



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan ke hadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya yang telah diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Pengaruh Diameter *Combustor* terhadap Karakteristik Pembakaran pada *Meso-scale combustor* dengan *Backward facing step*”** dengan baik. Sholawat serta salam semoga tetap tercurahkan kepada junjungan kita Rasulullah SAW.

Dalam penyusunan skripsi penulis telah mendapatkan bantuan, petunjuk, semangat, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak tersebut, antara lain :

1. Kedua orang tua tercinta, Bapak Suroto dan Ibu Khusnul Khotimah yang tiada henti mendoakan, memberi bimbingan, dan motivasi kepada penulis.
2. Adik kandung Zuzun Khofitri yang senantiasa mendoakan dan memotivasi penulis.
3. Prof. Ir. ING Wardana, M. Eng., Ph.D. selaku dosen pembimbing I yang telah memberi banyak pengetahuan, bimbingan, dan motivasi selama penyusunan skripsi.
4. Dr. Eng. Lilis Yuliati, ST., MT. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan motivasi, bimbingan, dan arahan demi kesempurnaan penulisan skripsi.
5. Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M. Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah membantu kelancaran proses administrasi.
6. Purnami, ST., MT. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah membantu kelancaran proses administrasi.
7. Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT. selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah membantu kelancaran proses administrasi.
8. Francisca Gayuh Utami Dewi ST., MT. selaku Ketua Kelompok Dasar Keahlian Konsentrasi Teknik Konversi Energi yang telah memberikan bimbingan penulisan skripsi.
9. Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M. Eng. selaku dosen wali yang tiada henti memberikan bimbingan selama penulis menyelesaikan studi di Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
10. Ibu / Bapak Dosen pengajar dan staf Jurusan Teknik Mesin yang telah memberikan motivasi kepada penulis.
11. Moch. Refrian Ramadhan yang telah memberikan doa dan semangat kepada penulis.



12. Buat Keluarga KA 126 terutama ‘SIMPIONI’ terima kasih atas dukungan, bantuan serta hangatnya kebersamaan selama di rumah ke-2.

13. Andhika Dwi Saputro dan Felix Ernest selaku partner berjuang di tugas akhir, Sahabat M’girl 2011 : Tueztika A., Onny Ika P., Veronika K., Marita A., Salsabiila V., dan Rizky K. terima kasih telah menemani berjuang di bumi Biru Abang Arek Mesin.

14. Seluruh Keluarga Besar *Fluid Machine Laboratory*, (Ferry, Hispano, Fauzi, Wigung, Tanjung, Musthofa, Elga, dan Josep) terima kasih atas bantuannya selama penulis melakukan penelitian.

15. Saudara seperjuangan “KAMIKAZE”, terima kasih atas doa, kebersamaan, dan solidaritas selama masa kuliah.

16. Keluarga Besar Mahasiswa Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah memberikan bantuannya kepada penulis.

17. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu penulis dalam penyelesaian skripsi.

Penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi penyusunan yang baik karena penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna.

Akhir kata, penulis berharap agar skripsi ini dapat berguna bagi kita semua sehingga dapat menjadi acuan untuk penelitian lebih lanjut untuk kemajuan kita bersama.

Malang, Agustus 2015

Penulis



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR TABEL.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR LAMPIRAN.....	viii
RINGKASAN.....	ix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	4
2.2 Aliran Fluida Pada Saluran Dengan Perubahan Luas Penampang.....	5
2.3 Proses Pembakaran.....	5
2.3.1 Reaksi Kimia dan Proses Pembakaran.....	6
2.3.2 <i>Air fuel Ratio (AFR)</i>	7
2.3.3 <i>Rasio ekuivalen (ϕ)</i>	8
2.4 Klasifikasi Pembakaran.....	9
2.4.1 Pembakaran <i>Premixed</i>	9
2.4.2 <i>Flammability limit</i> dan Kestabilan api.....	11
2.5 <i>Micro power generator</i> dan <i>Micro/Meso-scale combustor</i>	11
2.6 <i>Liquified Petroleum Gas (LPG)</i>	13
2.7 Hipotesis.....	14
BAB III METODE PENELITIAN.....	15

3.1	Tempat dan Waktu Pelaksanaan.....	15
3.2	Variabel Penelitian.....	15
3.3	Peralatan Penelitian.....	16
3.4	Skema Instalasi Penelitian.....	19
3.5	Metode Pengambilan Data.....	20
3.6	Pengambilan Dan Pengolahan Data.....	20
3.7	Diagram Alir penelitian.....	22
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		23
4.1	Data Hasil Penelitian.....	23
4.2	Pengolahan Data <i>Flammability limit</i>	28
4.2.1	Perhitungan <i>Rasio ekuivalen</i> (Φ).....	28
4.2.2	Perhitungan Kecepatan Reaktan (V_{tot}).....	29
4.3	Pembahasan <i>Flammability limit</i>	32
4.4	Pengambilan Data Visualisasi dan Temperatur Nyala Api.....	33
4.5	Visualisasi Bentuk Nyala Api.....	33
4.6	Temperatur Nyala Api.....	36
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		40
5.1	Kesimpulan.....	40
5.2	Saran.....	40
DAFTAR PUSTAKA.....		41
LAMPIRAN.....		42

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Komposisi udara kering	6
Tabel 4.1 Pengambilan data <i>flammability limit</i> untuk debit bahan bakar konstan.....	23
Tabel 4.2 Pengambilan data <i>flammability limit</i> untuk debit bahan bakar konstan.....	24
Tabel 4.3 Pengambilan data <i>flammability limit</i> pada <i>exit combustor</i> untuk debit bahan bakar konstan	24
Tabel 4.4 Data kalibrasi <i>flowmeter</i> bahan bakar (LPG)	25
Tabel 4.5 Data <i>flammability limit</i> untuk debit bahan bakar konstan (Setelah konversi)	27
Tabel 4.6 Data <i>flammability limit</i> untuk debit bahan bakar konstan (Setelah konversi)	26
Tabel 4.7 Data <i>flammability limit</i> pada <i>exit combustor</i> bahan bakar konstan (Setelah konversi)	27
Tabel 4.8 Hasil pengolahan data <i>flammability limit</i> untuk bahan bakar konstan	30
Tabel 4.9 Hasil pengolahan data <i>flammability limit</i> untuk bahan bakar konstan	30
Tabel 4.10 Hasil pengolahan data <i>flammability limit</i> pada <i>exit combustor</i> untuk bahan bakar konstan	31
Tabel 4.11 Titik pengambilan data visualisasi bentuk nyala api dan temperatur nyala api	34
Tabel 4.12 Data temperatur nyala api pada <i>meso-scale combustor</i> dengan <i>backward facing step</i> dengan $D_1/D_2 = 3.5/4.7$	36
Tabel 4.13 Data temperatur nyala api pada <i>meso-scale combustor</i> dengan <i>backward facing step</i> dengan $D_1/D_2 = 2.6/3.5$	36



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram temperatur pada <i>meso-scale combustor</i> , (a) $d=2$ mm, (b) $d=6$ mm	4
Gambar 2.2 <i>Backward facing step</i>	5
Gambar 2.3 Ilustrasi proses pembakaran	6
Gambar 2.4 Klasifikasi pembakaran (a) Pembakaran <i>Premixed</i> , (b) Pembakaran difusi.	9
Gambar 2.5 (a) Pembakaran <i>premixed</i> pada <i>tube</i> (b) Pembakaran bunsen	10
Gambar 2.6 <i>Micro power generator</i> dengan siklus daya konvensional	12
Gambar 2.7 <i>Micro power generator</i> dengan prinsip <i>thermoelectric</i>	12
Gambar 3.1 Variasi diameter <i>combustor</i> tipe 1, 2, dan 3 dengan <i>backward facing step</i> (satuan mm)	16
Gambar 3.2 <i>Combustor holder</i>	17
Gambar 3.3 <i>Flowmeter</i>	17
Gambar 3.4 <i>Pisco tube</i> dan <i>Y connector</i>	18
Gambar 3.5 Skema instalasi alat penelitian	19
Gambar 3.6 Titik pengukuran temperatur nyala api	21
Gambar 3.7 Diagram alir penelitian	22
Gambar 4.1 Grafik kalibrasi nilai debit bahan bakar (Q_f)	26
Gambar 4.2 Grafik <i>flammability limit</i> pada <i>meso-scale combustor</i> dengan <i>backward facing step</i> dengan D_1/D_2 (A) 3.5/4.7, (B) 2.6/3.5	32
Gambar 4.3 Visualisasi bentuk nyala api pada <i>meso-scale combustor</i> dengan <i>backward facing step</i> , $D_1/D_2 = 3.5/4.7$ pada nilai <i>rasio ekuivalen</i> 1,3 dengan kecepatan reaktan 30 cm/s, 25 cm/s dan 20 cm/s	34
Gambar 4.4 Visualisasi bentuk nyala api pada <i>meso-scale combustor</i> dengan <i>backward facing step</i> , $D_1/D_2 = 2.6/3.5$ pada nilai <i>rasio ekuivalen</i> 1,3 dengan kecepatan reaktan 25 cm/s, 21 cm/s dan 20 cm/s	34
Gambar 4.5 Visualisasi bentuk nyala api pada <i>meso-scale combustor</i> dengan <i>backward facing step</i> , $D_1/D_2 = 3.5/4.7$ pada kecepatan reaktan 25 cm/s dengan nilai <i>rasio ekuivalen</i> 1,5, 1,3 dan 1	35
Gambar 4.6 Visualisasi bentuk nyala api pada <i>meso-scale combustor</i> dengan <i>backward facing step</i> , $D_1/D_2 = 2.6/3.5$ pada kecepatan reaktan 25 cm/s dengan nilai <i>rasio ekuivalen</i> 1,4 dan 1,3	35



Gambar 4.7 Hubungan <i>rasio ekuivalen</i> terhadap temperatur nyala api pada <i>meso-scale combustor</i> dengan <i>backward facing step</i> dengan $D_1/D_2 = 3.5/4.7$	37
Gambar 4.8 Hubungan kecepatan reaktan terhadap temperatur nyala api pada <i>meso-scale combustor</i> dengan <i>backward facing step</i> dengan $D_1/D_2 = 3.5/4.7$	37
Gambar 4.9 Hubungan <i>rasio ekuivalen</i> terhadap temperatur nyala api pada <i>meso-scale combustor</i> dengan <i>backward facing step</i> dengan $D_1/D_2 = 2.6/3.5$	38
Gambar 4.10 Hubungan kecepatan reaktan terhadap temperatur nyala api pada <i>meso-scale combustor</i> dengan <i>backward facing step</i> dengan $D_1/D_2 = 2.6/3.5$	38



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Persentase Gas Propana Dan Butana Dalam *Liquified Petroleum Gas* (LPG)..... 42

RINGKASAN

Sullistiyah Sari, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Agustus 2015, Pengaruh Diameter *Combustor* terhadap Karakteristik Pembakaran pada *Meso-scale combustor* dengan *Backward facing step*, Dosen Pembimbing : I.N.G Wardana dan Lilis Yuliati.

Meso-scale combustor merupakan komponen penting dari *micro power generator* yang berfungsi mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi termal. Sebelumnya telah dilakukan penelitian mengenai *meso-scale combustor* dengan *backward facing step*. Didapatkan bahwa pembakaran stabil dapat terjadi dalam sebuah *combustor* dengan *backward facing step* yang berfungsi untuk meningkatkan proses pencampuran udara dan bahan bakar, dan memperpanjang waktu tinggal reaktan dalam daerah reaksi pembakaran. Dalam penelitian tersebut diameter inlet (D_1) *combustor* dijaga konstan, sedangkan diameter outletnya (D_2) divariasikan untuk mengubah rasio diameter D_1/D_2 . Dalam penelitian ini penulis memvariasikan diameter *micro combustor* dengan *backward facing step* pada rasio diameter D_1/D_2 konstan.

Variabel bebas dalam penelitian meliputi diameter *combustor*, debit bahan bakar (Q_f), dan debit udara (Q_a). Diameter *combustor* divariasikan sebesar $D_1/D_2 = 2.6/3.5$, $D_1/D_2 = 3.5/4.7$ dan $D_1/D_2 = 3.5/3.5$. Kemudian variabel terikatnya adalah *flammability limit*, visualisasi bentuk nyala api dan temperatur nyala api. Variabel yang terakhir adalah variabel terkontrol yaitu perbandingan diameter *combustor* D_1/D_2 sebesar 0,75. Bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini adalah LPG dengan oksidator udara.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar diameter *meso-scale combustor* maka daerah *flammability limit* semakin luas dan temperatur nyala api semakin meningkat. Hal tersebut berhubungan dengan perbandingan antara *heat loss* terhadap *heat generation* yang nilainya semakin kecil. Temperatur tertinggi untuk *combustor* $D_1/D_2 = 3.5/4.7$ pada rasio ekuivalen 1,3 dan kecepatan reaktan 30 cm/s adalah 1367.16 °C dan temperatur terendah adalah 1311.21 °C untuk kecepatan reaktan 20 cm/s. Sedangkan untuk *combustor* $D_1/D_2 = 2.6/3.5$ temperatur tertinggi pada rasio ekuivalen 1,3 dan kecepatan reaktan 25 cm/s adalah 979.35 °C, dan temperatur terendah adalah 806.02 °C dengan kecepatan reaktan 20 cm/s. Bentuk nyala api hasil pembakaran dalam *meso-scale combustor* dengan *backward facing step* berwarna biru dan semakin terang, seiring dengan peningkatan kecepatan reaktan.

Kata Kunci : *Meso-scale combustor*, *backward facing step*, diameter *combustor*, karakteristik pembakaran



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini banyak dikembangkan energi *micro* berbasis *microcombustion* yang disebut *micro power generator* (MPG), yang digunakan sebagai sumber energi pada peralatan listrik portable. MPG terdiri dari dua bagian utama, yaitu *micro* atau *meso-scale combustor* dan modul pengkonversi energi panas menjadi energi listrik. Pilihan tersebut diambil karena bahan bakar hidrokarbon yang biasanya digunakan sebagai bahan bakar pada MPG dan memiliki densitas energi jauh lebih tinggi daripada densitas energi pada baterai. Dengan perbandingan ~40-45 MJ/kg untuk hidrokarbon dan ~1,2 MJ/kg untuk baterai (Li-ion) (Fernandez-Pello, 2002).

Dalam MPG bagian yang penting adalah *meso-scale combustor*. *Meso-scale combustor* yang berfungsi mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi termal. Pembakaran yang berlangsung pada *meso-scale combustor* haruslah stabil dan untuk menjaganya sangatlah tidak mudah, mengingat terbatasnya waktu pembakaran dalam ruang bakar (*fuel residence time*) dan tingginya laju kehilangan kalor (*heat loss*) yang mengakibatkan api pada *combustor* mudah padam. Upaya dalam membentuk kestabilan api dan pembakaran yang stabil pada *meso-scale combustor* adalah dengan meningkatkan *fuel residence time* dan kecepatan reaksi pembakaran serta meminimalkan *heat loss*.

