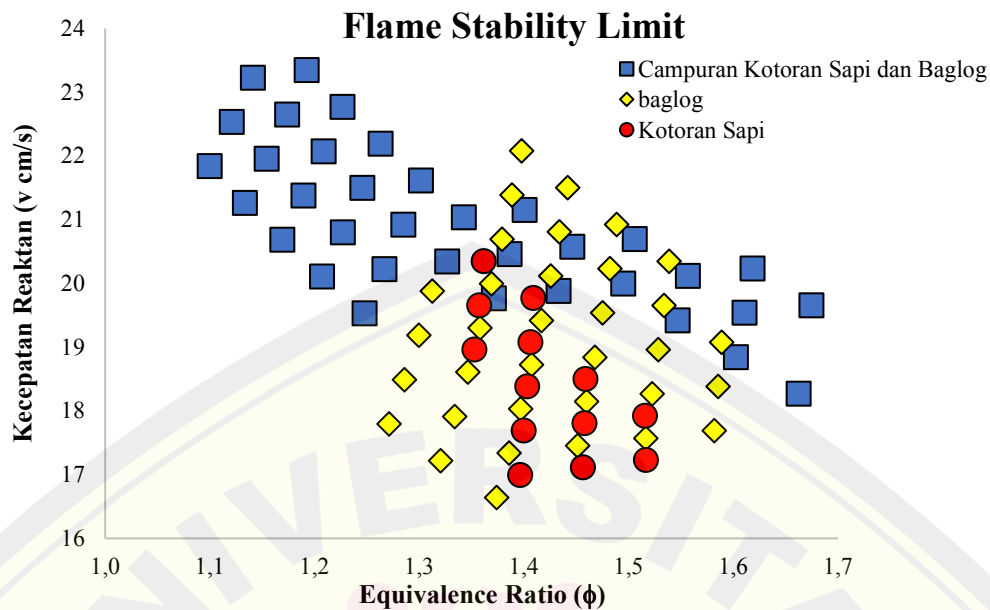
Kadar CH_4 dan CO_2 yang dihasilkan bahan baku campuran, kotoran sapi, dan limbah baglog diuji menggunakan sensor MQ-4 dan MQ-134 serta Arduino uno sebagai data transfer. Pada proses pembuatan biogas semua bahan baku ditakar pada suatu wadah yang memiliki volume yang sama. Hal tersebut untuk memastikan agar perbandingan pada biogas campuran benar-benar 50%:50% kotoran sapi dengan limbah baglog. Sajian hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 4.1 sebagai berikut:

Tabel 4. 1 kadar CH_4 dan CO_2

NO	Jenis Biogas	Kadar CH_4 / ppm	Kadar CO_2 / ppm
1	MIX	867,636	43,138
2	KS	663,645	188,373
3	BK	785,285	116

4.1.2 *Flame Stability Limit*

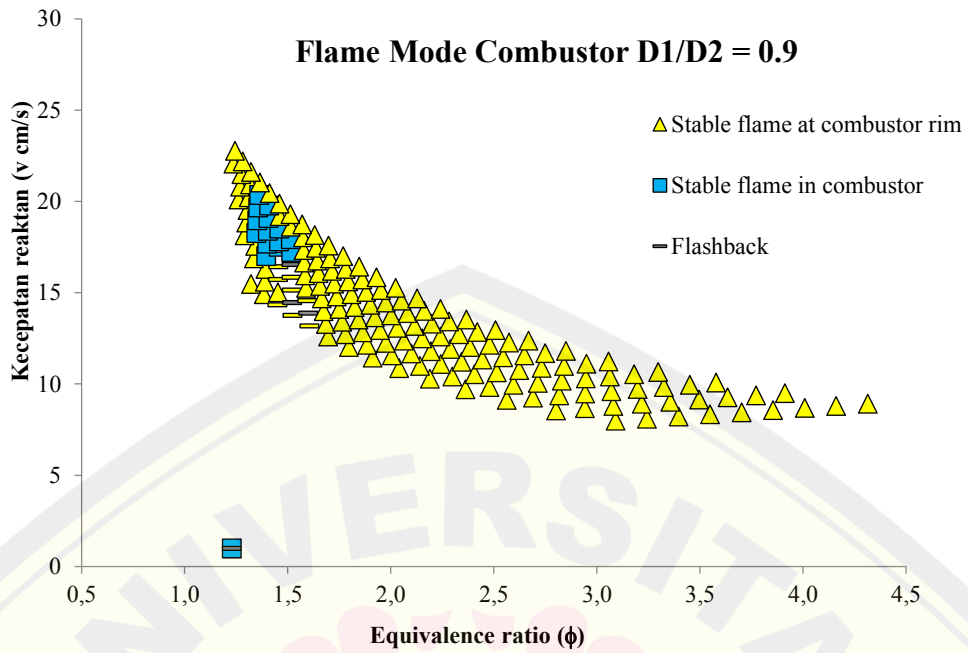
Gambar 4.1 menunjukkan *flame stability limit* pembakaran biogas-udara pada *combustor* dengan rasio diameter *inlet combustor*/diameter *outlet combustor* (D1/D2) 0,9. *Flame stability limit* menunjukkan nyala api dapat menyala stabil pada posisi di dalam *combustor*.

