



***ANALISIS VARIASI SURFACE TO VOLUME RATIO
TERHADAP FLAME PROPAGATION SPEED PADA SUDDEN
EXPANSION MESO-SCALE COMBUSTOR***

SKRIPSI

Oleh

**Dwi Kurniawan Tumanggor
NIM 1319101010**

**PROGRAM STUDI STRATA SATU TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2019**



**ANALISIS VARIASI *SURFACE TO VOLUME RATIO*
TERHADAP *FLAME PROPAGATION SPEED* PADA *SUDDEN*
*EXPANSION MESO-SCALE COMBUSTOR***

SKRIPSI

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

Oleh

Dwi Kurniawan Tumanggor
NIM 1319101010618

**PROGRAM STUDI STRATA SATU TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2019**

PERSEMBAHAN

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu dengan kerendahan hati saya persembahkan skripsi ini kepada:

1. Kedua orang tua terhebat dan tercinta;
2. Seluruh keluarga Tumanggor;
3. Dosen dan staff almamater tercinta Jurusan Teknik Mesin Universitas Jember, khususnya dosen pembimbing dan dosen penguji;
4. Sahabat dan teman-teman kuliah khususnya Teknik Mesin angkatan 2013;
5. Keluarga besar Merpati Putih;
6. Dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-satu.

MOTO

“Mersudi Patitising Tindak Pusakane Titising Hening”.
“Manunggalno Estining Roso Pikiran Ati Tumuju Ing Pangeran Udinen Tatanan
Ingkang Hang Agung”
(MERPATI PUTIH) *)



*)PERGURUAN PENCAK SILAT BELADIRI TANGAN KOSONG MERPATI
PUTIH.

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dwi Kurniawan Tumanggor

NIM : 131910101018

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul “Analisis Variasi *Surface to Volume Ratio Flame Propagation Speed* pada *Sudden Expansion Meso-Scale Combustor*” adalah benar-benar karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, serta 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, 11 Januari 2019

Yang menyatakan,

Dwi Kurniawan Tumanggor
NIM 131910101066

SKRIPSI

***ANALISIS VARIASI SURFACE TO VOLUME RATIO
TERHADAP FLAME PROPAGATION SPEED PADA SUDDEN
EXPANSION MESO-SCALE COMBUSTOR***

Oleh

Dwi Kurniawan Tumanggor

NIM 131910101018

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Nasrul Ilminnafik, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Aris Zainul Muttaqin, S.T., M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Analisis Variasi *Surface to Volume Ratio Flame Propagation Speed* pada *Sudden Expansion Meso-Scale Combustor*” telah diuji dan disahkan pada:

Hari, tanggal : 11 Januari 2019

Pukul : 07.00 – 09.00 WIB

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji:

Dosen Pembimbing Utama,

Dosen Pembimbing Anggota,

Dr. Nasrul Iminnafik, S.T., M.T.
NIP 197111114 199903 1 002

Aris Zainul Muttaqin, S.T., M.T.
NIP 19681207 199512 1 002

Dosen Penguji I,

Dosen Penguji II,

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

Santoso Mulyadi, S.T., M.T.
NIP 19700228 199702 1 001

Mengesahkan
Dekan,

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

RINGKASAN

Analisis Variasi Surface to Volume Ratio terhadap Flame Propagation Speed pada Sudden Expansion Meso-Scale Combustor; Dwi Kurniawan Tumanggor, 131910101018; 2019: 50 Halaman; Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Perangkat *portable* pada saat ini yang menunjang kebutuhan energi listrik dalam skala kecil saat ini adalah baterai. Kepadatan energi baterai masih kurang untuk memenuhi kebutuhan energi skala kecil. Pengembangan untuk perangkat skala kecil pada saat ini adalah *Micro Power Generator* (MPG). *Micro Power Generator* (MPG) mempunyai kepadatan energi yang lebih tinggi dari baterai karena menggunakan bahan bakar hidrokarbon. Komponen utama pada *Micro Power Generator* adalah *micro/meso combustor* dan *Micro-Termophotovoltaic*. *Micro/meso* berfungsi sebagai pengubah bahan bakar hidrokarbon menjadi energi panas sedangkan *Micro-Termophotovoltaic* berfungsi sebagai pengubah energi panas menjadi listrik. Pada pengembangan alat saat ini masalah utama MPG yang timbul pada *micro/meso combustor* adalah bagaimana memaksimalkan output panas, karena sebagian besar dipengaruhi meningkatnya kehilangan panas dalam combustor akibat rasio permukaan terhadap volume yang tinggi, sehingga dapat menghentikan proses pembakaran.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan analisis *surface to volume ratio* terhadap *flame propagation* dan memvisualisasikan hasil *flame propagation* dan menghitung kecepatan rambat api. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan *surface to volume* (S/V) pada D_{out} combustor 5 mm dan 6 mm dengan panjang combustor yang sama yaitu 20 mm dan diameter *input combustor* 4,5 mm. Bahan combustor menggunakan kaca Pyrex borosilikat berbentuk

silinder, hasil visualisasi penelitian menggunakan kamera Fujifilm X-A3 dengan spesifikasi resolusi 920 x1080 60p/50p.

Dengan rasio ekuivalen $\phi = 0,86$ pada kecepatan konstan $v = 29,80$ cm/s pada *combustor* 5 mm mempunyai debit bahan bakar $Q_f = 13,418$ ml/min dengan debit udara $Q_a = 255,75$ ml/min. Karakteristik api yang teramati pada rasio ekuivalen ini adalah *stationary* asimetri dan untuk kecerahan warna api pada diameter 5 mm adalah RGB (23,44,97). Untuk *combustor* 6 mm mempunyai debit bahan bakar $Q_f = 9,65$ ml/min dengan debit udara $Q_a = 255,75$ ml/min. Karakteristik api yang teramati pada rasio ekuivalen ini adalah *stationary* asimetri dan tingkat kecerahan warna api pada diameter 6 mm adalah RGB (24,43,101).

Hasil penelitian menurut *flame propagation*, s/v dan karakteristiknya bahwa kondisi nyala api terbaik terdapat pada rasio ekuivalen $\phi = 0,86$ pada kecepatan konstan $v = 29,80$ cm/s dengan bahan bakar $Q_f = 17,5$ ml/min dengan udara $Q_a = 504$ ml/min, di mana posisi api pada saat penyalaan menempel pada *sudden expansion*, dan diperoleh hasil dari variasi *surface to volume* dan juga *flame speed* pada kedua *combustor* yaitu kecepatan rata-rata pada *combustor* 5 mm adalah 13,951 m/s dengan hasil rasio *surface to volume* adalah 0,6. Sedangkan untuk *combustor* 6mm mempunyai kecepatan rata-rata sebesar 21,676 m/s dan hasil rasio *surface to volume* adalah 0,8. Dengan kondisi rasio ekuivalen yang sama akan tetapi mempunyai tingkat kecerahan api yang berbeda. Perbedaan kecepatan api dan juga stabilitas api dipengaruhi oleh lebar saluran, menurut Ju *et al* (2006) transisi non monotonik antara rezim api sangat bergantung pada lebar saluran dan kecepatan aliran, terdapat dua transisi api yaitu transisi kepunahan dan transisi langsung, dan nyala api cepat ke nyala lambat. Efek angka Lewis adalah menyempitkan batas kepunahan nyala api cepat secara signifikan mengubah batas transisi nyala api, yang memiliki dampak besar pada ketidakstabilan api.

Penggunaan *sudden expansion* membuat kondisi api di dalam saluran menjadi lebih baik hal ini diperkuat juga oleh Yang *et al* (2002) menyatakan

bahwa *sudden expansion* mempunyai fungsi mengontrol kestabilan nyala api karena mampu mensirkulasikan pencampuran reaktan pembakaran pada area dekat dinding *combustor*, sehingga meningkatkan proses pencampuran pembakaran di sekitar tepi tabung *combustor* menjadi lebih stabil.



SUMMARY

Analysis of the variation of Surface to Volume Ratio on Flame Propagation Speed with Sudden Expansion Meso-Scale Combustor; Dwi Kurniawan Tumanggor, 131910101018; 2019: 50 Pages; Departement of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Jember

Portable devices at this time that support small-scale electrical energy needs today are batteries. Battery energy density is still lacking to meet small-scale energy needs. The development for small scale devices at the moment is Micro Power Generator (MPG). Micro Power Generator (MPG) has a higher energy density than a battery because it uses hydrocarbon fuels. The main components in Micro Power Generator are micro / meso combustor and Micro-Termophotovoltaic. Micro / meso functions as a hydrocarbon fuel converter to heat energy while Micro-Termophotovoltaic functions as a modifier of heat energy into electricity. In the development of the current tool the main problem of MPG that arises in micro / meso combustor is how to maximize heat output, because most of it is influenced by the increase in heat loss in the combustor due to the high surface to volume ratio, so it can stop the combustion process.

The purpose of this study was to analyze the surface to volume ratio against flame propagation and visualize the results of flame propagation and calculate the velocity of flame propagation. The study was carried out by varying the surface to volume (S / V) in the 5 mm and 6 mm Dout combustor with the same combustor length of 20 mm and the 4.5 mm combustor input diameter. Combustor materials using cylindrical Borosilicate Pyrex glass, the results of the visualization study using a Fujifilm X-A3 camera with specifications resolution of 920 x1080 60p / 50p.

With an equivalent ratio of $\phi = 0.86$ at a constant speed $v = 29.80 \text{ cm / s}$ in a 5 mm combustor has a fuel discharge $Q_f = 13.418 \text{ ml / min}$ with air discharge $Q_a = 255.75 \text{ ml / min}$. The fire characteristics observed in this equivalent ratio are

stationary asymmetry and for the brightness of the fire color at a diameter of 5 mm is RGB (23,44,97). For the 6 mm combustor has a fuel discharge $Q_f = 9.65$ ml / min with air discharge $Q_a = 255.75$ ml / min. The fire characteristics observed in this equivalent ratio are stationary asimetri and the brightness level of the fire color at a diameter of 6 mm is RGB (24,43,101).

The results of research according to flame propagation, s / v and its characteristics that the best flame conditions are in the ϕ equivalent ratio = 0.86 at a constant velocity $v = 29.80$ cm / s with Q_f fuel = 17.5 ml / min with Q_a air , = 504 ml / min, where the position of fire during ignition attaches to sudden expansion, and results from variations in surface to volume and flame speed are obtained at both combustors ie the average velocity at the 5 mm combustor is 13,951 m / s with the results the ratio of surface to volume is 0.6. While for combustor 6mm has an average speed of 21,676 m / s and the ratio of surface to volume is 0.8. With the same equivalent ratio conditions, but have different levels of fire brightness. The difference in fire speed and fire stability is influenced by the width of the channel, according to Ju et al (2006), the non monotonic transition between the fire regime is very dependent on channel width and flow velocity, there are two flame transitions, namely extinction transitions and direct transitions, and fast flame to slow on. The lewd number effect is to narrow the limit of the rapid flame extinction significantly changing the flame transition limit, which has a large impact on fire instability.

The use of sudden expansion makes the fire conditions in the channel better, this is also reinforced by Yang et al (2002) which states that sudden expansion has the function of controlling the flame stability because it is able to circulate the mixing of combustion reactants in the area near the combustor wall, thus increasing the combustion mixing process around the edge of the combustor tube it becomes more stable.

PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul *Analisis Variasi Surface to Volume Ratio Flame Propagation Speed pada Sudden Expansion Meso-Scale Combustor*". 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. Nasrul Iminnafik S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Utama, Bapak Aris Zainul Muttaqin, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam penulisan skripsi ini;
2. Bapak Hary Sutjahjono, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji Utama dan Bapak Santoso Mulyadi, 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 Togu Tumanggor, Ibu Siwuh, dan seluruh keluarga untuk segala semangat, doa, dan dukungan yang selalu diberikan;
6. Alivia Davy Ratu Pericha yang selalu menyemangati dan memberikan dukungan dalam melakukan penelitian;
7. Rekan satu tim penelitian Meso-Combustion dan saudara-saudaraku mahasiswa teknik mesin angkatan 2013;
8. 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, 11 Januari 2019

Penulis



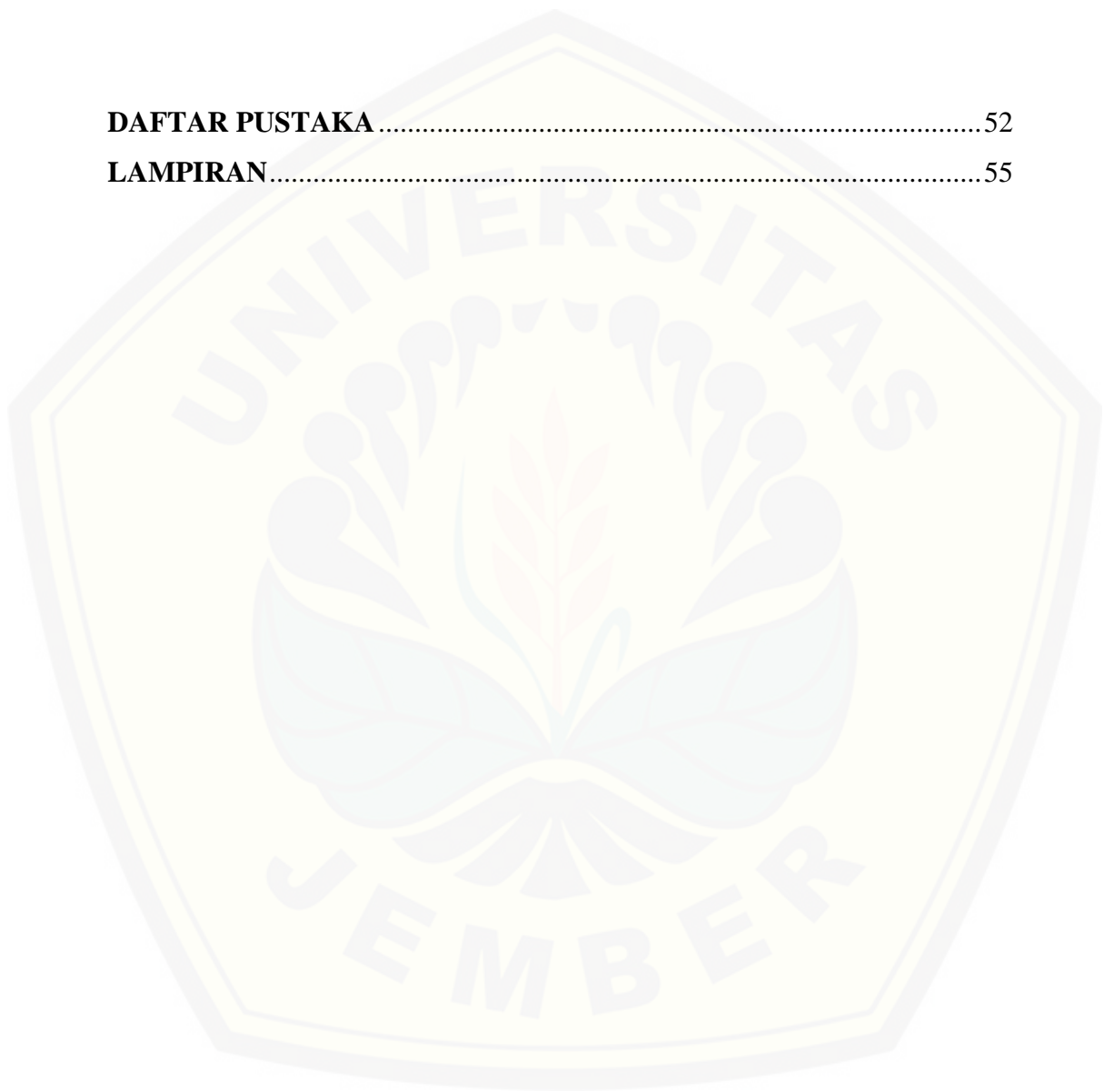
DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN PEMBIMBINGAN	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
RINGKASAN	vii
SUMMARY	ix
PRAKATA	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR GRAFIK	xx
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Sebelumnya	5
2.2 Pembakaran	6
2.2.1 Klasifikasi Pembakaran	6
2.2.2 <i>Air Fuel Ratio</i> (AFR).....	7
2.2.3 Rasio Ekuivalen	7

2.2.4 <i>Flammability Limit</i>	8
2.3 <i>Micro/ Meso Scale Combustor</i>	9
2.4 <i>Elpiji</i>.....	12
2.5 <i>Micro Power Generator (MPG)</i>	12
2.5.1 <i>Jenis Micro Power Generator</i>	13
2.6 <i>Sudden Expansion</i>	14
2.7 <i>Karakteristik Nyala Api (Rezim Api)</i>	15
2.8 <i>Hipotesis</i>.....	18
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	19
3.1 <i>Metodologi Penelitian</i>	19
3.2 <i>Tempat dan Waktu Pengambilan Data</i>	19
3.3 <i>Alat dan Bahan Penelitian</i>	19
3.3.1 <i>Alat</i>	19
3.3.2 <i>Bahan</i>	24
3.4 <i>Variabel Penelitian</i>	25
3.4.1 <i>Variabel Bebas</i>	25
3.4.2 <i>Variabel Terikat</i>	25
3.5 <i>Skema Rangkaian Alat Uji</i>.....	26
3.6 <i>Prosedur Penelitian</i>.....	26
3.7 <i>Diagram Alir Penelitian</i>	29
3.8 <i>Penyajian Data Penelitian</i>	30
3.9 <i>Rencana Analisa Data</i>	32
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	36
4.1 <i>Hasil Penelitian</i>	36
4.2 <i>Pembahasan</i>.....	40
BAB 5. PENUTUP.....	50

