



**PENGARUH RASIO EKUIVALEN GAS LPG DAN UDARA  
TERHADAP KARAKTERISTIK PEMBAKARAN  
*FLAME REGIME* PADA *MESO-SCALE COMBUSTOR*  
DENGAN *SUDDEN EXPANSION***

**SKRIPSI**

Oleh

**Rachmad Dwi Fitriansyah  
NIM 131910101066**

**PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2017**



**PENGARUH RASIO EKUIVALEN GAS LPG DAN UDARA  
TERHADAP KARAKTERISTIK PEMBAKARAN  
*FLAME REGIME* PADA *MESO-SCALE 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

**Rachmad Dwi Fitriansyah**  
**NIM 131910101066**

**PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2017**

## PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk :

1. Ibunda Wahyu Winanti, Ayahanda Ali Munip dan saudara-saudaraku serta keluarga besar Bapak Sabiq tercinta;
2. Guru dan Staf TK Karya Bhakti Kota Mojokerto, SDN Wates 1 Kota Mojokerto, SMPN 1 Kota Mojokerto dan SMAN 2 Kota Mojokerto;
3. Dosen dan staff almamater tercinta Jurusan Teknik Mesin Universitas Jember, khususnya dosen pembimbing dan dosen penguji;
4. Teman – teman TK, SD, SMP, SMA, teman-teman kuliah khususnya Teknik Mesin angkatan 2013;
5. Dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-satu.

**MOTTO**

“I maintain that the cosmic religious feeling is the strongest and noblest motive  
for scientific research”\*)



---

\*) Albert Einstein. 1954. *Ideas and Opinions*

**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rachmad Dwi Fitriansyah

NIM : 131910101066

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul “Pengaruh Rasio Ekuivalen Gas LPG Dan Udara Terhadap Karakteristik Pembakaran *Flame Regime* Pada *Meso-Scale Combustor* Dengan *Sudden Expansion* adalah benar-benar karya sendiri, kecuali kutipan yang saya sudah 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 manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 30 November 2017

Yang menyatakan,

(Rachmad Dwi Fitriansyah)

NIM 131910101066

**SKRIPSI**

**PENGARUH RASIO EKUIVALEN GAS LPG DAN UDARA  
TERHADAP KARAKTERISTIK PEMBAKARAN  
*FLAME REGIME* PADA *MESO-SCALE COMBUSTOR*  
DENGAN *SUDDEN EXPANSION***

Oleh

Rachmad Dwi Fitriansyah  
NIM 131910101066

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Gaguk Jatisukamto, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Ir. Digdo Listyadi Setyawan, M.Sc.

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Pengaruh Rasio Ekuivalen Gas LPG dan Udara terhadap Karakteristik Pembakaran *Flame Regime* pada *Meso-Scale Combustor* dengan *Sudden Expansion*” telah diuji dan disahkan pada:

Hari, tanggal : Kamis, 30 November 2017

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji:

Ketua,

Anggota I,

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

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

Anggota II,

Anggota III,

Ir. Ahmad Syuhri, M.T.  
NIP 19670123 199702 1 001

Hary Sutjahjono, S.T., M.T.  
NIP 19681205 199702 1 002

Mengesahkan

Dekan,

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

## RINGKASAN

**Pengaruh Rasio Ekuivalen Gas LPG dan Udara terhadap Karakteristik Pembakaran *Flame Regime* pada *Meso-Scale Combustor* dengan *Sudden Expansion***; Rachmad Dwi Fitriansyah, 131910101066; 2017: 49; Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

*Micro-thermophotovoltaic* merupakan salah satu sistem pembangkit energi listrik mikro yang termasuk dalam *Micro-electromechanical System*. *Micro-thermophotovoltaic* terdiri dari tiga komponen: sumber panas, selektif emitter (yang merupakan dinding *micro combustor*) dan susunan sel *photovoltaic*. Selektif emitter atau bisa disebut *meso-scale combustor wall* berfungsi untuk mengubah panas pembakaran menjadi radiasi panas yang nantinya akan ditangkap sel *photovoltaic*. Masalah yang paling menantang dalam desain *combustor* mikro adalah menjaga keseimbangan optimal antara mempertahankan pembakaran dan memaksimalkan hasil panas. Mempertahankan pembakaran dalam pembakaran mikro sebagian besar disebabkan oleh meningkatnya kehilangan panas akibat rasio permukaan terhadap volume tinggi, yang cenderung menekan pengapian dan memadamkan reaksinya (Yang *et al.*, 2002). Salah satu solusi dari tantangan pada proses pembakaran skala meso atau mikro adalah dengan mendapatkan nyala api yang stabil selama proses pembakaran.

Tujuan penelitian ini adalah untuk melakukan pengamatan terhadap *flammability limit* dan memvisualisasikan *flame regime* apa saja yang terdapat dalam *combustor* selama proses pembakaran, sehingga didapatkan nyala api yang paling ideal. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan rasio ekuivalen pada *combustor* dengan saluran *sudden expansion* sepanjang 20 mm. Bahan *combustor input* dari tembaga sedangkan *output* dari kaca Pyrex silinder, dengan diameter *input* 4,5 mm dan diameter *output* 6 mm. Visualisasi *flame regime* berupa foto dan video menggunakan kamera DSLR Nikon D5100.

Hasil *flammability limit* menunjukkan api dapat menyala pada rentang rasio ekuivalen terendah adalah  $\phi = 0,80$  sedangkan nilai tertinggi  $\phi = 1,10$



dengan kecepatan reaktan ( $V$ ) = 11,55 – 19,95 cm/s. Dari data ini diambil titik tengahnya sehingga didapat titik tengah rasio ekuivalen pada angka  $\phi = 0,95$  dan kecepatan reaktan ( $V$ ) = 15,7 cm/s. Pada kecepatan reaktan konstan, nilai rasio ekuivalen di variasikan dan dikembalikan lagi melalui perhitungan dalam bentuk debit bahan bakar dan udara yang akan menjadi data untuk mendapatkan *flame regime*. *Flame regime* yang teramati ada lima yaitu *blow-out*, *stationary asymmetric*, *stationary symmetric*, *stationary-flashback*, dan *flashback*. *Flame regime* tersebut mempunyai karakteristik masing-masing dan nyala api terbaik ada pada rasio ekuivalen  $\phi = 0,95$  dengan nilai debit bahan bakar  $Q_f = 9$  ml/min dan debit udara  $Q_a = 256$  ml/min dimana *flame regime* yang terbentuk *Stationary symmetric* yang stabil, posisinya menempel pada *sudden expansion* sehingga waktu tinggal api lebih lama dan mempunyai distribusi temperatur yang tinggi dibandingkan *flame regime stationary* lainnya.

## SUMMARY

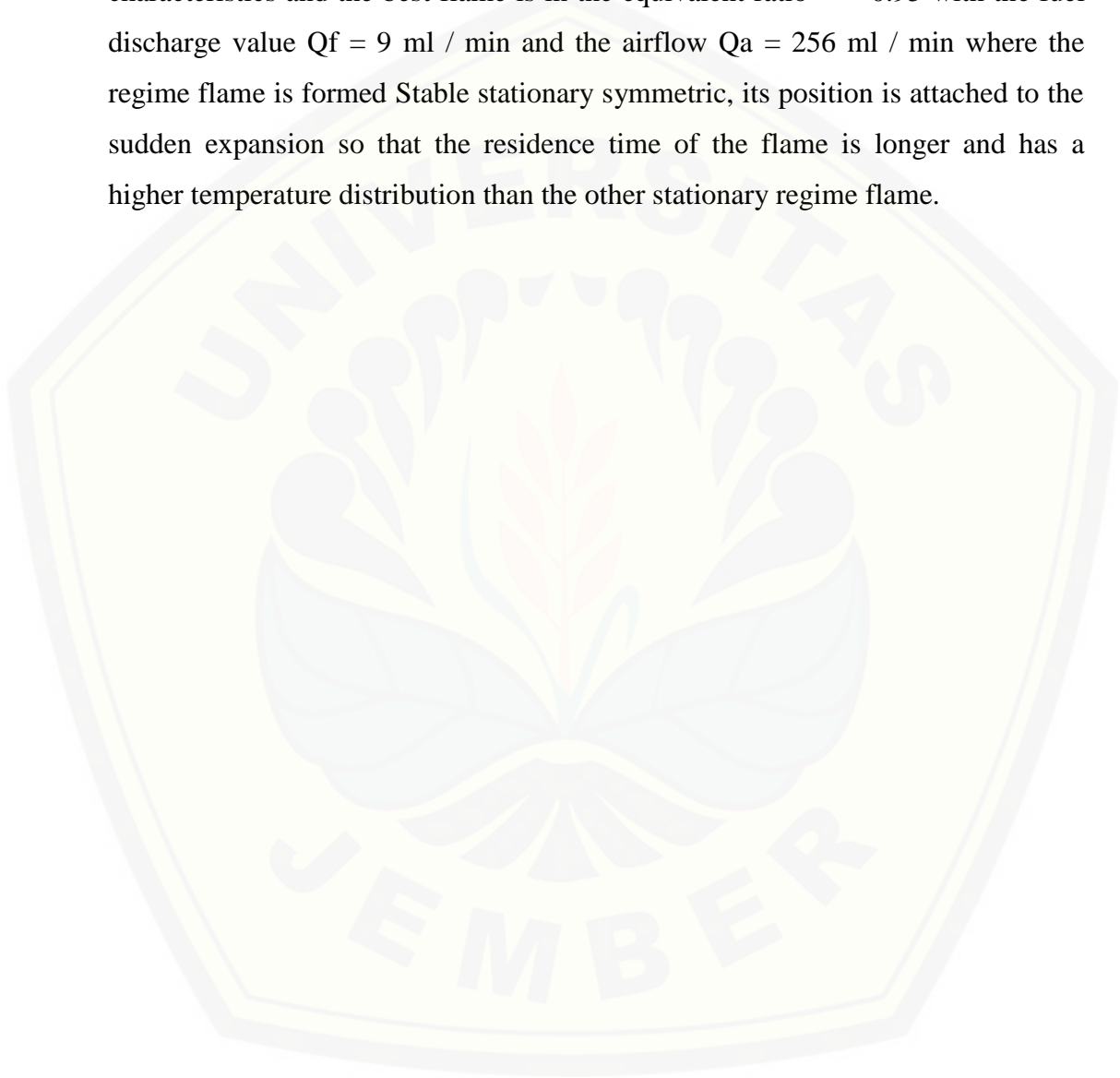
**The Effect of Equivalence ratio on LPG and Air against Flame Regime Characteristics on Meso-Scale Combustor with Sudden Expansion;** Rachmad Dwi Fitriansyah, 131910101066; 2017: 49; Departement of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Jember

Micro-thermophotovoltaic is one of the micro electric energy generating systems included in Micro-electromechanical System. Micro-thermophotovoltaic consists of three components: heat source, selective emitter (which is a micro combustor wall) and the arrangement of photovoltaic cells. Selective emitter or so-called meso-scale combustor wall function to convert the burning heat into heat radiation which will be captured photovoltaic cells. The most challenging issue in micro combustor design is maintaining an optimal balance between sustaining combustion and maximizing heat yield. Maintaining combustion in micro combustion is largely due to increased heat loss due to high surface to volume ratio, which tends to suppress ignition and extinguish the reaction (Yang, et al 2002). One solution to the challenge of meso or micro scale combustion process is to obtain a steady flame during the combustion process.

The purpose of this study was to observe flammability limits and visualize any regime flame contained in the combustor during the combustion process, so as to obtain the most ideal flame. This research was conducted by varying the ratio of equivalent in combustor with a sudden expansion channel along 20 mm. The copper input combustor material while the output of pyrex cylinder glass, with an input diameter of 4.5 mm and a diameter of 6 mm output. Flame regime visualization in the form of photos and video using Nikon D5100 DSLR camera.

