



**PENGARUH PANJANG SALURAN *SUDDEN EXPANSION* TERHADAP
KARAKTERISTIK PEMBAKARAN PADA *MESO-SCALE COMBUSTOR***

SKRIPSI

Oleh

**Ahmad Ifan Rohadi
NIM 121910101091**

**PROGRAM STUDI STRATA SATU TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2016**



**PENGARUH PANJANG SALURAN *SUDDEN EXPANSION* TERHADAP
KARAKTERISTIK PEMBAKARAN PADA *MESO-SCALE COMBUSTOR***

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat untuk
menyelesaikan Program Studi Teknik Mesin (S1)
dan mencapai gelar sarjana Teknik

Oleh

Ahmad Ifan Rohadi
NIM 121910101091

**PROGRAM STUDI STRATA SATU TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2016**

PERSEMBAHAN

Puji syukur alhamdulillah kepada Allah Subhannahu Wa Ta'ala atas nikmat dan hidayah-Nya dan semoga sholawat serta salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad Shallallahu Alaihi Wa Sallam. Dengan segala kerendahan hati skripsi ini saya persembahkan kepada :

1. Keluarga tercinta yang luar biasa;
2. Guru dan Staf TK PG. Pesantren Baru Kota Kediri, SDN Pesantren II Kota Kediri, SMPN 1 Kota Kediri, dan SMAN 1 Kota Kediri;
3. Dosen dan Staf almamater tercinta Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember, khususnya Dosen pembimbing dan Dosen penguji;
4. Teman – teman rumah, TK, SD, SMP, SMA, teman – teman kuliah khususnya teman kost, dan teman – teman lainnya;
5. Dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu -satu;

terimakasih atas segala kebaikan yang telah diberikan kepada saya, semoga mendapat balasan kebaikan yang lebih baik dari Allah Subhannahu Wa Ta'ala, aamiin.

MOTTO

“Hai orang-orang yang beriman, jadikanlah sabar dan shalatmu sebagai penolongmu, sesungguhnya Allah beserta orang-orang yang sabar”.

(Al-Baqarah: 153)

“Karena sesungguhnya, sesudah kesulitan itu ada kemudahan”.

(Surat Alam-Nasyrah ayat 5)

“Apabila kamu di waktu sore, jangan menunggu pagi, jika kamu di waktu pagi jangan menunggu sore, pergunakanlah kesehatanmu untuk persiapan sakitmu dan pergunakanlah hidupmu untuk persiapan matimu”.

(H.R. Bukhari)

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ahmad Ifan Rohadi

NIM : 121910101091

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul “Pengaruh Panjang Saluran *Sudden Expansion* Terhadap Karakteristik Pembakaran Pada *Meso-Scale Combustor*” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi manapun, dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 11 Oktober 2016

Yang menyatakan,

(Ahmad Ifan Rohadi)

NIM 121910101091

SKRIPSI

**PENGARUH PANJANG SALURAN *SUDDEN EXPANSION* TERHADAP
KARAKTERISTIK PEMBAKARAN PADA *MESO-SCALE COMBUSTOR***

Oleh

Ahmad Ifan Rohadi
NIM 121910101091

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dr. R. Koekoeh K. W., S.T., M.Eng.

Dosen Pembimbing Anggota : Boy Arief F., S.T., M.T., Ph.D.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Pengaruh Panjang Saluran *Sudden Expansion* Terhadap Karakteristik Pembakaran Pada *Meso-Scale Combustor*” telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal : Kamis, 13 Oktober 2016

tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji

Ketua,

Dr. R. Koekoeh K. W., S.T., M.Eng.
NIP 19670708 199412 1 001

Anggota I,

Ir. Digdo Listyadi S., M.Sc.
NIP 19680617 199501 1 001

Sekretaris,

Boy Arief F., S.T., M.T., Ph.D
NIP 19700807 200212 1 001

Anggota II,

Ir. Dwi Djumhariyanto, M.T.
NIP 19600812 199802 1 001

Mengesahkan

Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember,

Dr. Ir. Entin Hidayah, M.UM.
NIP. 19661215 199503 2 001

RINGKASAN

Pengaruh Panjang Saluran *Sudden Expansion* Terhadap Karakteristik Pembakaran Pada *Meso-Scale Combustor*; Ahmad Ifan Rohadi, 121910101091; 2016: 62 halaman; Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Sumber energi ramah lingkungan dan berkelanjutan sangat diperlukan untuk membantu mengurangi konsumsi bahan bakar fosil. Bahan bakar fosil merupakan sumber energi yang tidak terbarukan, oleh karena itu dibutuhkan kebijakan pemerintah agar masyarakat memiliki budaya bijak dalam menggunakan bahan bakar fosil atau dilakukan pengembangan teknologi dalam pengolahan atau pemakaian sumber energi fosil. *Meso-combustion* atau pembakaran pada saluran ruang bakar dengan diameter sebesar 1 – 10 mm (Maruta dan Ju, 2011) merupakan salah satu wujud pengembangan teknologi pemanfaatan bahan bakar fosil. Pembakaran ini memiliki potensi untuk menghasilkan energi panas yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber pembangkit listrik skala mikro atau disebut *Micro Power Generator (MPG)*. Komponen utama MPG adalah ruang bakar atau disebut *combustor*, dalam *combustor* tersebut berlangsung proses pembakaran skala *meso*.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan pengamatan terhadap *flammability limit* atau batas nyala api dan visualisasi nyala api pada proses pembakaran skala *meso (meso-scale combustion)*. Penelitian ini dilakukan dengan jalan memberikan variasi dimensi panjang saluran *sudden expansion* pada *combustor* sebesar 10 mm, 15 mm, dan 20 mm. *Combustor* tersebut terdiri dari bagian *input* yang terbuat dari tembaga dan bagian *output* yang terbuat dari *quartz glass*, dengan diameter dalam bagian *input* sebesar 2,6 mm dan diameter dalam bagian *output* sebesar 3,5 mm. Penambahan dimensi tersebut diharapkan dapat meningkatkan batas nyala api atau *flammability limit* pada proses pembakaran.

Hasil perbandingan batas nyala api pada variasi panjang saluran *sudden expansion* menunjukkan bahwa batas nyala api atau *flammability limit* terluas terdapat pada saluran *sudden expansion* dengan panjang 20 mm, dimana api dapat menyala dalam rentang rasio nilai ekuivalen (ϕ) = 0,91 – 1,38 dan nilai kecepatan reaktan (v) = 19,6 – 31 cm/s, untuk panjang saluran *sudden expansion* 15 mm api dapat menyala pada rasio ekuivalen (ϕ) = 0,93 – 1,35 dan nilai kecepatan reaktan (v) = 19,1 – 28,1 cm/s. Sedangkan untuk panjang saluran *sudden expansion* 10 mm api dapat menyala pada nilai rasio ekuivalen (ϕ) = 0,94 – 1,22 dan nilai kecepatan reaktan (v) = 17,3 – 22,4. Sehingga, dapat dikatakan *combustor* atau ruang bakar dengan saluran *sudden expansion* 20 mm memiliki batas nyala api terluas dan stabilas nyala api baik. Saluran *sudden expansion* dengan panjang 10 mm memiliki tingkat kecerahan warna api paling rendah yaitu sebesar RGB(66,82,173). Tingkat kecerahan nyala api mengalami peningkatan pada variasi panjang 15 mm dan 20 mm, yaitu sebesar RGB(74,82,173) dan RGB(74,90,181). Kecerahan nyala api semakin meningkat dengan bertambahnya panjang saluran *sudden expansion* dan semakin cerah nyala api, semakin tinggi pula temperatur pada nyala api tersebut.

SUMMARY

THE EFFECT OF LONG DIMENTION OF SUDDEN EXPANSION CHANNEL AGAINTS COMBUSTION CHARACTERISTICS IN MESO-SCALE COMBUSTOR; Ahmad Ifan Rohadi, 121910101091; 2016; 61 page ; Departement of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Jember.

Green and sustainable energy source is needed to help reduce fossil fuel consumption. Fossil fuels are non-renewable energy sources, hence the importance of government policy so that people have a wise culture in using fossil fuels or made the development of technology in the processing or the use of fossil energy sources. Meso-combustion or combustion in the combustion chamber channel with a diameter of 1-10 mm (Maruta and Ju, 2011) is one manifestation of the development of technologies using fossil fuels. This combustion has the potential to generate thermal energy that can be harnessed as a source of micro-scale power generation or so-called Micro Power Generator (MPG). MPG is the main component of the combustion chamber or the so-called combustor, the combustor the combustion process takes place meso scale.

The purpose of this study was to make observations on flammability limit or limits visualization of flame and the flame in the combustion process meso scale (meso-scale combustion). This research was conducted by way of giving dimensional variations sudden expansion in the channel length of the combustor by 10 mm, 15 mm and 20 mm. The combustor is composed of parts made of copper input and output sections are made of quartz glass, with an inner diameter of 2.6 mm input section and an inner diameter of 3.5 mm output section. The addition of these dimensions is expected to increase the limit of flame or flammability limit in the combustion process.

The comparison flammability limit of length variation sudden channel expansion shows that the limit of flame or flammability limit contained in the widest sudden channel expansion with a length of 20 mm, in which a fire can be lit in the range of equivalent value ratio (ϕ) = 0.91 to 1.38 and the value of the speed of the reactant (v) = 19.6 to 31 cm / s, for the sudden expansion channel length of 15 mm fire can be lit at a ratio equivalent (ϕ) = 0.93 to 1.35 and the value of the speed of the reactant (v) = 19, 1 to 28.1 cm / s. As for the sudden expansion channel length of 10 mm fire can be lit at a value equivalent ratio (ϕ) = 0.94 to 1.22 and the value of the speed of the reactant (v) = 17.3 to 22.4. Thus, it can be said combustor or combustion chamber with sudden channel expansion limit of 20 mm has the widest flame and flame stabilas well. Sudden channel expansion with a length of 10 mm has a color brightness level that is equal to the lowest flame RGB (66,82,173). Flame brightness levels increase on the variation in the length of 15 mm and 20 mm, which amounted to RGB (74,82,173) and RGB (74,90,181). The brightness of the flame will increase by increasing of leght of the sudden expansion channel and the brighter flame show the higher temperature of the flame.

PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah Subhannahu Wa Ta'ala yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi berjudul "Pengaruh Panjang Saluran *Sudden Expansion* Terhadap Karakteristik Pembakaran Pada *Meso-Scale Combustor*". Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Allah Subhannahu Wa Ta'ala yang telah memberikan nikmat dan karunia yang tidak pernah henti dalam hidup ini dan junjungan besar Nabi Muhammad Shallallahu Alaihi Wa Sallam;
2. Keluarga tercinta, Bapak Kariyono, almarhum Ibu Sunarti, Mas Fandi, Yusuf, Sofyan, Alfian, dan Rizal;
3. Guru dan Staf TK PG. Pesantren Baru Kota Kediri, SDN Pesantren II Kota Kediri, SMPN 1 Kota Kediri, dan SMAN 1 Kota Kediri;
4. Bapak Dr. R. Koekoeh KW., S.T., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing Utama, Bapak Boy Arief F., S.T., M.T., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam penulisan skripsi ini;
5. Bapak Ir. Digdo Listyadi S., M.Sc. selaku Dosen Penguji Utama dan Bapak Ir. Dwi Djumhariyanto, M.T. selaku Dosen Penguji Anggota yang telah banyak sekali memberikan saran dan berbagai pertimbangan menuju ke arah yang benar dalam penulisan skripsi ini;
6. Bapak Andi Sanata. S.T., M.T selaku dosen pembimbing penelitian;
7. Dosen dan Staf Universitas Jember khususnya Jurusan Teknik Mesin yang telah membimbing penulis selama menjadi mahasiswa;
8. Rekan satu tim penelitian *Meso-Combustion*.

9. Ketua Angkatan TM 12 Universitas Jember, Rama, yang telah sabar dan mengayomi dulur-dulur di angkatan 2012. Serta seluruh teman – teman seperjuangan.
10. Teman – teman rumah, TK, SD, SMP, SMA, teman – teman kuliah khususnya teman kost, dan teman – teman lainnya.
11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat.

Jember, 11 Oktober 2016

Penulis

DAFTAR ISI

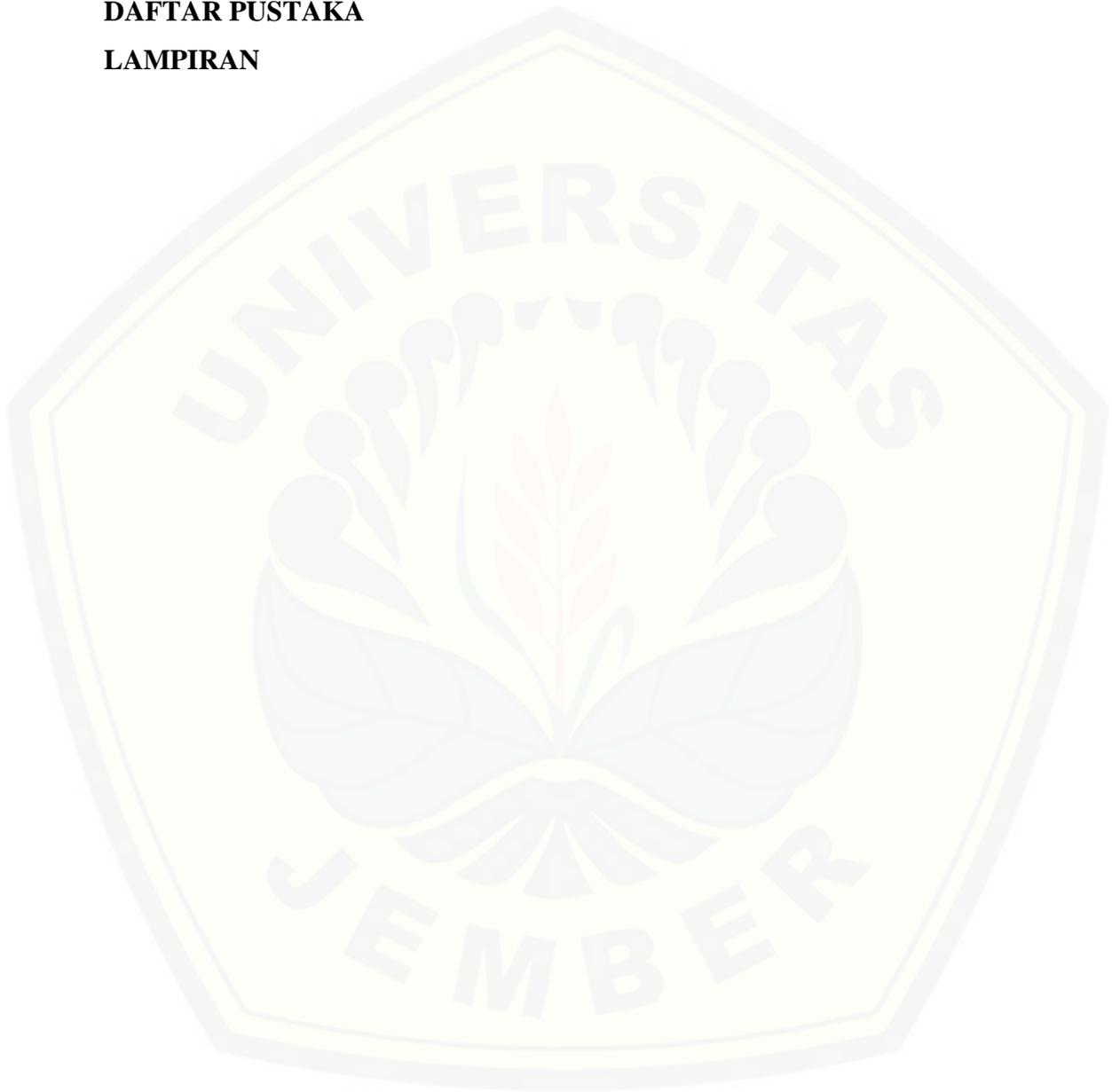
	Halaman
HALAMAN JUDUL	ii
PERSEMBAHAN	iii
MOTTO	iv
PERNYATAAN	v
PEMBIMBINGAN	vi
PENGESAHAN	vii
RINGKASAN	viii
PRAKATA	xii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR TABEL	xix
BAB 1. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalahan	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Pembakaran	4
2.1.1 Klasifikasi Pembakaran	
Berdasarkan Sifat Reaksi Kimia.....	5
2.1.2 Klasifikasi Pembakaran Berdasarkan Cara	
Pencampuran Reaktan dan Pengoksidasi	5
2.2 Rasio Udara dan Bahan bakar	6