Gambar 4. 1 *Flame stability limit*

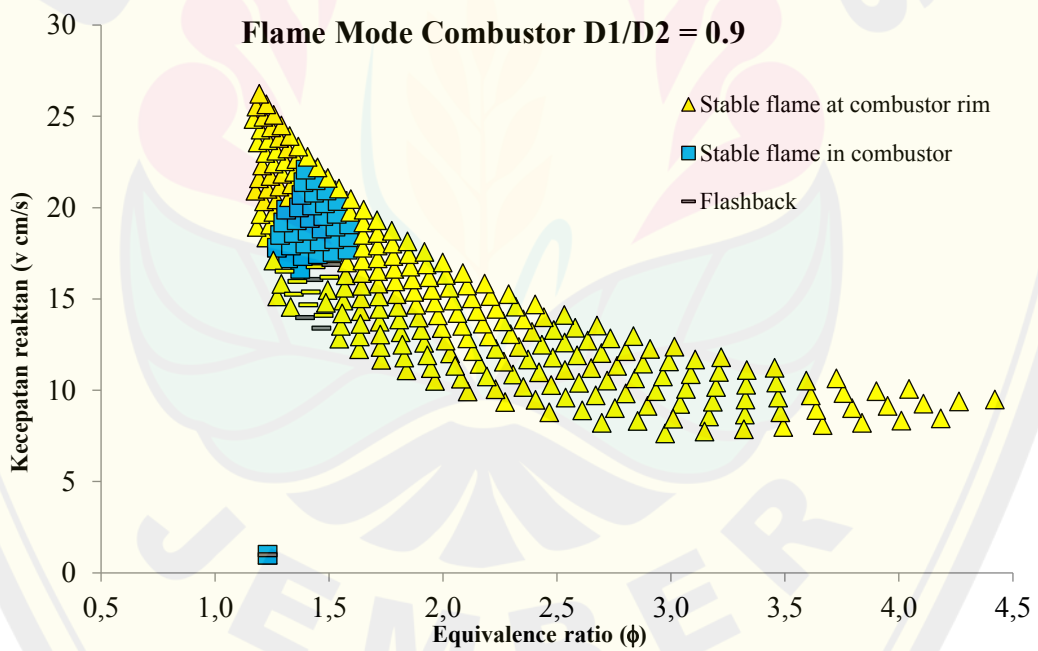
Pada gambar 4.1 *flame stability limit* pada rasio *combustor* 0,9 bahan bakar biogas dengan bahan baku kotoran sapi – udara dapat menyala stabil, dimana ekuivalen rasionya 1,36 – 1,52. Bahan bakar biogas dengan bahan baku baglog dapat menyala stabil di ekuivalen rasio 1,27 – 1,59. Sementara untuk bahan bakar biogas dengan bahan baku campuran kotoran sapi dan baglog – udara nyala api stabil di ekuivalen rasio 1,10 – 1,68. Data *flame stability limit* pada rasio *combustor* 0,9 masing masing variasi terdapat pada lampiran 2.

4.1.3 *Flame Mode Map*

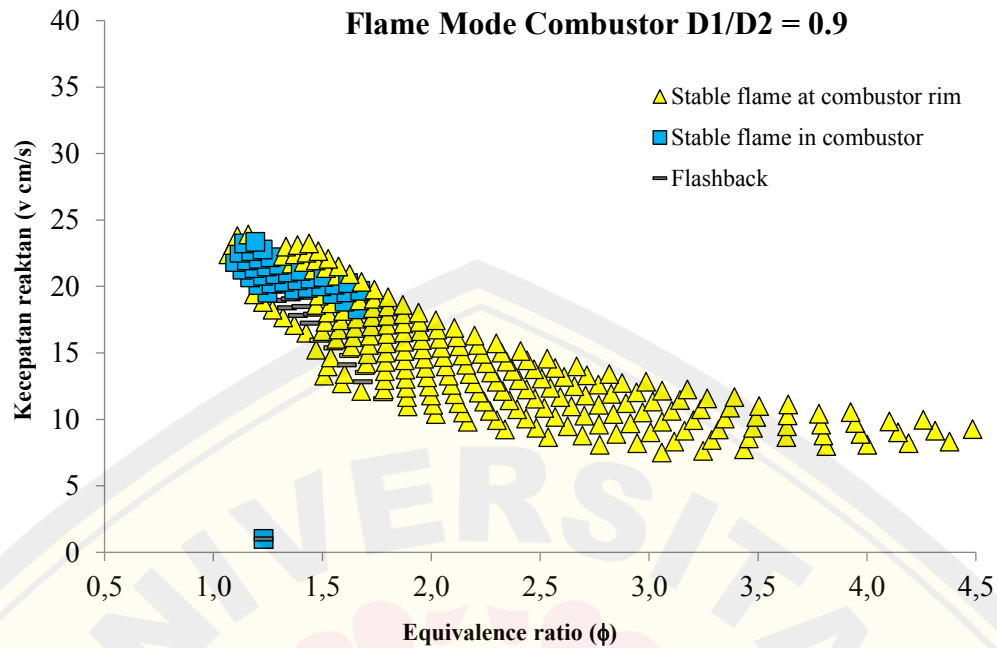
Gambar 4.2-4.4 menunjukkan *flame mode map* pembakaran bahan bakar biogas - udara dengan variasi bahan baku biogas yaitu kotoran sapi, baglog, dan campuran kotoran sapi dan baglog dengan rasio $D1/D2$ *combustor* 0,9. *Flame mode map* terinci pada grafik kecepatan aliran reaktan terhadap ekuivalen rasio (v/ϕ). Area *flame mode map* yang terbentuk pada plot gambar 4.2 – 4.4, yaitu *flame mode stable flame at the combustor rim*, *stable in the combustor*, *flashback*, dan *ignition*.



Gambar 4. 2 *Flame mode map* biogas kotoran sapi



Gambar 4. 3 *Flame mode map* biogas baglog



Gambar 4. 4 *Flame mode map* biogas kotoran sapi – baglog

4.1.4 Visualisasi Nyala Api

Pada tabel 4.2 menunjukkan visualisasi nyala api pembakaran campuran bahan bakar – udara pada *combustor* dengan variasi ukuran *inlet combustor* pada *range* kecepatan reaktan (v) terhadap rasio ekuivalen (ϕ), dimana kecepatan reaktan dihitung berdasarkan diameter *combustor* di dalam zona reaksi ($D2$). Beberapa *flame mode* yang terbentuk adalah *stable flame at combustor rim*, dan *stable flame in combustor*. *Flame mode* tersebut terbentuk akibat adanya variasi kecepatan reaktan dan rasio ekuivalen.

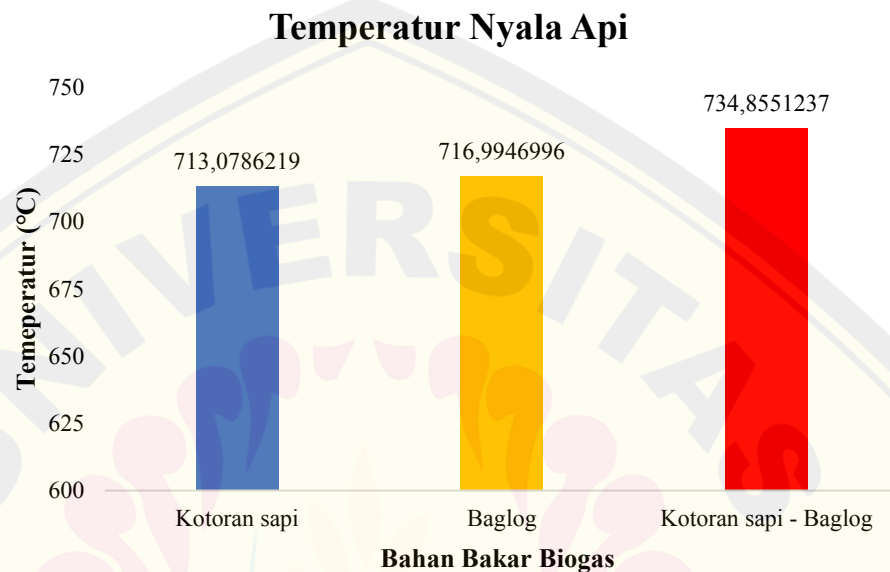
Tabel 4. 2 Visualisasi nyala api rasio *combustor* 0,9