The result of the flammability limit indicates that the flame can be burned in the lowest equivalent ratio range is  $\phi = 0.80$  while the highest value  $\phi = 1.10$  with the reactant velocity (V) = 11.55 - 19.95 cm / s. From this data is taken the middle point so that it gets the midpoint of the equivalent ratio on the number  $\phi = 0.95$  and reactant velocity (V) = 15.7 cm / s. At constant reactant velocity, the value of

the equivalent ratio is varied and returned again by calculation in the form of fuel and air discharge which will be the data to get the flame regime. Flame regime observed there are five that is blow-out, stationary asymmetric, stationary symmetric, stationary-flashback, and flashback. The regime flame has its own characteristics and the best flame is in the equivalent ratio  $\phi = 0.95$  with the fuel discharge value  $Q_f = 9 \text{ ml / min}$  and the airflow  $Q_a = 256 \text{ ml / min}$  where the regime flame is formed Stable stationary symmetric, its position is attached to the sudden expansion so that the residence time of the flame is longer and has a higher temperature distribution than the other stationary regime flame.



## PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Allah SWT. atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengaruh Rasio Ekuivalen Gas LPG dan Udara terhadap Karakteristik Pembakaran *Flame Regime* pada *Meso-Scale Combustor* dengan *Sudden Expansion*”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah 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. Bapak Dr. Gaguk Jatisukanto S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Utama, Bapak Ir. Digdo Listyadi Setyawan, M.Sc. selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam penulisan skripsi ini;
2. Bapak Ir. Ahmad Syuhri, M.T. selaku Dosen Penguji Utama dan Bapak Hary Sutjahjono, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji Anggota yang telah banyak memberikan saran dan berbagai pertimbangan dalam penulisan skripsi ini;
3. Bapak Andi Sanata, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing penelitian;
4. Bapak/Ibu Dosen dan Staf Jurusan Teknik Mesin Universitas Jember yang telah membimbing penulis selama menjadi mahasiswa
5. Bapak Ali Munip, Ibu Wahyu Winanti, Kakak Achmad Ivan Fitrianto, dan Adik Septian Ilmi Ferdiansyah untuk segala semangat, doa, dan dukungan yang selalu diberikan;
6. Rekan satu tim penelitian *Meso-Combustion* dan saudara-saudaraku mahasiswa teknik mesin angkatan 2013;
7. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

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

Jember, 30 November 2017

Penulis



**DAFTAR ISI**

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	ii
<b>HALAMAN MOTTO</b> .....	iii
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	iv
<b>HALAMAN PEMBIMBINGAN</b> .....	v
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	vi
<b>RINGKASAN</b> .....	vii
<b>SUMMARY</b> .....	ix
<b>PRAKATA</b> .....	xi
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xv
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xvi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xvii
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	2
<b>1.3 Batasan Masalah</b> .....	2
<b>1.4 Tujuan</b> .....	2
<b>1.5 Manfaat</b> .....	3
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	4
<b>2.1 Pembakaran</b> .....	4
2.1.1 Klasifikasi Pembakaran Berdasarkan Pencampuran Bahan Bakar .....	4
2.1.2 Pembakaran Skala Meso.....	5
<b>2.2 <i>Liquefied Petroleum Gas</i></b> .....	6
<b>2.3 Campuran Udara dan Bahan Bakar</b> .....	7

2.3.1	<i>Air Fuel Ratio</i> .....	8
2.3.2	Rasio Ekuvalen .....	8
<b>2.4</b>	<b>Batas Nyala Api</b> .....	9
<b>2.5</b>	<b>Sifat Nyala Api (Rezim Api)</b> .....	10
<b>2.6</b>	<b><i>Sudden Expansion</i></b> .....	13
<b>2.7</b>	<b><i>Micro Power Generator</i></b> .....	14
<b>2.8</b>	<b>Aliran Fluida</b> .....	18
2.8.1	Fluida Statis dan Fluida Dinamis .....	18
2.8.2	Aliran Laminer dan Turbulen.....	19
<b>2.9</b>	<b>Penelitian Sebelumnya</b> .....	20
<b>2.10</b>	<b>Hipotesa</b> .....	21
<b>BAB 3.</b>	<b>METODE PENELITIAN</b> .....	22
<b>3.1</b>	<b>Tempat dan Waktu Penelitian</b> .....	22
<b>3.2</b>	<b>Alat dan Bahan</b> .....	22
3.2.1	Alat .....	22
3.2.2	Bahan.....	26
<b>3.3</b>	<b>Variabel Penelitian</b> .....	26
3.3.1	Variabel Bebas .....	26
3.3.2	Variabel Terikat .....	26
<b>3.4</b>	<b>Skema Rangkai Alat Uji Penelitian</b> .....	27
<b>3.5</b>	<b>Prosedur Penelitian</b> .....	27
<b>3.6</b>	<b>Diagram Alir Penelitian</b> .....	29
<b>3.7</b>	<b>Penyajian Data Penelitian</b> .....	30
<b>BAB 4.</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	33
<b>4.1</b>	<b>Hasil Penelitian</b> .....	33
<b>4.2</b>	<b>Pembahasan</b> .....	38
<b>BAB 5.</b>	<b>PENUTUP</b> .....	48
<b>5.1</b>	<b>Kesimpulan</b> .....	48

<b>5.2 Saran</b> .....	49
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	50
<b>LAMPIRAN</b> .....	54





**DAFTAR TABEL**

	Halaman
2.1 Klasifikasi jenis pembakaran .....	5
2.2 Material <i>combustor</i> .....	6
3.1 Data debit bahan bakar dan udara .....	30
3.2 Penyajian data hasil pengujian <i>flammability limit</i> .....	30
4.1 Data komposisi debit bahan bakar dan debit udara.....	33
4.2 Nilai rasio ekuivalen dan kecepatan raktan dalam <i>combustor</i> .....	34
4.3 Variasi rasio ekuivalen untuk <i>flame regime</i> .....	36
4.4 Distribusi temperatur nyala api pada <i>combustor</i> 6 mm.....	37

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Rezim api <i>Blow-out</i> .....	11
2.2 Rezim api <i>Marginal</i> .....	11
2.3 Rezim api <i>Stationary asymmetric</i> . .....	11
2.4 Rezim api <i>Spinning</i> . .....	12
2.5 Rezim api RERI .....	12
2.6 Rezim api <i>Flashback</i> .....	13
2.7 <i>Sudden expansion</i> .....	13
2.8 Spesifikasi iso-octane dan baterai. ....	15
2.9 Modul <i>Thermoelectric</i> .....	16
2.10 Modul <i>Thermoelectric</i> sebagai pembangkit listrik.....	16
2.11 Skema sistem micro-TPV.....	17
2.12 Aliran laminer dan turbulen. ....	19
3.1 <i>Micro Scale combustor</i> dengan <i>sudden expansion</i> .....	22
3.2 <i>Mixer</i> .....	23
3.3 <i>Flowmeter</i> .....	23
3.4 Kompresor.....	25
3.5 <i>Pisco Tube</i> .....	25
3.6 Kamera DSLR .....	25
3.7 Tabung gas LPG 3 kg.....	26
3.8 Skema alat uji. ....	27
4.1 Grafik <i>flammability limit</i> pada <i>meso-scale combustor</i> dengan panjang saluran <i>sudden expansion</i> 20 mm dan diameter dalam 6 mm.....	35
4.2 Titik tengah grafik <i>flammability limit</i> . ....	36
4.3 <i>Flame regime Blow-out</i> pada $U = 0,77$ dan $V = 15,7$ cm/s (a) tampak samping (b) tampak depan. ....	38
4.4 <i>Flame regime stationary asymmetric downward</i> pada $U = 0,82$	

	dan $V = 15,7 \text{ cm/s}$ (a) tampak samping (b) tampak depan.....	39
4.5	<i>Flame regime stationary asymmetric downward</i> pada $= 0,86$ dan $V = 15,7 \text{ cm/s}$ (a) tampak samping (b) tampak depan.....	40
4.6	<i>Flame regime stationary asymmetric downward</i> pada $= 0,90$ dan $V = 15,7 \text{ cm/s}$ (a) tampak samping (b) tampak depan.....	41
4.7	<i>Flame regime stationary asymmetric downward</i> pada $= 0,95$ dan $V = 15,7 \text{ cm/s}$ (a) tampak samping (b) tampak depan.....	42
4.8	<i>Flame regime stationary asymmetric downward</i> pada $= 0,99$ dan $V = 15,7 \text{ cm/s}$ (a) tampak samping (b) tampak depan.....	43
4.9	<i>Flame regime stationary asymmetric downward</i> pada $= 1,03$ dan $V = 15,7 \text{ cm/s}$ . .....	44
4.10	<i>Flame regime stationary asymmetric downward</i> pada $= 1,07$ dan $V = 15,7 \text{ cm/s}$ .. .....	45
4.11	Grafik pemetaan <i>flame regime</i> berdasarkan variasi rasio ekuivalen. ....	46
4.12	Perbandingan nyala api <i>stationary symmetric</i> .....	47

## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Perangkat komunikasi, penginderaan (sensor), kimia analitis dan biomedis telah dikembangkan menggunakan teknologi fabrikasi nano dan mikro yang multifungsional. Perangkat dengan teknologi nano dan mikro diharapkan lebih ringan, praktis dan memberikan tenaga dari beberapa miliwatt ke ratusan watt. Baterai merupakan sumber energi portable yang sering digunakan pada ponsel, kamera dan laptop, namun baterai mempunyai densitas energi yang rendah dan beberapa jam untuk isi ulang (Ju dan Maruta, 2011).

Bahan bakar hidrokarbon mempunyai kepadatan energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan baterai sebagai sumber energi. Pembakaran bahan bakar dan oksidator dapat diaplikasikan pada pembangkit energi mikro dengan mengkonversi energi panas pada proses pembakaran menjadi energi listrik (Walther dan Ahn, 2011).

*Micro-thermophotovoltaic* merupakan salah satu sistem pembangkit energi listrik mikro yang termasuk dalam *Micro-electromechanical System*. *Micro-thermophotovoltaic* terdiri dari tiga komponen: sumber panas, selektif emitter (yang merupakan dinding *micro combustor*) dan susunan sel *photovoltaic*. Selektif emitter atau bisa disebut *meso-scale combustor wall* berfungsi untuk mengubah panas pembakaran menjadi radiasi panas yang nantinya akan ditangkap sel *photovoltaic*. *Sudden expansion* yang diaplikasikan dalam *combustor* akan meningkatkan pencampuran bahan bakar dengan udara dan memperlama *residence time* sehingga panas dalam *combustor* lebih merata. *Sudden expansion* juga berguna untuk mengontrol posisi nyala api dan memperluas jarak operasional kecepatan aliran dan rasio H<sub>2</sub>/ udara (Yang *et al.*, 2002).

Masalah yang sering muncul dalam desain *combustor* mikro adalah menjaga keseimbangan optimal antara mempertahankan pembakaran dan memaksimalkan hasil panas. Mempertahankan pembakaran dalam pembakaran mikro sebagian besar disebabkan oleh meningkatnya kehilangan panas akibat rasio permukaan

terhadap volume tinggi, yang cenderung menekan pengapian dan memadamkan reaksinya (Yang *et al.*, 2002). Solusi dari masalah pada proses pembakaran skala meso atau mikro adalah dengan mendapatkan nyala api yang stabil selama proses pembakaran. Baighmohammadi *et al.* (2015) pada penelitian sebelumnya mengamati beberapa rezim api antara lain *Blow-out*, *Marginal*, *Stationary*, *Repetitive Extinction and Re-ignition (RERI)*, *Stationary-flashback*, *RERI-flashback* dan *Flashback* serta dengan melakukan variasi pada rasio ekuivalen akan merubah rezim dan kestabilan api. Rasio ekuivalen pada gas LPG dan udara pada penelitian ini divariasikan untuk mendapatkan *flame regime* yang muncul dan karakteristiknya sehingga didapatkan nyala api yang paling ideal.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas perumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh rasio ekuivalen terhadap terbentuknya *flame regime* dan karakteristiknya pada *combustor* skala meso dengan saluran *sudden expansion*.