5.1 Kesimpulan	50
5.2 Saran	50

DAFTAR PUSTAKA	52
LAMPIRAN	55



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1. <i>Flammability limit</i>	9
2.2. Perbandingan antara konvensional dan mikro- <i>combustor</i> [MIT].....	11
2.3. <i>Thermoelectric Micro Power Generator</i>	13
2.4. <i>Micro Gas Turbine Generator</i>	14
2.5. <i>Micro-Thermophotovoltaic Power Generator</i>	14
2.6. <i>Backward facing step/Sudden expansion</i>	15
2.7. Rezim api <i>Blow-Out</i>	15
2.8. Rezim api <i>Marginal</i>	16
2.9. Rezim api <i>Stationary</i> simetri	16
2.10. Rezim api <i>Stationary</i> asimetri	16
2.11. Rezim api <i>Spinning</i>	17
2.12. Rezim api RERI.....	17
2.13. Rezim api <i>flashback</i>	18
3.1. <i>Mixer</i>	20
3.2. <i>Flowmeter</i>	21
3.3. Kompresor udara	22
3.4. <i>Pisco tube</i>	23
3.5. <i>Lighter Api</i>	23
3.6. Kamera Fujifilm X-A3	24
3.7. Tabung Gas LPG 3 kg	24
3.8. Skema Alat Uji	26
3.9. Diagram alir penelitian	29
3.10. Pra-eksperimen Grafik <i>flammability limit</i>	32
4.1. Grafik <i>flammability limit</i> pada <i>meso-scale combustor</i> dengan panjang saluran <i>sudden expansion</i> 20 mm dengan diameter dalam 5 mm dan 6 mm	39
4.2. Titik tengah grafik <i>flammability limit</i>	40

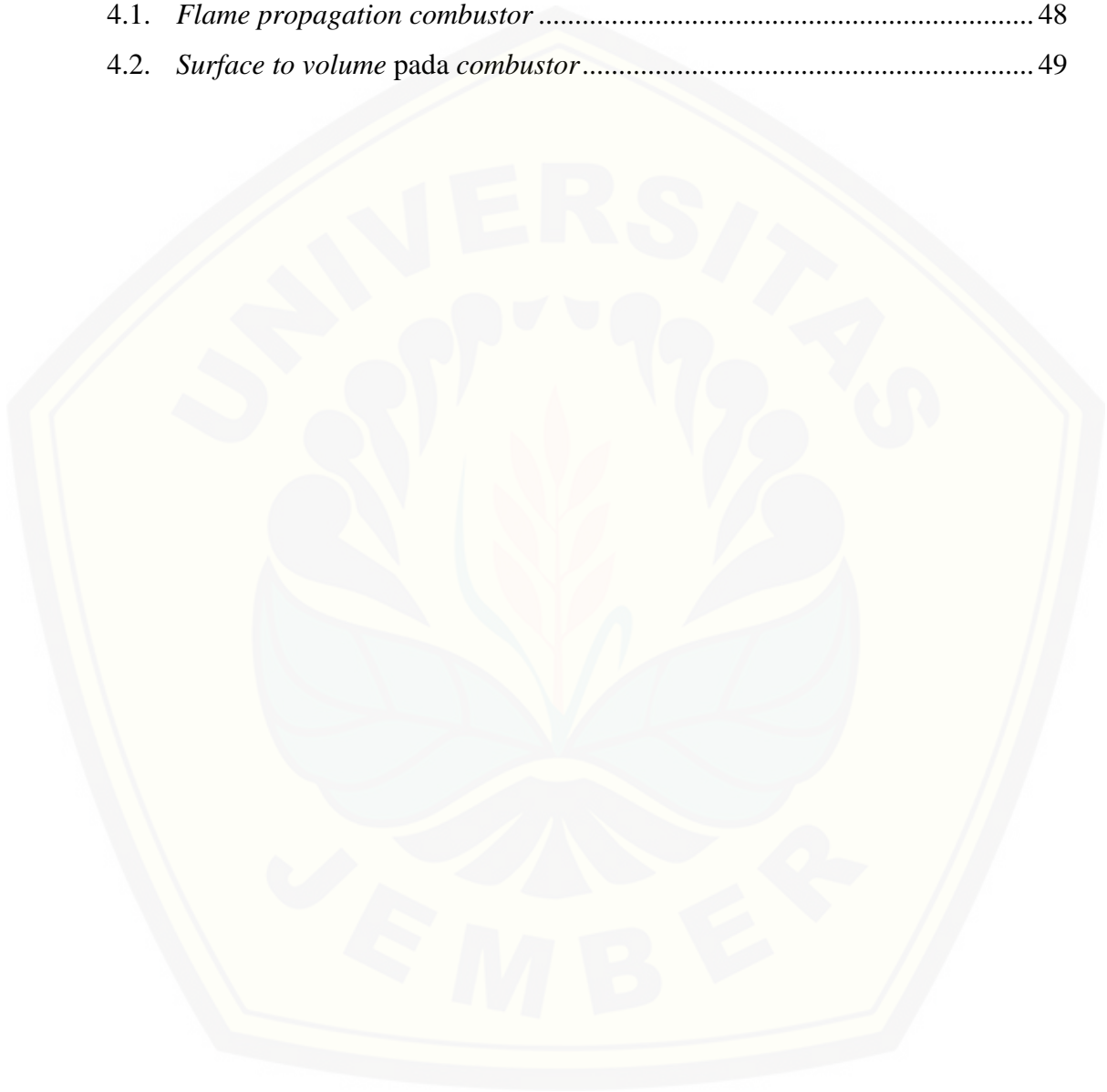
4.3. <i>Flame</i> propagasi 5 mm pada $\phi = 0,86$ dan $V = 29,80$ cm/s tampak samping dan tampak depan.....	42
4.4. <i>Flame</i> propagasi 6 mm pada $\phi = 0,86$ dan $V = 29,80$ cm/s tampak samping dan tampak depan.....	42
4.5. <i>Flame stationary asimetri</i>	43
4.6. Dimensi <i>pixel Combustor</i> 5mm.....	43
4.7. Dimensi <i>pixel Combustor</i> 6mm.....	43
4.8. Propagasi api 5 mm dengan $\phi = 0,86$ dan $V = 29,80$ cm/s, (a) nyala api di luar saluran, (b) nyala api 208 <i>pixel</i> , (c) nyala api 105 <i>pixel</i> , (d) nyala api 50 <i>pixel</i> , (e) nyala api 20 <i>pixel</i> , (f) nyala api menempel pada <i>sudden expansion</i>	45
4.9. Propagasi api 6 mm dengan $\phi = 0,86$ dan $V = 29,80$ cm/s, (a) nyala api di luar saluran, (b) nyala api 2310 <i>pixel</i> , (c) nyala api 200 <i>pixel</i> , (d) nyala api 70 <i>pixel</i> , (e) nyala api 15 <i>pixel</i> , (f) nyala api menempel pada <i>sudden expansion</i>	47

DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1. Klasifikasi jenis pembakaran.....	10
2.2. Material <i>combustor</i>	10
3.1. Tabel variasi ukuran <i>combustor</i>	19
3.2. Pra-eksperimen data debit bahan bakar dan udara Dout 5 mm	33
3.3. Pra-eksperimen data debit bahan bakar dan udara Dout 6 mm	34
4.1. Data komposisi debit bahan bakar dan udara Dout 5 mm	36
4.2. Data komposisi debit bahan bakar dan udara Dout 6 mm	37

DAFTAR GRAFIK

	Halaman
4.1. <i>Flame propagation combustor</i>	48
4.2. <i>Surface to volume pada combustor</i>	49



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada saat ini kebutuhan akan energi semakin meningkat, dan menjadikan krisis energi di berbagai negara termasuk Indonesia dengan tidak seimbangnya antara cadangan energi dan kebutuhan energi. Berdasarkan data BP *Statistical Review 2016*, cadangan minyak Indonesia per akhir tahun 2015 hanya 3,6 miliar barrel. Adapun cadangan gas, dan merujuk data yang sama diperkirakan 100,3 triliun kaki kubik (TCF). Sedangkan, konsumsi harian minyak dalam negeri saat ini perharinya mencapai 1,6 juta barrel. Hanya sekitar 800.000 barrel yang dipakai produksi di dalam negeri dan selebihnya harus impor. (Dudley, 2016)

Dengan adanya krisis energi yang terjadi pada saat ini para peneliti mengembangkan perangkat yang dapat digunakan secara lebih efisien, portabel, dan multi-fungsional. Perangkat ini memiliki *life time* yang panjang dan mampu mempunyai pasokan listrik yang dapat diisi ulang dan memiliki rentang daya dari beberapa miliwatt hingga ratusan watt. Pada saat ini, perangkat portabel tersebut sangat bergantung pada baterai, sedangkan permintaan pasar untuk pembangkit listrik dalam skala kecil akan terus tumbuh, akan tetapi kepadatan energi baterai sangat rendah. Bahkan baterai ion lithium terancang pun hanya memiliki sekitar 0,20 kWh/kg. Kepadatan energi yang rendah ini hanya dapat mendukung beberapa jam untuk komputer notebook dan video kamera. Selain itu, baterai membutuhkan beberapa jam untuk mengisi ulang dan hanya memiliki jumlah siklus isi ulang yang terbatas. (Ju dan Maruta, 2011)

Menurut Yang *et al*, (2002) bahwa perangkat baterai masih merupakan komponen terbesar dan terberat dari kebanyakan peralatan / sistem. Dalam pengembangan energi yang terbaru dibutuhkan adanya perangkat yang kecil tetapi mempunyai sumber energi yang kuat sebagai pengganti baterai. sehingga banyak dilakukan pengembangan energi dengan skala kecil yang mempunyai energi dengan

kepadatan yang sangat tinggi pada sistem generasi berikutnya. Energi yang dapat melebihi baterai adalah bahan bakar hidrokarbon (Chou *et al.*, 2010). Efisiensi energi dari hidrokarbon lebih kuat dari baterai, bahan bakar hidrokarbon mempunyai keuntungan yaitu biaya yang sangat rendah, voltase yang dihasilkan lebih konstan dan pengisian ulang instan, dalam memenuhi permintaan kebutuhan manusia dalam skala kecil dan sumber energi dengan kepadatan yang tinggi. Penggunaan proses pembakaran untuk pembangkit tenaga listrik memberikan beberapa kelebihan dari baterai dalam hal kepadatan penyimpanan, bahan bakar hidrogen mempunyai kepadatan penyimpanan 120 MJ / kg, sedangkan baterai lithium ion yang umum digunakan di ponsel dan komputer hanya sekitar 0,5 MJ / kg. Dengan demikian bahkan pada hanya 10% konversi efisiensi dari panas ke listrik bahan bakar hidrogen 24 kali lebih kuat dari pada baterai.

Perkembangan peralatan penghasil energi skala kecil sebagai pengganti fungsi baterai yang sedang dikembangkan saat ini adalah *Micro Power Generator* (MPG). *Micro power generator* adalah peralatan penghasil energi yang memiliki dua komponen utama yaitu *combustor* skala kecil (*micro/meso*) sebagai pengkonversi energi kimia pada bahan bakar hidrokarbon menjadi energi panas dan bagian yang kedua adalah *Micro-Termophotovoltaic* sebagai alat perubah energi panas menjadi listrik sebagai pengganti baterai. Namun masalah yang paling menantang dalam MPG yaitu desain sebuah *combustor* yang pada skala kecil (*micro/meso*), di mana *combustor* tersebut mampu mempertahankan pembakaran dalam sebuah *micro/meso combustor* dengan tetap memaksimalkan *output* panas. Dalam *micro/meso combustor* sebagian besar dipengaruhi oleh meningkatnya kehilangan panas karena tingginya rasio permukaan terhadap *volume*, serta untuk mencapai proses pembakaran yang stabil dibutuhkan waktu tinggal reaktan (*residence time*) dalam proses pencampuran bahan bakar. (Yang *et al.*, 2002)

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Yang, *et al.*, (2002) bahwa pembakaran stabil dapat terjadi dalam sebuah *combustor* dengan *backward facing step* untuk meningkatkan proses pencampuran udara dan bahan bakar yang terjadi dalam

sebuah *combustor*, dan untuk memperpanjang waktu tinggal reaktan (*residence time*) dalam daerah raksi pembakaran. *Backward facing step* adalah sebuah penambahan *sudden expansion* pada geometri diameter *combustor* D_1/D_2 dengan $D_1 < D_2$ dan terletak pada sisi *upstream* (ujung *combustor*). *Backward facing step* pada *meso-scale combustor* sangat efektif dalam mengontrol posisi api dan meningkatkan laju aliran dan rasio bahan bakar/udara serta mampu mensirkulasikan pencampuran reaktan pada pembakaran.

Pembakaran pada saluran ruang bakar dengan diameter *combustor* antara 1-10 mm yang disebut dengan *Meso Scale-Combustion* adalah salah satu pengembangan teknologi pembakaran pada skala kecil dengan memanfaatkan bahan bakar hidrokarbon, dan dapat dimanfaatkan sebagai alternatif solusi masalah krisis energi dan pemenuhan perkembangan teknologi saat ini. Pembakaran ini mempunyai energi yang tinggi untuk menghasilkan energi panas yang bisa dimanfaatkan pada pembangkit energi listrik dalam skala kecil atau juga bisa disebut sebagai *Micro Power Generator*, dimana *combustor* skala kecil (*meso combustor*) adalah komponen utama yang digunakan sebagai ruang bakar pada proses pembakarannya untuk proses konversi energinya (Ju dan Maruta, 2011).

Pada penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Rachell Nurman Zulkarnain (2017), tentang karakteristik pembakaran pada *sudden expansion meso combustor* dengan variasi diameter *inlet* bahwa dari penelitian ini menunjukkan hasil nyala api terbaik dan stabil pada *combustor* dengan mempunyai posisi api mendekati step atau *sudden expansion*. Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Ahmad Ifan Rohadi (2016), yang meneliti tentang pengaruh panjang saluran *sudden expansion* terhadap karakteristik pembakaran pada *meso-scale combustor*, dengan hasil yang diperoleh adalah nilai rasio ekuivalen dan kecepatan reaktan bertambah tinggi dengan tingkat kecerahan warna api paling rendah yaitu sebesar RGB (66,82,173).

Sebagai pengembangan dari penelitian yang sudah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya, dalam penelitian ini akan dilakukan pengamatan terhadap *flame propagation* pembakaran pada *meso scale combustor* dengan *sudden expansion*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang maka perumusan masalah pada penelitian ini adalah analisis variasi *surface to volume ratio* terhadap *flame propagation speed meso scale combustor* dengan *sudden expansion*.

1.3 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan permasalahan yang akan dianalisis dalam penelitian ini, maka akan dibatasi permasalahan yang akan dibahas sebagai berikut:

1. Proses pembakaran dilakukan pada kondisi baik.
2. Udara pembakaran (oksidator) adalah udara atmosfer yang disuplai ke *meso scale combustor* melalui kompresor dan diasumsikan terdiri dari 79% N₂ dan 21% O₂ (Sari, 2015)

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk mengetahui karakteristik bentuk nyala, dan warna api variasi *surface to volume ratio* pada *meso scale combustor*.
2. Untuk mengetahui kecepatan *flame propagation* pada *meso scale combustor*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mampu mengetahui perbedaan karakteristik pembakaran untuk variasi *surface to volume ratio* pada *meso scale combustor*.
2. Mampu mengetahui kecepatan *flame propagation* pada *meso scale combustor*.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Penelitian sebelumnya telah banyak dilakukan seperti penelitian yang dilakukan Yang *et al.*, (2002) yang meneliti tentang optimasi pembakaran pada *combustor* dengan penambahan *backward facing step* (BFS) atau perbesaran diameter di dalam *combustor*. Penelitian dilakukan dengan cara membandingkan tiga jenis *combustor* skala mikro berbahan *stainless* yang dilengkapi BFS dan tidak dilengkapi dengan BFS. Dari hasil penelitian dapat ditarik kesimpulan bahwa *backward facing step* dapat meningkatkan pencampuran bahan bakar dengan oksidator sehingga reaksi pembakaran lebih sempurna dan posisi api dapat dikontrol dengan lebih baik, selain itu dengan dilengkapi BFS distribusi temperatur pada *combustor* lebih tinggi dan merata.

Rachell Nurman (2017) dalam penelitiannya yang dilakukan Hasil analisa *flammability limit* pada rasio diameter inlet *combustor* menunjukkan daerah *flammability limit* terluas terdapat pada rasio diameter inlet *combustor* 75% dimana api dapat menyala dalam rentang rasio ekuivalen (ϕ) = 1.04 - 1.35 dan nilai kecepatan reaktan (v) = 17.51 cm/s – 25.43 cm/s. untuk rasio diameter inlet *combustor* 50% api dapat menyala dalam rentang rasio ekuivalen (ϕ) = 1.09 - 1.25 dan nilai kecepatan reaktan (v) = 18.96 cm/s – 21.21 cm/s. dan untuk rasio diameter inlet *combustor* 100% api dapat menyala dalam rentang rasio ekuivalen (ϕ) = 0.89 - 1.25 dan nilai kecepatan reaktan (v) = 23.33 cm/s – 33.68 cm/s. sehingga dapat dikatakan *combustor* rasio 75% memiliki batas nyala api terluas dan stabilitas nyala api baik.

