



**PENGARUH TINGGI *SUDDEN EXPANSION* TERHADAP
KARAKTERISTIK NYALA API PADA *MESOSCALE COMBUSTOR*
DENGAN *SUDDEN EXPANSION***

SKRIPSI

Oleh

**Muhammad Rozak
NIM 121910101101**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2018**



**PENGARUH TINGGI *SUDDEN EXPANSION* TERHADAP
KARAKTERISTIK NYALA API PADA *MESOSCALE COMBUSTOR*
DENGAN *SUDDEN EXPANSION***

SKRIPSI

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

Oleh

**Muhammad Rozak
NIM 121910101101**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2018**

PERSEMBAHAN

Puji syukur kehadirat Allah SWT dengan tulus ikhlas dan segala kerendahan hati, saya persembahkan skripsi ini kepada:

1. Allah SWT atas segala rizki dan kesempatanNya yang telah dilimpahkan, serta kepada junjungan Nabi Muhammad SAW.
2. Keluargaku, ibunda Rumiwati, bapak Amin S, kakak Nurul Fatimah dan adek Lutfi M. R. atas semua cinta, kasih sayang, perhatian, doa, pengorbanan, semangat, bantuan, motivasi dan bimbingan yang telah diberikan kepada penulis dengan tulus.
3. Staf pengajar semua dosen Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember yang telah memberikan ilmu dan bimbingan kepada penulis terutama Bapak A. Adib Rosadi, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing utama, Bapak Dedi Dwilaksana S.T., M.T., selaku dosen pembimbing anggota, Bapak Dr. Gaguk Djatisukanto, S.T., M.T., selaku dosen penguji I, Bapak Ir. Digdo Lisyadi S., M.Sc., selaku dosen penguji II, dan Bapak Ir. Dwi Djumhariyanto M.T., selaku dosen pembimbing akademik
4. Bapak Andi Sanata, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing lapangan selama penelitian.
5. Bapak Hari Arbiantara, S.T., M.T. selaku ketua jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.
6. Almamater tercinta Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.
7. Guru – guru serta kawan – kawan SMAN 1 Manyar Gresik, SMPN 4 Gresik, MI MIFTAHUL ULUM Gresik yang telah memberikan ilmu serta pengalamannya selama ini.
8. Seluruh tim penelitian yang turut membantu suksesnya dalam penyusunan skripsi Rachel, Ifan, Yahya, Kamal, Fauzan, Rahmat, Akbar, Dwi, dan Eranio.
9. Kawan, adek, kakak seperjuangan Kosan Ismail Jember Mas Prabu, Mas Bayu, Mas Royan, Mas Joko, Rico, Maskulin, Raka, Erwin, Jhon, dan semua warga kosan.

10. Semua Saudara-Saudara Teknik Mesin 2012 (Mechanical Engineering) atas semua kebersamaan selama ini yang tidak bisa disebutkan satu persatu.
11. Teman – teman KKN 129 atas segala kebersamaan yang selama ini telah dilalui.
12. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan yang telah membantu dan memberikan motivasi serta semangat dalam penulisan serta penyusunan skripsi ini.



MOTTO

“Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan, sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan.”¹

“Everybody is a genius. But if you judge a fish by its ability to climb a tree, it will live its whole life believing that it is stupid”²



¹ (terjemahan Q.S. Al-Insyirah ayat 5-6)

² Albert Einstein

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Rozak

NIM : 121910101101

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan skripsi yang berjudul "*Analisis Pengaruh Ketinggian Step pada Meso Scale Combustor dengan Sudden Expansion terhadap Karakteristik Nyala Api*" adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika disebutkan sumbernya dan belum pernah diajukan pada instansi 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 sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 21 Januari 2019

Yang menyatakan,

Muhammad Rozak
NIM 121910101101

SKRIPSI

**ANALISIS PENGARUH KETINGGIAN *STEP* PADA *MESO SCALE*
COMBUSTOR DENGAN *SUDDEN EXPANSION* TERHADAP
KARAKTERISTIK NYALA API**

Oleh:

Muhammad Rozak
NIM 121910101101

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Ahmad Adib Rosyadi, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Dedi Dwilaksana, S.T., M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Analisis Pengaruh Ketinggian *Step* Pada *Meso Scale Combustor* Dengan *Sudden Expansion* Terhadap Karakteristik Nyala Api” telah diuji dan disahkan oleh Fakultas Teknik Universitas Jember pada:

hari, tanggal : Kamis, 17 Januari 2019

tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji

Dosen Pembimbing Utama,

Ahmad Adib Rosyadi, S.T., M.T.
NIP 19850117 201212 1 001

Anggota I,

Dr. Gaguk Djatisukamto, S.T., M.T.
NIP 19690209 199802 1 001

Dosen Pembimbing Anggota,

Dedi Dwilaksana, S.T., M.T.
NIP 19691201 199602 1 001

Anggota II,

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

Mengesahkan
Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember,

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

RINGKASAN

Analisis Pengaruh Ketinggian Step pada Meso Scale Combustor dengan Sudden Expansion terhadap Karakteristik Nyala Api; Muhammad Rozak, 121910101101; 2019: 39 halaman; Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Perkembangan teknologi yang pesat dalam segala bidang ilmu dan teknologi membuat manusia untuk terus berinovasi. *Micro power generator* (MPG) adalah teknologi yang saat ini dikembangkan. MPG merupakan teknologi yang menggunakan peralatan pembakaran dalam sebuah *combustor* ukuran kecil (*micro / mesoscale combustor*) dengan bahan bakar hidrokarbon. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *combustor* dengan material tembaga dengan bahan bakar LPG dan divariasikan pada ukuran diameter *outlet* dengan ukuran 5 mm, 5.5 mm, dan 6 mm, sedangkan untuk diameter inlet digunakan ukuran diameter yang konstan yaitu 4.5 mm. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperoleh nyala api yang paling stabil ditunjukkan dengan grafik *flammability limit* dan visualisasi nyala api yang terbentuk pada proses pembakaran yang terjadi pada *meso scale combustor* dengan *sudden expansion*. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Hasil yang diperoleh pada penelitian ini yaitu pada *combustor* dengan ukuran diameter inlet yang konstan 4,5 mm dan dengan variasi diameter outlet dapat diketahui jika semakin besar rentang nilai kecepatan reaktan (v) dan nilai rasio equivalen (ϕ) maka nyala api yang dihasilkan akan lebih stabil. Pada penelitian ini *combustor* dengan variasi outlet 6 mm memiliki nilai rentang kecepatan reaktan (v) dan equivalen rasio (ϕ) yang lebih besar dibandingkan lainnya, pada variasi ukuran diameter outlet 5 mm kecepatan reaktan (v) = 15.46 - 47.74 cm/s dan rasio equivalen (ϕ) = 1.10 - 1.61, pada variasi ukuran diameter outlet 5,5 mm kecepatan reaktan (v) = 15.28 - 49.49 cm/s dan rasio equivalen (ϕ) = 1.08 - 1.63, dan pada variasi ukuran diameter outlet 6 mm kecepatan reaktan (v) = 15.18 - 52.04 cm/s dan rasio equivalen (ϕ) = 1.06 - 1.68.

Kata Kunci : Ketinggian step, Meso scale combustor, Sudden expansion, Micro power generator

SUMMARY

Step High Analysis in Meso Scale Combustor with Sudden Expansion to Flammability Characteristic; Muhammad Rozak, 121910101101; 2019; 39 of page; Department of Mechanical Engineering Mechanical Faculty Jember University.

Technology development was growing fast in any aspect make the researcher keep innovate. *Micro power generator* (MPG) are technology now in research. MPG is a technology that uses combustion equipment in a small size combustor (micro / mesoscale combustor) with hydrocarbon fuels. This research was conducted using combustor with copper material with LPG fuel and varied in size of outlet diameter with a size of 5 mm, 5.5 mm, and 6 mm, while for inlet diameter a constant diameter size of 4.5 mm was used. The purpose of this research is to obtain the most stable flame shown by the flammability limit graph and the visualization of the flame formed in the combustion process that occurs in mesoscale combustor with sudden expansion. This research was conducted at the Energy Conversion Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Jember.

The results obtained in this research are in combustors with a constant inlet diameter size of 4.5 mm and with variations in outlet diameter can be seen if the greater the range of reactant speed values (v) and the equivalent ratio value (ϕ), the resulting flame will be more stable. In this research combustor with 6 mm outlet variation has a reactant velocity range (v) and an equivalent ratio (ϕ) that is greater than the other, on variations in outlet diameter size of 5 mm reactant speed (v) = 15.46 - 47.74 cm / s and ratio equivalent (ϕ) = 1.10 - 1.61, in the variation in outlet diameter size of 5.5 mm reactant speed (v) = 15.28 - 49.49 cm / s and the equivalent ratio (ϕ) = 1.08 - 1.63, and in the variation in outlet diameter size of 6 mm reactant (v) = 15.18 - 52.04 cm / s and the equivalent ratio (ϕ) = 1.06 - 1.68.

Keyword : Step High, Meso scale combustor, Sudden expansion, Micro power generator

PRAKATA

Alhamdulillah puji syukur ke hadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, hidayah serta karunia-Nya terhadap penulis sehingga mampu menyelesaikan penyusunan skripsi dengan judul “Analisis Pengaruh Ketinggian *Step* pada *Meso Scale Combustor* dengan *Sudden Expansion* terhadap Karakteristik Nyala Api”. Skripsi ini disusun guna memenuhi salah satu persyaratan menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin Universitas Jember.

Selama penelitian dan penulisan laporan Skripsi ini, telah banyak mendapatkan bantuan, bimbingan dan pengarahan dari berbagai pihak. Dalam kesempatan ini tak lupa penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Ir. Entin Hidayah, M. UM., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember.
2. Bapak Hari Arbiantara S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.
3. Bapak Hary Sutjahjono S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi S1 jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.
4. Bapak Ir. Dwi Djumhariyanto, M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing selama ini.
5. Bapak Ahmad Adib Rosyadi, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing utama, yang telah banyak membantu proses terselesaikannya penulisan skripsi.
6. Bapak Dedi Dwilaksana, S.T, M.T., selaku Dosen Pembimbing Anggota, yang telah banyak membantu proses terselesaikannya penulisan skripsi.
7. Bapak Dr. Gaguk Djatisukamto, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji I, yang telah banyak membantu proses terselesaikannya penulisan skripsi.
8. Bapak Ir. Digdo Listyadi S., M.Sc., selaku Dosen Penguji II, yang telah banyak membantu proses terselesaikannya penulisan skripsi.
9. Bapak Andi Sanata, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing lapangan selama penelitian.