No	Flame mode	Biogas kotoran sapi	Biogas baglog	Biogas campuran kotoran sapi dan baglog
1	<i>Stable flame at combustor rim</i>			
		RGB%	RGB%	RGB%
		21,60 30,11 48,27	21,44 30,23 48,31	19,72 29,20 51,06
				
		RGB%	RGB%	RGB%
		10,84 23,33 65,81	10,78 22,71 66	8,58 20,40 71,01
2	<i>Stable flame in combustor</i>			
		RGB%	RGB%	RGB%
		24,67 30,68 44,63	23,92 30,66 45,40	22,59 30,49 46,91
				
		RGB%	RGB%	RGB%
		13,45 23,53 63	9,88 22,34 67,77	9,78 22,38 67,82

4.1.5 Temperatur api dan dinding *combustor*

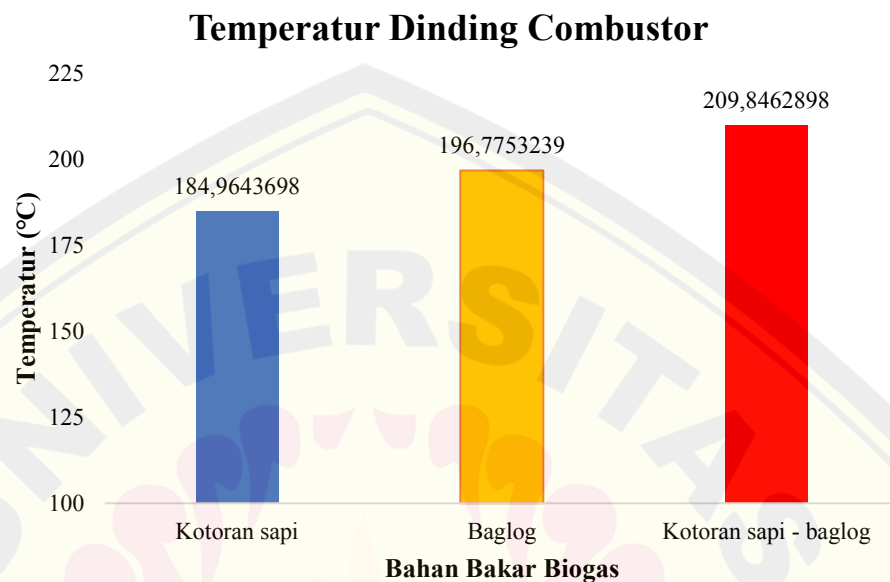
Pada gambar 4.5 dan 4.6 menunjukkan grafik temperatur nyala api dan dinding *combustor* menggunakan *combustor* dengan rasio $D1/D2$ *combustor* 0,9.

a. Temperatur nyala api



Gambar 4. 5 Temperatur nyala api pada rasio *combustor* 0,9

Gambar 4.5 menunjukkan grafik temperatur nyala api pada rasio *combustor* 0,9. Biogas dengan bahan baku kotoran sapi diperoleh pada rasio ekuivalen (ϕ) 1,35 dan kecepatan reaktan (v) 18,96 cm/s. pada biogas dengan bahan baku baglog berada pada rasio ekuivalen (ϕ) 1,31 dan kecepatan reaktan (v) 19,88 cm/s. sedangkan pada biogas dengan bahan baku campuran kotoran sapi dan baglog berada pada rasio ekuivalen (ϕ) 1,10 dan kecepatan reaktan (v) 21,84 cm/s. hal ini menunjukkan bahwa terjadi peningkatan temperatur api pada *meso scale combustor* dengan *backward facing step* akibat dari pencampuran limbah organik pada bahan baku biogas, dimana temperatur pada biogas dengan kotoran sapi sebesar 713,08°C, biogas baglog 716,994°C, dan biogas kotoran sapi-baglog sebesar 734,855°C.

b. Temperatur dinding *combustor*Gambar 4. 6 Grafik temperatur rata rata dinding *combustor*

Gambar 4.6 menunjukkan grafik rata rata dinding *combustor* rasio D1/D2 0,9 dimana nyala api stabil pada rasio ekuivalen (ϕ) 1,35 dan kecepatan reaktan (v) 18,96 cm/s untuk biogas kotoran sapi. pada biogas dengan bahan baku baglog berada pada rasio ekuivalen (ϕ) 1,31 dan kecepatan reaktan (v) 19,88 cm/s. sedangkan pada biogas dengan bahan baku campuran kotoran sapi dan baglog berada pada rasio ekuivalen (ϕ) 1,10 dan kecepatan reaktan (v) 21,84 cm/s. pada biogas dengan bahan baku campuran kotoran sapi dan baglog menunjukkan terjadinya peningkatan temperatur pada *meso scale combustor* dengan *backward facing step* akibat dari pencampuran limbah organik, dimana temperatur dinding rata rata pada biogas kotoran sapi sebesar 184,96°C, biogas baglog 196,77°C, dan biogas kotoran sapi-baglog sebesar 209,85°C.

4.2 Pembahasan

4.2.1 Kadar CH₄ dan CO₂

CH₄ dan CO₂ merupakan komposisi senyawa terbesar pada biogas. Gas metana merupakan senyawa rangkaian carbon yang mudah terbakar. dapat disimpulkan bahwasannya biogas mudah terbakar dikarenakan memiliki metana sebagai komposisi dominan (Rintonga dan Masruki, 2017). Sehingga pada penelitian ini terfokuskan pada pengamatan kadar CH₄ dan CO₂. Selain itu, senyawa metana dan CO₂ lebih mudah dideteksi dengan menggunakan sensor MQ-4 dan MQ-135. Biogas disemprotkan ke arah sensor selama 3 detik. Hasil dari pada pengambilan data kadar CH₄ dan CO₂ dapat dilihat pada Tabel 4. 3.

