

**PENGARUH VARIASI BESAR SUDUT SALURAN *INLET* TERHADAP
KARAKTERISTIK PEMBAKARAN DALAM *CIRCULAR DISK COMBUSTOR***

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:
AHMAD FAHMI IRFANDA
NIM. 145060200111011

**KEMENTERIAN RISET TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN MESIN
MALANG
2018**

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH VARIASI BESAR SUDUT SALURAN INLET TERHADAP
KARAKTERISTIK PEMBAKARAN DALAM CIRCULAR DISK COMBUSTOR**

COMBUSTOR

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



AHMAD FAHMI IFRANDA
NIM. 145060200111011

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

Dosen Pembimbing II

Winarto, ST., MT., Ph.D.
NIP. 19710710 200012 1 001

Dosen Pembimbing I

Dr. Eng. Lili Yuliaty, ST., MT.
NIP. 19750702 200003 2 001

Mengetahui,
Ketua Program Studi S1

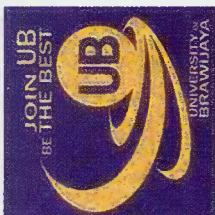
Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP. 197409302 00012 1 001



TURNITIN



UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 132/UN10.F07.12.21/PP/2018

Sertifikat ini diberikan kepada :

AHMAD FAHMI IRFANDA

Dengan Judul Skripsi :

**PENGARUH BESAR SUDUT SALURAN INLET TERHADAP KARAKTERISTIK
PEMBAKARAN DALAM CIRCULAR DISK COMBUSTOR**

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq 20\%$, dan dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal **19 OCT 2018**

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Dr. 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 Sudut Saluran Inlet 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 M. Nur Fatoni dan Mama Ririn K. yang tiada henti mendoakan, memberikan bimbingan, dan motivasi kepada penulis.
3. Ibu Dr. Eng. Lilis Yuliati, ST., MT. selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan motivasi, bimbingan dan arahan demi kesempurnaan penulisan skripsi.
4. Bapak Winarto, ST., MT., Ph.D. selaku dosen pembimbing II yang sudah meluangkan waktu untuk membimbing penelitian dari awal hingga akhir.
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. Bapak Agung Sugeng Widodo, ST., MT., Ph.D. 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 yang sangat sabar dalam menyelesaikan skripsi ini
Dimas Sayekti
11. Teman satu kelompok penelitian sepejuangan Dhian dan Diqi
12. Kakak tercinta, Ditya R. R. S.Pd yang senantiasa selalu mendoakan dan memotivasi penulis.
13. Merinda Lestandy S.Kom., MT. yang tersayang yang selalu memberikan semangat dan tenaganya untuk mensukseskan penyelesaian skripsi
14. Seluruh asisten Laboratorium Mesin-Mesin Fluida yang telah memberikan motivasi dan banyak pengalaman kepada penulis.
15. Tim PKL Petrokimia (Dhewa, Rifqi, Fikri) yang telah membantu dalam menyemangati
16. 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.
17. 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

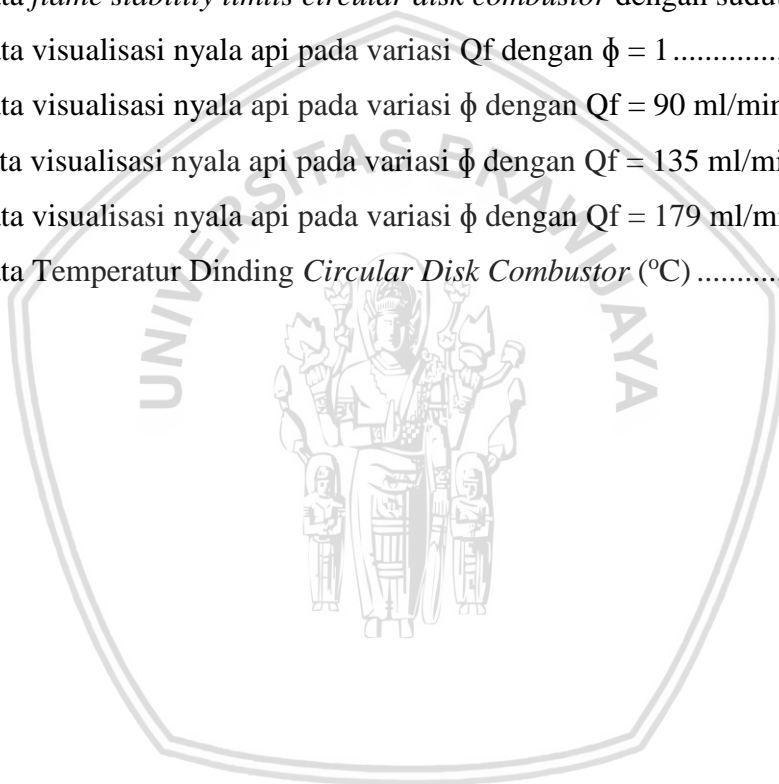
	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
RINGKASAN	viii
SUMMARY	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Sebelumnya	5
2.2 Pembakaran	9
2.2.1 Pembakaran <i>Premixed</i>	10
2.2.2 Reaksi Kimia Pada Proses Pembakaran	11
2.2.3 Rasio Udara Dan Bahan Bakar (AFR)	13
2.2.4 Rasio Ekuivalen (ϕ)	15
2.2.5 Batas Mampu Nyala Api (<i>Flameability Limit</i>) dan Batas Kestabilan Nyala Api (<i>Flame Stability Limit</i>)	15
2.3 Bahan Bakar	16
2.4 <i>Micropower Generator</i> (MPG) dan <i>Micro/Meso-Scale Combustor</i>	17
2.5 Pembakaran Pada <i>Circular Disk Combustor</i> Menggunakan Variasi Besar Sudut Saluran Masuk	19
2.6 Hipotesis.....	20
BAB III METODE PENELITIAN	21
3.1 Tempat dan Waktu Pelaksanaan	21
3.2 Variabel Penelitian	21