10. Ayah, Ibu, Adik, dan juga keluarga besarku yang telah memberikan dukungan moril, materil, do'a dan semangat demi terselesainya kuliahku khususnya dan selama menuntut ilmu di bangku sekolah pada umumnya.
11. Dosen, staf, dan teknisi jurusan Teknik Mesin Universitas Jember.
12. Teman – teman beserta seluruh pihak yang tidak dapat penyusun sebutkan satu persatu yang telah membantu dalam pelaksanaan skripsi ini.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhir kata penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Jember, 17 Januari 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
PERSEMBAHAN	iii
MOTTO	v
PERNYATAAN	vi
PEMBIMBINGAN	vii
PENGESAHAN	viii
RINGKASAN	ix
PRAKATA	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvi
BAB 1. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan dan Manfaat	3
1.4.1 Tujuan	4
1.4.2 Manfaat	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Micro Power Generator (MPG)	5
2.1.1 Klasifikasi <i>Micro Power Generator</i>	5
2.2 Combustor	7
2.3 Sudden Expansion / Backward Facing Step	8
2.4 Pembakaran	9
2.4.1 Reaksi Kimia Pembakaran	10
2.4.2 <i>Air Fuel Ratio</i> (AFR)	11
2.4.3 <i>Equivalence Ratio</i>	12

2.4.4 <i>Flammability Limit</i>	12
2.5 <i>Liquified Petroleum Gas (LPG)</i>	13
2.6 Penelitian Sebelumnya	14
2.7 Hipotesa	15
BAB 3. METODOLOGI	
3.1 Metode Penelitian	16
3.2 Variabel Penelitian	16
3.3.1 Variabel Bebas	16
3.3.2 Variabel Terikat	17
3.3 Alat dan Bahan	17
3.3.1 Alat	17
3.3.2 Bahan	22
3.4 Skema Alat Uji Penelitian	23
3.5 Prosedur Penelitian	24
3.6 Diagram Alir Penelitian	26
3.7 Penyajian Data Penelitian	27
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Data Hasil Penelitian	30
4.2 <i>Flammability Limit (Batas Nyala Api)</i>	32
4.3 Visualisasi Nyala Api	35
BAB 5. PENUTUP	
5.1 Kesimpulan	38
5.2 Saran	39
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

2.1 <i>Thermoelectric Micro power generator</i>	6
2.2 <i>Micro Gas Turbine Generator</i>	6
2.3 <i>Micro-Thermophotovoltaic Power Generator</i>	7
2.4 <i>Micro combustor</i>	8
2.5 <i>Backward facing step/ Sudden expansion</i>	9
3.1 <i>Meso Scale Combustor</i>	18
3.2 <i>Mixer</i>	19
3.3 <i>Flowmeter Udara dan Butana</i>	20
3.4 <i>Selang Bahan Bakar Dan Udara</i>	21
3.5 <i>Regulator LPG</i>	21
3.6 <i>Kompresor</i>	22
3.7 <i>Skema Alat Uji</i>	23
3.8 <i>Diagram Alir Penelitian</i>	26
3.9 <i>Grafik Flammability Limit</i>	27
4.1 <i>Grafik Flammability Limit</i>	34
4.2 <i>Grafik Titik Tengah Pada Meso Scale Combustor</i>	36

DAFTAR TABEL

2.1 Klasifikasi combustor berdasarkan ukurannya	7
3.1 Variasi Ukuran Ketinggian Step	16
3.2 <i>Flammability Limit</i> pada <i>combustor</i> dengan <i>sudden expansion</i> 5 mm	27
3.3 <i>Flammability Limit</i> pada <i>combustor</i> dengan <i>sudden expansion</i> 5,5 mm	27
3.4 <i>Flammability Limit</i> pada <i>combustor</i> dengan <i>sudden expansion</i> 6 mm	28
4.1 Data Debit <i>Meso Scale Combustor</i> 5 mm	30
4.2 Data Debit <i>Meso Scale Combustor</i> 5,5 mm	31
4.3 Data Debit <i>Meso Scale Combustor</i> 6 mm	31
4.4 Data <i>Equivalence Ratio Meso Scale Combustor</i> 5 mm	32
4.5 Data <i>Equivalence Ratio Meso Scale Combustor</i> 5,5 mm	33
4.6 Data <i>Equivalence Ratio Meso Scale Combustor</i> 6 mm	33
4.7 Nilai campuran bahan bakar	35
4.8 Visualisasi Nyala Api dalam <i>Meso Scale Combustor</i>	36

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi yang pesat dalam segala bidang ilmu dan teknologi menjadikan manusia untuk terus melakukan inovasi. Berbagai peralatan diciptakan guna memudahkan pekerjaan, peralatan – peralatan tersebut tentunya memerlukan energi untuk dapat dioperasikan. Demikian pula dengan teknologi portabel, inovasi juga terus dilakukan pada peralatan portabel. Permasalahan yang timbul dari peralatan portabel saat ini adalah kapasitas daya yang dimiliki peralatan portabel umumnya masih tergolong kecil sedangkan daya yang diperlukan relatif besar. Hal ini menyebabkan banyak dilakukan pengembangan teknologi pembangkit daya berukuran kecil (*micro power generator*) yang mampu dikemas menjadi sebuah *power cell* / baterai (Maruta, 2011). Berbagai perangkat portabel modern tidak akan lepas dari kebutuhan akan sumber daya yang satu ini. Maka dari itu perlu adanya pengembangan teknologi *micro power generator* yang memiliki densitas energi tinggi, memiliki waktu operasi relatif panjang dengan waktu isi ulang energi yang lebih pendek dan juga ramah lingkungan. *Micro power generator* ini dimasa yang akan datang diharapkan mampu menjadi baterai baru yang mampu mengatasi permasalahan yang ada pada baterai generasi sekarang ini.

Micro-power generator adalah suatu alat untuk membangkitkan energi dalam skala pembangkit yang sangat kecil (Raditya, 2013). Micro power generator sendiri pada dasarnya terbagi menjadi dua jenis, diantaranya adalah micro power generator yang menggunakan siklus daya konvensional dan micro power generator dengan menggunakan modul pengkonversi energi termal menjadi energi listrik (termophotovoltaic atau termoelectric). Perbedaan kedua micro power generator ini terletak dari prinsip kerja pembangkitan energi.

Micro power generator (MPG) adalah teknologi yang saat ini dikembangkan. MPG merupakan teknologi yang menggunakan peralatan pembakaran dalam sebuah combustor ukuran kecil (*micro / meso scale combustor*) dengan bahan bakar hidrokarbon yang memiliki densitas energi

hingga 45 MJ/kg (Fernandez-Pello,2002). Hasil penelitian yang dilakukan oleh Pan, et. al (2006), menunjukkan bahwa perubahan yang dilakukan pada *major parameter* mempengaruhi hasil pembakaran dan panas yang dihasilkan. Perubahan yang dilakukan terhadap tebal dinding kombustor akan mempengaruhi panas dinding yang dihasilkan, sedangkan pada pencampuran volumetrik bahan bakar dan oksidator akan mempengaruhi nyala api yang dihasilkan.

Penelitian yang dilakukan oleh Mikami, et. al (2012) bahwa pembakaran yang dilakukan dalam *micro scale combustor* dengan *wire mesh* dengan kombustor *quartz glass* dan *stainless steel* menghasilkan nyala api yang menempel pada *wire mesh*. Dengan adanya *wire mesh* maka panas yang dihasilkan kombustor menjadi lebih tinggi dan energi yang dihasilkan pun meningkat dikarenakan api tertahan pada *wire mesh*.

Meso scale combustor dengan *sudden expansion* adalah *combustor* skala kecil dengan perbedaan ukuran diameter *inlet* (D1) dan diameter *outlet* (D2) sehingga menyebabkan adanya *sudden expansion* yang dapat menyebabkan api tertahan pada *sudden expansion*. Adanya *sudden expansion* ditujukan agar panas yang dihasilkan meningkat dan diperoleh nyala api yang lebih stabil.

Dalam penelitian ini akan dilakukan penerapan *sudden expansion* pada suatu *meso scale combustor* berbentuk saluran pipa silindris dengan variasi ukuran ketinggian *sudden expansion*, ukuran diameter yang digunakan pada *micro scale combustor* dalam penelitian ini yaitu dengan diameter *inlet* (D1) yang konstan 4,5 mm. Terdapat 3 variasi ukuran yang digunakan yaitu, pada *meso scale combustor* 1 digunakan diameter *outlet* (D2) sebesar 5 mm, *meso scale combustor* 2 digunakan diameter *outlet* (D2) sebesar 5,5 mm, dan *meso scale combustor* 3 digunakan diameter *outlet* (D2) sebesar 6 mm. Hal ini dilakukan guna untuk mendapatkan optimalisasi pembakaran suatu teknologi konversi energi yang lebih efisien, hemat bahan bakar, praktis, dan dapat digunakan sebagai sumber energi pengganti baterai.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian yang telah dijelaskan pada latar belakang, maka rumusan masalah dari penelitian ini adalah bagaimanakah pengaruh dari ketinggian *sudden expansion* terhadap karakteristik nyala api pada *meso scale combustor* dengan *sudden expansion*.

1.3 Batasan Masalah

Dalam penyusunan penelitian ini terdapat batasan – batasan yang akan disampaikan agar tidak meluas pada bahasan yang lain, yaitu

1. Dalam penelitian ini karakteristik nyala api yang dimaksud adalah *flame stability limit* (dalam bentuk grafik *flammability limit*) dan foto visualisasi nyala api (tampak depan) yang terjadi pada pembakaran dalam *meso scale combustor* dengan *sudden expansion*.
2. Hanya mengamati pengaruh dari adanya variasi ukuran ketinggian *step* pada *meso scale combustor* dengan *sudden expansion*.
3. Bahan bakar yang digunakan adalah *Liquified Petroleum Gas* (LPG), dengan pengoksidator udara.
4. Kecepatan aliran diasumsikan dalam *steady state*.