## 1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Proses pembakaran berlangsung secara stabil dengan penyalaan minimal selama 3 menit.
2. Hanya membahas karakteristik pembakaran rezim api.
3. Udara bebas diasumsikan terdiri dari 79% N<sub>2</sub> dan 21% O<sub>2</sub>.
4. LPG diasumsikan 50% propana dan 50% butana.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini ditujukan untuk mengetahui pengaruh variasi rasio ekuivalen dengan bahan bakar gas LPG dan udara terhadap *flame regime* dan

karakteristiknya pada pembakaran skala *meso* dengan saluran *sudden expansion*, serta mengetahui nilai rasio ekuivalen terbaik untuk mendapatkan api yang paling stabil di dalam *combustor*.

### 1.5 Manfaat

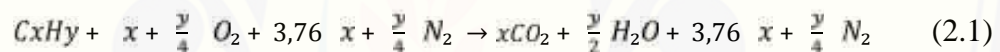
Adapun manfaat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui pengaruh variasi rasio ekuivalen terhadap kehadiran *flame regime* dalam *combustor* skala meso dengan *sudden expansion*
2. Mengetahui karakteristik *flame regime* dan visualisasi foto api.
3. Mengetahui debit bahan bakar dan udara terbaik untuk mendapatkan nyala api yang paling stabil dalam *combustor* skala meso.
4. Memberikan referensi dalam pengembangan *meso-scale combustion* selanjutnya.

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Pembakaran

Pembakaran dapat didefinisikan sebagai proses oksidasi yang sangat cepat antara bahan bakar (fuel) dan oksidator dengan menimbulkan nyala api dan panas. Secara umum bahan bakar melepaskan panas ketika dioksidasi dan mengandung unsur-unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S). Sementara oksidator adalah segala substansi yang mengandung oksigen (misal udara) yang akan bereaksi terhadap bahan bakar. Oksigen yang dibutuhkan untuk proses pembakaran diperoleh dari udara kering, dimana udara kering terdiri dari 21% oksigen dan 78% nitrogen, maka reaksi stoikiometrik pembakaran hidrokarbon murni  $C_xH_y$  dapat ditulis dengan persamaan :



Persamaan reaksi pembakaran hidrokarbon telah disederhanakan karena untuk memastikan proses pembakaran yang terjadi secara sempurna cukup sulit dengan rasio ekivalen yang tepat dari udara. Hasil persamaan  $CO_2$  dan  $H_2O$  tidak akan terjadi jika pembakaran yang terjadi adalah pembakaran tidak sempurna, akan tetapi terbentuk hasil oksidasi  $CO$ ,  $CO_2$  dan  $H_2O$  (Mahandri, 2010).

#### 2.1.1 Klasifikasi pembakaran berdasarkan pencampuran bahan bakar

##### a. Pembakaran difusi

Pembakaran difusi adalah proses pembakaran dimana bahan bakar dan udara sebagai pengoksida tidak bercampur secara mekanik, melainkan dibiarkan bercampur secara alami melalui proses difusi dalam ruang bakar/proses pembakaran (Wardana, 2008). Contoh dari *non premix* adalah lilin.

##### b. Pembakaran *premixed*

Pembakaran secara *premixed* adalah pembakaran dimana bahan bakar dan udara sudah bercampur terlebih dahulu secara mekanik sebelum terjadi pembakaran (Wardana, 2008). Pembakaran secara *premixed* ini membutuhkan

perbandingan antara udara dan bahan bakar (AFR) dalam jumlah tertentu. Api yang ditimbulkan oleh pembakaran *premixed* sangatlah besar sebab terdapat 2 api yaitu api *premixed* sendiri dan terdapat juga api difusi. Kelemahan api *premixed* ini sering terjadi *flashback* yang mana api akan merambat ke dalam ruang pencampuran mekanik yang menyebabkan kebakaran, sehingga tipe api ini rawan terjadi kebakaran dan apabila terjadi kebakaran pada api tipe ini lebih susah untuk di padamkan.

### 2.1.2 Pembakaran Skala Meso

Proses pembakaran mempunyai skala dimana masih banyak masyarakat yang belum mengetahui definisi dari pembakaran skala makro, meso dan mikro. Maruta dan Ju (2011) mengemukakan salah satu pembandingan adalah dengan mengetahui ukuran diameter dalam *combustor* pada proses pembakaran tersebut. Pada skala meso ukuran fisik dari diameter dalam *combustor* antara 1 mm – 10 mm dan untuk skala mikro ukuran fisik diameter dalam *combustor* dibawah 1 mm. Perbedaan antara *meso-scale combustion* dan *micro-scale combustion* dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 2.1 Klasifikasi jenis pembakaran

Definisi berdasarkan	Rezim Pembakaran	Skala Panjang (Diameter Kombustor)	Contoh	Aplikasi
Panjang Fisik	Skala meso	1-10 mm	Mesin rotary (UCB)	Daya MEMS
	Skala mikro	1-1000 $\mu\text{m}$	Mikro reaktor (UIUC)	<i>Thruster</i>
Diameter <i>flame quenching</i>	Skala meso	Diameter <i>quenching</i> (equilibrium)	<i>Swiss-roll</i> kombustor (USC)	Pembangkit listrik
	Skala mikro	Diameter <i>quenching</i> ~ <i>mean-free path</i> (non equilibrium)	Sel bahan bakar reaktor nano-partikel	Konversi energi
Skala perangkat	Skala mikro	Lebih kecil dari ukuran mesin konvensional	<i>Micro-thrusters</i> (PSU), mikro-turbin gas (MIT)	Mikro-satelit, mikro-pesawat

(Sumber: Maruta dan Ju, 2011)



*Combustor* terdiri dari dua komponen yaitu komponen *input* dan komponen *output* dimana kedua komponen tersebut disambungkan menggunakan lem tahan panas. Material untuk *combustor* dapat dibuat tergantung keinginan, beberapa material yang sudah digunakan pada penelitian dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2.2 Material *combustor*

Penulis	Material <i>combustor</i>
Zamashchikov	Stainless steel Keramik Kuarsa
Mellish <i>et al.</i>	Stainless steel Alumina Kuarsa
Miesse <i>et al.</i>	Stainless steel Alumina Kuarsa Cordierite
Prakash <i>et al.</i>	Alumina
Maruta <i>et al.</i>	Kuarsa
Fan <i>et al.</i>	Kuarsa
Boyarko <i>et al.</i>	Platinum
Yang <i>et al.</i>	Silikon karbida dilapisi dengan platinum

(Sumber: Chou *et al.*, 2010)

*Combustor* dengan bahan *quartz glass* sering dipakai beberapa peneliti karena strukturnya yang transparan memudahkan peneliti untuk mengamati pergerakan api dalam *combustor* dan juga dapat mengambil data berupa foto api.

## 2.2 Liquefied Petroleum Gas (LPG)

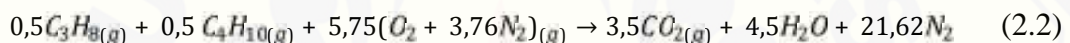
Bahan bakar yang sering digunakan masyarakat Indonesia merupakan bahan bakar *Liquefied Petroleum gas* (LPG). LPG merupakan gas hidrokarbon produksi dari kilang minyak dan kilang gas dengan komponen utama gas propane ( $C_3H_8$ ) dan butane ( $C_4H_{10}$ ). Berdasarkan komposisinya LPG dibedakan menjadi tiga macam :

- a. LPG *propane*, sebagian terdiri atas  $C_3$

- b. LPG *butane*, sebagian terdiri atas C<sub>4</sub>  
 c. LPG *mix*, terdiri atas campuran propana dan butana

Pada tekanan atmosfer LPG berbentuk gas, tetapi untuk kemudahan dalam mendistribusikan LPG dapat disimpan dalam kondisi cair dengan temperatur sekitar pada tekanan rendah 0,7 - 0,8 Mpa (Wiranto, 2005). Dalam bentuk cair LPG dapat dengan mudah didistribusikan dalam tabung atau tank.

Pertamina mengeluarkan produk LPG dengan merk dagang Elpiji untuk memenuhi konsumsi bahan bakar rumah tangga, komersil hingga industri. Bahan bakar LPG yang sering digunakan masyarakat Indonesia adalah LPG *mix*, dimana komposisinya terdiri atas campuran propana dan butana. Reaksi pembakaran teoritis LPG adalah sebagai berikut :



Reaksi pembakaran teoritis yang ditunjukkan persamaan 2.2 merupakan proses pembakaran stoikiometri. Semua atom oksigen bereaksi sempurna terhadap bahan bakar namun dalam kenyataannya yang terjadi reaksi tersebut tidak hanya menghasilkan CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O saja. Berdasarkan persamaan (2.2) menurut Sari (2015) nilai AFR<sub>stoikiometri</sub> dapat dicari dengan perhitungan sebagai berikut :

1. Massa atom relatif (Ar)

C = 12 gram/mol; H = 1 gram/mol; O = 16 gram/mol; N = 14 gram/mol

2. AFR<sub>stoikiometri</sub> berdasarkan rasio massa udara dan bahan bakar:

$$\begin{aligned} \text{AFR}_{\text{stoikiometri}} &= \frac{\text{massa udara}}{\text{massa bahan bakar}} \\ &= \frac{5,75 (2 \times 16 + 3,76 \times 14 \times 2)}{0,5 (12 \times 3 + 18) + 0,5(12 \times 4 + 10)} \\ &= \frac{789,36}{51} = 15,47 \end{aligned}$$

### 2.3 Campuran Udara dan Bahan Bakar

Proses pembakaran ada beberapa hal penting yang harus diperhatikan antara lain bahan bakar, udara, reaksi kimia dan kalor. Perbandingan campuran bahan bakar dan udara juga faktor yang penting untuk mendapatkan hasil pembakaran

yang sempurna. Metode yang digunakan untuk menghitung rasio campuran bahan bakar dan udara antara lain AFR (*Air Fuel Ratio*) dan Rasio Ekuivalen ( $\Phi$ ).

### 2.3.1 Air Fuel Ratio (AFR)

Metode perhitungan rasio campuran bahan bakar dan udara ini merupakan metode yang sering digunakan dalam mendefinisikan campuran dan merupakan perbandingan antara massa dari udara dengan bahan bakar pada suatu titik tinjau. Menurut Mahandari dan Kartika (2010), Secara simbolis AFR dapat dihitung melalui persamaan berikut :

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

Dengan  $m_a$  adalah laju massa udara (kg/detik),  $m_f$  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).

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).

### 2.3.2 Rasio Ekuivalen

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. Rasio ekuivalen dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\Phi = \frac{(AFR)_s}{AFR_a} \quad (2.4)$$

Keterangan :

$\Phi$  : Rasio ekuivalen

$(AFR)_s$  : Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi stokiometrik

(*AFR*)<sub>a</sub> : 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.