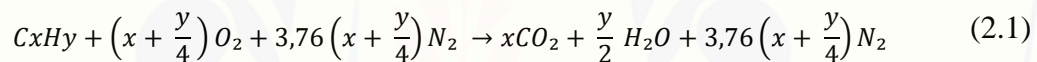
Penelitian yang dilakukan oleh Ahmad Ifan (2016) dalam penelitiannya tentang pengaruh panjang saluran *sudden expansion*, dari hasil penelitiannya bahwa saluran *sudden expansion* dengan panjang 10 mm memiliki tingkat kecerahan warna api paling rendah yaitu sebesar RGB (66,82,173). Tingkat kecerahan nyala api mengalami peningkatan pada variasi panjang 15 mm dan 20 mm, yaitu sebesar RGB (74,82,173) dan RGB (74,90,181). Kecerahan nyala api semakin meningkat dengan bertambahnya

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

2.2 Pembakaran

Pembakaran adalah reaksi oksidasi yang terjadi antara bahan bakar (*fuel*) dan oksidator, hasil dari pembakaran adalah nyala dan panas. Substansi yang dapat melepaskan panas pada saat oksidasi adalah bahan bakar, dan pada umumnya mengandung unsur – unsur karbon (C), hidrogen (H), nitrogen (O), dan sulfur (S). Sedangkan oksidator merupakan segala substansi yang mengandung oksigen (misalnya udara) yang akan bereaksi dengan bahan bakar.

Rumus umum reaksi stoikiometrik pembakaran hidro karbon murni C_xH_y adalah sebagai berikut :



Berdasarkan metode pencampurannya, terdapat dua jenis pembakaran yaitu pembakaran *premixed* dan pembakaran difusi (Mahandri, 2010).

2.2.1 Klasifikasi Pembakaran

a. Pembakaran difusi

Pembakaran difusi adalah pembakaran yang terjadi tidak bercampur secara mekanik antara bakar dan udara sebagai oksidator, tetapi tercampur secara alami melalui proses difusi dalam ruang bakar/proses pembakaran (Wardana, 2008). Contoh dari difusi adalah lilin.

b. Pembakaran *premixed*

Pembakaran secara *premixed* yaitu proses pembakaran dimana bahan bakar dan udara sudah tercampur secara mekanik sebelum terjadi pembakaran (Wardana, 2008).

Contoh Kompor Gas

2.2.2 Air Fuel Ratio (AFR)

Dalam proses pembakaran hal yang paling penting adalah bahan bakar, udara, reaksi kimi dan kalor. Faktor yang paling penting adalah perbandingan campuran bahan bakar dan udara untuk memperoleh hasil pembakaran yang sempurna. Untuk menghitung rasio campuran bahan bakar dan udara antara lain AFR (*Air Fuel Ratio*) dan Rasio Ekuivalen (ϕ). Menurut Mahandri dan Kartika(2010), Secara simbolis AFR dapat dihitung melalui persamaan berikut :

$$AFR = \frac{m_a}{m_f} = \frac{M_a N_a}{M_f N_f} \quad (2.2)$$

Dengan m_a adalah laju aliran massa udara (kg/detik), m_f merupakan laju aliran massa bahan bakar (kg/detik), untuk M_a adalah massa molar udara (g/mol), N_a adalah jumlah mol udara bahan bakar (mol). Untuk nilai AFR lebih besar dari nilai AFR stoikiometrik, maka terdapat udara yang jumlahnya lebih banyak yang dibutuhkan sistem dalam proses pembakaran dan di katakan miskin bahan bakar jika nilai aktual lebih kecil dari AFR stoikiometrik maka tidak cukup terdapat udara pada sistem dan dikatakan kaya bahan bakar (Taufiq, 2008).

2.2.3 Rasio Ekuivalen

Menurut Farizkaraja *et al.* (2014), rasio ekuivalen yaitu 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 :

$$\Phi = \frac{(AFR)_s}{(AFR)_a} \quad (2.3)$$

Keterangan :

Φ : Rasio ekuivalen

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

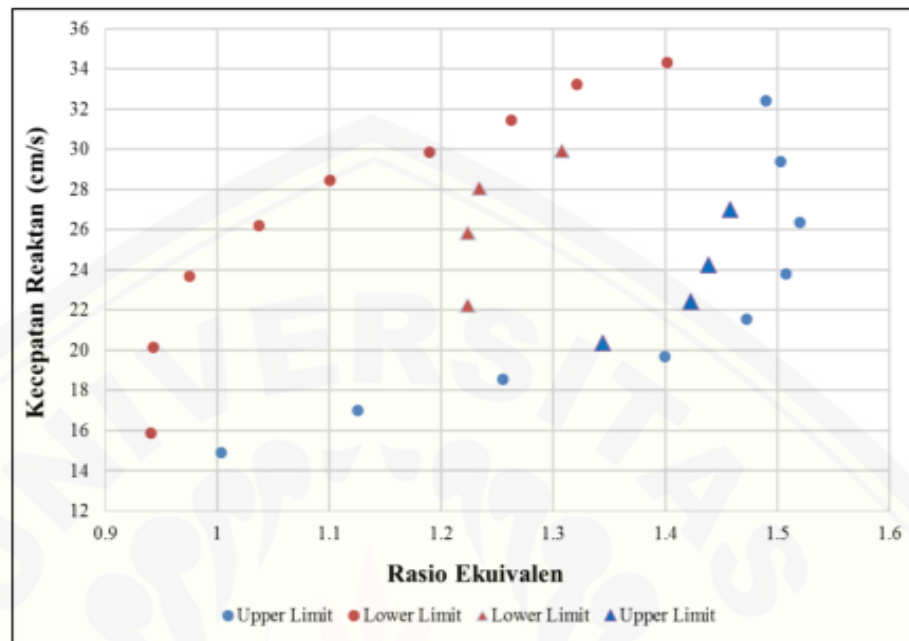
$(AFR)_a$: Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi aktual

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

Menurut Farizkaraja *et al.* (2014), perbedaan perbandingan campuran udara dan bahan bakar bisa berpengaruh terhadap warna api. Perbedaan perbandingan campuran dapat diketahui dengan membandingkan *equivalent ratio* udara-bahan bakar (Φ), dimana jika $\Phi < 1$ maka akan terbentuk api campuran miskin, ketika $\Phi = 1$ terbentuk api stoikiometri dan saat $\Phi > 1$ akan terbentuk api campuran kaya. Ditinjau dari pengaruh campuran bahan bakar udara pada pengujian di *bunsen burner* terlihat api campuran miskin berwarna merah dan berjelaga, sedangkan pada api campuran kaya terbentuk api berwarna biru atau lebih terang. Api yang memiliki temperatur lebih tinggi cenderung berwarna lebih terang.

2.2.4 Flammability Limit

Pada proses pembakaran terdapat campuran bahan bakar dan oksidator sehingga terjadinya nyala api. Dalam kisaran *flammability limit* dibatasi oleh batas bawah mampu nyala dan batas atas mampu nyala atau yang 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 mencukupi untuk mendukung proses pembakaran. Sedangkan *Upper flammability limit* (UFL) adalah konsentrasi gas tertinggi di mana kandungan oksigen tidak akan mencukupi untuk mendukung proses pembakaran. Dari dua batas LFL dan UFL merupakan kondisi rentang mudah terbakar pada suatu gas, di mana gas dan udara dalam komposisi yang tepat untuk dibakar saat dinyalakan (Sari, 2015).



Gambar 2.1 *Flammability limit*
(Sumber: Sari, 2015)

2.3 *Micro/Meso Scale Combustor*

Dalam skala *combustor* terdapat beberapa jenis serta ukuran, secara umum *micro combustor* dapat diklasifikasikan menjadi dua bagian yang pada dasarnya ditentukan oleh besarnya celah pada ruang bakar. Pada *micro-scale combustor* celah ruang bakar memiliki ukuran kurang dari 1 mm dan untuk *meso-scale combustor* memiliki ukuran celah lebih dari 1 mm. Karakteristik dari kedua *combustor* tersebut merupakan karakteristik pembakaran pada *micro combustion* (Maruta, 2011).

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 μm	Mikro reaktor (UIUC)	<i>Thruster</i>
Diameter flame quenching	Skala meso	Diameter quenching (equilibrium)	<i>Swiss-roll</i> kombustor (USC)	Pembangkit listrik
	Skala mikro	Diameter quenching ~mean-free path (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)

Tabel 2.2 Material combustor

Penulis	Material combustor
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.

Menurut (Raditya *et al*, 2013), batasan dari ukuran *micro combustor* adalah skala panjang lebih kecil dari *quenching distance* bahan bakar yang digunakan. *Quenching distance* merupakan jarak minimum dari celah *combustor* dimana masih bisa terjadi *flame propagation* didalamnya.

Pembakaran skala mikro digunakan untuk pembakaran yang melibatkan karakteristik skala panjang yang berkaitan dengan jarak *quenching*, oleh karena itu dengan skala panjang hanya lebih kecil dari 1×10^{-3} m. Istilah pembakaran mesoscale digunakan untuk kasus dengan panjang karakteristik skala jelas lebih besar dari 1 mm tetapi tetap fitur karakteristik dari pembakaran skala mikro (Maruta, 2011).

	Conventional Combustor	Micro-combustor
Length	0.2 m	0.001 m
Volume	0.073 m ³	6.6 x 10 ⁻⁸ m ³
Cross-sectional area	0.36 m ²	6.0 x 10 ⁻⁵ m ²
Inlet total pressure	37.5 atm	4 atm
Inlet total temperature	870 K	500 K
Mass flow rate	140 kg/s	1.8 x 10 ⁻⁴ kg/s
Residence time	7 ms	5 ms
Efficiency	> 99%	> 0.9
Pressure ratio	> 0.95	> 0.95
Exit temperature	1800 K	1600 K
Power density	1960 MW/m ³	3000 MW/m ³

Gambar 2.2 Perbandingan antara konvensional dan mikro-*combustor* [MIT]
(Sumber: Bui, 2013)

Menurut (Bui, 2013) meskipun tidak ada definisi universal pembakaran skala kecil, dapat didefinisikan dalam tiga kategori: makro, meso, dan mikro. Skala makro mencakup geometri karakteristik yang lebih besar dari 1.0 cm skala mikro kurang dari 1,0 milimeter, dan skala meso yang mencakup rentang antara makro dan mikro, di mana parameter berada di ruang pembakaran, bukan perangkat.

2.4 *Elpiji*

Masyarakat Indonesia pada umumnya memakai bahan bakar *Elpiji* atau *Liquid Petroleum Gas* (LPG). Campuran utama dari LPG adalah propana dan butana dengan sedikit persentase hidrokarbon tidak jenuh (*propilene* dan *butilene*) dan beberapa fraksi C_2 yang lebih ringan dan C_5 yang lebih berat. Komponen LPG di Indonesia terdiri dari propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}) dengan perbandingan 50 : 50. Dalam kondisi atmosfer, LPG akan berbentuk gas. *Volume* LPG dalam bentuk cair lebih kecil dibandingkan dalam bentuk gas untuk berat yang sama. Karena itu LPG dipasarkan dalam bentuk cair dalam tabung-tabung logam bertekanan. Untuk memungkinkan terjadinya ekspansi panas (*thermal expansion*) dari cairan yang dikandungnya, tabung LPG tidak diisi secara penuh, hanya sekitar 80-85% dari kapasitasnya. *Rasio* antara *volume* gas bila menguap dengan gas dalam keadaan cair bervariasi tergantung komposisi, tekanan dan temperatur, tetapi biasanya sekitar 250 : 1.

Menurut spesifikasinya, LPG dibagi menjadi tiga jenis yaitu LPG campuran, LPG propana dan LPG butana. Gas LPG bersifat *flammable* (mudah terbakar). Untuk mencegah hal-hal yang tidak diinginkan perlu diketahui beberapa sifat LPG.

- Cairan dan gasnya sangat mudah terbakar.
- Gas tidak beracun.
- Gas berupa cairan yang bertekanan di dalam tangki atau silinder, apabila terjadi kebocoran LPG akan membentuk gas secara cepat.
- Daya pemanasannya cukup tinggi, namun tidak meninggalkan debu dan abu (sisa pembakaran).
- Perbandingan komposisi, propana (C_3H_8) : butana (C_4H_{10}) = 50 : 50.
- Cara penggunaannya cukup mudah dan praktis.

2.5 *Micro Power Generator (MPG)*

Menurut (Chou *et al*, 2010) *Micro Power Generator* adalah pengembangan untuk merubah energi yang tersedia menjadi bentuk yang dapat digunakan menggunakan teknologi mikro dan nano yang dapat berkontribusi dalam

pengembangan energi berkelanjutan untuk memenuhi kebutuhan yang terus meningkat untuk daya dalam aplikasi skala kecil (*Micro Power Generator*). *Micro power generator* mempunyai densitas energi yang tinggi, waktu operasi relatif panjang dengan waktu isi ulang yang lebih pendek dan juga ramah lingkungan (Maruta, 2011)

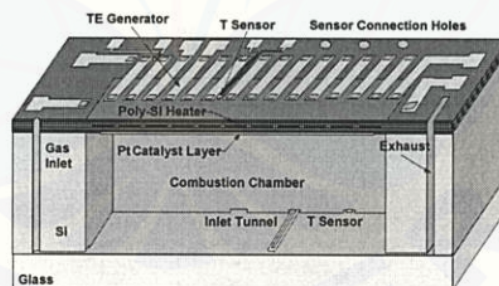
Menurut (Sari, 2015) pada dasarnya MPG dibagi menjadi dua jenis, yaitu *micro power generator* siklus konvensional dan *micro power generator* menggunakan modul pengkonversi energi termal menjadi listrik (*thermophotovoltaic* atau *thermoelectric*).

2.5.1 Jenis *Micro Power Generator*

Menurut Fernandes (2002), jenis *combustor* dibagi menjadi dua jenis, yaitu *Thermoelectric Micro Power Generator* dan *Micro Gas Turbine Generator*.

a. *Thermoelectric Micro Power Generator*

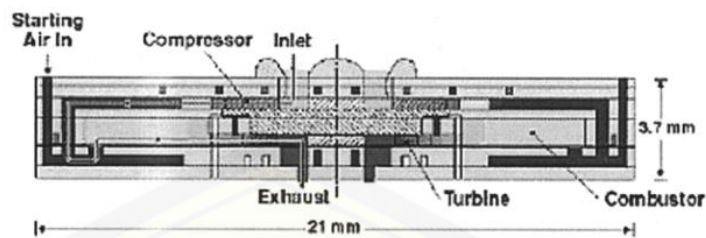
Thermoelectric Micro Power Generator adalah tipe pembangkit energi yang menggunakan bahan katalis sebagai sumber energi yang terbuat dari bahan keramik alumina dan platinum. Proses tersebut menyebabkan terjadinya reaksi kimia pada bahan – bahan katalis tersebut sehingga menjadi energi yang dimanfaatkan sebagai energi listrik. (Fernandes, 2002).



Gambar 2.3 *Thermoelectric Micro Power Generator*
(Sumber: Fernandes 2002)

b. *Micro Gas Turbine Generator*

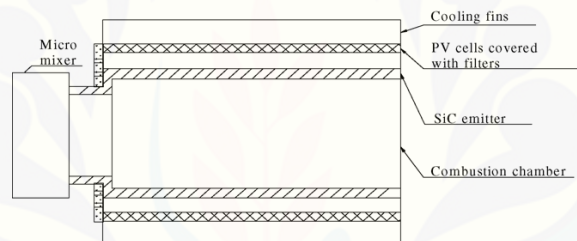
Micro Gas Turbine Generator memanfaatkan gerak putar turbin yang terhubung langsung pada *micro generator* (Fernandes, 2002).



Gambar 2.4 *Micro Gas Turbine Generator*
(Sumber: Fernandes 2002)

c. *Micro-Thermophotovoltaic Power Generator*

Micro-Thermophotovoltaic Power Generator menggunakan pergerakan *photon* – *photon* pada converter energi (*emitter*) dari panas hasil pembakaran campuran bahan bakar dan udara pada *combustor* sehingga menjadi energi listrik (Yang, *et al*, 2002).

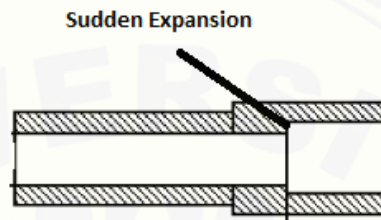


Gambar 2.5 *Micro-Thermophotovoltaic Power Generator*
(Sumber: Chou *et al*, 2010)

2.6 *Sudden Expansion*

Pada *meso-scale combustor* permasalahan yang timbul adalah bagaimana cara mendapatkan keseimbangan antara kestabilan api pembakaran dan mendapatkan *output* panas yang maksimal. Dalam *meso-scale* penyebab pembakaran yang tidak stabil dan api mudah padam adalah jika *combustor* mempunyai perbandingan luas permukaan terhadap *volume* yang tinggi, sehingga akan meningkatkan *heat losses*. Pada *combustor*, *residence time* juga rendah yang bisa mengakibatkan kesulitan dalam pembakaran yang berkelanjutan. 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*. *Sudden expansion* adalah perluasan area pada dinding *combustor* sehingga proses pencampuran pembakaran meningkat di sekitar tepi tabung *combustor*, dan juga

membuat pembakaran lebih sempurna dan stabil. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa *meso-scale combustor* dengan *backward facing step* sangat efektif untuk aplikasi energi secara langsung di mana temperatur panas dinding tersebut yang diperlukan sebagai sumber panas seperti pada aplikasi *Thermoelectric Power Generator* (Sulis, 2015).