1.4 Tujuan dan Manfaat

1.4.1 Tujuan

Dari penelitian yang dilakukan ini peneliti memiliki beberapa tujuan, yaitu

1. Untuk mengetahui pengaruh ketinggian *step* terhadap nyala api yang terjadi pada *meso scale combustor* dengan *sudden expansion*.
2. Untuk mengetahui nilai *range* pada grafik *flammability limit* yang terbentuk akibat pembakaran dalam *meso scale combustor* dengan *sudden expansion* pada masing – masing variasi ketinggian *step*.
3. Untuk mengetahui bentuk visualisasi (foto tampak depan) nyala api yang terbentuk pada pembakaran dalam *meso scale combustor* dengan *sudden expansion* pada masing – masing variasi ketinggian *step*.

1.4.2 Manfaat

Manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini adalah

1. Dapat mengetahui pengaruh dari perubahan ketinggian *step* terhadap nyala api yang terbentuk dalam *meso scale combustor* dengan *sudden expansion*.
2. Dapat mengetahui *range* nilai dari grafik *flammability limit* yang terbentuk pada *meso scale combustor* dengan *sudden expansion* pada masing – masing variasi ketinggian *step*.
3. Dapat mengetahui bentuk visualisasi (foto tampak depan) nyala api yang terbentuk pada proses pembakaran yang terjadi dalam *meso scale combustor* dengan *sudden expansion* pada masing – masing variasi ketinggian *step*.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Micro Power Generator* (MPG)

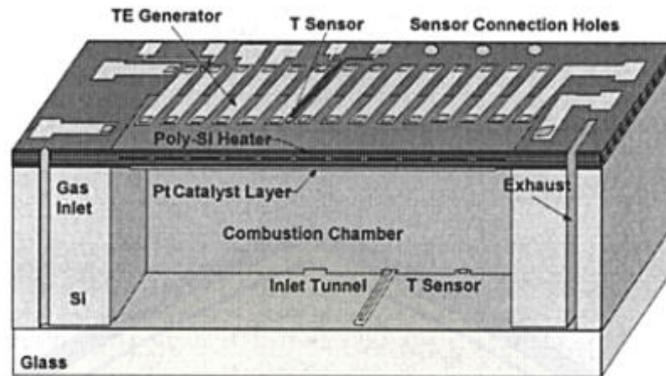
Micro power generator adalah suatu alat untuk membangkitkan energi dalam skala pembangkit yang sangat kecil (Raditya, 2013). *Micro power generator* sendiri pada dasarnya terbagi menjadi dua jenis, diantaranya adalah *micro power generator* yang menggunakan siklus daya konvensional dan *micro power generator* dengan menggunakan modul pengkonversi energi termal menjadi energi listrik (*termophotovoltaic* atau *termoelectric*). Perbedaan kedua *micro power generator* ini terletak dari prinsip kerja pembangkitan energi.

2.1.1 Klasifikasi *Micro Power Generator* (MPG)

Berdasarkan dari prinsip kerja *micro power generator* Fernandes (2002), mengklasifikasikan tipe-tipe *combustor* menjadi dua jenis, yaitu *Thermoelectric Micro Power Generator* (TE) dan *micro gas turbine generator*. Sedangkan Yang (2005), menambahkan tipe *micro power generator* yang menggunakan perubahan aliran *photon* menjadi energi listrik atau biasa disebut dengan *micro-thermophotovoltaic power generator* (TPV).

a. *Thermoelectric Micro Power Generator*

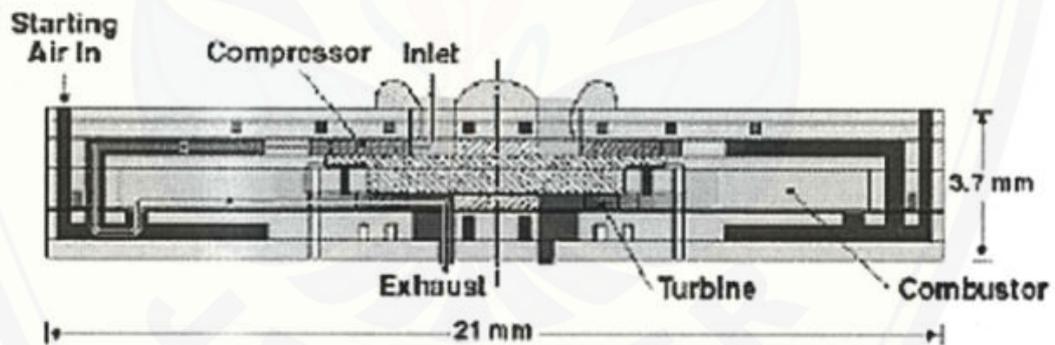
Thermoelectric Micro Power Generator merupakan salah satu tipe pembangkit energi berskala mikro yang memanfaatkan sistem pembakaran beberapa bahan katalis sebagai sumber energinya diantaranya terbuat dari bahan keramik alumina dan platinum. Proses pembakaran tersebut akan menyebabkan terjadinya reaksi kimia pada bahan-bahan katalis tersebut sehingga menghasilkan energi yang nantinya akan dimanfaatkan sebagai energi listrik (Fernandes, 2002).

Gambar 2.1 *Thermoelectric Micro Power Generator*

(Sumber : Fernandes 2002)

b. *Micro Gas Turbine Generator*

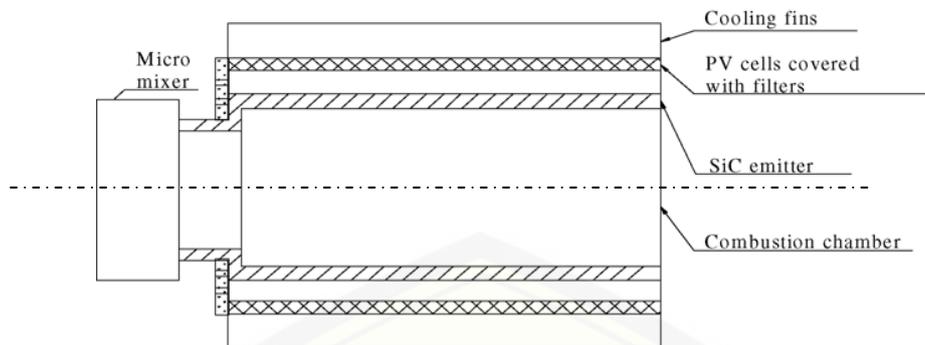
Energi listrik pada *micro power generator* jenis ini memanfaatkan gerak putar turbin yang terhubung langsung pada *micro power generator*. Sumber energi penggerakannya berasal dari pembakaran campuran bahan bakar dan udara pada *combustor* (Fernandes, 2002).

Gambar 2.2 *Micro Gas Turbine Generator*

(Sumber : Fernandes 2002)

c. *Micro-Thermophotovoltaic Power Generator*

Micro-Thermophotovoltaic Power Generator ini memanfaatkan pergerakan *photon - photon* pada konverter energi (*emitter*) dari panas hasil pembakaran campuran bahan bakar dan udara pada *combustor* sehingga menjadi energi listrik (Yang, 2002).

Gambar 2.3 *Micro-Thermophotovoltaic Power Generator*

(Sumber : Yang, 2002)

2.2 Combustor (Meso-scale Combustor)

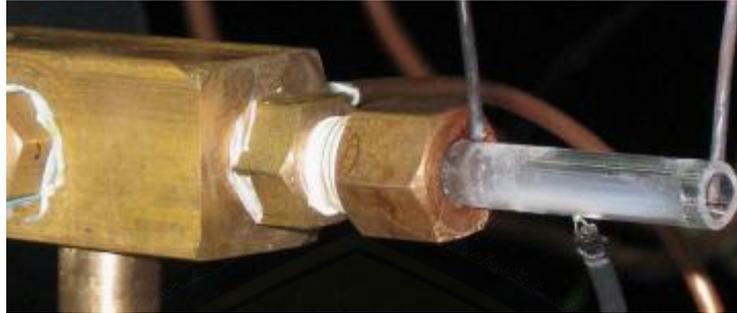
Microcombustor terbagi menjadi beragam macam jenis dan ukuran yang ada. Akan tetapi secara umum *micro combustor* diklasifikasikan secara sederhana menjadi dua yaitu *micro-scale combustor* dan *meso-scale combustor*. Pengklasifikasian tersebut berdasarkan besarnya celah pada ruang bakar. Untuk *micro-scale combustor* celah ruang bakar memiliki ukuran kurang dari 1 mm, sedangkan untuk *meso-scale combustor* memiliki ukuran lebih dari 1 mm, namun karakteristik pembakaran masih menyerupai *micro combustion* (Maruta, 2011).

Tabel 2.1 Klasifikasi combustor berdasarkan ukurannya

Definition of micro-scale and mesoscale combustion using different length scales.

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

(sumber : Maruta, 2011)



Gambar 2.4 *Micro combustor*

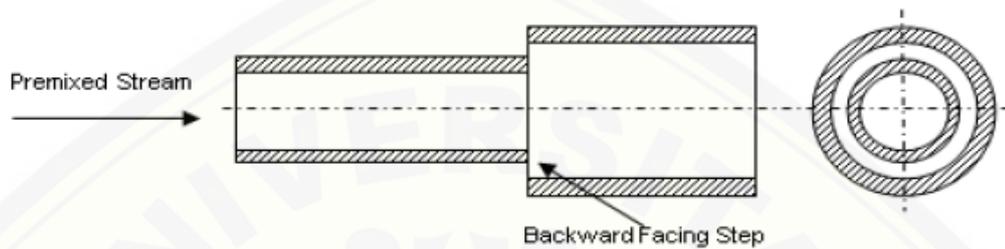
(Sumber : Baigmohammadi, 2015)

Mesoscale combustor merupakan ruang bakar yang mempunyai ukuran yang sangat kecil bila dibandingkan dengan ruang bakar pada umumnya seperti yang kita ketahui selama ini seperti ruang bakar motor bensin maupun motor diesel. *Mesoscale combustor* mempunyai ukuran yang sedikit lebih besar daripada *micro combustor*. Dimana salah satu batasan ukuran *micro combustor* adalah skala panjangnya lebih kecil dari *quenching distance* bahan bakar digunakan. *Quenching distance* merupakan jarak minimum dimana masih bisa terjadi *flame propagation*. Sumber energi dari *micro-power generator* adalah energi termal dari *micro* dan *mesoscale combustor* yang nantinya dikonversi menjadi energi listrik (Mikami, 2012)

2.3 Sudden Expansion / Backward Facing Step

Permasalahan utama dalam *mesoscale combustor* adalah mendapatkan keseimbangan antara kestabilan api pembakaran dan memaksimalkan *output* panas. Pada *meso-scale combustor* memiliki perbandingan luas permukaan terhadap *volume* yang tinggi sehingga akan meningkatkan *heat losses*, yang mana hal ini dapat menyebabkan pembakaran yang tidak stabil dan dapat memadamkan api. *Residence time* pada *combustor* juga rendah yang menyebabkan kesulitan dalam keberlanjutan pembakaran. Pada penelitian Yang, *et, al* pada tahun 2002 menyatakan bahwa *backward facing step/ sudden expansion* pada *combustor* mampu mensirkulasikan pencampuran reaktan pada pembakaran di area dekat dinding *combustor*, sehingga meningkatkan proses pencampuran pembakaran di

sekitar tepi tabung *combustor*, serta membuat pembakaran lebih komplit dan stabil. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa *mesoscale combustor* dengan *backward facing step* sangat efektif untuk aplikasi konversi energi secara langsung dimana temperatur panas dinding tersebut yang diperlukan sebagai sumber panas, seperti pada aplikasi *Thermoelectric Power Generator* (Sari, 2015).