Dalam penelitian yang dilakukan Mikami, *et al* (2013), diamati pengaruh variasi ukuran diameter *combustor* yang berbentuk silinder terhadap kestabilan api dan kecepatan pembakaran (*flame propagation*). Dari penelitian ini didapatkan bahwa semakin kecil ukuran diameter *combustor* maka daerah stabilitas api yang digambarkan pada diagram kecepatan – *equivalen ratio* juga semakin sempit. Hal ini disebabkan kehilangan panas yang lebih tinggi dan keterbatasan waktu nyala api yang tidak memadai yang terkait dengan peningkatan perbandingan luas permukaan terhadap *volume*.

Hasil penelitian Yang, *et al* (2002) menunjukkan bahwa pembakaran stabil dapat terjadi dalam sebuah *combustor* dengan *backward facing step* untuk meningkatkan proses pencampuran udara dan bahan bakar, selain itu untuk memperpanjang waktu tinggal reaktan dalam daerah reaksi pembakaran. *Backward facing step* adalah pembesaran diameter *combustor* D_1 / D_2 , dengan $D_1 < D_2$ dan terletak pada sisi *upstream* (ujung *combustor*). *Meso-scale combustor* dengan *backward facing step* sangat efektif dalam



mengontrol posisi api dan meningkatkan laju aliran dan rasio H_2 / udara serta mampu mensirkulasikan pencampuran reaktan pada pembakaran.

Melihat pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Yang, *et al* pada tahun 2002 dan Mikami pada tahun 2013 di sini dilakukan pengembangan penelitian mengenai pengaruh variasi diameter *combustor* dengan *backward facing step*. Pada penelitian ini dilakukan pengamatan terhadap *flammability limit*, visualisasi bentuk nyala api dan temperatur nyala api pada *meso-scale combustor*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan pada bagian sebelumnya, maka rumusan masalah dari penelitian ini adalah bagaimanakah pengaruh variasi diameter *combustor* dengan *backward facing step* terhadap *flammability limit*, visualisasi bentuk nyala api, dan temperatur nyala api pada *meso-scale combustor*.

1.3 Batasan Masalah

Agar permasalahan dalam penelitian ini tidak meluas maka perlu diberikan batasan-batasan masalah yang meliputi hal-hal berikut ini :

1. Perbandingan diameter *combustor* D_1 / D_2 adalah 0,75.
2. Bahan bakar gas yang digunakan adalah *liquefied petroleum gas* (LPG) dengan asumsi terdiri dari 50% propana dan 50% butana.
3. Udara pembakaran (*oxydizer*) adalah udara atmosfer yang disuplai ke *meso-scale combustor* melalui kompresor dan diasumsikan terdiri dari 79% N_2 dan 21% O_2 .

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana pengaruh variasi diameter *combustor* dengan *backward facing step* terhadap *flammability limit*, visualisasi bentuk nyala api dan temperatur nyala api pada *meso-scale combustor*.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Mahasiswa mampu menganalisa karakteristik pembakaran pada *meso-scale combustor* meliputi temperatur nyala api, visualisasi bentuk nyala api dan *flammability limit*.
2. Mahasiswa dapat mengetahui pengaruh penggunaan *backward facing step* terhadap karakteristik pembakaran bahan bakar gas di dalam *meso-scale combustor*.



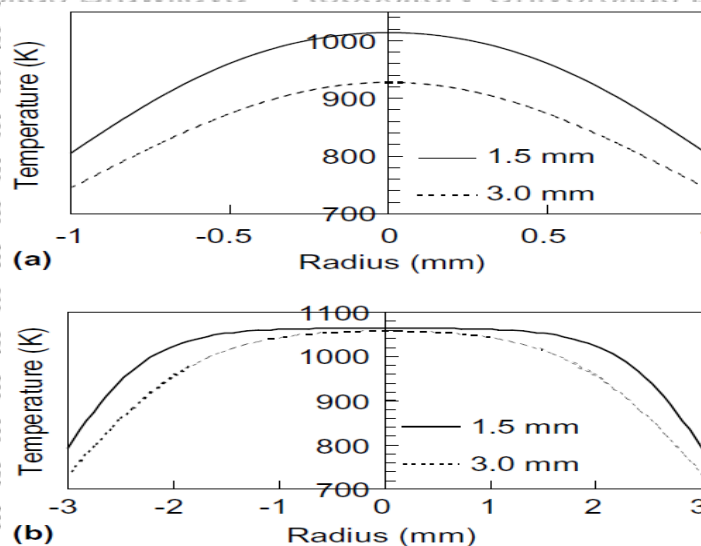
3. Hasil penelitian ini dapat memberikan pengetahuan baru kepada masyarakat mengenai penggunaan bahan bakar gas pada suatu *meso-scale combustor* dengan *backward facing step* serta dapat dijadikan referensi untuk penelitian selanjutnya.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Li, *et al.*, (2005) melakukan penelitian tentang pengaruh variasi ukuran diameter *combustor* yang berbentuk silinder terhadap temperatur. Dari penelitian ini didapatkan bahwa semakin kecil ukuran diameter *combustor* maka temperatur yang dihasilkan rendah yang digambarkan pada diagram temperatur - radius juga semakin menurun. Hal tersebut disebabkan kehilangan panas yang lebih tinggi dan keterbatasan waktu nyala api yang tidak memadai yang terkait dengan peningkatan perbandingan luas permukaan terhadap volume.



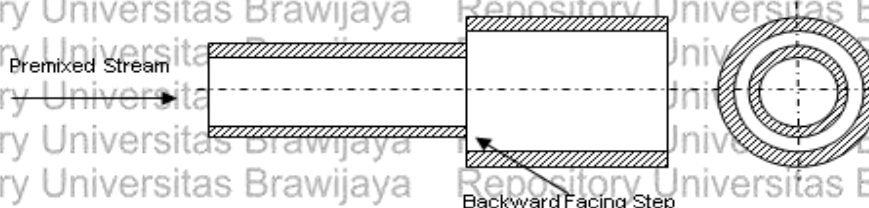
Gambar 2.1 Diagram temperatur pada *meso-scale combustor*, (a) $d=2$ mm, (b) $d=6$ mm
Sumber : (Li, *et al.*, 2005)

Yang, *et al.*, (2002) melakukan penelitian yang difokuskan pada *meso-scale combustor* berbentuk silinder dengan *backward facing step* terhadap kestabilan api. Dari penelitian ini menunjukkan bahwa pembakaran stabil dapat terjadi dalam sebuah *combustor* dengan *backward facing step* untuk meningkatkan proses pencampuran udara dan bahan bakar, selain itu untuk memperpanjang waktu tinggal reaktan dalam daerah reaksi pembakaran. *Backward facing step* adalah pembesaran diameter *combustor* D_1 / D_2 , dengan $D_1 < D_2$ dan terletak pada sisi upstream (ujung *combustor*). *Meso-scale combustor* dengan *backward facing step* sangat efektif dalam mengontrol posisi api dan meningkatkan laju aliran dan rasio H_2 / udara serta mampu mensirkulasikan pencampuran reaktan pada pembakaran.



2.2 Aliran Fluida Pada Saluran Dengan Perubahan Luas Penampang

Permasalahan utama dalam *meso-scale combustor* adalah mendapatkan keseimbangan antara kestabilan api pembakaran dan memaksimalkan *output* panas. Pada *meso-scale combustor* memiliki perbandingan luas permukaan terhadap *volume* yang tinggi sehingga akan meningkatkan *heat losses*, yang mana hal ini menyebabkan pembakaran yang tidak stabil dan dapat memadamkan api. *Residence time* pada *combustor* juga rendah yang menyebabkan kesulitan dalam keberlanjutan pembakaran. Pada penelitian Yang, *et al* pada tahun 2002 menyatakan bahwa *backward facing step* pada *combustor* mampu mensirkulasikan pencampuran reaktan pada pembakaran di area dekat dinding *combustor*, sehingga meningkatkan proses pencampuran pembakaran di sekitar tepi tabung *combustor*, serta membuat pembakaran lebih komplit dan stabil. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa *meso-scale combustor* dengan *backward facing step* sangat efektif untuk aplikasi konversi energi secara langsung dimana temperatur panas dinding tersebut yang diperlukan sebagai sumber panas, seperti pada aplikasi *Thermoelectric Power Generator*.



Gambar 2.2 *Backward facing step*

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

2.3 Proses Pembakaran

Pembakaran adalah reaksi kimia yang cepat antara pengoksidasi (udara atau oksigen) dan bahan yang dapat terbakar, disertai timbulnya cahaya dan menghasilkan kalor. Syarat terjadinya pembakaran adalah ada bahan bakar, pengoksidasi (udara atau oksigen), dan energi aktivasi masing-masing elemen terdapat dalam jumlah tertentu yang memungkinkan terjadinya pembakaran. Berikut ini ilustrasi yang menggambarkan hubungan antara bahan bakar, pengoksidasi dan energi aktivasi.

Dari penjelasan Gambar 2.3 dapat disimpulkan bahwa pembakaran adalah suatu reaksi kimia antara bahan bakar dan pengoksidasi (oksigen atau udara) yang menghasilkan panas dan cahaya.



Gambar 2.3 Ilustrasi proses pembakaran
Sumber : (Wardana, 2008)

2.3.1 Reaksi Kimia dan Proses Pembakaran

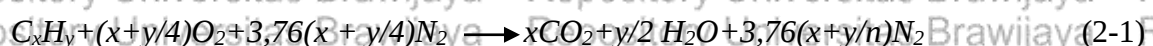
Pembakaran ideal (stoikiometri) disebut pembakaran sempurna, namun pada faktanya pembakaran sempurna sangat sulit terjadi karena kebanyakan reaksi pembakaran yang terjadi menggunakan oksidator (oksigen) dari udara bebas. Kandungan udara bebas tidak hanya oksigen saja, melainkan banyak gas-gas lain yang terkandung di dalamnya. Gas utama udara kering yang bersih, dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Komposisi udara kering

Udara	Proporsi Volume %		Proporsi massa %	
	Aktual	Penggunaan	Aktual	Penggunaan
Nitrogen	78,03	79	75,45	76,8
Oksigen	20,99	21	23,20	23,2
Argon	0,94	0	1,30	0
CO ₂	0,03	0	0,05	0
Gas lainnya	0,01	0	-	0

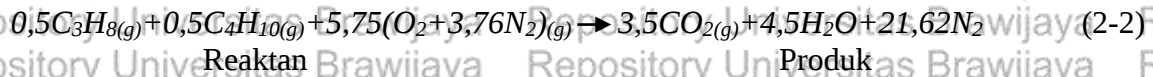
Sumber : Wardana (2008)

Dari tabel 2.1 di atas apabila kandungan gas-gas lain diabaikan karena persentasenya terlalu kecil, maka dapat diasumsikan udara hanya terdiri dari 79% Nitrogen (N₂) dan 21% Oksigen (O₂) saja. Dengan demikian setiap penggunaan 1mol O₂ yang terkandung di udara pada suatu reaksi pembakaran, secara otomatis akan mencakup penggunaan $\left(\frac{79}{21}\right) = 3,76$ mol N₂. Maka reaksi stoikiometrik pembakaran hidrokarbon C_xH_y Dapat di tulis dengan persamaan (2-1):





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



2.3.2 Air fuel Ratio (AFR)

Air fuel Ratio (AFR) adalah rasio perbandingan antara massa atau mol udara dan bahan bakar yang terjadi dalam suatu reaksi. Persamaan AFR pada campuran stoikiometrik dituliskan dalam rumus sebagai berikut.

$$(AFR)_{stoic} = \left(\frac{N_{udara}}{N_{bahan\ bakar}} \right)_{stoic} \quad (2-3)$$

$$(AFR)_{stoic} = \left(\frac{M_{udara}}{M_{bahan\ bakar}} \right)_{stoic} \quad (\text{Wardana, 2008:58-59}) \quad (2-4)$$

Keterangan :

$(AFR)_{stoic}$ = Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi stoikiometrik

N_{udara} = Jumlah mol udara (mol)

$N_{bahan\ bakar}$ = Jumlah mol bahan bakar (mol)

M_{udara} = Massa udara (kg)

$M_{bahan\ bakar}$ = Massa bahan bakar (kg)

Dengan berdasarkan pada persamaan (2-2) tersebut maka dapat dihitung nilai AFR untuk bahan bakar LPG (50% propana dan butana 50%).

➤ Massa atom relatif (Ar)

C = 12 ; H = 1 ; O = 16 ; N = 14

➤ Untuk proses pembakaran stoikiometri, perbandingan antara udara dan bahan bakar berdasarkan jumlah mol dari persamaan (2-4), menjadi :

$$AFR = \frac{N_{udara}}{N_{bahan\ bakar}}$$

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



➤ Perhitungan stoikiometri LPG berdasarkan massa

$$AFR = \frac{M_{udara}}{M_{bahan\ bakar}}$$

$$AFR = \frac{5,75(2 \times 16 + 3,76 \times 14 \times 2)}{(0,5(12 \times 3 + 8)) + 0,5(12 \times 4 + 10)} = \frac{789,36}{51} = 15,47 \frac{\text{kg udara}}{\text{kg bahan bakar}}$$

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

Diketahui :

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

➤ Berdasarkan data yang diketahui di atas maka dengan persamaan $\rho = \frac{m}{v}$ kita dapat menghitung volume menggunakan persamaan $V = \frac{m}{\rho}$.

$$V_{udara} = \frac{m}{\rho} = \frac{789,36}{0,0012} = 657.800 \text{ cm}^3$$

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

➤ Sehingga perbandingan volume antara bahan bakar dan udara dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{array}{lcl} V_{udara} & : & V_{bahan\ bakar} \\ 657.800 \text{ cm}^3 & : & 23.665,89 \text{ cm}^3 \\ 27,57 \text{ mL} & : & 1 \text{ mL} \end{array}$$

2.3.3 Rasio ekuivalen (ϕ)

Rasio ekuivalen dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara rasio udara-bahan bakar (AFR) stoikiometrik dengan rasio bahan bakar dan udara (AFR) aktual, dituliskan dengan persamaan (2-5) :

$$\phi = \frac{(AFR)_{stoic}}{(AFR)_{aktual}} \quad (\text{Wardana, 2008;65}) \quad (2-5)$$

Keterangan :

ϕ = Rasio ekuivalen

AFR_{stoic} = Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi stoikiometrik

AFR_{aktual} = Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi aktual

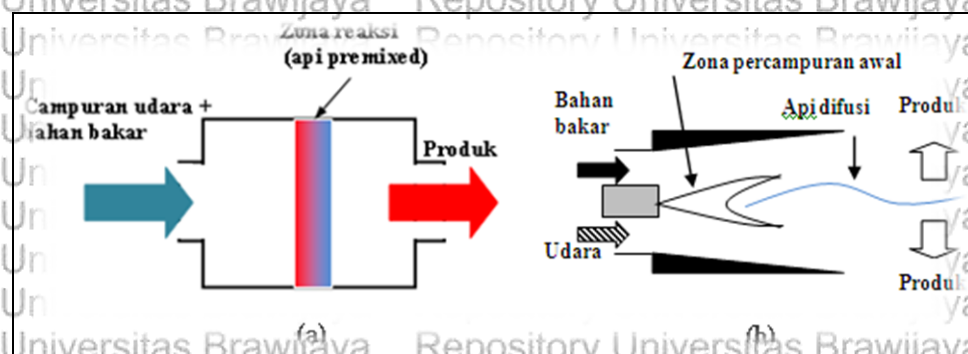


Perhitungan *rasio ekuivalen* berfungsi untuk menentukan jenis campuran udara dan bahan bakar yang terjadi pada reaksi pembakaran. Jenis campuran udara dan bahan bakar diklasifikasikan menjadi tiga jenis tergantung dari nilai *rasio ekuivalennya*, ketiga jenis tersebut antara lain :

- $\Phi > 1$ terdapat kelebihan bahan bakar dan campurannya disebut sebagai campuran kaya bahan bakar (*fuel-rich mixture*)
- $\Phi < 1$ campurannya disebut sebagai campuran miskin bahan bakar (*fuel-lean mixture*).
- $\Phi = 1$ merupakan campuran stoikiometri.

