PENGARUH VARIASI BESAR DIAMETER *OUTLET* TERHADAP KARAKTERISTIK PEMBAKARAN DALAM *CIRCULAR DISK COMBUSTOR*

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

MUHAMMAD ASH SHIDDIEQY
NIM. 145060207111020

UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2018

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

repository.ub.ac.id

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH VARIASI BESAR DIAMETER *OUTLET* TERHADAP KARAKTERISTIK PEMBAKARAN DALAM *CIRCULAR DISK COMBUSTOR*

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

MUHAMMAD ASH SHIDDIEQY

NIM. 145060207111020

Skripsi ini telah di revisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 19 Oktober 2018

Dosen Pembimbing I	Dosen Pembimbing II
Winarto, ST., MT., Ph.D.	Dr. Eng. Lilis Yuliati, ST., MT.
NIP. 19710710 200012 1 001	NIP. 19750702 200003 2 001

Mengetahui,
Ketua Program Studi S1

Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP. 19740930 200012 1 001

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

JUDUL SKRIPSI:

Pengaruh Variasi Besar Diameter *Outlet* Terhadap Karakteristik Pembakaran Dalam *Circular Disk Combustor*

Nama Mahasiswa : Muhammad Ash Shiddieqy

NIM : 145060200111034

Program Studi : Teknik Mesin

Minat : Teknik Konversi Energi

KOMISI PEMBIMBING

Pembimbing I : Winarto, ST., MT., Ph.D

Pembimbing II : Dr. Eng. Lilis Yuliati, ST., MT.

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Prof. Ir. Sudjito, Ph.D

Dosen Penguji 2 : Agung Sugeng Widodo, ST., MT., Ph.D

Dosen Penguji 3 : Fransisca Gayuh Utami, ST., MT

Tanggal Ujian : 10 Oktober 2018

SK Penguji : 2279/UN10.F07/SK/2018
9 Oktober 2018

repository.ub.ac.id

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, Pasal 25 ayat 2 dan Pasal 70).

Malang, 19 Oktober 2018

Mahasiswa

Muhammad Ash Shiddieqy

NIM. 145060207111020

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

UNIVERSITAS BRAWIJAYA
repository.ub.ac.id

TURNITIN

UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA

SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 135/UN10.F07.12.21/PP/2018

Sertifikat ini diberikan kepada :

MUHAMMAD ASH SHIDDIEQY

Dengan Judul Skripsi :

PENGARUH VARIASI BESAR DIAMETER *OUTLET* TERHADAP KARAKTERISTIK PEMBAKARAN DALAM *CIRCULAR DISK COMBUSTOR*

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi ≤ 20 %, dan dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal 22 OCT 2018

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D
NIP. 19670518 199412 1 001

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

Dr.Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT
NIP. 19740930 200012 1 001

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, hidayah dan karunia-Nya telah diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi dengan judul "**Pengaruh Variasi Besar Diameter *Outlet* Terhadap Karakteristik Pembakaran Dalam *Circular Disk Combustor***" dengan baik. Sholawat serta salam semoga tetap tercurahkan kepada junjungan kita Rasulullah SAW.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini dapat terselesaikan berkat bantuan, petunjuk dan bimbingan dari berbagai pihak dalam proses penyelesaian skripsi ini dengan baik. Oleh karena itu, dalam kesempatan kali ini penulis menyampaikan puji syukur dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi ini:

1. Allah SWT yang telah memberikan kekuatan dan kesabaran tanpa henti dari awal penulis memasuki dunia perkuliahan sampai dengan penulis dapat menyelesaikan skripsi.
2. Kedua orang tua yang tersayang, Ayah Hefni Abdul Muthalib dan Ibu Nita Kandini yang tiada henti mendoakan, memberikan bimbingan, dan motivasi kepada penulis.
3. Bapak Winarto, ST., MT., Ph. D., selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan motivasi, bimbingan dan arahan demi kesempurnaan penulisan skripsi.
4. Ibu Dr. Eng. Lilis Yuliati, ST., MT., selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan waktu, tenaga, motivasi, bimbingan dan arahan demi kesempurnaan penulisan skripsi.
5. Bapak Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
6. Bapak Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT., selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
7. Ibu Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT., selaku Ketua Kelompok Dasar Keahlian Konsentrasi Teknik Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
8. Ibu Femiana Gapsari, ST., MT., selaku dosen wali yang tiada henti memberikan bimbingan selama penulis menyelesaikan studi di Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.

9. Seluruh Dosen Pengajar dan Staff Administrasi Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang yang telah memberikan banyak ilmu pengetahuan yang sangat mendukung selama penyusunan skripsi.
10. Teman satu kelompok penelitian skripsi seperjuangan Fahmi, Dhyan dan Dimas.
11. Kakak, abang dan adik yang senantiasa selalu mendoakan dan memotivasi penulis.
12. Zhafrina Diandra yang selalu memberikan motivasi dan menemani untuk mensukseskan penyelesaian skripsi
13. Seluruh asisten Laboratorium Mesin-Mesin Fluida yang telah memberikan ilmu dan banyak pengalaman kepada penulis.
14. Tim perjuangan sejak maba KINGDOM yang telah membantu dalam menyemangati dan belajar bersama
15. Seluruh Keluarga Besar M'14 terima kasih atas doa, dukungan, bantuan dan kebersamaannya selama masa kuliah dan memberikan arti sesungguhnya dari susah seneng tanggung bareng.
16. Semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini, yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk dapat digunakan sebagai perbaikan 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 demi kemajuan kita bersama.

Malang, September 2018

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR i
DAFTAR ISI iii
DAFTAR TABEL v
DAFTAR GAMBAR vi
RINGKASAN viii
SUMMARY ix
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Batasan Masalah 2
1.4 Tujuan Penelitian 3
1.5 Manfaat Penelitian 3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 Penelitian Sebelumnya 5
2.2 *Micropower Generator* (MPG) 6
2.2.1 Micro/*Meso-Scale Combustion* 8
2.2.2 Pembakaran Berdasarkan Cara Reaktan Terbakar Pada Zona Reaksi 9
2.2.3 Reaksi Kimia Pada Proses Pembakaran 10
2.3 Batas Nyala Api dan Sifat Nyala Api 11
2.4 Bahan Bakar 12
2.5 Butana 12
2.6 AFR (*Air Fuel Ratio)* 13
2.7 Rasio Ekuivalen (***Φ***) 15
2.8 Koefisien *Losses* 15
2.9 Hipotesis 16
BAB III METODE PENELITIAN 17
3.1 Tempat dan Waktu Pelaksanaan 17
3.2 Variabel Penelitian 17
3.3 Peralatan Penelitian 18
3.4 Skema Instalasi Penelitian 25
3.5 Metode Pengambilan Data 25
3.6 Diagram Alir Penelitian 27

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 29
4.1 Kalibrasi *Flowmeter* 29
4.2 Pengolahan dan Pembahasan Data Batas Kestabilan Nyala Api 31
4.3 Pembahasan Data Visualisasi Nyala Api 34
4.4 Pengolahan dan Pembahasan Data Temperatur Dinding *Combustor* 39
BAB V PENUTUP 43
5.1 Kesimpulan 43
5.2 Saran 43
DAFTAR PUSTAKA

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Presentase Volume dan Massa Gas pada Udara Kering 10
Tabel 2.2 Massa Atom Relatif 14
Tabel 4.1 Data kalibrasi *flowmeter* bahan bakar butana (C_4H_{10}) 29
Tabel 4.2 Data kalibrasi *flowmeter* udara 30
Tabel 4.3 Data *flame stability limits circular disk combustor* dengan Do = 2.5mm 32
Tabel 4.4 Data *flame stability limits circular disk combustor* dengan Do = 3.5mm 32
Tabel 4.5 Data *flame stability limits circular disk combustor* dengan Do = 4.5mm 32
Tabel 4.6 Data visualisasi nyala api pada variasi Qf dengan ϕ = 1 34
Tabel 4.7 Data visualisasi nyala api pada variasi ϕ dengan Qf = 90 ml/min 36
Tabel 4.8 Data visualisasi nyala api pada variasi ϕ dengan Qf = 135 ml/min 37
Tabel 4.9 Data visualisasi nyala api pada variasi ϕ dengan Qf = 179 ml/min 38
Tabel 4.10 Data Temperatur Dinding *Circular Disk Combustor* (^oC) 39

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Design dari *vortex combustor* 5
Gambar 2.2 Daerah *stability* dari api vortex pada *meso scale combustor* 5
Gambar 2.3 Hubungan specific area pada konsentrasi CO dan temperatur *exhaust* yang dihasilkan.....6
Gambar 2.4 *Micropower generator* dengan siklus daya konvensional 7
Gambar 2.5 *Micropower generator* dengan prinsip thermoelectric…….....8
Gambar 2.6 *Micropower generator* dengan prinsip siklus daya konvensional 8
Gambar 2.7 (a) Pembakaran *premixed* dan (b) Pembakaran *non-premixed* /difusi..... 9
Gambar 2.8 Sturuktur Kimia Butana 13
Gambar 2.9 Koefissien *Losses*.....16
Gambar 3.1 *Circular disk combustor* dengan D_o=2.5.....18
Gambar 3.2 *Circular disk combustor* dengan D_o=3.5.....18
Gambar 3.3 *Circular disk combustor* dengan D_o=4.5.....19
Gambar 3.4 Kaca Tahan Panas Api 19
Gambar 3.5 Lem Tahan Panas Api 20
Gambar 3.6 Tabung bahan bakar butana (C_4H_{10}) 20
Gambar 3.7 Regulator butana 21
Gambar 3.8 (a) *Flowmeter* udara dan (b) *Flowmeter* bahan bakar..... 21
Gambar 3.9 (a) *Inlet Connector* (b) *T-Connector* 22
Gambar 3.10 Y-*Connector* 22
Gambar 3.11 Pemantik 23
Gambar 3.12 Kompressor 23
Gambar 3.13 Selang/Pipa Saluran 24
Gambar 3.14 Skema penelitian 25
Gambar 3.15 Titik pengambilan data temperatur dinding *combustor* 26
Gambar 3.16 Diagram alir penelitian 27
Gambar 4.1 Hubungan Q terbaca dan Q aktual pada *flowmeter* butana (C_4H_{10})..... 30
Gambar 4.2 Hubungan Q terbaca dan Q aktual pada *flowmeter* udara..... 31
Gambar 4.3 Perbandingan kestabilan nyala api Do 2.5mm, 3.5mm dan 4.5mm pada *RE* dan debit reaktan yang divariasikan..... 33
Gambar 4.4 Perbandingan kestabilan nyala api Do 2.5mm, 3.5mm dan 4.5mm pada *RE* dan kecepatan reaktan yang divariasikan. 33

Gambar 4.5 Perbandingan temperatur rata-rata dinding *combustor* terhadap rasio ekuivalen yang divariasikan pada debit bahan bakar 135 ml/min 40
Gambar 4.6 Temperatur dinding *combustor* dengan Do = 2.5mm pada masing-masing titik..... 41
Gambar 4.7 Temperatur dinding *combustor* dengan Do = 3.5mm pada masing-masing titik..... 41
Gambar 4.8 Temperatur dinding *combustor* dengan Do = 4.5mm pada masing-masing titik..... 42

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

RINGKASAN

Muhammad Ash Shiddieqy, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, September 2018, *Pengaruh Variasi Besar Diameter Outlet Terhadap Karakteristik Pembakaran Dalam Circular Disk Combustor*, Dosen Pembimbing: Winarto dan Lilis Yuliati.

Perkembangan teknologi semakin berkembang pesat dibidang perangkat berskala kecil. Salah satu teknologi nya adalah *Micropower generator* , yaitu teknologi pembangkit skala mikro yang memiliki potensi untuk menghasilkan energy listrik memanfaatkan energi panas. Komponen utama MPG adalah ruang bakar atau disebut *combustor*, di dalam *combustor* tersebut berlangsung proses pembakaran skala *meso atau micro*. Sumber tenaga ini diharapkan dapat digunakan pada perangkat elektronik portabel di masa depan.

Combustor yang akan diteliti berjenis *meso-scale combustor* yang memiliki *physical length scale combustor* lebih dari 1 mm. Bentuk *combustor* berjenis *circular disk-type*. Material terbuat dari tembaga dan memiliki diameter *combustor* 28mm dengan tebal 3 mm. Besar diameter *outlet* yang divariasikan pada penelitian ini adalah 2.5mm, 3.5mm, 4.5mm. Pembakaran jenis *premixed* dengan bahan bakar butana (C_4H_{10}) dan oksidator berupa udara.

Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi karakteristik permbakaran dalam *combustor* yaitu jumlah saluran masuk reaktan, sudut saluran masuk reaktan ke *combustor*, volume ruang bakar *combustor*, kecepatan masuk reaktan ke dalam *combustor*, dan diameter *outlet*. Pada penelitian ini akan diamati penggunaan *circular disk combustor* dengan variasi besar diameter *outlet* terhadap *flame stability limit*, visualisasi nyala api serta temperatur dinding *combustor*.

Hasil penelitian menunjukan bahwa semakin kecil diameter *outlet* maka *range flame stability limit* yang dihasilkan semakin lebar, temperatur dinding *combustor* semakin tinggi, dan distribusi api di dalam ruang bakar semakin merata dikarenakan waktu tinggal reaktan yang semakin lama.

Kata Kunci: diameter *outlet*, karakteristik pembakaran, pembakaran *premixed*, *Circular disk combustor*

repository.ub.ac.id

SUMMARY

Muhammad Ash Shiddieqy, *Mechanical Engineering, The Faculty of Engineering, Universitas Brawijaya, September 2018, The Effect of Exhaust Diameter on The Combustion Characteristics in Circular Disk Combustor, Academic Supervisor*: Winarto dan Lilis Yuliati.

Technologies development are increasing in the field of small-scale devices. One of the technologies is a micro power generator (MPG), which is a power generation technology that can produce electricity from heat. The main component of the MPG is combustor, which consist of meso and micro scale combustor This power source is expected to be used in the portable devices in the future.

Type of combustor to be studied here is a meso-scale combustor that has a physical length more than 1 mm. The Shape is circular disk-type type combustor. Material is made of copper and has a diameter of 28mm combustion chamber with a thickness of 3 mm. Diameter outlets that were varied in this study were 2.5 mm, 3.5 mm, 4.5 mm. Reactans enter the chamber with premix butane (C4H10) and air as oxidizing agent.

Factors that can affect the combustion consist of amount of reactants that enter the combustor, the volume of the combustion chamber, the speed of entry into the combustor, and the diameter outlet. In this case,we will be study about The Effect of Exhaust Diameter On The Combustion Characteristics In Circular Disk Combustor such as flame stability limits, flame visualization and wall temperature of the combustor.

The results showed that the smaller outlet diameter, the greater the flame stability range produced, the higher the fuel wall temperature, and more distribution of fire in the combustion chamber because of the longer residence time of the reactants.

***Keywords**: outlet diameter, combustion characteristics, premixed combustion, cirlcular disk combustor*

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi semakin berkembang pesat dibidang perangkat berskala kecil. Salah satu teknologinya adalah *Micropower generator*, yaitu teknologi pembangkit skala mikro yang memiliki potensi untuk menghasilkan energy listrik memanfaatkan energi panas. Komponen utama MPG adalah ruang bakar atau disebut *combustor*, di dalam *combustor* tersebut berlangsung proses pembakaran skala *meso atau micro*. Sumber tenaga ini diharapkan dapat digunakan pada perangkat elektronik portabel di masa depan.