Gambar 2.5 *Backward facing step/ Sudden expansion*

(sumber : Li, *et al.*, 2005)

2.4 Pembakaran

Pembakaran merupakan reaksi kimia yang sangat rumit dan cepat antara udara dan bahan bakar disertai dengan produksi panas, atau panas dan cahaya. Pembakaran sempurna terjadi hanya jika ada pasokan oksigen dan bahan bakar yang cukup. (UNEP, 2006)

Ketika terjadi pembakaran kimia, ikatan-ikatan di dalam molekul-molekul dari reaktan-reaktan menjadi terputus dan atom-atom dan elektron-elektron tersusun ulang menjadi produk-produk. Di dalam reaksi pembakaran, elemen-elemen bahan bakar yang mudah terbakar mengalami proses oksidasi yang cepat sehingga menghasilkan pelepasan energi bersamaan dengan terbentuknya produk hasil pembakaran. Tiga elemen kimia utama yang mudah terbakar di dalam bahan bakar yang paling umum ditemukan adalah karbon, hidrogen, dan sulfur. Sulfur biasanya merupakan kontributor yang relatif tidak penting dalam pelepasan energi, tapi dapat menjadi signifikan karena permasalahan dengan polusi dan korosi yang disebabkan. (Moran dan Saphiro, 2004:328-329).

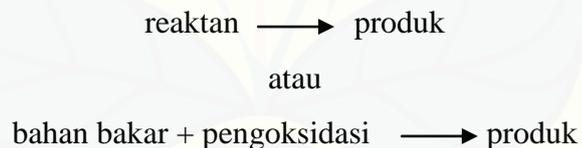
Pembakaran dituntaskan ketika semua karbon yang terkandung di dalam bahan bakar telah habis terbakar menjadi karbon dioksida, semua hidrogen telah

habis terbakar menjadi air, dan semua sulfur telah habis terbakar menjadi sulfur dioksida, dan semua elemen-elemen yang mudah terbakar lainnya telah teroksidasi. Jika kondisi tersebut tidak terpenuhi, pembakaran dikatakan tidak tuntas. (Moran dan Saphiro, 2004:328-329).

Oksigen (O₂) merupakan salah satu elemen bumi paling umum yang jumlahnya mencapai 20.9% dari udara. Bahan bakar gas akan terbakar pada keadaan normal jika terdapat udara yang cukup. Hampir 79% udara (tanpa adanya oksigen) merupakan nitrogen, dan sisanya merupakan elemen lainnya. Nitrogen dianggap sebagai pengencer yang menurunkan suhu yang harus ada untuk mencapai oksigen yang dibutuhkan untuk pembakaran. Nitrogen mengurangi efisiensi pembakaran dengan cara menyerap panas dari pembakaran bahan bakar dan mengencerkan gas buang. Nitrogen ini juga dapat bergabung dengan oksigen (terutama pada suhu nyala yang tinggi) untuk menghasilkan oksida nitrogen (NO_x), yang merupakan pencemar beracun. (UNEP, 2006)

2.4.1 Reaksi Kimia Dalam Pembakaran

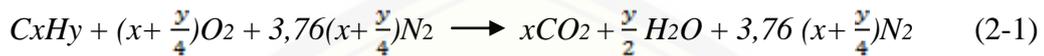
Untuk reaksi-reaksi pembakaran antara udara dan bahan bakar dapat dinyatakan dalam reaksi kimia sebagai berikut :



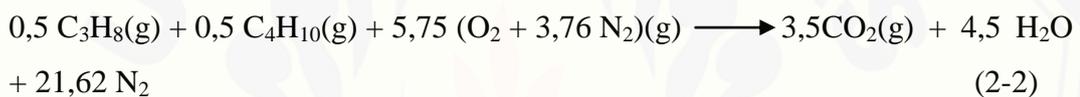
Ketika menangani reaksi kimia, perlu diingat bahwa terjadi konservasi massa, sehingga massa dari produk berjumlah sama dengan massa dari reaktan. Massa total dari setiap elemen kimia harus sama pada kedua sisi dari persamaan, elemen-elemen tersebut terkandung di dalam senyawa kimia yang berbeda di dalam reaktan dan produk. Akan tetapi, jumlah mol dari produk dapat berbeda dengan jumlah mol reaktan. (Moran dan Saphiro, 2004:329)

Nilai kandungan beberapa gas pada udara kering dapat dikatakan bahwa kandungan gas terbesar adalah Nitrogen (N₂) dengan nilai sebesar 79% dan kandungan terbesar kedua yaitu Oksigen (O₂) dengan nilai sebesar 21% dengan asumsi bahwa gas yang lain diabaikan karena presentase kandungan yang terlalu

kecil. Dengan demikian setiap penggunaan 1 mol (O_2) yang terkandung di udara pada suatu reaksi pembakaran, secara otomatis akan mencakup $\left(\frac{79}{21}\right) = 3,76$ mol (N_2). Maka reaksi stoikiometrik pembakaran untuk hidrokarbon C_xH_y dapat di tulis dengan persamaan (2-1):



Setelah mengetahui persamaan reaksi untuk pembakaran stoikiometrik, maka reaksi pembakaran untuk LPG yang terdiri dari 50% propana dan 50% butana, dinyatakan dalam persamaan (2-2):



2.4.2 Air Fuel Ratio (AFR)

Dua parameter yang sering digunakan untuk memberikan kuantifikasi jumlah bahan bakar dan udara di dalam proses pembakaran tertentu adalah rasio udara-bahan bakar dan sebaliknya rasio bahan bakar-udara. Rasio udara-bahan bakar singkatnya adalah rasio jumlah udara di dalam sebuah reaksi terhadap jumlah bahan bakar. Rasio ini dapat dituliskan dengan basis molar (mol udara dibagi dengan mol bahan bakar) atau dengan basis massa (massa udara dibagi dengan massa bahan bakar). (Moran dan Saphiro, 2004:330)

Sedangkan persamaan yang digunakan untuk menyatakan nilai rasio udara-bahan bakar adalah sebagai berikut:

$$\frac{\text{massaudara}}{\text{massabahanbakar}} = \frac{\text{moludara} \times M_{\text{udara}}}{\text{molbahanbakar} \times M_{\text{bahanbakar}}}$$

$$= \frac{\text{moludara}}{\text{molbahanbakar}} \left(\frac{M_{\text{udara}}}{M_{\text{bahanbakar}}} \right)$$

atau

$$AF = \overline{AF} \left(\frac{M_{\text{udara}}}{M_{\text{bahanbakar}}} \right) \quad (2-4)$$

Dimana \overline{AF} adalah rasio udara-bahan bakar dengan basis molar dan AF adalah rasio udara-bahan bakar dengan basis massa.

2.4.3 Equivalence Ratio (Φ)

Equivalence ratio merupakan nilai perbandingan antara rasio campuran bahan bakar dan udara stoikiometrik terhadap rasio campuran udara dan bahan bakar aktual.

$$\Phi = \frac{AF_{stoic}}{AF_{actual}} \quad (2-5)$$

dimana :

Φ = *Equivalence Ratio*

AF_{stoic} = rasio udara dan bahan bakar dengan kondisi stoikiometrik

AF_{aktual} = rasio udara dan bahan bakar dengan kondisi aktual

Menurut nilai rasio ekuivalen, jenis campuran udara dan bahan bakar dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis yaitu

- a. $\Phi > 1$ Terdapat kelebihan bahan bakar dan campurannya disebut sebagai campuran kaya bahan bakar (*fuel-rich mixture*)
- b. $\Phi < 1$ disebut sebagai campuran miskin bahan bakar (*fuel-lean mixture*)
- c. $\Phi = 1$ adalah campuran stoikiometrik

2.4.4 Flammability Limit

Dalam proses pembakaran terdapat kisaran pencampuran bahan bakar dan oksidator yang menyebabkan terjadinya nyala api. Kisaran (*flammability limit*) dibatasi oleh batas bawah mampu nyala dan batas atas mampu nyala atau sering lebih dikenal sebagai *lower flammability limit* (LFL) dan *upper flammability limit* (UFL). *Lower flammability limit* (LFL) adalah konsentrasi gas terendah dimana kandungan bahan bakar tidak akan cukup untuk mendukung proses pembakaran. Sedangkan *upper flammability limit* (UFL) adalah konsentrasi gas tertinggi dimana kandungan oksigen tidak akan cukup untuk mendukung proses pembakaran. Antara dua batas LFL dan UFL merupakan kondisi rentang mudah terbakar pada suatu gas, dimana gas dan udara dalam komposisi yang tepat untuk dibakar saat dinyalakan (Sari, 2015).