2.4 Klasifikasi Pembakaran

Proses pembakaran apabila diklasifikasikan menurut cara reaktan terbakar di zona reaksi dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu pembakaran *premixed* dan pembakaran difusi. Pembakaran *premixed* merupakan proses pembakaran dimana udara dan bahan bakar bercampur terlebih dahulu secara mekanik sebelum dibangkitkan reaksinya oleh energi aktivasi (Gambar 2.4). Sebaliknya pada pembakaran difusi bahan bakar dialirkan ke ruang yang dipenuhi udara, pada saat yang bersamaan diberikan energi aktivasi untuk mengaktifkan reaksi, sehingga proses pembakaran berlangsung bersamaan dengan pencampuran udara dan bahan bakar (Gambar 2.4). Pada penelitian ini proses pembakaran yang digunakan pada *meso-scale combustor* adalah pembakaran *premixed*.



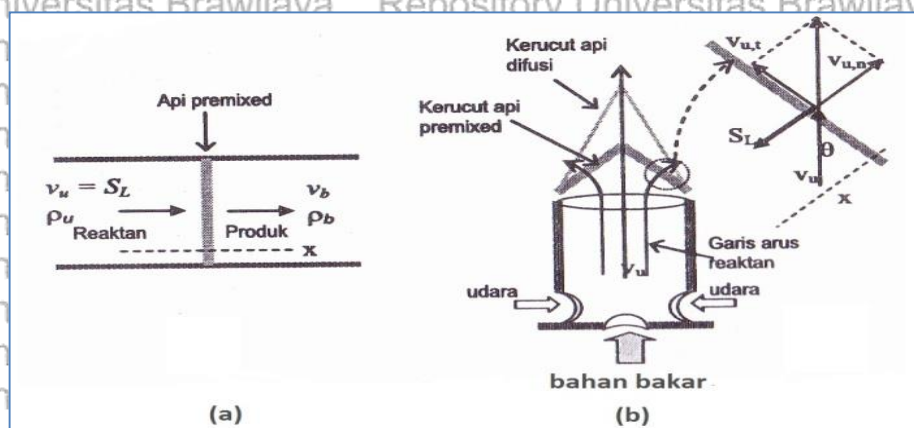
Gambar 2.4 Klasifikasi pembakaran (a) Pembakaran *Premixed*, (b) Pembakaran difusi
Sumber: Wardana (2008:149)

2.4.1 Pembakaran *Premixed*

Nyala api *premixed* terjadi jika bahan bakar dan oksidator sudah tercampur sebelum masuk ke dalam daerah reaksi, sedangkan nyala api difusi terbentuk karena bahan bakar dan oksidator saat memasuki daerah reaksi belum tercampur. Api *premixed* sendiri



sebenarnya dibagi lagi menjadi dua jenis menurut jenis alirannya yaitu api *premixed* laminar dan api *premixed* turbulen. Misalnya pada mesin pembakaran dalam. Bentuk api *premixed* laminar yang paling khas adalah api bunsen dan api yang merambat di dalam tabung *combustor*. Kedua jenis api *premixed* laminar tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 (a) Pembakaran *premixed* pada tube (b) Pembakaran bunsen
Sumber : Wardana, 2008

Bentuk api *premixed* laminar yang merambat di dalam tabung *combustor* berbentuk lembar datar tipis dan merambat tegak lurus ke arah reaktan. Sedangkan pada api bunsen, api *premixed* berbentuk kerucut dengan dinding kerucut merupakan permukaan api (Wardana, 2008).

Pada gambar 2.5 (a) di atas dapat dilihat bahwa vektor kecepatan rambatan api *premixed* (S_L) di dalam tabung sejajar dengan vektor kecepatan reaktan (V_u) dan vektor kecepatan produk (V_b). Sedangkan untuk api *premixed* bunsen, garis arus reaktan membelok ke dekat api akibat perubahan densitas gas dan mengalir ke luar tegak lurus dengan permukaan api. Penurunan densitas gas yang terjadi sekitar 10 kali lebih rendah akibat kenaikan suhu yang cukup signifikan. Karena sifat fluida yang cenderung mengalir dari densitas tinggi ke rendah maka gas akan berbelok menuju api secara tegak lurus. Penguraian vektor pada api *premixed* bunsen dapat dilihat pada gambar 2.5 (b).

Keuntungan dari pembakaran *premixed* adalah efisiensinya yang lebih tinggi dari pembakaran difusi. Hal ini dikarenakan reaktan telah bercampur terlebih dahulu dengan udara sebelum memasuki daerah reaksi, sehingga perbandingan bahan bakar dan udara bisa diatur sampai titik stoikiometrinya. Seperti yang telah diketahui pembakaran pada kondisi stoikiometri membuat bahan bakar bereaksi seluruhnya sehingga tidak ada bahan bakar yang terbentuk pada produk hasil pembakaran.



2.4.2 Flammability limit dan Kestabilan api

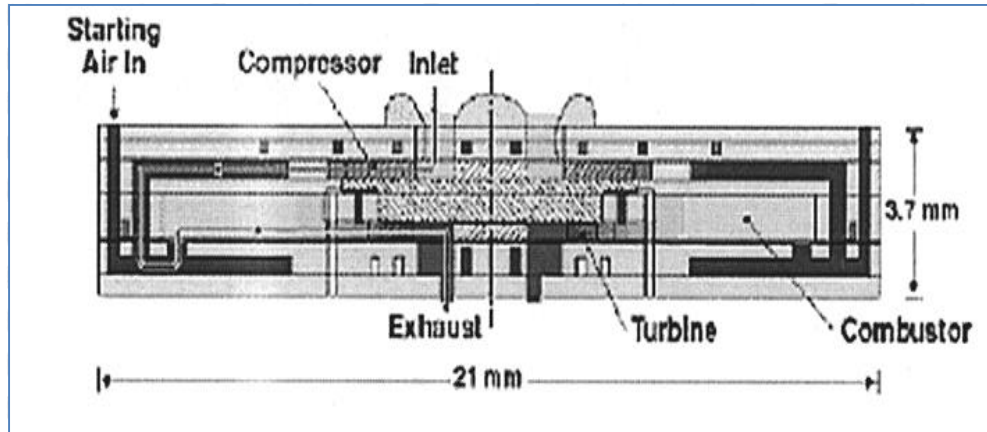
Dalam proses pembakaran terdapat kisaran campuran bahan bakar dan oksidator yang menyebabkan terjadinya nyala api. Kisaran (*flammability range*) dibatasi oleh batas bawah mampu nyala dan batas atas mampu nyala atau yang lebih dikenal sebagai *lower flammability limit* (LFL) dan *upper flammability limit*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

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

2.5 Micro power generator dan Micro/Meso-scale combustor

Micro power generator adalah sumber energi berskala *micro* yang memanfaatkan prinsip pembakaran dalam pembangkitan energinya. Dengan adanya *Micro power generator* diharapkan ketergantungan peralatan *micro* pada sumber energi baterai dapat dikurangi. *Micro power generator* sendiri pada dasarnya terbagi menjadi dua jenis. Diantaranya adalah *micro power generator* yang menggunakan siklus daya konvensional dan *micro power generator* dengan menggunakan modul pengkonversi energi termal menjadi energi listrik (*thermophotovoltaic* atau *thermoelectric*). Perbedaan kedua *micro power generator* ini terletak dari prinsip kerja pembangkitan energi listriknya. Untuk

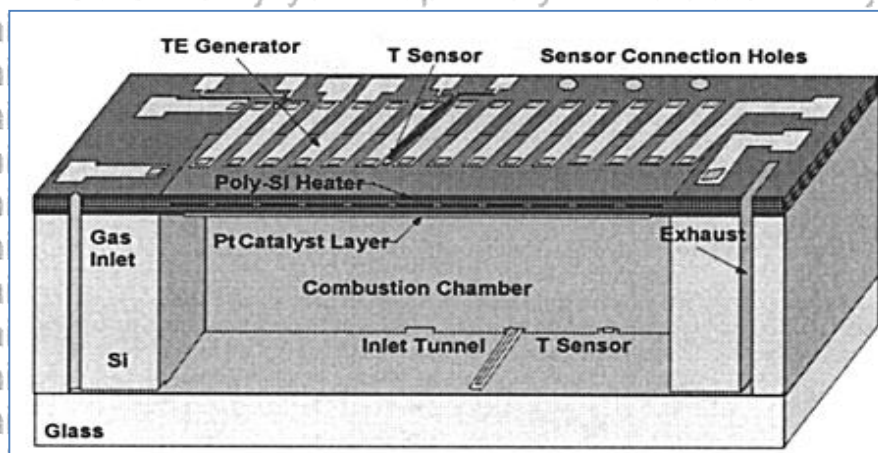
micro power generator yang menggunakan siklus daya konvensional prinsip kerjanya hampir sama dengan prinsip kerja turbin gas yaitu dengan memanfaatkan pembakaran untuk memutar turbin yang berskala *micro*.



Gambar 2.6 *Micro power generator* dengan siklus daya konvensional

Sumber : Fernandez-Pello, et al, 2002

Sedangkan *micro power generator* dengan menggunakan *thermophotovoltaic* (TPV) prinsip kerjanya hampir sama dengan prinsip kerja *thermo electric* pada umumnya. Bedanya sumber energi termal pada *micro power generator* jenis ini bukan berasal dari sinar matahari melainkan dari proses pembakaran berskala *micro*.



Gambar 2.7 *Micro power generator* dengan prinsip *thermoelectric*

Sumber : Fernandez-Pello, et al, 2002.

Micro combustor terbagi menjadi berbagai macam jenis dan ukuran yang ada. Namun secara garis besar *micro combustor* diklasifikasikan secara sederhana menjadi dua golongan yaitu *micro-scale combustor* dan *meso-scale combustor*. Pengklasifikasian



tersebut berdasarkan besarnya celah pada ruang bakar. Untuk *micro-scale combustor* celah ruang bakar memiliki ukuran kurang dari 1 mm. Sedangkan untuk *meso-scale combustor* memiliki ukuran lebih dari 1 mm, namun karakteristik pembakaran masih menyerupai *micro combustion* (Maruta, 2011).

Dalam penelitian ini *combustor* yang digunakan adalah *meso-scale combustor*. Pada *meso-scale combustor* pembakaran yang stabil sangat sulit dicapai karena perbandingan luas permukaan terhadap *volume* sangatlah besar (*surface to volume ratio*) pada ruang bakar, sehingga *heat-loss* yang terjadi juga semakin tinggi. Hal ini dapat menyebabkan api padam karena panas yang terjadi dari pembakaran sebelumnya tidak cukup untuk menjadi energi aktivasi bagi pembakaran selanjutnya.

Sejauh ini bahan bakar yang umum digunakan pada *meso-scale combustor* adalah bahan bakar gas, karena gas mudah diatur debit bahan bakarnya serta mudah tercampur dengan udara.

2.6 *Liquified Petroleum Gas (LPG)*

Liquified Petroleum Gas (LPG) adalah bahan bakar gas yang dicairkan dan dihasilkan dari pengolahan minyak bumi. 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 (sisir pembakaran).
- Perbandingan komposisi, propana (C_3H_8) : butana (C_4H_{10}) = 50 : 50.
- Cara penggunaannya cukup mudah dan praktis.

2.7 Hipotesis

Pembakaran pada *meso-scale combustor* dengan *backward facing step* dengan variasi diameter, semakin besar diameter *meso-scale combustor* maka perbandingan *heat loss* terhadap *heat generation* semakin kecil, daerah *flammability limit* semakin tinggi dan temperatur semakin meningkat.



BAB III

METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini metode yang digunakan adalah metode eksperimental (*experimental research*) dimana dilakukan pengamatan secara langsung pada objek yang diteliti. Dari data-data hasil penelitian, nantinya dapat dibandingkan dan diambil suatu kesimpulan.

3.1 Tempat dan Waktu Pelaksanaan

Proses penelitian dilakukan sejak bulan April 2015 sampai dengan selesai, bertempat di Laboratorium Mesin - mesin Fluida Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

3.2 Variabel Penelitian

Variabel - variabel yang digunakan pada penelitian ini dibagi menjadi 3 jenis yaitu variabel bebas, variabel terikat dan variabel kontrol.