Meso scale combustor adalah pembakaran pada saluran ruang bakar dengan diameter lebih dari 1 mm (Maruta dan Ju, 2011) untuk pembangkit listrik dari 10 W hingga 1 kW sedangkan *micro-scale combustor* memiliki ruang bakar dengan panjang karakteristik kurang dari 1 mm untuk pembangkit l µW hingga mW.

Apabila ditinjau dari bentuk, secara umum di bagi menjadi 2, yaitu *Tube-type* dan *Disk-type*. *Tube-type* memiliki keunggulan dalam kestabilan nyala api yang baik, namun waktu tinggal reaktan yang sangat cepat dan pengaplikasian *thermophotovolotaic* atau *thermoelectric* yang sulit karena tidak memiliki permukaan datar, *disk-type* memiliki kelebihan yaitu efisiensi termal yang lebih baik dari pada tipe yang lain, mudah diaplikasikan ke *thermophotovoltaic* atau *thermoelectric* karena memiliki bidang kontak yang luas dan datar. Ada pula bentuk *micro/meso-scale combustor* yang menyerupai labirin yang berputar yaitu *swiss-roll combustor*. Weinberg et al. (2002) mengembangkan tipe ini yang bentuknya terdiri dari *spiral channels* dengan zona pembakaran di tengahnya, api pembakaran dan efisiensi yang lebih baik dapat dihasilkan dari *combustor* tipe ini. Tujuan dari dibuatnya *swiss-roll combustor* adalah memberikan panas kepada reaktan dari hasil pembakaran yang ada, namun terdapat kekurangan dari *combustor* tipe ini yaitu keseragaman temperatur dinding yang kurang baik dan daerah nyala api yang sempit.

Tantangan pembakaran *microscale* atau *mesoscale* sebagai penyedia panas dalam *thermal electric system* adalah bagaimana mempertahankan kestabilan api dalam *combustor* yang disebabkan oleh skala ruang bakar yang dipersempit, sehingga perbandingan *heat loss* yang terbuang dari sistem dengan energi yang dihasilkan meningkat, serta waktu tinggal reaktan dalam ruang bakar pendek. Untuk meningkatkan efisiensi dari *micropower generator* dibutuhkan nyala api yang stabil, temperatur dinding

yang tinggi, keseragaman temperatur dinding yang baik, dan waktu tinggal reaktan dalam ruang bakar yang cukup lama. Menurut Khalegi et al. (2015) alternatif yang paling mudah untuk menstabilkan nyala api dan meningkatkan waktu tinggal reaktan adalah dengan cara membuat alirannya berputar (*swirling flow*) sehingga membentuk pusaran *(vortex*). Dapat disimpulkan bahwa *meso vortex combustor* adalah alat yang mampu meningkatkan *output* daya, temperatur dinding, dan distribusi yang merata pada dinding *combustor* yang diinginkan.

Berdasarkan apa yang sudah dijabarkan di atas maka dapat dikembangkan penelitian dengan menggunakan *combustor*, dengan sisi saluran masuk tangensial dengan bentuk *combustor* bulat pipih (*Disk*) yang memiliki kelebihan, waktu tinggal reaktan yang lebih baik, keseragaman temperatur dinding *combustor*, daerah nyala api yang luas, dan bidang kontak yang datar sehingga mempermudah pengaplikasian *thermophotovoltaic* atau *thermoelectri*c.

Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi aliran dalam *combustor* yaitu jumlah saluran masuk reaktan, sudut saluran masuk reaktan ke *combustor*, volume ruang bakar *combustor*, kecepatan masuk reaktan ke dalam *combustor*, dan diameter *outlet*. Pada penelitian ini akan diamati penggunaan *cirlcular disk combustor* dengan variasi besar diameter *outlet* terhadap *flame stability limit*, visualisasi nyala api serta temperatur dinding *combustor*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut maka rumusan masalah dari penelitian ini adalah pengaruh besar diameter *outlet* terhadap karaktristik pembakaran pada *circular disk combustor meliputi flame stability limit*, temperatur dinding *combustor,* visualisasi nyala api.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah ini dibuat bertujuan untuk membatasi agar penelitian yang dilakukan lebih spesifik dengan batasan sebagai berikut.

1. Pada alat dianggap tidak terjadi kebocoran.
2. Bahan bakar yang digunakan adalah butana (C4H10) yang diasumsikan komposisinya terdiri dari 100% butana.
3. Udara yang digunakan berasal dari kompresor yang diasumsikan terdiri dari 79% N2 dan 21% O2.

4. Proses pembakaran berlangsung secara *steady*.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini dilakukan adalah untuk mengetahui pengaruh pengaruh besar diameter *outlet* terhadap karaktristik pembakaran pada *cirlcular disk combustor* seperti *flame stability limit*, temperatur dinding *combustor*, visualisasi nyala api.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian yang dilakukan adalah:

1. Mengetahui pengaruh besar diameter *outlet* terhadap range *flame stability limit*
2. Mengetahui pengaruh besar diameter *outlet* terhadap distribusi api pada ruang bakar
3. Mengetahui pengaruh diameter *outlet* terhadap temperatur dinding *combustor*
4. Mengetahui besar diameter *outlet* yang paling optimal untuk menghasilkan pembakaran yang stabil
5. Mampu memberikan referensi baru dalam pengembangan pembakaran skala *meso* selanjutnya

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Khaleghi (2015) mengembangkan penelitian eksperimental dan numerik terhadap penggunakan aliran *vortex* pada *disk combustor*, seperti pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2.

Gambar 2.1 Design dari *vortex combustor*
Sumber: Khaleghi (2015)

1. Aliran *vortex* mampu menstabilkan pembakaran non-*premix* dalam *mesoscale combustor*
2. *blow off* terjadi untuk semua pembakaran dengan rasio ekuivalen 0.2 kebawah.

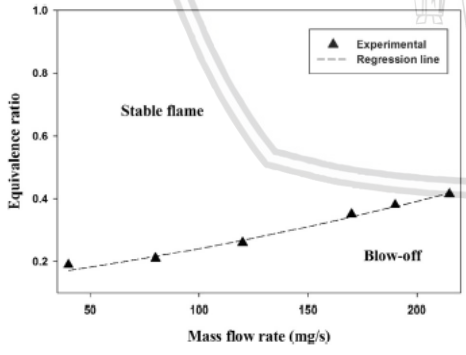
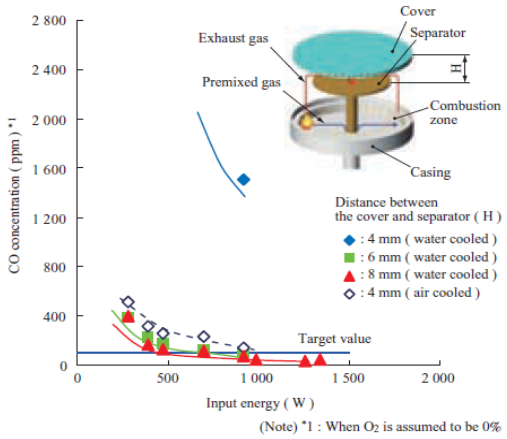


Fig. 4. The stability region of vortex flames in meso-scale combustor.

Gambar 2.2 Daerah *stability* dari api *vortex* pada *meso scale combustor*
Sumber: Khaleghi (2015)

Katsuyoshi (2009) mengembangkan penelitian tentang *meso-scale combustor* dengan memvariasikan jarak antara *cover* dan *seperator*. Hasilnya, dengan menambah jarak *cover* & *separator* pada ruang bakar dapat mengurangi emisi CO sedangkan mengurangi jarak *cover* & *separator* membuat temperatur gas buang dan *heat loss* semakin meningkat, seperti pada Gambar 2.3.



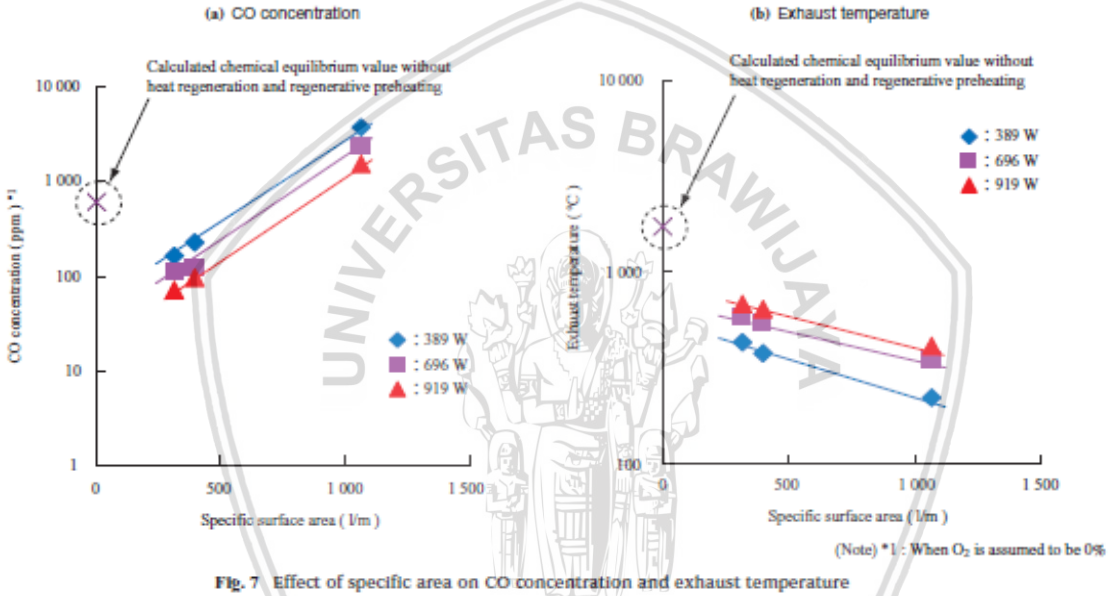


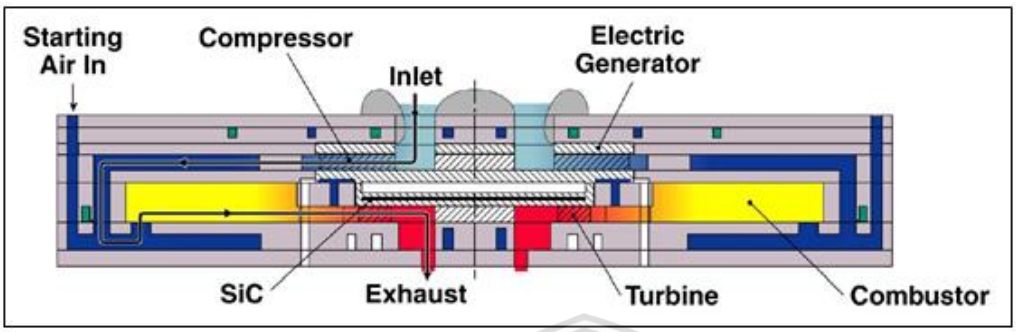
Fig. 7 Effect of specific area on CO concentration and exhaust temperature

Gambar 2.3 Hubungan *specific area* pada konsentrasi CO dan *temperature exhaust* yang dihasilkan
Sumber: Katsuyoshi (2009)

2.2 *Micropower Generator* (MPG)

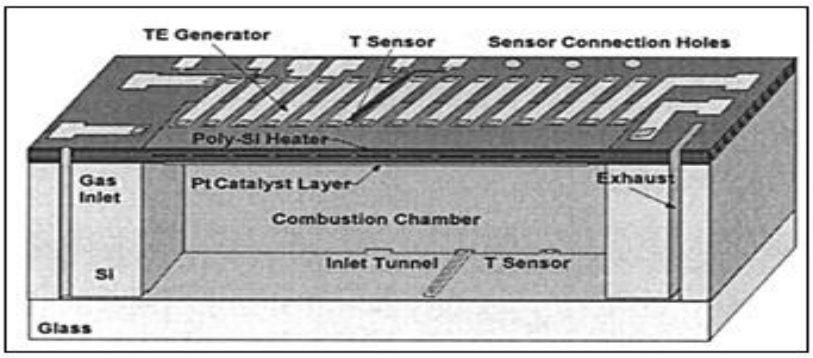
Micropower generator merupakan sumber energi listrik berskala mikro yang memanfaatkan prinsip proses pembakaran dalam menghasilkan energinya. *Micropower generator* dibagi menjadi dua jenis, yaitu *micropower generator* yang menggunakan siklus daya konvensional dan *micropower generator* yang menggunakan modul pengkonversi energi termal menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip *thermophotovoltaic* atau *thermoelectric*. Perbedaannya terletak pada prinsip kerja untuk membangkitkan energi listriknya. Prinsip kerja pada *micropower generator* yang menggunakan siklus daya konvensional hampir mirip dengan prinsip kerja turbin gas yaitu dengan memanfaatkan pembakaran untuk memutar turbin yang berskala mikro. Sedangkan prinsip kerja pada *micropower generator* yang menggunakan *thermophotovoltaic* atau *thermoelectric* memiliki

prinsip kerja yang hampir sama. Sumber energi termal pada *micropower generator* yang menggunakan *thermoelectric* bekerja dengan mengubah energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran menjadi energi listrik dengan menggunakan modul pengkonversi *thermoelectric*, seperti pada Gambar 2.4 dan Gambar 2.5.



Gambar 2.4 Micropower generator dengan siklus daya konvensional
Sumber: Fernandez-Pello et al. (2002)

Micropower generator yang menggunakan *thermophotovoltaic* atau *thermoelectric* dan *micropower generator* yang menggunakan siklus daya konvensional memiliki kesamaan yaitu pada sumber energi termalnya. Sumber energi thermal pada *micropower generator* berasal dari proses pembakaran berskala mikro atau biasa disebut dengan istilah *microcombustion* pada *micro* atau *meso-scale combustor*. *Microcombustion* merupakan proses pembakaran pada suatu *combustor* (ruang bakar) yang memiliki karakteristik dimensi relatif mendekati *quenching distance* atau lebar minimal suatu ruang bakar agar dapat terjadi pembakaran di dalamnya. Suatu *combustor* yang dimensinya mendekati *quenching distance* disebut *microcombustor* (Maruta, 2011). *Microcombustor* terbagi menjadi berbagai macam jenis dan ukuran yang ada. Namun secara garis besar *microcombustor* diklasifikasikan secara sederhana menjadi dua golongan yaitu *micro-scale combustor* dan *meso-scale combustor*. Pengklasifikasian tersebut berdasarkan panjang karakteristik pada ruang bakar. Untuk *micro-scale combustor* lebar pada ruang bakar memiliki ukuran kurang dari 1 mm. Sedangkan untuk *meso-scale combustor* memiliki ukuran lebih dari 1 mm, namun karakteristik pembakaran masih menyerupai *microcombustion* (Maruta, 2011). Berdasarkan bentuknya *combustor* dibagi menjadi jenis *tube-type* dan *disk-type*.



Gambar 2.5 Micropower generator dengan prinsip *thermoelectric*
Sumber: Fernandez-Pello, et al. (2002)

2.2.1 Micro/Meso-*Scale Combustion*

Menurut Ju dan Maruta (2011), pembakaran skala meso dan mikro memiliki potensi sebagai solusi untuk sistem yang membutuhkan energi dalam volume yang kecil seperti daya untuk peralatan elektronik yang bersifat portabel. Dengan densitas energi dari bahan bakar hidrokarbon mencapai (50 MJ/kg), pembakaran dengan berdasarkan *micro power devices* lebih unggul dibandingkan dengan baterai lithium kontemporer yang hanya memiliki densitas energi sebesar (0,6 MJ/kg). Meso-*combustor* merupakan bagian penting dalam *Micro Power Generator* (MPG) yaitu sebagai ruang bakar penyuplai energi panas. Proses pembakaran skala meso berlangsung dalam ruang bakar dengan diameter > 1 mm (Ju dan Maruta,2011).