Api akan stabil bila konsentrasi campuran bahan bakar dengan oksidator berada pada komposisi yang tepat, hal ini terjadi bila kecepatan reaktan (V_U) sama dengan kecepatan rambat api (S_L) ($V_U = S_L$). *flashback* terjadi ketika kecepatan pembakaran lebih besar daripada kecepatan campuran udara-bahan bakar, sehingga nyala api masuk ke saluran campuran reaktan menuju tabung bahan bakar (sumber bahan bakar), sedangkan *Lift-off* adalah kondisi dimana nyala api tidak menyentuh permukaan mulut tabung pembakar, tetapi stabil pada jarak dari ujung tabung pembakar. Pada kecepatan reaktan rendah, posisi api akan mendekati mulut tabung pembakaran dan menyentuhnya. Namun jika kecepatan reaktan ditingkatkan, maka posisi hulu api sudah tidak lagi menempel melainkan menjauh dari mulut *combustor*. Untuk mendapatkan *combustor* dengan densitas tinggi harus bisa mendapatkan kecepatan pembakaran yang lebih tinggi sehingga api tetap stabil pada kecepatan reaktan yang tinggi dan memperluas daerah reaksi dalam *combustor* (Sari, 2015).

2.5 *Liquified Petroleum Gas (LPG)*

Liquified Petroleum Gas (LPG) terdiri dari campuran utama propana dan butana dengan sedikit persentase hidrokarbon tidak jenuh (*propilen* dan *butilene*) dan beberapa fraksi C_2 yang lebih ringan dan C_5 yang lebih berat. Senyawa yang terdapat dalam LPG adalah propana (C_3H_8), *propilen* (C_3H_6), normal dan iso-butan (C_4H_{10}) dan *butilen* (C_4H_8). Menurut Saptoadi (2010), berdasarkan spesifikasi LPG yang dikeluarkan oleh Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi No. 26525.K/10/DJM.T/2009 komposisi produk LPG minimal mengandung campuran propane dan butane sebesar 97% dan maksimum 2% merupakan campuran petana dan hidrokarbon yang lebih berat. Batasan komposisi butana dan *propane* dalam spesifikasi tersebut dibatasi dengan parameter maksimum tekanan uap yang ditentukan sebesar 145 psi. Komposisi campuran LPG Pertamina mengandung 50% *propane* dan 50% *butane* dan telah sesuai dengan ketentuan tersebut baik dari aspek komposisi maupun tekanan uapnya yang telah diperhitungkan sesuai dengan kalori/daya bakar yang diperlukan.

LPG merupakan campuran dari hidrokarbon tersebut yang berbentuk gas pada tekanan atmosfer, namun dapat diembunkan menjadi bentuk cair pada suhu normal, dengan tekanan yang cukup besar. Walaupun digunakan sebagai gas, namun untuk kenyamanan dan kemudahannya, disimpan dan ditransport dalam bentuk cair dengan tekanan tertentu. LPG cair, jika menguap membentuk gas dengan volume sekitar 250 kali.

Uap LPG lebih berat dari udara, karena butana beratnya sekitar dua kali berat udara dan propana sekitar satu setengah kali berat udara. Sehingga, uap dapat mengalir didekat permukaan tanah dan turun hingga ke tingkat yang paling rendah dari lingkungan dan dapat terbakar pada jarak tertentu dari sumber kebocoran. Pada udara yang tenang, uap akan tersebar secara perlahan. Lolosnya gas cair walaupun dalam jumlah sedikit, dapat meningkatkan campuran perbandingan volume uap/udara sehingga dapat menyebabkan bahaya. Untuk membantu pendeteksian kebocoran ke atmosfer, LPG biasanya ditambah bahan yang berbau. Harus tersedia ventilasi yang memadai didekat permukaan tanah pada tempat penyimpanan LPG. Karena alasan di atas, sebaiknya tidak menyimpan tabung LPG di gudang bawah tanah atau lantai bawah tanah yang tidak memiliki ventilasi udara.

2.6 Penelitian Sebelumnya

Rohadi A. I. (2016) telah melakukan penelitian pada *meso scale combustor* dengan mengamati pengaruh panjang saluran *sudden expansion* terhadap karakteristik pembakaran. Dari penelitian tersebut telah diperoleh tentang pengaruh panjang saluran *sudden expansion* bahwa panjang saluran *sudden expansion* akan mempengaruhi kecerahan warna nyala api, semakin panjang saluran *sudden expansion* juga akan mempengaruhi letak nyala api dalam saluran *sudden expansion*, dalam penelitian tersebut letak nyala api yang paling mendekati saluran *sudden expansion* adalah saluran dengan panjang 20 mm.

Penelitian lainnya tentang *meso scale combustor* juga telah dilakukan oleh Zulkarnain R. N. (2017) untuk mengetahui pengaruh perubahan diameter inlet pada *meso scale combustor* terhadap karakteristik pembakaran. Dalam penelitian

tersebut dilakukan variasi diameter inlet yaitu untuk diameter inlet 3,5 mm dan diameter inlet 4,5 mm, dari hasil penelitian ditunjukkan bahwa diameter inlet 3,5 mm rentang daerah *flammability limit* yang terbentuk jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan jumlah rentang daerah *flammability limit* yang terjadi pada diameter inlet 4,5 mm, kemudian panas temperatur api juga jauh lebih tinggi pada diameter inlet yang lebih besar.

Yang *et al.* (2002) didalam penelitiannya tentang *combustor* menyatakan bahwa pembakaran yang dilakukan dalam sebuah *combustor* mampu mencapai stabil apabila terdapat *backward facing step* atau bisa disebut *sudden expansion*. Selain itu pada suatu *combustor* yang diberikan *sudden expansion* akan terjadi pencampuran bahan bakar dan udara yang lebih baik, waktu tinggal reaktan dalam reaksi pembakaran bisa bertahan lebih lama. *Sudden expansion* sendiri merupakan pembesaran diameter *combustor* dimana antara kedua sisi *combustor* yakni inlet dan outlet memiliki diameter yang berbeda. Dengan diameter outlet lebih besar daripada diameter inlet ($D_{inlet} < D_{outlet}$).

Dengan adanya *sudden expansion* dalam *combustor* percampuran bahan bakar menjadi lebih baik, sehingga mampu meningkatkan waktu tinggal reaktan yang akan berpengaruh pada panas yang dihasilkan pada proses pembakaran yang terjadi, hal ini diharapkan mampu menjadikan nilai efektivitas dari *combustor* tersebut dapat meningkat.

2.7 Hipotesa

Pembakaran pada *sudden expansion meso-scale combustor* dengan variasi ketinggian *sudden expansion* akan menyebabkan perubahan pada daerah *flammability limit*. Jika semakin besar ketinggian *sudden expansion* pada *meso scale combustor* maka daerah *flammability limit* yang terbentuk semakin luas, semakin meningkatnya daerah *flammability limit* pada *meso scale combustor*, maka grafik yang akan terbentuk akan semakin lebar areanya. Perubahan warna pada nyala api juga akan tampak semakin mendekati warna nyala yang lebih cerah pada *meso scale combustor* dengan *sudden expansion* yang memiliki ketinggian *sudden expansion* yang lebih besar.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Pada penelitian ini digunakan metode ekperimental (*experimental reseach*) dimana dilakukan pengamatan secara langsung terhadap objek yang diteliti. Data yang diperoleh pada penelitian ini akan dilakukan perbandingan dan nantinya akan diambil suatu kesimpulan.

3.2 Variabel Penelitian

Pada penelitian ini digunakan 2 jenis variabel yang di dibedakan menjadi variabel bebas dan variabel terikat. Masing – masing dari variabel akan dijelaskan sebagai berikut :

3.2.1 Variabel Bebas (*Independent Variable*)

Variabel bebas merupakan variabel yang ditentukan oleh peneliti yang nantinya akan mempengaruhi dari hasil penilitian yang dilakukan. Bentuk dari variabel bebas yang digunakan pada penelitian ini adalah :

a. Variasi diameter *outlet combustor*

Variasi ukuran ketinggian step yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada tabel berikut :

Tabel 3.1 Variasi Ukuran Ketinggian Step

no	Ukuran Step	Din	Dout
1	0,25 mm	4,5 mm	5 mm
2	0,5 mm	4,5 mm	5,5 mm
3	0,75 mm	4,5 mm	6 mm

b. Debit bahan bakar (Q_f)

Debit bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini disesuaikan dengan skala yang terdapat pada *flowmeter* bahan bakar yang digunakan dengan *minimum flowlimit* 2 ml/min dan *maximum flowlimit* 20ml/min.

c. Debit udara (Q_a)

Debit udara yang digunakan pada penelitian ini disesuaikan dengan skala yang terdapat pada *flowmeter* yang digunakan dengan *minimum flowlimit* 50ml/min dan *maximum flowlimit* 500ml/min, dengan besaran menyesuaikan kestabilan nyala api pada suatu variasi debit bahan bakar.

3.2.2 Variabel Terikat (*Dependent Variable*)

Variabel terikat adalah variabel yang nilainya dipengaruhi oleh variasi yang digunakan pada variabel bebas. Variabel bebas yang terdapat pada penelitian ini, yaitu :

a. Batas stabilitas nyala api (*Flammability Limit*)

Batas stabilitas nyala api atau *flammability limit* merupakan suatu titik dimana api dapat menyala secara stabil dan bertahan untuk waktu yang telah ditentukan yaitu 10 menit.

b. Visualisasi bentuk nyala api

Visualisasi dari bentuk nyala api atau foto bentuk nyala api yang terjadi pada kegiatan penelitian dengan tampilan tampak depan.