1. Variabel bebas (*Independent variable*)

Variabel bebas adalah variabel yang besarnya ditentukan sendiri oleh peneliti dan tidak di pengaruhi oleh variabel lain. Pada penelitian ini variabel yang divariasikan sebagai variabel bebas adalah :

- Diameter *combustor*, nilai D_1 / D_2 divariasikan sebesar 1 dan 0,75. Sehingga diperoleh *combustor* dengan D_1 / D_2 sebesar 3,5/3,5 2,6/3,5 dan 3,5/4,7 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1. Untuk nilai $D_1 / D_2 = 0,75$ ukuran diameter *combustor* yang seharusnya adalah 2,62/3,5 dan 3,5/4,66. Karena keterbatasan mata bor yang tersedia diameter *combustor* dibulatkan menjadi 2,6/3,5 dan 3,5/4,7.
- Debit bahan bakar (Q_f)
- Debit udara (Q_a)

2. Variabel terikat (*dependent variable*)

Variabel terikat merupakan variabel yang nilainya tergantung pada variasi variabel bebas, pada penelitian ini yang berperan sebagai variabel terikat antara lain :

- Batas stabilitas nyala api (*flammability limit*)

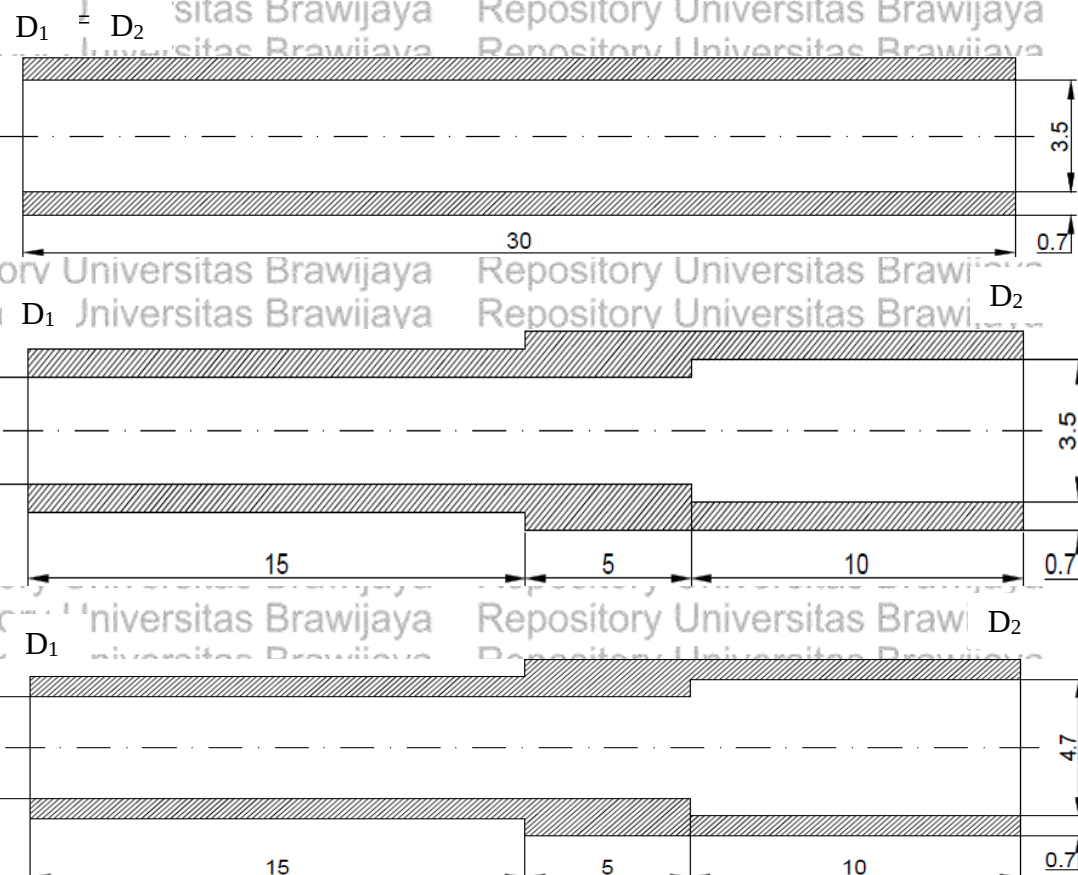


- Visualisasi bentuk nyala api
- Temperatur nyala api

3. Variabel kontrol (*control variable*)

Variabel kontrol merupakan variabel yang nilainya dijaga konstan selama proses penelitian. Berikut adalah variabel kontrol yang nilainya dijaga tetap selama proses penelitian:

- Perbandingan diameter *combustor* D_1 / D_2 adalah 0,75



Gambar 3.1 Variasi diameter *combustor* tipe 1, 2, dan 3 dengan *backward facing step* (satuan mm)

3.3 Peralatan Penelitian

1. Meso-scale combustor dengan *backward facing step*

Meso-scale combustor merupakan alat utama yang digunakan pada penelitian ini. Material yang digunakan adalah tembaga dengan *backward facing step* dan variasi diameter dalam inlet 2,6, 3,5 mm dan panjang 30 mm. Meso-scale combustor secara detail yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.1.



2. LPG

Liquified petroleum gas (LPG) berfungsi sebagai bahan bakar *burner*, Kandungan utama dari *LPG* adalah propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}) dengan rasio perbandingan (50 : 50).

3. Combustor holder

Digunakan sebagai penyangga *meso-scale combustor*



Gambar 3.2 *Combustor holder*

4. Kompresor

Kompresor merupakan penyuplai udara pembakaran (*oxidizer*) pada *meso-scale combustor*, udara yang digunakan adalah udara bebas (*ambient air*).

5. Flowmeter

Digunakan untuk mengukur debit bahan bakar (*LPG*) dan debit udara yang masuk pada *meso-scale combustor*.



Gambar 3.3 *Flowmeter*

Spesifikasi:

Flowmeter udara

Merk

: Kofloc

Series

: RK-1250



Jenis : *Flowmeter* udara

Tekanan kerja : 0,1 Mpa

Maximum flow : 500 ml/min

Minimum flow : 50 ml/min

Skala terkecil : 5 ml/min

Flowmeter Bahan bakar

Merk : Kofloc

Series : RK-1250

Jenis : *Flowmeter* propana (C_3H_8)

Tekanan kerja : 0,1 Mpa

Maximum flow : 20 ml/min

Minimum flow : 2 ml/min

Skala terkecil : 0,5 ml/min

6. *Pisco tube* dan *Y connector*

Pisco tube berfungsi sebagai saluran pengalir udara dan bahan bakar, warna putih digunakan untuk udara dan warna merah untuk bahan bakar (LPG). Sedangkan *Y connector* berfungsi untuk percabangan yang mempertemukan udara dan bahan bakar.



Gambar 3.4 *Pisco tube* dan *Y connector*

7. Regulator LPG

Digunakan untuk mengalirkan bahan bakar keluar dari tabung LPG.

8. Pemantik (*ignitor*)

Alat ini berfungsi sebagai penyalan awal pada *meso scale combustor*.

9. *Thermocouple*

Thermocouple adalah sensor yang digunakan untuk mengukur temperatur nyala api pada *meso scale combustor*.

10. Data logger

Alat ini digunakan untuk menerima data temperatur nyala api pada *meso-scale combustor*.

11. Laptop

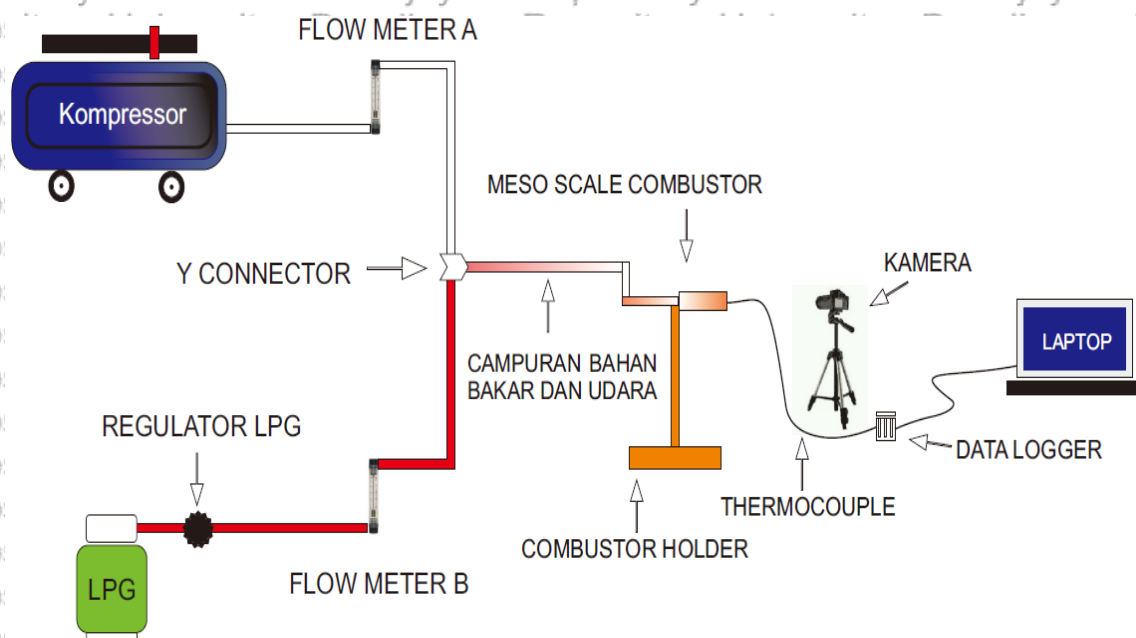
Alat ini digunakan untuk mengolah data hasil penelitian.

12. Kamera

Alat untuk mengambil gambar visualisasi bentuk nyala api.

3.4 Skema Instalasi Penelitian

Rangkaian peralatan penelitian dapat digambarkan dalam skema seperti Gambar 3.5 dibawah ini :



Gambar 3.5 Skema instalasi alat penelitian

Dari skema diatas ditunjukkan rangkaian alat penelitian *meso-scale combustor*, dimana terdapat tabung udara sebagai *oxydyzer* disuplai ke *combustor* melalui kompresor dan tabung bahan bakar (LPG) yang dialirkan ke *combustor* melalui selang yang di atur debitnya dengan *flowmeter*. Pencampuran udara dan bahan bakar terjadi pada *Y connector*. Untuk pengambilan data temperatur nyala api pada *meso-scale combustor* menggunakan rangkaian *thermocouple*, rangkaian tersebut terdiri dari *thermocouple*, *data logger* dan laptop. *Data logger* berfungsi untuk mengolah data mentah temperatur yang



terbaca oleh *thermocouple* agar dapat ditampilkan pada layar laptop. Sedangkan kamera pada skema tersebut berfungsi sebagai pengambilan gambar visualisasi bentuk nyala api.

3.5 Metode Pengambilan Data

Urutan langkah - langkah untuk pengambilan data pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan *meso-scale combustor* dan memastikan tidak ada cacat fisik pada *meso-scale combustor*.
2. Mengkalibrasi *flowmeter* bahan bakar yang akan digunakan.
3. Melakukan *setting* peralatan sesuai dengan skema pada Gambar 3.5
4. Membuka katup pada regulator LPG dan katup pada kompresor.
5. Mengatur debit LPG dan udara yang memasuki *meso-scale combustor* menggunakan *flowmeter*.
6. Menyalakan api pada *combustor* dengan pemantik pada ujung *meso-scale combustor* serta mengatur debit LPG dan udara menggunakan *flowmeter*.
7. Untuk pengambilan data *flammability limit* diamati apakah api bisa menyala stabil lebih dari 3 menit atau tidak.
8. Catat nilai - nilai debit udara dan bahan bakar ketika api pada *meso-scale combustor* mampu menyala dengan stabil selama 3 menit atau lebih.
9. Untuk pengambilan data temperatur nyala api pada *meso-scale combustor* tempelkan *thermocouple* pada *meso-scale combustor* yang terhubung dengan data *logger* dan baca data yang ditampilkan pada laptop.
10. Untuk pengambilan gambar visualisasi bentuk nyala api dilakukan menggunakan kamera. Sudut pengambilan dari *exit combustor*.

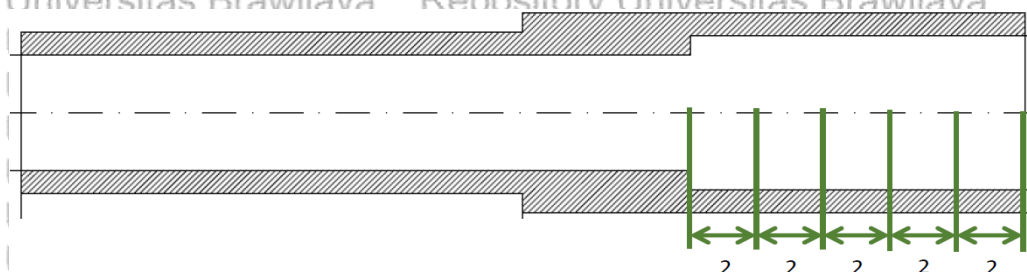
3.6 Pengambilan Dan Pengolahan Data

Urutan langkah - langkah untuk pengambilan data pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan *meso-scale combustor* dan memastikan tidak ada cacat fisik pada *meso-scale combustor*.
2. Mengkalibrasi *flowmeter* bahan bakar yang akan digunakan.
3. Melakukan *setting* peralatan sesuai dengan skema pada Gambar 3.5
4. Penelitian ini dimulai dengan pengambilan data *flammability limit*
5. Mengatur debit bahan bakar (LPG) dan udara yang memasuki *combustor*.



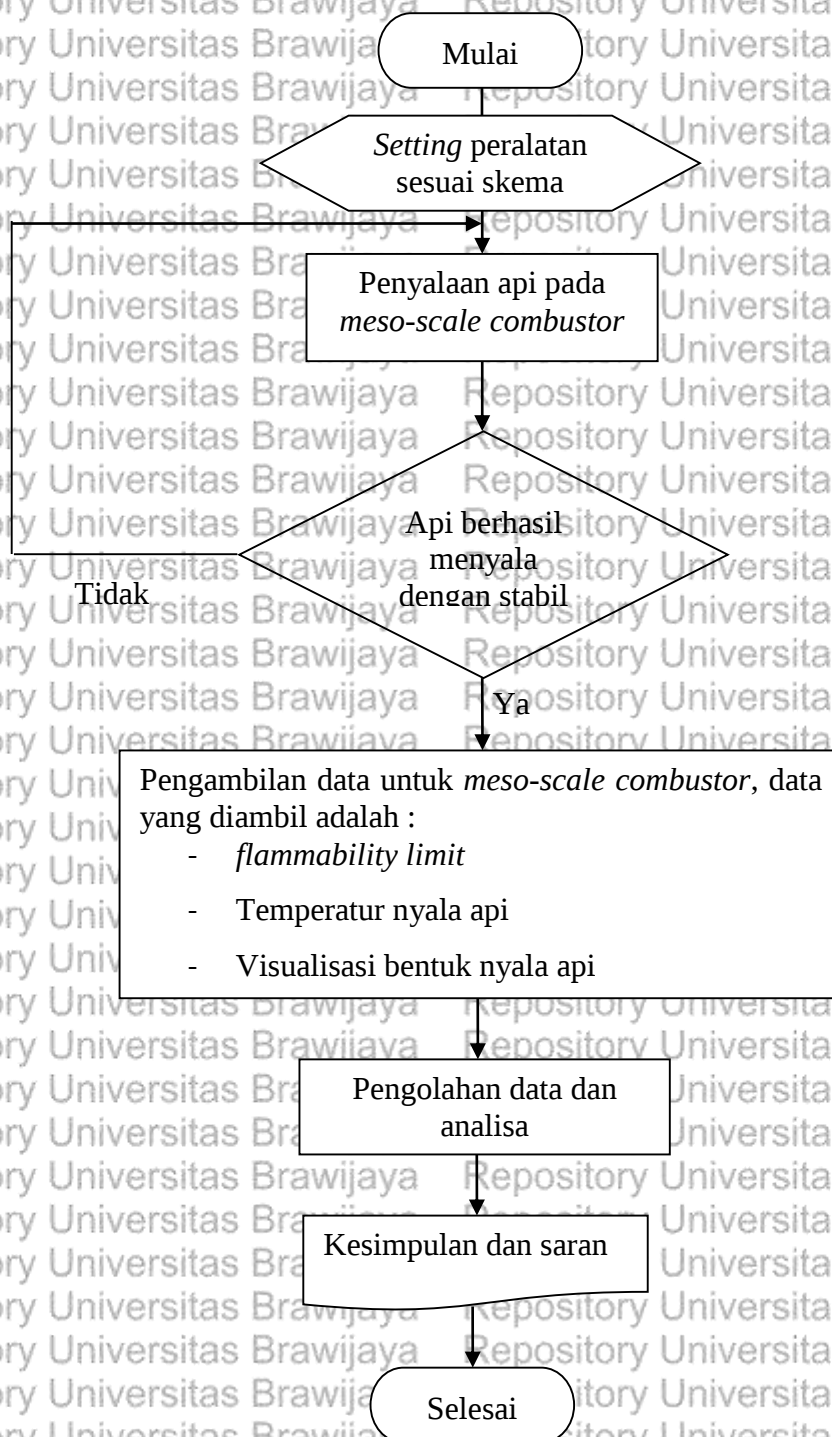
6. Pengaturan debit bahan bakar menggunakan *flowmeter* bahan bakar, sedangkan pengaturan debit udara menggunakan *flowmeter* udara.
7. Menyalakan api pada *combustor* dengan pemantik yang diposisikan pada *exit combustor*.
8. Debit bahan bakar LPG dijaga konstan, kemudian debit udara divariasikan sampai menemukan debit udara minimum dan maksimum.
9. Langkah tersebut dilakukan untuk berbagai debit bahan bakar LPG.
10. Pengambilan data dilakukan pada campuran debit bahan bakar LPG dan udara dimana api dapat menyala stabil selama 3 menit atau lebih.
11. Pengambilan data visualisasi bentuk nyala api dan temperatur nyala api dilakukan dengan parameter penentuan titik dimana masih berada dalam daerah *flammability limit*.
10. Pengambilan data visualisasi bentuk nyala api dan temperatur nyala api, terdapat 2 buah variasi yaitu pada *rasio ekuivalen* konstan dengan variasi kecepatan reaktan dan kecepatan reaktan konstan dengan variasi *rasio ekuivalen*.
11. Pengambilan data visualisasi bentuk nyala api dilakukan dengan jarak ± 30 cm dari depan *exit combustor* dengan menggunakan kamera NIKON D5200 berlensa makro.
12. Pengambilan data temperatur nyala api dilakukan dengan *thermocouple* yang terhubung dengan data *logger* dan laptop. *Thermocouple* yang digunakan adalah tipe R.
13. Pengambilan data temperatur nyala api pada *meso-scale combustor* diambil 6 titik arah aksial dari *exit combustor*.
14. Posisi pengambilan temperature ditunjukkan seperti pada gambar 3.6



Gambar 3.6 Titik pengukuran temperatur nyala api



3.7 Diagram Alir penelitian



Gambar 3.7 Diagram alir penelitian



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

Data hasil penelitian didapat dari penelitian eksperimental terhadap *meso-scale combustor* dengan *backward facing step*. Pengambilan data yang dilakukan antara lain adalah data *flammability limit*, visualisasi bentuk nyala api, dan temperatur nyala api.