Gambar 2.6 *Backward facing step/Sudden expansion*
(Sumber: Yang *et al*, 2002)

2.7 Karakteristik Nyala Api (Rezim Api)

Dalam reaksi pembakaran terdapat stabilitas nyala yang dipengaruhi oleh komposisi campuran bahan bakar dan udara. Penelitian yang telah dilakukan oleh Baigmohammadi *et al.* (2015) dengan hasil nyala api dapat dikategorikan menjadi tujuh bagian sebagai akibat dari variasi geometri, bilangan *reynold* dan rasio ekuivalen. Poses terjadinya rezim api tersebut akan dijelaskan sebagai berikut :

- a. *Blow Out* : Api yang terbentuk diluar *combustor* karena kecepatan aliran raktif lebih tinggi dibandingkan dengan kecepatan nyala, sehingga api terdorong keluar *combustor*. Api ini terjadi pada rasio ekuivalen yang tinggi pada bilangan *reynolds* konstan.



Gambar 2.7 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 2.8 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 :

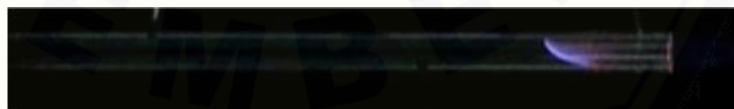
1. Simetri



Gambar 2.9 Rezim api *stationary* simetri

(sumber: Fitriansyah, 2017)

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



Gambar 2.10 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 2.11 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 terbentang 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).

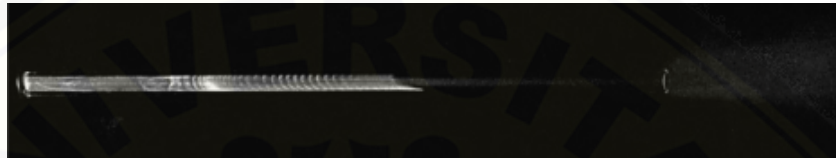
Self-RERI : Campuran reaktif yang padam dapat dinyalakan lagi dengan pemanasan pada dinding reaktor.



Gambar 2.12 Rezim api RERI

- e. *Stationary (stabil) – Flashback* : rezim api ini terdiri dari api stabil dan *flashback* di mana rezim api yang awalnya stabil berubah menjadi *flashback* secara bertahap.

- f. RERI-*Flashback* : Rezim api ini terdiri dari RERI dan *flashback* di mana 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 2.13 Rezim api *flashback*

2.8 Hipotesis

Pada pembakaran *meso-scale combustor* mempunyai fitur karakteristik yang sama dengan pembakaran skala *micro*. Penggunaan *backward facing step* dengan campuran stokiometri ($\phi = 1$) pada *flame propagation* dengan variasi diameter *outlet*, diameter *combustor* yang lebih besar mempunyai kehilangan panas yang lebih rendah sehingga kecepatan rambat api lebih kecil, stabilitas api yang dihasilkan pada daerah *flammability limit* semakin besar.

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian yang digunakan pada penelitian ini adalah metode eksperimental dan simulasi pembakaran untuk mengetahui hasil dari analisis variasi *surface to volume ratio* terhadap *flame propagation speed meso-scale combustor*.

3.2 Tempat dan Waktu Pengambilan Data

Prapenelitian dilaksanakan di Laboratorium Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember pada bulan Januari 2018.

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

3.3.1 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 *combustor* dengan *sudden expansion*. Sketsa gambar *combustor* ditampilkan pada lampiran dan untuk variasi ukuran diameter *inlet combustor* dan diameter *outlet combustor* ditunjukkan pada Tabel 3.1. Ukuran geometri *combustor* tersebut dipilih berdasarkan referensi penelitian sebelumnya.

Tabel 3.1 Tabel variasi ukuran *combustor*

Skala <i>Combustor</i>	D_{out} (mm)	D_{inlet} (mm)	Panjang inlet (mm)	Panjang outlet (mm)
<i>Meso scale combustor</i>	5	4,5	35	20
	6	4,5	35	20

b. *Combustion Holder*

Combustion holder adalah sebagaiudukan atau penyanggah *combustor*.

c. *Mixer*

Mixer berfungsi sebagai tempat pencampuran bahan bakar dan udara sebelum terjadinya reaksi pembakaran. *Mixer* ini akan dihubungkan pada dua *flowmeter*, salah satu *flowmeter* untuk bahan bakar LPG dan yang lain untuk udara.



Gambar 3.1 *Mixer*

d. *Flowmeter*

Flowmeter merupakan alat untuk mengukur laju aliran udara dan bahan bakar yang akan dialirkan ke *mixer*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 32 berikut.



Gambar 3.2 *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 sebagai oksidator pada proses pembakaran.

Spesifikasi:

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



LAKONI - Air Compressor 0,75 HP - IMOLA 75

Gambar 3.3 Kompresor Udara

f. *Pisco Tube*

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



Gambar 3.4 *Pisco tube*

g. *Lighter* api

Lighter api atau penyala api berfungsi menyalakan api dan memulai pembakaran di dalam *combustor*.



Gambar 3.5 *Lighter* api

h. Kamera

Pada penelitian ini untuk pengambilan gambar penelitian menggunakan kamera Fujifilm X-A3 dengan spesifikasi resolusi 920 x 1080 60p / 50p.



Gambar 3.6 Kamera Fujifilm X-A3

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

3.4 Variabel Penelitian

3.4.1 Variabel Bebas

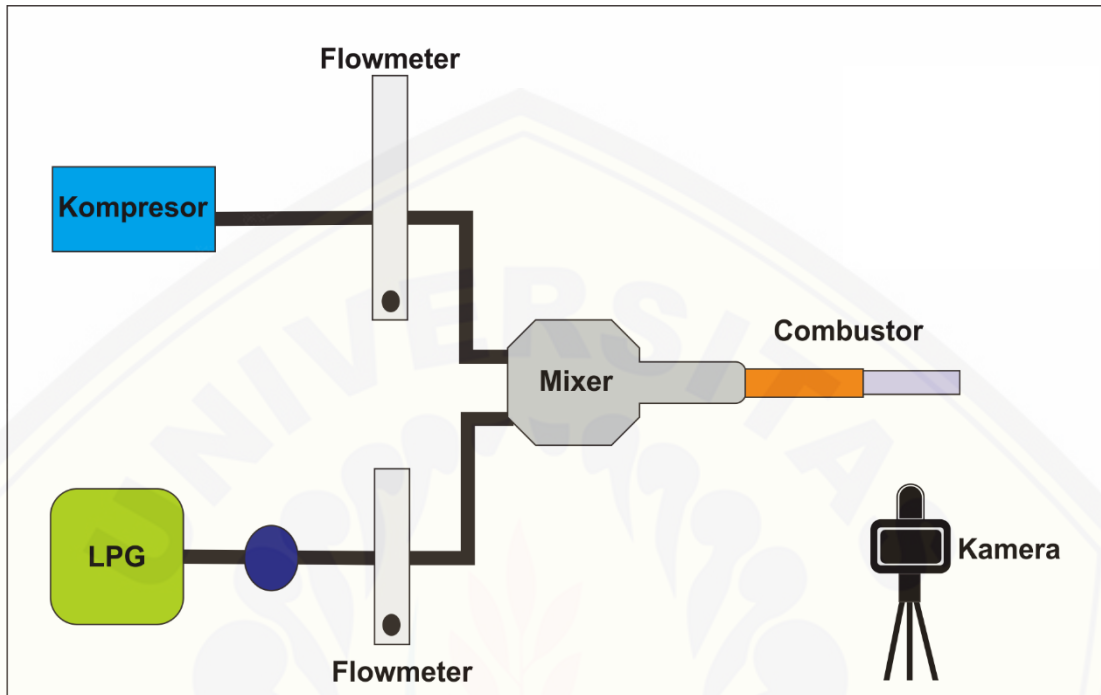
Variabel bebas merupakan variabel yang mempengaruhi faktor-faktor yang diukur oleh peneliti untuk menentukan hubungan antara fenomena yang diamati, adapun variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

- a. *Surface to volume ratio* = 0.6, dengan panjang *meso-scale combustor outlet* 20 mm dengan diameter *inlet combustor* 4,5 mm dan diameter *outlet combustor* 6 mm.
- b. *Surface to volume ratio* = 0.8, dengan panjang *meso-scale combustor outlet* 20 mm dengan diameter *inlet combustor* 4,5 mm dan diameter *outlet combustor* 5 mm.
- c. Debit bahan bakar (Q_f)

3.4.2 Variabel Terikat

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

3.5 Skema Rangkaian Alat Uji



Gambar 3.8 Skema alat uji

3.6 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:

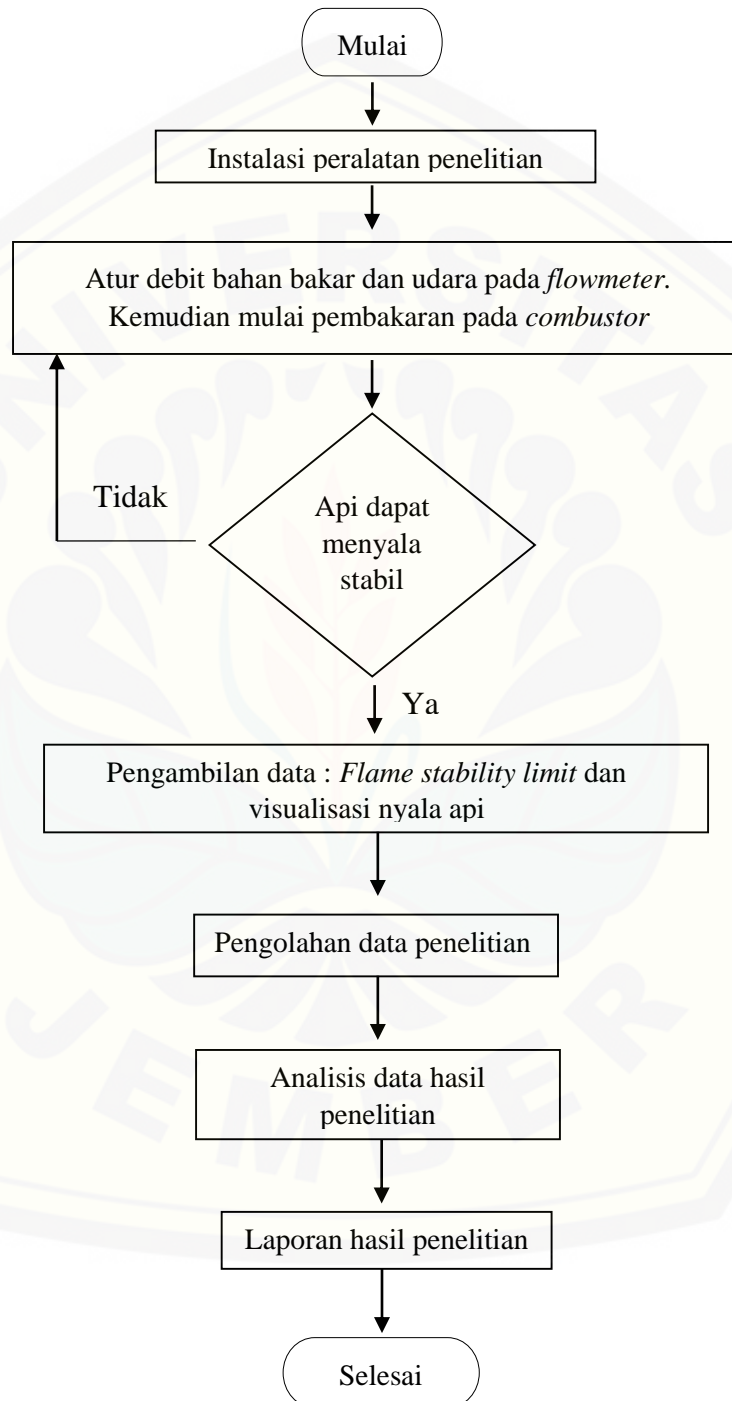
1. Memasang alat – alat penelitian sesuai dengan skema pada Gambar 3.9, selang saluran bahan bakar, saluran udara, dan saluran campuran bahan bakar dan udara harus terpasang dengan baik tanpa terjadi kebocoran, lalu setting kompresor pada tekanan 1,1 bar.
2. Melakukan *setting* pada *flowmeter* udara 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. Melakukan penyalaan api sesuai debit bahan bakar dan udara pada variasi rasio ekuivalen yang sudah ditentukan
11. Melakukan visualisasi nyala api dengan kamera DSLR dengan jarak dari *combustor* 30 cm, data visualisasi berupa foto dan video.

12. Mengolah data visualisasi nyala api dengan *software* aplikasi *editing* video, untuk mendapatkan analisis *flame propagation*.



3.7 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.9 Diagram alir penelitian.

3.8 Penyajian Data Penelitian

Data yang diperoleh dari hasil penelitian diolah menggunakan *software microsoft excel*, visualisasi nyala api dengan *software editing video*, untuk memudahkan pencarian nilai variabel terikat. Hasil pengolahan data disajikan dalam bentuk grafik dan tabel.

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

- a. Massa alir bahan bakar

$$m_f = \frac{Q_{f(vapor)}}{60} \times \rho_{f(vapor)} \text{ (mg/min)} \quad (3.1)$$

- b. Debit bahan bakar

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

- c. Air-fuel ratio

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

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

- d. Rasio ekuivalen

$$\Phi = \frac{(AFR)_{stoikiometri}}{(AFR)_{aktual}} \quad (3.4)$$

- e. Kecepatan minimal reaktan

$$V_{total \text{ (minimal)}} = \frac{\frac{Q_{f(vapor)} + Q_{a(\min)}}{60}}{\frac{(3,14 \times r^2)}{100}} \quad (3.5)$$

f. Kecepatan maksimal reaktan

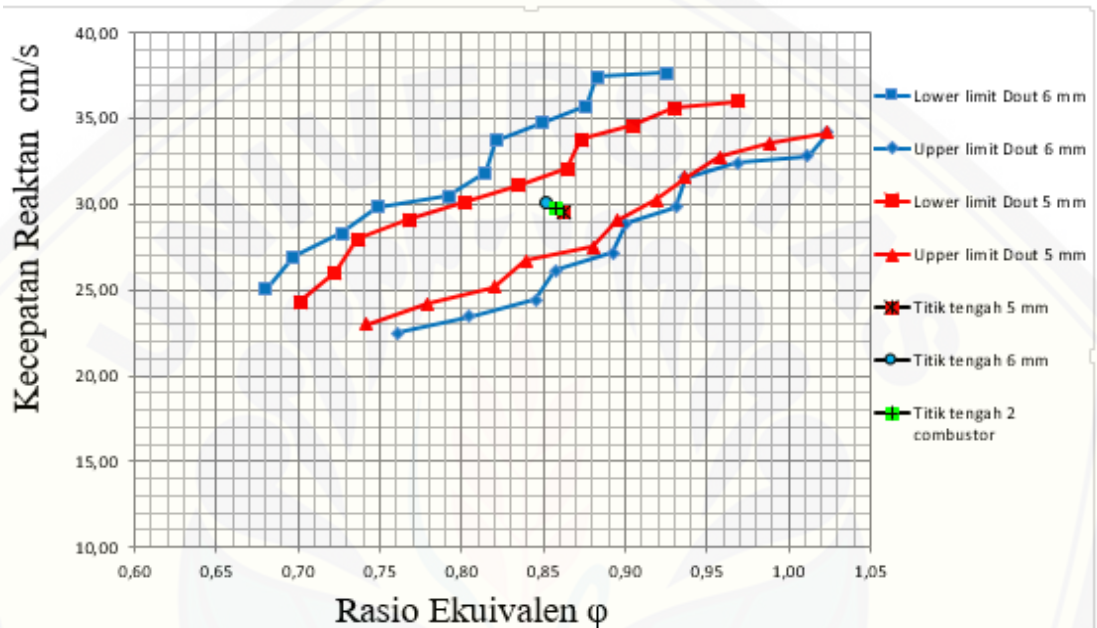
$$V_{total \text{ (maksimal)}} = \frac{Q_{f(vapor)} + Q_{a(maksimal)}}{\frac{(3,14 \times r^2)}{100}} \quad (3.6)$$

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)
\dot{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
Φ	: rasio ekuivalen
$V_{(minimal)}$: kecepatan minimal reaktan di dalam <i>combustor</i> (cm/s)
$V_{(maksimal)}$: kecepatan maksimal reaktan di dalam <i>combustor</i> (cm/s)

3.9 Rencana Analisa Data

Rencana analisa data dapat dilakukan setelah memenuhi prosedur penelitian untuk pengambilan data *flammability limit*, kemudian didapat hasil dari *flammability limit* yang ditampilkan pada seperti Tabel 3.4, Tabel 3.5 dan hasil grafik pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Pra-eksperimen Grafik *flammability limit*