Pembakaran merupakan suatu reaksi yang dapat menghasilkan panas dan cahaya, hal itu tejadi karena adanya reaksi kimia antara bahan bakar dan pengoksidasi (oksigen/udara). Untuk dapat terjadi pembakaran, dalam suatu reaksi harus terdapat:

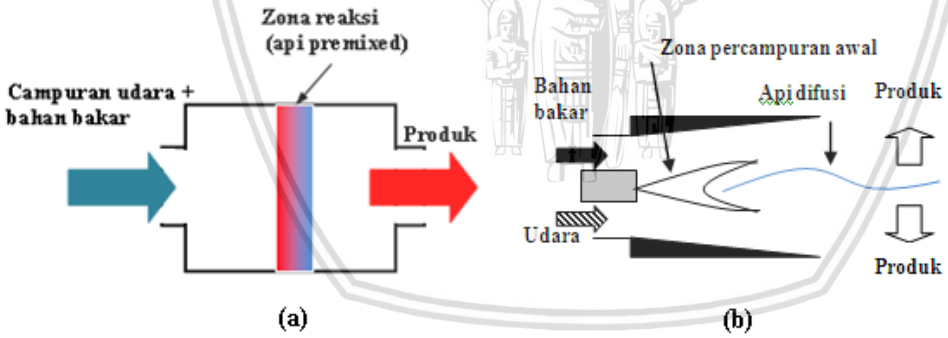
1. Bahan bakar
2. Pengoksidasi (oksigen/udara)
3. Panas atau energi aktivasi.

Energi aktivasi dibutuhkan sebagai pemicu dari molekul-molekul bahan bakar memiliki muatan dengan dilepaskanya satu atau beberapa elektron dari kulit terluar atom atau memutus ikatan rantai molekul. Saat suatu reaksi pembakaran berlangsung, reaksi menghasilkan energi panas dan cahaya dan sebagian energi panas hasil akan menjadi energi aktivasi selanjutnya yang menyebabkan suatu reaksi pembakaran bisa terus berlanjut. Skema dari suatu proses pembakaran ditunjukkan oleh Gambar 2.6.

Gambar 2.6 Ilustrasi proses pembakaran
Sumber: Wardana (2008)

2.2.2 Klasifikasi Pembakaran Berdasarkan Cara Reaktan Terbakar Pada Zona Reaksi

Pembakaran diklasifikasikan menjadi dua berdasarkan cara reaktan terbakar di dalam zona reaksi yaitu, pembakaran *premixed* dan pembakaran *non-premixed* atau difusi. Pembakaran *premixed* adalah proses pembakaran dimana reaktan (bahan bakar dan udara) telah bercampur terlebih dahulu secara mekanik biasanya menggunakan alat berupa *mixing chamber* sebelum terbakar. Sedangkan pembakaran *non-premixed* adalah proses pembakaran dimana reaktan (bahan bakar dan udara) tidak bercampur sebelum terbakar (Wardana, 2008) seperti terlihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 (a) Pembakaran *premixed* dan (b) Pembakaran *non-premixed* atau difusi
Sumber: Wardana (2008)

Kelebihan pembakaran *premixed* yaitu dapat meningkatkan efisiensi pembakaran karena jumlah campuran bahan bakar dan udara dapat kita sesuaikan terlebih dahulu sehingga kadar oksigen pada udara dan bahan bakar berada pada kadar dimana dapat terikat seluruh campurannya sehingga bahan bakar dapat terbakar seluruhnya atau bisa disebut kondisi stoikiometrik.

2.2.3 Reaksi Kimia Pada Proses Pembakaran

Pembakaran merupakan suatu reaksi kimia dimana zat-zat reaktan yaitu bahan bakar dan oksidator bereaksi menjadi produk yaitu zat-zat hasil pembakaran. Dalam reaksi pembakaran proses lepasnya ikatan kimia lemah bahan bakar terjadi akibat pemberian energi dari energi aktivasi yang menjadikan atom-atom bahan bakar bermuatan, yang kemudian bereaksi dengan oksigen membentuk ikatan molekul-molekul kuat yang menghasilkan panas dalam jumlah sangat besar dan cahaya.

Agar suatu reaksi kimia pembakaran dapat berlangsung dengan baik, reaksi kimia pembakaran yang terjadi harus memenuhi 2 hal yaitu kesetimbangan massa dan kesetimbangan energi. Kesetimbangan massa atau stoikiometrik yaitu kondisi pembakaran dimana semua atom dari reaktan yakni pengoksidasi dan bahan bakar bereaksi secara kimia dan menjadi berbagai macam produk atau hasil reaksi. Pembakaran stoikiometrik adalah suatu proses pembakaran sempurna dimana jumlah reaktan yakni bahan bakar dan udara mempunyai jumlah yang tepat untuk bereaksi dan seluruh massa bahan bakar terbakar semua, pada hidrokarbon bahan bakar seluruh atom C dan H dapat berikatan sempurna dengan O_2 membentuk CO_2 dan H_2O.

Tidak mudah untuk tercapainya suatu pembakaran yang sempurna karena dalam udara sebagai oksidator dalam reaktan tidak murni terdiri dari oksigen, tetapi terdapat juga gas-gas lain seperti nitrogen, argon, karbondioksida dan gas-gas lainnya. Karena gas gas lain dalam udara memiliki persentase yang relatif kecil maka, dalam komposisi penyusun reaksi kimia udara kita asumsikan terdiri dari gas nitrogen 79% dan gas oksigen 21%. Berikut ini tabel asumsi persentase volume dan massa gas udara kering.

Tabel 2.1
Komposisi Gas pada Udara Kering

Unsur	M (g/mol)	m (volume %)
N_2	28,02	78,084
O_2	32,01	20,946
Ar	39,96	0,946
CO_2	44,02	0,032

Sumber: Warneck (1988)

Dari asumsi unsur penyusun udara pada tabel maka, persamaan stoikimetrik reaksi kimia pembakaran antara hidrokarbon (*butana*) dengan udara adalah:

$$C_xH_y + \left(x + \frac{y}{4}\right) O_2 + 3{,}76 \left(x + \frac{y}{4}\right) N_2 \longrightarrow x\, CO_2 + \left(\frac{y}{2}\right) H_2O + 3{,}76 \left(x + \frac{y}{4}\right) N_2$$

$$C_4H_{10(g)} + 6{,}5(O_2 + 3{,}76N_2)_{(g)} \longrightarrow 4CO_{2(g)} + 5H_2O_{(l)} + 24{,}44N_{2(g)}$$

Reaktan Produk

Reaksi pembakaran aktual yang sesuai dengan kesetimbangan masa atau stoikiometrik hampir tidak mungkin tercapai. Pertama, karena oksidator yaitu udara yang tidak hanya tersusun oleh oksigen tetapi terdapat gas-gas lainnya. Kedua adalah kecepatan pembakaran yang relativ rendah dan waktu tinggal reaktan relatif cepat. Kecepatan pembakaran yang rendah akan mempengaruhi apakah reaktan terbakar sempurna atau tidak dan waktu tinggal reaktan yang relatif cepat berpengaruh pada jumlah reaktan yang terbakar sebelum meninggalkan ruang bakar.

2.3 Batas Nyala Api dan Sifat Nyala Api

Api yang terbentuk dalam proses pembakaran merupakan hasil dari pelepasan dari energi panas hasil reaksi pembakaran. Api dapat terbentuk apabila terdapat bahan bakar yang bercampur dengan oksidator mendapatkan penambahan energi eksternal untuk mengawali terjadinya reaksi pembakaran. Dalam hal ini terdapat kisaran batas komposisi antara bahan bakar dan udara agar terbentuk api. Menurut Turns et al. (2014) pemunculan dari nyala api akan bergantung pada sifat dari bahan bakar dan kecepatan pancaran bahan bakar terhadap udara di sekitarnya.

Pemunculan nyala api ini juga memiliki kisaran batas bawah atau biasa disebut campuran termiskin maupun kisaran batas atas atau biasa disebut campuran terkaya. Kisaran batas bawah terjadi jika pada kondisi campuran awal minimal akan terbentuk nyala api kecil. Kisaran batas bawah stabilitas nyala api lebih dikenal dengan *lower flammability limits*, sedangkan untuk batas atas stabilitas nyala api dikenal dengan istilah *upper flammability limits.* Melalui kedua parameter ini kita dapat mengetahui sifat dari suatu reaksi pembakaran, apakah reaksi pembakaran memiliki stabilitas nyala api yang tinggi atau sebaliknya. Selain itu dengan mengetahui nilai dari stabilitas nyala api dapat digunakan untuk mengatur komposisi campuran bahan bakar dan udara sehingga reaksi pembakaran dapat terjaga kelangsungannya.

Menurut Mahandari, et al. (2010) sifat nyala api dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. *Flashback* ($S_L > V_u$) dimana kecepatan pembakaran (S_L) lebih besar dari kecepatan reaktan (V_u) yang menyebabkan nyala api merambat kembali menuju sumber bahan bakar yaitu menuju ke tabung bahan bakar.
2. Nyala api stabil ($S_L = V_u$) dimana kecepatan reaktan (V_u) dan kecepatan pembakaran (S_L) memiliki nilai yang sama.
3. *Blow-off* ($S_L < V_u$) dimana kecepatan reaktan (V_u) lebih besar dari kecepatan pembakaran (S_L) yang menyebabkan nyala api akan langsung padam.

4. *Lift-off* dimana nyala api stabil pada jarak tertentu jauh dari mulut *combustor* dan tidak menempel permukaan mulut *combustor* atau bisa dikatakan nyala api terangkat.

2.4 Bahan Bakar

Bahan bakar merupakan sumber energi dalam reaksi pembakaran berupa energi kimia. Kandungan utama dari bahan bakar adalah karbon (C) dan hidrogen (H), sedangkan kandungan minoritas bahan bakar adalah nitrogen (N), sulfur (S), oksigen (O), karbondioksida (CO_2) dan air (H_2O) (Wardana, 2008).

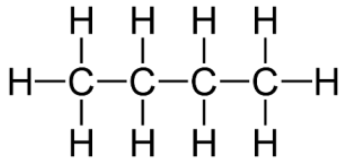
Bahan bakar dibagi menjadi dua kelompok besar berdasarkan prosesnya yaitu, bahan bakar primer dan bahan bakar sekunder. Bahan bakar primer atau bahan bakar alami adalah bahan bakar yang dapat secara langsung digunakan seperti gas alam dan kayu. Sedangkan bahan bakar sekunder atau bahan bakar buatan adalah bahan bakar yang harus diolah terlebih dahulu sebelum dipakai seperti proses destilasi bahan bakar alami minyak bumi menjadi bensin dan solar.

Bahan bakar berdasarkan masa penggunaannya dibagi menjadi dua yaitu, bahan bakar terbarukan dan bahan bakar tak terbarukan. Bahan bakar tak terbarukan adalah seperti bahan bakar fosil yang sewaktu-waktu bisa habis. Sedangkan bahan bakar terbarukan adalah bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar fosil yang sewaktu-waktu bisa habis misalnya, minyak jarak dan *bioethanol.*

Bahan bakar berdasarkan wujudnya di bagi menjadi tiga yaitu, bahan bakar padat, bahan bakar cair, dan bahan bakar gas. Bahan bakar padat yang termasuk bahan bakar alami adalah kayu dan batu bara mentah, sedangkan bahan bakar padat yang termasuk bahan bakar buatan adalah kokas, arang dan bris. Bahan bakar cair yang termasuk bahan bakar alami adalah minyak bumi yang kemudian diproses menjadi bahan bakar cair buatan berupa bensin, solar, dan avtur. Dan bahan bakar gas yang di dapat secara alami berupa gas alam yang kemudian diproses menjadi bahan bakar gas buatan atau *manufactured gas* seperti *liquified petroleum gas* (LPG).

2.5 Butana

Butana adalah gas hidrokarbon yang paling sederhana dengan rumus kimia C_4H_{10}. Butana atau yang juga disebut n-butana merupakan alkana rantai lurus dengan empat atom karbon yaitu $CH_3CH_2CH_2CH_3$. Butana sangat mudah terbakar, tidak berwarna, dan merupakan gas yang mudah dicairkan. Struktur butana pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Struktur ikatan molekul butana (C_4H_{10})
Sumber: Wardana (2008)

Untuk reaksi yang terjadi pada butana yakni ketika oksigen tersedia dalam jumlah yang melimpah, maka butana akan terbakar dan membentuk karbon dioksida dan uap air. Sedangkan, apabila oksigen jumlahnya terbatas, maka akan terbentuk karbon monoksida.

$2\ C_4H_{10} + 13\ O_2 \rightarrow 8\ CO_2 + 10\ H_2O$

Sifat Butana:

1. Massa molar: 58.12 g mol^{-1}
2. Penampilan: Gas tidak berwarna
3. Densitas: 2.48 kg/m^3, gas (15°C, 1 atm)
4. 600 kg/m3, cairan (0°C, 1 atm)
5. Titik lebur: −138.4°C (135.4 K)
6. Titik didih: −0.5°C (272.6 K)
7. Kelarutan dalam air: 6.1 mg/100 ml (20°C)

2.6 AFR (*Air Fuel Ratio*)

Air fuel ratio adalah perbandingan massa udara dengan massa bahan bakar atau juga bisa perbandingan antara mol udara dengan mol bahan bakar. Perbandingan campuran bahan bakar dan pengoksidasi (udara atau oksigen) mempunyai peran peran penting karena dapat mempengaruhi karakteristik dari api yang dihasilkan dari proses pembakaran. Adapun persamaan *air fuel ratio* pada pembakaran dituliskan dalam rumus sebagai berikut.

$$\textit{Air fuel ratio} = \frac{M_{udara}}{M_{bahan\ bakar}} \quad (2\text{-}1)$$

$$\textit{Air fuel ratio} = \frac{N_{udara}}{N_{bahan\ bakar}} \quad (2\text{-}2)$$

Keterangan:

(AFR) = *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)

Berdasarkan pada persamaan (2.1) tersebut kita dapat menghitung nilai *air fuel ratio* stoikiometrik untuk bahan bakar butana.