Farizkaraja *et al.* (2014), menyatakan perbedaan warna api bisa dipengaruhi karena adanya perbedaan perbandingan campuran udara dan bahan bakar. Perbedaan perbandingan campuran dapat diketahui dengan membandingkan *equivalent ratio* udara-bahan bakar ( $\Phi$ ), dimana jika  $\Phi < 1$  maka akan terbentuk api campuran miskin, ketika  $\Phi = 1$  terbentuk api stoikiometri dan saat  $\Phi > 1$  akan terbentuk api campuran kaya. 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

Farizkaraja *et al.* (2014) menyatakan bahwa nyala api akan muncul tergantung 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 (*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. *Upper flammability limit* (UFL) adalah konsentrasi gas tertinggi dimana kandungan udara tidak akan cukup untuk

mendukung proses pembakaran. Batas antara LFL dan UFL merupakan kondisi rentang mudah terbakar pada suatu gas, dimana gas dan udara dalam komposisi yang tepat untuk dibakar saat dinyalakan.

Api akan stabil apabila konsentrasi campuran bahan bakar dengan oksidator berada pada komposisi yang tepat. Komposisi yang tepat terjadi pada saat kecepatan reaktan ( $V_u$ ) sama dengan kecepatan rambat nyala api ( $S_L$ ) ( $V_u = S_L$ ). *Flashback* terjadi ketika kecepatan pembakaran lebih besar daripada kecepatan campuran udara dan bahan bakar, sehingga nyala api masuk ke saluran campuran reaktan menuju tabung bahan bakar (sumber bahan bakar). *Lift-off* adalah kondisi dimana nyala api tidak menyentuh permukaan mulut tabung pembakar, tetapi stabil pada jarak dari ujung tabung pembakar. Kecepatan reaktan yang rendah membuat posisi api akan mendekati mulut tabung pembakaran dan menyentuhnya, apabila kecepatan reaktan ditingkatkan maka posisi hulu api sudah tidak lagi menempel melainkan menjauh dari mulut *combustor*. *Combustor* dengan densitas tinggi bisa didapatkan dengan kecepatan pembakaran yang lebih tinggi, sehingga nyala api tetap stabil pada kecepatan reaktan yang tinggi dan memperluas daerah reaksi dalam *combustor* (Sari, 2015).

## 2.5 Sifat Nyala Api (Rezim Api)

Api dalam reaksi pembakaran memiliki stabilitas nyala yang banyak dipengaruhi oleh komposisi campuran bahan bakar dan udara. Baigmohammadi *et al.* (2015) melakukan penelitian dengan hasil nyala api dapat dikategorikan menjadi tujuh sebagai akibat dari variasi geometri, bilangan reynold dan rasio ekuivalen antara lain *Blow-out*, *Marginal*, *Stationary (stable)*, *Repetitive Extinction and Re-ignition (RERI)*, *stationary (stable)-flashback*, *RERI-flashback* dan *Flashback*. Proses terjadinya rezim api tersebut akan dijelaskan sebagai berikut :

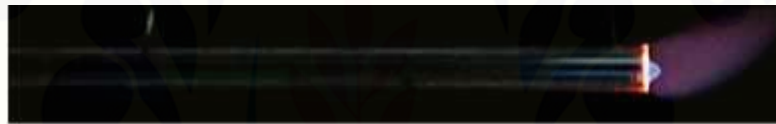
- a. *Blow out* : Api yang terbentuk diluar *combustor* karena kecepatan aliran reaktif lebih tinggi dibandingkan dengan kecepatan nyala, sehingga api

terdorong keluar *combustor*. Api ini terjadi pada rasio ekuivalen yang tinggi pada bilangan reynolds konstan.



Gambar 2.1 Rezim api *Blow-out*

- b. *Marginal* : Api yang terbentuk di saluran luar *combustor*, ciri utama adanya distorsi kecil pada api ini yang membuat nyala api tidak stabil. Nyala api *marginal* dipengaruhi oleh penurunan rasio ekuivalensi dari nilai bahan bakar kaya mendekati nilai stoikiometri. Api ini akan teramati jika menurunkan rasio ekuivalen dari kondisi nyala api blow-out.



Gambar 2.2 Rezim api *Marginal*

- c. *Stationary* (stabil) : Nyala api stationary, bagian depan api memiliki posisi yang stabil dalam *combustor* disebabkan penurunan rasio ekuivalen secara berkelanjutan sampai bahan bakar dan oksidator tercampur dengan ideal dimana nilai kecepatan reaktan dan kecepatan nyala api seimbang. Api stabil terbagi atas tiga kategori yaitu :

1. Simetri
2. Asimetri (dapat terbentuk miring keatas dan kebawah) dipengaruhi oleh *preheating zone* dan efek buoyancy.



Gambar 2.3 Rezim api *stationary* (asimetri)

3. *Spinning flame* terdiri dari api simetris atas dan bawah yang telah kehilangan stabilitas dan kemudian mulai berputar cepat disekitar sumbu *combustor*. Interaksi antara bagian depan api, dinding *combustor*, pergerakan fluida sekitar step, dan nilai laju aliran yang mempengaruhi terjadinya nyala api *spinning*.



Gambar 2.4 Rezim api *spinning*

- d. *Repetitive extinction and re-ignition* (RERI) : Api depan tidak bisa mencapai posisi yang tetap dalam *combustor*, bagian api benar-benar tidak stabil dan terbenteng sepanjang *combustor* secara berkala. Nyala campuran pada *combustor* luar akan padam oleh perambatannya menuju ujung reaktor disebabkan oleh kerugian panas yang luas pada dinding *combustor* dan campuran yang masuk. Setelah api padam pada ujung reaktor, campuran segar bisa dinyalakan lagi jika dinding reaktor dipanaskan atau sumber pengapian eksternal. Api ini terbentuk jika menurunkan rasio ekuivalen dari titik stabil sehingga meningkatkan kecepatan persebaran api.

*Forced-RERI* : RERI yang terbentuk dengan bantuan sumber pengapian (obor).

*Self-RERI* : Campuran reaktif yang padam dapat dinyalakan lagi dengan pemanasan pada dinding reaktor.



Gambar 2.5 Rezim api RERI

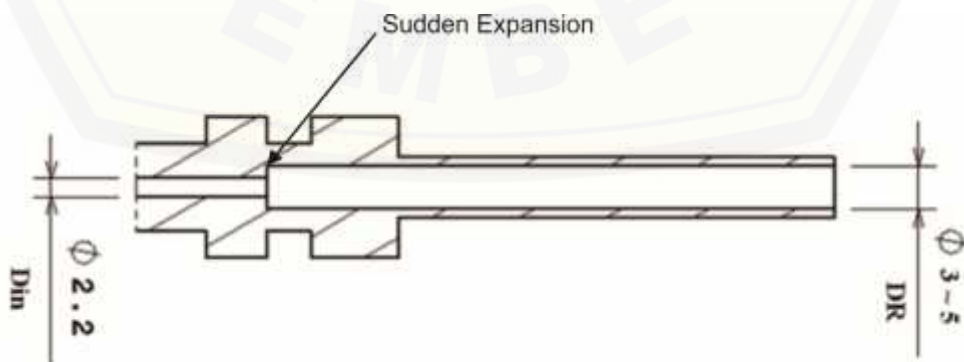
- e. *Stationary* (stabil) – *Flashback* : rezim api ini terdiri dari api stabil dan *flashback* dimana rezim api yang awalnya stabil berubah menjadi *flashback* secara bertahap.
- f. *RERI-Flashback* : Rezim api ini terdiri dari RERI dan *flashback* dimana Rezim api RERI berubah menjadi *flashback* secara bertahap.
- g. *Flashback* : Rezim api ini terjadi ketika kecepatan perambatan api lebih tinggi dari kecepatan aliran. Api ini terjadi jika menurunkan rasio ekuivalen dari campuran kaya atau menaikkan rasio ekuivalen dari campuran miskin sampai titik kritis.



Gambar 2.6 Rezim api *flashback*

## 2.6 Sudden Expansion

*Sudden Expansion* atau *Backward Facing Step* merupakan modifikasi bentuk dalam *combustor* yang berfungsi meningkatkan pencampuran udara dengan bahan bakar dan memperlama *residence time*. *Sudden expansion* juga berguna mengontrol posisi nyala api dan memperluas jarak operasional kecepatan aliran dan rasio udara dan bahan bakar (Yang, 2002).



Gambar 2.7 *Sudden expansion* (Sumber : Baighmohammadi *et al.*, 2015)



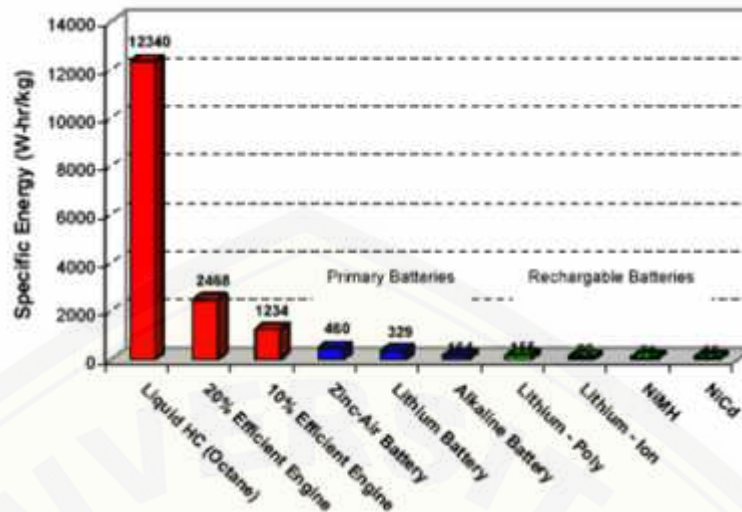
Dalam karya tulis ilmiah ini jenis *combustor* yang digunakan *meso-scale combustor* dengan *sudden expansion* dimana inlet *combustor* terbuat dari material tembaga dan keluaran (*outlet*) *combustor* terbuat dari material kaca PYREX.

## 2.7 *Micro Power Generator*

Produksi miniaturisasi peralatan membuka peluang baru untuk pembakaran khususnya di bidang pembangkit listrik mikro karena dibutuhkan perangkat catu daya dengan energi spesifik yang tinggi, ukuran kecil, ringan, dan tahan lama (Fernandez-Pello dan Carlos, 2002).

Toriyama *et al.* (2007) menyatakan konsep awal *Micro electro mechanical system* membuat munculnya beberapa konsep miniaturisasi peralatan seperti *micro gas turbine*, *micro steam turbine* dan *micro internal combustion* yang dikembangkan untuk menyediakan sumber daya listrik. Strategi dalam mengembangkan peralatan ini mempunyai tujuan untuk menghasilkan tenaga yang bersumber dari panas.

*Micro power generator* atau pembangkit listrik mikro memanfaatkan pembakaran dari bahan bakar hidrokarbon cair. Potensi keuntungan menggunakan pembakaran hidrokarbon cair untuk menghasilkan energi dapat dilihat pada gambar 2.1. hidrokarbon cair dapat menghasilkan energi tinggi (biasanya 45 MJ/kg) yang transportable dan cukup aman (Weinberg, 1974).