Untuk data *flammability limit*, data yang diambil merupakan nilai debit udara dan debit bahan bakar yang divariasikan dimana dapat nyala dengan stabil api di dalam *meso-scale combustor*. Pada pengambilan data, debit bahan bakar (Q_f) dijaga konstan sedangkan nilai debit udara (Q_a) divariasikan hingga mencapai nilai minimum dan maksimum dimana api menyala dalam *combustor* di dekat *backward facing step*.

Selanjutnya data hasil penelitian *flammability limit* dalam *meso-scale combustor* dengan *backward facing step* dibentuk menjadi Tabel sebagai berikut.

A. Diameter *Meso-scale combustor* : 3,5/4,7

Tabel 4.1 Pengambilan data *flammability limit* untuk debit bahan bakar konstan

Q_f (mL/min)	Q_a min (mL/min)	Q_a max (mL/min)
2	150	160
2.5	170	203
3	185	238
3.5	195	263
4	213	285
4.5	235	298
5	260	313
5.5	290	330
6	320	340



B. Diameter Meso-scale combustor : 2,6/3,5

Tabel 4.2 Pengambilan data *flammability limit* untuk debit bahan bakar konstan

Q_f (mL/min)	$Q_{a \text{ min}}$ (mL/min)	$Q_{a \text{ max}}$ (mL/min)
2	112	123
2.3	123	143
2.5	133	155
2.8	148	165

C. Diameter Meso-scale combustor : 3,5/3,5

Tabel 4.3 Pengambilan data *flammability limit* pada *exit combustor* untuk debit bahan bakar konstan

Q_f (mL/min)	$Q_{a \text{ flashback}}$ (mL/min)	$Q_{a \text{ blow off}}$ (mL/min)
0.5	110	115
1	125	135
1.5	135	155
2	120	170
2.5	130	205
3	140	240
3.5	125	275
4	110	305
4.5		335
5		360
5.5		385
6		410
6.5		435
7		460
7.5		490
8		520

Untuk setiap nilai debit bahan bakar (Q_f) pada tabel diatas perlu dilakukan kalibrasi *flowmeter* bahan bakar. *Flowmeter* yang digunakan untuk debit bahan bakar (LPG) menggunakan *flowmeter* C_3H_8 sehingga perlu dilakukan kalibrasi. Kalibrasi dilakukan

untuk mengetahui hubungan antara debit yang terbaca dan debit aktual. Proses kalibrasi *flowmeter* bahan bakar (LPG), diawali dengan mengisi penuh air bak penampung dan gelas ukur. Gelas ukur yang sudah terisi air diposisikan terbalik, selanjutnya mengalirkan bahan bakar dari tabung LPG dengan mengatur debit bahan bakar (LPG) menggunakan *flowmeter* yang terhubung dengan selang. Ujung selang yang dialiri bahan bakar (LPG) tersebut dimasukkan kedalam gelas ukur sampai batas permukaan air dalam gelas ukur. *Volume* air pada gelas ukur akan terus berkurang, seiring hal tersebut posisi gelas ukur ditarik ke atas, sehingga permukaan air didalam gelas ukur dan diluar gelas ukur dijaga tetap sama. Perbedaan *volume* air pada gelas ukur yang semakin berkurang yang terlihat diukur gelas ukur akan dicatat setiap beberapa penurunan garis dengan waktu 1 menit. Data kalibrasi *flowmeter* bahan bakar (LPG) dapat dilihat pada Tabel 4.4 berikut.

Tabel 4.4 Data kalibrasi *flowmeter* bahan bakar (LPG)

Waktu (detik)	Q _f Terukur (mL/min)	Q _f Aktual (mL/min)
60	2	5.667
60	4	11.83
60	6	17.5
60	8	22.67
60	10	28.67
60	12	35
60	14	41.67
60	16	48
60	18	53.67
60	20	58.33

Setelah didapat nilai Q_f Aktual untuk masing - masing debit bahan bakar selanjutnya nilai - nilai tersebut di plot pada grafik menggunakan aplikasi *microsoft excel* 2013 sehingga membentuk Grafik 4.1 berikut.

Dari Grafik ditarik *Trendline* dan didapat persamaan linear konversi Q_f terukur menjadi Q_f aktual. Persamaannya adalah :

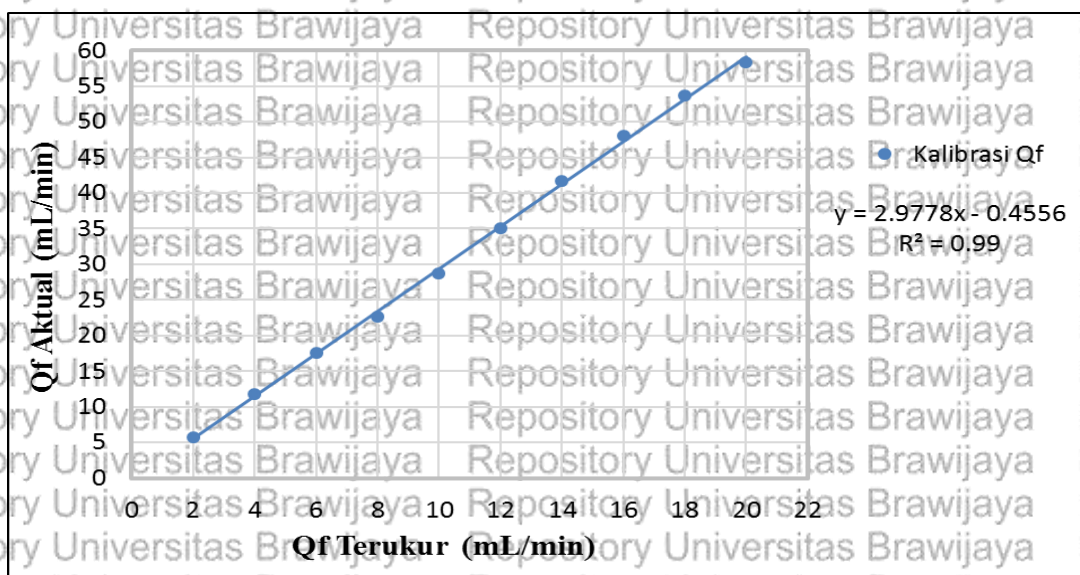


$$y = 2,9778x + 0,4556$$

(4-1)

Dimana:

- $y = Q_f$ aktual
- $x = Q_f$ terbaca
- $R^2 =$ Koefisien determinasi = 0,999



Gambar 4.1 Grafik kalibrasi nilai debit bahan bakar (Q_f)

R^2 merupakan koefisien determinasi yang berfungsi untuk mengukur keakuratan suatu persamaan regresi dengan cara memberikan proporsi atau persentase yang terletak antara 0 – 1. Keakuratan suatu persamaan regresi dikatakan semakin akurat apabila nilai R^2 semakin mendekati 1. Setelah didapat persamaan (4-1) seluruh nilai Q_f pada Tabel 4.1-4.3 dikonversi menggunakan persamaan tersebut. Kemudian hasil konversinya dituliskan pada Tabel berikut.

A: Diameter Meso-scale combustor : 2,6/3,5

Tabel 4.5 Data *flammability limit* untuk debit bahan bakar konstan (Setelah konversi)

Q_f (mL/min)	Q_a min (mL/min)	Q_a max (mL/min)
5.50	112	123
6.39	123	143
6.99	133	155
7.88	148	165



B. Diameter Meso-scale combustor : 3,5/4,7

Tabel 4.6 Data *flammability limit* untuk debit bahan bakar konstan (Setelah konversi)

Q_f (mL/min)	$Q_{a\ min}$ (mL/min)	$Q_{a\ max}$ (mL/min)
5.50	150	160
6.99	170	203
8.48	185	238
9.97	195	263
11.46	213	285
12.94	235	298
14.43	260	313
15.92	290	330
17.41	320	340

B. Diameter Meso-scale combustor : 3,5/3,5

Tabel 4.7 Data *flammability limit* pada *exit combustor* bahan bakar konstan (Setelah konversi)

Q_f (mL/min)	$Q_{a\ flashback}$ (mL/min)	$Q_{a\ blow\ off}$ (mL/min)
1.03	110	115
2.52	125	135
4.01	135	155
5.50	120	170
6.99	130	205
8.48	140	240
9.97	125	275
11.46	110	305
12.94		335
14.43		360
15.92		385
17.41		410
18.90		435
20.39		460
21.88		490
23.37		520

4.2 Pengolahan Data *Flammability limit*

Dalam grafik *flammability limit* batas - batas kestabilan nyala api ditentukan dari batas *rasio ekuivalen* (Φ). Batas tersebut dibagi menjadi dua yaitu batas atas (*upper limit*) dan batas bawah (*lower limit*).

Untuk melakukan perhitungan *rasio ekuivalen* sebelumnya harus dilakukan perhitungan *rasio* udara dan bahan bakar (*AFR*) stoikiometri terlebih dahulu. *AFR* stoikiometri sendiri adalah *rasio* campuran udara dan bahan bakar pada kondisi dimana setiap molekul bahan bakar bereaksi seluruhnya dengan molekul *oxydizer* (udara). Setelah didapat nilai *AFR* stoikiometri untuk LPG yang terdiri dari 50% propana dan 50% butana, selanjutnya dapat dilakukan perhitungan *rasio ekuivalen* (Φ). Rumus perhitungan Φ menggunakan rumus (2-5) berikut ini.

$$\Phi = \frac{(AFR)_{stoic}}{(AFR)_{aktual}}$$

Keterangan :

- Φ = *Rasio ekuivalen*
- AFR_{stoic} = *Rasio* udara dan bahan bakar dalam kondisi stoikiometrik
- AFR_{aktual} = *Rasio* udara dan bahan bakar dalam kondisi aktual

Untuk menghitung nilai *AFR* aktual dapat dicari dengan menggunakan data aktual perbandingan debit udara dan bahan bakar. Data yang digunakan berdasarkan pada Tabel 4.3. Sebagai contoh berikut perhitungan *rasio ekuivalen* salah satu data dari masing - masing tabel diatas.

4.2.1 Perhitungan *Rasio ekuivalen* (Φ)

diketahui dari data pada Tabel 4.3 kolom nomor 1

- $AFR_{stoic} = 27,37$
- $Q_{f \text{ constant}} = 5.50 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ min}} = 150 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \text{ max}} = 160 \text{ ml/min}$

- *Rasio ekuivalen* (Φ)

Perhitungan *rasio ekuivalen* (Φ) menggunakan penurunan rumus *rasio ekuivalen* (2-5) berdasarkan Tabel 4.5 sehingga didapat rumus (4-2) untuk menghitung *lower limit* (Φ_{lower}) dan rumus (4-3) untuk menghitung *upper limit* (Φ_{upper}).



$$a. \Phi_{lower} = \frac{Q_{bb_{act}} \times AFR_{stoic}}{Q_{udara_{act}}} \quad (4-2)$$

$$\Phi_{lower} = \frac{5.50 \text{ ml/min} \times 27,37}{150 \text{ ml/min}}$$

$$\Phi_{lower} = 0,94$$

$$b. \Phi_{upper} = \frac{Q_{bb_{act}} \times AFR_{stoic}}{Q_{udara_{act}}} \quad (4-3)$$

$$\Phi_{upper} = \frac{5.50 \text{ ml/min} \times 27,37}{160 \text{ ml/min}}$$

$$\Phi_{upper} = 1$$

Pengolahan data yang dilakukan selanjutnya adalah menghitung kecepatan aliran total reaktan didalam *meso-scale combustor*. Perhitungan kecepatan reaktan (V_{total}) dilakukan berdasarkan debit total aliran reaktan yang mengalir didalam *combustor*.

Berikut adalah perhitungan kecepatan total reaktan berdasarkan pada data debit di Tabel

4.5.

4.2.2 Perhitungan Kecepatan Reaktan (V_{tot})

Diketahui dari data Tabel 4.5 kolom nomor 1

- $Q_f = 5.50 \text{ ml/min}$
- $Q_a \text{ min} = 150 \text{ ml/min}$
- $Q_a \text{ max} = 160 \text{ ml/min}$
- $\emptyset$ dalam *combustor* = 4,7 mm ; r = 2,35 mm

- Kecepatan reaktan minimum ($V_{total(min)}$)

$$V_{total(min)} = \frac{\left(\frac{Q_a(min) + Q_f}{60} \right)}{\frac{(3,16 \times r^2)}{100}}$$

$$V_{total(min)} = \frac{\left(\frac{150 \text{ ml/min} + 5.50 \text{ ml/min}}{60 \text{ s}} \right)}{\frac{(3,16 \times 2,35^2)}{100} \text{ cm}^2}$$

$$V_{total(min)} = 14.94 \text{ cm/s}$$

- Kecepatan reaktan maksimum ($V_{total(max)}$)

$$V_{total(max)} = \frac{\left(\frac{Q_a(min) + Q_f}{60} \right)}{\frac{(3,16 \times r^2)}{100}}$$

$$V_{total(max)} = \frac{\left(\frac{160 \text{ ml/min} + 5.50 \text{ ml/min}}{60 \text{ s}} \right)}{\frac{(3,16 \times 2,35^2)}{100} \text{ cm}^2}$$

$$V_{total(max)} = 15.91 \text{ cm/s}$$

Keseluruhan perhitungan diatas diterapkan ke masing masing data pada Tabel 4.5 sampai Tabel 4.7 Hasil keseluruhan perhitungan tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.8 sampai Tabel 4.10 dibawah ini.