Tabel 4. 3 Persentase Kadar CH₄ dan CO₂

NO	Jenis Biogas	Kadar CH ₄ / ppm	Kadar CO ₂ / ppm
1	MIX	95%	5%
2	Kotoran Sapi	77%	23%
3	Baglog	87%	13%

Pada tabel 4.3 menunjukkan bahwa CH₄ dan CO₂ pada masing-masing biogas berbeda-beda. Untuk kadar CH₄ pada biogas bahan baku campuran sebesar 94%. Angka tersebut menjadi yang tertinggi dibandingkan dengan biogas lainnya. Selain itu, kandungan CO₂ pada biogas bahan baku campuran sangat rendah sebesar 6%. Hal itu menunjukkan bahwa kualitas biogas tersebut semakin baik. Mengutip (Mika, 2014) CO₂ Merupakan zat pengotor yang bersifat merugikan.

Pada penelitian (Mulyadi et al., 2016) bahwasannya limbah baglog memiliki kadar metana 54% lebih tinggi dibandingkan dengan kotoran sapi. selain itu penambahan substrat nabati khususnya pada starter kotoran sapi sangat berpengaruh baik terhadap kualitas biogas. Penambahan substrat limbah baglog berpengaruh baik terhadap kualitas biogas karena mengandung banyak senyawa organik yang membuat proses fermentasi semakin baik. Pengaruh tersebut sangat signifikan sehingga dapat mempengaruhi karakteristik pembakaran biogas.

4.2.2 *Flame Stability Limit*

Flame stability limit adalah suatu kondisi dimana nyala api dapat menyala terus menerus tanpa padam pada lokasi dekat dengan *backward facing step* di dalam *combustor*. Pada gambar 4.1 menunjukkan *flame stability limit* untuk variasi bahan bakar terhadap rasio *combustor* 0,9. Hal ini menunjukkan bahwa *flame stability limit* biogas kotoran sapi-baglog memiliki area nyala api stabil yang paling luas, selanjutnya diikuti oleh biogas baglog dan biogas kotoran sapi. Hal ini disebabkan oleh perbedaan jumlah kandungan CH₄ dan zat pengotor pada setiap variasi bahan baku biogas.

Biogas kotoran sapi-baglog memiliki kandungan (CH₄ 95%, CO₂ 5%), diikuti oleh biogas baglog dengan kandungan (CH₄ 87% CO₂ 13%), dan kotoran sapi yang memiliki kandungan (CH₄ 77% CO₂ 23%). Untuk variasi biogas kotoran sapi memiliki *calorific value* yang rendah. Rendahnya *calorific value* pada biogas disebabkan kandungan CH₄ yang rendah dan banyaknya zat pengotor yang membuat proses pembakaran menjadi terganggu. Hal ini dijelaskan juga oleh (Suprianti, 2016) bahwa kandungan biogas menentukan *calorific value* yang terkandung dalam biogas. Semakin tinggi kandungan CH₄, semakin tinggi *calorific value* yang terkandung dalam biogas.

4.2.3 *Visualisasi Flame Mode*

Pada tabel 4.2 menunjukkan *visualisasi flame mode* untuk variasi bahan bakar terhadap rasio *combustor* 0,9. Penggunaan bahan bakar biogas kotoran sapi-baglog memiliki kontrol nyala api yang lebih baik daripada penggunaan bahan bakar biogas baglog dan biogas kotoran sapi. Perbedaan bentuk nyala api tersebut disebabkan oleh variasi bahan baku biogas yang mengakibatkan kestabilan nyala api yang berbeda-beda. *Calorific value* yang rendah akan membuat nyala api tidak stabil (Raza Shah et al., 2015).

Pada *stable flame at combustor rim* terlihat bahwa penggunaan biogas campuran kotoran sapi-baglog menunjukkan warna nyala api yang lebih biru terang dibandingkan biogas baglog dan biogas kotoran sapi yang menandakan suatu kelancaran proses reaksi pembakaran. Proses reaksi yang lancar akan memberikan

warna nyala yang lebih baik, karena reaktan yang terbakar jauh lebih sempurna (Ilminnafik et al., 2017).

Flame mode flame in combustor terjadi ketika nyala api berada di dalam zona reaksi *combustor*. Nyala api bergerak masuk ke dalam *combustor* seiring dengan penurunan kecepatan reaktan (v). pada variasi biogas bahan baku kotoran sapi-baglog, posisi nyala api yang terbentuk terjadi dibagian yang cenderung dekat dengan *step* di dalam *combustor* dan mampu menahan api berada pada posisi hampir menempel *step*. Berbeda dengan biogas baglog dan biogas kotoran sapi yang posisi nyala api terjadi cenderung menjauhi *step* didalam *combustor*. Hal ini disebabkan oleh kandungan biogas baglog dan biogas kotoran sapi lebih rendah daripada biogas campuran kotoran sapi-baglog. Perbedaan jumlah kandungan mempengaruhi kualitas api yang dihasilkan.

Flame mode lain yang terbentuk diluar *flame mode* yang telah dijelaskan sebelumnya adalah *flashback* dan *mode no ignition*. *Mode flashback* terjadi dengan penyalan sesaat yang kemudian nyala api bergerak ke arah *step combustor* dan mengalami pemadaman. Hal ini disebabkan oleh kecepatan perambatan nyala api yang terjadi lebih besar dari pada kecepatan aliran reaktan di dalam saluran *combustor*. *Mode no ignition* terjadi ketika campuran bahan bakar dan udara yang masuk tidak dapat dinyalakan meskipun telah dilakukan beberapa kali, atau nyala api segera padam saat melepas sumber penyalan (pemantik).

4.2.4 *Flame Mode Map*

Pada gambar 4.2-4.4 menunjukkan bahwa *flame mode map* terbentuk pada grafik v/ϕ tergantung pada kandungan CH_4 . Area *flame mode maps* yang terbentuk adalah *stable flame at the combustor rim*, *stable flame in combustor*, *flashback*, dan *no ignition*. Biogas campuran kotoran sapi-baglog memiliki area stabilitas nyala api yang lebih luas karena kandungan metana yang lebih tinggi, yang kemudian diikuti dengan biogas baglog, dan biogas kotoran sapi.