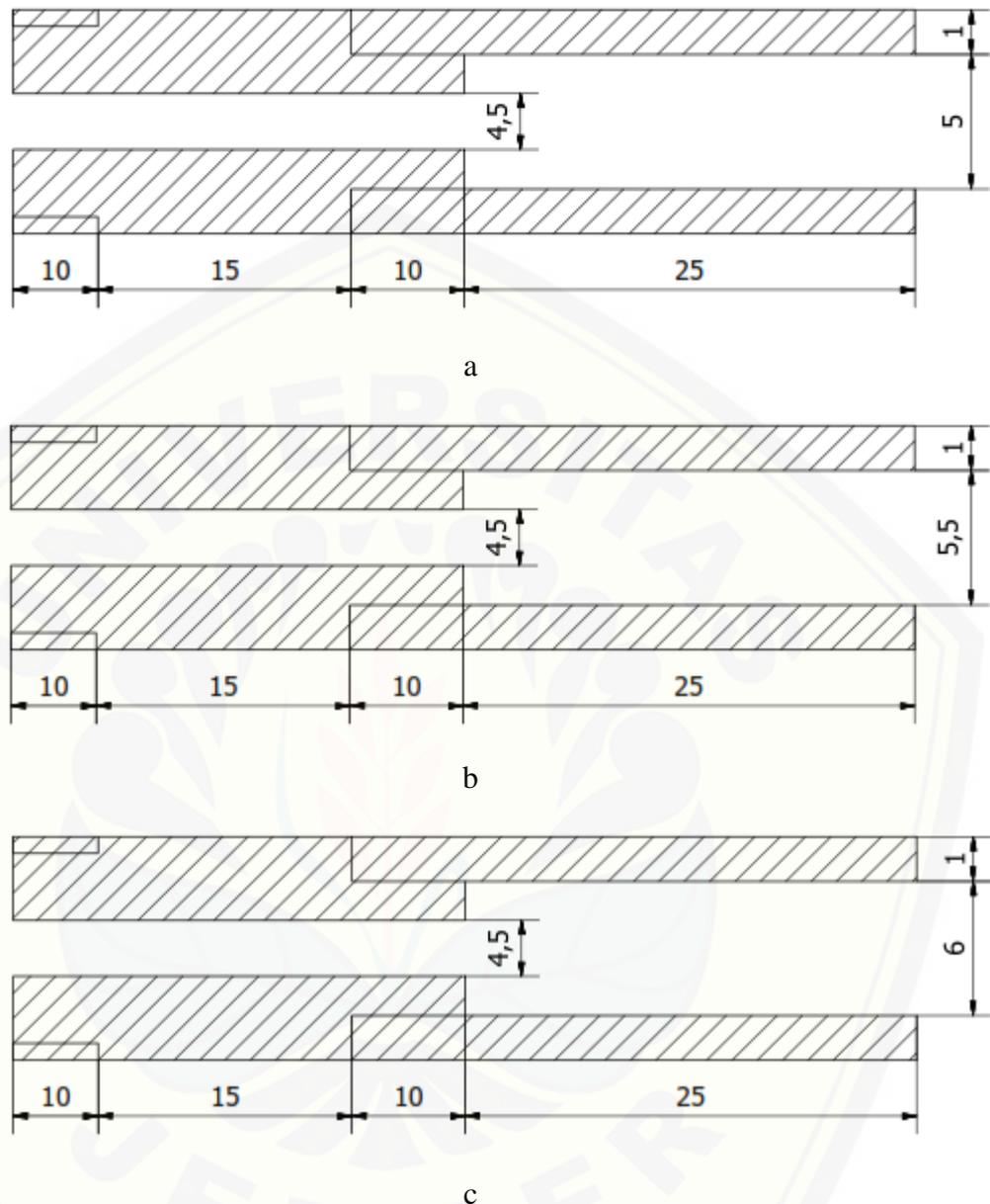
3.3 Alat dan Bahan

3.3.1 Alat

Alat – alat yang digunakan untuk penilitan ini akan dijelaskan sebagai berikut :

1. *Meso Scale Combustor*

Meso Scale Combustor yang digunakan pada penelitian ini adalah combustor dengan bahan *copper steel* pada sisi *inlet* dan juga pada sisi *sudden expansion*. Dimensi *combustor* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.1.



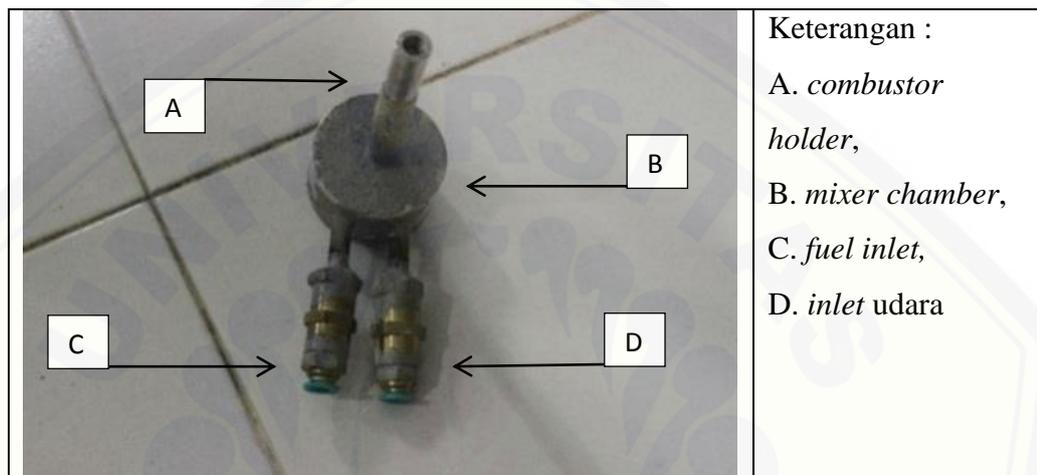
Gambar 3.1 *Meso Scale Combustor* : a. diameter out 5 mm ; b. diameter out 5,5 mm ; c. diameter out 6 mm.

2. *Combustor Holder*

Combustor holder merupakan tempat dudukan *meso scale combustor* dan *mixer* yang digunakan pada penelitian ini sebagai *stabilizer* alat uji agar terhindar dari guncangan dan getaran selama proses pengambilan data.

3. *Mixer*

Mixer digunakan sebagai tempat untuk mencampurkan udara dan bahan bakar yang diperlukan selama proses pembakaran pada *meso scale combustor*. Diperlukannya *mixer* agar terjadi campuran bahan bakar yang homogen sehingga dapat menunjang proses pembakaran. Pada gambar 3.2 ditunjukkan bentuk *mixer*.



Gambar 3.2 *Mixer*

4. *Flowmeter*

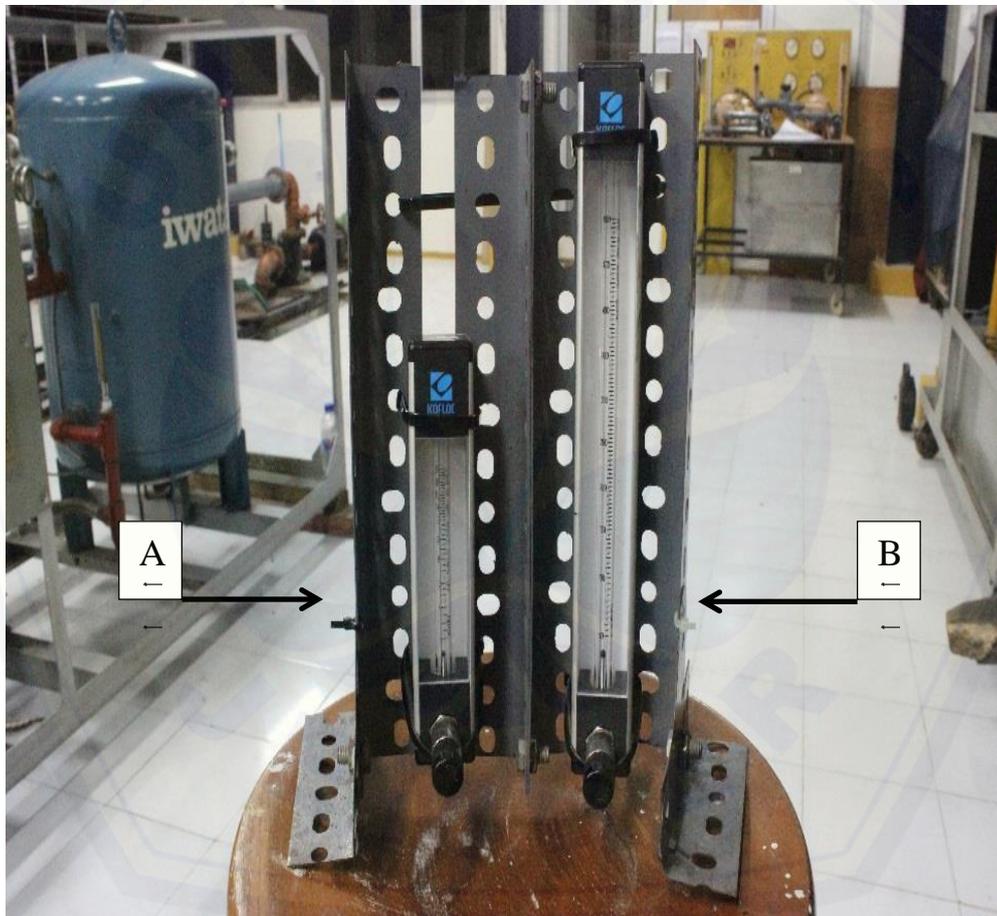
Flowmeter merupakan alat yang digunakan untuk mengatur debit aliran yang digunakan dalam proses pembakaran pada *meso scale combustor* dalam penelitian ini. *Flowmeter* yang digunakan dibedakan menjadi, *flowmeter* udara dan *flowmeter* bahan bakar, berikut spesifikasi dari masing – masing *flowmeter* yang digunakan :

A. *Flowmeter* Bahan Bakar

- a. Merek : Kofloc
- b. Seri : RK – 1250
- c. Jenis : *Flowmeter* Butana
- d. Tekanan kerja : 0,1 Mpa
- e. Aliran min. : 2 ml/min
- f. Aliran maks. : 20 ml/min
- g. Skala terkecil : 0,5 ml/min

B. *Flowmeter* Udara

- a. Merek : Kofloc
- b. Seri : RK – 1250
- c. Jenis : *Flowmeter* udara
- d. Tekanan kerja : 0,1 Mpa
- e. Aliran min. : 50 ml/min
- f. Aliran maks. : 500 ml/min
- g. Skala terkecil : 5 ml/min



Gambar 3.3 *Flowmeter* Udara dan Butana

5. *Pisco Tube* (selang bahan bakar dan udara)



Gambar 3.4 selang bahan bakar dan udara

6. *Regulator LPG*



Gambar 3.5 regulator LPG

7. Kompresor

Udara yang digunakan untuk proses pembakaran pada *meso scale combustor* dalam penelitian ini adalah udara yang disuplai dari kompresor. Penggunaan kompresor ditujukan untuk mempermudah dalam mengontrol tekanan udara dalam memvariasikan aliran udara. Bentuk dari kompresor ditunjukkan pada gambar 3.7



Gambar 3.6 Kompresor

8. Pemantik

Pemantik digunakan sebagai awalan untuk proses pembakaran yang dilakukan di *meso scale combustor*.