2.3 Rasio Ekuivalen	7
2.4 Batas Nyala Api	8
2.5 Sifat Nyala Api.....	8
2.6 <i>Liquified Pretroleum Gasses</i>	9
2.7 <i>Micro Power Generator</i>	13
2.8 <i>Micro/Meso-Scale Combustor</i>	16
2.9 Aliran Fluida.....	18
2.10 Penelitian Sebelumnya	19
2.11 Hipotesis	21
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Tempat dan Waktu Pengambilan Data	22
3.2 Bahan dan Alat Penelitian.....	22
3.2.1 Bahan	22
3.2.2 Alat	23
3.3 Variabel Penelitian	29
3.3.1 Variabel Bebas	29
3.2.2 Variabel Terikat	30
3.4 Skema Instalasi Penelitian	31
3.5 Prosedur Penelitian.....	32
3.6 Diagram Alir Penelitian	35
3.7 Penyajian Data Penelitian	36
3.8 Jadwal Kegiatan Penelitian.....	39
BAB 4. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Data Hasil Penelitian	40
4.2 Batas Nyala Api atau <i>Flammability Limit</i>	42
4.3 Visualisasi Nyala Api	49
BAB 5. PENUTUP	
5.1 Kesimpulan	54

5.2 Saran 55

DAFTAR PUSTAKA

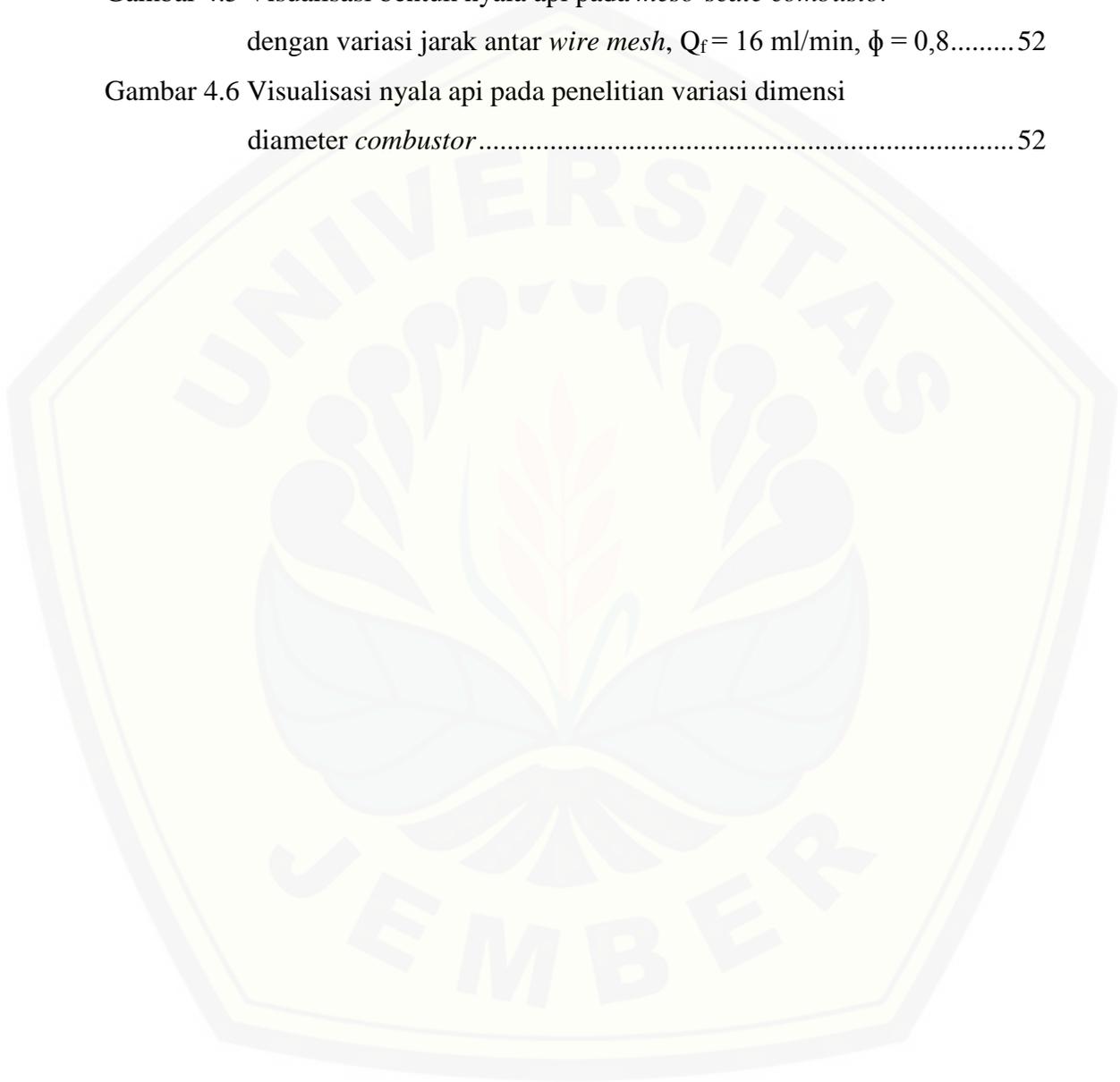
LAMPIRAN



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Skema efek <i>Seebeck</i>	14
Gambar 2.2 Ilustrasi proses konversi energi pada <i>thermophotovoltaic</i>	16
Gambar 2.3 Dimensi <i>Meso-scale Combustor</i>	18
Gambar 2.4 <i>Combustor</i> dengan saluran <i>sudden expansion</i>	20
Gambar 3.1 Tabung LPG	22
Gambar 3.2 Lem Keramik.....	23
Gambar 3.3 <i>Meso-scale Combustor</i>	23
Gambar 3.4 Dimensi <i>Meso-scale Combustor</i>	24
Gambar 3.5 <i>Mixer</i>	24
Gambar 3.6 Kompresor elektrik.....	25
Gambar 3.7 <i>Flowmeter</i>	26
Gambar 3.8 Jangka Sorong	27
Gambar 3.9 <i>Pisco Tube</i>	28
Gambar 3.10 <i>Regulator</i> LPG	28
Gambar 3.11 Kamera DSLR.....	29
Gambar 3.12 Skema Instalasi Alat Penelitian.....	31
Gambar 3.13 Diagram Alir Penelitian	35
Gambar 3.14 Grafik <i>flammability limit</i>	36
Gambar 4.1 Grafik <i>flammability limit</i> pada <i>meso-scale combustor</i> dengan variasi panjang saluran <i>sudden expansion</i> 10 mm, 15 mm, dan 20 mm	45
Gambar 4.2 Posisi <i>wire mesh</i> di dalam <i>meso-scale combustor</i> dengan jarak antar <i>wire mesh</i> 3 mm.....	47
Gambar 4.3 <i>Flammability limit</i> pada <i>combustor</i> dengan	

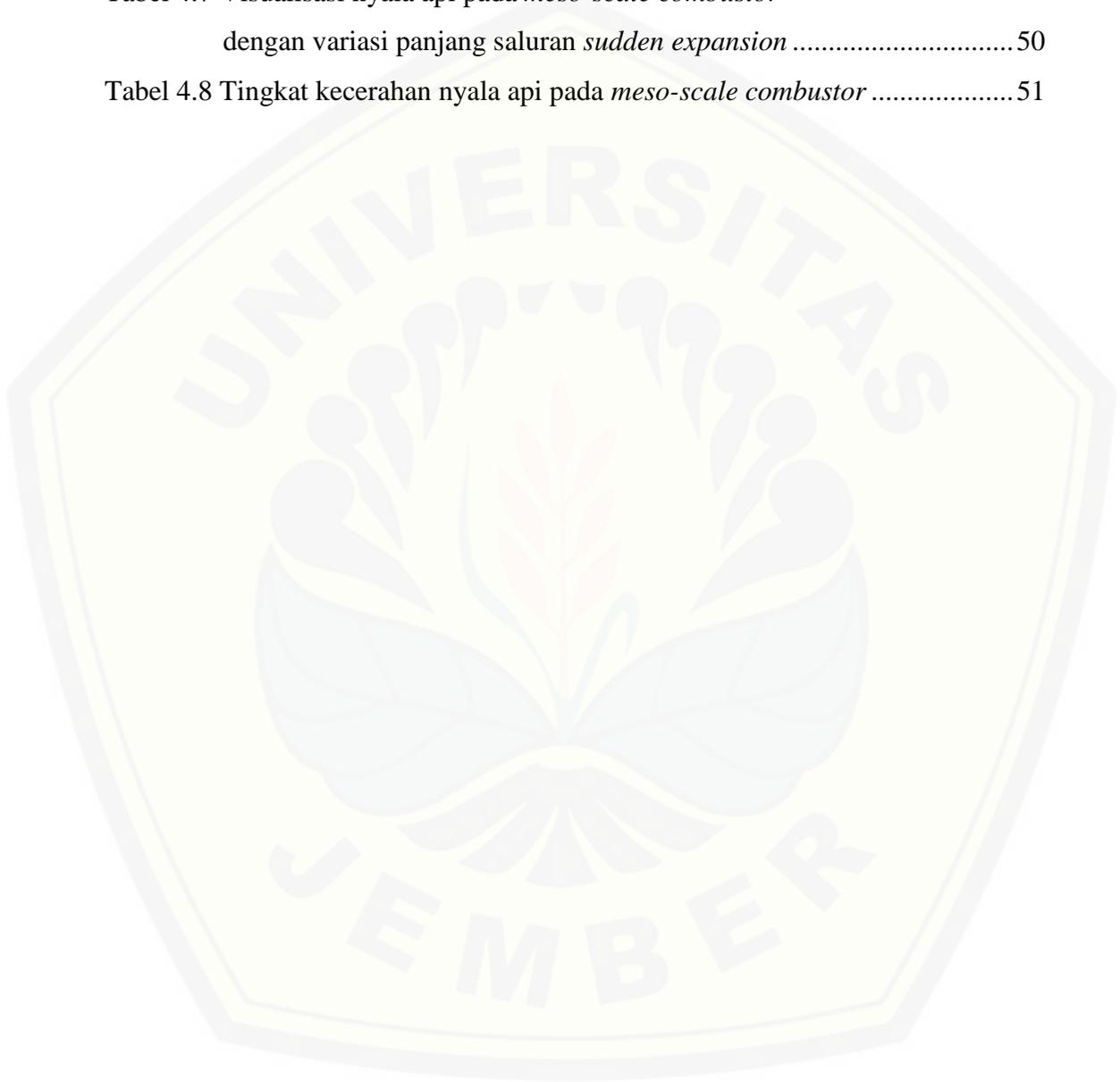
variasi perbandingan diameter.	48
Gambar 4.4 Titik pengambilan nilai rasio ekuivalen dan kecepatan reaktan	49
Gambar 4.5 Visualisasi bentuk nyala api pada <i>meso-scale combustor</i> dengan variasi jarak antar <i>wire mesh</i> , $Q_f = 16$ ml/min, $\phi = 0,8$	52
Gambar 4.6 Visualisasi nyala api pada penelitian variasi dimensi diameter <i>combustor</i>	52



DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Klasifikasi Jenis Pembakaran.....	17
Tabel 3.1 Penyajian data hasil pengujian <i>flammability limit</i> pada <i>combustor</i> dengan saluran <i>sudden expansion</i> 10 mm.....	36
Tabel 3.2 Penyajian data hasil pengujian <i>flammability limit</i> pada <i>combustor</i> dengan saluran <i>sudden expansion</i> 15 mm.....	37
Tabel 3.3 Penyajian data hasil pengujian <i>flammability limit</i> pada <i>combustor</i> dengan saluran <i>sudden expansion</i> 20 mm.....	37
Tabel 3.4 Jadwal Kegiatan Penelitian	39
Tabel 4.1 Data komposisi debit bahan bakar dan udara dalam proses pembakaran <i>meso-scale combustor</i> dengan panjang saluran <i>sudden expansion</i> 10 mm	40
Tabel 4.2 Data komposisi debit bahan bakar dan udara dalam proses pembakaran <i>meso-scale combustor</i> dengan panjang saluran <i>sudden expansion</i> 15 mm	41
Tabel 4.3 Data komposisi debit bahan bakar dan udara dalam proses pembakaran <i>meso-scale combustor</i> dengan panjang saluran <i>sudden expansion</i> 20 mm	42
Tabel 4.4 Hasil perhitungan nilai rasio ekuivalensi (ϕ) dan kecepatan reaktan (v) pada <i>combustor</i> dengan panjang saluran <i>sudden expansion</i> 10 mm.....	43
Tabel 4.5 Hasil perhitungan nilai rasio ekuivalensi (ϕ) dan kecepatan reaktan (v) pada <i>combustor</i> dengan panjang saluran <i>sudden expansion</i> 15 mm.....	44
Tabel 4.6 Hasil perhitungan nilai rasio ekuivalensi (ϕ) dan	

kecepatan reaktan (v) pada <i>combustor</i> dengan panjang saluran <i>sudden expansion</i> 20 mm.....	44
Tabel 4.7 Visualisasi nyala api pada <i>meso-scale combustor</i> dengan variasi panjang saluran <i>sudden expansion</i>	50
Tabel 4.8 Tingkat kecerahan nyala api pada <i>meso-scale combustor</i>	51



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sumber energi ramah lingkungan dan berkelanjutan sangat diperlukan untuk membantu mengurangi konsumsi bahan bakar fosil. Bahan bakar fosil merupakan sumber energi yang tidak terbarukan, apabila sumber energi tersebut dieksploitasi dengan laju produksi per tahun seperti pada tahun 2008, yaitu sebesar 0,36 miliar barrel minyak bumi, 2,89 TSCF gas bumi, serta 0,24 miliar ton batu bara, maka keberadaan minyak bumi hanya dapat diharapkan sampai 22 tahun mendatang, ketersediaan gas alam hanya sekitar 55 tahun lagi, dan batu bara masih dapat dinikmati sampai 87 tahun dari sekarang (Saptoadi, 2010). Oleh karena itu, dibutuhkan kebijakan pemerintah agar masyarakat memiliki budaya bijak dalam menggunakan bahan bakar fosil atau dilakukan pengembangan teknologi dalam pengolahan atau pemakaian sumber energi fosil.