Hal tersebut membuktikan bahwa pencampuran kotoran sapi dengan baglog pada pembuatan biogas mengakibatkan perbedaan luas *flame mode map* pada meso

scale combustor dengan *backward facing step* akibat dari peningkatan kadar metana pada biogas tersebut. *Flame mode map* terluas didapat pada bahan bakar biogas campuran kotoran sapi-baglog dimana ekuivalen rasionya (ϕ) 1,07 – 5,13 dengan kecepatan reaktan (v) 7,52-23,92 cm/s. kemudian diikuti biogas baglog dengan ekuivalen rasionya (ϕ) 1,17-4,87 dengan kecepatan reaktan (v) 7,63-26,24 cm/s, biogas kotoran sapi dengan ekuivalen rasio (ϕ) 1,24-4,31 dengan kecepatan reaktan (v) 7,98-22,77 cm/s.

4.2.5 Temperatur

Gambar 4.5 dan 4.6 menunjukkan temperatur nyala api dan temperatur rata-rata dinding untuk variasi bahan bakar terhadap rasio *combustor* 0,9. Pada rasio *combustor* 0,9 menunjukkan bahwa temperatur nyala api dan temperatur rata-rata dinding pada bahan bakar biogas campuran kotoran sapi-baglog memiliki temperatur tertinggi, selanjutnya diikuti oleh bahan bakar biogas baglog dan bahan bakar biogas kotoran sapi. Untuk variasi bahan bakar biogas kotoran sapi memiliki temperatur nyala api dan temperatur rata-rata dinding yang rendah dibandingkan dengan bahan bakar biogas baglog maupun biogas campuran kotoran sapi-baglog. *Calorific value* pada biogas kotoran sapi lebih rendah dibandingkan *calorific value* biogas baglog atau biogas campuran kotoran sapi-baglog. Hal ini disebabkan rendahnya kandungan CH_4 pada biogas kotoran sapi sehingga temperatur nyala api dan temperatur rata-rata dinding menjadi rendah. Pencampuran bahan baku biogas kotoran sapi dengan baglog mengakibatkan peningkatan pada *calorific value* biogas sehingga temperatur menjadi meningkat.

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan pada bab sebelumnya, maka kesimpulan pada penelitian ini sebagai berikut :

1. Penambahan limbah organik baglog menghasilkan perbedaan luas *flame stability limit* dan *flame mode map* akibat dari peningkatan kadar metana biogas.
2. *flame mode map* yang terbentuk dari masing-masing variasi antara lain *flashback*, *stable flame at combustor rim*, dan *stable flame in combustor*.
3. Akibat dari peningkatan kandungan metana pada biogas menghasilkan nyala api yang lebih stabil sehingga visualisasi api lebih tegas.
4. Temperatur nyala api tertinggi diperoleh pada bahan bakar biogas campuran kotoran sapi dengan baglog, lalu diikuti oleh biogas baglog, dan terakhir biogas kotoran sapi. Hal tersebut dipengaruhi oleh pencampuran limbah organik baglog yang dapat meningkatkan jumlah CH₄ pada biogas

5.2 Saran

Berdasarkan hasil dan pembahasan tersebut, diberikan saran antara lain :

1. Perlu pengujian pada kandungan biogas menggunakan GCMS (*Gas Chromatography and Mass Spectroscopy*) untuk memperoleh hasil yang valid.
2. Melakukan percobaan variasi *combustor* dengan memperbesar diameter *combustor* dan penambahan *wire mesh* dengan menggunakan bahan bakar biogas.
3. Melakukan percobaan pencampuran limbah organik lain dalam pembuatan biogas yang memiliki kandungan karbohidrat, lemak, dan protein lebih tinggi agar dapat meningkatkan kandungan CH₄ pada biogas.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbasi, T., Tauseef, S. M., & Abbasi, S. A. (2012). Biogas and Biogas Energy: An Introduction. In *Biogas Energy* (pp. 1–10). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1040-9_1
- Akunna, J. C. (2018). *Anaerobic Waste-Wastewater Treatment and Biogas Plants: A Practical Handbook*.
- Aravind, B., Raghuram, G. K. S., Kishore, V. R., & Kumar, S. (2018). Compact design of planar stepped micro combustor for portable thermoelectric power generation. *Energy Conversion and Management*, *156*, 224–234. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.021>
- Baigmohammadi, M., Tabejamaat, S., & Farsiani, Y. (2015). An experimental study of methane-oxygen-carbon dioxide premixed flame dynamics in non-adiabatic cylindrical meso-scale reactors with the backward facing step. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, *95*, 105–123. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2015.05.013>
- Deshpande, A. A., & Kumar, S. (2013). On the formation of spinning flames and combustion completeness for premixed fuel-air mixtures in stepped tube microcombustors. *Applied Thermal Engineering*, *51*(1–2), 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.09.013>
- DuttaRoy, R., Chakravarthy, S. R., & Sen, A. K. (2018). Experimental investigation of flame propagation and stabilization in a meso-combustor with sudden expansion. *Experimental Thermal and Fluid Science*, *90*, 299–309. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.09.008>
- Fanciulli, C., Abedi, H., Merotto, L., Dondè, R., De Iuliis, S., & Passaretti, F. (2018). Portable thermoelectric power generation based on catalytic combustor for low power electronic equipment. *Applied Energy*, *215*, 300–308. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.012>
- Ilminnafik, N., kristianta, F., & Sanjaya, I. B. (2017). Karakteristik Pembakaran Pada Meso Scale Combustor Dengan Bahan Bakar Butan Dan Liquefied petroleum Gas. *Jurnal ROTOR*.
- Ju, Y., & Maruta, K. (2011). Microscale combustion: Technology development and fundamental research. In *Progress in Energy and Combustion Science* (Vol. 37, Issue 6, pp. 669–715). <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2011.03.001>
- KESDM. (2016). *Program Strategis EBTKE dan Ketenagalistrikan*.