3.3 Peralatan Penelitian	22
3.4 Skema Instalasi Penelitian	30
3.5 Metode Pengambilan Data	31
3.6 Diagram Alir Penelitian	33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1 Kalibrasi <i>flowmeter</i>	35
4.2 Pengolahan dan Pembahasan Data Batas Kestabilan Nyala Api	38
4.3 Pembahasan Data Visualisasi Nyala Api	41
4.4 Pengolahan dan Pembahasan Data Temperatur Dinding Combustor	47
BAB V PENUTUP	51
5.1 Kesimpulan	51
5.2 Saran.....	51
DAFTAR PUSTAKA	



DAFTAR TABEL

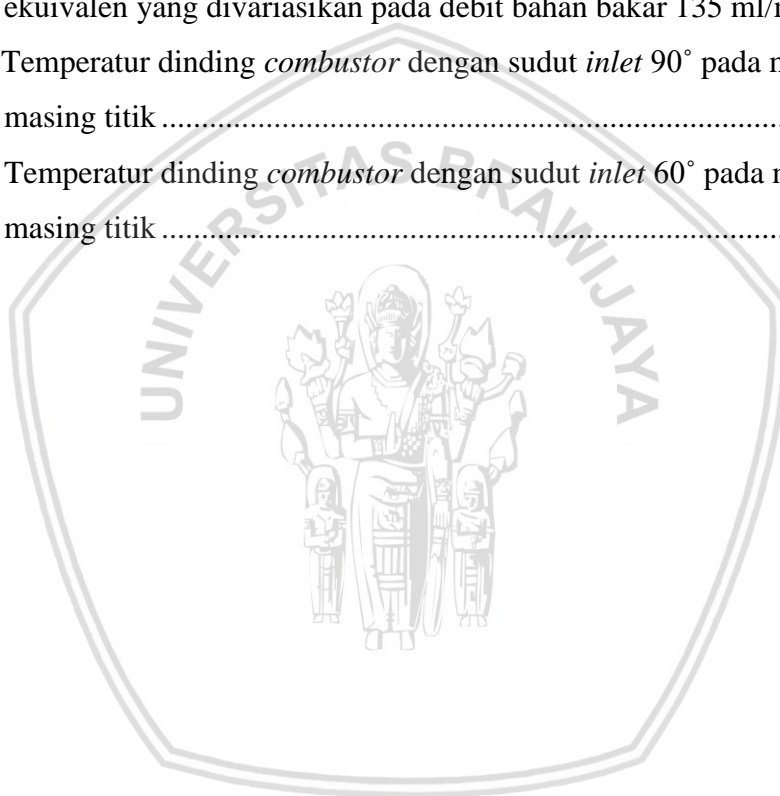
No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Presentase Volume dan Massa Gas pada Udara Kering.....	12
Tabel 4.1	Data kalibrasi <i>flowmeter</i> bahan bakar butana (C ₄ H ₁₀)	36
Tabel 4.2	Data kalibrasi <i>flowmeter</i> udara.....	37
Tabel 4.3	Data <i>flame stability limits circular disk combustor</i> dengan sudut inlet 90°	38
Tabel 4.4	Data <i>flame stability limits circular disk combustor</i> dengan sudut inlet 60°	39
Tabel 4.5	Data <i>flame stability limits circular disk combustor</i> dengan sudut inlet 30°	39
Tabel 4.6	Data <i>flame stability limits circular disk combustor</i> dengan sudut inlet 0°..	39
Tabel 4.7	Data visualisasi nyala api pada variasi Qf dengan $\phi = 1$	42
Tabel 4.8	Data visualisasi nyala api pada variasi ϕ dengan Qf = 90 ml/min	44
Tabel 4.9	Data visualisasi nyala api pada variasi ϕ dengan Qf = 135 ml/min	45
Tabel 4.10	Data visualisasi nyala api pada variasi ϕ dengan Qf = 179 ml/min	46
Tabel 4.11	Data Temperatur Dinding <i>Circular Disk Combustor</i> (°C)	37