Tabel 3.4 Pra-eksperimen data debit, bahan bakar dan udara D_{out} 5mm

No	Qf (ml/min)	Qf					Qa min (ml/min)					Qa max (ml/min)					φ		v total	
		Kalibrasi	Qa1	Qa2	Qa3	Qa rata2	Qa min	Qa1	Qa2	Qa3	Qa rata2	Qa max	Lower limit	Upper limit	V min (cm/s)	V max (cm/s)				
1	5	5,79	200	200	200	200,00	213,81	210	215	210	211,67	226,13	0,70	0,74	23,02	24,32				
2	5,5	6,39	205	210	215	210,00	224,37	230	220	230	226,67	241,98	0,72	0,78	24,19	26,04				
3	6	6,99	215	220	220	218,33	233,18	245	245	240	243,33	259,59	0,74	0,82	25,18	27,95				
4	6,5	7,58	230	235	230	231,67	247,27	255	255	250	253,33	270,16	0,77	0,84	26,72	29,12				
5	7	8,18	235	240	240	238,33	254,31	260	265	260	261,67	278,96	0,80	0,88	27,52	30,11				
6	7,5	8,77	250	255	250	251,67	268,40	270	270	270	270,00	287,77	0,83	0,89	29,06	31,09				
7	8	9,37	260	265	260	261,67	278,96	280	275	280	278,33	296,57	0,86	0,92	30,23	32,08				
8	8,5	9,97	275	275	270	273,33	291,29	295	295	290	293,33	312,42	0,87	0,94	31,59	33,80				
9	9	10,56	285	280	285	283,33	301,86	300	305	295	300,00	319,47	0,90	0,96	32,76	34,60				
10	9,5	11,16	290	290	290	290,00	308,90	305	310	310	308,33	328,27	0,93	0,99	33,56	35,59				
11	10	11,75	295	295	295	295,00	314,18	310	315	310	311,67	331,79	0,97	1,02	34,17	36,02				

Tabel 3.5 Pra-eksperimen data debit, bahan bakar dan udara D_{out} 6mm

No	Qf (ml/min)	Qf					Qa min (ml/min)					Qa max (ml/min)			ϕ		v total	
		Kalibrasi	Qa1	Qa2	Qa3	Qa rata2	Qa min	Qa1	Qa	Qa3	Qa rata2	Qa max	Lower limit	Upper limit	V min (cm/s)	V max (cm/s)		
1	5	5,79	195	195	195	195,00	208,52	220	225	210	218,33	233,18	0,68	0,76	22,47	25,06		
2	5,5	6,39	205	205	200	203,33	217,33	230	240	235	235,00	250,79	0,70	0,80	23,46	26,96		
3	6	6,99	210	210	215	211,67	226,13	250	245	245	246,67	263,12	0,73	0,85	24,44	28,32		
4	6,5	7,58	225	230	225	226,67	241,98	255	265	260	260,00	277,20	0,75	0,86	26,17	29,86		
5	7	8,18	230	235	240	235,00	250,79	260	270	265	265,00	282,49	0,79	0,89	27,15	30,48		
6	7,5	8,77	245	250	255	250,00	266,64	270	270	290	276,67	294,81	0,81	0,90	28,88	31,83		
7	8	9,37	255	260	260	258,33	275,44	290	295	295	293,33	312,42	0,82	0,93	29,86	33,74		
8	8,5	9,97	270	275	275	273,33	291,29	300	305	300	301,67	321,23	0,85	0,94	31,59	34,72		
9	9	10,56	275	280	285	280,00	298,34	305	310	315	310,00	330,03	0,88	0,97	32,39	35,71		
10	9,5	11,16	285	285	280	283,33	301,86	320	325	330	325,00	345,88	0,88	1,01	32,82	37,43		
11	10	11,75	290	295	300	295,00	314,18	330	330	320	326,67	347,64	0,93	1,02	34,17	37,68		

Setelah pengambilan data *flammability limit* kemudian menentukan titik tengah nyala api, dari titik tengah nyala api tersebut data diambil dengan visual gambar dan *video* menggunakan kamera yang mempunyai spesifikasi maksimal 100 fps. Setelah proses pengambilan data menggunakan kamera data diolah untuk menghitung *flame propagation* dengan cara konversi hasil gambar dalam *pixel* ke mm. kemudian dilanjutkan dengan perhitungan *flame speed propagation*.



BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

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

1. *Flame speed* yang teramati pada *combustor* dengan panjang saluran *sudden expansion* 20 mm dengan diameter 5 mm dan 6 mm dengan kecepatan reaktan konstan $v = 29,80$ ml/min mempunyai nilai *surface to volume* yang berbeda. Nilai rasio *surface to volume* terendah adalah 0,6 pada *combustor* 6 mm yang mempunyai kecepatan *flame speed* sebesar 17,909 m/s.
2. Semakin tingginya rasio *surface to volume* maka semakin tinggi juga kecepatan api, maka kondisi api pada saluran semakin lebih baik hal ini diperkuat oleh Sari (2015), menyatakan untuk mendapatkan *combustor* dengan densitas energi yang tinggi maka harus bisa memperoleh kecepatan pembakaran yang lebih tinggi sehingga api tetap stabil pada kecepatan reaktan yang tinggi, dan memperluas daerah reaksi dalam *combustor*.
3. Karakteristik warna api mempunyai tingkat kecerahan yang berbeda meskipun rasio ekuivalen dan kecepatan reaktannya sama.
4. Karakteristik nyala api sama yaitu rezim api *stationary* asimetri.

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. Pengembangan material dan geometri *combustor* untuk mendapatkan *output* yang maksimal untuk meningkatkan kestabilan nyala api, temperatur dan efisiensi.

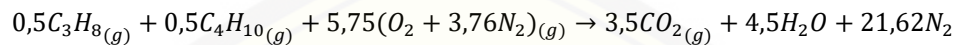
3. Pengadaan alat uji yang memadai sehingga pada saat melakukan pengujian bisa lebih maksimal dan juga kondusif.



LAMPIRAN

4.1 Perhitungan Hasil Penelitian

1. Perhitungan $AFR_{stoikiometri}$



a) Diketahui:

- Massa atom relatif (Ar)
 $C = 12 \text{ gram/mol}$; $H = 1 \text{ gram/mol}$; $O = 16 \text{ gram/mol}$; dan $N = 14 \text{ gram/mol}$
- Massa jenis udara pada suhu ruangan 20°C adalah $0,001205 \text{ gram/cm}^3$
- Massa jenis propana $0,00183 \text{ gram/cm}^3$.
- Massa jenis butana $0,002417 \text{ gram/cm}^3$.
- Massa jenis LPG (50% propana dan 50% butana) adalah $0,0092126 \text{ gram/cm}^3$.

b) Ditanya:

- $AFR_{stoikiometri} = \dots?$

c) Penyelesaian:

- $AFR_{stoikiometri}$ berdasarkan rasio massa udara dan bahan bakar:
 - Massa bahan bakar
 - $= n \times Mr$
 - $= 0,5 MrC_3H_8 + 0,5 MrC_4H_{10}$
 - $= (0,5(36 + 8)) + (0,5(48 + 10))$
 - $= 22 + 29$
 - $= 51 \text{ gram}$
 - Massa udara
 - $= n \times Mr$
 - $= 5,75 (MrO_2 + 3,76 MrN_2)$
 - $= 5,75(32 + 3,76(28))$
 - $= 5,75 \times 137,28$
 - $= 789,36 \text{ gram}$

$$\begin{aligned}
 - \text{AFR}_{\text{stoikiometri}} &= \frac{\text{Massa udara}}{\text{Massa bahan bakar}} \\
 &= \frac{789,36}{51} \\
 &= 15,48
 \end{aligned}$$

2. Perhitungan 5mm

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

1. Perhitungan $\text{AFR}_{\text{aktual}}$

a) Diketahui :

- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $\rho_{\text{udara}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3$
- $Q_f = 5,79 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ min}} = 213,81 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ maks}} = 226,13 \text{ ml/min}$

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

- $m_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126 \text{ gram/cm}^3 \times 5,79 \text{ ml/min} = 0,01230 \text{ gram/min}$
- $m_{a \text{ min}} = \rho_{\text{udara}} \times Q_{a \text{ maksimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 226,13 \text{ ml/min} = 0,272 \text{ gram/min}$
- $m_{a \text{ maks}} = \rho_{\text{udara}} \times Q_{a \text{ minimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 213,81 \text{ ml/min} = 0,257 \text{ gram/min}$

c) Nilai $\text{AFR}_{\text{aktual}}$

$$\text{AFR}_{\text{aktual}} = \frac{m_a}{m_f}$$

- $\text{AFR}_{\text{aktual batas atas}} = \frac{0,257 \text{ gram/min}}{0,0123 \text{ gram/min}} = 20,89$
- $\text{AFR}_{\text{aktual batas bawah}} = \frac{0,272 \text{ gram/min}}{0,0123 \text{ gram/min}} = 22,11$

2. Perhitungan rasio ekuivalen (Φ)

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

- $\Phi_{batas\ atas} = \frac{15,48}{20,89} = 0,74$
- $\Phi_{batas\ bawah} = \frac{15,48}{22,11} = 0,70$

3. Perhitungan kecepatan reaktan (v)

a) Diketahui:

- $Q_{a\ min} = 213,81\ \text{ml/min}$
- $Q_{a\ maks} = 226,13\ \text{ml/min}$
- $Q_f = 5,79\ \text{ml/min}$
- $\rho_{LPG} = 0,002126\ \text{gram/cm}^3$
- $d_{in\ combustor} = 5\ \text{mm}$
- $r_{in\ combustor} = 2,5\ \text{mm}$

b) Ditanya :

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

c) Penyelesaian:

$$\bullet V_{reaktan\ min} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ min}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{5,79 + 213,81}{60}}{\frac{(3,14 \times 2,5^2)}{100}} = \frac{3,66}{0,1962} = 18,65\ \text{cm/s}$$

$$\bullet V_{reaktan\ maks} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ maks}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{5,79 + 226,13}{60}}{\frac{(3,14 \times 2,5^2)}{100}} = \frac{3,865}{0,1962} = 19,69\ \text{cm/s}$$

2.2. ($Q_f = 6,39\ \text{ml/min}$)

1. Perhitungan AFR_{aktual}

a) Diketahui :

- $\rho_{LPG} = 0,002126\ \text{gram/cm}^3$
- $\rho_{udara} = 0,001205\ \text{gram/cm}^3$

- $Q_f = 6,39 \text{ ml/min}$
 - $Q_{a \text{ min}} = 224,37 \text{ ml/min}$
 - $Q_{a \text{ maks}} = 241,98 \text{ ml/min}$
- b) Karena perbedaan fase bahan bakar dan udara, maka keduanya diubah menjadi massa alir (m).
- $m_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126 \text{ gram/cm}^3 \times 6,39 \text{ ml/min} = 0,01358 \text{ gram/min}$
 - $m_{a \text{ min}} = \rho_{\text{udara}} \times Q_{a \text{ maksimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 241,98 \text{ ml/min} = 0,2915 \text{ gram/min}$
 - $m_{a \text{ maks}} = \rho_{\text{udara}} \times Q_{a \text{ minimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 224,37 \text{ ml/min} = 0,270 \text{ gram/min}$
- c) Nilai AFR_{aktual}

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

- $AFR_{\text{aktual batas atas}} = \frac{0,270 \text{ gram/min}}{0,01358 \text{ gram/min}} = 19,88$
- $AFR_{\text{aktual batas bawah}} = \frac{0,2915 \text{ gram/min}}{0,01358 \text{ gram/min}} = 21,46$

2. Perhitungan rasio ekuivalen (Φ)

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

- $\Phi_{\text{batas atas}} = \frac{15,48}{19,88} = 0,77$
- $\Phi_{\text{batas bawah}} = \frac{15,48}{21,46} = 0,72$

3. Perhitungan kecepatan reaktan (v)

a) Diketahui:

- $Q_{a \text{ min}} = 224,37 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ maks}} = 241,98 \text{ ml/min}$

- $Q_f = 6,39 \text{ ml/min}$
- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $d_{in\ combustor} = 5 \text{ mm}$
- $r_{in\ combustor} = 2,5 \text{ mm}$

b) Ditanya :

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

c) Penyelesaian:

$$\bullet V_{reaktan\ min} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ min}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{6,39 + 224,37}{60}}{\frac{(3,14 \times 2,5^2)}{100}} = \frac{3,846}{0,1962} = 19,60 \text{ cm/s}$$

$$\bullet V_{reaktan\ maks} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ maks}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{6,39 + 241,98}{60}}{\frac{(3,14 \times 2,5^2)}{100}} = \frac{4,139}{0,1962} = 21,09 \text{ cm/s}$$

2.3. ($Q_f = 6,99 \text{ ml/min}$)

1. Perhitungan AFR_{aktual}

a) Diketahui :

- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $\rho_{udara} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3$
- $Q_f = 6,99 \text{ ml/min}$
- $Q_{a\ min} = 233,18 \text{ ml/min}$
- $Q_{a\ maks} = 259,59 \text{ ml/min}$

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

$$\bullet m_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126 \text{ gram/cm}^3 \times 6,99 \text{ ml/min} = 0,01486 \text{ gram/min}$$

$$\bullet m_{a\ min} = \rho_{udara} \times Q_{a\ maksimal} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 259,59 \text{ ml/min} = 0,312 \text{ gram/min}$$

- $m_{a \text{ maks}} = \rho_{\text{udara}} \times Q_{a \text{ minimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 233,18 \text{ ml/min} = 0,280 \text{ gram/min}$

c) Nilai AFR_{aktual}

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

- $AFR_{\text{aktual batas atas}} = \frac{0,280 \text{ gram/min}}{0,01486 \text{ gram/min}} = 18,84$
- $AFR_{\text{aktual batas bawah}} = \frac{0,312 \text{ gram/min}}{0,01486 \text{ gram/min}} = 20,99$

2. Perhitungan rasio ekuivalen (Φ)

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

- $\Phi_{\text{batas atas}} = \frac{15,48}{18,84} = 0,82$
- $\Phi_{\text{batas bawah}} = \frac{15,48}{20,99} = 0,73$

3. Perhitungan kecepatan reaktan (v)

a) Diketahui:

- $Q_{a \text{ min}} = 233,18 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ maks}} = 259,59 \text{ ml/min}$
- $Q_f = 6,99 \text{ ml/min}$
- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $d_{in \text{ combustor}} = 5 \text{ mm}$
- $r_{in \text{ combustor}} = 2,5 \text{ mm}$

b) Ditanya :

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

c) Penyelesaian:

$$\bullet V_{reaktan\ min} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ min}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{6,99 + 233,18}{60}}{\frac{(3,14 \times 2,5^2)}{100}} = \frac{4,002}{0,1962} = 20,39\ \text{cm/s}$$

$$\bullet V_{reaktan\ maks} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ maks}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{6,99 + 259,59}{60}}{\frac{(3,14 \times 2,5^2)}{100}} = \frac{4,443}{0,1962} = 22,64\ \text{cm/s}$$

2.4. ($Q_f = 7,58\ \text{ml/min}$)

1. Perhitungan AFR_{aktual}

a) Diketahui :

- $\rho_{LPG} = 0,002126\ \text{gram/cm}^3$
- $\rho_{udara} = 0,001205\ \text{gram/cm}^3$
- $Q_f = 7,58\ \text{ml/min}$
- $Q_{a\ min} = 247,27\ \text{ml/min}$
- $Q_{a\ maks} = 270,16\ \text{ml/min}$

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

- $m_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126\ \text{gram/cm}^3 \times 7,58\ \text{ml/min} = 0,0161\ \text{gram/min}$
- $m_{a\ min} = \rho_{udara} \times Q_{a\ maksimal} = 0,001205\ \text{gram/cm}^3 \times 270,16\ \text{ml/min} = 0,3255\ \text{gram/min}$
- $m_{a\ maks} = \rho_{udara} \times Q_{a\ minimal} = 0,001205\ \text{gram/cm}^3 \times 247,27\ \text{ml/min} = 0,2979\ \text{gram/min}$

c) Nilai AFR_{aktual}

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

- $AFR_{aktual\ batas\ atas} = \frac{0,2979\ \text{gram/min}}{0,0161\ \text{gram/min}} = 18,503$
- $AFR_{aktual\ batas\ bawah} = \frac{0,3255\ \text{gram/min}}{0,0161\ \text{gram/min}} = 20,217$

2. Perhitungan rasio ekuivalen (Φ)

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

- $\Phi_{batas\ atas} = \frac{15,48}{18,503} = 0,83$
- $\Phi_{batas\ bawah} = \frac{15,48}{20,217} = 0,76$

3. Perhitungan kecepatan reaktan (v)

a) Diketahui:

- $Q_{a\ min} = 247,27\ \text{ml/min}$
- $Q_{a\ maks} = 270,16\ \text{ml/min}$
- $Q_f = 7,58\ \text{ml/min}$
- $\rho_{LPG} = 0,002126\ \text{gram/cm}^3$
- $d_{in\ combustor} = 5\ \text{mm}$
- $r_{in\ combustor} = 2,5\ \text{mm}$

b) Ditanya :

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

c) Penyelesaian:

$$\bullet V_{reaktan\ min} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ min}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{7,58 + 247,27}{60}}{\frac{(3,14 \times 2,5^2)}{100}} = \frac{4,247}{0,1962} = 21,64\ \text{cm/s}$$

$$\bullet V_{reaktan\ maks} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ maks}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{7,58 + 270,16}{60}}{\frac{(3,14 \times 2,5^2)}{100}} = \frac{4,629}{0,1962} = 21,75\ \text{cm/s}$$

2.5. ($Q_f = 8,18\ \text{ml/min}$)1. Perhitungan AFR_{aktual}

a) Diketahui :

- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $\rho_{udara} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3$
- $Q_f = 8,18 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ min}} = 254,31 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ maks}} = 278,96 \text{ ml/min}$

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

- $m_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126 \text{ gram/cm}^3 \times 8,18 \text{ ml/min} = 0,01739 \text{ gram/min}$
- $m_{a \text{ min}} = \rho_{udara} \times Q_{a \text{ maksimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 278,96 \text{ ml/min} = 0,336 \text{ gram/min}$
- $m_{a \text{ maks}} = \rho_{udara} \times Q_{a \text{ minimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 254,31 \text{ ml/min} = 0,306 \text{ gram/min}$

c) Nilai AFR_{aktual}

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

- $AFR_{aktual \text{ batas atas}} = \frac{0,306 \text{ gram/min}}{0,01739 \text{ gram/min}} = 17,59$
- $AFR_{aktual \text{ batas bawah}} = \frac{0,336 \text{ gram/min}}{0,01739 \text{ gram/min}} = 19,32$