Gambar 2.8 Spesifik energi iso-octane dan beberapa baterai (Sumber: Fernandez-Pello dan Carlos, 2002)

Meskipun *micro power generator* dengan menggunakan bidang pembakaran masih baru, beberapa proyek pengembangannya *micro-scale power generator* sudah berjalan meliputi:

a. *Micro-thermoelectric*

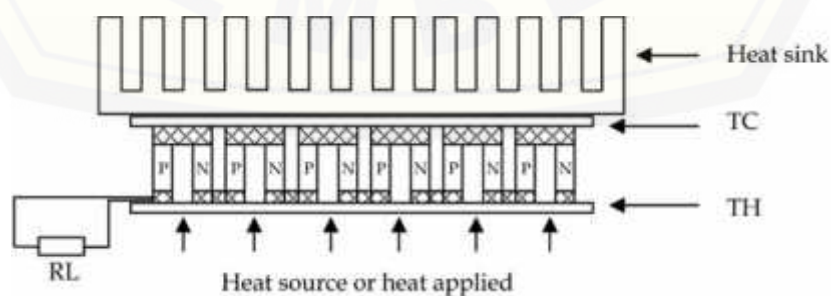
*Thermoelectric* memanfaatkan efek Seebeck, Peltier dan Thomson yang pertama kali diamati antara tahun 1821 dan 1851 (Nolas *et al.*, 2001). Perangkat *thermoelectric* praktis muncul pada tahun 1960-an dan telah berkembang secara signifikan sejak itu dengan sejumlah produsen sekarang memasarkan modul *thermoelectric* untuk pendingin, pemanas dan aplikasi pembangkit listrik. Pembangkit listrik *thermoelectric* terutama dipengaruhi oleh efek Seebeck, dengan pendingin *thermoelectric* dan pemanasan dipengaruhi secara dominan oleh efek peltier. Efek Thomson tidak memiliki pengaruh besar meskipun dimasukkan dalam rincian perhitungan (Rowe, 2006). Aplikasi pembangkit listrik modul *thermoelectric* biasanya menghasilkan sejumlah kecil daya listrik dalam  $\mu\text{W}$  atau  $\text{mW}$  jika perbedaan suhu dipertahankan antara dua terminal dari modul *thermoelectric*. Modul *thermoelectric* dapat beroperasi sebagai pemanasan atau pendinginan dari suatu obyek yang terhubung ke satu sisi dari modul *thermoelectric* jika arus DC diterapkan terminal input modul.

Modul *thermoelectric* standar yang dibangun dari termo-elemen tipe P dan tipe N, terhubung secara seri untuk yang elektrik dan secara paralel untuk thermal. Setiap pasangan dibangun dari dua pellet dari bahan semikonduktor biasanya terbuat dari Bismuth Telluride. Kedua pelet secara fisik terhubung bersama-sama di satu sisi, biasanya dengan strip kecil tembaga, dan ditempatkan di antara dua plat keramik. plat keramik melakukan dua fungsi; mereka bertindak sebagai dasar di mana untuk mengikat termo-elemen; dan juga mengisolasi listrik termo-elemen (Riffat dan Ma, 2003). Modul *thermoelectric* akan ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Modul *thermoelectric* (Sumber: Gould dan Shammass, 2009)

Satu sisi modul terpasang dengan sumber panas dan disebut sebagai sisi 'panas' atau 'TH'. Sisi lain dari modul biasanya melekat pada heat sink dan disebut sisi 'dingin' atau 'TC'. Heat sink digunakan untuk membuat perbedaan suhu antara sisi dingin dan panas dari modul. Jika beban resistif (RL) terhubung di terminal output modul, daya listrik akan dihasilkan dalam beban resistif ketika perbedaan suhu ada antara sisi panas dan dingin dari modul karena efek Seebeck

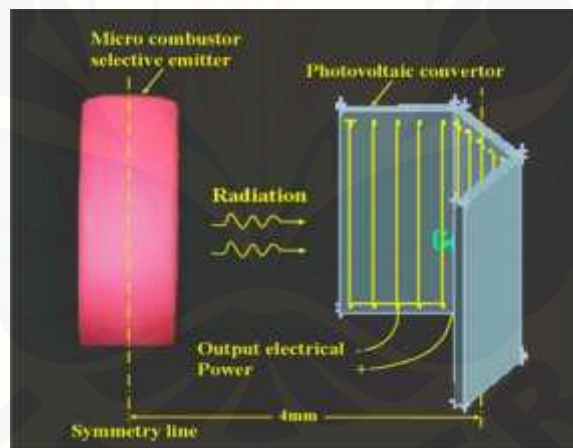


Gambar 2.10 Modul *thermoelectric* sebagai pembangkit listrik (Sumber : Gould dan Shammass, 2009)

*Thermoelectric* 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 *thermoelectric* yang rendah.

b. *Micro-thermophotovoltaic (TPV)*

*Micro thermophotovoltaic* merupakan tipe perangkat yang mengkonversi energi secara langsung, dimana menggunakan sel *photovoltaic* untuk mengubah radiasi panas dari pembakaran bahan bakar menjadi listrik. Pembuatan dan perakitan yang relatif mudah sehingga dapat menjadi lebih umum untuk dijadikan sebagai perangkat elektronik mikro secara komersial. Sistem ini terutama terdiri dari sumber panas, emitor dan sel PV. Skema sistem *micro thermophotovoltaic* ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.11 Skema sistem micro-TPV (Sumber: Yang *et al.*, 2003)

*Micro thermophotovoltaic* terdiri atas sumber panas, selektif emitor dan sel *photovoltaic*. Sumber panas didapatkan dari pembakaran bahan bakar dan oksidator, selektif emitor dimana dalam hal ini adalah dinding *combustor* yang berfungsi mengkonversi panas dari pembakaran menjadi radiasi yang selanjutnya radiasi panas tersebut dikonversikan menjadi listrik oleh sel *photovoltaic* (Yang *et al.*, 2002).

## 2.8 Aliran Fluida

Zat yang tersebar di alam dibedakan menjadi dalam tiga fase, yaitu fase padat, fase cair dan fase gas. Fase cair dan gas memiliki karakter tidak mempertahankan suatu bentuk yang tetap, maka keduanya memiliki kemampuan untuk mengalir, dengan demikian keduanya disebut dengan fluida (Olson dan Steven, 1993).

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).

### 2.8.1 Fluida Statis dan Fluida Dinamis

#### a. Fluida Statis

Fluida statis adalah fluida yang tidak bergerak atau dalam keadaan diam, misalnya air dalam gelas. Fluida statis mempelajari hukum-hukum dasar antara lain mengenai tekanan hidrostatis, hukum Archimedes, tegangan permukaan dan kapilaritas (Rosyid, 2014).

#### b. Fluida Dinamis

Fluida dinamis atau dinamika fluida adalah subdisiplin dari mekanika yang mempelajari tentang pergerakan dari fluida, terutama pada fluida cairan dan gas. Penyelesaian dari masalah dinamika fluida biasanya melibatkan perhitungan dari sifat fluida seperti kecepatan, kepadatan, tekanan dan suhu sebagai fungsi ruang dan waktu. Disiplin ini memiliki beberapa subdisiplin termasuk aerodinamika (penelitian gas) dan hidrodinamika (penelitian cairan). Dinamika fluida memiliki aplikasi yang luas, contohnya adalah pada saat dinamika fluida digunakan dalam menghitung gaya, hambatan dan momen pada pesawat terbang, *mass flow rate* dari petroleum dalam jalur pipa, perkiraan pola cuaca dan bahkan digunakan pada teknik lalu lintas, dimana lalu lintas diperlakukan sebagai fluida yang berkelanjutan (Rosyid, 2014).

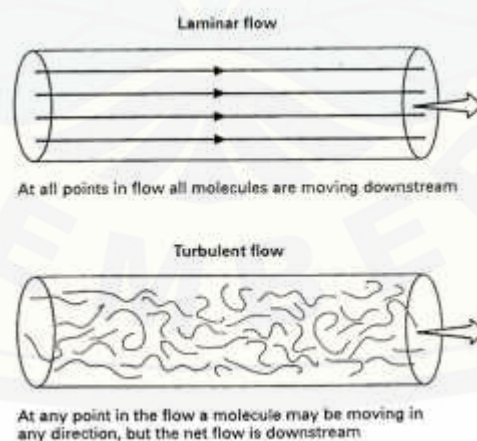
### 2.8.2 Aliran Laminer dan Turbulen

Aliran fluida dapat dibedakan menjadi dua tipe yaitu aliran laminar dan aliran turbulen. Aliran dikatakan laminar jika partikel-partikel fluida yang

bergerak teratur mengikuti lintasan yang sejajar pipa dan bergerak dengan kecepatan sama. Aliran ini terjadi apabila kecepatan kecil dan kekentalan besar. Aliran disebut turbulen jika tiap partikel fluida bergerak mengikuti lintasan sembarang di sepanjang pipa dan hanya gerakan rata-rata saja yang mengikuti sumbu pipa. Aliran ini terjadi apabila kecepatan besar dan kekentalan zat cair kecil (Sularso dan Tahara, 1983).

Pengaruh kekentalan sangat besar sehingga dapat meredam gangguan yang dapat menyebabkan aliran menjadi turbulen. Berkurangnya kekentalan dan bertambahnya kecepatan aliran maka daya redam terhadap gangguan akan berkurang, yang sampai pada batas tertentu akan menyebabkan terjadinya perubahan aliran dari laminar menjadi turbulen (Sularso dan Tahara, 1983).

Fluida laminar disebut juga dengan fluida viskos atau fluida garis alir (*streamline*). Kata laminar berasal dari bahasa latin lamina, yang berarti lapisan atau plat tipis, sehingga aliran laminar berarti aliran yang berlapis-lapis. Lapisan-lapisan fluida akan saling bertindihan satu sama lain tanpa bersilangan. Gerakan partikel fluida tidak lagi sejajar, mulai saling bersilang satu sama lain sehingga terbentuk pusaran di dalam fluida, aliran yang seperti ini disebut dengan aliran turbulen (Bruce *et al.*, 2004).



Gambar 2.12 Aliran laminar dan turbulen (Sumber: Boggs, 2006)

## 2.9 Penelitian Sebelumnya

Penelitian tentang *meso-scale combustion* sudah banyak dilakukan dengan menggunakan beberapa jenis bahan bakar gas seperti hidrogen, methane, propane atau butane. Yang *et al.* (2002) melakukan penelitian dengan membandingkan *combustor* dengan dan tanpa *backward facing step*. 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.

Rohadi (2016) melakukan penelitian dengan memvariasikan panjang saluran *sudden expansion* terhadap karakteristik pembakaran pada *meso-scale combustion*. *Flammability limit* terluas terdapat pada saluran *sudden expansion* dengan panjang 20 mm dimana api dapat menyala dengan rentang rasio ekuivalen 0,91 – 1,38 dan nilai kecepatan reaktan 19,6 – 31 cm/s dibandingkan saluran *sudden expansion* 10 mm dan 15 mm. Kecerahan warna nyala api paling tinggi juga terdapat pada *combustor* dengan panjang *sudden expansion* 20 mm dengan tampak samping RGB(74,90,181) dan tampak depan RGB(156,156,255) dan temperatur tertinggi terdapat pada *combustor* 20 mm dengan angka 889°C sehingga disimpulkan *sudden expansion* 20 mm mempunyai operasi nyala api yang lebih luas dan lebih baik dari *combustor* dengan *sudden expansion* 10 dan 15 mm.

Sadeghi *et al.* (2014) mengatakan untuk mendapatkan nyala api yang stabil kecepatan reaktan harus diimbangi dengan kecepatan nyala api. Kecepatan nyala api meningkat ketika rasio ekuivalen mendekati nilai stoikiometri ( $\phi = 1$ ).

Baighmohammadi *et al.* (2015) melakukan penelitian dengan memvariasikan geometri *combustor*, kecepatan aliran dan rasio ekuivalen bahan bakar metana dan oksigen sehingga didapatkan tujuh rezim api dalam *combustor* dengan *sudden expansion*. Rezim api tersebut antara lain *Blow out*, *Marginal*, *Stationary (stabil)*, *Repetitive Extinction and re-ignition (RERI)*, *RERI-flashback*, *Stationary-flashback* dan *Flashback*. Rezim api tersebut memiliki karakteristik pembakaran masing-masing seperti rezim api *stationary* (stabil) yang terdiri dari api simetris, asimetris dan *spinning flame*, dimana *spinning flame* merupakan api

yang muncul membentuk huruf X dengan kondisi tertentu. Penurunan panjang reaktor memperluas kisaran operasional Reri dan rezim api stasioner dalam reaktor dengan diameter dalam 5 mm. Sebaliknya, penurunan panjang reaktor menekan kisaran operasional api dalam reaktor dengan diameter dalam 3 mm. Meningkatkan rasio ekuivalen pada bilangan reynolds konstan menurunkan *traveling speed* dan frekuensi rezim api RERI. Meningkatkan panjang reaktor pada diameter dalam, rasio ekuivalen dan bilangan reynolds konstan dapat meningkatkan *traveling speed* dan frekuensi rezim api RERI pada kombustor skala meso.