Meso-combustion atau pembakaran pada saluran ruang bakar dengan diameter sebesar 1 – 10 mm (Maruta dan Ju, 2011) merupakan salah satu wujud pengembangan teknologi pemanfaatan bahan bakar fosil. Pembakaran ini memiliki potensi untuk menghasilkan energi panas yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber pembangkit listrik skala mikro atau disebut *Micro Power Generator (MPG)*. Komponen utama MPG adalah ruang bakar atau disebut *combustor*, dalam *combustor* tersebut berlangsung proses pembakaran skala *meso*.

Desain dan jenis material *combustor* sangat berpengaruh terhadap energi panas hasil proses pembakaran. Menurut Yang *et al.* (2002), penambahan saluran *sudden expansion* pada *combustor* dapat membantu pencampuran antara bahan bakar dan udara sebelum terjadi proses pembakaran, selain itu juga berguna untuk mengatur posisi nyala api. Sedangkan penelitian yang dilakukan Pradika *et al.* (2014), membuktikan bahwa konduktivitas termal dinding *combustor* sangat berpengaruh

terhadap visualisasi nyala api dan *flammability limit* pada *meso-scale combustor* dengan *wire mesh* di dalamnya. Hasil dari penelitian tersebut ialah, variasi *combustor* atau ruang bakar yang terdiri atas *copper* dan *quartz glass tube* memiliki *flammability limit* paling luas dibanding dengan variasi *combustor* yang terdiri atas *quartz glass tube* dengan *quartz glass tube* dan *combustor* yang terdiri atas *stainless steel* dengan *quartz glass tube*.

Pengembangan selanjutnya berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Yang *et al.* (2002) dan Pradika *et al.* (2014), dalam karya tulis ilmiah ini dilakukan pengamatan terhadap *flammability limit* dan visualisasi nyala api pada proses pembakaran skala *meso* (*meso-scale combustion*). Penelitian ini dilakukan dengan jalan memberikan variasi dimensi panjang saluran *sudden expansion* pada *combustor*. Penambahan dimensi tersebut diharapkan secara langsung dapat meningkatkan volume ruang bakar dan memberikan pengaruh pola aliran campuran udara dan bahan bakar yang masuk ke dalam *combustor*, sehingga dapat meningkatkan batas nyala api atau *flammability limit* pada proses pembakaran.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam karya tulis ilmiah ini adalah bagaimana pengaruh penambahan variasi dimensi panjang saluran *sudden expansion* pada *combustor* terhadap *flammability limit* atau batas nyala api dan visualisasi nyala api di dalam *meso-scale combustor*.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Besar diameter *input combustor* adalah 3,5 mm, diameter saluran *sudden expansion* adalah 3,5 mm, dengan variasi panjang saluran *sudden expansion* sebesar 10 mm, 15 mm, dan 20 mm;
2. Udara Bebas diasumsikan terdiri atas 79% N₂ dan 21% O₂;

3. Bahan bakar LPG terdiri atas 50% propana dan 50% butane;
4. Proses pembakaran berlangsung secara *steady*.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini ditujukan untuk mengetahui pengaruh penambahan variasi dimensi panjang saluran *sudden expansion* pada *combustor* terhadap karakteristik pembakaran pada *combustor* skala *meso*.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

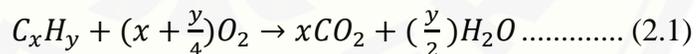
1. Mampu mengetahui pengaruh variasi panjang saluran *sudden expansion* terhadap karakteristik pembakaran pada *meso-scale combustor*;
2. Mampu menganalisa karakteristik pembakaran pada *meso-scale combustor* seputar visualisasi nyala api dan batas nyala api atau *flammability limit*;
3. Mampu memberikan referensi baru dalam pengembangan pembakaran skala *meso* selanjutnya.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

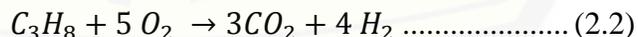
2.1 Pembakaran

Proses pembakaran merupakan rangkaian reaksi - reaksi kimia yang terjadi antara bahan bakar dan zat pengoksidasi berupa oksigen, dimana dalam proses pembakaran ini dibarengi dengan produksi energi berupa panas dan perubahan senyawa kimia. Pelepasan energi panas ini dapat menimbulkan cahaya dalam bentuk api. Reaksi pembakaran berlangsung ketika suatu zat bereaksi cepat dengan oksigen dan mendapatkan suhu yang cukup untuk memulai awal pembakaran. Dalam proses pembakaran terdapat proses pembakaran yang berlangsung secara sempurna dan tidak berlangsung secara sempurna, hal ini dipengaruhi oleh unsur yang tergantung di dalam bahan bakar yang digunakan maupun proses terjadinya pembakaran tersebut (Cahyono *et al.*, 2011).

Pembakaran dapat berlangsung secara sempurna disaat unsur yang terkandung dalam bahan bakar dapat terbakar secara keseluruhan, sedangkan apabila dalam bahan bakar terdapat unsur yang tidak dapat terbakar maka akan menghasilkan sisa pembakaran berupa gas beracun dan material yang dapat mencemari dan berbahaya bagi lingkungan. Bahan bakar yang umumnya digunakan adalah bahan bakar organik seperti hidrokarbon dalam fasa padat, cair, dan gas. Pada umumnya reaksi kimia dalam pembakaran bahan bakar hidrokarbon dan udara adalah sebagai berikut :



untuk contoh reaksi kimia pada pembakaran propana adalah:



pada umumnya dalam proses pembakaran menghasilkan zat-zat berbahaya yang tidak digunakan lagi seperti CO, CO₂, dan jelaga. Reaksi pembakaran sempurna akan menghasilkan CO₂, hal ini terjadi ketika dalam proses oksidasi bahan bakar terdapat suplai jumlah oksigen yang cukup. Sedangkan dalam proses oksidasi bahan bakar

yang kekurangan jumlah oksigen akan menghasilkan zat sisa pembakaran berupa CO dan jelaga. Dimana zat CO lebih berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan manusia dibandingkan dengan zat CO₂. Oleh karena itu pembentukan CO dan jelaga harus dihindari dalam proses pembakaran.

2.1.1 Klasifikasi Pembakaran Berdasarkan Sifat Reaksi Kimia

a. Pembakaran Sempurna

Pembakaran ini merupakan jenis pembakaran sempurna, dimana reaktan secara keseluruhan terbakar dengan oksigen dan menghasilkan energi panas, karbondioksida dan uap air saja. Pada umumnya pembakaran sempurna tidak mungkin terjadi dalam kehidupan nyata.

b. Pembakaran Tidak Sempurna

Proses pembakaran yang berlangsung secara tidak sempurna dapat disebabkan karena jumlah oksigen tidak mencukupi untuk membakar bahan bakar sehingga dihasilkan zat sisa pembakaran berupa karbon monoksida dan jelaga yang merupakan zat bahaya bagi kesehatan manusia. Oleh karena itu zat sisa berupa karbon monoksida harus dihindari, hal ini dapat ditempuh dengan melakukan optimasi pada proses pembakaran.

2.1.2 Klasifikasi Pembakaran Berdasarkan Cara Pencampuran Reaktan dan Pengoksidasi

a. Pembakaran *Premixed*

Pembakaran *premixed* memiliki ciri – ciri mengalami proses pembakaran, bahan bakar dan zat pengoksidasi bercampur secara sempurna antara satu sama lain terlebih dahulu sebelum dialirkan ke dalam ruang bakar (*combustor*) untuk mengalami proses pembakaran.

b. Pembakaran Difusi

Bahan bakar pada pembakaran jenis difusi akan tercampur dengan udara di dalam ruang bakar, seperti proses pembakaran pada mesin diesel dimana bahan bakar diinjeksikan dalam ruang bakar agar tercampur dengan udara bertekanan tinggi dan terjadi proses pembakaran.

Pembakaran secara difusi memiliki visualisasi nyala api yang didominasi warna kuning, sedangkan pembakaran secara *premixed* memiliki visualisasi nyala api berwarna biru yaitu memiliki suhu tinggi. Warna dalam hal ini menunjukkan tingkat panas dari hasil pembakaran. Kelemahan dari pembakaran *premixed* adalah terjadinya *flash back*, yaitu api akan merambat ke dalam ruang pencampuran mekanik yang menyebabkan kebakaran. Apabila terjadi kebakaran pada api tipe ini, maka api lebih susah untuk di padamkan (Siamullah *et al.* 2013).

2.2 Rasio Udara dan Bahan Bakar (AFR)

Air flow ratio atau biasa disingkat AFR merupakan besaran yang menyatakan jumlah perbandingan antara massa udara dan bahan bakar dalam suatu reaksi kimia. Menurut Mahandari dan Kartika (2010), Secara simbolis AFR dapat dihitung melalui persamaan berikut :

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

dimana \dot{m}_a adalah laju massa udara (kg/detik), \dot{m}_f merupakan laju massa bahan bakar (kg/detik), M_a adalah massa molar udara (g/mol), N_a adalah jumlah mol udara (mol), M_f adalah massa molar bahan bakar (g/mol), dan N_f adalah jumlah mol udara bahan bakar (mol).

Jika nilai AFR aktual lebih besar dari nilai AFR stoikiometrik, maka terdapat udara yang jumlahnya lebih banyak daripada yang dibutuhkan sistem dalam proses pembakaran dan dikatakan miskin bahan bakar dan jika nilai aktual lebih kecil dari

AFR stoikiometrik maka tidak cukup terdapat udara pada sistem dan dikatakan kaya bahan bakar (Taufiq, 2008).

2.3 Rasio Ekuivalen (ϕ)

Menurut Farizkaraja *et al.* (2014), rasio ekuivalen merupakan rasio dari rasio aktual bahan bakar dan udara terhadap rasio bahan bakar dan udara untuk pembakaran dengan jumlah udara teoritis. Rumus rasio ekuivalen dituliskan sebagai berikut :

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

Keterangan :

- ϕ = Rasio ekuivalen
- $(AFR)_s$ = Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi stokiometrik
- $(AFR)_a$ = Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi aktual

Berdasarkan nilai rasio, apabila nilai $\phi > 1$ maka mengindikasikan terdapat kelebihan bahan bakar dan campurannya disebut sebagai campuran kaya akan bahan bakar (*fuel-rich mixture*). Nilai $\phi < 1$ menunjukkan campuran miskin bahan bakar (*fuel-lean mixture*), sedangkan nilai $\phi = 1$ menyatakan bahwa campuran bersifat sempurna atau disebut campuran stokiometrik.

Menurut Farizkaraja *et al.* (2014), perbedaan warna api bisa dipengaruhi karena adanya perbedaan perbandingan campuran udara dan bahan bakar. Hal ini dapat diketahui dengan membandingkan *equivalent ratio* udara-bahan bakar (ϕ), dimana jika $\phi < 1$ maka akan terbentuk api campuran miskin, ketika $\phi = 1$ terbentuk api stokiometri dan saat $\phi > 1$ akan terbentuk api campuran kaya. Jika dilihat pada pengaruh campuran bahan bakar udara pada pengujian di *bunsen burner*

maka akan terlihat api campuran miskin berwarna merah dan berjelaga. Sedangkan pada api campuran kaya, terbentuk api berwarna biru atau lebih terang. Api yang berwarna lebih terang memiliki temperatur lebih tinggi.

2.4 Batas Nyala Api

Api yang terbentuk dalam proses pembakaran merupakan hasil dari pelepasan dari energi panas hasil reaksi pembakaran. Api dapat terbentuk apabila terdapat bahan bakar yang bercampur dengan oksidator mendapatkan penambahan energi eksternal untuk mengawali terjadinya reaksi pembakaran. Dalam hal ini terdapat kisaran batas komposisi antara bahan bakar dan udara agar terbentuk api.

Menurut Farizkaraja *et al.* (2014) pemunculan dari nyala api akan bergantung pada sifat dari bahan bakar dan kecepatan pancaran bahan bakar terhadap udara di sekitarnya. Pemunculan nyala api ini juga memiliki kisaran batas bawah atau biasa disebut campuran termiskin maupun kisaran batas atas atau biasa disebut campuran terkaya. Kisaran batas bawah terjadi jika pada kondisi campuran awal minimal akan terbentuk nyala api kecil.

Kisaran batas bawah stabilitas nyala api lebih dikenal dengan *lower flammability limits*, sedangkan untuk batas atas stabilitas nyala api dikenal dengan istilah *upper flammability limits*. Melalui kedua parameter ini kita dapat mengetahui sifat dari suatu reaksi pembakaran, apakah reaksi pembakaran memiliki stabilitas nyala api yang tinggi atau sebaliknya. Selain itu dengan mengetahui nilai dari stabilitas nyala api dapat digunakan untuk mengatur komposisi campuran bahan bakar dan udara sehingga reaksi pembakaran dapat terjaga kelangsungannya.