9. Kamera

Kamera digunakan sebagai alat untuk pengambilan data visualisasi dalam proses pengujian *meso scale combustor*. Kamera yang digunakan adalah kamera DSLR (*Digital Single Lens Reflex*)

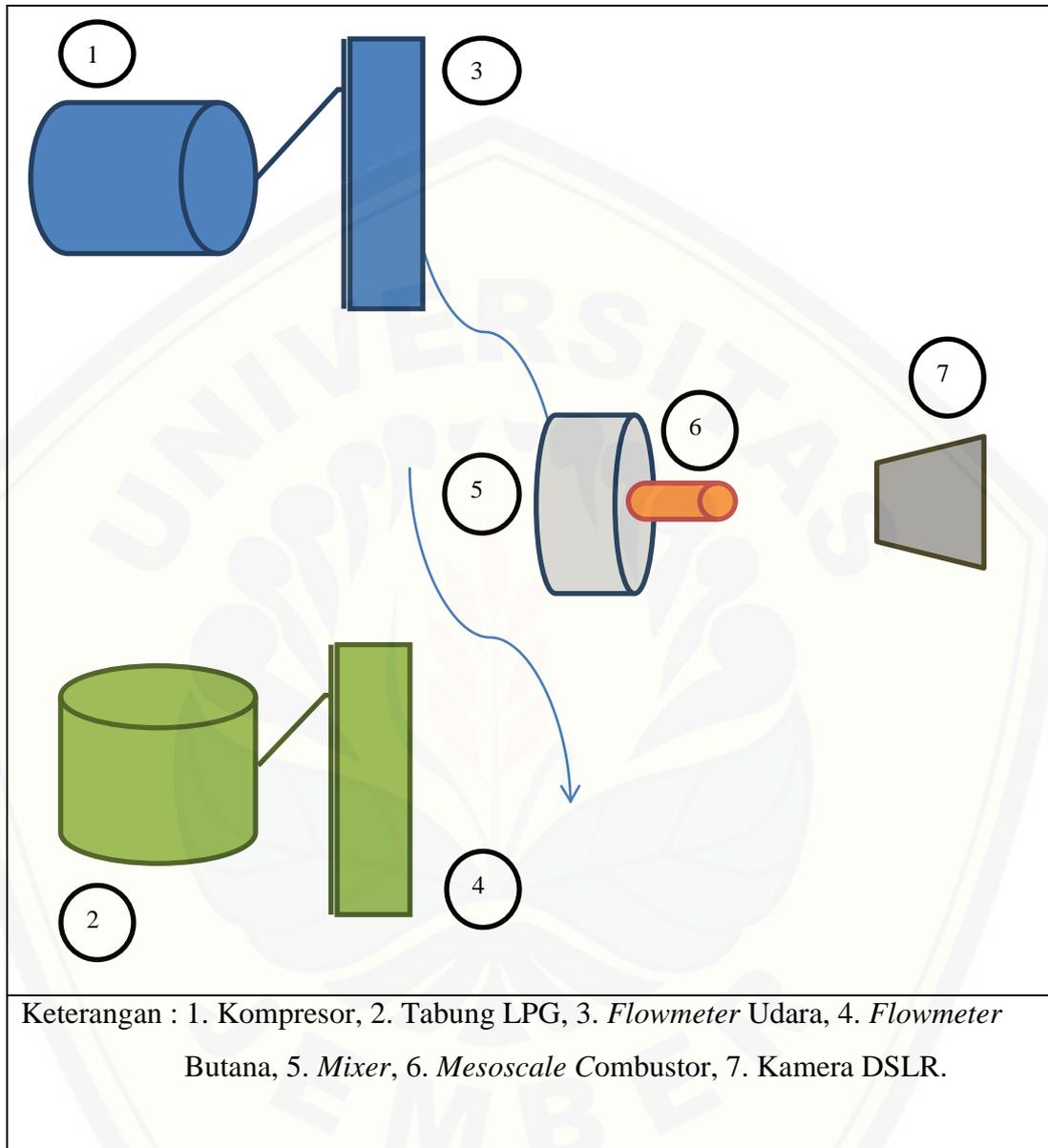
3.3.2 Bahan

Bahan – bahan yang digunakan pada penelitian ini akan dijelaskan sebagai berikut :

1. Gas LPG

Gas LPG digunakan pada penelitian ini sebagai sumber bahan bakar dalam proses pembakaran pada *meso scale combustor*. LPG yang digunakan terdiri dari 50% gas propana dan 50% gas butana.

3.4 Skema Alat Uji Penelitian



Gambar 3.7 Skema alat uji

Pada gambar 3.8 ditunjukkan skema alat uji yang digunakan pada pengambilan data penelitian pembakaran pada *meso scale combustor*. Bahan bakar merupakan gas LPG dengan 50% gas butana dan 50% gas propana, sedangkan udara diperoleh dari kompresor. Bahan bakar dan udara disalurkan melalui *flowmeter* yang berbeda, yaitu *flowmeter* bahan bakar dan *flowmeter*

udara. Dari masing – masing *flowmeter* bahan bakar dan udara ditampung pada *mixer* kemudian terjadi proses penyampuran antara bahan bakar dan udara agar diperoleh campuran bahan bakar yang homogen. Campuran bahan bakar dialirkan menuju *meso scale combustor* untuk selanjutnya dilakukan proses pembakaran.

Pengambilan data visualisasi nyala api dilakukan dengan menggunakan kamera DSLR yang ditempatkan pada sisi depan meso scale combustor. Pengambilan data visualisasi dilakukan untuk mengetahui warna nyala api yang terjadi pada masing – masing meso scale combustor yang dilakukan pengujian.

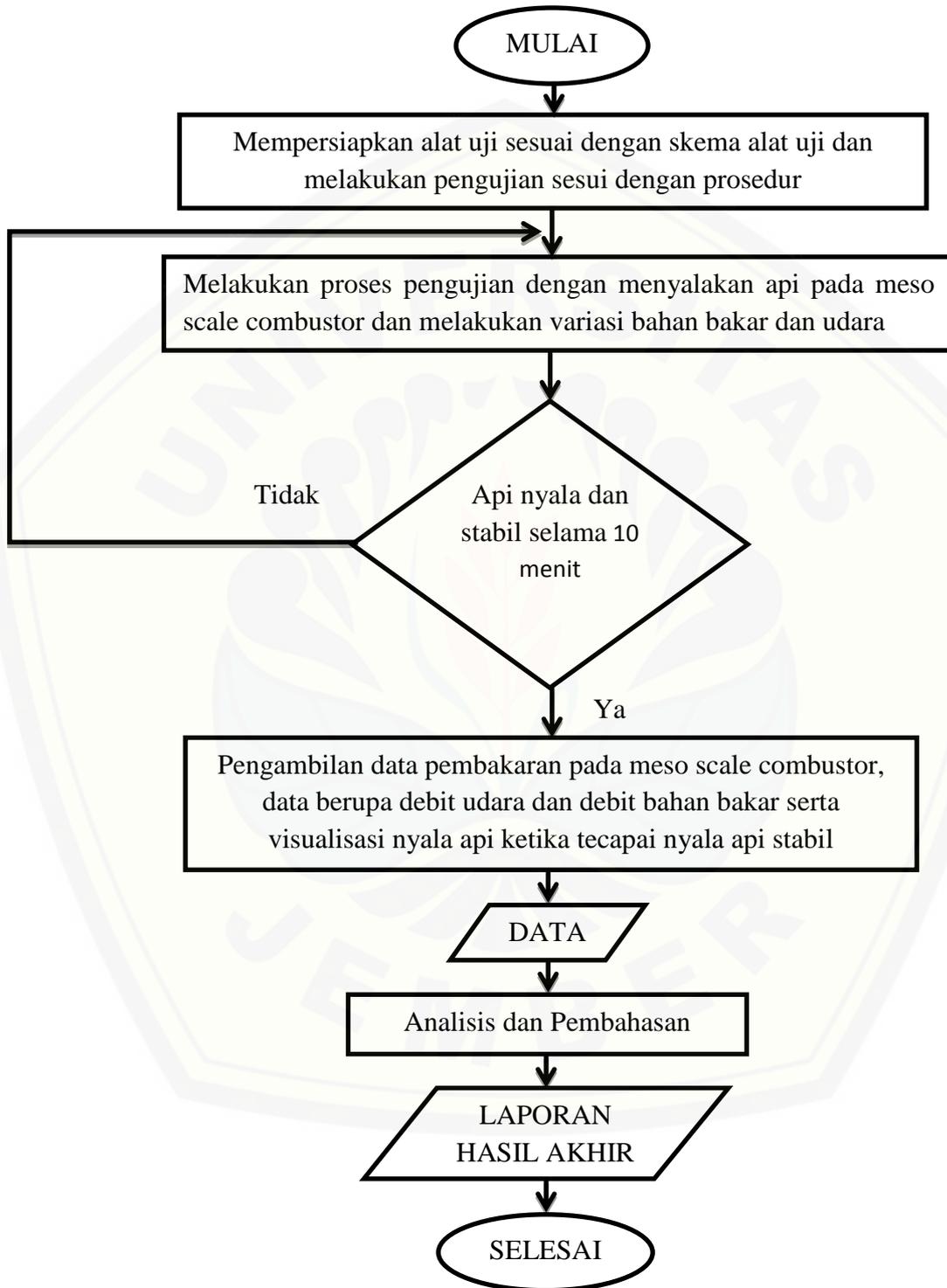
3.5 Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini pengambilan data dilaksanakan sesuai dengan prosedur yang telah ditentukan, adapun prosedur pengambilan data pada penelitian ini yang akan diuraikan sebagai berikut :

1. Mempersiapkan alat uji sesuai dengan skema yang terdapat pada gambar 3.8, yaitu dengan menghubungkan saluran aliran udara dari kompresor melalui *flowmeter* udara dan saluran aliran bahan bakar dari tabung gas LPG melalui *flowmeter* bahan bakar menuju ke *mixer* dan pastikan tidak terdapat kebocoran pada masing – masing saluran.
2. Mempersiapkan *meso scale combustor* dan memasangkannya pada *combustor holder*.
3. Melakukan pengaturan pada *flowmeter* udara dengan membuka saluran udara pada *flowmeter* dan dari kompresor udara dialirkan menuju *flowmeter*, hingga bola pada *flowmeter* bergerak dan berada pada posisi yang stabil.
4. Melakukan pengaturan pada *flowmeter* bahan bakar dengan membuka saluran bahan bakar pada *flowmeter* dan dari tabung gas LPG dialirkan menuju *flowmeter*, hingga bola pada *flowmeter* bergerak dan berada pada posisi yang stabil.
5. Melakukan proses pembakaran pada meso scale combustor dengan memantikkan api dibagian output combustor disertai dengan mengatur campuran bahan bakar pada *flowmeter* sampai didapatkan keadaan api yang stabil.