Tabel 2.2
Massa Atom Relatif (Ar)

Simbol	Unsur	Massa Atom Relatif
H	Hidrogen	1
C	Karbon	12
N	Nitrogen	14
O	Oksigen	16

Sumber: Elsair (2012)

1. Menghitung perbandingan AFR stoikiometrik butana berdasarkan jumlah mol

$$\text{AFR} = \frac{\text{N}_{\text{udara}}}{\text{N}_{\text{bahan bakar}}}$$

$$\text{AFR} = \frac{6{,}5 \text{ x } (1+3{,}76)}{1}$$

$$= 30{,}94 \frac{\text{mol}_{\text{udara}}}{\text{mol}_{\text{bahan bakar}}}$$

2. Menghitung nilai *Air Fuel Ratio (*AFR*)* stoikiometrik butana berdasarkan massa

$$\text{AFR} = \frac{\text{M}_{\text{udara}}}{\text{M}_{\text{bahan bakar}}}$$

$$\text{AFR} = \frac{(6{,}5.(2 \text{ x} 16)) + (6{,}5.(3{,}76 \text{ x } 14 \text{ x } 2))}{(1.((12 \text{ x } 4) + 10))}$$

$$= \frac{892{,}32}{58}$$

$$= 15{,}38 \frac{\text{kg}_{\text{udara}}}{\text{kg}_{\text{bahan bakar}}}$$

Setelah diketahui massa dari udara dan massa bahan bakar maka kita dapat mengetahui perbandingan volume antara volume udara dan volume bahan bakar. Besar volume udara bisa kita ketahui dengan cara pembagian antara massa udara dan massa jenis udara. Begitu pula besar volume bahan bakar dapat kita ketahui dengan cara pembagian antara massa bahan bakar dan massa jenis bahan bakar. Rumus tersebut dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\rho \equiv \frac{m}{v} \qquad (2\text{-}3)$$

Keterangan:

ρ = Massa jenis (gr/cm^3)

m = Massa (gr)

v = Volume (cm^3)

Dari rumus diatas kita dapat menghitung perbandingan volume dengan menggunakan persamaan $V \equiv \frac{m}{\rho}$ dan juga diketahui massa jenis udara pada suhu 27ºC adalah sebesar

0,0012 gr/cm^3 atau 1,2 kg/m^3. Sedangkan massa jenis bahan bakar butana adalah sebesar 0,00248 gr/cm^3 atau 2,48 kg/m^3. Kita dapat menghitung volume udara dan volume bahan bakar adalah:

$$Vudara \equiv \frac{m}{\rho} \quad (2\text{-}4)$$

$V_{udara} = \frac{892,32}{0,0012} = 743.600\ cm^3$

$$V_{bahan\ bakar} = \frac{m}{\rho} \quad (2\text{-}5)$$

$V_{bahan\ bakar} = \frac{58}{0,00248} = 23.387,09\ cm^3$

Dengan demikian maka perbandingan antara volume udara dan bahan bakar adalah:

$V_{udara} : V_{bahanbakar}$

$743,6\,dm^3 : 23,39\,dm^3$

$31,79\,L : 1\,L$

2.7 Rasio Ekuivalen (Φ)

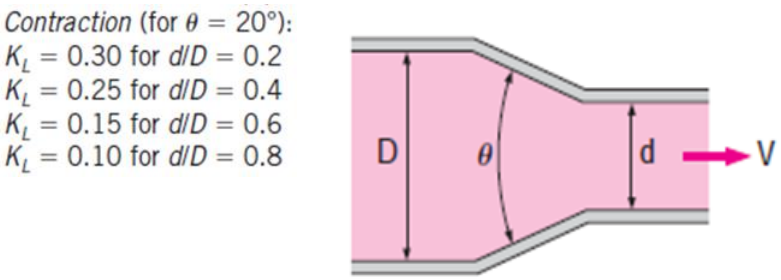
Besar Rasio Ekuivalen sesuai dengan perbandingan antara AFR stoikiometri dan AFR aktualnya. Sehingga rasio ekuivalen dapat dirumuskan dengan:

$$\Phi = \frac{AFR_{stoikiometri}}{AFR_{aktual}} \quad (2\text{-}6)$$

1. Disaat Φ > 1 mengindikasikan terdapat kelebihan bahan bakar pada campuran (*Fuel rich mixture*).
2. Disaat Φ < 1 maka terdapat kekurangan bahan bakar pada campuran (*Fuel lean mixture*).
3. Disaat Φ = 1 maka campuran disebut stoikiometri.

2.8 Koefisien *Losses*

Fluida pada sistem *piping* pada umumnya akan melewati berbagai macam benda, katup, lekukan, *elbows, inlet, outlet*, pembesaran, *contraction*. Komponen tersebut akan mengganggu kelancaran aliran fluida dan menyebabkan *losses*/hambatan yang biasanya di lambangkan dengan K_L (*Cengel*, 2006). Salah satu efek dari *losses* hasil dari *contraction* adalah semakin besar diameter *outlet* maka hambatan semakin kecil. Seperti dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Koefisien losses ($K_{L)}$
Sumber: *Cengel (*2006)

2.9 Hipotesis

Dengan berbagai pustaka dan hasil penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya yang berkaitan dengan topik pada karya ilmiah ini, maka dapat ditarik hipotesis bahwa variasi diameter *outlet* dapat mempengaruhi stabilitas nyala api dan distribusi temperatur pada *circular disk combustor*. Semakin kecil diameter *outlet* maka hambatan semakin besar, Akibatnya pada debit reaktan yang sama dan hambatan yang lebih besar butuh tekanan yang lebih besar agar fluida di dalam combustor bisa mengalir ke luar. Tekanan yang tinggi di dalam *combustor*, akan membuat densitas reaktan lebih tinggi dan waktu tinggal reaktan lebih lama, yang menyebabkan pembakaran lebih sempurna sehingga meningkatkan kestabilan pembakaran dan temperatur dinding lebih tinggi.

BAB III
METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah *experimental research* dengan melakukan penelitian langsung pada objek yang diteliti lalu didapatkan data diolah dan dianalisa kemudian dihasilkan berupa kesimpulan dari objek yang diteliti.

3.1 Tempat dan Waktu Pelaksanaan

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Mesin-Mesin Fluida, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya di Jl. Mayjend Haryono No. 167, Kota Malang, Jawa Timur, Indonesia pada bulan Maret 2018 sampai dengan Juli 2018.

3.2 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Variabel Bebas

   Variabel bebas adalah variabel yang ditentukan oleh peneliti itu sendiri dimana tidak tergantung oleh variabel lainnya. Variabel bebas pada penelitian ini adalah:

   a. Variasi saluran diameter *outlet* 2.5 mm, 3.5 mm, 4.5 mm.
   b. Debit udara (Qa) dan debit bahan bakar (Qf) divariasikan pada rasio ekuivalen (ϕ) yang masih dapat menimbulkan terjadinya proses pembakaran.

2. Variabel Terikat

   Variabel terikat adalah variabel yang hasilnya bergantung pada variabel bebas yang didapat setalah proses penelitian. Variabel terikat penelitian ini adalah:

   a. Kestabilan nyala api atau *flame stability limits*
   b. Temperatur dinding *combustor*
   c. Visualisasi nyala api

3. Variabel Terkontrol

   Variabel terkontrol adalah variabel yang nilainya dijaga tetap atau konstan selama proses penelitian berlangsung. Variabel terkontrol pada penelitian ini adalah:

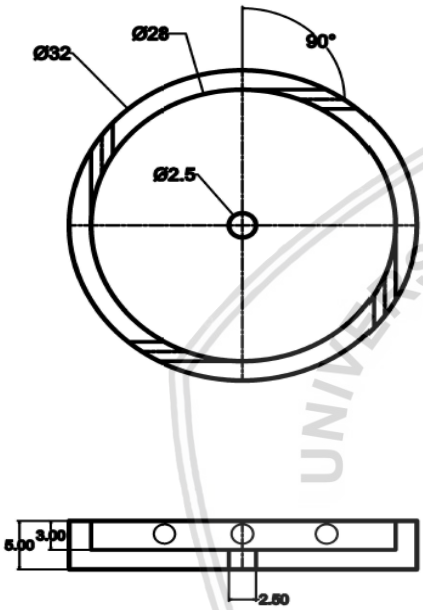
   a. Material *combustor* menggunakan Tembaga (Cu)
   b. Dimensi *combustor* berukuran 28 mm
   c. Dimensi *combustor* dengan tebal 3 mm
   d. 4 *inlet combustor* dengan sudut 90^o

3.3 Peralatan Penelitian

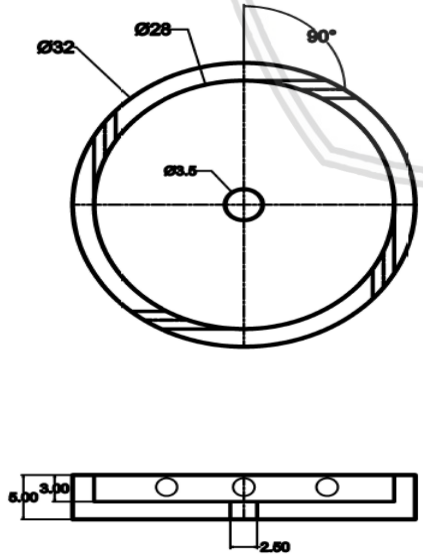
Peralatan penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. *Circular disk combustor*

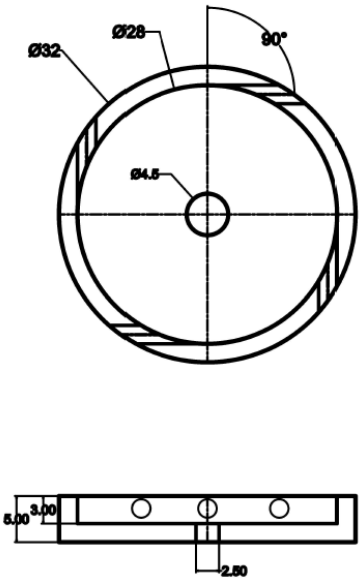
   Circular disk combustor adalah alat utama pada penelitian ini, dimana akan diamati hasil pembakaran pada *circular disk combustor* yang berjenis *meso-scale combustor*. Penelitian ini menggunakan 3 buah *combustor* dengan variasi diameter *outlet*, material *combustor* yang digunakan adalah tembaga dengan dimensi satuan adalah milimeter, seperti Gambar 3.1, Gambar 3.2, Gambar 3.3.



Gambar 3.1 Circular disk *combustor* dengan D_o = 2.5 mm



Gambar 3.2 Circular disk combustor dengan D_o = 3.5 mm



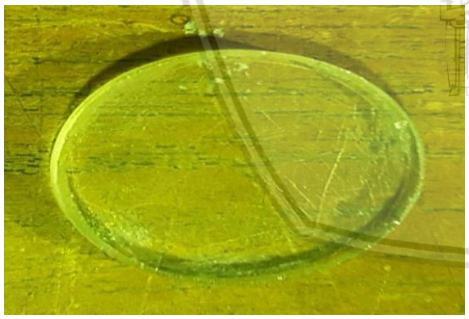
Gambar 3.3 Circular disk combustor dengan D_o = 4.5 mm

Spesifikasi Material Tembaga (Cu):

a. Densitas : 8,96 g/cm^3
b. Titik Lebur : 1084,62^{o}C

2. Kaca Tahan Panas Api

Kaca tahan panas api adalah kaca transparan yang digunakan sebagi penutup permukaan *combustor* dan untuk pengambilan data visualisasi nyala api sehingga dibutuhkan material yang tahan terhadap panas api hasil pembakaran. Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Kaca tahan panas api

Spesifikasi Kaca:

a. Merek : *Pyrex*
b. Bahan : *Borosilicate*
c. Suhu Maksimal : 500^{o}C

3. Lem Tahan Panas Api

Lem tahan api berfungsi sebagai penggabung antara kaca tahan panas api dengan *Circular disk combustor* dan juga sebagai isolator agar panas api hasil pembakaran tidak berpindah ke lingkungan. Gambar 3.5.

Gambar 3.5 Lem tahan panas api

Spesifikasi Lem:

a. Merek : *PC-Fahrenheit*
b. Berat : 180 gr
c. Suhu Maksimal : 260^{o}C

4. Butana (C_4H_{10})

Butana (C_4H_{10}) berfungsi sebagai bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini. Kandungan butana yang digunakan diasumsikan mengandung murni 100% butana (C_4H_{10}). Gambar 3.6.

Gambar 3.6 Tabung bahan bakar butana (C_4H_{10})

Spesifikasi tabung bahan bakar butana (C_4H_{10}):

a. Merek : WINN GAS
b. Berat bersih : 235 gr

5. Regulator Butana

Regulator Butana digunakan untuk mengalirkan bahan bakar butana (C_4H_{10}) dari tabung bahan bakar butana (C_4H_{10}) menuju *flowmeter* bahan bakar. Gambar 3.7.

Gambar 3.7 Regulator butana

6. *Flowmeter* Udara dan *Flowmeter* Bahan Bakar

   Flowmeter pada penelitian ini digunakan untuk mengukur debit udara dan bahan bakar yang masuk menuju *meso-scale combustor*. *Flowmeter* yang digunakan adalah *flowmeter* udara, untuk mengukur debit bahan bakar dan udara *flowmeter* akan dikalibrasi sebelum digunakan. Gambar 3.8.

(a) (b)

Gambar 3.8 (a) *Flowmeter* udara dan (b) *Flowmeter* bahan bakar

Spesifikasi *flowmeter* udara:

a. Merek : Kofloc
b. *Maximum flow* : 5 L/min
c. *Minimum flow* : 0.5 L/min
d. Skala terkecil : 0.5 L/min

Spesifikasi *flowmeter* bahan bakar:

a. Merek : Kofloc
b. *Maximum flow* : 100 ml/min
c. *Minimum flow* : 10 ml/min
d. Skala terkecil : 10 ml/min

7. *Inlet Connector* dan T-*Connector*

   Inlet Connector berfungsi untuk menghubungkan/mengalirkan reaktan kedalam *combustor* dan T-*Connector* berfungsi untuk membagi 2 saluran reaktan yang berasal dari *Y-Connector*. Gambar 3.9.

(a) (b)

Gambar 3.9 (a) *Inlet Connector* (b) *T-Connector*

8. *Y-Connector*

   Y-Connector berfungsi pengganti *mixing chamber* untuk mencampur udara dan bahan bakar sebelum masuk ke dalam *Circular disk combustor*. Gambar 3.10.

Gambar 3.10 Y-Connector

9. Pemantik

   Pemantik berfungsi sebagai energi aktivasi agar terjadi pembakaran di dalam ruang bakar. Gambar 3.11.

Gambar 3.11 Pemantik

10. Kompresor

    Kompresor digunakan untuk menyuplai udara bebas. Gambar 3.12.

Gambar 3.12 Kompresor

Spesifikasi kompresor:

a. Merek : Lakoni
b. *Power* : 0,75 HP/0,5 KW
c. *Voltage* : 220 V/50 Hz
d. *Outlet pressure* : 8 Bar
e. Kapasitas tangki : 10 Liter
f. *Rated speed* : 2850 rpm
g. *Flow* : 120 Liter/min

11. Selang/Pipa Saluran

    Selang/pipa saluran berfungsi menghubungkan atau mengalirkan reaktan ke dalam *circular disk combustor*. Gambar 3.13.

Gambar 3.13 Selang/Pipa saluran

12. *Thermocouple*

    Thermocouple adalah sebuah sensor suhu yang diguakan untuk mengukur temperatur dinding *combustor* pada *circular disk combustor.*

    Spesifikasi *thermocouple*:

    a. Tipe : *K-Type*
    b. *Range* suhu : -270^{o}C – 1320^{o}C

13. Data *Logger*

    Data *logger* digunakan untuk menerima data temperatur dinding *circular disk combustor.*

    Spesifikasi Data *logger*:

    a. Merek : Advantech
    b. *Channels* : 8
    c. *Input Type* : mV, V, mA
    d. *Input range* : J, K, T, E, R, S, dan B
    e. *Accuracy* : ±0.1%

14. Laptop

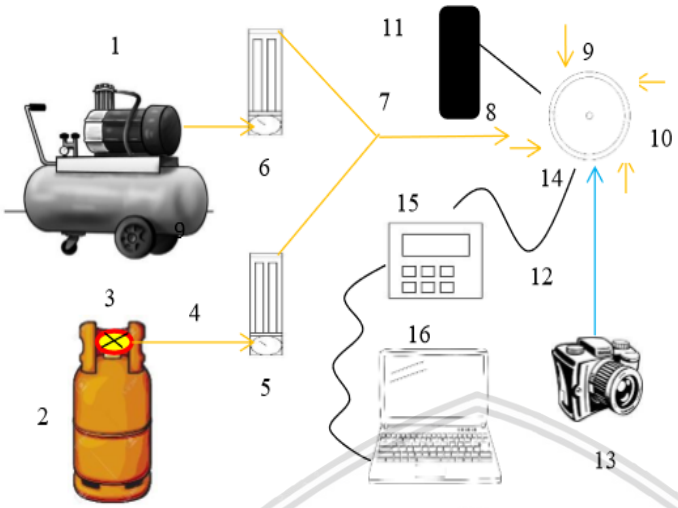
    Digunakan untuk menyimpan dan mengolah data hasil penelitian.