Baighmohammadi *et al.* (2017) juga melakukan penelitian dengan geometri berbeda dari sebelumnya dan campuran bahan bakar propana dan udara, namun kali ini diberikan penambahan oksigen dengan beberapa konsentrasi 21%, 40%, 80%, 100%. Hasil yang didapat berupa tujuh rezim api *blow-off*, *blow-out*, *asymmetric stationary*, *forced/self-RERI*, *stationary-RERI*, *RERI-flashback*, and *flashback*. Meningkatkan konsentrasi oksigen 40% memperluas jangkauan kehadiran api dalam reaktor. Meningkatkan konsentrasi oksigen 80%-100% menekan pengendalian dan stabilitas api disebabkan oleh memperluasnya rezim api RERI, *stationary-RERI*, dan *RERI-flashback*.

## 2.10 Hipotesis

Rasio ekuivalen apabila diturunkan dari campuran kaya pada kecepatan reaktan konstan akan menyebabkan rezim api *blowout* karena meningkatkan kecepatan persebaran api. Rasio ekuivalen apabila diturunkan sampai mendekati keadaan stoikiometri ( $\phi = 1$ ) maka akan menyebabkan nyala api *flashback*.



### BAB 3. METODE PENELITIAN

Penelitian pengaruh Rasio ekuivalen gas LPG dan udara terhadap *flame regime* pada *meso-scale combustor* dengan *sudden expansion* menggunakan metode eksperimental, yaitu metode dengan memvariasikan rasio ekuivalen untuk mengetahui karakteristik pembakaran berupa rezim api yang muncul pada *combustor* skala meso dengan *sudden expansion*.

#### 3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember pada bulan Juli 2017 sampai dengan bulan Agustus 2017.

#### 3.2 Alat dan Bahan Penelitian

##### 3.2.1 Alat

##### a. *Meso-scale Combustor*

*Combustor* yang digunakan terdiri atas dua bagian yaitu bagian *inlet* terbuat dari bahan tembaga dan bagian *outlet* terbuat dari kaca PYREX sebagai saluran *sudden expansion*. Diameter *inlet* *combustor* 4,5 mm, diameter *outlet* 6 mm dan panjang *outlet* dari step sampai ujung *combustor* 20 mm. Ukuran geometri *combustor* tersebut dipilih berdasarkan referensi penelitian sebelumnya.



Gambar 3.1 *Micro-scale combustor* dengan *sudden expansion*

b. *Combustion Holder*

*Combustion holder* berfungsi sebagai tempat dudukan dan pemegang *combustor*.

c. *Mixer*

*Mixer* digunakan untuk tempat pencampuran bahan bakar dan udara sebelum terjadinya reaksi pembakaran. *Mixer* ini akan terhubung pada dua *flowmeter* yang satu untuk bahan bakar LPG dan yang lain untuk udara.



Gambar 3.2 *Mixer*

d. *Flowmeter*

*Flowmeter* merupakan alat untuk mengatur debit udara dan bahan bakar yang akan dialirkan ke *mixer*. Pada gambar ditunjukkan sebelah kiri yang lebih kecil untuk bahan bakar dan yang besar sebelah kanan untuk udara dari kompresor.



Gambar 3.3 *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

## e. Kompresor

Digunakan untuk menyuplai udara pada reaksi pembakaran

## Spesifikasi:

- Merek : Lakoni
- Daya : 0,75 HP
- Tegangan : 180-220 V
- Berat Bersih : 22 kg
- Tekanan maksimum : 8 bar
- Kapasitas tangki : 10 liter



Gambar 3.4 Kompresor

f. *Pisco Tube*

*Pisco tube* adalah selang kecil untuk menghubungkan udara dari kompresor dan bahan bakar ke *flowmeter*



Gambar 3.5 Pisco tube

g. Kamera

Pada penelitian ini untuk pengambilan gambar menggunakan kamera DSLR Nikon D5100 agar kualitas gambar untuk api terlihat jelas.



Gambar 3.6 Kamera DSLR

### 3.2.2 Bahan

#### a. Gas LPG

Pada penelitian ini bahan bakar yang digunakan berupa gas LPG mix dengan komposisi 50% propana dan 50% butana



Gambar 3.7 Tabung gas LPG 3 Kg

## 3.3 Variabel Penelitian

### 3.3.1 Variabel Bebas

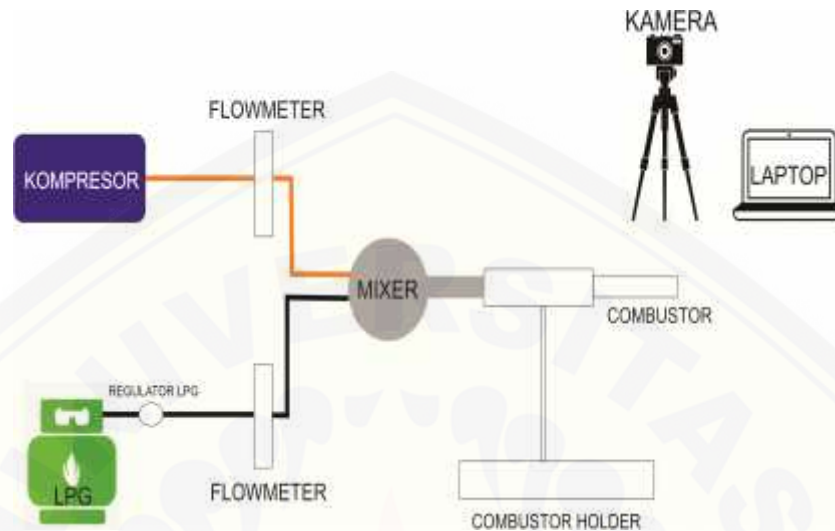
Variabel bebas merupakan variabel yang mempengaruhi faktor-faktor yang diukur oleh peneliti untuk menentukan hubungan antara fenomena yang diamati, adapun variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

- Panjang *combustor outlet* 20 mm dengan Inner diameter *inlet combustor* 4,5 mm dan *outlet diameter combustor* 6 mm.
- Debit bahan bakar ( $Q_f$ ) dan debit udara ( $Q_a$ ).
- Variasi Rasio Ekuivalen.

### 3.3.2 Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang nilainya dipengaruhi oleh variabel bebas. Penelitian ini mempunyai variabel terikat yang meliputi karakteristik dan visualisasi *flame regime* pada reaksi pembakaran di dalam *meso-scale combustor*.

### 3.4 Skema Rangkaian Alat Uji Penelitian



Gambar 3.8 Skema alat uji

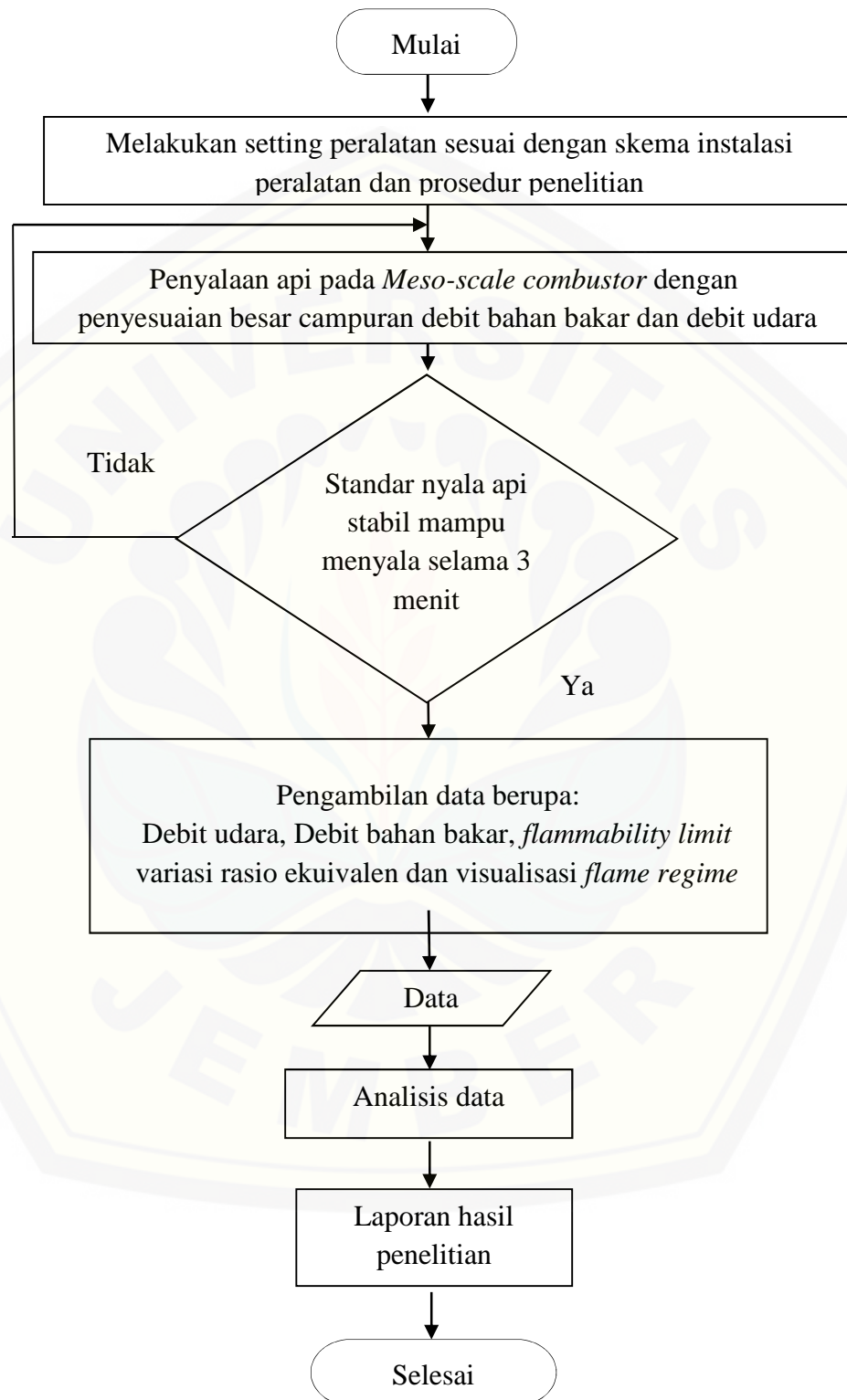
### 3.5 Prosedur Penelitian

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

1. Memasang alat – alat penelitian sesuai dengan skema pada Gambar 3.8, selang saluran bahan bakar, saluran udara, dan saluran campuran bahan bakar dan udara harus terpasang dengan baik tanpa terjadi kebocoran, lalu setting kompresor pada tekanan 1,1 bar.
2. Melakukan *setting* pada *flowmeter* udara dengan membuka tuas output kompresor lalu membuka bukaan *flowmeter* secara perlahan sampai bola penunjuk debit udara pada *flowmeter* berada di skala paling atas.
3. Melakukan *setting* pada *flowmeter* bahan bakar dengan membuka regulator LPG, lalu membuka bukaan *flowmeter* secara perlahan sampai bola penunjuk debit bahan bakar pada *flowmeter* berada pada posisi skala paling atas.