6. Memvariasikan debit udara pada proses pembakaran dan menjaga debit bahan bakar untuk tetap konstan agar diperoleh nilai debit udara maksimum dan nilai debit udara minimum.
7. Untuk memperoleh nilai debit udara minimum dilakukan dengan cara menjaga bahan bakar tetap konstan dan mengurangi debit udara hingga mencapai titik dimana api bergerak menjauhi step dan mati.
8. Untuk memperoleh nilai debit campuran bahan bakar maksimum dilakukan dengan cara menjaga bahan bakar tetap konstan dan menambahkan debit udara hingga mencapai titik dimana api bergerak menjauhi step dan mati.
9. Mengamati reaksi pembakaran untuk mengetahui kestabilan nyala api selama 10 menit dalam reaksi pembakaran kaya dan reaksi pembakaran miskin.
10. Mencatat debit udara pada reaksi pembakaran setelah nyala api pada combustor dapat menyala dengan stabil selama 10 menit.
11. Pengulangan pengambilan data dilakukan sebanyak 3 kali untuk kemudian diambil nilai rata – rata. Pengambilan ulang dilakukan sesuai dengan prosedur penelitian yang telah diuraikan.
12. Pengambilan data visualisasi nyala api tampak depan dilakukan dengan cara memotret nyala api pada saat keadaan nyala api dikatakan stabil pada masing – masing combustor.

3.6 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.8 Diagram Alir Penelitian

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian tentang pengaruh tinggi *sudden expansion* terhadap karakteristik nyala api pada *meso scale combustor* dengan *sudden expansion* dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Ketinggian *step* pada *meso scale combustor* dengan *sudden expansion* mempengaruhi karakteristik nyala api (*flammability limit*) yang terjadi pada *meso scale combustor* dengan *sudden expansion*. Semakin besar ketinggian *step* kecepatan aliran dalam *meso scale combustor* dengan *sudden expansion* menjadi semakin meningkat dikarenakan jumlah debit yang mengalir semakin besar untuk mencapai nilai *equivalence ratio* agar api mampu menyala dan bertahan pada *step* di dalam *meso scale combustor* dengan *sudden expansion*.
2. *Range* dari grafik *flammability limit* yang terbentuk pada *meso scale combustor* dengan *sudden expansion* menunjukkan bahwa semakin kecil ketinggian *step* pada *meso scale combustor* maka *range* dari grafik *flammability limit* juga semakin kecil begitu juga sebaliknya pada ketinggian *step* yang lebih besar maka *range* dari grafik *flammability limit* yang terbentuk semakin besar. Hal ini dikarenakan kemampuan api untuk bertahan dan mencapai nyala api pada diameter yang lebih jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan *combustor* yang memiliki diameter yang lebih besar.
3. Visualisasi nyala api pada *meso scale combustor* dengan *sudden expansion* yang nampak pada penelitian ini yaitu untuk *meso scale combustor* dengan *sudden expansion* pada diameter *outlet* yang lebih kecil nampak nyala api yang redup dengan ukuran nyala api yang lebih besar sedangkan pada nyala api yang terbentuk pada diameter *outlet* yang lebih besar nampak lebih cerah dengan ukuran nyala api yang lebih kecil. Warna nyala api yang lebih cerah menunjukkan bahwa campuran bahan bakar memiliki nilai *equivalence ratio* yang lebih baik, warna nyala api ini terjadi pada *meso scale combustor* pada diameter *outlet* yang lebih besar dibandingkan dengan campuran bahan bakar

yang terdapat pada *meso scale combustor* dengan diameter *outlet* yang lebih kecil warna api yang nampak lebih redup.

5.2 Saran

Pada penelitian ini perlu adanya perbaikan serta tindakan lebih lanjut untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal dan lebih baik pada penelitian selanjutnya, adapun saran yang dapat dilakukan pada penelitian selanjutnya yaitu :

1. Pada penelitian selanjutnya peneliti harap melakukan pengecekan dan persiapan pada alat ukur, apabila alat ukur yang digunakan telah menurun keakuratannya maka perlu adanya kalibrasi agar data yang diperoleh dapat lebih akurat.
2. Perlu kajian lebih dalam untuk mengetahui jumlah *heat losses* pada penelitian ini serta pengamatan temperatur yang terjadi pada proses pembakaran di dalam *meso scale combustor* serta di dinding *meso scale combustor* untuk mengetahui energi yang mampu dihasilkan.
3. Pengembangan pada *meso scale combustor* masi sangat diperlukan untuk mengetahui parameter – parameter lain yang mampu memperbaiki kualitas serta meningkatkan efesiensi dari *meso scale combustor* tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Baigmohammadi, M., Sadegh, T., dan Yasaman, F. 2015. Experimental Study of The Effects of Geometrical Parameters ,Reynolds Number, and Equivalence Ratio on Methane – Oxygen Premixed Flame Dynamics in Non-Adiabatic Cylindrical Meso-Scale Reactors with The Backward Facing Step. Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of technology. Iran. 132 (2015) 215 - 233.
- Fernandez, A. C. dan Pello. 2002. Micropower Generation Using Combustion Issues And Approaches. Department of Mechanical Engineering University of California. Berkeley. USA. 29 (2002) 883-899.
- Maruta, K. 2011. Technology development and fundamental research. Tohoku University. Japan. 37(2011) 669-715.
- Mikami, Maeda, Matsui, Seo, dan Yuliati. 2012. Combustion of Gaseous and Liquid Fuels in Meso-Scale Tubes with Wire Mesh. Department of Mechanical Engineering. Yamaguchi University. Japan. Department of Mechanical Engineering, Brawijaya University. Indonesia. 34 (2013) 3387– 3394.
- Moran, M. J. dan Shapiro, H. N. 2004. *Termodinamika Teknik*. Edisi Ke-4. Jakarta: Erlangga.
- Munson, B. R., Young, D. F., dan Okiishi, T. H. 2003. *Mekanika Fluida*. Edisi keempat. Jilid I. Jakarta: Erlangga.
- Nasri, M. F. A. dan Utomo, T. S. 2015. *Prediksi Konsumsi Bahan Bakar Minyak Untuk Kendaraan Darat Jalan Raya Sampai Tahun 2040 Menggunakan Software Leap*. Jurusan Teknik Mesin. Fakultas Teknik. Universitas Diponegoro. Semarang.
- Pan, J. F., Huang, J., Li, D. T., Yang, W.M., Tang, W. X., dan Xue, H. 2006. Effects of major parameters on micro-combustion for thermophotovoltaic energy conversion. Department of Mechanical Engineering, California State Polytechnic University. Pomona. USA. 27 (2007) 1089–1095.
- Pertamina. 2010. *Komposisi Elpiji Sesuai Spesifikasi & Standar Keselamatan*. <http://www.bumn.go.id/pertamina/berita/471/komposisi.elpiji.sesuai.spesifikasi.standar.keselamatan>.
- Raditya, M. A., Wardana, I. N. G., dan Yulianti, L. 2013. Pengaruh Variasi Jarak Antar *Wire Mesh* terhadap Karakteristik Pembakaran Pada *Mesoscale Combustor*. Malang. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

- Rohadi, A. I. 2016. Pengaruh Saluran *Sudden Expansion* Terhadap Karakteristik Pembakaran pada *Meso Scale Combustor*. Jurusan Teknik Mesin. Fakultas Teknik. Universitas Jember. Jember.
- Saptoadi, H. 2010. Bahan Bakar Padat dari Bumi Indonesia untuk Kemandirian dan Kesejahteraan Bangsa. Yogyakarta. Universitas Gajah Mada.
- Sari, S. 2015. *Pengaruh Diameter Combustor Terhadap Karakteristik Pembakaran pada Meso-scale Combustor dengan Backward Facing Step*. Jurusan Teknik Mesin. Fakultas Teknik. Universitas Brawijaya. Malang.
- UNEP. 2006. *Pedoman Efisiensi Energi untuk Industri di Asia*. www.energyefficiencyasia.org.
- Yang, W. M., Chou, S. K., Shu, C., Li, Z. W., dan Xue, H. 2002. Combustion in Micro-Cylindrical Combustors With and Without a Backward Facing Step. Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore. Singapore. Department of Mechanical Engineering, California State Polytechnic University. USA. 22 (2002) 1777 - 1787.
- Zulkarnain, R. N. 2017. Karakteristik Pembakaran pada *Sudden Expansion Meso Scale Combustor* dengan Variasi Diameter Inlet. Jurusan Teknik Mesin. Fakultas Teknik. Universitas Jember. Jember.

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 5,57 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 = $n \times Mr$

$$= 0,5 \text{ Mr C}_3\text{H}_8 + 0,5 \text{ Mr C}_4\text{H}_{10}$$

$$= (0,5(36+8)) + (0,5(48+10))$$

$$= 22 + 29$$

$$= 51 \text{ gram}$$

– Massa udara

$$= n \times \text{Mr}$$

$$= 5,75 (\text{Mr O}_2 + 3,76 \text{ Mr N}_2)$$

$$= 5,75 (32 + 3,76 (28))$$

$$= 5,75 \times 137,28$$

$$= 789,36 \text{ gram}$$

– $\text{AFR}_{\text{stoikiometri}}$

$$= \frac{\text{Massa udara}}{\text{Massa bahan bakar}}$$

$$= \frac{789,36}{51}$$

$$= 15,48$$

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 :

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

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 :

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

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

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

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

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

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

$$Q_a = 24,83 Q_f$$

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

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

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

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

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

$$Q_a = 24,83 Q_f$$

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

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

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