- Li, J., Chou, S. K., Li, Z. W., & Yang, W. M. (2010). Experimental investigation of porous media combustion in a planar micro-combustor. *Fuel*, 89(3), 708–715. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.06.026>
- Mahandari, C. P. (2010). *Fenomena FLame Lift-up Pada Pembakaran Premixed gas Propana*.
- Maruta, K. (2011). Micro and mesoscale combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*, 33(1), 125–150. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2010.09.005>
- Meng, L., Li, J., & Li, Q. (2017). A miniaturized power generation system cascade utilizing thermal energy of a micro-combustor: Design and modelling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(27), 17275–17283. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.147>
- Mika, F. (2014). *Pengaruh Konsentrasi CO₂ Terhadap Karakteristik Api Pembakaran Difusi CH₄-CO₂ Pada Counterflow Burner*. Skripsi.
- Mikami, M., Maeda, Y., Matsui, K., Seo, T., & Yuliati, L. (2013). Combustion of gaseous and liquid fuels in meso-scale tubes with wire mesh. *Proceedings of the Combustion Institute*, 34(2), 3387–3394. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2012.05.064>
- Mulyadi, D., Yuningsih, L. M., & Kusumawati, D. (2016). Efektivitas Pemanfaatan Serbuk Gergaji dan Limbah Media Tanam Jamur (Baglog) sebagai Bahan Baku Pembuatan Biogas. *Jurnal Kimia VALENSI*, 2(1), 11–16. <https://doi.org/10.15408/jkv.v2i1.3100>
- Nugraha, I. (2022). *ANALISIS KARAKTERISTIK API PEMBAKARAN PADA MESO SCALE COMBUSTOR DENGAN BAHAN BAKAR BIOGAS DAN BUTANA*.
- Pernanda, M. R. (2021). *Skripsi Nilai pH, Suhu, Nyala Api Dan Warna Api Biogas Yang Dihasilkan Pada C/N Feses Kerbau Dan Ampas Kelapa Ddengan Lama Fermentasi Yang Berbeda*.
- Raza Shah, S. A., Ahmed, Z., Leghari, B. A., Laghari, W. M., & Khidrani, A. (2015). Generation of Electric Power from Domestic Cooking System. *Open Journal of Energy Efficiency*, 04(04), 69–76. <https://doi.org/10.4236/ojee.2015.44008>
- Sanata, A., Nyoman Gede Wardana, I., Yuliati, L., & Sasongko, M. N. (2019). Effect of backward facing step on combustion stability in a constant contact area cylindrical meso-scale combustor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(8–97), 51–59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.149217>

- Sanata, A., Yuliati, L., Sasongko, M. N., & Wardana, I. N. G. (2020). Flame behavior inside constant diameter cylindrical meso-scale combustor with different backward facing step size. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(8–104), 44–51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.197988>
- Subiyanto, A. (2020). Analysis Of Forest And Land Fire From The Side Of Trigger Factors And Political Ecology. *Jurnal Manajemen Bencana (JMB)*, 6(2), 1–24. <https://doi.org/10.33172/jmb.v6i2.620>
- Sucipto, I. (2009). *Biogas hasil fermentasi Hidrolisat Bagas Menggunakan Konsorsium bakteri termofilik Kotoran Sapi*.
- Suprianti, Y. (2016). Pemurnian Biogas untuk meningkatkan Nilai Kalor melalui Adsorpsi Dua Tahap Susunan Seri dengan Media Karbon Aktif YANTI SUPRIANTI. *Teknik Konversi Energi Politeknik Negeri Bandung*, 4(2), 185–196.
- Widodo, Y., Wibowo, A., Mesin, T., Pengajar, S., Ups, D., & Kontak Person, T. (2014). *PENENTUAN AIR FUEL RATIO (AFR) AKTUAL PEMBAKARAN LPG PADA CELAH SEMPIT TIPE HORIZONTAL* Aris.
- Yang, W. M., Chou, S. K., Shu, C., Li, Z. W., & Xue, H. (2002). *Combustion in micro-cylindrical combustors with and without a backward facing step*. www.elsevier.com/locate/apthermeng
- Zhen, H. S., Leung, C. W., Cheung, C. S., & Huang, Z. H. (2014). Characterization of biogas-hydrogen premixed flames using Bunsen burner. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(25), 13292–13299. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.06.126>

LAMPIRAN-LAMPIRAN

LAMPIRAN 1. PERHITUNGAN PEMBAKARAN BAHAN BAKAR PADA
MESO SCALE COMBUSTOR

A. Kecepatan reaktan (v) biogas

Diketahui :

- Diameter *combustor* (d) = 4,7 mm → jari-jari *combustor* (r) = 2,35 mm
- Debit aktual udara (Qud) = 220,57 ml/min
- Debit aktual bahan bakar (Qbb) = 35,61 ml/min

Maka : m²

$$\begin{aligned} \text{Kecepatan reaktan (v)} &= \frac{(Q_{bb}+Q_{ud}) \times 100}{A_{\text{combustor}} \times 60} \\ &= \frac{(35,61+220,57) \times 100}{\pi \times r^2 \times 60} \\ &= \frac{(35,61+220,57) \times 100}{3,14 \times 2,35^2 \times 60} = 24,62 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

B. Persamaan reaksi kimia pembakaran sempurna

1. Perhitungan AFR stokiometri biogas kotoran sapi

- Persamaan pembakaran biogas kotoran sapi 100% (77% CH₄ – 23% CO₂)
- 0,77 CH₄ + 0,23 CO₂ + 1,54 (O₂ + 3,76N₂) → 1 CO₂ + 1,54 H₂O + 5,7904 N₂

Maka :

$$\begin{aligned} \text{AFR stokiometri} &= \frac{V_{\text{udara}}}{V_{\text{bahan bakar}}} \times 22,4 \\ &= \frac{1,54 \times (1+3,76)}{1} \times 22,4 \end{aligned}$$

$$= 164,2 \text{ liter.mol}^{-1}$$

2. Perhitungan AFR stokiometri biogas baglog

- Persamaan pembakaran biogas baglog 100% (87% CH₄ – 13% CO₂)
- 0,87 CH₄ + 0,13 CO₂ + 1,74 (O₂ + 3,76N₂) → 1CO₂ + 1,74 H₂O + 6,5424 N₂

Maka :

$$\begin{aligned} \text{AFR stokiometri} &= \frac{V \text{ udara}}{V \text{ bahan bakar}} \times 22,4 \\ &= \frac{1,74 \times (1+3,76)}{1} \times 22,4 \\ &= 185,5 \text{ liter.mol}^{-1} \end{aligned}$$

3. Perhitungan AFR stokiometri biogas campuran kotoran sapi – baglog

- Persamaan pembakaran biogas campuran kotoran sapi – baglog 100% (95% CH₄ – 5% CO₂)
- (0,95 CH₄ + 0,05 CO₂ + 1,9 (O₂ + 3,76N₂) → 1CO₂ + 1,9 H₂O + 7,144 N₂

Maka :

$$\begin{aligned} \text{AFR stokiometri} &= \frac{V \text{ udara}}{V \text{ bahan bakar}} \\ &= \frac{1,9 \times (1+3,76)}{1} \\ &= 202,5 \text{ liter.mol}^{-1} \end{aligned}$$