15. Kamera

    Kamera digunakan untuk mengambil data visualisasi nyala api.

3.4 Skema Instalasi Penelitian

Skema instalasi penelitian ini adalah seperti pada Gambar 3.14.



Keterangan:

1. Kompresor
2. Tabung bahan bakar (Butana)
3. Regulator bahan bakar
4. Selang/pipa saluran (kuning)
5. *Flowmeter* bahan bakar
6. *Flowmeter* udara
7. *Y-Connector*
8. *T-Connector*
9. *Inlet Connector*
10. *Combustor*
11. Pemantik
12. Kabel (hitam)
13. Kamera
14. *Thermocouple*
15. Data *Logger*
16. Laptop

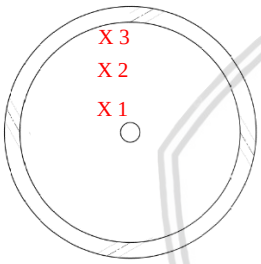
Gambar 3.14 Skema penelitian

3.5 Metode Pengambilan Data

Metode pengambilan data pada penelitian ini adalah:

1. Menyiapkan *circular disk combustor* dan memastikan tidak ada kebocoran atau kerusakan.
2. Menyusun peralatan sesuai dengan skema penelitian.
3. Melakukan pengambilan data kestabilan nyala api/*flame stability limit* sekaligus data visusalisasi nyala api menggunakan kamera.
4. Membuka katup regulator bahan bakar yang terpasang pada tabung butana dan katup udara pada kompresor.
5. Mengatur debit bahan bakar butana menggunakan *flowmeter* bahan bakar dan mengatur debit udara menggunakan *flowmeter* udara.

6. Menyalakan api pada *circular disk combustor* dengan pemantik.
7. Debit bahan bakar butana dan debit udara divariasikan pada rasio ekuivalen tertentu sampai menemukan debit batas minimum dan maksimum.
8. Pengambilan data dilakukan pada campuran debit bahan bakar (butana) dan udara di mana api dapat menyala stabil selama 3 menit atau lebih.
9. Mencatat nilai-nilai debit udara dan bahan bakar ketika api menyala dengan stabil selama 3 menit atau lebih.
10. Melakukan pengambilan data temperatur dinding *combustor* menggunakan *thermocouple* yang terhubung dengan data *logger* dan laptop. *Thermocouple* diletakkan pada titik-titik dimana masih berada dalam daerah *flame stability limit* pada dinding *combustor* dan baca data yang dihasilkan pada laptop. Titik pengambilan data temperatur dinding *combustor* seperti pada Gambar 3.15.



Gambar 3.15 Titik pengambilan data temperatur dinding *combustor*

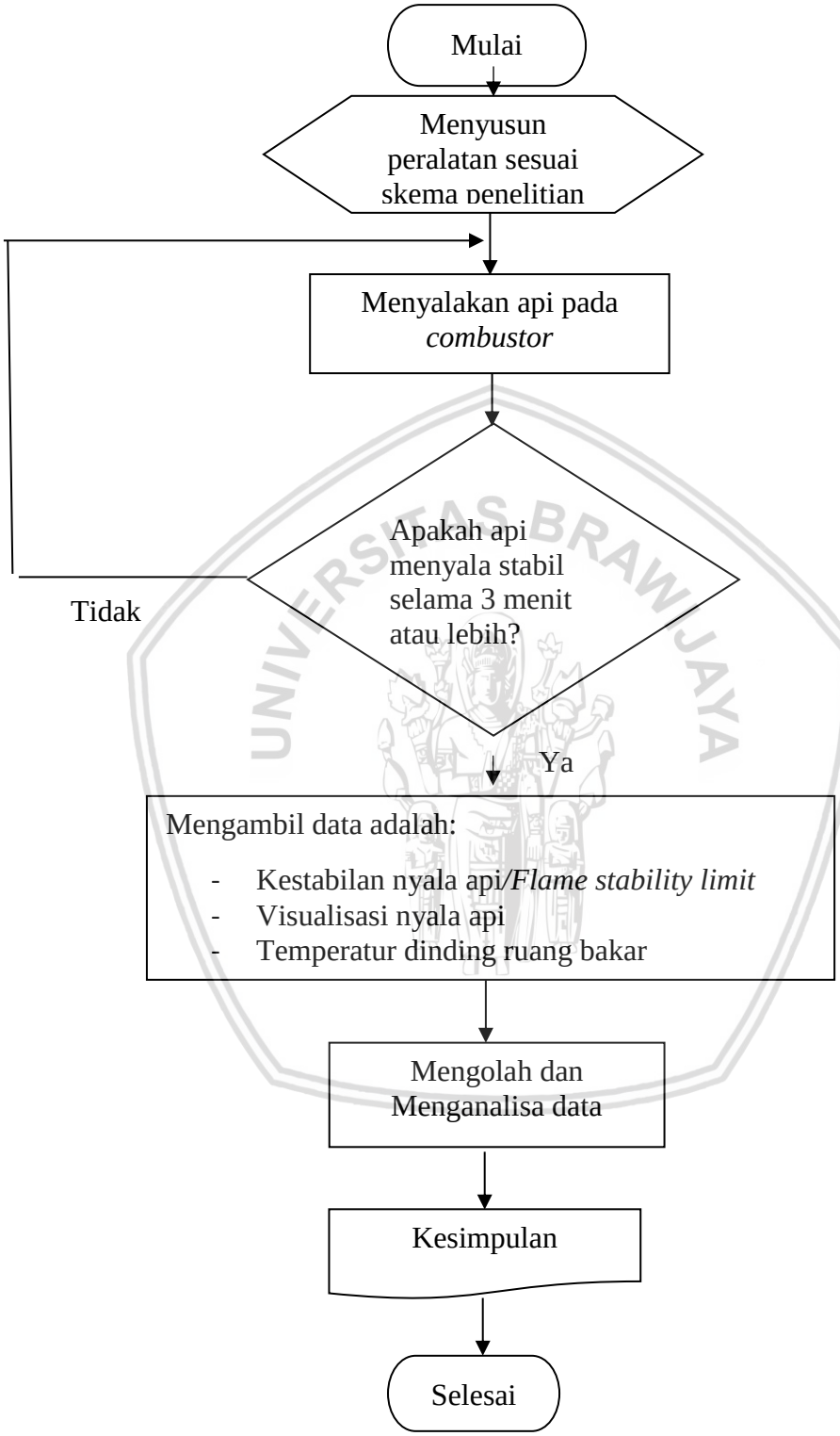
Keterangan:

X 1 : Titik 3 mm dari titik pusat *combustor*

X 2 : Titik 7 mm dari titik pusat *combustor*

X 3 : Titik 14 mm dari titik pusat *combustor*

3.6 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.16 Diagram alir penelitian

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

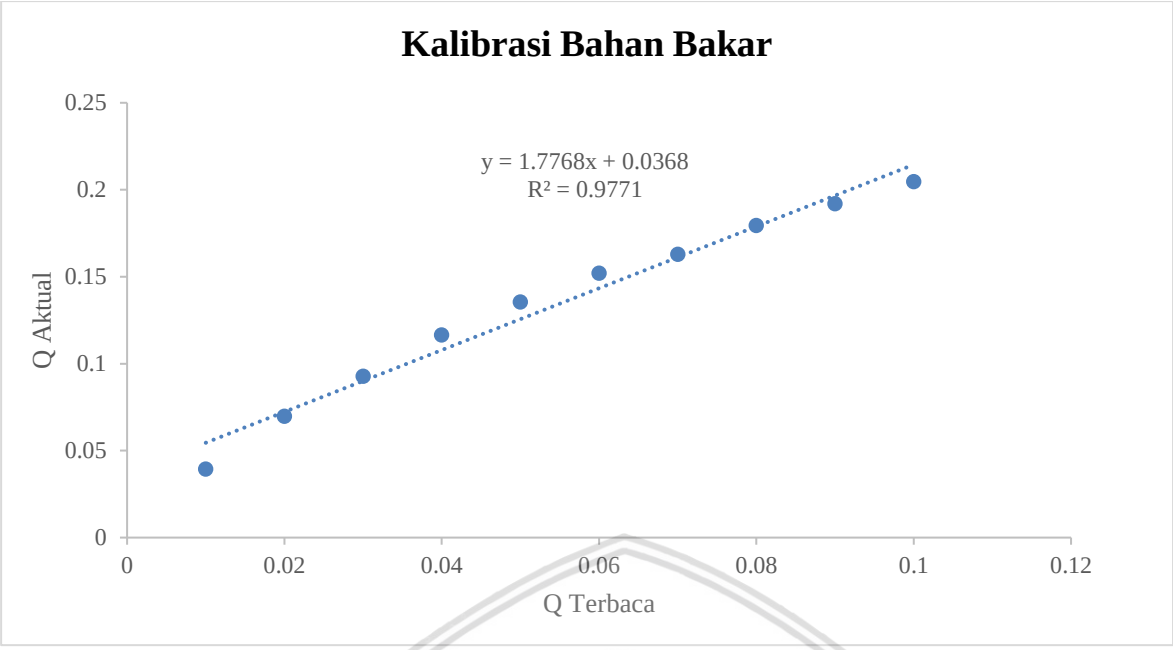
4.1 Kalibrasi Flowmeter

Data hasil penelitian ini didapat dengan metode *experimental research* tentang pengaruh besar diameter *outlet* diantaranya adalah 2.5 mm, 3.5 mm, 4.5 mm terhadap karakteristik pembakaran dengan pembakaran *premixed* yang terjadi pada *meso-scale combustor* berbentuk *disk-type circular* atau *circular disk combustor* dengan bahan bakar butana (C_4H_{10}). Data karakteristik pembakaran pada penelitian ini meliputi batas kestabilan nyala api, visualisasi nyala api, dan temperatur dinding *combustor*.

Sebelum melakukan pengambilan data, *flowmeter* dikalibrasi terlebih dahulu untuk mengetahui hubungan antara debit yang terbaca pada *flowmeter* dan debit aktualnya. Proses kalibrasi *flowmeter* dimulai dengan mengisi air hingga penuh pada bak penampung. Kemudian siapkan gelas ukur lalu isi penuh dengan air dalam bak dan posisikan terbalik sedikit ditarik keatas permukaan air dimana air masih terisi penuh pada gelas ukur yang berada pada posisi tegak. Alirkan udara/bahan bakar butana dari kompresor/tabung bahan bakar butana menggunakan selang menuju *flowmeter* dengan mengatur debit yang terbaca pada *flowmeter*. Selang dari *flowmeter* yang sudah diatur debit terbacanya dimasukkan pada permukaan air lalu kedalam gelas ukur yang terisi penuh dengan air. Udara/bahan bakar butana mulai mengalir kedalam gelas ukur dan volume air pada gelas ukur akan terus berkurang dikarenakan udara/bahan bakar butana memenuhi ruang dalam gelas ukur. Catat waktu yang dibutuhkan untuk mencapai volume yang diinginkan pada gelas ukur. Data kalibrasi *flowmeter* dimasukkan pada Tabel 4.1 dan 4.2.

Tabel 4.1
Data Kalibrasi *Flowmeter* Bahan Bakar Butana (C_4H_{10})

$Q_{terbaca}$ (ml/min)	Waktu (s)	$V_{gelas\ ukur}$ (ml)	Q_{aktual} (ml/min)
10	30,45	20	39,40
20	34,43	40	69,71
30	38,79	60	92,82
40	41,19	80	116,53
50	44,32	100	135,37
60	47,37	120	152,01
70	51,55	140	162,94
80	53,53	160	179,35
90	56,28	180	191,91
100	58,62	200	204,71



Gambar 4.1 Hubungan Q terbaca dan Q aktual pada *flowmeter* butana (C_4H_{10})

Dari *trendline* pada grafik kalibrasi *flowmeter* bahan bakar butana (C_4H_{10}) dihasilkan persamaan berikut ini.

y=1,7768x+36,751

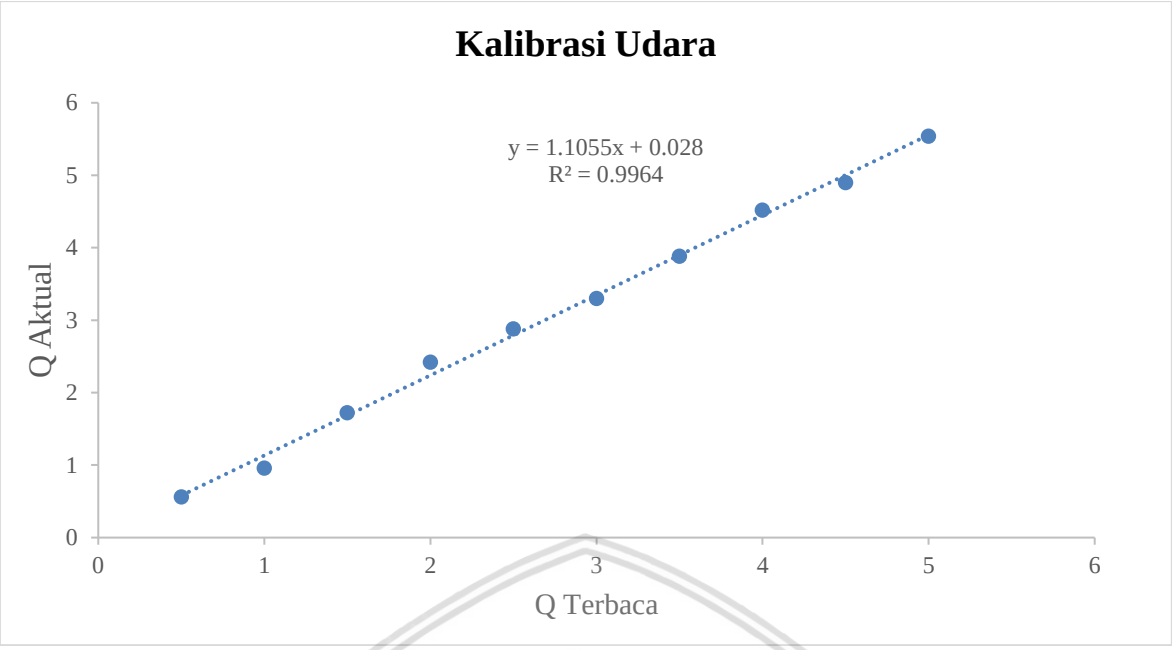
Dimana:

y = Q_f aktual (ml/min)

x = Q_f terbaca (ml/min)

Tabel 4.2
Data Kalibrasi *Flowmeter* Udara

$Q_{terbaca}$ (L/min)	Waktu (s)	$V_{gelas\ ukur}$ (ml)	Q_{aktual} (L/min)
0,5	10	93,33	0,56
1	10	160	0,96
1,5	10	286,67	1,72
2	10	403,33	2,42
2,5	10	480	2,88
3	10	550	3,3
3,5	10	646,67	3,88
4	10	753,33	4,52
4,5	10	816,67	4,9
5	10	923,33	5,54



Gambar 4.2 Hubungan Q terbaca dan Q aktual pada *flowmeter* udara

Dari *trendline* pada grafik kalibrasi *flowmeter* udara dihasilkan persamaan berikut ini.

$$y = 1{,}1055x + 0{,}028$$

Dimana :

y : Q_a aktual (l/min)

x : Q_a terbaca (l/min)

4.2 *Flame Stability Limits*

Data *flame stability limits* diperoleh dengan cara memvariasikan debit bahan bakar (Q_f) dan debit udara (Q_a) pada beberapa rasio ekuivalen (ϕ) tertentu sehingga di dapatkan batas maksimum dan minimum yang betujuan untuk mengetahui kebutuhan debit reaktan atau campuran udara dan bahan bakar dimana pembakaran yang dihasilkan masih memiliki nyala api yang stabil. Untuk mengetahui nilai rasio ekuivalen (ϕ) dan kecepatan reaktan ($V_{reaktan}$).