2.5 Sifat Nyala Api

Api dalam reaksi pembakaran memiliki stabilitas nyala yang banyak dipengaruhi oleh komposisi campuran bahan bakar dan udara. Menurut Mahandari dan Kartika (2010), dalam reaksi pembakaran dapat terbentuk nyala api dengan sifat

nyala yang berbeda, klasifikasi nyala api berdasarkan sifat nyala adalah sebagai berikut:

a. *Flashback*

Flashback merupakan kondisi dimana kecepatan pembakaran lebih besar dibandingkan kecepatan campuran antara udara-bahan bakar sehingga nyala api merambat kembali ke dalam tabung pembakar. Istilah lain dari fenomena ini biasa dikenal dengan *back fire* atau *light back*.

b. *Lift-off*

Lift-off adalah keadaan nyala api yang mencapai kestabilan pada jarak tertentu dari tabung pembakar, nyala api tidak menyentuh permukaan mulut tabung pembakar. Kondisi nyala api terangkat (*lift-off*) dipengaruhi kecepatan nyala api dan sifat aliran campuran bahan bakar dan udara di dekat ujung (mulut) tabung pembakar. Meningkatnya kecepatan aliran hingga tercapai kecepatan kritis, ujung nyala akan meloncat ke posisi jauh dari ujung (mulut) pembakar dan nyala api terdorong ke atas. Kondisi nyala terangkat inilah yang dinamakan sebagai *lift-off*, dan jika kecepatan aliran terus dinaikkan, maka nyala api akan padam.

c. *Blow-off*

Kondisi nyala api *blow-off* merupakan suatu keadaan di mana nyala api padam akibat kecepatan aliran lebih besar dari kecepatan pembakaran, oleh karena itu kondisi ini sangat dihindari agar keberlangsungan nyala api tetap terjaga.

2.6 *Liquefied Petroleum Gas*

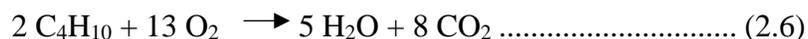
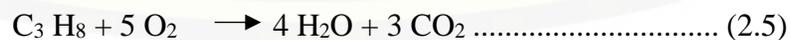
Bahan bakar yang digunakan oleh masyarakat pada umumnya adalah bahan bakar senyawa organik yaitu senyawa dengan kandungan unsur-unsur karbon (C), hidrogen (H) dan oksigen (O). Reaksi pembakaran yang terjadi antara campuran bahan bakar dan udara merupakan reaksi pemutusan rantai ikatan pada senyawa

organik. Energi panas akan muncul disaat terjadi pemutusan ikatan pada rantai senyawa organik. Pada proses pembakaran, oksigen yang berperan sebagai oksidator mengikat unsur - unsur C dan H yang putus akibat energi panas dari proses pembakaran. Api akan padam jika salah satu dari ketiga elemen dasar tidak lagi tersedia. Segitiga api mengilustrasikan hubungan antara tiga elemen dasar yang diperlukan untuk membangkitkan api. Tiga elemen untuk membangkitkan api tersebut adalah senyawa oksigen, bahan bakar yang dapat terbakar dan mengandung energi, serta sumber api atau sumber panas.

Menurut Gunanto dan Pramono (2009), LPG adalah kependekan dari *Liquefied Petroleum Gas*, merupakan gas hasil produksi dari kilang minyak atau kilang gas, yang komponen utamanya adalah gas propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}) yang dicairkan. Pertamina memasarkan LPG sejak tahun 1969 dengan merk dagang elpiji. Berdasarkan komposisi propan dan butan, LPG dapat dibedakan menjadi tiga macam:

- LPG *propane*, sebagian besar terdiri dari C_3
- LPG *butane*, sebagian besar terdiri dari C_4
- LPG *Mix*, merupakan campuran dari *propane* dan *butane*

LPG *butane* dan LPG *mix* biasanya dipergunakan oleh masyarakat untuk bahan bakar memasak, sedangkan LPG *propane* biasanya dipergunakan di industri sebagai pendingin, bahan bakar pemotong, untuk menyemprot cat dan lainnya. Proses pembakaran menggunakan bahan bakar LPG merupakan reaksi oksidasi antara hidrokarbon (propana dan butana) dengan oksigen. Reaksi yang terjadi pada proses pembakaran sempurna LPG adalah :



LPG memiliki beberapa sifat utama seperti rentan terbakar, baik dalam fasa gas maupun dalam fasa cair, gas ini tidak beracun dan bewarna. LPG tidak memiliki bau, namun pada umumnya diberikan zat kimia tambahan yang berfungsi untuk memberi bau yang menyengat pada gas LPG agar apabila gas ini mengalami kebocoran akan mudah diketahui dengan cepat. Reaksi pembakaran teoritis LPG adalah sebagai berikut :



reaksi pembakaran yang ditunjukkan pada Persamaan 2.7 disebut sebagai proses pembakaran stoikiometris. Semua atom oksigen bereaksi sempurna dengan bahan bakar. Reaksi tersebut secara teoritis dapat terjadi, namun dalam kenyataannya reaksi yang terjadi tidak hanya menghasilkan CO_2 dan H_2O saja. Hasil-hasil reaksi lainnya antara lain HC , CO , NH_3 , NO , NO_2 , SO_2 , SO_3 , H_2SO_4 , OH dan O_3 . Hasil reaksi tersebut karena adanya suhu tinggi pada pembakaran. Reaksi-reaksi yang menghasilkan gas tersebut menjadikan proses menjadi tidak sempurna sekaligus mengurangi jumlah panas yang diperoleh pada proses pembakaran (Arijanto *et al.*, 2015).

Berdasarkan persamaan 2.7 di atas, menurut Sari (2015), nilai AFR untuk bahan bakar LPG dapat dicari dengan langkah perhitungan sebagai berikut :

1. Massa atom relatif (Ar)

$$\text{C} = 12 \text{ gram/mol}; \text{H} = 1 \text{ gram/mol}; \text{O} = 16 \text{ gram/mol}; \& \text{N} = 14 \text{ gram/mol}$$

2. Perbandingan antara udara dan bahan bakar berdasarkan jumlah mol dari persamaan 2.7 untuk proses pembakaran stoikiometri

$$\text{AFR}_{\text{stoikiometri}} = \frac{N \text{ udara}}{N \text{ bahan bakar}} \dots \dots \dots (2.8)$$

$$\text{AFR}_{\text{stoikiometri}} = \frac{5,75 \times (1 + 3,76)}{(0,5 + 0,5)} = 27,37 \frac{N \text{ udara}}{N \text{ bahan bakar}}$$

3. Perhitungan $AFR_{stoikiometri}$ LPG berdasarkan massa

$$AFR_{stoikiometri} = \frac{5,75(2 \times 16 + 3,76 \times 14 \times 2)}{(0,5(12 \times 3 + 8)) + 0,5(12 \times 4 + 10)}$$

$$AFR_{stoikiometri} = \frac{789,36}{51} = 15,47$$

4. Dengan diketahui massa dari LPG dan massa udara, maka kita dapat menghitung AFR stoikiometri LPG bila dinyatakan dalam perbandingan volume berdasarkan densitasnya.

Diketahui:

- Massa jenis udara pada 27 °C adalah 0,0012 gr/cm³.
- Massa jenis propana 0,00183 gr/cm³.
- Massa jenis butana 0,00248 gr/cm³.
- Massa jenis LPG (50% propana dan 50% butana) adalah 0,002155 gr/cm³.

5. Berdasarkan data yang diketahui di atas maka dengan persamaan $\rho = \frac{m}{V}$, kita dapat mencari nilai volume.

$$V_{udara} = \frac{m}{\rho} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$V_{udara} = \frac{789,36}{0,0012} = 657,800 \text{ cm}^3$$

$$V_{bahan bakar} = \frac{m}{\rho} \dots\dots\dots (2.10)$$

$$V_{bahan bakar} = \frac{51}{0,002155} = 23.665,89 \text{ cm}^3$$

6. Sehingga didapat perbandingan volume antara udara dan bahan bakar dituliskan sebagai berikut :

V_{udara}	:	$V_{bahan bakar}$
$657,800 \text{ cm}^3$:	$23.665,89 \text{ cm}^3$
$27,57 \text{ ml}$:	1 ml

Nilai $AFR_{stoikiometri}$ dapat dihitung berdasarkan perbandingan massa, mol, maupun volume seperti yang ditunjukkan pada perhitungan di atas. Dalam penelitian ini $AFR_{stoikiometri}$ yang digunakan sebagai acuan adalah $AFR_{stoikiometri}$ berdasarkan perbandingan massa udara dan bahan bakar.

Pada umumnya kandungan energi LPG adalah sebesar 46,23 MJ/kg dan 26 MJ/l, sedangkan kandungan energi bensin sebesar 44,4 MJ/kg dan 34,8 MJ/l. Dibandingkan dengan bensin, LPG memiliki kandungan energi per satuan massa relatif tinggi, tetapi kandungan energi per satuan volumenya rendah. Volume LPG lebih besar dari bensin sekitar 15 % sampai dengan 20% (Condro dan Setiyo, 2012).

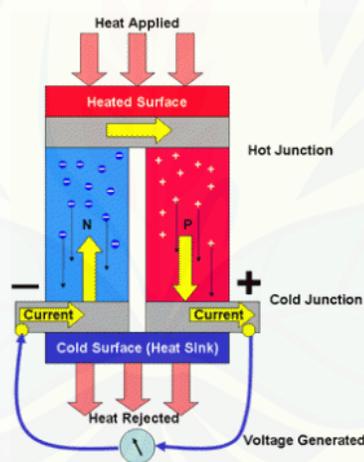
2.7 Micro Power Generator

Pembangkit listrik skala kecil atau *Micro power generator* banyak digunakan untuk memenuhi kebutuhan sumber energi skala kecil sebagai pengganti baterai. Penerapan pembangkit listrik skala kecil banyak dijumpai pada peralatan elektronik yang bersifat *portable* atau peralatan yang mudah dibawa dan dipindahkan keberadaannya, seperti pada peralatan *power bank*, *LCD*, dan *Wireless*.

Menurut Yang *et al.* (2002), pembangkitan daya dalam skala kecil dapat ditempuh menggunakan mesin pembakaran internal dalam skala kecil atau yang dikenal dengan istilah *scaled-down versions*. Penggunaan mesin pembakaran internal tersebut masih menggunakan mekanisme mesin yang berbasis gerakan, yaitu memanfaatkan energi kinetik diubah menjadi energi listrik. Untuk mengeliminasi komponen yang bergerak pada pembangkit daya dalam skala kecil dapat digunakan metode konversi energi secara langsung, dengan menggunakan peralatan yang meliputi :

a. *Micro-thermoelectric*

Menurut Djafar *et al.* (2010), modul termoelektrik generator bekerja berdasarkan prinsip kerja dari efek Seebeck. Efek Seebeck pertama kali ditemukan pada tahun 1821 oleh Thomas Johann Seebeck, yaitu efek yang terjadi bila terdapat dua material yang berbeda dihubungkan dalam suatu rangkaian tertutup dan pada kedua sambungannya (*junction*) dipertahankan pada temperatur yang berbeda, sehingga arus listrik akan mengalir dalam rangkaian tersebut. Selanjutnya, ketika salah satu kawatnya diputuskan lalu disambung dengan sebuah galvanometer, maka akan terlihat perbedaan tegangan dari kedua ujung tersebut. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa perbedaan temperatur dapat mengakibatkan terjadinya perbedaan tegangan yang menghasilkan gaya gerak listrik.



Gambar 2.1 Skema efek *Seebeck*

(Sumber: Suprpto *et al.*, 2013)

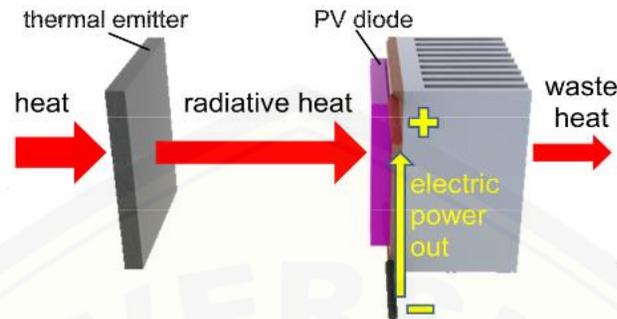
Menurut Anwar *et al.* (2013), panas yang diterima oleh logam pada sisi atas seperti yang terlihat pada Gambar 2.1 akan menyebabkan elektron pada logam tersebut bergerak aktif dan mengalir dengan kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan sisi logam dingin. Melalui kecepatan ini terjadilah difusi elektron dari sisi logam panas ke sisi logam dingin dan menyebabkan timbulnya

medan listrik antara kedua logam tersebut. Elemen termoelektrik yang terdiri dari bahan semikonduktor tipe-p dan tipe-n yang dihubungkan dalam sebuah rangkaian tertutup yang terdapat pada beban. Maka perbedaan suhu yang ada pada tiap *junction* dan setiap semikonduktor tersebut akan menyebabkan perpindahan elektron dari sisi panas logam menuju sisi dingin logam.

Teknologi termoelektrik dapat digunakan untuk menghasilkan daya listrik dalam nilai yang cukup kecil, seperti dalam kisaran mikro Watt sampai mili Watt. Generator termoelektrik dalam skala mikro memiliki beberapa keunggulan seperti masa pemakaian alat yang relatif panjang tanpa dibutuhkan prosedur perbaikan alat untuk 10 tahun, mudah mengumpulkan energi inputan dari berbagai macam sumber panas, dan dapat menghasilkan listrik dengan perbedaan temperatur antara kedua sisi logam termoelektrik hampir mencapai nilai nol.

b. *Micro-thermophotovoltaic (TPV)*

Sistem pembangkitan daya pada *thermophotovoltaic* adalah dengan menggunakan inputan energi panas untuk memanaskan emitor termal sehingga memancarkan radiasi untuk kemudian di terima oleh diode aktif pada sel fotovoltaiik dan diubah menjadi energi listrik. Temperatur emitor termal dapat mencapai 900°C sampai 1300°C. Pada sistem pembangkit listrik ini, *thermophotovoltaic emitor* termal, memancarkan radiasi foton dengan sifat optik dari emisi termal seperti panjang gelombang, polarisasi, dan arah radiasi. Bahan yang digunakan sebagai sel fotovoltaiik adalah *gallium antimonide (GaSb)*.



Gambar 2.2 Ilustrasi proses konversi energi pada *thermophotovoltaic*

(Sumber: Celanovic *et al.*, 2011)

Gambar 2.2 menunjukkan proses konversi energi panas dari sumber panas yang diterima oleh *thermal emitter*, sehingga terpancar radiasi foton dan diterima oleh dioda pada sel fotovoltaik yang selanjutnya dirubah menjadi energi listrik. Hasil dari proses konversi energi tersebut adalah berupa energi listrik dan energi panas sisa.

2.8 *Micro/Meso-Scale Combustor*

Menurut Wang *et al.* (2007), pembakaran skala meso dan mikro memiliki potensi sebagai solusi untuk sistem yang membutuhkan energi dalam volume yang kecil seperti daya untuk peralatan elektronik yang bersifat *portable*. Dengan densitas energi dari bahan bakar hidrokarbon mencapai (50 MJ/kg), pembakaran dengan berdasarkan *micro power devices* lebih unggul dibandingkan dengan baterai lithium kontemporer yang hanya memiliki densitas energi sebesar (0,6 MJ/kg).