C. *Equivalence ratio* biogas (ϕ)

1. Campuran stokiometri

Diketahui :

- Jumlah volume udara (V_{ud}) = 202,5 liter.mol⁻¹
- Jumlah volume bahan bakar (V_{bb}) = 22,4 liter.mol⁻¹
- Debit aktual udara (Q_{ud}) = 244,59 ml/min
- Debit aktual bahan bakar (Q_{bb}) = 27,08 ml/min

Maka :

$$\text{Equivalence ratio } (\phi) = \frac{AFR_{\text{stokiometri}}}{AFR_{\text{aktual}}}$$

$$= \frac{\left(\frac{V_{ud}}{V_{bb}}\right)}{\left(\frac{Q_{ud}}{Q_{bb}}\right)}$$

$$= \frac{\left(\frac{202,5 \times 10^6}{22,4 \times 10^6}\right)}{\left(\frac{244,59}{27,08}\right)}$$

$$= 1$$

2. Campuran kaya bahan bakar

Diketahui :

- Jumlah volume udara (V_{ud}) = 164,2 liter.mol⁻¹
- Jumlah volume bahan bakar (V_{bb}) = 22,4 liter.mol⁻¹
- Debit aktual udara (Q_{ud}) = 88,46 ml/min
- Debit aktual bahan bakar (Q_{bb}) = 25,86 ml/min

Maka :

$$\text{Equivalence ratio } (\phi) = \frac{AFR_{\text{stokimetri}}}{AFR_{\text{aktual}}}$$

$$= \frac{\left(\frac{V_{ud}}{V_{bb}}\right)}{\left(\frac{Q_{ud}}{Q_{bb}}\right)}$$

$$= \frac{\left(\frac{164,2 \times 10^6}{22,4 \times 10^6}\right)}{\left(\frac{88,46}{25,86}\right)}$$

$$= 2,14$$

3. Campuran miskin bahan bakar

Diketahui :

- Jumlah volume udara (V_{ud}) = 185,5 liter.mol⁻¹
- Jumlah volume bahan bakar (V_{bb}) = 22,4 liter.mol⁻¹
- Debit aktual udara (Q_{ud}) = 292,63 ml/min
- Debit aktual bahan bakar (Q_{bb}) = 27,08 ml/min

Maka :

$$\text{Equivalence ratio } (\phi) = \frac{AFR_{\text{stokimetri}}}{AFR_{\text{aktual}}}$$

$$= \frac{\left(\frac{V_{ud}}{V_{bb}}\right)}{\left(\frac{Q_{ud}}{Q_{bb}}\right)}$$

$$= \frac{\left(\frac{185,5 \times 10^6}{22,4 \times 10^6}\right)}{\left(\frac{292,63}{27,08}\right)}$$

$$= 0,78$$

LAMPIRAN 2. DATA HASIL PENGUJIAN *FLAME STABILITY LIMIT*

Tabel B.1 *Flame Stability Limit* biogas kotoran sapi

Q_f (ml/min)	Q_a (ml/min)	v (cm/s)	(φ)
28,30	148,51	16,99	1,40
29,51	148,51	17,11	1,46
	154,51	17,69	1,40
30,73	148,51	17,23	1,52
	154,51	17,80	1,46
	160,52	18,38	1,40
	166,52	18,96	1,35
31,95	154,51	17,92	1,52
	160,52	18,50	1,46
	166,52	19,08	1,41
33,17	172,53	19,65	1,36
	172,53	19,77	1,41
	178,53	20,35	1,36

Tabel B.2 *Flame Stability Limit* biogas baglog

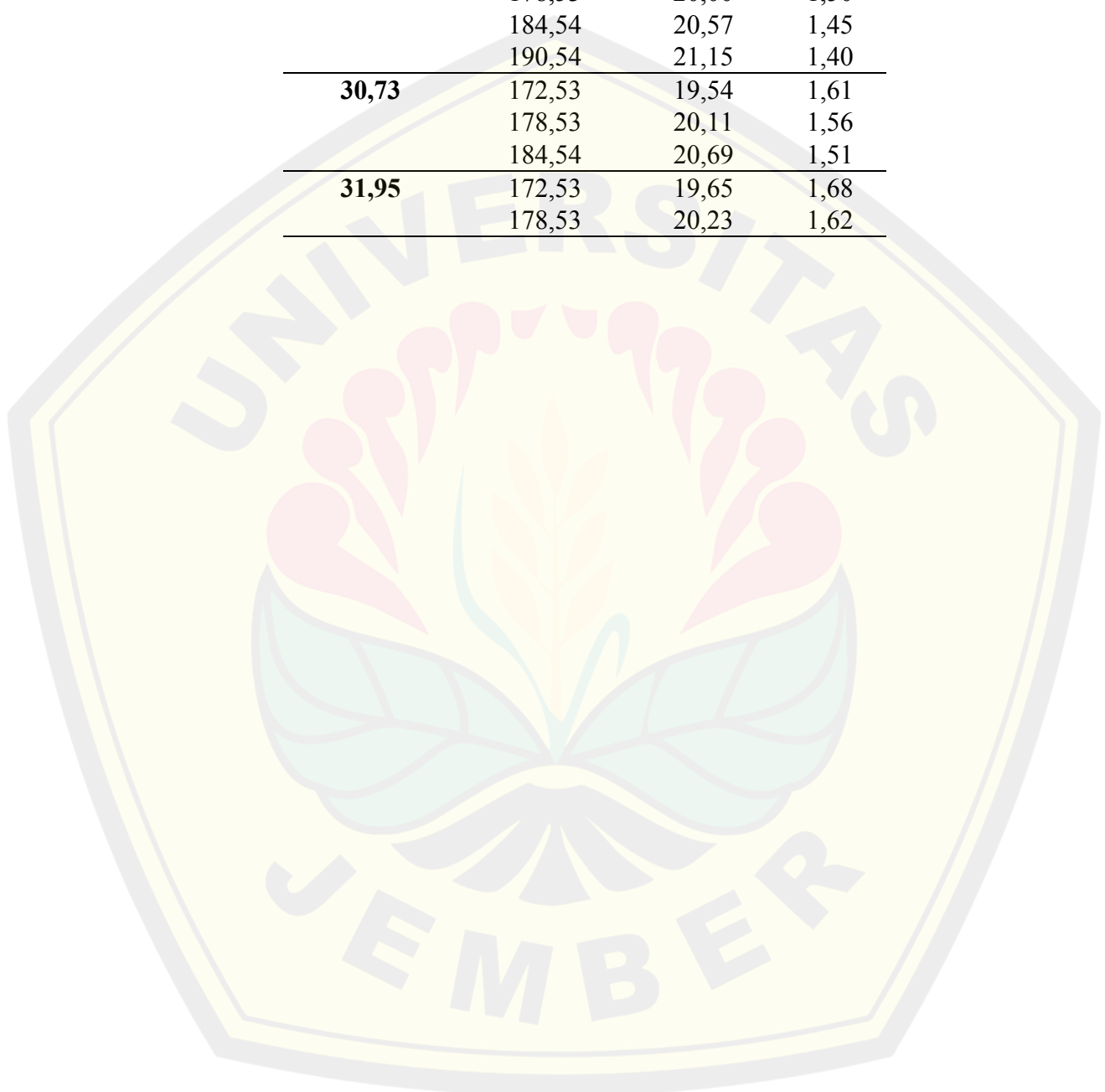
Q_f (ml/min)	Q_a (ml/min)	v (cm/s)	(φ)
24,64	148,51	16,64	1,37
	154,51	17,22	1,32
	160,52	17,80	1,27
25,86	154,51	17,34	1,39
	160,52	17,91	1,33
	166,52	18,49	1,29
27,08	154,51	17,45	1,45
	160,52	18,03	1,40
	166,52	18,61	1,35
	172,53	19,18	1,30
28,30	154,51	17,57	1,52
	160,52	18,15	1,46
	166,52	18,72	1,41
	172,53	19,30	1,36
	178,53	19,88	1,31
29,51	154,51	17,69	1,58
	160,52	18,26	1,52
	166,52	18,84	1,47
	172,53	19,42	1,42
	178,53	20,00	1,37