4. 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*.
5. Pengaturan perbandingan debit bahan bakar dan udara yang dilakukan dengan jalan menjaga debit bahan bakar agar tetap konstan, kemudian debit udara divariasikan.
6. Mencari dan mencatat nilai debit bahan bakar terendah pada nyala api yang paling mendekati *sudden expansion* dengan memvariasikan debit udara maksimal dan minimal, kemudian mengulangi dengan debit bahan bakar yang berbeda dengan ketentuan api mampu menyala selama 3 menit.
7. Data debit bahan bakar, debit udara maksimal dan debit udara minimal kemudian diolah dengan perhitungan rumus untuk mendapatkan rasio ekuivalen *upper limit* dan *lower limit* serta kecepatan reaktan maksimal dan minimal.
8. Membuat grafik *flammability limit* berdasarkan data pada point 7, kemudian dicari titik tengah rasio ekuivalen dan kecepatan reaktan dengan cara mencari nilai rata tengah dari rasio ekuivalen dan kecepatan reaktan.
9. Titik tengah kecepatan reaktan akan menjadi nilai kecepatan reaktan konstan, sedangkan nilai titik tengah rasio ekuivalen menjadi acuan untuk variasi rasio ekuivalen.
10. Nilai variasi rasio ekuivalen melalui perhitungan dikembalikan lagi dalam bentuk debit bahan bakar dan udara untuk mendapatkan *flame regime* pada *combustor*.
11. Melakukan penyalaan api sesuai debit bahan bakar dan udara pada variasi rasio ekuivalen yang sudah ditentukan
12. Melakukan visualisasi *flame regime* dengan kamera DSLR dengan jarak dari combustor 30 cm, data visualisasi berupa foto dan video.
13. Mengolah data visualisasi *flame regime* dengan *software* aplikasi *editing video*.

### 3.6 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.9 Diagram Alir Penelitian



### 3.7 Penyajian Data Penelitian

Data yang diperoleh dari hasil penelitian diolah menggunakan *software Microsoft excel* dan Foto rezim api untuk memudahkan pencarian nilai variabel terikat. Hasil pengolahan data disajikan dalam bentuk grafik dan tabel.

Tabel 3.1 Data debit bahan bakar dan udara

No	$Q_f$ (ml/min)	$Q_a$ (ml/min)	
		$Q_{a\text{ minimal}}$	$Q_{a\text{ maksimal}}$
1			
2			
3			
4			
5			
dst			

Tabel 3.2 Penyajian data hasil pengujian flammability limit

No.	$Q_f$ (ml/min)	$Q_a$ (ml/min)		$\phi$		$V$ (cm/s)	
		$Q_{a\text{ min}}$	$Q_{a\text{ maks}}$	$\phi_{\text{lower limit}}$	$\phi_{\text{upper limit}}$	$V_{\text{min}}$	$V_{\text{maks}}$
1							
2							
3							
4							
5							
dst							

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

- a. Massa alir bahan bakar

$$m_f = \frac{Q_f(\text{vapor})}{60} \times \rho_f(\text{vapor}) \text{ (mg/min)} \quad (3.1)$$

- b. Debit bahan bakar

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

- c. Air-fuel ratio

$$AFR = \frac{m_a}{m_f} = \frac{M_a N_a}{M_f N_f} \quad (3.3)$$

$$AFR_{stoikiometri} = \frac{\text{massa udara}}{\text{massa bahan bakar}} = \frac{N \times Mr \text{ udara}}{N \times Mr \text{ Bahan Bakar}} \quad (3.4)$$

d. Rasio ekuivalen

$$\Phi = \frac{(AFR)_{stoikiometri}}{(AFR)_{aktual}} \quad (3.5)$$

e. Kecepatan minimal reaktan

$$V_{total} \text{ (minimal)} = \frac{Q_{f(vapor)} + Q_{a(\text{min})}}{\frac{60}{(3,14 \times r^2) \times 100}} \quad (3.6)$$

f. Kecepatan maksimal reaktan

$$V_{total} \text{ maksimal} = \frac{Q_{f \text{ vapor}} + Q_{a \text{ maksimal}}}{\frac{60}{3,14 \times r^2 \times 100}} \quad (3.7)$$

Keterangan :

$r$	: jari – jari dalam <i>combustor</i> (mm)
$(AFR)_{stoikiometri}$	: rasio udara dan bahan bakar stoikiometri
$(AFR)_{aktual}$	: rasio udara dan bahan bakar aktual
$Q_{a \text{ minimal}}$	: debit udara minimal (ml/min)
$Q_{a \text{ maksimal}}$	: 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)
$m_a$	: massa alir udara (mg/min)
$M_f$	: massa molar bahan bakar (g/mol)
$M_a$	: massa molar udara (g/mol)
$N_f$	: Jumlah mol bahan bakar
$N_a$	: Jumlah mol udara
$Mr$	: Molekul relatif
$\Phi$	: rasio ekuivalen
$V_{(\text{minimal})}$	: kecepatan minimal reaktan di dalam <i>combustor</i> (cm/s)

$V_{\text{(maksimal)}}$  : kecepatan maksimal reaktan di dalam *combustor* (cm/s)



## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

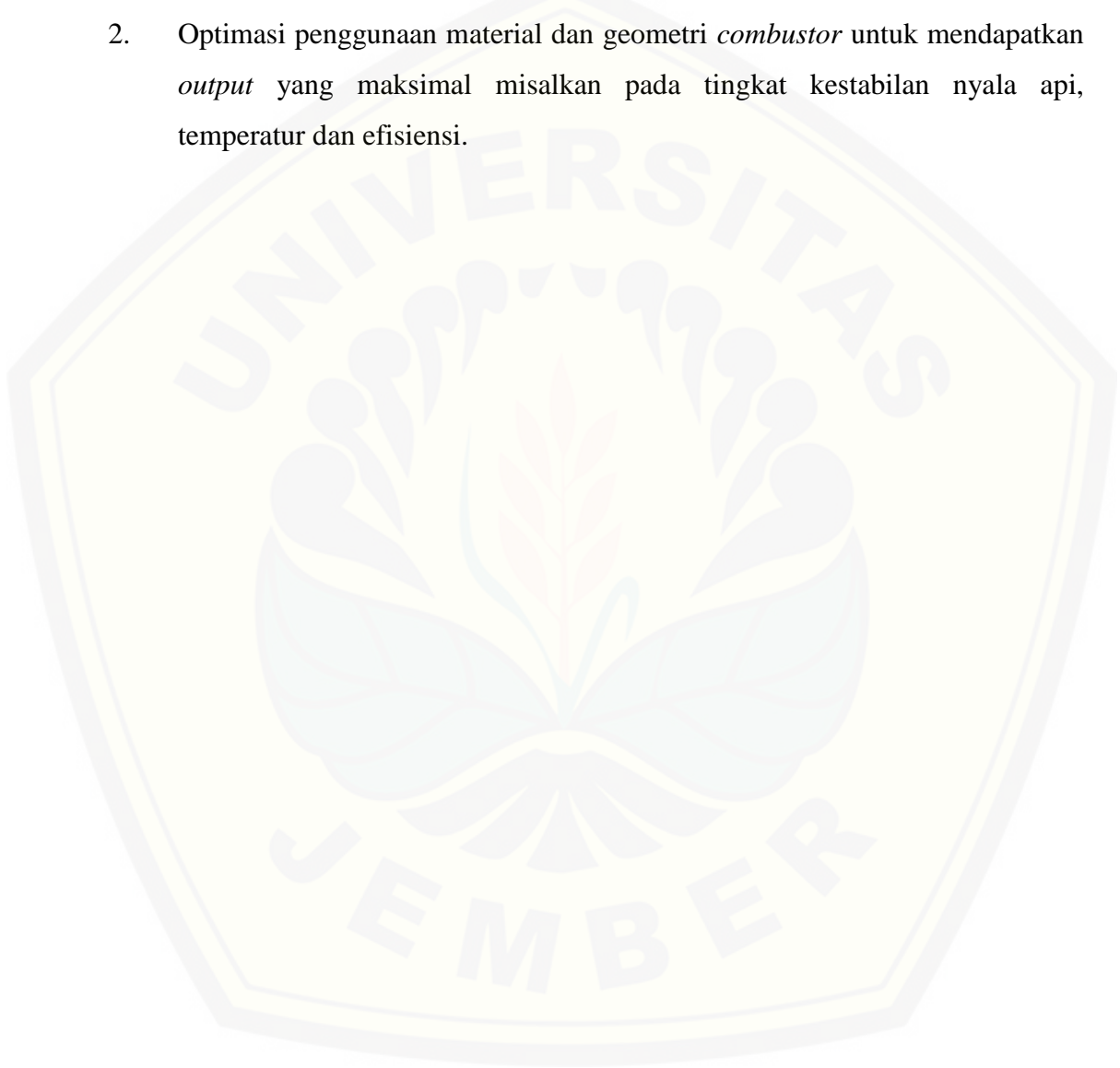
Kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian pengaruh variasi rasio ekuivalen gas LPG dan udara terhadap karakteristik pembakaran *flame regime* pada *meso-scale combustor* dengan *sudden expansion* adalah :

1. *Flame regime* yang teramati pada *combustor* dengan panjang saluran *sudden expansion* 20 mm dan diameter dalam 6 mm dengan kecepatan reaktan konstan  $V = 15,7$  ml/min ada lima yaitu *Blow-out*, *Stationary asymmetric*, *Stationary symmetric*, *Stationary flashback* dan *flashback*. Variasi rasio ekuivalen tertinggi adalah  $\phi = 1,07$  yang mempunyai komposisi bahan bakar  $Q_f = 10$  ml/min dan udara  $Q_a = 255$  ml/min dengan *flame regime* yang teramati adalah *flashback*. Rasio ekuivalen terendah  $\phi = 0,77$  yang mempunyai komposisi bahan bakar  $Q_f = 7,3$  ml/min dan udara  $Q_a = 258$  ml/min dengan *flame regime* yang teramati adalah *blow out*. Nilai rasio yang tinggi memungkinkan terjadinya nyala api *flashback* karena debit bahan bakar tinggi dan debit udara yang rendah yang menyebabkan kecepatan api lebih cepat dari kecepatan reaktan. Nilai rasio ekuivalen rendah memungkinkan terjadinya *blow out* karena debit bahan bakar yang kecil sedangkan debit udara semakin besar, kecepatan reaktan juga lebih besar dari kecepatan api sehingga api terdorong ke luar *combustor*.
2. Nyala api terbaik ada pada rasio ekuivalen  $\phi = 0,95$  dimana *flame regime* yang terbentuk *Stationary symmetric* yang stabil, posisinya menempel pada *sudden expansion* sehingga waktu tinggal api lebih lama dan menurut tabel 4.4 distribusi temperatur mempunyai temperatur yang tinggi dibandingkan nyala api *stationary* pada rasio ekuivalen lainnya.

## 5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut :

1. Pengembangan dari proses pembakaran pada *mesoscale combustor* dengan alat pengubah energi sehingga dapat meneliti proses dari energi panas dikonversi menjadi energi listrik (thermophotovoltaic) atau lainnya.
2. Optimasi penggunaan material dan geometri *combustor* untuk mendapatkan *output* yang maksimal misalkan pada tingkat kestabilan nyala api, temperatur dan efisiensi.