1. Untuk $\phi = 1$.

$$\phi = \frac{(AFR)_{stoikiometri}}{(AFR)_{aktual}}$$

$$\phi = \frac{30{,}94}{(AFR)_{aktual}}$$

$$(AFR)_{aktual} = \frac{30{,}94}{1}$$

$$(AFR)_{aktual} = 30{,}94$$

2. $V_{reaktan} = \frac{Q_f + Q_a}{3{,}14 \times r^2 \times \Sigma Inlet}$

$$V_{reaktan} = \frac{\frac{(55+2183{,}02)}{60}\ ml/s}{\frac{(3{,}14 \times 0{,}8^2 \times 4)}{100}\ cm^2}$$

$V_{reaktan}$ =452,62 cm/s

Tabel 4.3
Data Batas Kestabilan Nyala Api untuk *Circular Disk Combustor* dengan Diameter *Outlet* 2,5 mm

Rasio Ekuivalen (ϕ)	$Q_{f\ min}$ (ml/min)	$Q_{a\ min}$ (L/min)	$Q_{f\ maks}$ (ml/min)	$Q_{a\ maks}$ (L/min)	$V_{reaktan\ min}$ (cm/s)	$V_{reaktan\ maks}$ (cm/s)	Stabil	Padam
0,8	55	2,1	143	5,6	452,62	1181,60	✓	X
1	55	1,7	179	5,6	360,94	1188,97	✓	X
1,4	55	1,1	179	4,0	246,33	868,07	✓	X
1,8	55	0,9	179	3,2	200,49	707,62	✓	X
2	55	0,9	179	2,7	189,12	593,02	✓	X

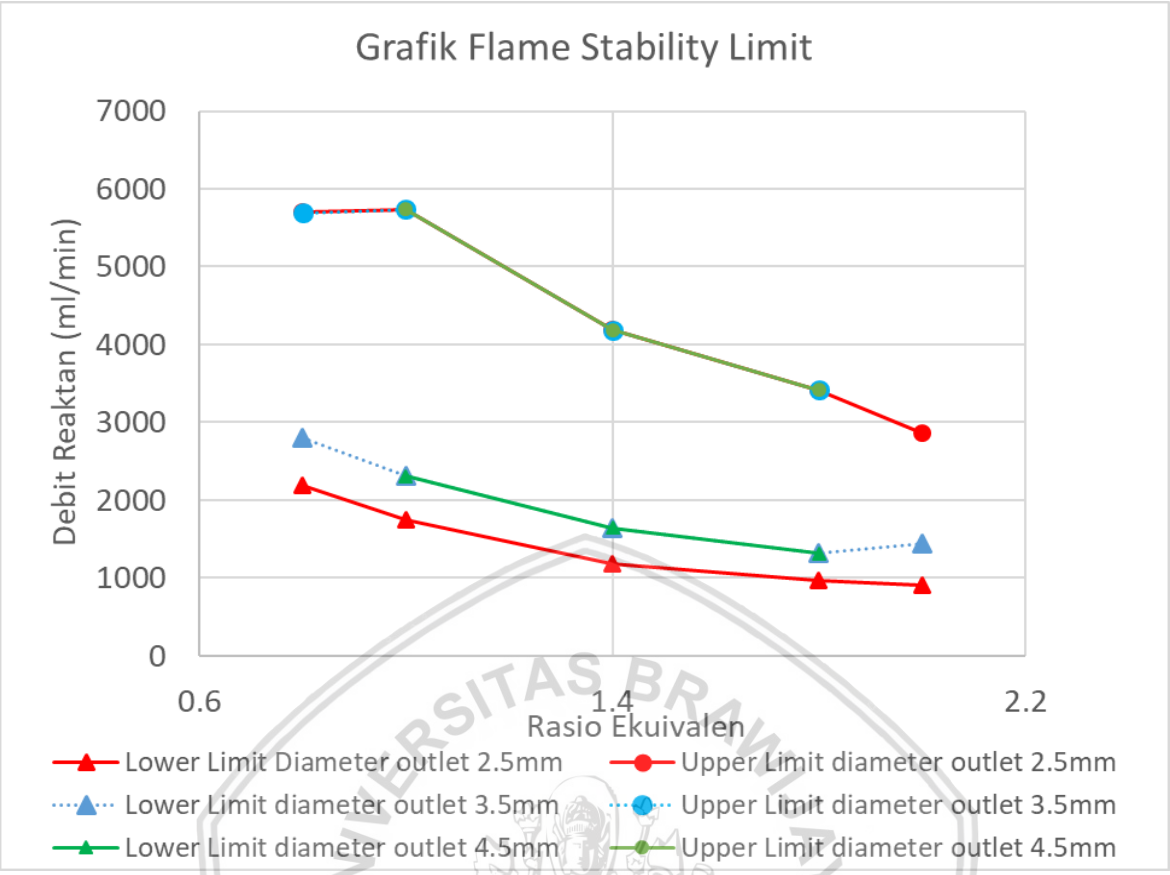
Tabel 4.4
Data Batas Kestabilan Nyala Api untuk *Circular Disk Combustor* dengan Diameter *Outlet* 3,5 mm

Rasio Ekuivalen (ϕ)	$Q_{f\ min}$ (ml/min)	$Q_{a\ min}$ (L/min)	$Q_{f\ maks}$ (ml/min)	$Q_{a\ maks}$ (L/min)	$V_{reaktan\ min}$ (cm/s)	$V_{reaktan\ maks}$ (cm/s)	Stabil	Padam
0,8	72	2,7	135	5,6	735,0	1181,60	✓	X
1	72	2,2	179	5,6	479,2	1188,97	✓	X
1,4	72	1,6	179	4,0	341,7	868,07	✓	X
1,8	72	1,2	179	3,2	272,9	707,62	✓	X
2	90	1,4	-	-	299,5	-	✓	X

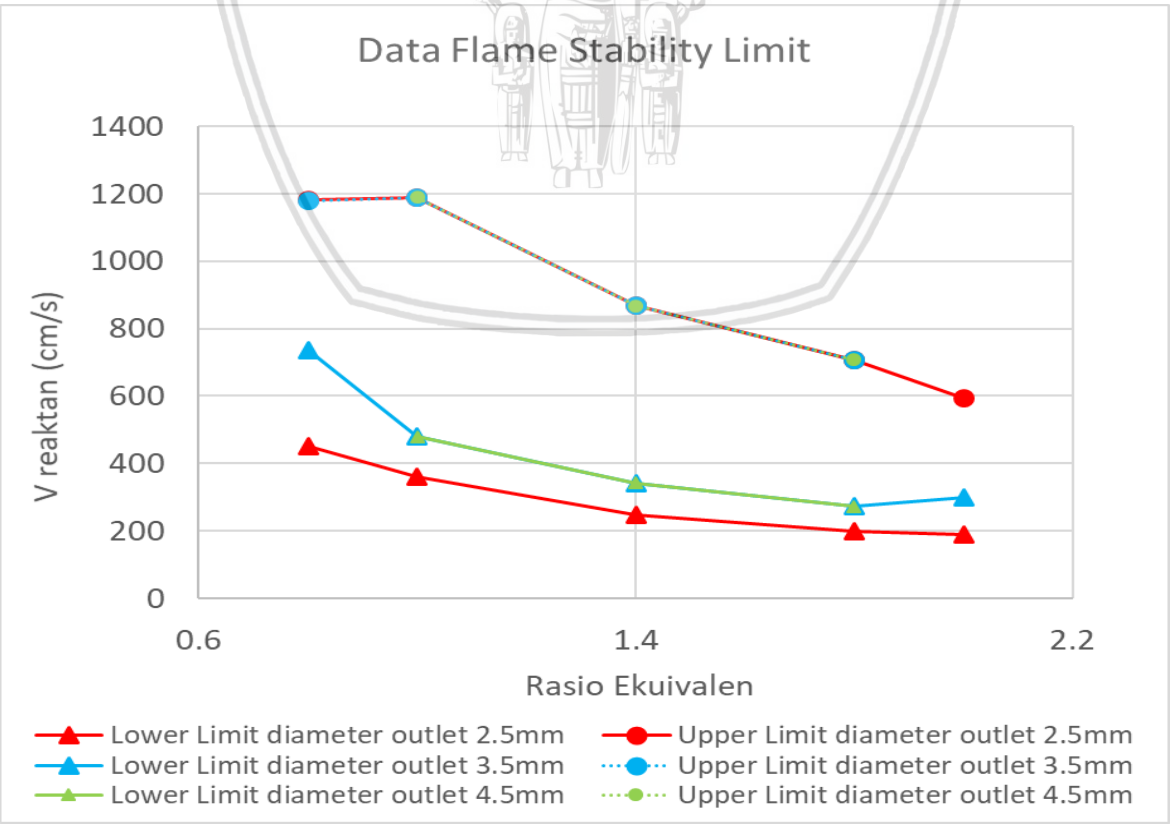
Tabel 4.5
Data Batas Kestabilan Nyala Api untuk *Circular Disk Combustor* dengan Diameter *Outlet* 4,5 mm

Rasio Ekuivalen (ϕ)	$Q_{f\ min}$ (ml/min)	$Q_{a\ min}$ (L/min)	$Q_{f\ maks}$ (ml/min)	$Q_{a\ maks}$ (L/min)	$V_{reaktan\ min}$ (cm/s)	$V_{reaktan\ maks}$ (cm/s)	Stabil	Padam
0,8	-	-	-	-	-	-	X	✓
1	72	2,2	179	5,6	479,2	1189,0	✓	X
1,4	72	1,6	179	4,0	341,7	868,1	✓	X
1,8	72	1,2	179	3,2	272,9	707,6	✓	X
2	-	-	-	-	-	-	X	✓

Dari rumus dan Tabel 4.3, 4.4, 4.5 maka kita mendapatkan grafik perbandingan kecepatan reaktan dengan rasio ekuivalen dan grafik perbandingan debit total reaktan dengan rasio ekuivalen.



Gambar 4.3 Flame Stability Limit perbandingan debit reaktan total dengan variasi rasio ekuivalen pada *circular disk combustor*



Gambar 4.4 Flame Stability Limit dalam perbandingan antara kecepatan reaktan dengan variasi rasio ekuivalen pada *circular disk combustor*

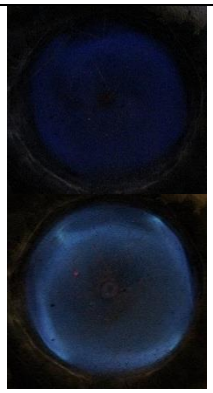
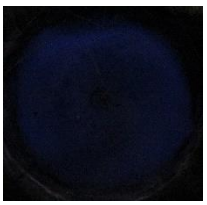
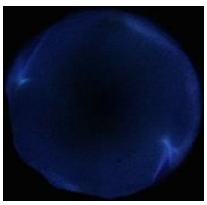
Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 menjelaskan kestabilan nyala api dengan menunjukkan batas maksimum dan batas minimum dimana api masih bisa menyala dengan variasi besar diameter *outlet* reaktan pada *circular disk combustor*. Pada *circular disk combustor* dengan diameter saluran *outlet* 2.5 mm, api menyala dari rasio ekuivalen 0.8 sampai rasio ekuivalen sampai 2.0 mulai dari debit bahan bakar 55 sampai 179 ml/min. Pada diameter saluran *outlet* 3.5 mm, api bisa menyala dari rasio ekuivalen 0.8 sampai 2.0 dari debit bahan bakar 72 sampai 179 ml/min. Pada diameter saluran *outlet* 4.5 mm, api bisa menyala dari rasio ekuivalen 1.0 sampai 1.8 dari debit bahan bakar 72 sampai 179 ml/min.

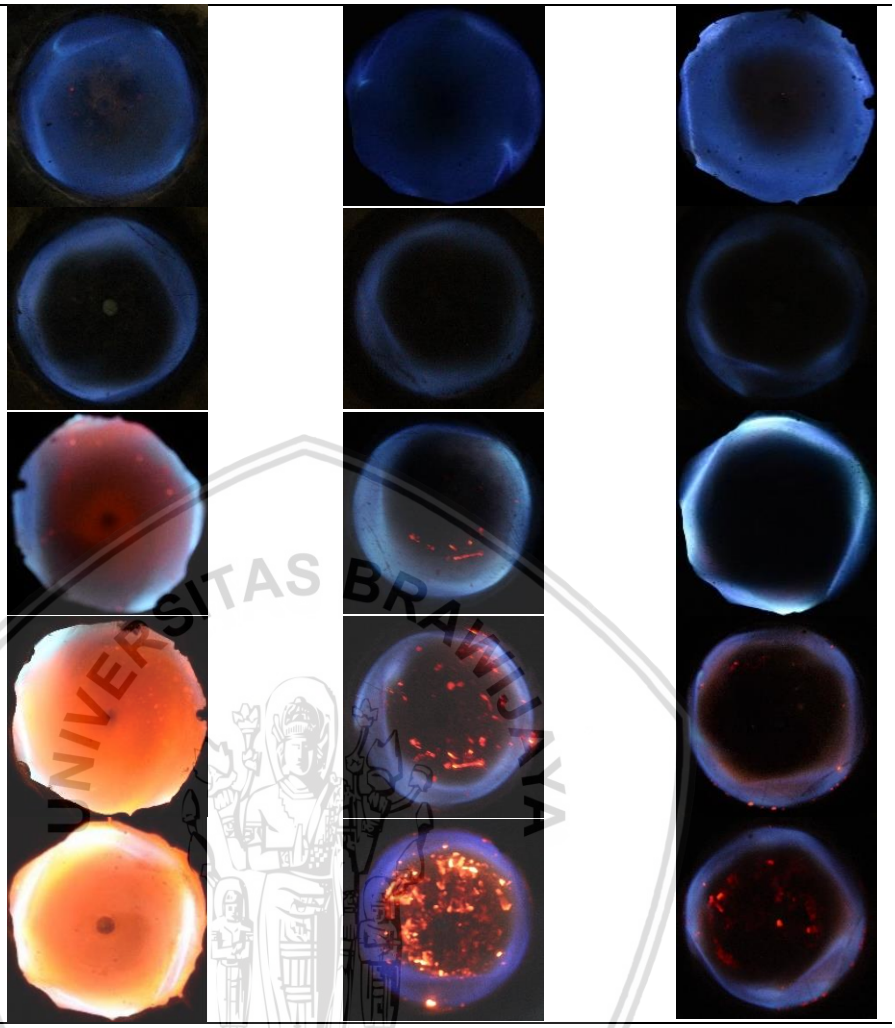
Perbedaan dalam grafik terletak pada luas dari *flame stability limit* setiap variasi diameter saluran *outlet.* Diameter saluran *outlet* 2,5 mm memiliki rentang *flame stabilty limits* yang paling luas diantara semua variasi. Hal ini disebabkan pada diameter *outlet* 2.5 mm maka hambatan semakin besar, yang mengakibatkan perbedaan tekanan yang lebih besar agar fluida di dalam *combustor* bisa mengalir ke luar. Sehingga tekanan di dalam *combustor* tadi akan membuat densitas reaktan lebih tinggi dan waktu tinggal reaktan lebih lama, yang menyebabkan pembakaran lebih sempurna sehingga meningkatkan kestabilan pembakaran dan temperatur dinding lebih tinggi.