A. Diameter Meso-scale combustor : 3,5/4,7

Tabel 4.8 Hasil pengolahan data *flammability limit* untuk bahan bakar konstan

No	Q_f (mL/min)	Q_f kalibrasi (mL/min)	$Q_{a\ min}$ (mL/min)	$Q_{a\ max}$ (mL/min)	ϕ_{lower}	ϕ_{upper}	$V_{reaktan\ min}$ (cm/s)	$V_{reaktan\ max}$ (cm/s)
1	2	5.50	150	160	0.94	1.00	14.95	15.91
2	2.5	6.99	170	203	0.94	1.13	17.01	20.18
3	3	8.48	185	238	0.97	1.25	18.60	23.69
4	3.5	9.97	195	263	1.04	1.40	19.70	26.24
5	4	11.46	213	285	1.10	1.47	21.57	28.49
6	4.5	12.94	235	298	1.19	1.51	23.83	29.89
7	5	14.43	260	313	1.26	1.52	26.38	31.47
8	5.5	15.92	290	330	1.32	1.50	29.40	33.25
9	6	17.41	320	340	1.40	1.49	32.43	34.35

B. Diameter Meso-scale combustor : 2,6/3,5

Tabel 4.9 Hasil pengolahan data *flammability limit* untuk bahan bakar konstan

No	Q_f (mL/min)	Q_f kalibrasi (mL/min)	$Q_{a\ min}$ (mL/min)	$Q_{a\ max}$ (mL/min)	ϕ_{lower}	ϕ_{upper}	$V_{reaktan\ min}$ (cm/s)	$V_{reaktan\ max}$ (cm/s)
1	2	5.50	112	123	1.22	1.34	20.36	22.27
2	2.3	6.39	123	143	1.22	1.42	22.43	25.89
3	2.5	6.99	133	155	1.23	1.44	24.26	28.08
4	2.8	7.88	148	165	1.31	1.46	27.02	29.96



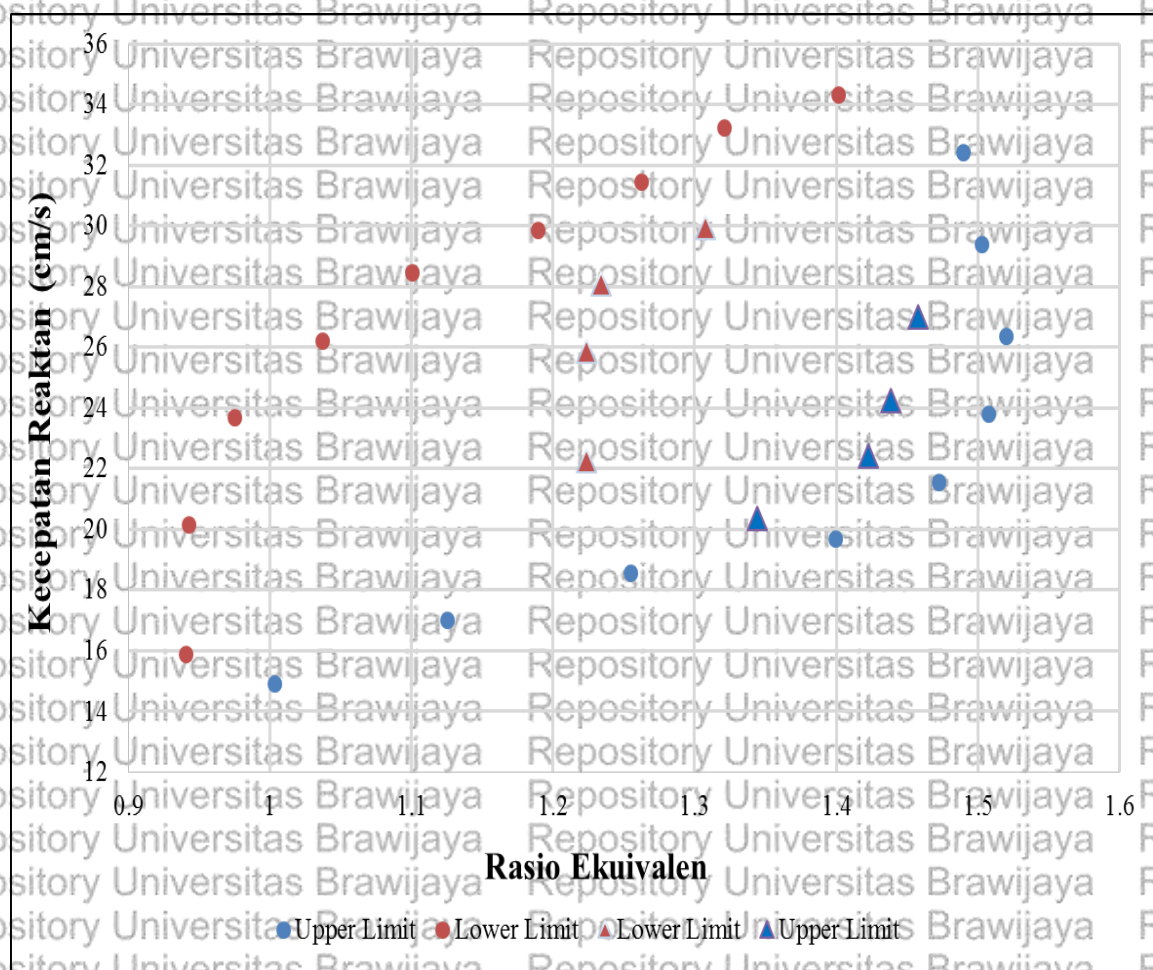
C. Diameter Meso-scale combustor : 3,5/3,5

Tabel 4.10 Hasil pengolahan data *flammability limit* pada exit combustor untuk bahan bakar konstan

No	Q_f (mL/min)	Q_f kalibrasi (mL/min)	Q_a flashback (mL/min)	Q_a blow off (mL/min)	ϕ flashback	ϕ blow off	$V_{reaktan}$ flashback (cm/s)	$V_{reaktan}$ blow off (cm/s)
1	0.2	0.14	105	75	0.04	0.05	18.22	13.02
2	0.5	1.03	110	115	0.26	0.25	19.24	20.11
3	1	2.52	120	135	0.58	0.51	21.24	23.84
4	1.5	4.01	125	155	0.88	0.71	22.36	27.56
5	2	5.50	130	170	1.16	0.89	23.48	30.42
6	2.5	6.99	135	205	1.42	0.93	24.61	36.74
7	3	8.48	140	240	1.66	0.97	25.73	43.07
8	3.5	9.97	130	275	2.10	0.99	24.26	49.39
9	4	11.46	120	305	2.61	1.03	22.78	54.85
10	4.5	12.94		335		1.06		60.30
11	5	14.43		360		1.10		64.90
12	5.5	15.92		385		1.13		69.49
13	6	17.41		410		1.16		74.08
14	6.5	18.90		435		1.19		78.67
15	7	20.39		460		1.21		83.26
16	7.5	21.88		490		1.22		88.72
17	8	23.37		520		1.23		94.18

Selanjutnya dilakukan pengeplotan grafik berdasarkan nilai *rasio ekuivalen* dan kecepatan reaktan dari Tabel 4.8-4.9 diatas. Sehingga didapat diagram hubungan *rasio ekuivalen* dengan kecepatan reaktan, diagram tersebut yang menjadi dasar analisa *flammability limit* atau batas stabilitas nyala api di dalam meso-scale combustor dengan *backward facing step*.

4.3 Pembahasan *Flammability limit*



Gambar 4.2 Grafik *flammability limit* pada *meso-scale combustor* dengan *backward facing step* dengan D_1/D_2 (A) 3.5/4.7, (B) 2.6/3.5

Gambar 4.2 merupakan grafik *flammability limit* untuk pembakaran bahan bakar LPG pada *meso-scale combustor* menggunakan *backward facing step* dengan diameter yang berbeda. Diameter pertama adalah 3.5/4.7, sedangkan diameter kedua adalah 2.6/3.5. Pada grafik terlihat kecenderungan perbedaan luas daerah *flammability limit* yang dipengaruhi oleh besarnya ukuran diameter *combustor*. Semakin kecil diameter *combustor* maka luas daerah *flammability limit* yang dihasilkan juga semakin sempit. Hal ini disebabkan tingkat kehilangan panas (*heat loss*) yang lebih tinggi, dimana terkait dengan peningkatan perbandingan luas permukaan terhadap *volume* dan temperatur yang dihasilkan semakin rendah.

Grafik dengan diameter *combustor* 2.6/3.5 menunjukkan daerah *flammability limit* yang lebih sempit dibandingkan daerah *flammability limit* dengan diameter *combustor*

3.5/4.7. Karena semakin kecil diameter *combustor*, perbandingan luas permukaan dan *volume* ruang *combustor* semakin luas. Sehingga perpindahan kalor ke dinding yang terjadi semakin meningkat. Dapat dilihat bahwa *rasio ekuivalen* terendah pada diameter *combustor* 3.5/4.7 adalah 0.94 dengan kecepatan reaktan sebesar 14.95 cm/s, *rasio ekuivalen* tertinggi adalah 1.52 dengan kecepatan reaktan sebesar 31.47 cm/s. Sedangkan *rasio ekuivalen* terendah pada diameter *combustor* 2.6/3.5 adalah 1.22 dengan kecepatan reaktan 22.43 cm/s dan nilai *rasio ekuivalen* tertinggi adalah 1.46 dengan kecepatan reaktan sebesar 29.96 cm/s.

Apabila dilihat dari nilai kecepatan reaktannya diketahui bahwa grafik *flammability limit* memiliki batas kecepatan tertinggi dan terendah. Apabila kecepatan reaktan diatur melebihi batas bawah kecepatan terendah maka akan terjadi fenomena *flashback* dimana api bergerak masuk kembali ke dalam saluran reaktan. Sedangkan apabila kecepatan reaktan diatur melebihi batas atas kecepatan reaktan tertinggi maka akan terjadi fenomena *blow off*.

4.4 Pengambilan Data Visualisasi dan Temperatur Nyala Api

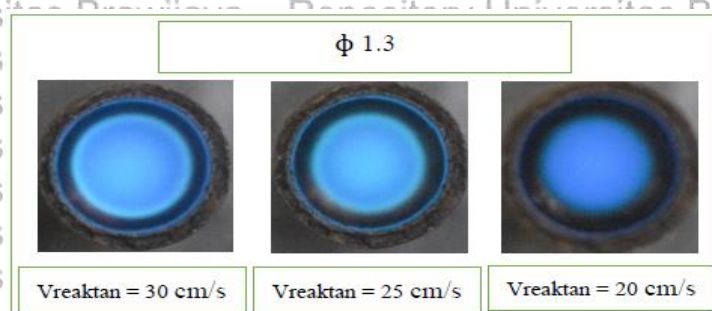
Pengambilan data visualisasi bentuk nyala api dan temperatur nyala api dilakukan dengan menentukan titik-titik pengukuran berdasarkan data dari Tabel 4.8 dan 4.9. Dari data tersebut, diambil beberapa titik pengukuran untuk mengetahui karakteristik visualisasi nyala api dan temperatur nyala api dimana ke semua titik pengukuran yang diambil dapat menyala stabil dalam *combustor*. Kemudian ditentukan titik pada *rasio ekuivalen* (ϕ) yang sama dengan kecepatan total reaktan yang berbeda dan titik pada kecepatan total reaktan yang sama dengan *rasio ekuivalen* yang berbeda. Tabel 4.11 menunjukkan rincian titik acuan pengukuran visualisasi nyala api dan temperatur nyala api.

4.5 Visualisasi Bentuk Nyala Api

Setelah dilakukan pengambilan data visualisasi bentuk nyala api menggunakan kombinasi - kombinasi debit udara dan debit bahan bakar pada Tabel 4.11 sebelumnya. Didapat gambar visualisasi bentuk nyala api seperti pada Gambar 4.3 sampai Gambar 4.6 berikut ini.

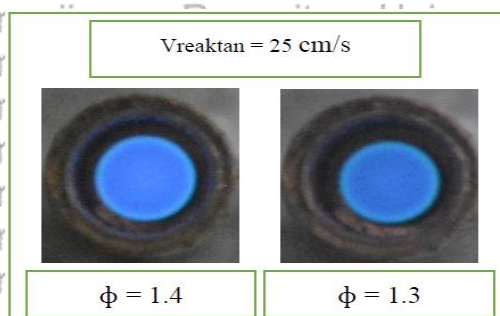
Tabel 4.11 Titik pengambilan data visualisasi bentuk nyala api dan temperatur nyala api

No	ϕ	V_{reaktan} (cm/s)	Q_f (mL/min)	Konversi Q_f (mL/min)	Q_a (mL/min)
1	1.3	20	3.47	9.88	198.20
2	1.3	25	4.30	12.35	247.76
3	1.3	30	5.13	14.83	297.31
4	1	25	3.66	10.45	249.66
5	1.3	25	4.30	12.35	247.76
6	1.5	25	4.94	14.26	245.85
7	1.3	20	1.99	5.48	109.91
8	1.3	21	2.09	5.75	115.41
9	1.3	25	2.45	6.85	137.39
10	1.4	25	2.63	7.38	136.87
11	1.3	25	2.45	6.85	137.39

Gambar 4.3. Visualisasi bentuk nyala api pada *meso-scale combustor* dengan *backward facing step*, $D_1/D_2 = 3.5/4.7$ pada nilai rasio ekuivalen 1,3 dengan kecepatan reaktan 30 cm/s, 25 cm/s dan 20 cm/sGambar 4.4. Visualisasi bentuk nyala api pada *meso-scale combustor* dengan *backward facing step*, $D_1/D_2 = 2.6/3.5$ pada nilai rasio ekuivalen 1,3 dengan kecepatan reaktan 25 cm/s, 21 cm/s dan 20 cm/s



Gambar 4.5 Visualisasi bentuk nyala api pada *meso-scale combustor* dengan *backward facing step*, $D_1/D_2 = 3.5/4.7$ pada kecepatan reaktan 25 cm/s dengan nilai rasio ekuivalen 1.5, 1.3 dan 1



Gambar 4.6 Visualisasi bentuk nyala api pada *meso-scale combustor* dengan *backward facing step*, $D_1/D_2 = 2.6/3.5$ pada kecepatan reaktan 25 cm/s dengan nilai rasio ekuivalen 1.4 dan 1.3

Pada Gambar 4.3 dan 4.4 menunjukkan visualisasi bentuk nyala api pada rasio ekuivalen 1.3 dengan kecepatan reaktan yang bervariasi yaitu $D_1/D_2 = 3.5/4.7$ (30 cm/s, 25 cm/s dan 20 cm/s) dan $D_1/D_2 = 2.6/3.5$ (25 cm/s, 21 cm/s dan 20 cm/s). Sedangkan Gambar 4.5 dan 4.6 menunjukkan visualisasi bentuk nyala api pada kecepatan reaktan 25 cm/s dengan rasio ekuivalen bervariasi yaitu $D_1/D_2 = 3.5/4.7$ (1.5, 1.3 dan 1) dan $D_1/D_2 = 2.6/3.5$ (1.4, 1.3).