**DAFTAR PUSTAKA**

- Baigmohammadi, M., S. Tabejamaat dan Y. Farsiani. 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. *Chemical Engineering Science*. 132: 215-233.
- Baigmohammadi, M., S. Tabejamaat dan M. Faghani-Lamraski. 2017. Experimental study on the effects of mixture flow rate, equivalence ratio, oxygen enhancement, and geometrical parameters on propaneair premixed flame dynamics in non-adiabatic meso-scale reactors. *Energy*. 121: 657-675.
- Boggs, S. Jr. 2006. Principle of Sedimentology and Stratigraphy. Fourth Edition. New Jersey: Pearson Education.
- Carlos, A. dan F. Pello. 2002. Micropower Generation Using Combustion: Issues and Approach. *Proceedings of the Combustion Institute*. 29. Elsevier Inc: 883-899
- Chou, S.K., W.M. Yang, K.J. Chua, J.Li, dan K.L. Zhang. 2010. Development of micro power generators – A review. *Applied Energy*. 88: 1-16.
- Evans, C. J dan D. C. Kyritsis. 2009. Operational Regime of Rich Methane and Propane/ Oxygen Flames in Mesoscale non-adiabatic Ducts. *Proceeding of the Combustion Institute*. 32. Elsevier Inc: 3107-3114.
- Farizkaraja M., Sasongko, M. N., dan Wijayanti W. 2014. “Pengaruh Konsentrasi CO<sub>2</sub> terhadap Karakteristik Api Pembakaran Difusi CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub> pada Counter Flow Burner”. Malang. Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
- Gould, C dan N. Shamma. 2009. A Review of Thermoelectric MEMS Device for Micro-power Generation, Heating and Cooling Applications. *Micro electronic and mechanical system*. Vukovar: InTech.

- Helmizar. 2011. Studi eksperimental tentang head loss pada aliran fluida yang melalui elbow 90°. Bengkulu. Program studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Bengkulu.
- Ju, Y. dan K. Maruta. 2011. Microscale combustion: Technology development and fundamental research. *Progress in Energy and Combustion Science*. 37: 669-715.
- Mahandri, C.P. 2010. Fenomena Flame Lift-up pada Pembakaran *Premixed Gas* Propana. *Disertasi*. Depok: Program Pasca Sarjana Teknik Mesin Universitas Indonesia.
- Mahandri, C.P. dan I. M. K. Dhiputra. 2010. Flame Lift-up on A Bunsen Burner. *Energy, Process and Enviromental Engineering and Management & Sustainable Architecture*. 13: 1-4.
- Munson, B. R., D. F. Young, dan T. H. Okiishi. 2004. *Mekanika Fluida*. Jilid 1. Jakarta: Erlangga.
- Nolas, G. S., J. Sharp, dan J. Goldsmid. 2001. *Thermoelectrics: Basic Principles and New Materials Developments*. Edisi Pertama. Berlin: Springer.
- Olson, R. M. dan Steven J. 1993. *Dasar-dasar Mekanika Fluida Teknik*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- Pizza, G., J. Mantzaras, dan C. E. Frouzakis. 2010. Flame dynamics in catalytic and non-catalytic mesoscale microreactors. *Catalysis Today*. 155: 123-130.
- Prabowo, E.R., A. Syuhri, dan A. A. Rosyadi. 2017. Karakteristik Distribusi Temperatur pada Mesoscale Combustor dengan Sudden Expansion. *Skripsi*. Jember. Program Sarjana Fakultas Teknik Universitas Jember.
- Riffat, S.B. dan X. Ma. 2003. Thermoelectrics: A Review of Present and Potential Applications. *Applied Thermal Engineering*. 23: 913-935.

- Rohadi, A. I. 2016. Pengaruh Panjang Saluran Sudden Expansion terhadap Karakteristik Pembakaran pada Meso-scale Combustor. Jember. Teknik Mesin Universitas Jember.
- Rosyid, A. 2014. Fluida dan Sifat-sifat. <https://mechanicals.wordpress.com/2014/03/23/fluida-dan-sifat-sifatnya/>. [Diakses pada 8 April 2017].
- Rowe, D.M. 2006. *Thermoelectric Handbook: Macro to Nano*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Sadeghi, S.S., S. Tabejamaat, M. Baighmohammadi dan J. Zarvandi. 2014. An experimental study of the effects of equivalence ratio, mixture velocity and nitrogen dilution on methane/oxygen pre-mixed flame dynamics in a meso-scale reactor. *Energy Conversion and Management*. 81: 169-183.
- Sari, S. 2015. Pengaruh Diameter Combustor Terhadap Karakteristik Pembakaran pada Meso-scale Combustor dengan Backward Facing Step. Malang. Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
- Sularso dan H. Tahara. 1983. *Pompa dan Kompresor: Pemilihan, Pemakaian dan Pemeliharaan*. Tokyo: Association for International Technical Promotion.
- Suzuki, Y., Y. Okada, J. Ogawa, S. Sugiyama, dan T. Toriyama. 2007. Experimental study on mechanical power generation from MEMS internal combustion engine. *Sensor and Actuators A*. 141: 654-661.
- 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.
- Tsai, C. H. 2008. The Asymmetric behavior of steady laminar flame propagation in ducts. *Combustion Science and Technology*. 180: 533-545.
- Walther, D.C. dan J. Ahn. 2011. Advances and challenges in the development of power-generation systems at small scales. *Progress in Energy and Combustion Science*. 37: 583-610.



Wardana, I.N.G. 2008. *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*. Malang: PT. Danar Wijaya Brawijaya University Press.

Weinberg, F. J. 1975. The First Half-million Years of Combustion Research and Today's Burning Problems. *Progress in Energy and Combustion Science*. 1: 17-31.

Wiranto dan Arismunandar. 2005. Penggerak mula motor bakar torak. Bandung. Institut Teknologi Bandung.

Yang, W.M., S.K. Chou, C. Shu, Z.W. Li, dan H. Xue. 2002. Combustion in micro-cylindrical combustors with and without a backward facing step. *Applied Thermal Engineering*. 22: 1777-1787.

Yang, W.M., S.K. Chou, C. Shu, Z.W. Li, dan H. Xue. 2003. Research on micro-thermophotovoltaic power generators. *Solar Energy Materials and Solar Cell*. 80: 95-104.

LAMPIRAN

**Perhitungan  $AFR_{stoikiometri}$**



a) Diketahui:

- Massa atom relatif (Ar)

$C = 12$  gram/mol ;  $H = 1$  gram/mol ;  $O = 16$  gram/mol ; dan  
 $N = 14$  gram/mol

- Massa jenis udara pada suhu ruangan  $20^\circ C$  adalah  $0,001205$  gram/ $cm^3$
- Massa jenis propana  $0,00183$  gram/ $cm^3$ .
- Massa jenis butana  $0,002417$  gram/ $cm^3$ .
- Massa jenis LPG (50% propana dan 50% butana) adalah  $0,0092126$  gram/ $cm^3$ .

b) Ditanya:

- $AFR_{stoikiometri} = \dots?$

c) Penyelesaian:

- $AFR_{stoikiometri}$  berdasarkan rasio massa udara dan bahan bakar:

$$\begin{aligned} - \text{ Massa bahan bakar} &= n \times Mr \\ &= 0,5 MrC_3H_8 + 0,5 MrC_4H_{10} \\ &= 0,5 (36 + 8) + (0,5 (48 + 10)) \\ &= 22 + 29 \\ &= 51 \text{ gram} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} - \text{ Massa udara} &= n \times Mr \\ &= 5,75 (MrO_2 + 3,76 MrN_2) \\ &= 5,75(32 + 3,76 \cdot 28) \\ &= 5,75 \times 137,28 \\ &= 789,36 \text{ gram} \end{aligned}$$

$$- AFR_{stoikiometri} = \frac{\text{Massa udara}}{\text{Massa bahan bakar}}$$

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

$$= 15,48$$

$(Q_f = 5,79 \text{ ml/min})$

### 1. Perhitungan $AFR_{\text{aktual}}$

a) Diketahui :

- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $\rho_{\text{udara}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3$
- $Q_f = 5,8 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ min}} = 190 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ maks}} = 200 \text{ ml/min}$

b) Karena perbedaan fase bahan bakar dan udara, maka keduanya diubah menjadi massa alir ( $m$ ).

- $m_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126 \text{ gram/cm}^3 \times 5,8 \text{ ml/min} = 0,01230 \text{ gram/min}$
- $m_{a \text{ min}} = \rho_{\text{udara}} \times Q_{a \text{ maksimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 200 \text{ ml/min} = 0,241 \text{ gram/min}$
- $m_{a \text{ maks}} = \rho_{\text{udara}} \times Q_{a \text{ minimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 190 \text{ ml/min} = 0,229 \text{ gram/min}$

c) Nilai  $AFR_{\text{aktual}}$

$$AFR_{\text{aktual}} = \frac{m_a}{m_f}$$

- $AFR_{\text{aktual batas atas}} = \frac{0,229 \text{ gram/min}}{0,0123 \text{ gram/min}} = 18,61$
- $AFR_{\text{aktual batas bawah}} = \frac{0,241 \text{ gram/min}}{0,0123 \text{ gram/min}} = 19,59$

### 2. Perhitungan rasio ekuivalen ( $\Phi$ )

$$\Phi = \frac{AFR_{\text{stokimetri}}}{AFR_{\text{aktual}}}$$

- $\Phi_{\text{batas atas}} = \frac{15,48}{18,61} = 0,83$

- $\Phi_{\text{batas bawah}} = \frac{15,48}{19,59} = 0,80$

### 3. Perhitungan kecepatan reaktan (V)

a) Diketahui:

- $Q_{a \text{ min}} = 190 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ maks}} = 200 \text{ ml/min}$
- $Q_f = 5,8 \text{ ml/min}$
- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $d_{\text{out combustor}} = 6 \text{ mm}$
- $r_{\text{out combustor}} = 3 \text{ mm}$

b) Ditanya :

- $V_{\text{reaktan min}}$
- $V_{\text{reaktan maks}}$

c) Penyelesaian:

- $V_{\text{reaktan min}} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a \text{ min}}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{5,8 + 190}{60}}{\frac{(3,14 \times 3^2)}{100}} = \frac{3,26}{0,282} = 11,55 \text{ cm/s}$

- $V_{\text{reaktan maks}} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a \text{ max}}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{5,8 + 200}{60}}{\frac{(3,14 \times 3^2)}{100}} = \frac{3,43}{0,282} = 12,14 \text{ cm/s}$

#### ❖ Perhitungan nilai $Q_a$ dan $Q_f$ untuk data visualisasi nyala api

##### 1. Rasio Ekuivalen 0,77

a) Diketahui:

- $\Phi = 0,77$
- $V = 15,7 \text{ cm/s}$
- $AFR_{\text{stoikiometri}} = 15,48$
- $\rho_{\text{udara}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3$
- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$

b) Ditanya:

- $Q_a$
- $Q_f$

c) Penyelesaian:

$$\bullet \Phi = \frac{AFR_{stoikiometri}}{AFR_{aktual}}$$

$$0,77 = \frac{15,48}{AFR_{aktual}}$$

$$AFR_{aktual} = \frac{15,48}{0,77} = 20,10$$

$$\bullet AFR_{aktual} = \frac{m_a}{m_f}$$

$$20,10 = \frac{Q_a \times 0,001205 \text{ gram/cm}^3}{Q_f \times 0,002126 \text{ gram/cm}^3}$$

$$Q_a = 35,46 Q_f$$

$$\bullet V_{reaktan} = \frac{\frac{Q_f + Q_c}{3,14 \times r^2}}{100}$$

$$15,7 \text{ cm/s} = \frac{Q_f + 35,46 Q_f}{\frac{3,14 \times r^2}{100}}$$

$$15,7 \text{ cm/s} = \frac{0,607 Q_f}{0,282}$$

$$Q_f = \frac{15,7 \times 0,282}{0,60766}$$

$$Q_f = 7,285 \text{ ml/min}$$

$$Q_a = 35,46 Q_f$$

$$Q_a = 35,46 \times 7,285 = 258,36$$

Dokumentasi