4.3 Pengolahan dan Pembahasan Data Visualisasi Nyala Api

Pengambilan data visualisasi nyala api mengacu pada *flame stability limit* seperti pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4. Data di ambil pada beberapa titik untuk mengetahui pengaruh besar diameter *outlet* pada kenaikan rasio ekuivalen dan kenaikan debit reaktan.

Tabel 4.6
Data visualisasi nyala api pada variasi Q_f dengan $\phi = 1$

Debit bahan bakar (ml/min)	*Combustor* dengan *outlet* 2,5 mm	*Combustor* dengan *outlet* 3,5 mm	*Combustor* dengan *outlet* 4,5 mm
$Q_f = 55$			
$Q_f = 72$			

Debit bahan bakar (ml/min)	*Combustor* dengan *outlet* 2,5 mm	*Combustor* dengan *outlet* 3,5 mm	*Combustor* dengan *outlet* 4,5 mm
Q_f = 90			
Q_f = 108			
Q_f = 135			
Q_f = 143			
Q_f = 179			

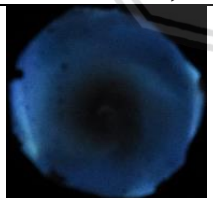
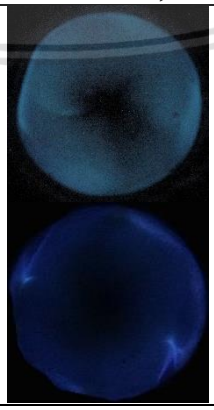
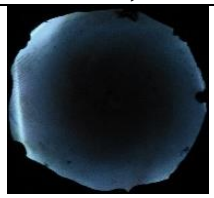
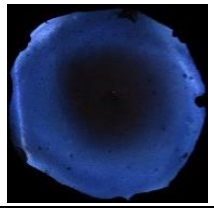
Tabel 4.6 menunjukkan visualisasi bentuk nyala api pada rasio ekuivalen (ϕ) 1 dan debit reaktan dari 55 ml/min sampai 179 ml/min dengan variasi besar diameter *outlet*. Pada tabel diatas terlihat bahwa *circular disk combustor* dengan besar diameter *outlet* 2.5 mm bisa menyala pada debit bahan bakar 55 ml/min karena dengan besar diameter *outlet* 2.5 mm mampu mengondisikan aliran reaktan dalam ruang bakar agar terjadi perputaran dalam ruang bakar dan akhirnya keluar melalui saluran *outlet.* Dengan diameter *outlet* kecil aliran reaktan mampu memiliki waktu tinggal dalam ruang bakar lebih lama dalam ruang bakar daripada *circular disk combustor* dengan besar diameter *outlet* 3.5 mm dan 4.5nmm. *Circular disk combustor* dengan besar diameter *outlet* 3.5mm dan 4.5mm juga memungkinkan suatu aliran reaktan dalam ruang bakar untuk terjadi *swirling flow* sebelum akhirnya terbuang melalui saluran *outlet*, namun butuh kecepatan dan debit reaktan lebih besar agar terjadi perputaran aliran yang stabil agar dapat terjadi pembakaran yang stabil dalam ruang bakar Yoon, et al. (2011). Hasilnya, pada besar diameter *outlet* 2.5 mm dengan debit bahan bakar 55 ml/min

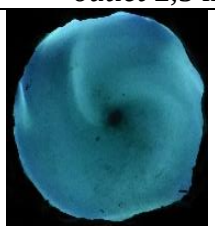
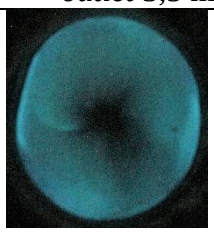
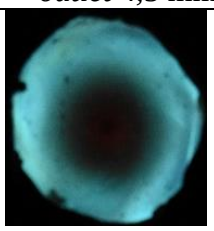
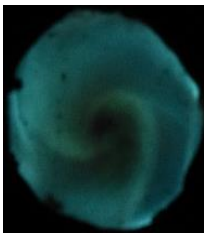
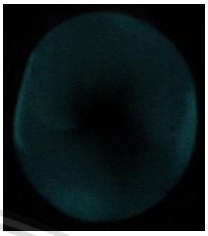
reaktan sudah bisa terbakar. Berbeda dengan besar diameter *outlet* 3.5 mm dan 4.5 mm, membutuhkan debit 72 ml/min karena dengan diameter *outlet* semakin besar hambatan/*losses* fluida semakin kecil menyebabkan waktu tinggal reaktan singkat. Debit rektan yang lebih besar diperlukan agar memperpanjang reaksi kimia pembakaran sebelum terbuang ke saluran *outlet.*

Dalam visualisasi nyala api, terlihat pada debit bahan bakar 90 ml/min nyala api dalam *circular disk combustor* dengan besar diameter *outlet* 2.5 mm lebih memenuhi ruang bakar daripada yang terjadi pada besar diameter *outlet* 3.5 mm dan 4.5 mm. Hal ini terjadi karena bahan bakar dalam campuran reaktan di bagian sekitar *outlet* belum terjadi pembakaran yang diakibatkan oleh semakin besar diameter *outlet*-nya, waktu tinggal reaktan semakin singkat.

Dari visualisasi nyala api juga terlihat bahwa pada debit 135 ml/min sampai 179 ml/min material *circular disk combustor* mulai memerah. Pada *circular disk combustor* dengan besar diameter *outlet* 2.5 mm warna merah dari material *circular disk combustor* menyatu dengan warna nyala api. Hal ini karena pada besar diameter *outlet* 2.5 mm, hambatan semakin besar, yang mengakibatkan perbedaan tekanan yang lebih besar agar fluida fluida di dalam *combustor* bisa mengalir ke luar. Sehingga tekanan di dalam *combustor* tadi akan membuat densitas reaktan lebih tinggi dan waktu tinggal reaktan lebih lama, yang menyebabkan pembakaran lebih sempurna sehingga meningkatkan kestabilan pembakaran dan temperatur dinding lebih tinggi dibandingkan diameter *outlet* 3.5 mm dan 4.5 mm yang baru menunjukkan bercak merah pada *combustor*.

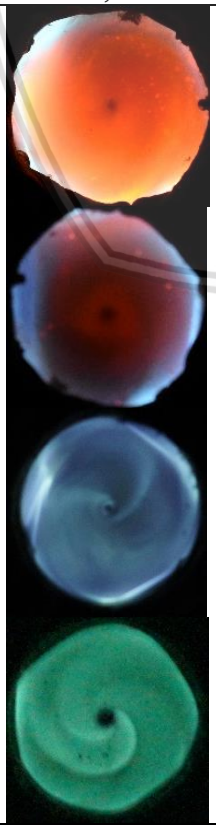
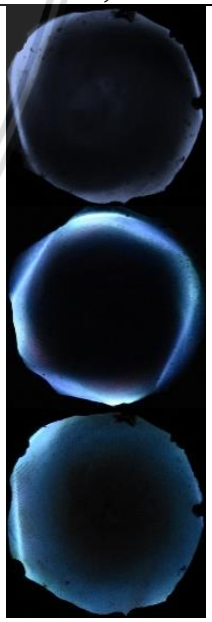
Tabel 4.7
Data Visualisasi Nyala Api Pada Variasi ϕ dengan Q_f = 90 ml/min

Debit bahan bakar (ml/min)	*Combustor* dengan *outlet* 2,5 mm	*Combustor* dengan *outlet* 3,5 mm	*Combustor* dengan *outlet* 4,5 mm
ϕ = 0.8			
ϕ = 1			

Debit bahan bakar (ml/min)	*Combustor* dengan *outlet* 2,5 mm	*Combustor* dengan *outlet* 3,5 mm	*Combustor* dengan *outlet* 4,5 mm
ϕ = 1,4			
ϕ = 2			

Pada Tabel 4.7 diatas dapat dilihat visualisasi nyala api pada debit rendah yaitu 90 ml/min dengan berbagai macam rasio ekuivalen. Pada rasio ekuivalen rendah api tidak penuh memenuhi seluruh ruang bakar namun seiring naiknya rasio ekuivalen maka api akan semakin merata karena rasio debit bahan bakar dalam reaktan yang masuk semakin besar dan reaktan yang terbakar akan semakin banyak sehingga dapat memenuhi ruang bakar.

Tabel 4.8
Data Visualisasi Nyala Api Pada Variasi ϕ dengan Q_f = 135 ml/min

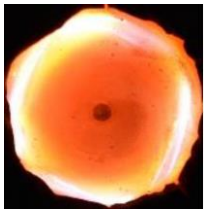
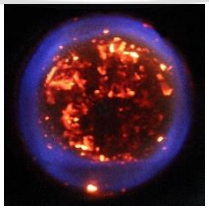
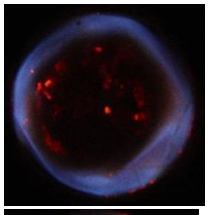
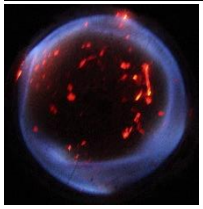
Debit bahan bakar (ml/min)	*Combustor* dengan *outlet* 2,5 mm	*Combustor* dengan *outlet* 3,5 mm	*Combustor* dengan *outlet 4,5 mm*
ϕ = 0,8			
ϕ = 1			
ϕ = 1,4			
ϕ = 2			

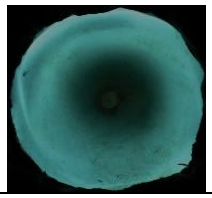
Pada Tabel 4.8 menunjukan bagaimana visualisasi nyala api pada debit bahan bakar 135 ml/min yang mana merupakan titik pengambilan data temperatur dengan berbagai macam rasio ekuivalen pada berbagai variasi besar diameter *outlet*.

Pada ketiga variasi, seiring dengan meningkatnya jumlah rasio ekuivalen maka warna yang dihasikkan pada api akan semakin terang lalu menuju ke kehijau-hijauan, warna kehijau-hijauan disini menunjukan reaktan yang terbakar disini adalah campuran udara dan bahan bakar dengan kondisi kaya bahan bakar. Bahan bakar yang berlebih akan menimbulkan senyawa radikal CH yang menimbulkan radiasi warna hijau ke biru-biruan, warna hijau ini mengindikasikan api tidak terlalu panas karena panjang gelombang yang panjang. Pada rasio ekuivalen 0.8 api terlihat lebih gelap dikarenakan pembakaran terjadi pada kondisi miskin bahan bakar dan menimbulkan senyawa radikal OH yang menghasilkan radiasi warna biru ke ungu-unguan yang mengindikasikan temperatur yang dihasilkan relatif tinggi karena panjang gelombang yang rendah.

Perbedaan disini terlihat pada visualisasi pada rasio ekuivalen 0.8 sampai dengan rasio ekuivalen 2. Pada besar diameter *outlet* 2.5 mm persebaran pembakaran lebih merata daripada besar diameter *outlet* 3.5 mm dan 4.5 mm. Hal ini terjadi karena pada besar diameter *outlet* 2.5 mm waktu tinggal reaktan dalam ruang bakar lebih lama daripada besar diameter *outlet* 3.5 mm dan 4.5 mm yang menyebabkan api dapat menyebar lebih merata dalam ruang bakar sebelum reaktan terbuang melalui saluran *outlet.*

Tabel 4.9
Data visualisasi nyala api pada variasi ϕ dengan Q_f = 179 ml/min

Debit bahan bakar (ml/min)	*Combustor* dengan *outlet* 2,5 mm	*Combustor* dengan *outlet* 3,5 mm	*Combustor* dengan *outlet* 4,5 mm
ϕ = 0,8			
ϕ = 1			
ϕ = 1,4			

ϕ = 2	

Pada Tabel 4.9 diatas, dapat dilihat dari perbedaan visualisasi nyala api dengan debit bahan bakar tinggi yakni 179 ml/min dengan berbagai macam variasi rasio ekuivalen.

Apabila di tinjau dari warnanya, semakin meningkat rasio ekuivalen maka warna yang dihasilkan akan semakin hijau, yang menandakan pembakaran terjadi pada kondisi kaya bahan bakar. Perbedaan disini terdapat pada perbedaan persebaran nyala api antara dua variasi besar diameter *outlet* diatas. besar diameter *outlet* 2.5 mm, menghasilkan nyala api yang lebih merata.

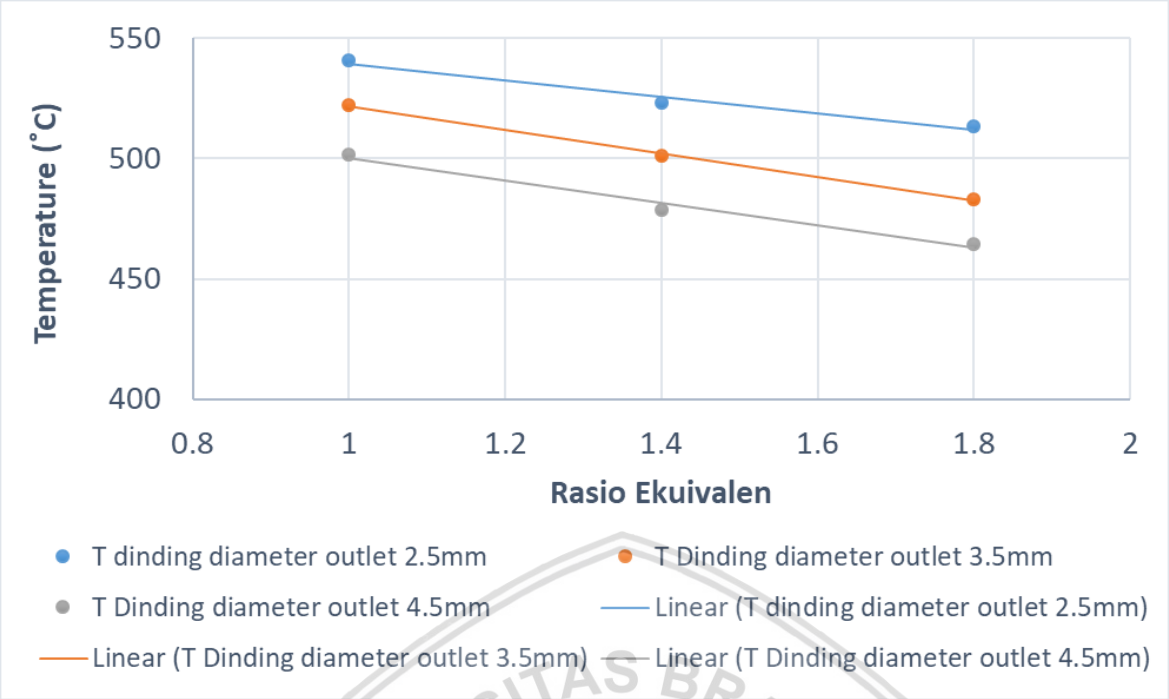
4.4 Pengolahan dan Pembahasan Data Temperatur Dinding *Combustor*