2. Perhitungan rasio ekuivalen (Φ)

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

- $\Phi_{\text{batas atas}} = \frac{15,48}{17,59} = 0,88$
- $\Phi_{\text{batas bawah}} = \frac{15,48}{19,32} = 0,80$

3. Perhitungan kecepatan reaktan (v)

a) Diketahui:

- $Q_{a \min} = 254,31 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \max} = 278,96 \text{ ml/min}$
- $Q_f = 8,18 \text{ ml/min}$
- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $d_{in \text{ combustor}} = 5 \text{ mm}$
- $r_{in \text{ combustor}} = 2,5 \text{ mm}$

b) Ditanya :

- $V_{reaktan \min}$
- $V_{reaktan \max}$

c) Penyelesaian:

$$\bullet V_{reaktan \min} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a \min}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{8,18 + 254,31}{60}}{\frac{(3,14 \times 2,5^2)}{100}} = \frac{4,374}{0,1962} = 22,29 \text{ cm/s}$$

$$\bullet V_{reaktan \max} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a \max}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{8,18 + 278,96}{60}}{\frac{(3,14 \times 2,5^2)}{100}} = \frac{4,785}{0,1962} = 24,38 \text{ cm/s}$$

2.6. ($Q_f = 8,77 \text{ ml/min}$)

1. Perhitungan AFR_{aktual}

a) Diketahui :

- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $\rho_{udara} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3$
- $Q_f = 8,77 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \min} = 268,40 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \max} = 287,77 \text{ ml/min}$

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

$$\bullet m_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126 \text{ gram/cm}^3 \times 8,77 \text{ ml/min} = 0,01864 \text{ gram/min}$$

- $m_{a \min} = \rho_{\text{udara}} \times Q_{a \text{ maksimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 287,77 \text{ ml/min} = 0,3467 \text{ gram/min}$
- $m_{a \text{ maks}} = \rho_{\text{udara}} \times Q_{a \text{ minimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 268,40 \text{ ml/min} = 0,3234 \text{ gram/min}$

c) Nilai AFR_{aktual}

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

- $AFR_{\text{aktual batas atas}} = \frac{0,3234 \text{ gram/min}}{0,01864 \text{ gram/min}} = 17,34$
- $AFR_{\text{aktual batas bawah}} = \frac{0,3467 \text{ gram/min}}{0,01864 \text{ gram/min}} = 18,59$

2. Perhitungan rasio ekuivalen (Φ)

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

- $\Phi_{\text{batas atas}} = \frac{15,48}{17,34} = 0,89$
- $\Phi_{\text{batas bawah}} = \frac{15,48}{18,59} = 0,83$

3. Perhitungan kecepatan reaktan (v)

a) Diketahui:

- $Q_{a \min} = 268,40 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ maks}} = 287,77 \text{ ml/min}$
- $Q_f = 8,77 \text{ ml/min}$
- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $d_{in \text{ combustor}} = 5 \text{ mm}$
- $r_{in \text{ combustor}} = 2,5 \text{ mm}$

b) Ditanya :

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

c) Penyelesaian:

$$\bullet V_{reaktan\ min} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ min}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{8,77 + 268,40}{60}}{\frac{(3,14 \times 2,5^2)}{100}} = \frac{4,6195}{0,1962} = 23,54\ \text{cm/s}$$

$$\bullet V_{reaktan\ maks} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ maks}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{8,77 + 287,77}{60}}{\frac{(3,14 \times 2,5^2)}{100}} = \frac{4,942}{0,1962} = 25,18\ \text{cm/s}$$

2.7. ($Q_f = 9,37\ \text{ml/min}$)

1. Perhitungan AFR_{aktual}

a) Diketahui :

- $\rho_{LPG} = 0,002126\ \text{gram/cm}^3$
- $\rho_{udara} = 0,001205\ \text{gram/cm}^3$
- $Q_f = 9,37\ \text{ml/min}$
- $Q_{a\ min} = 278,96\ \text{ml/min}$
- $Q_{a\ maks} = 296,57\ \text{ml/min}$

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

- $m_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126\ \text{gram/cm}^3 \times 9,37\ \text{ml/min} = 0,01992\ \text{gram/min}$
- $m_{a\ min} = \rho_{udara} \times Q_{a\ maksimal} = 0,001205\ \text{gram/cm}^3 \times 296,57\ \text{ml/min} = 0,3573\ \text{gram/min}$
- $m_{a\ maks} = \rho_{udara} \times Q_{a\ minimal} = 0,001205\ \text{gram/cm}^3 \times 278,96\ \text{ml/min} = 0,3361\ \text{gram/min}$

c) Nilai AFR_{aktual}

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

- $AFR_{aktual\ batas\ atas} = \frac{0,3361\ \text{gram/min}}{0,01992\ \text{gram/min}} = 16,87$
- $AFR_{aktual\ batas\ bawah} = \frac{0,3573\ \text{gram/min}}{0,01992\ \text{gram/min}} = 17,93$

2. Perhitungan rasio ekuivalen (Φ)

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

- $\Phi_{batas\ atas} = \frac{15,48}{16,87} = 0,91$
- $\Phi_{batas\ bawah} = \frac{15,48}{17,93} = 0,86$

3. Perhitungan kecepatan reaktan (v)

a) Diketahui:

- $Q_{a\ min} = 278,96\ \text{ml/min}$
- $Q_{a\ maks} = 296,57\ \text{ml/min}$
- $Q_f = 9,37\ \text{ml/min}$
- $\rho_{LPG} = 0,002126\ \text{gram/cm}^3$
- $d_{in\ combustor} = 6\ \text{mm}$
- $r_{in\ combustor} = 2,5\ \text{mm}$

b) Ditanya :

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

c) Penyelesaian:

$$\bullet V_{reaktan\ min} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ min}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{9,37 + 278,96}{60}}{\frac{(3,14 \times 2,5^2)}{100}} = \frac{4,8055}{0,1962} = 24,49\ \text{cm/s}$$

$$\bullet V_{reaktan\ maks} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ maks}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{9,37 + 296,57}{60}}{\frac{(3,14 \times 2,5^2)}{100}} = \frac{5,099}{0,1962} = 25,98\ \text{cm/s}$$

2.8. ($Q_f = 9,97\ \text{ml/min}$)1. Perhitungan AFR_{aktual}

a) Diketahui :

- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $\rho_{udara} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3$
- $Q_f = 9,97 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ min}} = 291,29 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ maks}} = 312,42 \text{ ml/min}$

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

- $m_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126 \text{ gram/cm}^3 \times 9,97 \text{ ml/min} = 0,02119 \text{ gram/min}$
- $m_{a \text{ min}} = \rho_{udara} \times Q_{a \text{ maksimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 312,42 \text{ ml/min} = 0,3764 \text{ gram/min}$
- $m_{a \text{ maks}} = \rho_{udara} \times Q_{a \text{ minimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 291,29 \text{ ml/min} = 0,35100 \text{ gram/min}$

c) Nilai AFR_{aktual}

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

- $AFR_{aktual \text{ batas atas}} = \frac{0,35100 \text{ gram/min}}{0,02119 \text{ gram/min}} = 16,56$
- $AFR_{aktual \text{ batas bawah}} = \frac{0,3764 \text{ gram/min}}{0,02119 \text{ gram/min}} = 17,76$

2. Perhitungan rasio ekuivalen (Φ)

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

- $\Phi_{\text{batas atas}} = \frac{15,48}{16,56} = 0,93$
- $\Phi_{\text{batas bawah}} = \frac{15,48}{17,76} = 0,87$

3. Perhitungan kecepatan reaktan (v)

a) Diketahui:

- $Q_{a \min} = 291,29 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \max} = 312,42 \text{ ml/min}$
- $Q_f = 9,97 \text{ ml/min}$
- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $d_{in \text{ combustor}} = 5 \text{ mm}$
- $r_{in \text{ combustor}} = 2,5 \text{ mm}$

b) Ditanya :

- $V_{reaktan \min}$
- $V_{reaktan \max}$

c) Penyelesaian:

$$\bullet V_{reaktan \min} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a \min}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{9,97 + 291,29}{60}}{\frac{(3,14 \times 2,5^2)}{100}} = \frac{5,021}{0,1962} = 25,59 \text{ cm/s}$$

$$\bullet V_{reaktan \max} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a \max}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{9,97 + 312,42}{60}}{\frac{(3,14 \times 2,5^2)}{100}} = \frac{5,373}{0,1962} = 27,38 \text{ cm/s}$$

2.9. ($Q_f = 10,56 \text{ ml/min}$)

1. Perhitungan AFR_{aktual}

a) Diketahui :

- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $\rho_{udara} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3$
- $Q_f = 10,56 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \min} = 301,86 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \max} = 319,47 \text{ ml/min}$

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

$$\bullet m_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126 \text{ gram/cm}^3 \times 10,56 \text{ ml/min} = 0,02245 \text{ gram/min}$$

- $m_{a \min} = \rho_{\text{udara}} \times Q_{a \text{ maksimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 319,47 \text{ ml/min} = 0,3849 \text{ gram/min}$
- $m_{a \text{ maks}} = \rho_{\text{udara}} \times Q_{a \text{ minimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 301,86 \text{ ml/min} = 0,3637 \text{ gram/min}$

c) Nilai AFR_{aktual}

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

- $AFR_{\text{aktual batas atas}} = \frac{0,3637 \text{ gram/min}}{0,02245 \text{ gram/min}} = 16,20$
- $AFR_{\text{aktual batas bawah}} = \frac{0,3849 \text{ gram/min}}{0,02245 \text{ gram/min}} = 17,14$

2. Perhitungan rasio ekuivalen (Φ)

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

- $\Phi_{\text{batas atas}} = \frac{15,48}{16,20} = 0,95$
- $\Phi_{\text{batas bawah}} = \frac{15,48}{17,14} = 0,90$

3. Perhitungan kecepatan reaktan (v)

a) Diketahui:

- $Q_{a \min} = 301,86 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ maks}} = 319,47 \text{ ml/min}$
- $Q_f = 10,56 \text{ ml/min}$
- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $d_{in \text{ combustor}} = 5 \text{ mm}$
- $r_{in \text{ combustor}} = 2,5 \text{ mm}$

b) Ditanya :

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

c) Penyelesaian:

$$\bullet V_{reaktan\ min} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ min}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{10,56 + 301,86}{60}}{\frac{(3,14 \times 2,5^2)}{100}} = \frac{5,207}{0,1962} = 26,53\ \text{cm/s}$$

$$\bullet V_{reaktan\ maks} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ maks}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{10,56 + 319,47}{60}}{\frac{(3,14 \times 2,5^2)}{100}} = \frac{5,500}{0,1962} = 28,03\ \text{cm/s}$$

2.10. ($Q_f = 11,16\ \text{ml/min}$)

1. Perhitungan AFR_{aktual}

a) Diketahui :

- $\rho_{LPG} = 0,002126\ \text{gram/cm}^3$
- $\rho_{udara} = 0,001205\ \text{gram/cm}^3$
- $Q_f = 11,16\ \text{ml/min}$
- $Q_{a\ min} = 308,90\ \text{ml/min}$
- $Q_{a\ maks} = 328,27\ \text{ml/min}$

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

- $m_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126\ \text{gram/cm}^3 \times 11,16\ \text{ml/min} = 0,0237\ \text{gram/min}$
- $m_{a\ min} = \rho_{udara} \times Q_{a\ maksimal} = 0,001205\ \text{gram/cm}^3 \times 328,27\ \text{ml/min} = 0,3955\ \text{gram/min}$
- $m_{a\ maks} = \rho_{udara} \times Q_{a\ minimal} = 0,001205\ \text{gram/cm}^3 \times 308,90\ \text{ml/min} = 0,3722\ \text{gram/min}$

c) Nilai AFR_{aktual}

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

- $AFR_{aktual\ batas\ atas} = \frac{0,3722\ \text{gram/min}}{0,0237\ \text{gram/min}} = 15,70$
- $AFR_{aktual\ batas\ bawah} = \frac{0,3955\ \text{gram/min}}{0,0237\ \text{gram/min}} = 16,68$

2. Perhitungan rasio ekuivalen (Φ)

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

- $\Phi_{batas\ atas} = \frac{15,48}{15,70} = 0,98$
- $\Phi_{batas\ bawah} = \frac{15,48}{16,68} = 0,92$

3. Perhitungan kecepatan reaktan (v)

a) Diketahui:

- $Q_{a\ min} = 308,90\ \text{ml/min}$
- $Q_{a\ maks} = 328,27\ \text{ml/min}$
- $Q_f = 11,16\ \text{ml/min}$
- $\rho_{LPG} = 0,002126\ \text{gram/cm}^3$
- $d_{in\ combustor} = 5\ \text{mm}$
- $r_{in\ combustor} = 2,5\ \text{mm}$

b) Ditanya :

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

c) Penyelesaian:

$$\begin{aligned} \bullet V_{reaktan\ min} &= \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ min}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{11,16 + 308,90}{60}}{\frac{(3,14 \times 2,5^2)}{100}} = \frac{5,334}{0,1962} = 27,18\ \text{cm/s} \\ \bullet V_{reaktan\ maks} &= \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ maks}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{11,16 + 328,27}{60}}{\frac{(3,14 \times 2,5^2)}{100}} = \frac{5,657}{0,1962} = 28,83\ \text{cm/s} \end{aligned}$$

2.11. ($Q_f = 11,75\ \text{ml/min}$)1. Perhitungan AFR_{aktual}

a) Diketahui :

- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $\rho_{udara} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3$
- $Q_f = 11,75 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ min}} = 314,18 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ maks}} = 331,79 \text{ ml/min}$

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

- $m_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126 \text{ gram/cm}^3 \times 11,75 \text{ ml/min} = 0,0249 \text{ gram/min}$
- $m_{a \text{ min}} = \rho_{udara} \times Q_{a \text{ maksimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 331,79 \text{ ml/min} = 0,3998 \text{ gram/min}$
- $m_{a \text{ maks}} = \rho_{udara} \times Q_{a \text{ minimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 314,18 \text{ ml/min} = 0,3785 \text{ gram/min}$

c) Nilai AFR_{aktual}

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

- $AFR_{aktual \text{ batas atas}} = \frac{0,3785 \text{ gram/min}}{0,0249 \text{ gram/min}} = 15,20$
- $AFR_{aktual \text{ batas bawah}} = \frac{0,3998 \text{ gram/min}}{0,0249 \text{ gram/min}} = 16,05$

2. Perhitungan rasio ekuivalen (Φ)

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

- $\Phi_{\text{batas atas}} = \frac{15,48}{15,20} = 1,01$
- $\Phi_{\text{batas bawah}} = \frac{15,48}{16,05} = 0,96$

3. Perhitungan kecepatan reaktan (v)

a) Diketahui:

- $Q_{a \min} = 314,18 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \max} = 331,79 \text{ ml/min}$
- $Q_f = 11,75 \text{ ml/min}$
- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $d_{in \text{ combustor}} = 5 \text{ mm}$
- $r_{in \text{ combustor}} = 2,5 \text{ mm}$

b) Ditanya :

- $V_{reaktan \min}$
- $V_{reaktan \max}$

c) Penyelesaian:

$$\bullet V_{reaktan \min} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a \min}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{11,75 + 314,18}{60}}{\frac{(3,14 \times 2,5^2)}{100}} = \frac{5,432}{0,1962} = 27,68 \text{ cm/s}$$

$$\bullet V_{reaktan \max} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a \max}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{11,75 + 331,79}{60}}{\frac{(3,14 \times 2,5^2)}{100}} = \frac{5,725}{0,1962} = 29,17 \text{ cm/s}$$

3. Perhitungan 6mm

3.1. ($Q_f = 5,79$ ml/min)1. Perhitungan AFR_{aktual}

a) Diketahui :

- $\rho_{LPG} = 0,002126$ gram/cm³
- $\rho_{udara} = 0,001205$ gram/cm³
- $Q_f = 5,79$ ml/min
- $Q_{a\ min} = 208,52$ ml/min
- $Q_{a\ maks} = 233,18$ ml/min

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

- $m_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126$ gram/cm³ \times $5,79$ ml/min =
0,01230 gram/min
- $m_{a\ min} = \rho_{udara} \times Q_{a\ maksimal} = 0,001205$ gram/cm³ \times $233,18$ ml/
min = 0,280 gram/min
- $m_{a\ maks} = \rho_{udara} \times Q_{a\ minimal} = 0,001205$ gram/cm³ \times $208,18$ ml/
min = 0,250 gram/min

c) Nilai AFR_{aktual}

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

- $AFR_{aktual\ batas\ atas} = \frac{0,250\ gram/min}{0,0123\ gram/min} = 20,32$
- $AFR_{aktual\ batas\ bawah} = \frac{0,280\ gram/min}{0,0123\ gram/min} = 22,76$

2. Perhitungan rasio ekuivalen (Φ)

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

- $\Phi_{batas\ atas} = \frac{15,48}{20,32} = 0,76$

- $\Phi_{\text{batas bawah}} = \frac{15,48}{22,76} = 0,68$

3. Perhitungan kecepatan reaktan (v)

a) Diketahui:

- $Q_{a \text{ min}} = 208,52 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ maks}} = 233,18 \text{ ml/min}$
- $Q_f = 5,79 \text{ ml/min}$
- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $d_{in \text{ combustor}} = 6 \text{ mm}$
- $r_{in \text{ combustor}} = 3 \text{ mm}$

b) Ditanya :