Q_f (ml/min)	Q_a (ml/min)	v (cm/s)	(ϕ)
30,73	160,52	18,38	1,59
	166,52	18,96	1,53
	172,53	19,54	1,48
	178,53	20,11	1,43
	184,54	20,69	1,38
31,95	166,52	19,08	1,59
	172,53	19,65	1,53
	178,53	20,23	1,48
	184,54	20,81	1,43
	190,54	21,38	1,39
33,17	178,53	20,35	1,54
	184,54	20,92	1,49
	190,54	21,50	1,44
	196,55	22,08	1,40

Tabel B.3 *Flame stability limit biogas campuran kotoran sapi-baglog*

Q_f (ml/min)	Q_a (ml/min)	v (cm/s)	(ϕ)
24,64	178,53	19,53	1,25
	184,54	20,10	1,21
	190,54	20,68	1,17
	196,55	21,26	1,13
	202,55	21,84	1,10
25,86	184,54	20,22	1,27
	190,54	20,80	1,23
	196,55	21,38	1,19
	202,55	21,95	1,15
	208,56	22,53	1,12
27,08	178,53	19,76	1,37
	184,54	20,34	1,33
	190,54	20,92	1,29
	196,55	21,49	1,25
	202,55	22,07	1,21
	208,56	22,65	1,17
	214,56	23,22	1,14
28,30	178,53	19,88	1,43
	184,54	20,46	1,39
	190,54	21,03	1,34
	196,55	21,61	1,30
	202,55	22,19	1,26
	208,56	22,76	1,23

Q_f (ml/min)	Q_a (ml/min)	v (cm/s)	(ϕ)
	214,56	23,34	1,19
29,51	160,52	18,26	1,66
	166,52	18,84	1,60
	172,53	19,42	1,55
	178,53	20,00	1,50
	184,54	20,57	1,45
	190,54	21,15	1,40
30,73	172,53	19,54	1,61
	178,53	20,11	1,56
	184,54	20,69	1,51
31,95	172,53	19,65	1,68
	178,53	20,23	1,62



LAMPIRAN 3. DATA HASIL PENGUJIAN VISUALISASI NYALA API

Tabel C.1 Visualisasi nyala api biogas kotoran sapi

<i>Flame mode</i>	Q_r (ml/min)	Q_a (ml/min)	v (cm/s)	(ϕ)
<i>Stable flame at combustor rim</i>	27,08	178,53	19,76	1,37
<i>Stable flame in combustor</i>	30,73	166,52	18,96	1,35

Tabel C.2 Visualisasi nyala api biogas baglog

<i>Flame mode</i>	Q_r (ml/min)	Q_a (ml/min)	v (cm/s)	(ϕ)
<i>Stable flame at combustor rim</i>	27,08	178,53	19,76	1,26
<i>Stable flame in combustor</i>	28,30	178,53	19,88	1,31

Tabel C.3 Visualisasi nyala api biogas campuran kotoran sapi-baglog

<i>Flame mode</i>	Q_r (ml/min)	Q_a (ml/min)	v (cm/s)	(ϕ)
<i>Stable flame at combustor rim</i>	27,07	178,53	19,76	1,11
<i>Stable flame in combustor</i>	24,64	202,55	21,84	1,10

**LAMPIRAN 4. DATA HASIL PENGUJIAN TEMPERATUR NYALA API
DAN TEMPERATUR DINDING COMBUSTOR**

Tabel D.1 Temperatur nyala api

Bahan Bakar	T_a (°C)	Q_f (ml/min)	Q_a (ml/min)	v (cm/s)	(φ)
Kotoran sapi	713,08 °C	30,73	166,52	18,96	1,35
Baglog	716,994 °C	28,30	178,53	19,88	1,31
Kotoran sapi- baglog	734,855 °C	24,64	202,55	21,84	1,10

Tabel D.2 Temperatur dinding *combustor*

Bahan Bakar	T_{d1}(°C)	T_{d2}(°C)	T_{d3}(°C)	T_{d4}(°C)
Kotoran sapi	126,009	233,784	195,101	713,079
Baglog	101,357	251,983	236,986	716,995
Kotoran sapi- baglog	142,193	283,015	204,33	734,855

LAMPIRAN 5. DOKUMENTASI INSTALASI PENELITIAN



Gambar E.1 Flowmeter bahan bakar biogas dan udara



Gambar E.2 Instalasi pengambilan data visualisasi nyala api



Gambar E.4 instalasi pengambilan data temperatur nyala api dan temperatur dinding combustor



Gambar E.5 *meso scale combustor* dengan *backward facing step* rasio diameter
0,9