Titik pengambilan temperatur dinding *circular disk combustor* ini terletak pada 3 titik. Titik 1 berada pada jarak 3 mm dari pusat *combustor*, titik 2 berjarak 7 mm dari pusat *combustor*, dan titik 3 berjarak 14 mm dari pusat *combustor*. Temperatur diambil pada Q_f 135 ml/min dengan variasi rasio ekuivalen dikarenakan debit tersebut adalah debit yang menjangkau semua variasi pada masing-masing variasi besar diameter *outlet.*

Tabel 4.10
Data Temperatur Dinding *Circular Disk Combustor* (°C)

Diameter *outlet*	Titik	T pada Rasio Ekuivalen (°C)			Jarak
		1	1.4	1.8	
2.5	1	529,66	516,47	496.12	3
	2	543,32	524,45	520.01	7
	3	549,29	527,87	524.01	14
rata-rata		540,76	522,93	513.38	
3.5	1	499,81	471,32	446,19	3
	2	526,28	512,88	496,54	7
	3	539,64	518,74	505,67	14
rata-rata		521,91	500,98	482,80	
4.5	1	489,81	451,75	436.77	3
	2	505,50	487,86	471.81	7
	3	509,47	496,54	484.59	14
rata-rata		501.60	478.72	464.41	

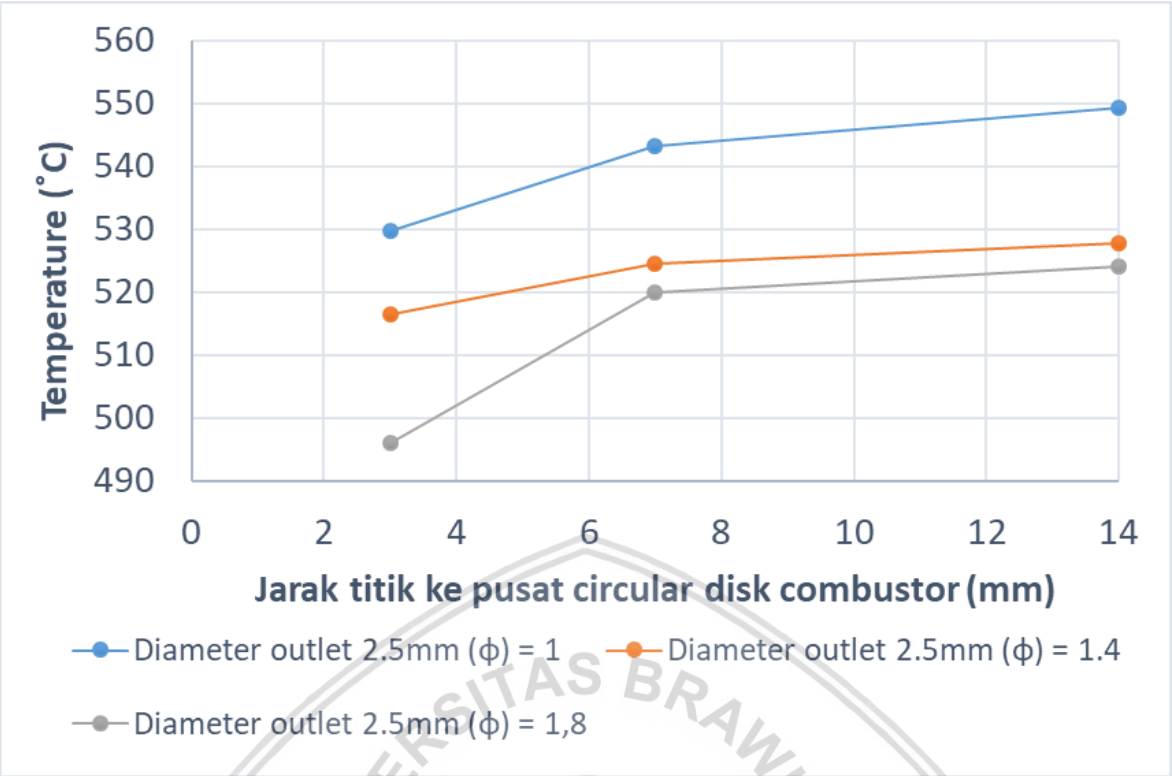
Pada Tabel 4.10 didapatkan nilai temperatur dinding *combustor* dengan variasi besar diameter *outlet* di berbagai rasio ekuivalen dan diplot kedalam Gambar 4.5.



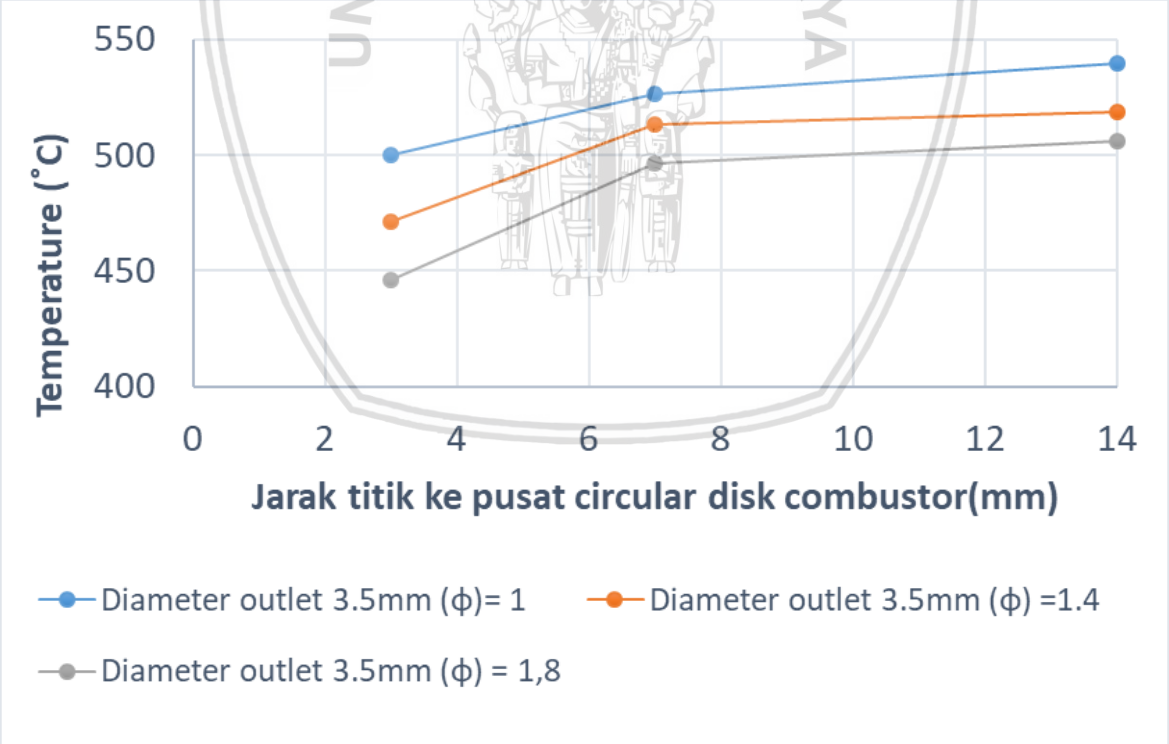
Gambar 4.5 Grafik temperatur rata-rata dinding *combustor* terhadap rasio ekuivalen

Pada Gambar 4.5 diatas didapatkan hasil bahwa semakin meningkat nilai rasio ekuivalen maka temperatur dinding akan menurun yang disebabkan pembakaran terjadi pada kondisi kaya bahan bakar, sehingga banyak bahan bakar yang belum terbakar (*unburn fuel*) yang menyerap kalor dari pembakaran yang terjadi. Sebaliknya, semakin mendekati rasio ekuivalen 1 maka temperatur yang dihasilkan akan semakin tinggi, dikarenakan semakin banyaknya bahan bakar yang dapat terbakar karena meningkatnya debit udara dalam reaktan sehingga dapat mengimbangi jumlah bahan bakar untuk terbakar.

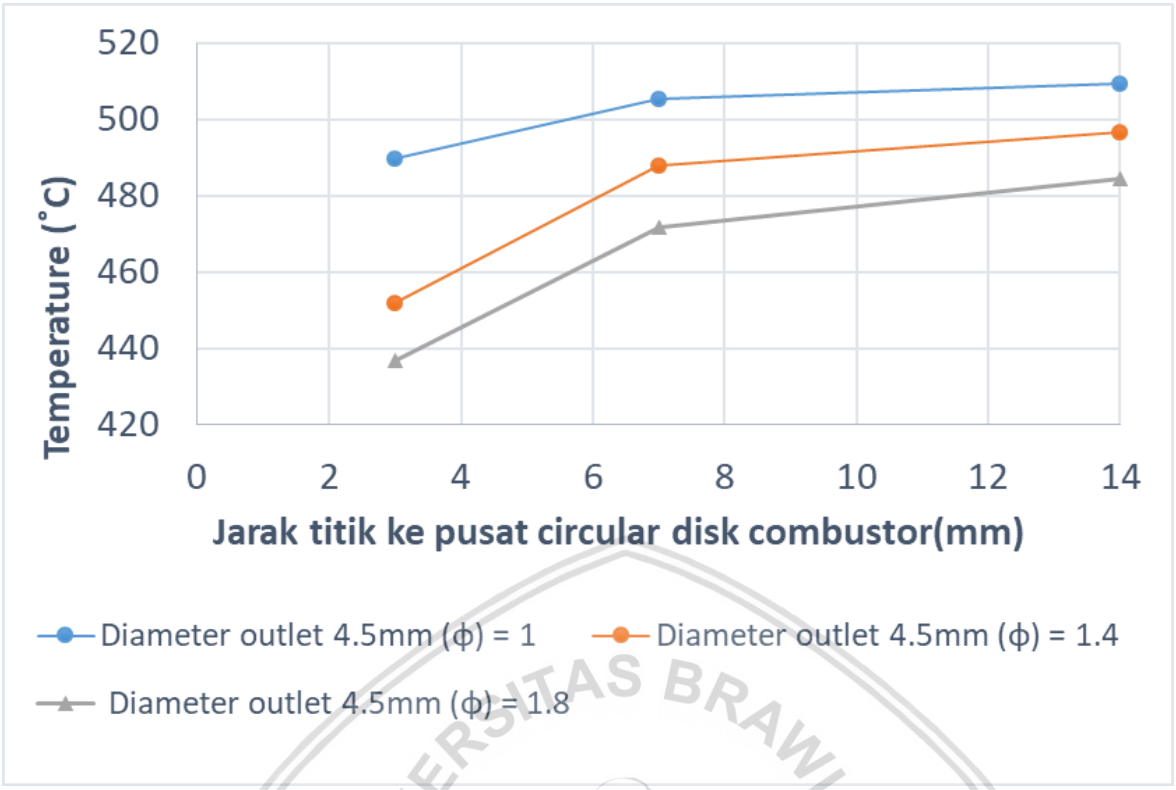
Pada besar diameter *outlet* 2.5 mm, temperatur dinding pada semua rasio ekuivalen yang diukur lebih tinggi daripada besar diameter *outlet* 3.5 mm dan 4.5 mm karena *circular disk combustor* dengan besar diameter *outlet* 2.5 mm memiliki hambatan semakin besar, yang mengakibatkan perbedaan tekanan yang lebih besar agar fluida fluida di dalam *combustor* bisa mengalir ke luar. Sehingga tekanan di dalam *combustor* tadi akan membuat densitas reaktan lebih tinggi dan waktu tinggal reaktan lebih lama, yang menyebabkan pembakaran lebih sempurna sehingga meningkatkan kestabilan pembakaran dan temperatur dinding lebih tinggi dibandingkan diameter *outlet* 3.5 mm dan 4.5 mm pada masing masing titik.



Gambar 4.6 Temperatur dinding *combustor* dengan diameter *outlet* 2.5 mm pada masing-masing titik



Gambar 4.7 Temperatur dinding *combustor* dengan diameter *outlet* 3.5 mm pada masing-masing titik



Gambar 4.8 Temperatur dinding *combustor* dengan diameter *outlet* 4.5 mm pada masing-masing titik

Pada ketiga gambar di atas, menunjukan pada ketiga *combustor* dengan besar diameter *outlet* yang berbeda memiliki kecenderungan yang sama, yaitu titik terendah pada titik ke pertama yang memiliki jarak dengan pusat *combustor* sebesar 3 mm. Titik ini terdapat di paling dekat diameter *outlet combustor* yang merupakan titik yang memiliki *heat release* yang paling kecil karena distribusi api kurang merata atau bahkan tidak terjadi pembakaran pada titik 1. Pada titik 2 dan titik 3 yaitu pada jarak 7 mm dan 14 mm, memiliki temperatur yang lebih tinggi karena pembakaran pada kecepatan reaktan yang tinggi cenderung terdorong oleh gaya tangensial dari *swirling flow*. Hasilnya, pembakaran terkumpul di sisi tepi ruang bakar dan menyebabkan menyebabkan perpindahan panas yang tinggi dengan dinding *combustor* pada titik 2 dan 3.

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian tentang karakteristik pembakaran pada *circular disk combustor* dengan variasi besar diameter *outlet* dan pembakaran *premixed* dengan bahan bakar butana adalah:

1. Pembakaran pada diameter *outlet* yang lebih kecil akan menghasilkan pembakaran yang lebih stabil dan visualisasi api yang lebih merata.
2. Semakin kecil diameter *outlet* maka *range flame stability limit* yang dihasilkan akan semakin lebar.
3. Semakin kecil diameter *outlet* maka temperatur dinding *combustor* akan semakin tinggi.

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh diameter outlet terhadap karakteristik pembakaran pada *circular disk combustor*.
2. Diperlukan pemilihan lem yang lebih tahan terhadap suhu tinggi dari segi bentuk maupun kekuatannya.

DAFTAR PUSTAKA

Cengel, Y. 2006. *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications*. New York: McGraw-Hill.

Elsair, R. 2012. *Fundamentals of Chemistry*. Frederiksberg: Ventus Publishing ApS.

Fernandez-Pello, C. 2002. *Micropower Generation Using Combustion: Issues and Approaches. Proceedings of The Combustion Institute Volume 29 Issues 1 Page 883-899.* Jurnal. Berkeley: University of California.

Katsuyoshi, T., Soichiro, K., Taku, M. & Toshiyuki, S. 2009. *Development of The Micro Combustor. Engineering Review vol* 42 no 2. 97-101.

Khaleghi, M., Hosseini, S.E., Wahid, M.A. 2015. *Vortex Combustion and Heat Tranfer In Meso-Scale with Thermal Recuperation*. Jurnal. Johor: Univertisi Teknologi Malaysia.

Mahandari, C. P., Kartika, D. 2010. *Flame Lift-up on A Bunsen Burner*. Jakarta: A Preliminary Study.

Maruta, K. 2011. *Micro and Mesoscale Combustion. Proceedings of The Combustion Institute Volume 33 Issue 1 Page 125-150.* Jurnal

Turns, Stephen R. (2000), *An Introduction to Combustion, Concepts and Applications*, 2nd edition. McGrawHill. USA

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

Warneck, P. 1988. *Chemistry of the Natural Atmosphere.* London: Academic Press, Inc.

Weinberg FJ, Rowe DM, Min G, Ronney PD. 2002. *On Thermoelectric Poer Generation From Heat Recirlculating Combustion System. Proceedings of The Combustion Institute.*Sapporo, Japan.