Dari Gambar 4.3 dan 4.4 dapat dilihat bahwa semakin tinggi kecepatan reaktan pada *meso-scale combustor* dengan *backward facing step* menghasilkan api yang tampak biru terang dan semakin lebar. Hal tersebut dikarenakan dengan meningkatnya kecepatan reaktan, maka debit udara dan debit bahan bakar yang mengalir di dalam *combustor* juga akan semakin meningkat. Sehingga semakin banyak reaktan yang bereaksi di dalam *combustor*. Api hasil pembakaran akan nampak semakin besar dan terang dari pada api hasil pembakaran dengan kecepatan reaktan yang lebih rendah.

Sedangkan pada Gambar 4.5 dan 4.6 menunjukkan bahwa semakin meningkatnya rasio ekuivalen dengan kecepatan reaktan dijaga tetap maka warna api yang dihasilkan

akan berwarna biru dan semakin terang. Hal tersebut dikarenakan semakin banyak debit reaktan yang terbakar sehingga energi yang dihasilkan semakin besar.

4.6 Temperatur Nyala Api

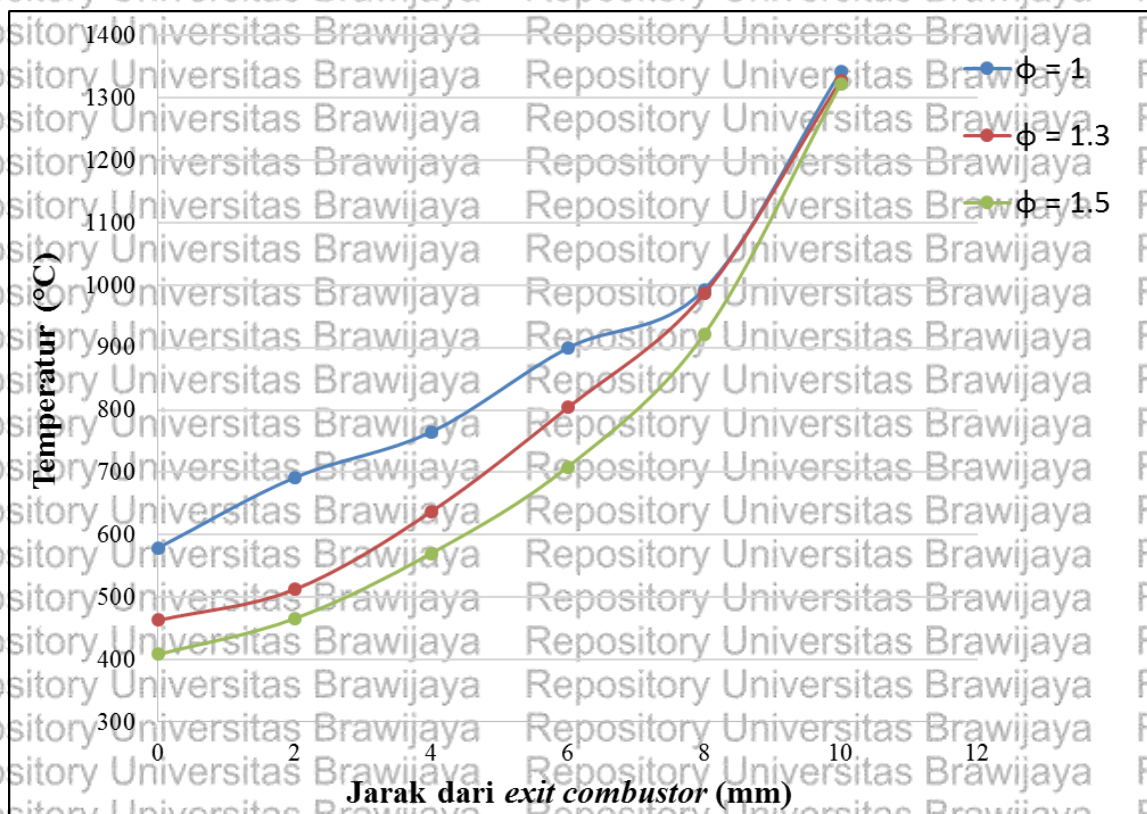
Titik pengambilan data temperatur nyala api dilakukan pada titik acuan yang sama dengan pengambilan data visualisasi bentuk nyala api berdasarkan data dari Tabel 4.11. Dalam pengambilan data temperatur nyala api pada *meso-scale combustor* diambil 6 titik pengambilan dari *exit combustor*. Titik 1 berada pada *exit combustor*, titik 2 berada 2 mm dari titik 1 dan selanjutnya titik 6 berada 10 mm dari titik 1. Jarak antar titik pengambilan adalah 2 mm. Berikut merupakan gambar temperatur nyala api.

Tabel 4.12 Data temperatur nyala api pada *meso-scale combustor* dengan *backward facing step* dengan $D_1/D_2 = 3.5/4.7$

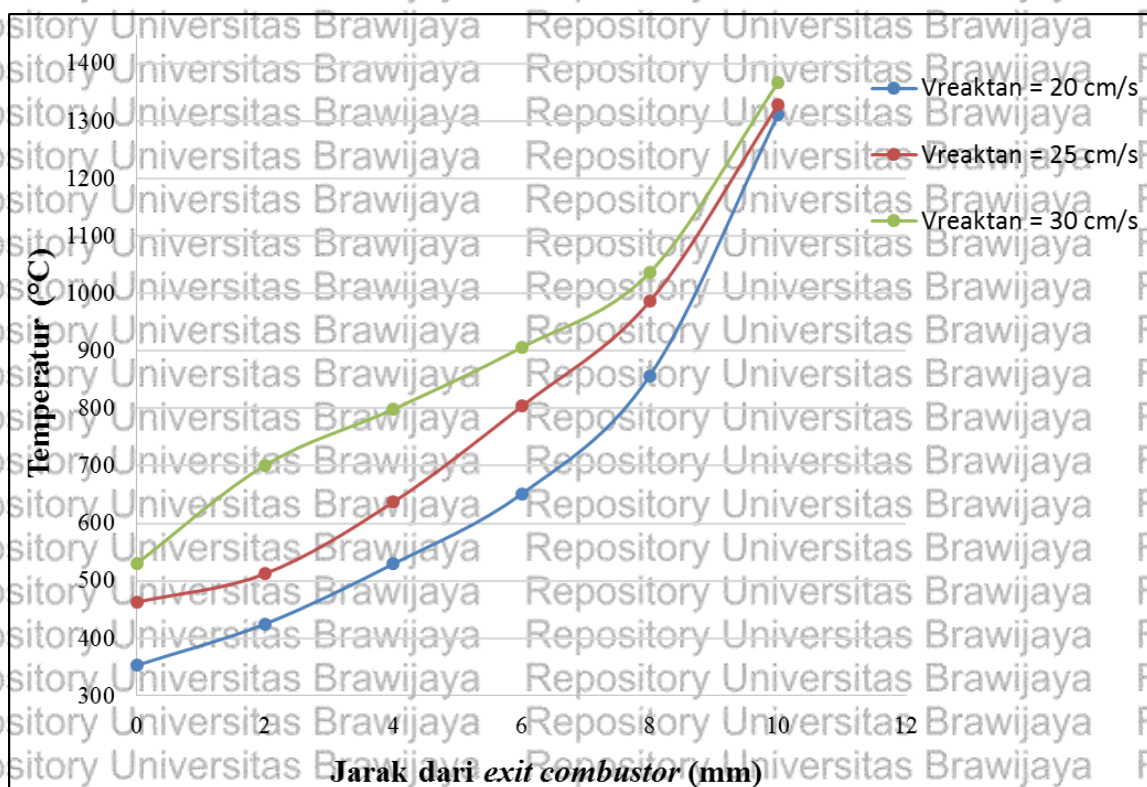
No	ϕ	Vreaktan (cm/s)	Temperatur (°C)					
			6	5	4	3	2	1
1	1.3	20	1311.21	857.30	651.30	529.63	425.19	353.21
2	1.3	25	1328.49	986.63	803.77	637.11	512.49	463.09
3	1.3	30	1367.16	1036.96	906.12	798.76	701.45	530.65
4	1	25	1341.97	993.13	899.34	764.71	691.76	579.16
5	1.3	25	1328.49	986.63	803.77	637.11	512.49	463.09
6	1.5	25	1322.74	921.42	708.86	570.20	465.89	408.34

Tabel 4.13 Data temperatur nyala api pada *meso-scale combustor* dengan *backward facing step* dengan $D_1/D_2 = 2.6/3.5$

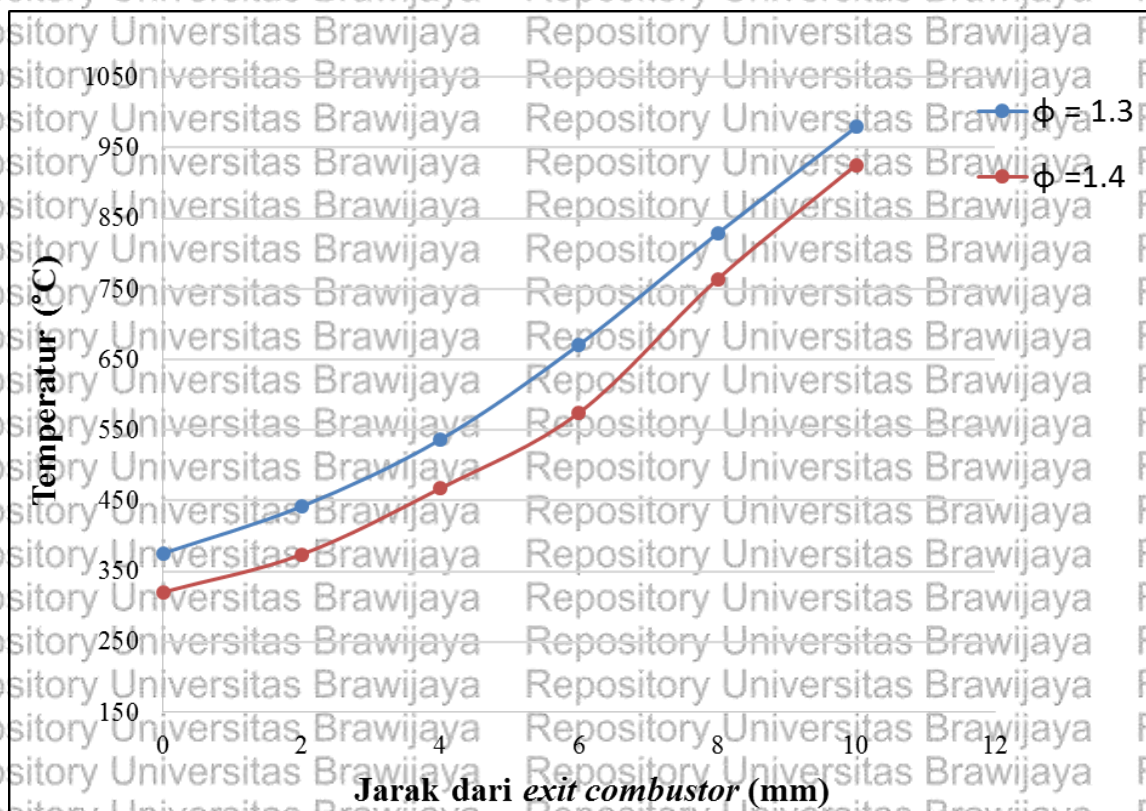
No	ϕ	Vreaktan (cm/s)	Temperatur (°C)					
			6	5	4	3	2	1
1	1.3	20	806.02	551.67	423.74	323.27	257.27	180.03
2	1.3	21	850.33	592.84	451.31	354.33	268.72	219.65
3	1.3	25	979.35	828.75	670.79	536.68	442.04	375.50
4	1.4	25	925.82	763.96	574.46	467.45	373.88	320.57
5	1.3	25	979.35	828.75	670.79	536.68	442.04	375.50



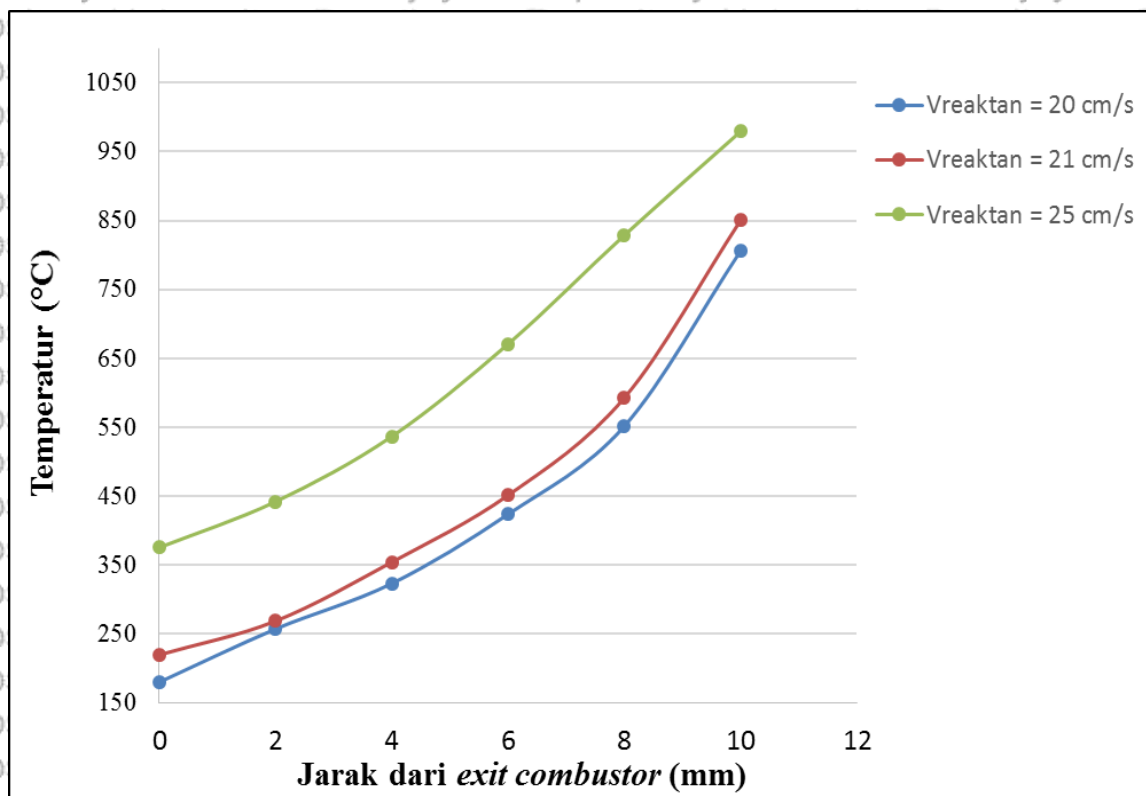
Gambar 4.7 Hubungan rasio ekuivalen terhadap temperatur nyala api pada meso-scale combustor dengan backward facing step dengan $D_1/D_2 = 3.5/4.7$



Gambar 4.8 Hubungan kecepatan reaktan terhadap temperatur nyala api pada meso-scale combustor dengan backward facing step dengan $D_1/D_2 = 3.5/4.7$



Gambar 4.9 Hubungan rasio ekuivalen terhadap temperatur nyala api pada meso-scale combustor dengan backward facing step dengan $D_1/D_2 = 2.6/3.5$



Gambar 4.10 Hubungan kecepatan reaktan terhadap temperatur nyala api pada meso-scale combustor dengan backward facing step dengan $D_1/D_2 = 2.6/3.5$



Gambar 4.7 dan 4.9 menunjukkan pengaruh variasi *rasio ekuivalen* terhadap temperatur nyala api pada *meso-scale combustor* dengan *backward facing step*. Terlihat bahwa temperatur api semakin menurun seiring dengan kenaikan nilai *rasio ekuivalen*. Hal tersebut disebabkan pada *rasio ekuivalen* yang lebih tinggi jumlah bahan bakar yang berada di dalam *combustor* akan semakin melimpah. Dan tidak diimbangi dengan kenaikan jumlah udara, campuran reaktan di dalam *combustor* akan bersifat semakin kaya. Sehingga menimbulkan kemungkinan jumlah bahan bakar yang tidak terbakar. *Rasio ekuivalen* 1 adalah keadaan stoikiometri dimana bahan bakar terbakar dengan sempurna. Pada titik pengambilan ke enam temperatur paling tinggi dikarenakan letak pengambilan yang lebih dekat dengan api serta berada pada daerah *backward facing step*, dimana terjadi sirkulasi balik pencampuran reaktan pada pembakaran menuju *backward facing step* (Yang 2002 : 1777–1787).