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

c) Penyelesaian:

- $$V_{\text{reaktan min}} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a \text{ min}}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{5,79 + 208,52}{60}}{\frac{(3,14 \times 3^2)}{100}} = \frac{3,571}{0,282} = 12,66 \text{ cm/s}$$

- $$V_{\text{reaktan maks}} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a \text{ maks}}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{5,79 + 233,18}{60}}{\frac{(3,14 \times 3^2)}{100}} = \frac{3,982}{0,282} = 14,12 \text{ cm/s}$$

3.2. ($Q_f = 6,39 \text{ ml/min}$)

1. Perhitungan AFR_{aktual}

a) Diketahui :

- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $\rho_{\text{udara}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3$
- $Q_f = 6,39 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ min}} = 217,33 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ maks}} = 250,79 \text{ ml/min}$

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

- $m_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126 \text{ gram/cm}^3 \times 6,39 \text{ ml/min} = 0,01358 \text{ gram/min}$
- $m_{a \text{ min}} = \rho_{udara} \times Q_{a \text{ maksimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 250,79 \text{ ml/min} = 0,302 \text{ gram/min}$
- $m_{a \text{ maks}} = \rho_{udara} \times Q_{a \text{ minimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 217,33 \text{ ml/min} = 0,261 \text{ gram/min}$

c) Nilai AFR_{aktual}

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

- $AFR_{aktual \text{ batas atas}} = \frac{0,261 \text{ gram/min}}{0,01358 \text{ gram/min}} = 19,21$
- $AFR_{aktual \text{ batas bawah}} = \frac{0,302 \text{ gram/min}}{0,01358 \text{ gram/min}} = 22,23$

2. Perhitungan rasio ekuivalen (Φ)

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

- $\Phi_{batas \text{ atas}} = \frac{15,48}{19,21} = 0,80$
- $\Phi_{batas \text{ bawah}} = \frac{15,48}{22,23} = 0,69$

3. Perhitungan kecepatan reaktan (v)

a) Diketahui:

- $Q_{a \text{ min}} = 217,33 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ maks}} = 250,79 \text{ ml/min}$
- $Q_f = 6,39 \text{ ml/min}$
- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $d_{in \text{ combustor}} = 6 \text{ mm}$

- $r_{in\ combustor} = 3\text{ mm}$

b) Ditanya :

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

c) Penyelesaian:

$$\bullet V_{reaktan\ min} = \frac{\frac{Q_f + Q_a\ min}{3,14 \times r^2}}{100} = \frac{\frac{6,39 + 217,33}{(3,14 \times 3^2)}}{100} = \frac{3,728}{0,282} = 13,21\text{ cm/s}$$

$$\bullet V_{reaktan\ maks} = \frac{\frac{Q_f + Q_a\ maks}{3,14 \times r^2}}{100} = \frac{\frac{6,39 + 250,79}{(3,14 \times 3^2)}}{100} = \frac{4,286}{0,282} = 15,19\text{ cm/s}$$

3.3. ($Q_f = 6,99\text{ ml/min}$)

1. Perhitungan AFR_{aktual}

a) Diketahui :

- $\rho_{LPG} = 0,002126\text{ gram/cm}^3$
- $\rho_{udara} = 0,001205\text{ gram/cm}^3$
- $Q_f = 6,99\text{ ml/min}$
- $Q_{a\ min} = 226,13\text{ ml/min}$
- $Q_{a\ maks} = 263,12\text{ ml/min}$

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

$$\bullet m_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126\text{ gram/cm}^3 \times 6,99\text{ ml/min} = 0,01486\text{ gram/min}$$

$$\bullet m_{a\ min} = \rho_{udara} \times Q_{a\ maksimal} = 0,001205\text{ gram/cm}^3 \times 263,12\text{ ml/min} = 0,317\text{ gram/min}$$

$$\bullet m_{a\ maks} = \rho_{udara} \times Q_{a\ minimal} = 0,001205\text{ gram/cm}^3 \times 226,13\text{ ml/min} = 0,272\text{ gram/min}$$

c) Nilai AFR_{aktual}

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

- $AFR_{aktual \text{ batas atas}} = \frac{0,272 \text{ gram/min}}{0,01486 \text{ gram/min}} = 18,30$
- $AFR_{aktual \text{ batas bawah}} = \frac{0,317 \text{ gram/min}}{0,01486 \text{ gram/min}} = 21,33$

2. Perhitungan rasio ekuivalen (Φ)

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

- $\Phi_{batas \text{ atas}} = \frac{15,48}{18,30} = 0,84$
- $\Phi_{batas \text{ bawah}} = \frac{15,48}{21,33} = 0,72$

3. Perhitungan kecepatan reaktan (v)

a) Diketahui:

- $Q_{a \text{ min}} = 226,13 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ maks}} = 263,12 \text{ ml/min}$
- $Q_f = 6,99 \text{ ml/min}$
- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $d_{in \text{ combustor}} = 6 \text{ mm}$
- $r_{in \text{ combustor}} = 3 \text{ mm}$

b) Ditanya :

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

c) Penyelesaian:

$$\bullet V_{reaktan \text{ min}} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a \text{ min}}}{100}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{6,99 + 226,13}{100}}{\frac{(3,14 \times 3^2)}{100}} = \frac{3,885}{0,282} = 13,77 \text{ cm/s}$$

$$\bullet V_{reaktan \text{ maks}} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a \text{ maks}}}{100}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{6,99 + 263,12}{100}}{\frac{(3,14 \times 3^2)}{100}} = \frac{4,501}{0,282} = 15,96 \text{ cm/s}$$

3.4. ($Q_f = 7,58 \text{ ml/min}$)

1. Perhitungan AFR_{aktual}

a) Diketahui :

- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $\rho_{udara} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3$
- $Q_f = 7,58 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ min}} = 241,98 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ maks}} = 270,20 \text{ ml/min}$

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

- $m_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126 \text{ gram/cm}^3 \times 7,58 \text{ ml/min} = 0,0161 \text{ gram/min}$
- $m_{a \text{ min}} = \rho_{udara} \times Q_{a \text{ maksimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 270,20 \text{ ml/min} = 0,325 \text{ gram/min}$
- $m_{a \text{ maks}} = \rho_{udara} \times Q_{a \text{ minimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 241,98 \text{ ml/min} = 0,291 \text{ gram/min}$

c) Nilai AFR_{aktual}

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

- $AFR_{aktual \text{ batas atas}} = \frac{0,291 \text{ gram/min}}{0,0161 \text{ gram/min}} = 18,07$
- $AFR_{aktual \text{ batas bawah}} = \frac{0,325 \text{ gram/min}}{0,0161 \text{ gram/min}} = 20,18$

2. Perhitungan rasio ekuivalen (Φ)

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

- $\Phi_{batas \text{ atas}} = \frac{15,48}{18,07} = 0,85$

- $\Phi_{batas\ bawah} = \frac{15,48}{20,18} = 0,76$

3. Perhitungan kecepatan reaktan (v)

a) Diketahui:

- $Q_{a\ min} = 241,98\ \text{ml/min}$
- $Q_{a\ maks} = 277,20\ \text{ml/min}$
- $Q_f = 7,58\ \text{ml/min}$
- $\rho_{LPG} = 0,002126\ \text{gram/cm}^3$
- $d_{in\ combustor} = 6\ \text{mm}$
- $r_{in\ combustor} = 3\ \text{mm}$

b) Ditanya :

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

c) Penyelesaian:

- $$V_{reaktan\ min} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ min}}{3,14 \times r^2}}{100} = \frac{\frac{7,58 + 241,98}{(3,14 \times 3^2)}}{100} = \frac{4,159}{0,282} = 14,74\ \text{cm/s}$$

- $$V_{reaktan\ maks} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ maks}}{3,14 \times r^2}}{100} = \frac{\frac{7,58 + 277,20}{(3,14 \times 3^2)}}{100} = \frac{4,746}{0,282} = 16,82\ \text{cm/s}$$

3.5. ($Q_f = 8,18\ \text{ml/min}$)

1. Perhitungan AFR_{aktual}

a) Diketahui :

- $\rho_{LPG} = 0,002126\ \text{gram/cm}^3$
- $\rho_{udara} = 0,001205\ \text{gram/cm}^3$
- $Q_f = 8,18\ \text{ml/min}$
- $Q_{a\ min} = 250,79\ \text{ml/min}$

- $Q_{a maks} = 282,49 \text{ ml/min}$
- b) Karena perbedaan fase bahan bakar dan udara, maka keduanya diubah menjadi massa alir (m).
- $m_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126 \text{ gram/cm}^3 \times 8,18 \text{ ml/min} = 0,01739 \text{ gram/min}$
 - $m_{a min} = \rho_{udara} \times Q_{a maksimal} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 282,49 \text{ ml/min} = 0,340 \text{ gram/min}$
 - $m_{a maks} = \rho_{udara} \times Q_{a minimal} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 250,79 \text{ ml/min} = 0,302 \text{ gram/min}$
- c) Nilai AFR_{aktual}

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

- $AFR_{aktual \text{ batas atas}} = \frac{0,302 \text{ gram/min}}{0,01739 \text{ gram/min}} = 17,36$
- $AFR_{aktual \text{ batas bawah}} = \frac{0,340 \text{ gram/min}}{0,01739 \text{ gram/min}} = 19,55$

2. Perhitungan rasio ekuivalen (Φ)

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

- $\Phi_{batas atas} = \frac{15,48}{17,36} = 0,89$
- $\Phi_{batas bawah} = \frac{15,48}{19,55} = 0,79$

3. Perhitungan kecepatan reaktan (v)

a) Diketahui:

- $Q_{a min} = 250,79 \text{ ml/min}$
- $Q_{a maks} = 282,49 \text{ ml/min}$
- $Q_f = 8,18 \text{ ml/min}$
- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$

- $d_{in\ combustor} = 6 \text{ mm}$

- $r_{in\ combustor} = 3 \text{ mm}$

b) Ditanya :

- $V_{reaktan\ min}$

- $V_{reaktan\ maks}$

c) Penyelesaian:

- $$V_{reaktan\ min} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ min}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{8,18 + 250,79}{60}}{\frac{(3,14 \times 3^2)}{100}} = \frac{4,332}{0,282} = 15,36 \text{ cm/s}$$

- $$V_{reaktan\ maks} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ maks}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{8,18 + 282,49}{60}}{\frac{(3,14 \times 3^2)}{100}} = \frac{4,844}{0,282} = 17,17 \text{ cm/s}$$

3.6. ($Q_f = 8,77 \text{ ml/min}$)

1. Perhitungan AFR_{aktual}

a) Diketahui :

- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$

- $\rho_{udara} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3$

- $Q_f = 8,77 \text{ ml/min}$

- $Q_{a\ min} = 266,64 \text{ ml/min}$

- $Q_{a\ maks} = 294,81 \text{ ml/min}$

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

- $m_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126 \text{ gram/cm}^3 \times 8,77 \text{ ml/min} = 0,01864 \text{ gram/min}$

- $m_{a\ min} = \rho_{udara} \times Q_{a\ maksimal} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 294,81 \text{ ml/min} = 0,3552 \text{ gram/min}$

- $m_{a\ maks} = \rho_{udara} \times Q_{a\ minimal} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 266,41 \text{ ml/min} = 0,3210 \text{ gram/min}$

c) Nilai AFR_{aktual}

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

- $AFR_{aktual \text{ batas atas}} = \frac{0,3210 \text{ gram/min}}{0,01864 \text{ gram/min}} = 17,22$
- $AFR_{aktual \text{ batas bawah}} = \frac{0,3552 \text{ gram/min}}{0,01864 \text{ gram/min}} = 19,05$

2. Perhitungan rasio ekuivalen (Φ)

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

- $\Phi_{batas \text{ atas}} = \frac{15,48}{17,22} = 0,89$
- $\Phi_{batas \text{ bawah}} = \frac{15,48}{19,05} = 0,81$

3. Perhitungan kecepatan reaktan (v)

a) Diketahui:

- $Q_{a \text{ min}} = 266,64 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ maks}} = 294,81 \text{ ml/min}$
- $Q_f = 8,77 \text{ ml/min}$
- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $d_{in \text{ combustor}} = 6 \text{ mm}$
- $r_{in \text{ combustor}} = 3 \text{ mm}$

b) Ditanya :

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

c) Penyelesaian:

$$\bullet V_{reaktan \text{ min}} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a \text{ min}}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{8,77 + 266,64}{60}}{\frac{(3,14 \times 3^2)}{100}} = \frac{4,590}{0,282} = 16,27 \text{ cm/s}$$

$$\bullet V_{reaktan maks} = \frac{Q_f + Q_a \max}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{8,77 + 294,81}{\frac{(3,14 \times 3^2)}{100}} = \frac{5,059}{0,282} = 17,39 \text{ cm/s}$$

3.7. ($Q_f = 9,37 \text{ ml/min}$)

1. Perhitungan AFR_{aktual}

a) Diketahui :

- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $\rho_{udara} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3$
- $Q_f = 9,37 \text{ ml/min}$
- $Q_{a min} = 275,44 \text{ ml/min}$
- $Q_{a maks} = 312,42 \text{ ml/min}$

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

- $m_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126 \text{ gram/cm}^3 \times 9,37 \text{ ml/min} = 0,01992 \text{ gram/min}$
- $m_{a min} = \rho_{udara} \times Q_{a maksimal} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 312,42 \text{ ml/min} = 0,3764 \text{ gram/min}$
- $m_{a maks} = \rho_{udara} \times Q_{a minimal} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 275,44 \text{ ml/min} = 0,3319 \text{ gram/min}$

c) Nilai AFR_{aktual}

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

- $AFR_{aktual \text{ batas atas}} = \frac{0,3319 \text{ gram/min}}{0,01992 \text{ gram/min}} = 16,66$
- $AFR_{aktual \text{ batas bawah}} = \frac{0,3764 \text{ gram/min}}{0,01992 \text{ gram/min}} = 18,89$

2. Perhitungan rasio ekuivalen (Φ)

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

- $\Phi_{batas\ atas} = \frac{15,48}{16,66} = 0,92$
- $\Phi_{batas\ bawah} = \frac{15,48}{18,89} = 0,81$

3. Perhitungan kecepatan reaktan (v)

a) Diketahui:

- $Q_{a\ min} = 275,44\ \text{ml/min}$
- $Q_{a\ maks} = 312,42\ \text{ml/min}$
- $Q_f = 9,37\ \text{ml/min}$
- $\rho_{LPG} = 0,002126\ \text{gram/cm}^3$
- $d_{in\ combustor} = 6\ \text{mm}$
- $r_{in\ combustor} = 3\ \text{mm}$

b) Ditanya :

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

c) Penyelesaian:

$$\bullet V_{reaktan\ min} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ min}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{9,37 + 275,44}{60}}{\frac{(3,14 \times 3^2)}{100}} = \frac{4,7468}{0,282} = 16,83\ \text{cm/s}$$

$$\bullet V_{reaktan\ maks} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ maks}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{9,37 + 312,42}{60}}{\frac{(3,14 \times 3^2)}{100}} = \frac{5,3631}{0,282} = 19,01\ \text{cm/s}$$

3.8. ($Q_f = 9,97\ \text{ml/min}$)

1. Perhitungan AFR_{aktual}

a) Diketahui :

- $\rho_{LPG} = 0,002126\ \text{gram/cm}^3$
- $\rho_{udara} = 0,001205\ \text{gram/cm}^3$

- $Q_f = 9,97 \text{ ml/min}$
 - $Q_{a \text{ min}} = 291,29 \text{ ml/min}$
 - $Q_{a \text{ maks}} = 321,23 \text{ ml/min}$
- b) Karena perbedaan fase bahan bakar dan udara, maka keduanya diubah menjadi massa alir (m).
- $m_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126 \text{ gram/cm}^3 \times 9,97 \text{ ml/min} = 0,02119 \text{ gram/min}$
 - $m_{a \text{ min}} = \rho_{\text{udara}} \times Q_{a \text{ maksimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 321,23 \text{ ml/min} = 0,3870 \text{ gram/min}$
 - $m_{a \text{ maks}} = \rho_{\text{udara}} \times Q_{a \text{ minimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 291,29 \text{ ml/min} = 0,3510 \text{ gram/min}$
- c) Nilai AFR_{aktual}

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

- $AFR_{\text{aktual batas atas}} = \frac{0,3510 \text{ gram/min}}{0,02119 \text{ gram/min}} = 16,56$
- $AFR_{\text{aktual batas bawah}} = \frac{0,3870 \text{ gram/min}}{0,02119 \text{ gram/min}} = 18,26$

2. Perhitungan rasio ekuivalen (Φ)

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

- $\Phi_{\text{batas atas}} = \frac{15,48}{16,56} = 0,93$
- $\Phi_{\text{batas bawah}} = \frac{15,48}{18,26} = 0,84$

3. Perhitungan kecepatan reaktan (v)

a) Diketahui:

- $Q_{a \text{ min}} = 291,29 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ maks}} = 321,23 \text{ ml/min}$

- $Q_f = 9,97 \text{ ml/min}$
- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $d_{in \text{ combustor}} = 6 \text{ mm}$
- $r_{in \text{ combustor}} = 3 \text{ mm}$

b) Ditanya :

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

c) Penyelesaian:

$$\bullet V_{reaktan \text{ min}} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a \text{ min}}}{\frac{60}{3,14 \times r^2}}}{100} = \frac{\frac{9,97 + 291,29}{\frac{60}{(3,14 \times 3^2)}}}{100} = \frac{5,021}{0,282} = 17,80 \text{ cm/s}$$

$$\bullet V_{reaktan \text{ maks}} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a \text{ max}}}{\frac{60}{3,14 \times r^2}}}{100} = \frac{\frac{9,97 + 321,23}{\frac{60}{(3,14 \times 3^2)}}}{100} = \frac{5,52}{0,282} = 19,57 \text{ cm/s}$$