Meso-combustor merupakan bagian penting dalam *Micro Power Generator (MPG)* yaitu sebagai ruang bakar penyuplai energi panas. Proses pembakaran skala *meso* berlangsung dalam ruang bakar dengan diameter 1 – 10 mm (Ju dan Maruta, 2011). Adapun klasifikasi jenis pembakaran skala kecil adalah seperti yang ditunjukkan pada tabel 1.1 di bawah ini.

Tabel 1.1 : Klasifikasi jenis pembakaran

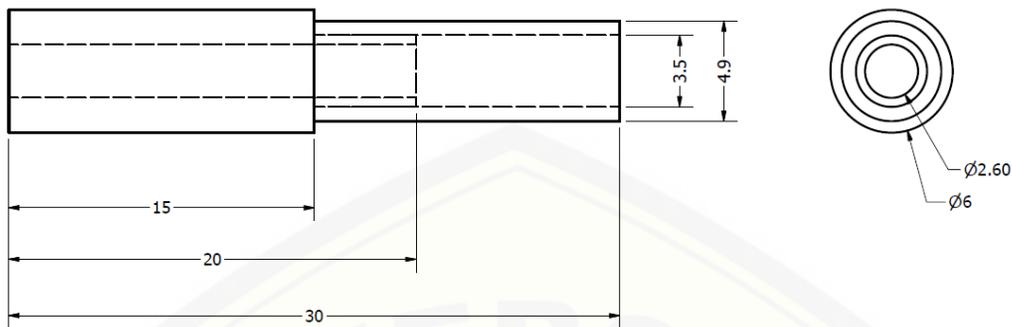
Definition based on	Combustion regime	Length scale
Physical length	Mesoscale	1–10 mm
Flame quenching diameter	Microscale	1–1000 μm
	Mesoscale	~ Quenching diameter (equilibrium)
Device scale	Microscale	Quenching diameter ~ Mean-free path (non-equilibrium)
	Microscale	Smaller than conventional engine size

Length scale menyatakan ukuran diameter dalam suatu *combustor*

Sumber : (Ju dan Maruta, 2011)

Menurut Ju dan Maruta (2011), secara garis besar *micro-combustion* diklasifikasikan menjadi dua golongan yaitu *micro-scale combustion* dan *meso-scale combustion*. Pengklasifikasian jenis pembakaran tersebut adalah berdasarkan ukuran diameter dalam suatu ruang bakar (*combustor*), diameter *quenching* api, dan ukuran peralatan.

Dalam karya tulis ilmiah ini jenis *combustor* yang digunakan adalah jenis *meso-scale combustor*. *Combustor* ini terdiri dari dua komponen yaitu komponen masukan (*input*) dan keluaran (*output*). *Input combustor* terbuat dari material tembaga, sedangkan *output combustor* terbuat dari material *quartz glass*. Kedua komponen tersebut disambung menggunakan lem keramik, penggunaan lem keramik ditujukan agar sambungan tahan akan temperatur tinggi. Dimensi *combustor* ditunjukkan pada Gambar 2.3 di bawah ini.



Gambar 2.3 Dimensi *Meso-scale Combustor*

2.9 Aliran Fluida

Fluida adalah zat yang dapat mengalir, yang terdiri dari zat cair dan gas. Ada fluida yang tak mengalir dan ada fluida yang mengalir. Ilmu yang mempelajari fluida yang tak mengalir disebut statika fluida dan ilmu yang mempelajari fluida yang mengalir disebut dinamika fluida (Helmizar, 2011).

Menurut Olson dan Steven (1993), gas tidak mempunyai bentuk maupun volume yang tetap, gas akan berkembang mengisi seluruh wadah. Karena fase cair dan gas tidak mempertahankan suatu bentuk yang tetap, keduanya mempunyai kemampuan untuk mengalir. Dengan demikian kedua – duanya sering secara kolektif disebut sebagai fluida.

Secara garis besar jenis aliran dapat dibedakan atau dikelompokkan menjadi aliran tunak dan aliran tidak tunak. Adapun aliran tunak (*steady*) merupakan suatu aliran dimana kecepatannya tidak terpengaruh oleh perubahan waktu sehingga kecepatan konstan pada setiap titik (tidak mempunyai percepatan). Sedangkan aliran tidak tunak (*unsteady*) Suatu aliran dimana terjadi perubahan kecepatan terhadap waktu (Olson dan Steven, 1993).

Aliran fluida sendiri dapat diklasifikasikan dalam dua kelompok berdasarkan besar bilangan Reynold, kelompok tersebut adalah:

a. Aliran laminar

Aliran laminar adalah aliran fluida yang bergerak dengan kondisi lapisan-lapisan (lamina-lamina) membentuk garis-garis alir yang tidak berpotongan satu sama lain. Hal tersebut ditunjukkan oleh percobaan Osborne Reynold, dimana pada laju aliran rendah, aliran laminar tergambar sebagai filamen panjang yang mengalir sepanjang aliran. Aliran ini mempunyai bilangan Reynold lebih kecil dari 2300.

b. Aliran turbulen

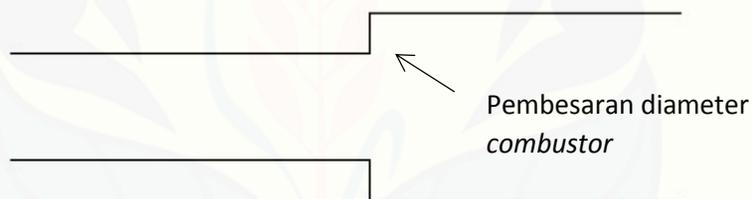
Aliran turbulen adalah aliran fluida yang partikel-partikelnya bergerak secara acak dan tidak stabil. Akibat dari hal tersebut garis alir antar partikel fluidanya saling berpotongan. Aliran ini oleh Osborne Reynold digambarkan sebagai bentuk yang tidak stabil yang bercampur dalam waktu yang cepat yang selanjutnya memecah dan menjadi tak terlihat. Aliran turbulen mempunyai bilangan Reynold lebih dari 4000 (Reza *et al.*, 2007).

2.10 Penelitian Sebelumnya

Penelitian tentang *meso-scale combustion* banyak dilakukan menggunakan bahan bakar gas seperti hidrogen, metana, propana atau butana. Penggunaan bahan bakar gas ditujukan untuk mempermudah bercampurnya bahan bakar dan udara. Akan tetapi kelebihan tersebut memberikan kekurangan di sisi lain. Diantaranya dari segi penyimpanan (*storage*). Penyimpanan bahan bakar gas harus menggunakan tangki bertekanan tinggi.

Penggunaan bahan bakar cair dalam *micro* atau *meso-scale combustion* memerlukan banyak perlakuan khusus pada bahan bakar sebelum terjadi reaksi pembakaran. Seperti pada percobaan yang dilakukan pada tahun 2012 oleh Mikami dan timnya, mereka melakukan penelitian tentang penggunaan bahan bakar cair pada *meso-scale combustor*. Penelitian tersebut dilakukan pada *meso-scale combustor* berbentuk *tube* dengan bantuan *electrospray* sebagai media pengkabutan bahan bakar

cair, serta *wire-mesh* sebagai media penyokong sirkulasi panas dari *flame* ke *unburned gas* sehingga tidak diperlukan pemanasan dari luar untuk menjaga kestabilan api. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa karakteristik pembakaran menggunakan bahan bakar cair, pada kondisi tertentu dapat disejajarkan dengan pembakaran menggunakan bahan bakar gas. Perlakuan khusus pada bahan bakar cair sebelum terjadi proses membuat sistem pembakaran menjadi kompleks, selain itu penggunaan bahan bakar gas lebih mudah untuk bercampur dengan udara secara sempurna. Sehingga dalam pengembangan selanjutnya menggunakan bahan bakar gas sebagai sumber energi pada *meso-scale combustor* yaitu berupa gas LPG. Penelitian sebelumnya dalam optimasi desain *micro-combustor* yang dilakukan oleh Yang *et al.* (2002) adalah dengan membandingkan *combustor* dengan dan tanpa *backward facing step*.



Gambar 2.4 *Combustor* dengan saluran *sudden expansion*

Backward facing step disebut juga sebagai saluran *sudden expansion*, yaitu saluran berundak dengan diameter yang semakin membesar seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.4. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa saluran ekspansi memberikan solusi sederhana namun efektif untuk meningkatkan pencampuran bahan bakar dan udara. Saluran tersebut berguna untuk mengontrol posisi nyala api pada ruang bakar.

Siregar *et al.* (2016) melakukan penelitian terkait pengaruh variasi diameter *input combustor* terhadap batas nyala api, visualisasi nyala api, dan temperatur nyala api pada *meso-scale combustor*. *Combustor* tersebut terdiri dari sisi *input* yang

terbuat dari tembaga dan *quartz glass tube* pada sisi *output* dengan saluran *sudden expansion* dengan panjang 10 mm. Penelitian ini menggunakan bahan bakar berupa gas butana dan oksidator dari udara bebas. Karakteristik yang diamati meliputi *flammability limit*, visualisasi bentuk nyala api, temperatur nyala api dan temperatur gas hasil pembakaran. Variasi perbandingan diameter yang digunakan adalah $D_1/D_2 = 2,4 \text{ mm}/4,7 \text{ mm}$ (0,5), $D_1/D_2 = 3,2 \text{ mm}/4,7 \text{ mm}$ (0,7) dan $D_1/D_2 = 4,7 \text{ mm}/4,7 \text{ mm}$ (1 atau tanpa saluran *sudden expansion*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa *meso-scale combustor* dengan perbandingan diameter 0,7 lebih menyala stabil daripada perbandingan diameter 0,5. Temperatur nyala api akan semakin meningkat jika kecepatan reaktan semakin besar dalam keadaan rasio ekuivalen konstan. Namun temperatur nyala api akan menurun jika rasio ekuivalen meningkat dalam keadaan kecepatan reaktan konstan.

2.11 Hipotesis

Penambahan variasi panjang saluran *sudden expansion* pada *meso-scale combustor* dapat meningkatkan batas nyala api dikarenakan aliran campuran bahan bakar dan udara memiliki pola aliran yang teratur dan tidak merusak atau memadamkan nyala api.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian karakteristik pembakaran pada *meso-scale combustor* adalah menggunakan metode eksperimental, yaitu metode yang ditempuh dengan jalan membandingkan penambahan variasi panjang saluran *sudden expansion* terhadap karakteristik pembakaran pada *meso-scale combustor*.

3.1 Tempat dan Waktu Pengambilan Data

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Mesin – mesin Fluida Fakultas Teknik Universitas Brawijaya pada bulan April 2016 sampai dengan bulan Mei 2016.

3.2 Bahan dan Alat Penelitian

3.2.1 Bahan

a. Gas LPG

Gas LPG digunakan sebagai bahan bakar dalam proses pembakaran di *meso-scale combustor*. LPG tersebut terdiri dari 50% gas propana dan 50% gas butana. Tabung LPG ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Tabung LPG
(Sumber : Amiryess, 2013)

b. Lem Keramik

Lem keramik berfungsi untuk menyambungkan *quartz glass tube* dengan tembaga yang terdapat dalam *meso-scale combustor*. Selain itu lem keramik berfungsi sebagai isolator pada area sambungan agar tidak terjadi *heat loss* dari dinding *combustor* ke lingkungan. Lem keramik ditunjukkan pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Lem Keramik
(Sumber : Corradi, 2010)

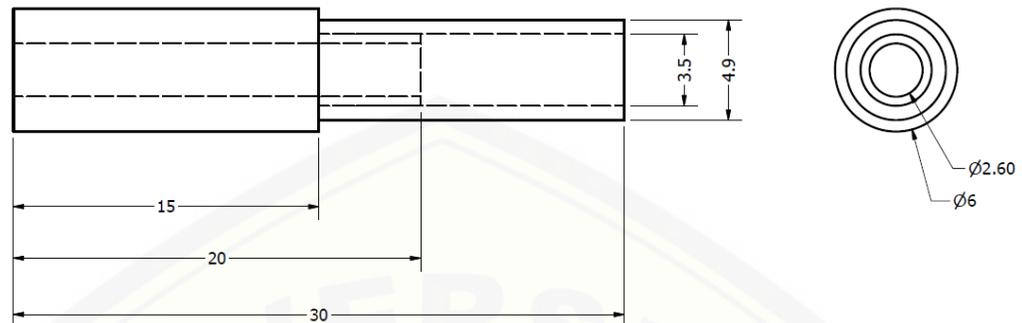
3.2.2 Alat

a. *Meso-scale Combustor*

Proses pembakaran dan terbentuk nyala api terjadi di dalam *combustor*. Ilustrasi *combustor* ditunjukkan pada Gambar 3.3. *Combustor* yang digunakan ini terdiri dari dua bagian yaitu bagian tembaga sebagai sisi *input* campuran udara dan bahan bakar, bagian lainnya adalah berupa *quartz glass tube* sebagai saluran *sudden expansion*. Dimensi dari masing-masing bagian *combustor* ditunjukkan pada Gambar 3.4



Gambar 3.3 *Meso-scale Combustor*



Gambar 3.4 Dimensi *Meso-scale Combustor*

b. Combustor Holder

Combustor holder berfungsi sebagai tempat dudukan *meso-scale combustor* dan juga untuk memudahkan penyambungan antara komponen *mixer* bahan bakar dengan udara terhadap *combustor*.

c. Mixer

Mixer digunakan untuk mencampur bahan bakar dan udara sebelum terjadi reaksi pembakaran agar terjadi campuran yang homogen sehingga menunjang proses pembakaran. Seperti yang terlihat pada Gambar 3.5 komponen *mixer* memiliki dua inputan, dimana satu untuk saluran bahan bakar dan satu lainnya sebagai saluran udara.



Gambar 3.5 *Mixer*

d. Kompresor

Udara yang disuplai untuk reaksi pembakaran pada *combustor* berasal dari kompresor, penggunaan kompresor ditujukan untuk memudahkan memberikan tekanan pada udara dan variasi aliran udara. Kompresor secara fisik sama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6



Gambar 3.6 Kompresor elektrik

(Sumber : Muhyiddin, 2016)

Spesifikasi :

- Merek : Wipro
- Nomor seri : 121105802
- Daya : 1 HP
- Tegangan : 220 V
- Berat Bersih : 22 kg
- Tekanan keluaran : 0,8 Mpa
- Kapasitas tangki : 24 liter

e. *Flowmeter*

Flowmeter merupakan alat yang berfungsi untuk mengukur dan mengatur debit udara dari kompresor dan debit bahan bakar yang akan disalurkan menuju combustor. *Flowmeter* ditunjukkan pada Gambar 3.7, dimana *flowmeter* sebelah kiri dengan ukuran lebih kecil adalah *flowmeter* untuk mengukur debit bahan bakar. Sedangkan *flowmeter* sebelah kanan digunakan untuk mengukur dan mengatur debit udara dari kompresor.