Sedangkan pada Gambar 4.8 dan 4.10 menunjukkan pengaruh kecepatan reaktan terhadap temperatur nyala api pada *meso-scale combustor* dengan *backward facing step* bahwa seiring dengan meningkatnya kecepatan reaktan yang mengalir di dalam *combustor*, temperatur nyala api akan semakin tinggi. Hal tersebut dikarenakan meningkatnya kecepatan reaktan disebabkan oleh kenaikan debit udara dan debit bahan bakar yang mengalir di dalam *combustor*. Dengan adanya reaktan yang melimpah maka proses pembakaran yang terjadi juga akan semakin besar dan membuat kalor yang terlepas dari reaksi pembakaran akan semakin banyak pula. Kalor yang terlepas dari reaksi pembakaran secara otomatis akan meningkatkan temperatur pada nyala api hasil pembakaran.

Gambar diatas dapat dilihat bahwa temperatur tertinggi untuk *combustor* $D_1/D_2 = 3.5/4.7$ berada pada nilai 1367.16°C pada *rasio ekuivalen* 1.3 dan kecepatan reaktan 30 cm/s. Temperatur terendah pada nilai 1311.21°C dengan *rasio ekuivalen* 1.3 dan kecepatan reaktan 20 cm/s. Grafik diatas dapat dilihat bahwa temperatur tertinggi untuk *combustor* $D_1/D_2 = 2.6/3.5$ berada pada nilai 979.35°C pada *rasio ekuivalen* 1.3 dan kecepatan reaktan 25 cm/s. Temperatur terendah pada nilai 806.02°C dengan *rasio ekuivalen* 1.3 dan kecepatan reaktan 20 cm/s.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini pada *meso-scale combustor* dengan *backward facing step* berpengaruh pada *flammability limit*, visualisasi bentuk nyala api dan temperatur nyala api sebagai berikut :

1. *flammability limit* pada *meso-scale combustor* dengan *backward facing step* dipengaruhi oleh diameter *combustor*. Semakin besar diameter *combustor* maka daerah *flammability limit* juga semakin luas.
2. Semakin besar kecepatan reaktan dengan *rasio ekuivalen* tetap pada *meso-scale combustor* dengan *backward facing step* menghasilkan api yang tampak biru terang dan lebar. Pada $D_1/D_2 = 3.5/4.7$, kecepatan reaktan 30 cm/s dan *rasio ekuivalen* 1.3 sedangkan $D_1/D_2 = 2.6/3.5$, kecepatan reaktan 25 cm/s dan *rasio ekuivalen* 1.3.
3. Jarak api dengan dinding *combustor* dipengaruhi oleh diameter *combustor*. Semakin kecil diameter *combustor* maka jarak api dengan dinding *combustor* semakin luas.
4. Temperatur api semakin meningkat ketika *rasio ekuivalen* mendekati 1 (stoikiometri) dan semakin meningkat seiring dengan kenaikan kecepatan reaktan.
5. Temperatur tertinggi untuk *combustor* $D_1/D_2 = 3.5/4.7$ berada pada nilai 1367.16 °C pada *rasio ekuivalen* 1.3 dan kecepatan reaktan 30 cm/s. Temperatur terendah pada nilai 1311.21 °C dengan *rasio ekuivalen* 1.3 dan kecepatan reaktan 20 cm/s. Sedangkan temperatur tertinggi untuk *combustor* $D_1/D_2 = 2.6/3.5$ berada pada nilai 979.35 °C pada *rasio ekuivalen* 1.3 dan kecepatan reaktan 25 cm/s. Temperatur terendah pada nilai 806.02 °C dengan *rasio ekuivalen* 1.3 dan kecepatan reaktan 20 cm/s.

5.2 Saran

1. Untuk penelitian selanjutnya sebaiknya dilakukan dengan bervariasi *meso-scale combustor* dengan *backward facing step* dengan diameter yang lebih besar.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan oksigen sebagai *oxidizer* pada proses pembakaran di dalam *meso-scale combustor* dengan *backward facing step*.



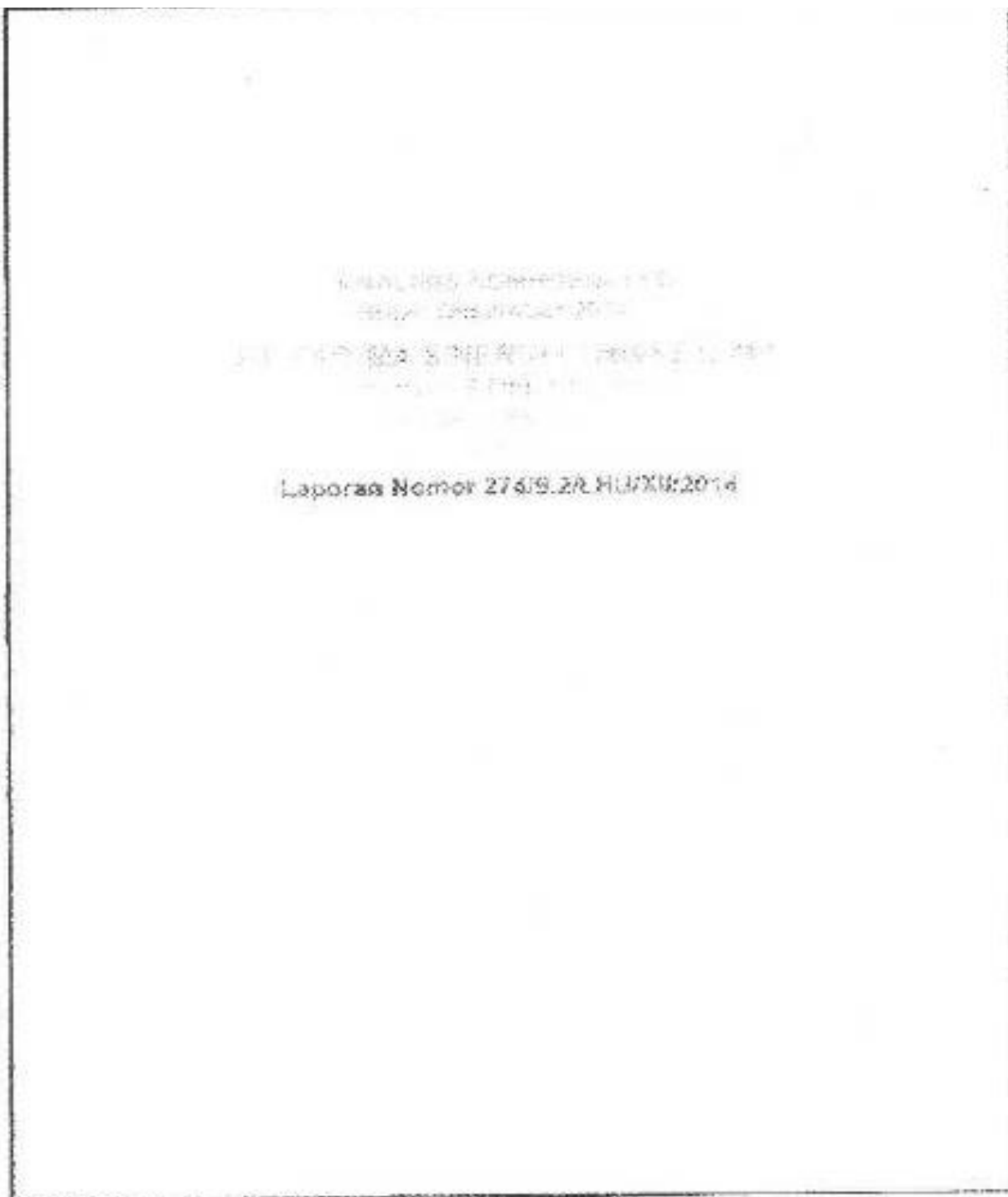
DAFTAR PUSTAKA

- Fernandes-Pello, C. 2002. *Micropower Generation Using Combustion: Issues and Approaches. Proceedings of The Combustion Institute Volume 29 Issues 1 Page 883-899*. Barkeley: University of California.
- Li, Z.W., Chou, S. K., Shu, C., Xue, H., and Yang, W. M. 2005. Characteristics of premixed flame in *microcombustors* with different diameters. *Applied Thermal Engineering Volume 25 Page 271-281*.
- Li, Z.W., Chou, S. K., Shu, and Yang, W. M. 2005. *Effects of step height on wall temperature of a microcombustor. Micro mechanics And Micro engineering Volume 15 Page 207-212*.
- Maruta, K. 2011. *Meso Scale Combustor. Proceedings of The Combustion Institute Volume 33 Issue 1 Page 125-150*.
- Mikami, M., Maeda, Y., Matsui, K., Seo, T. & Yuliaty, L. 2013. *Combustion of Gaseous and Liquid Fuels In Meso-Scale Tubes With Wire Mesh. Proceedings of The Combustion Institute Volume 34 Issue 2 Page 3387-3394*.
- Wardana, I.N.G. 2008. *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*. PT. Danar Wijaya. Malang: Brawijaya University Press.
- Yang, W. M., Chou, S. K., Shu, C., Li, Z. W., and Xue, H. 2002. Combustion in *micro-cylindrical combustors* with and without a *backward facing step*. *Applied Thermal Engineering Volume 22 Page 1777-1787*.



LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Persentase Gas Propana Dan Butana Dalam *Liquified Petroleum Gas* (LPG)



Laporan Nomor 27419.2R.HU/XII/2014

DEPARTEMEN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL REPUBLIK INDONESIA
BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL
PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN TEKNOLOGI MINYAK DAN GAS BUMI

KELompok Teknologi Analisis Gas
Jl. Ciledug Raya Cipulih Kebayoran Lama Jakarta Selatan 12230 INDONESIA
PO BOX 1689, JAKARTA 10016, INDONESIA PHONE: 7399276 (direct line), 7394422 (TOLL FREE), 1660, 1663, FAX: 021-7246150

PT. PERTAMINA LUBRICANTS



LABORATORIUM PRODUCTION UNIT GRESIK

Jalan Harun Tohir Desa Pulau Pancikan Gresik - 61113

Phone 031-3293892, Fax. 031-3294965, Email : labplm@pertamina.com



CERTIFICATE OF ANALYSIS

Type of Sample : LPG MIX
Customer : LPG & Gas Products Region V
Ex. Storage Location : Tanki Timbun III A (MT/LPG C NAVIGATOR GLOBAL)
Sample No. : -
Sample Delivery No : 08/T15451/TD-B/02/2014
Sample Delivery Date : 29.01.2014
COA No : 0193/PL2703/COA-G/2014
Date of COA : 04.02.2014
Sample Drawn by : -
Sample Drawn : -
Received Date : 03.02.2014
Type Test : -

NO	TEST	UNIT	METHOD	LIMIT	RESULT
1	Specific Gravity at 60 / 60 °F	-	ASTM D 1657	Reported	-
2	Vapor Pressure at 100 °F	psig	ASTM D 1267	Max. 145	106
3	Copper Corrosion 1 hr / 100 °F	-	ASTM D 1838	ASTM No. 1	ASTM No. 1
4	Composition :		ASTM D 2163 Gas Chromatography		
	C2	% Vol		Max. 0.6	0,11
	C3				49,57
	C4				50,11
	C5	% Vol		Max. 2.0	0,21
5	Molekul Weight (In Liquid)	-	-	-	50,17

Note : This report relates only to the sample tested and does not guarantee the bulk of material to be of equality.

*J Sesuai dengan Spesifikasi Dirjen Migas No. 22394.K/10/DJM.T/2009, ter ggal 11 Nopember 2009

Distribusi :

To : LPG & Gas Products Region V

Cc : File

Jurabaya, 04 April 2013
Junior Analyst QC. Lab. Prod. Unit Gresik

M. BIKO TO

PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN TEKNOLOGI MINYAK DAN GAS BUMI

LEMIGAS

LABORATORIUM KELOMPOK TEKNOLOGI ANALISIS GAS

JALAN CILEDUG RAYA KAVELING 109 - CIPULIR - KEBAYORAN LAMA - JAKARTA SELATAN 12230

TELEPON: 62-21-7394422 ext. 1639, 1980, 1661 FAKSIMILE: 62-21-7346150

Jakarta, 23 Desember 2014

Yang terhormat,

HSE Manager
PT. Optima Sinergi Comvestama
Gandaria 8 Office Building
Lantai 16 Blok G - H

Telepon 021 - 2930 3800/ 3734
Fax 021 - 2930 3736
Hp. 0812 9096 733

Up. Bapak Herclif Sayan

Sehubungan dengan service order Saudara Nomor 022-SO-100-JKT-XII-2014 tanggal 22 Desember 2014 hal analisis gas LPG, bersama ini kami sampaikan Laporan Hasil Uji Nomor 274/9.2/LHU/XII/2014 mengenai analisis komposisi gas LPG dimaksud yang sampelnya kami terima pada tanggal 22 Desember 2014.

Terkait dengan hal tersebut, terlampir kami sampaikan pula Lembaran Pengukuran Kepuasan Pelanggan untuk diisi dan dikembalikan ke PPPTMGB "LEMIGAS" pada kesempatan pertama.

Atas perhatian dan kerja sama Saudara, kami ucapkan terima kasih.

Kepala Kelompok Teknologi Analisis Gas,



Dra. Yayun Andriani, M.Si