3.9. ($Q_f = 10,56 \text{ ml/min}$)

1. Perhitungan AFR_{aktual}

a) Diketahui :

- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $\rho_{udara} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3$
- $Q_f = 10,56 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ min}} = 298,34 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ maks}} = 330,03 \text{ ml/min}$

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

$$\bullet m_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126 \text{ gram/cm}^3 \times 10,56 \text{ ml/min} = 0,02245 \text{ gram/min}$$

$$\bullet m_{a \text{ min}} = \rho_{udara} \times Q_{a \text{ maksimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 330,03 \text{ ml/min} = 0,3976 \text{ gram/min}$$

- $m_{a \text{ maks}} = \rho_{\text{udara}} \times Q_{a \text{ minimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 298,34 \text{ ml/min} = 0,3594 \text{ gram/min}$

c) Nilai AFR_{aktual}

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

- $AFR_{\text{aktual batas atas}} = \frac{0,3594 \text{ gram/min}}{0,02245 \text{ gram/min}} = 16,00$
- $AFR_{\text{aktual batas bawah}} = \frac{0,33976 \text{ gram/min}}{0,02245 \text{ gram/min}} = 15,13$

2. Perhitungan rasio ekuivalen (Φ)

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

- $\Phi_{\text{batas atas}} = \frac{15,48}{16,00} = 0,96$
- $\Phi_{\text{batas bawah}} = \frac{15,48}{15,13} = 1,02$

3. Perhitungan kecepatan reaktan (v)

a) Diketahui:

- $Q_{a \text{ min}} = 298,34 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ maks}} = 330,03 \text{ ml/min}$
- $Q_f = 10,56 \text{ ml/min}$
- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $d_{in \text{ combustor}} = 6 \text{ mm}$
- $r_{in \text{ combustor}} = 3 \text{ mm}$

b) Ditanya :

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

c) Penyelesaian:

$$\bullet V_{reaktan\ min} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ min}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{10,56 + 298,34}{60}}{\frac{(3,14 \times 3^2)}{100}} = \frac{5,148}{0,282} = 18,25\ \text{cm/s}$$

$$\bullet V_{reaktan\ maks} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ maks}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{10,56 + 330,03}{60}}{\frac{(3,14 \times 3^2)}{100}} = \frac{5,676}{0,282} = 20,12\ \text{cm/s}$$

3.10. ($Q_f = 11,16\ \text{ml/min}$)

1. Perhitungan AFR_{aktual}

a) Diketahui :

- $\rho_{LPG} = 0,002126\ \text{gram/cm}^3$
- $\rho_{udara} = 0,001205\ \text{gram/cm}^3$
- $Q_f = 11,16\ \text{ml/min}$
- $Q_{a\ min} = 301,86\ \text{ml/min}$
- $Q_{a\ maks} = 345,88\ \text{ml/min}$

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

- $m_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126\ \text{gram/cm}^3 \times 11,16\ \text{ml/min} = 0,0237\ \text{gram/min}$
- $m_{a\ min} = \rho_{udara} \times Q_{a\ maksimal} = 0,001205\ \text{gram/cm}^3 \times 345,88\ \text{ml/min} = 0,4167\ \text{gram/min}$
- $m_{a\ maks} = \rho_{udara} \times Q_{a\ minimal} = 0,001205\ \text{gram/cm}^3 \times 301,86\ \text{ml/min} = 0,3637\ \text{gram/min}$

c) Nilai AFR_{aktual}

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

- $AFR_{aktual\ batas\ atas} = \frac{0,3637\ \text{gram/min}}{0,0237\ \text{gram/min}} = 15,34$
- $AFR_{aktual\ batas\ bawah} = \frac{0,4167\ \text{gram/min}}{0,0237\ \text{gram/min}} = 17,58$

2. Perhitungan rasio ekuivalen (Φ)

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

- $\Phi_{batas\ atas} = \frac{15,48}{15,34} = 1,009$
- $\Phi_{batas\ bawah} = \frac{15,48}{17,58} = 0,88$

3. Perhitungan kecepatan reaktan (v)

a) Diketahui:

- $Q_{a\ min} = 301,86\ \text{ml/min}$
- $Q_{a\ maks} = 345,88\ \text{ml/min}$
- $Q_f = 11,16\ \text{ml/min}$
- $\rho_{LPG} = 0,002126\ \text{gram/cm}^3$
- $d_{in\ combustor} = 6\ \text{mm}$
- $r_{in\ combustor} = 3\ \text{mm}$

b) Ditanya :

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

c) Penyelesaian:

$$\bullet V_{reaktan\ min} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ min}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{11,16 + 301,86}{60}}{\frac{(3,14 \times 3^2)}{100}} = \frac{5,217}{0,282} = 18,5\ \text{cm/s}$$

$$\bullet V_{reaktan\ maks} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a\ maks}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{11,16 + 345,88}{60}}{\frac{(3,14 \times 3^2)}{100}} = \frac{5,950}{0,282} = 21,09\ \text{cm/s}$$

3.11. ($Q_f = 11,75\ \text{ml/min}$)1. Perhitungan AFR_{aktual}

a) Diketahui :

- $\rho_{LPG} = 0,002126\ \text{gram/cm}^3$

- $\rho_{udara} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3$
- $Q_f = 11,75 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ min}} = 314,18 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ maks}} = 347,64 \text{ ml/min}$

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

- $m_f = \rho_{LPG} \times Q_f = 0,002126 \text{ gram/cm}^3 \times 11,75 \text{ ml/min} = 0,0249 \text{ gram/min}$
- $m_{a \text{ min}} = \rho_{udara} \times Q_{a \text{ maksimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 347,64 \text{ ml/min} = 0,4189 \text{ gram/min}$
- $m_{a \text{ maks}} = \rho_{udara} \times Q_{a \text{ minimal}} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 314,18 \text{ ml/min} = 0,3785 \text{ gram/min}$

c) Nilai AFR_{aktual}

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

- $AFR_{aktual \text{ batas atas}} = \frac{0,3785 \text{ gram/min}}{0,0249 \text{ gram/min}} = 15,20$
- $AFR_{aktual \text{ batas bawah}} = \frac{0,4189 \text{ gram/min}}{0,0249 \text{ gram/min}} = 16,82$

2. Perhitungan rasio ekuivalen (Φ)

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

- $\Phi_{batas \text{ atas}} = \frac{15,48}{15,20} = 1,10$
- $\Phi_{batas \text{ bawah}} = \frac{15,48}{16,82} = 0,99$

3. Perhitungan kecepatan reaktan (v)

a) Diketahui:

- $Q_{a \text{ min}} = 314,18 \text{ ml/min}$

- $Q_{a maks} = 347,64 \text{ ml/min}$
- $Q_f = 11,75 \text{ ml/min}$
- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$
- $d_{in combustor} = 6 \text{ mm}$
- $r_{in combustor} = 3 \text{ mm}$

b) Ditanya :

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

c) Penyelesaian:

$$\bullet V_{reaktan min} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a min}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{11,75 + 314,18}{60}}{\frac{(3,14 \times 3^2)}{100}} = \frac{5,432}{0,293} = 18,53 \text{ cm/s}$$

$$\bullet V_{reaktan maks} = \frac{\frac{Q_f + Q_{a max}}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}} = \frac{\frac{11,75 + 347,64}{60}}{\frac{(3,14 \times 3^2)}{100}} = \frac{5,989}{0,293} = 20,44 \text{ cm/s}$$

4. Perhitungan nilai Q_a dan Q_f untuk data visualisasi nyala api

4.1 Rasio Ekuivalen 0,95 5mm

a) Diketahui:

- $\Phi = 0,95$
- $v = 29,80 \text{ cm/s}$
- $AFR_{stoikiometri} = 15,48$
- $\rho_{udara} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3$
- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$

b) Ditanya:

- Q_a
- Q_f

c) Penyelesaian:

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

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

$$AFR_{aktual} = \frac{15,48}{0,95} = 16,29$$

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

$$16,29 = \frac{Q_a \times 0,001205 \text{ gram/cm}^3}{Q_f \times 0,002126 \text{ gram/cm}^3}$$

$$Q_a = 28,74 Q_f$$

$$\bullet V_{reaktan} = \frac{\frac{Q_f + Q_c}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}}$$

$$29,80 \text{ ml/min} = \frac{Q_f + 28,74 Q_f}{\frac{60}{\frac{3,14 \times r^2}{100}}}$$

$$29,80 \text{ ml/min} = \frac{0,479 Q_f}{0,1962}$$

$$Q_f = \frac{29,80 \times 0,1962}{0,479}$$

$$Q_f = 12.206 \text{ ml/min}$$

$$Q_a = 28,74 Q_f$$

$$Q_a = 28,74 (12,206) = 350,80$$

4.2. Rasio Ekuivalen 0,95 6mm

a) Diketahui:

- $\Phi = 0,95$
- $V = 29,80 \text{ cm/s}$
- $AFR_{stoikiometri} = 15,48$
- $\rho_{udara} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3$
- $\rho_{LPG} = 0,002126 \text{ gram/cm}^3$

b) Ditanya:

- Q_a
- Q_f

c) Penyelesaian:

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

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

$$AFR_{aktual} = \frac{15,48}{0,95} = 16,29$$

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

$$16,29 = \frac{Q_a \times 0,001205 \text{ gram/cm}^3}{Q_f \times 0,002126 \text{ gram/cm}^3}$$

$$Q_a = 28,74 Q_f$$

$$\bullet V_{reaktan} = \frac{\frac{Q_f + Q_c}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100}}$$

$$29,80 \text{ ml/min} = \frac{Q_f + 28,74 Q_f}{\frac{3,14 \times r^2}{100}}$$

$$29,80 \text{ ml/min} = \frac{0,479 Q_f}{0,282}$$

$$Q_f = \frac{29,80 \times 0,282}{0,479}$$

$$Q_f = 17,544 \text{ ml/min}$$

$$Q_a = 28,74 Q_f$$

$$Q_a = 28,74 (17,544) = 504,21$$

5. Perhitungan nilai Surface to volume (S/V)

5.1. Surface to Volume 5mm

a) Diketahui:

- $P = 20$
- $D_{out} = 5\text{mm}$

b) Ditanya:

- S/V

c) Penyelesaian:

- $S = 2 \times 3,14 \times r \times 20$
 $= 2 \times 3,14 \times 2,5 \times 20$
 $= 314$

- $V = 3,14 \times r^2 \times 20$
 $= 3,14 \times 2,5^2 \times 20$
 $= 392,5$

- $S/V = \frac{314}{392,5}$
 $= 0,8$

5.2. Surface to Volume 5mm

a) Diketahui:

- $P = 20$
- $D_{out} = 6\text{mm}$

b) Ditanya:

- S/V

c) Penyelesaian:

- $S = 2 \times 3,14 \times r \times 20$
 $= 2 \times 3,14 \times 3 \times 20$

$$= 376,8$$

- $V = 3,14 \times r^2 \times 20$
- $= 3,14 \times 3^2 \times 20$
- $= 565,2$
- $S/V = \frac{376,8}{565,2}$
- $= 0,6$

4.2 Perhitungan Pembahasan

1. Perhitungan nilai visualisasi nyala api

1.1. Visualisasi 5mm

a) Diketahui:

- Durasi Video = 21 detik
- Frame = 1259
- Panjang *combustor* 20 mm = 395 pixel
- Jarak titik api dari *sudden expansion*
 1. 208 pixel
 2. 105 pixel
 3. 50 pixel
 4. 20 pixel

b) Ditanya:

- t
- Jarak sebenarnya titik api dari *sudden expansion*
- dx/dt

c) Penyelesaian:

- $t = \frac{60 \times 1259}{21}$
- $= 3597,1$ detik

- Jarak sebenarnya titik api

$$1. \frac{208 \text{ pixel} \times 20 \text{ mm}}{395} = 10,53 \text{ mm}$$

$$2. \frac{105 \text{ pixel} \times 20 \text{ mm}}{395} = 5,31 \text{ mm}$$

$$3. \frac{50 \text{ pixel} \times 20 \text{ mm}}{395} = 2,53 \text{ mm}$$

$$4. \frac{20 \text{ pixel} \times 20 \text{ mm}}{395} = 1,01 \text{ mm}$$

- dx/dt

$$1. \frac{10,53 \text{ mm}}{1/3597,1} = 37883,38 \text{ mm/s} = 37,883 \text{ m/s}$$

$$2. \frac{5,31 \text{ mm}}{1/3597,1} = 19123,82 \text{ mm/s} = 19,123 \text{ m/s}$$

$$3. \frac{2,53 \text{ mm}}{1/3597,1} = 9106,58 \text{ mm/s} = 9,106 \text{ m/s}$$

$$4. \frac{1,01 \text{ mm}}{1/3597,1} = 3642,63 \text{ mm/s} = 3,642 \text{ m/s}$$

Rata – rata kecepatan api = 13,951 m/s

1.2. Visualisasi 6mm

a) Diketahui:

- Durasi Video = 25 detik
- Frame = 1499
- Panjang *combustor* 20 mm = 395 pixel
- Jarak titik api dari *sudden expansion*
 1. 310 pixel
 2. 200 pixel
 3. 70 pixel
 4. 15 pixel

b) Ditanya:

- t
- Jarak sebenarnya titik api dari *sudden expansion*
- dx/dt

c) Penyelesaian:

- $t = \frac{60 \times 1499}{25}$

$$= 3597,6 \text{ detik}$$

- Jarak sebenarnya titik api

1. $\frac{310 \text{ pixel} \times 20 \text{ mm}}{395} = 15,69 \text{ mm}$

2. $\frac{200 \text{ pixel} \times 20 \text{ mm}}{395} = 10,16 \text{ mm}$

3. $\frac{70 \text{ pixel} \times 20 \text{ mm}}{395} = 3,54 \text{ mm}$

4. $\frac{15 \text{ pixel} \times 20 \text{ mm}}{395} = 0,75 \text{ mm}$

- dx/dt

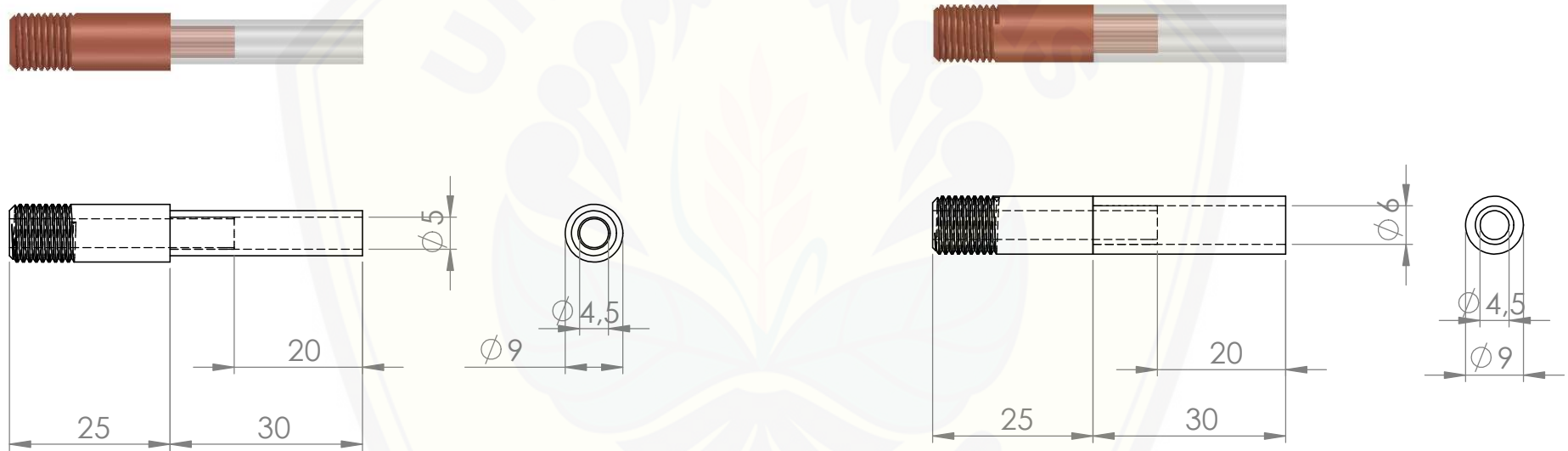
1. $\frac{15,69 \text{ mm}}{1/3597,1} = 56468,65 \text{ mm/s} = 56,468 \text{ m/s}$

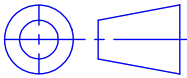
2. $\frac{10,16 \text{ mm}}{1/3597,1} = 36431,39 \text{ mm/s} = 36,431 \text{ m/s}$

3. $\frac{3,54 \text{ mm}}{1/3597,1} = 12750,98 \text{ mm/s} = 12,751 \text{ m/s}$

4. $\frac{0,75 \text{ mm}}{1/3597,1} = 2732,35 \text{ mm/s} = 2,732 \text{ m/s}$

Rata – rata kecepatan api = 21,676 m/s



	Skala : 1 : 1	Digambar : Dwi Kurniawan T.	Keterangan :	
	Satuan : mm	Jurusan : Teknik Mesin		
	Tanggal : 11-01-2019	Diperiksa : Dr. Nasrul Ilminnafik, S.T.,M.T		
FAKULTAS TEKNIK MESIN	MESO SCALE COMBUSTOR	No. 1	A4	