Gambar 3.7 *Flowmeter*

Spesifikasi *Flowmeter* :

1) *Flowmeter* udara

- Merek : Kofloc
- Seri : RK-1250
- Jenis : *Flowmeter* udara
- Tekanan kerja : 0,1 Mpa
- Aliran maks. : 500 ml/min

- Aliran min. : 50 ml/min
- Skala terkecil : 5 ml/min

2) *Flowmeter* bahan bakar

- Merek : Kofloc
- Seri : RK-1250
- Jenis : *Flowmeter* Propana dan Butana
- Tekanan kerja : 0,1 Mpa
- Aliran maks. : 20 ml/min
- Aliran min. : 2 ml/min
- Skala terkecil : 0,5 ml/min

f. Jangka Sorong

Jangka sorong digunakan untuk mengukur jarak nyala api yang terbentuk terhadap mulut *combustor* tembaga. Pengukuran ditujukan untuk membandingkan posisi nyala api saat merubah besar debit bahan bakar dan debit udara. Jangka sorong yang digunakan seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 Jangka Sorong

g. *Pisco Tube*

Pisco tube merupakan selang kecil sebagai saluran tempat bahan bakar dan udara mengalir. Udara dari kompresor dan gas LPG dari tabung gas disalurkan ke *flowmeter* dan *mixer* menggunakan saluran selang ini. *Pisco tube* ditunjukkan pada Gambar 3.9



Gambar 3.9 *Pisco Tube*

h. *Regulator LPG*

Regulator difungsikan untuk mengalirkan bahan bakar gas dari tabung gas menuju *flowmeter*. Regulator LPG dapat dilihat pada Gambar 3.10



Gambar 3.10 *Regulator LPG*

i. Kamera

Pengambilan gambar visualisasi nyala api pada reaksi pembakaran di dalam *combustor* dilakukan dengan menggunakan kamera DSLR (*Digital Single Lens Reflex*), agar gambar yang terekam memiliki kualitas yang baik untuk memudahkan proses analisa nyala api. Kamera DSLR ditunjukkan pada Gambar 3.11



Gambar 3.11 Kamera DSLR
(Sumber : Pango, 2014)

f. *Thermocouple*

Thermocouple digunakan untuk mengetahui temperatur hasil pembakaran pada *meso-scale combustion*. Pengukuran temperatur dilakukan dengan jalan memasukkan sensor kawat *thermocouple* ke dalam ruang bakar/*meso-scale combustor* sampai menyentuh nyala api

3.3 Variabel Penelitian

3.3.1 Variabel Bebas

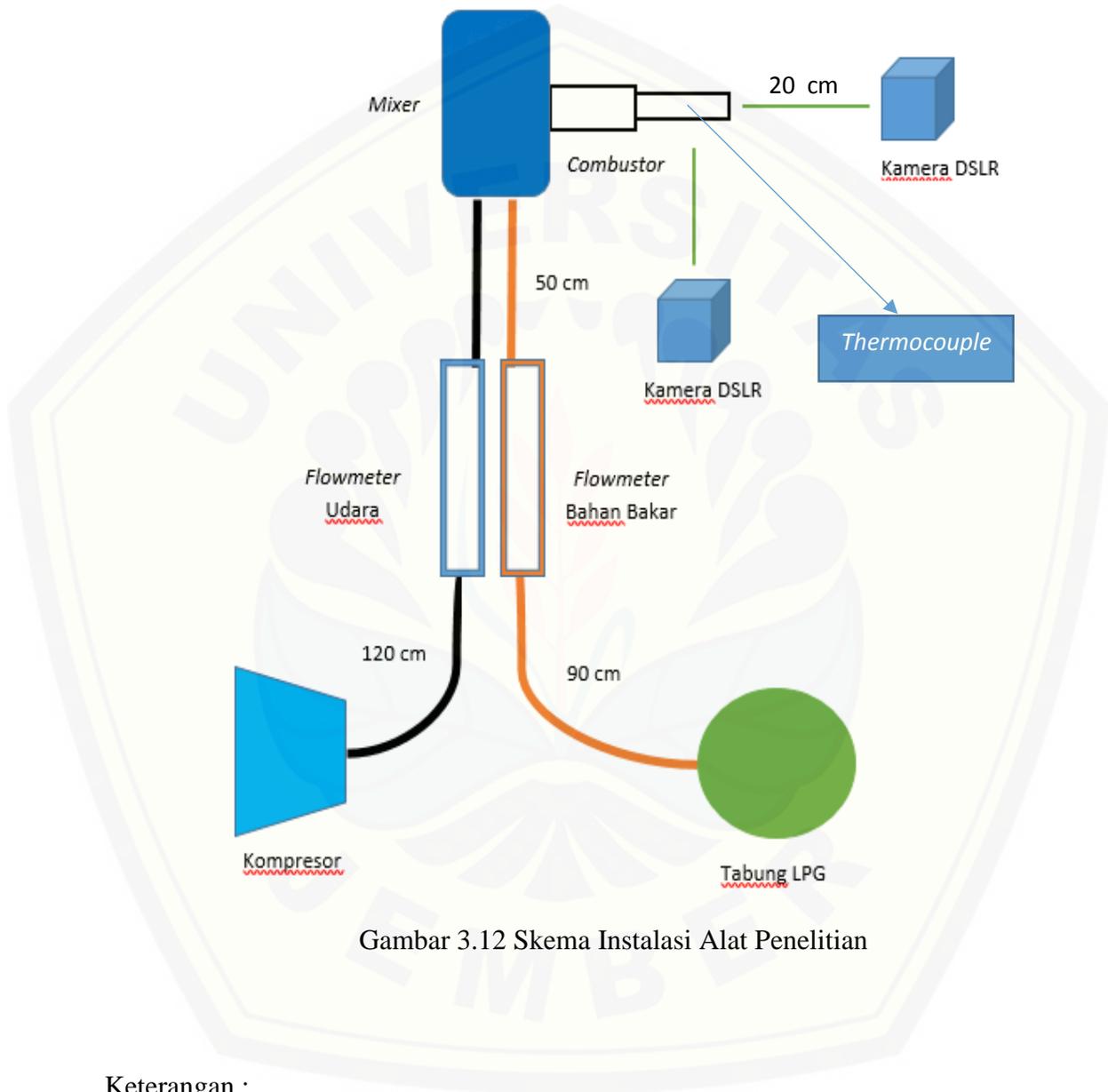
Variabel bebas merupakan variabel yang mempengaruhi faktor-faktor yang diukur oleh peneliti untuk menentukan hubungan antara fenomena yang diamati, adapun variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

- a. *Meso-scale combustor* terdiri dari dua komponen, salah satu merupakan bagian *input combustor* yang terbuat dari tembaga sedangkan bagian lainnya merupakan komponen saluran *sudden expansion* merupakan *quartz glass tube* yang berfungsi sebagai ruang bakar.
- b. Diameter *input combustor* adalah 2,6 mm
- c. Panjang saluran *sudden expansion* dibuat bervariasi sebesar 10 mm, 15 mm, dan 20 mm
- d. Debit bahan bakar (Q_f) dan debit udara (Q_a)

3.3.2 Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang nilainya dipengaruhi oleh variabel bebas. Penelitian ini mempunyai variabel terikat yang meliputi batas nyala api (*flammability limit*) dan visualisasi bentuk nyala api pada reaksi pembakaran di dalam *meso-scale combustor*.

3.4 Skema Instalasi Penelitian



Gambar 3.12 Skema Instalasi Alat Penelitian

Keterangan :

- — Saluran Udara
- — Saluran Bahan Bakar
- — Jarak Pengambilan Foto

Gambar 3.12 menunjukkan skema rangkaian pemasangan alat pada penelitian karakteristik pembakaran pada *meso-scale combustor*. Bahan bakar disuplai dari tabung gas LPG yang terdiri dari 50% gas butana dan 50% gas propana, sedangkan udara bebas didapatkan dari kompresor. Bahan bakar dan udara disalurkan menuju *flowmeter* dengan jenis yang berbeda, yaitu *flowmeter* bahan bakar dan *flowmeter* udara. *Flowmeter* difungsikan sebagai media pengatur debit dari aliran bahan bakar dan udara. Dimana nilai debit tersebut dapat diubah – ubah dengan kisaran tertentu sesuai dengan spesifikasi *flowmeter*. Dari *flowmeter* bahan bakar dan udara yang sudah diatur nilai debitnya, disalurkan menuju *mixer* agar terjadi pencampuran homogen antara bahan bakar dan udara. Selanjutnya campuran bahan bakar dan udara dialirkan menuju *meso-scale combustor* sebagai bahan dasar dalam reaksi pembakaran di dalam *combustor*.

Nyala api yang terbentuk dari reaksi pembakaran di dalam *combustor* di rekam dengan kamera DSLR (*Direct Single Len Reflex*) yang diletakkan 20 cm dari sisi depan *combustor* dan sisi samping diletakkan 15 cm dari *combustor*. Peletakan kamera pada sisi depan *combustor* ditujukan untuk merekam perbedaan warna nyala api disaat nyala api dalam keadaan pembakaran kaya dan pembakaran miskin. Sedangkan peletakan kamera pada sisi samping *combustor* ditujukan untuk merekam perbedaan posisi nyala api dan warna api pada *combustor* disaat nyala api dalam keadaan pembakaran miskin dan pembakaran kaya.

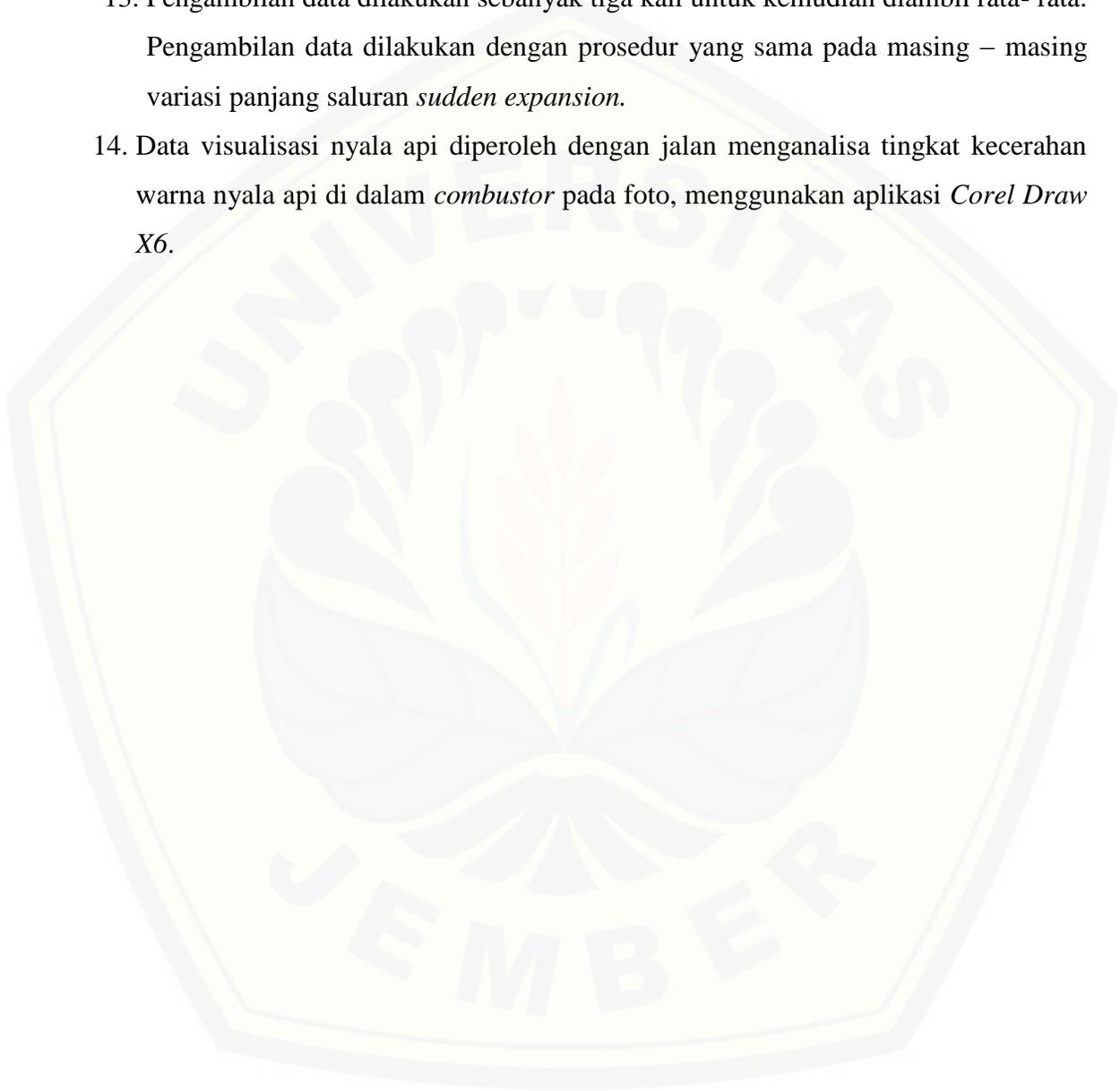
3.5 Prosedur Penelitian

Pengambilan data dalam penelitian nyala api pada *meso-scale combustor* harus melakukan beberapa tahapan secara berurutan, adapun tahapan – tahapan tersebut adalah sebagai berikut:

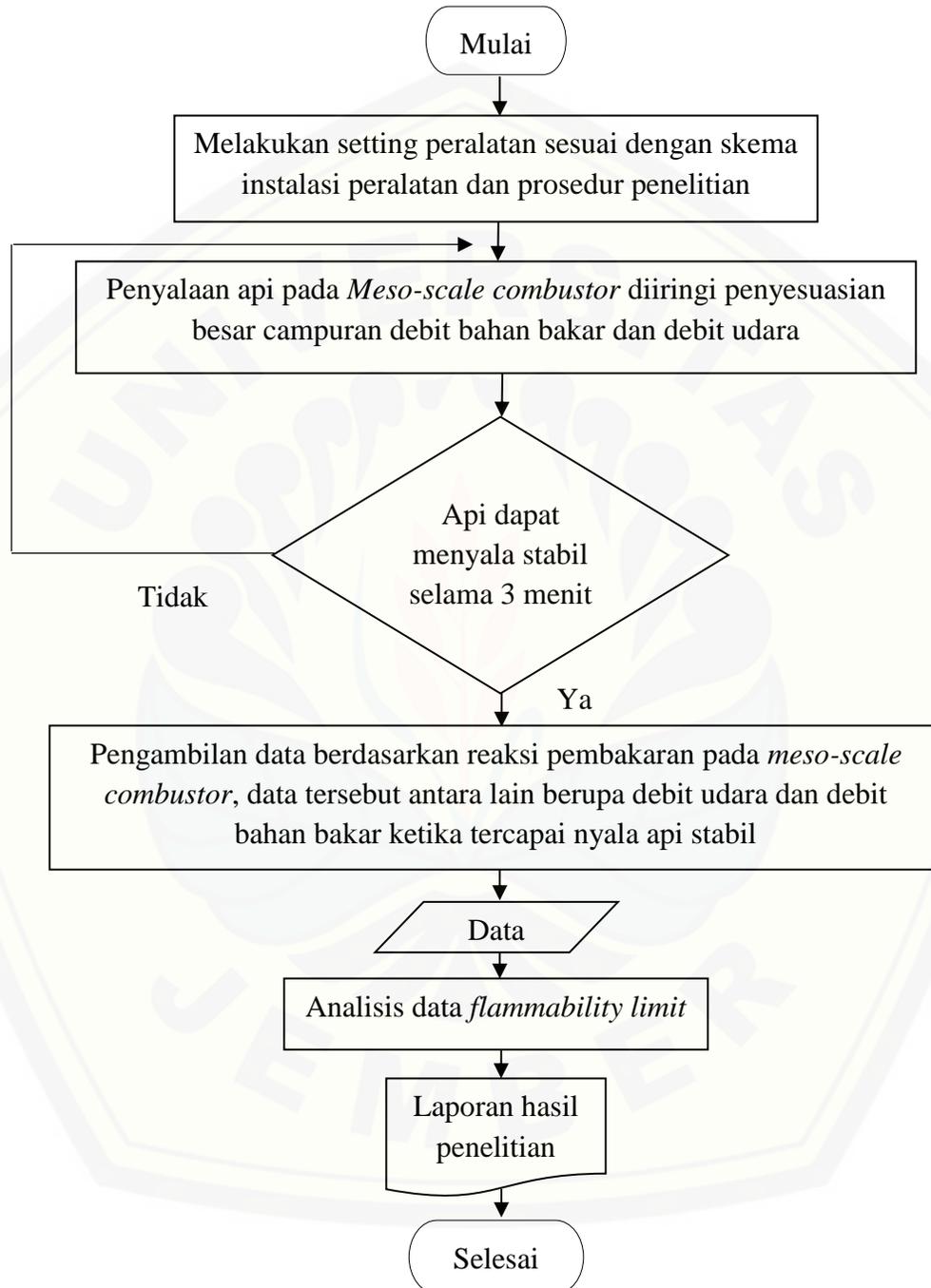
1. Mempersiapkan *meso-scale combustor*, memasangkannya pada *combustor holder*

2. Memasang alat – alat penelitian sesuai dengan skema pada Gambar 3.12, selang saluran bahan bakar, saluran udara, dan saluran campuran bahan bakar dan udara harus terpasang dengan baik tanpa terjadi kebocoran.
3. Melakukan *setting* pada *flowmeter* udara dengan jalan membuka bukaan *flowmeter* secara penuh, lalu membuka tuas *output* kompresor sampai bola penunjuk debit udara pada *flowmeter* berada di skala paling atas.
4. Melakukan *setting* pada *flowmeter* bahan bakar dengan jalan membuka bukaan pada *flowmeter* secara penuh, lalu buka *regulator* LPG secara perlahan sampai bola penunjuk debit bahan bakar pada *flowmeter* berada pada posisi skala paling atas.
5. Memulai reaksi pembakaran pada *meso-scale combustor* dengan jalan memberikan pemantik api dengan menggunakan korek api pada mulut *output combustor* disertai dengan mengatur rasio campuran bahan bakar dan udara menggunakan *flowmeter* hingga mencapai kondisi stoikiometri.
6. Pengaturan perbandingan debit bahan bakar dan udara yang dilakukan dengan jalan menjaga debit bahan bakar agar tetap konstan, kemudian debit udara divariasikan.
7. Mencari nilai debit udara maksimal dengan jalan meningkatkan nilai debit udara sampai nyala api menjadi stabil sebelum kemudian api padam karena pembakaran terlalu miskin.
8. Mencari nilai debit udara minimal dengan jalan mengurangi nilai debit udara sebanyak – banyaknya sampai nyala api stabil sebelum kemudian api padam karena pembakaran terlalu kaya.
9. Melakukan pengamatan kestabilan nyala api selama 3 menit disaat nyala api dalam keadaan reaksi pembakaran kaya dan reaksi pembakaran miskin.
10. Mencatat nilai debit udara dan debit bahan bakar ketika api mampu menyala secara stabil selama 3 menit.
11. Mengambil nilai temperatur pada nyala api dengan menggunakan *thermocouple*. Pengambilan nilai temperatur ini dilakukan dengan jalan memasukkan kawat sensor panas *thermocouple* ke dalam *combustor* sampai menyentuh api.

12. Pengambilan gambar visualisasi nyala api dari dua sisi, yaitu tampak depan dan tampak samping pada nyala api.
13. Pengambilan data dilakukan sebanyak tiga kali untuk kemudian diambil rata-rata. Pengambilan data dilakukan dengan prosedur yang sama pada masing – masing variasi panjang saluran *sudden expansion*.
14. Data visualisasi nyala api diperoleh dengan jalan menganalisa tingkat kecerahan warna nyala api di dalam *combustor* pada foto, menggunakan aplikasi *Corel Draw X6*.



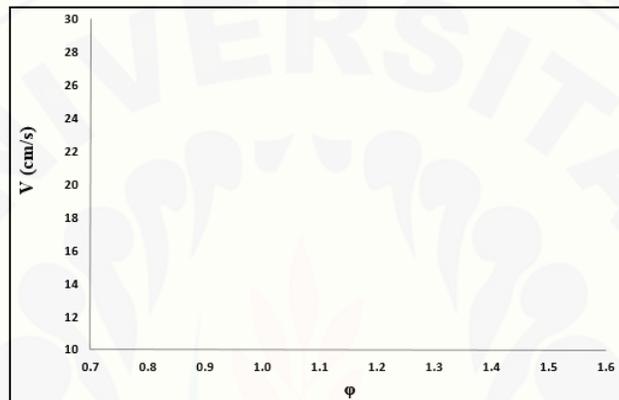
3.6 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.13 Diagram Alir Penelitian

3.7 Penyajian Data Penelitian

Data yang diperoleh dari hasil penelitian diolah menggunakan *software Microsoft excel* untuk memudahkan pencarian nilai variabel terikat. Hasil pengolahan data disajikan dalam bentuk grafik yang ditunjukkan pada Gambar 3.14 dan dalam bentuk tabel seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.1 sampai Tabel 3.3.



Gambar 3.14 Grafik *flammability limit*

Tabel 3.1 Penyajian data hasil pengujian *flammability limit* pada *combustor* dengan saluran *sudden expansion* 10 mm

No.	Q_f (ml/min)	Q_a (ml/min)		Φ		v total (cm/s)	
		Q_a minimal	Q_a maksimal	Lower limit	Upper limit	v minimal	v maksimal
1.							
2.							
3.							
4.							
dst.							

Tabel 3.2 Penyajian data hasil pengujian *flammability limit* pada *combustor* dengan saluran *sudden expansion* 15 mm

No.	Q _f (ml/min)	Q _a (ml/min)		Φ		v total (cm/s)	
		Q _a minimal	Q _a maksimal	Lower limit	Upper limit	v minimal	v maksimal
1.							
2.							
3.							
4.							
dst.							

Tabel 3.3 Penyajian data hasil pengujian *flammability limit* pada *combustor* dengan saluran *sudden expansion* 20 mm

No.	Q _f (ml/min)	Q _a (ml/min)		Φ		v total (cm/s)	
		Q _a minimal	Q _a maksimal	Lower limit	Upper limit	v minimal	v maksimal
1.							
2.							
3.							
4.							
dst.							

Persamaan yang digunakan untuk mengolah data hasil penelitian adalah sebagai berikut :

a. Massa alir bahan bakar

$$\dot{m}_f = \frac{Q_{f(vapor)}}{60} \times \rho_{f(vapor)} \text{ (mg/min)} \dots\dots\dots (3.1)$$

b. Debit bahan bakar

$$Q_f = \frac{\dot{m}_f}{\rho_f} \text{ (ml/hr)} \dots\dots\dots (3.2)$$

c. Rasio ekuivalen

$$\Phi = \frac{(AFR)_{Stoikiometri}}{(AFR)_{aktual}} \dots\dots\dots (3.3)$$

d. Kecepatan minimal reaktan

$$V_{total} \text{ (minimal)} = \frac{Q_{f(vapor)} + Q_{a(\min)}}{\frac{(3,16 \times r^2)}{100}} \dots\dots\dots (3.4)$$

e. Kecepatan maksimal reaktan

$$V_{total} \text{ (maksimal)} = \frac{Q_{f(vapor)} + Q_{a(\maximal)}}{\frac{(3,16 \times r^2)}{100}} \dots\dots\dots (3.5)$$

Keterangan :

r = jari – jari dalam *combustor* (mm)

(AFR)_{stoikiometri} = rasio udara dan bahan bakar stokiometri

(AFR)_{aktual} = rasio udara dan bahan bakar aktual

Q_{a minimal} = debit udara minimal (ml/min)

Q_{a maksimal} = debit udara maksimal (ml/min)

Q_{f(vapor)} = debit bahan bakar pada fase uap (ml/min)

$\rho_{f(vapor)}$	= densitas bahan bakar pada fase uap (mg/ml)
\dot{m}_f	= massa alir bahan bakar (mg/min)
Φ	= rasio ekuivalen
$V_{(minimal)}$	= kecepatan minimal reaktan di dalam <i>combustor</i> (cm/s)
$V_{(maksimal)}$	= kecepatan maksimal reaktan di dalam <i>combustor</i> (cm/s)



BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian pengaruh variasi panjang saluran *sudden expansion* terhadap karakteristik pembakaran pada *meso-scale combustion* dengan menggunakan bahan bakar LPG dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil perbandingan batas nyala api pada variasi panjang saluran *sudden expansion* menunjukkan bahwa batas nyala api atau *flammability limit* terluas terdapat pada saluran *sudden expansion* dengan panjang 20 mm, dimana api dapat menyala dalam rentang rasio nilai ekuivalen (ϕ) = 0,91 – 1,38 dan nilai kecepatan reaktan (v) = 19,6 – 31 cm/s, untuk panjang saluran *sudden expansion* 15 mm api dapat menyala pada rasio ekuivalen (ϕ) = 0,93 – 1,35 dan nilai kecepatan reaktan (v) = 19,1 – 28,1 cm/s. Sedangkan untuk panjang saluran *sudden expansion* 10 mm api dapat menyala pada nilai rasio ekuivalen (ϕ) = 0,94 – 1,22 dan nilai kecepatan reaktan (v) = 17,3 – 22,4. Sehingga, dapat dikatakan *combustor* atau ruang bakar dengan saluran *sudden expansion* 20 mm memiliki batas nyala api terluas dan stabilas nyala api baik.
2. Nilai rasio ekuivalen (ϕ) dan kecepatan reaktan (v) bertambah tinggi seiring dengan bertambahnya nilai debit bahan bakar (Q_f) dan debit udara (Q_a). Sedangkan untuk nilai (Q_f) dan (Q_a), semakin meningkat dengan bertambahnya dimensi panjang pada saluran *sudden expansion*.
3. Saluran *sudden expansion* dengan panjang 10 mm memiliki tingkat kecerahan warna api paling rendah yaitu sebesar RGB(66,82,173). Tingkat kecerahan nyala api mengalami peningkatan pada variasi panjang 15 mm dan 20 mm, yaitu sebesar RGB(74,82,173) dan RGB(74,90,181).

Kecerahan nyala api semakin meningkat dengan bertambahnya panjang saluran *sudden expansion*. Dimana semakin cerah nyala api, semakin tinggi pula temperatur pada nyala api tersebut.

5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut :

1. Pengembangan *meso-scale combustor* selanjutnya, dapat meneliti mengenai modul pengubah panas. Fungsi modul tersebut adalah untuk mengkonversi panas yang dihasilkan oleh *meso-scale combustor*, menjadi bentuk energi lain yang diperlukan.
2. *Software* simulasi aliran fluida dapat dimanfaatkan untuk memberikan kemudahan dalam memberikan gambaran pola aliran fluida yang terjadi di dalam *meso-scale combustor*.

DAFTAR PUSTAKA

- Agrawal, A. K., dan Sadasivuni, V. 2009. *A Novel Meso-scale Combustion System for Operation with Liquid Fuels. Science Direct. Proceedings of the Combustion Institute*. Vol. 32: 3155 – 3162.
- Amiryess. 2013. Tips Aman Menggunakan Tabung Gas LPG 3 Kg. <http://amiryess.blogspot.co.id/2010/08/tips-aman-menggunakan-tabung-gas-lpg-3.html> [18 Agustus 2016].
- Anwar, S., Ryanuargo, dan Sari S. P. 2013. Generator Mini dengan Prinsip Termoelektrik dari Uap Panas Kondensor pada Sistem Pendingin. Jakarta. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Gunadarma. *Jurnal Rekayasa Elektrika* Vol. 10, No. 4, Oktober 2013.
- Arijanto, Usman I., Bimo M. 2015. Penggunaan Gas Sebagai Bahan Bakar Pada Sepeda Motor Bermesin Injeksi. Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin Indonesia XIV, 7-8 OKTOBER 2015, BANJARMASIN.
- Cahyono, H., Fathurrohman, W., Hilal, A.S., dan Wahyoto, Tuter. 2011. Energi dan Pembakaran. Semarang. Universitas Negeri Semarang.
- Celanovic, I., Bermel, P., dan Soljadic, M. 2011. *Thermophotovoltaic power conversion system: current performance and future potential. Massachusetts Institute of Technology* (77 Massachuettts Ave., Cambridge, MA 02139, USA)
- Condro, B. dan Setiyo M. 2012. Optimasi Pemanfaatan LPG Sebagai Bahan Bakar Kendaraan Melalui Penyetelan Converter Kits dan Saat Pengapian. Magelang. Universitas Muhammadiyah Magelang.

- Corradi, F. 2010. *High Temperature Ceramic Adhesives* (A2). http://www.francocorradi.it/adesivi_coating_ceramici_en.htm. [7 Juni 2016].
- Djafar, Z., Putra N., dan Koestoer, R. A. 2010. Pengaruh Variasi Temperatur Fluida Panas terhadap Karakteristik Modul Termoelektrik Generator. Depok. Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Farizkaraja M., Sasongko, M. N., dan Wijayanti W. 2014. Pengaruh Konsentrasi CO₂ Terhadap Karakteristik Api Pembakaran Difusi CH₄ + CO₂ Pada Counter Flow Burner. Malang. Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
- Febrianto, W. T. 2015. Karakteristik Pembakaran Heksana pada Mesoscale Combustor dengan Preheated Multiple Tangential Fuel Inlet. Malang. Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Fernandez, dan C., Pello. 2002. *Micropower Generation Using Combustion: Issues and Approaches*. Proceedings of the Combustion Institute, 29. 883-899.
- Gunanto, dan Pramono J. 2009. Dampak Program Konversi Minyak Tanah ke LPG Terhadap Distribusi Minyak Tanah Bersubsidi ke LPG (Studi Kasus di Pangkalan Kota Salatiga). Jurnal Ilmiah Among Makarti, Vol.2, No.4 Desember 2009.
- Helmizar. 2011. Studi Eksperimental Tentang Head Loss Pada Aliran Fluida yang Melalui Elbow 90 °. Bengkulu. Program studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Bengkulu. Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Cakram Vol. 5 No. 1. April 2011 (26-31).
- Ibrahim Dincer & Marc A. Rosen. 2007. *Exergy: Energy, Environment, Sustainable Development*. ISBN: 978-0-08-097089-9
- Ju, Y., dan Maruta, K. 2011. *Microscale Combustion: Technology development and fundamental research*. Science Direct. Progress in Energy and Combustion Science. Vol.(xxx): 1 – 47.

- Mahandari, C. P. dan Kartika D. 2010. *Flame Lift-up on A Bunsen Burner*. Jakarta: A Preliminary Study.
- Maruta, K. 2011. *Micro and Mesoscale Combustion*. *Science Direct. Proceedings of the Combustion Institute* Vol (33): 125-150.
- Mikami, M., Maeda, Y., Matsui, K., Seo, T. & Yuliati, L. 2012. *Combustion of Gaseous and Liquid Fuels In Meso-scale Tubes With Wire Mesh*. *Proceeding of the Combustion Institute* 34. 3387-3394.
- Muhyiddin, A. 2016. Kompresor Angin Wipro. <http://m.olx.co.id/257467679/>. [28 Mei 2016].
- Munson, B. R., Young, D. F., dan Okiishi, T. H. 2005. *Mekanika Fluida Edisi Keempat*. Jakarta : Erlangga.
- Olson, R. M. dan Steven J. 1993. *Dasar-dasar Mekanika Fluida Teknik*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- Pradika, Z. R., Sasongko, M. N., dan Yuliati, L. 2014. *Studi Eksperimental Mengenai Nyala Api dan Gas Hasil Pembakaran pada Meso Scale Combustor dengan Material Non-Homogen*. Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Malang.
- Raditya, M. A., Wardana, I. N. G., dan Yuliati L. 2013. *Pengaruh Variasi Jarak Antar Wire Mesh Terhadap Karakteristik Pembakaran Pada Meso-scale Combustor*. Malang. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Reza, A., Soenoko, R., dan Sutikno, D. 2007. *Pengaruh Jumlah Sudu Static Radial Fin Terhadap Laju Perpindahan Kalor dan Pressure Drop pada Alat Penukar Kalor*. Malang. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Saptoadi, H. 2010. *Bahan Bakar Padat dari Bumi Indonesia untuk Kemandirian dan Kesejahteraan Bangsa*. Yogyakarta. Universitas Gadjah Mada.

- Sari, S. 2015. Pengaruh Diameter *Combustor* Terhadap Karakteristik Pembakaran pada *Meso-scale Combustor* dengan *Backward Facing Step*. Malang. Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
- Siamullah, M. W., Sasongko, M. N., dan Yuliati, L. 2013. Pengaruh Diameter *Droplet* Air Terhadap Proses Pemadaman Api Tipe *Premixed Flame*. Malang. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Suprpto, Utama, Putradipura, Juwanda, Theresia, dan Walio. 2013. Termoelektrik. [http:// praptofi11.wordpress.com](http://praptofi11.wordpress.com) [8 April 2016].
- Taufiq. 2008. Perbandingan Temperatur Ring *Stainless Steel* dan Temperatur Ring Keramik pada Fenomena “*Flame Lift-Up*”. Depok. Fakultas Teknik Program Studi Teknik Mesin Universitas Indonesia.
- Wang, Y., Wu, M., Yang, V., dan Yetter, R. A. 2007. *Combustion in meso-scale vortex chambers*. USA. *Department of Mechanical and Nuclear Engineering, The Pennsylvania State University. Proceedings of the Combustion Institute*. Vol.(31): 3235-3242.
- Yang, W. M., Chou, S. K., Shu, C., Li, Z. W., dan Xue, H. 2002. *Combustion in micro-cylindrical combustor with and without a backward facing step*. *Applied Thermal Engineering*. Vol. (22): 1777-1787.

LAMPIRAN

1. Perhitungan $AFR_{stoikiometri}$

$AFR_{stoikiometri}$ pada proses pembakaran di dalam *meso-scale combustor* merupakan AFR yang diperoleh dari hasil perhitungan teoritis pada persamaan kimia yang ditunjukkan pada Persamaan 4.1.



Reaksi kimia dalam proses pembakaran yang ditunjukkan pada persamaan di atas menggambarkan reaksi antara 0,5 mol butana dan 0,5 mol propana yang direaksikan terhadap 5,77 udara akan menghasilkan 3,5 mol gas CO_2 , 4,5 mol H_2O , dan 21,62 N_2 . Nilai AFR dalam reaksi kimia di atas dapat diperoleh melalui perhitungan seperti berikut ini :

a) Diketahui :

- Massa atom relatif (Ar)
C = 12 gram/mol; H = 1 gram/mol; O = 16 gram/mol; & N = 14 gram/mol
- Massa jenis udara pada suhu ruangan 20 °C adalah 0,001205 gram/cm³.
- Massa jenis propana 0,00183 gram/cm³.
- Massa jenis butana 0,002417 gram/cm³.
- Massa jenis LPG (50% propana dan 50% butana) adalah 0,002126 gram/cm³.

b) Ditanya :

- $AFR_{stoikiometri} = \dots ?$

c) Penyelesaian :

- $AFR_{stoikiometri}$ berdasarkan rasio massa udara dan bahan bakar :
– Massa bahan bakar = $n \times Mr$

$$\begin{aligned}
 &= 0,5 \text{ Mr C}_3\text{H}_8 + 0,5 \text{ Mr C}_4\text{H}_{10} \\
 &= (0,5(36+8)) + (0,5(48+10)) \\
 &= 22 + 29 \\
 &= 51 \text{ gram} \\
 \text{– Massa udara} &= n \times \text{Mr} \\
 &= 5,75 (\text{Mr O}_2 + 3,76 \text{ Mr N}_2) \\
 &= 5,75 (32 + 3,76 (28)) \\
 &= 5,75 \times 137,28 \\
 &= 789,36 \text{ gram} \\
 \text{– AFR}_{\text{stoikiometri}} &= \frac{\text{Massa udara}}{\text{Massa bahan bakar}} \\
 &= \frac{789,36}{51} \\
 &= 15,48
 \end{aligned}$$

2. Perhitungan AFR aktual

Nilai AFR aktual dapat diperoleh melalui perbandingan nilai massa alir antara bahan bakar dan udara. Untuk contoh perhitungan nilai Q_a dan Q_f diambil dari tabel 4.1 nomor 1.

a) Diketahui :

- $\rho_{\text{LPG}} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $\rho_{\text{udara pada } 20^\circ \text{ C}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3$
- $Q_f = 3,48 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ minimal}} = 97,2 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ maximal}} = 100,19 \text{ ml/min}$

b) Karena perbedaan fase antara bahan bakar dan udara, maka keduanya harus diubah terlebih dahulu menjadi massa alir (\dot{m}).

- $\dot{m}_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126 \text{ gram/cm}^3 \times 3,48 \text{ ml/min} = 0,00739 \text{ gram/min}$
- $\dot{m}_{a \text{ min}} = \rho_{udara} \times Q_{a \text{ minimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 97,2 \text{ ml/min} = 0,1171 \text{ gram/min}$
- $\dot{m}_{a \text{ max}} = \rho_{udara} \times Q_{a \text{ maximal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 100,19 \text{ ml/min} = 0,1207 \text{ gram/min}$

c) Nilai AFR aktual

$$AFR_{\text{aktual}} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \dots\dots\dots (2)$$

- $AFR_{\text{aktual batas bawah}} = \frac{0,1171 \text{ gr/min}}{0,00739 \text{ gr/min}}$

$$AFR_{\text{aktual batas bawah}} = 15,83$$

- $AFR_{\text{aktual batas atas}} = \frac{0,1207 \text{ gr/min}}{0,00739 \text{ gr/min}}$

$$AFR_{\text{aktual batas atas}} = 16,33$$

3. Perhitungan rasio equivalen (ϕ)

Rumus perhitungan rasio equivalen adalah perbandingan antara $AFR_{\text{stoikiometri}}$ terhadap AFR_{aktual} .

$$\phi = \frac{AFR_{\text{stoikiometri}}}{AFR_{\text{aktual}}} \dots\dots\dots (3)$$

1. Perhitungan rasio equivalen batas bawah ($\phi_{\text{batas bawah}}$)

- Diketahui :

- $AFR_{\text{aktual batas bawah}} = 15,83$

- $AFR_{\text{stoikiometri}} = 15,48$

- Ditanya :

$$\phi_{\text{batas bawah}} = \dots\dots\dots?$$

- Penyelesaian :

- $\phi = \frac{AFR_{stoikiometri}}{AFR_{aktual}}$
- $\phi_{batas\ bawah} = \frac{15,48}{15,83}$
- $\phi_{batas\ bawah} = 0,98$

2. Perhitungan rasio equivalen batas atas ($\phi_{batas\ atas}$)

- Diketahui :

- $AFR_{aktual\ batas\ atas} = 16,33$
- $AFR_{stoikiometri} = 15,48$

- Ditanya

$$\phi_{batas\ atas} = \dots\dots?$$

- Penyelesaian

- $\phi = \frac{AFR_{stoikiometri}}{AFR_{aktual}}$
- $\phi_{batas\ atas} = \frac{15,48}{16,33}$
- $\phi_{batas\ atas} = 0.95$

4. Perhitungan kecepatan total reaktan (v)

Nilai variabel yang digunakan dalam perhitungan kecepatan total reaktan diperoleh dari perhitungan sebelumnya.

- Diketahui

- $Q_a\ minimal = 97,2\ ml/min$
- $Q_a\ maximal = 100,19\ ml/min$
- $Q_f = 3,48\ ml/min$
- $\dot{m}_{udara\ minimal} = 0,1171\ gr/min$
- $\dot{m}_{udara\ maximal} = 0,1207\ gr/min$
- $\rho_{LPG} = 0,002126\ gr/cm^3$

- $D_{in\ Combustor} = 3,5\text{ mm}$; $r_{in\ Combustor} = 1,75\text{ mm}$

• Ditanya

- $V_{reaktan\ (minimal)} = \dots\dots\dots?$

- $V_{reaktan\ (maximal)} = \dots\dots\dots?$

• Penyelesaian

$$V_{reaktan\ (minimal)} = \frac{\left(\frac{Q_f + Q_{a(minimal/maximal)}}{60}\right)}{\frac{(3,16 \times r^2)}{100}} \text{ cm}^2$$

- Kecepatan reaktan minimum

$$- V_{reaktan\ (minimal)} = \frac{\left(\frac{3,48\text{ ml/min} + 97,2\text{ ml/min}}{60}\right)}{\frac{(3,16 \times 1,75^2)}{100}} \text{ cm}^2$$

$$- V_{reaktan\ (minimal)} = \frac{1,678}{0,0968}$$

$$- V_{reaktan\ (minimal)} = 17,33\text{ cm/s}$$

- Kecepatan reaktan maksimum

$$- V_{reaktan\ (maximal)} = \frac{\left(\frac{3,48\text{ ml/min} + 100,19\text{ ml/min}}{60}\right)}{\frac{(3,16 \times 1,75^2)}{100}} \text{ cm}^2$$

$$- V_{reaktan\ (maximal)} = \frac{1,728}{0,0968}$$

$$- V_{reaktan\ (maximal)} = 17,85\text{ cm/s}$$

5. Perhitungan nilai Q_a dan Q_f untuk pengambilan data visualisasi nyala api

• Diketahui :

- $\phi = 1,1$
- $v = 20 \text{ cm/s}$
- $AFR_{\text{stoikiometri}} = 15,48$
- $\rho_{\text{udara pada } 20^\circ \text{ C}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3$
- $\rho_{\text{LPG}} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$

• Dicari :

- Debit udara (Q_a) =?
- Debit Bahan bakar(Q_f) =?

• Penyelesaian :

$$\phi = \frac{AFR_{\text{stoikiometri}}}{AFR_{\text{aktual}}}$$

$$1,1 = \frac{15,48}{AFR_{\text{aktual}}}$$

$$AFR_{\text{aktual}} = \frac{15,48}{1,1}$$

$$AFR_{\text{aktual}} = 14,072$$

$$\text{○ } AFR_{\text{aktual}} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f}$$

$$14,072 = \frac{Q_a \times 0,001205 \text{ gram/menit}}{Q_f \times 0,002126 \text{ gram/menit}}$$

$$Q_a = 24,83 Q_f$$

$$\text{○ } V_{\text{reaktan (minimal)}} = \frac{\left(\frac{Q_f + Q_a(\text{minimal/maximal})}{60} \right)}{\frac{(3,16 \times r^2)}{100}} \text{ cm}^2$$

$$20 \text{ ml/min} = \frac{\left(\frac{Q_f + 24,83 Q_f}{60}\right)}{\frac{(3,16 \times 1,75^2)}{100} \text{ cm}^2}$$

$$20 \text{ ml/min} = \frac{0,4305 Q_f}{0,0968}$$

$$Q_f = \frac{0,0968 \times 20}{0,4305}$$

$$Q_f = 4,5 \text{ ml/menit}$$

$$Q_a = 24,83 Q_f$$

$$Q_a = 24,83 \times 4,5$$

$$Q_a = 111,74 \text{ ml/menit}$$

Dari hasil perhitungan didapatkan bahwa nilai debit bahan bakar (Q_f) dan debit udara (Q_a) untuk perbandingan visualisasi nyala api masing – masing variasi panjang saluran *sudden expansion* adalah $Q_a = 111,74 \text{ ml/menit}$ dan $Q_f = 4,5 \text{ ml/menit}$.