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Detail skema <i>combustor</i> (a) <i>Disk-type combustor</i> dan (b) <i>Tube-type combustor</i>	5
Gambar 2.2	(a) Pengaruh <i>surface area</i> terhadap jumlah emisi CO (b) Pengaruh <i>surface area</i> terhadap temperatur gas buang	6
Gambar 2.3	Desain meso-scale <i>combustor</i>	7
Gambar 2.4	Hubungan daya termal dan temperatur gas buang dengan variasi <i>mass flow rate</i>	8
Gambar 2.5	<i>Twin fluid type</i>	8
Gambar 2.6	Ilustrasi proses pembakaran	10
Gambar 2.7	(a) Pembakaran <i>premixed</i> (b) Pembakaran difusi.....	10
Gambar 2.8	Perbedaan api laminar dan api turbulen.....	11
Gambar 2.9	<i>Micropower generator</i> dengan siklus daya konvensional	18
Gambar 2.10	<i>Micropower generator</i> dengan prinsip <i>thermoelectric</i>	19
Gambar 3.1	<i>Circular Disk Combustor</i> dengan sudut inlet 0°	22
Gambar 3.2	<i>Circular Disk Combustor</i> dengan sudut inlet 30°	23
Gambar 3.3	<i>Circular Disk Combustor</i> dengan sudut inlet 60°	23
Gambar 3.4	<i>Circular Disk Combustor</i> dengan sudut inlet 90°	24
Gambar 3.5	Kaca Tahan Api	24
Gambar 3.6	Lem Tahan Panas (<i>FC-Fahrenheit</i>).....	25
Gambar 3.7	<i>Butana</i> (C_4H_{10}).....	25
Gambar 3.8	Regulator butana	26
Gambar 3.9	(a) <i>Flowmeter</i> udara dan (b) <i>Flowmeter</i> bahan bakar.....	26
Gambar 3.10	(a) <i>Connector</i> Saluran Masuk (b) <i>T Connector</i>	27
Gambar 3.11	<i>Y-Connector</i>	28
Gambar 3.12	Pemantik	28
Gambar 3.13	Kompresor udara.....	28
Gambar 3.14	Skema penelitian	30
Gambar 3.15	Titik pengambilan data temperatur dinding <i>circular disk combustor</i>	32
Gambar 3.16	Diagram alir penelitian	33
Gambar 4.1	Hubungan $Q_{terbaca}$ dan Q_{aktual} pada <i>flowmeter</i> butana (C_4H_{10}).....	36
Gambar 4.2	Hubungan $Q_{terbaca}$ dan Q_{aktual} pada <i>flowmeter</i> udara.....	37

Gambar 4.3	Perbandingan kestabilan nyala api sudut inlet 90° dan 60° pada <i>RE</i> dan debit reaktan yang divariasikan	40
Gambar 4.4	Perbandingan kestabilan nyala api sudut inlet 90° dan 60° pada <i>RE</i> dan kecepatan reaktan yang divariasikan.	40
Gambar 4.5	Visualisasi nyala api pada <i>circular disk combustor</i> dengan sudut saluran masuk 30°	41
Gambar 4.6	Visualisasi nyala api pada <i>circular disk combustor</i> dengan sudut saluran masuk 0°	42
Gambar 4.7	Perbandingan temperatur rata-rata dinding <i>combustor</i> terhadap rasio ekuivalen yang divariasikan pada debit bahan bakar 135 ml/min.....	48
Gambar 4.8	Temperatur dinding <i>combustor</i> dengan sudut inlet 90° pada masing-masing titik	49
Gambar 4.9	Temperatur dinding <i>combustor</i> dengan sudut inlet 60° pada masing-masing titik	49



RINGKASAN

Ahmad Fahmi Irfanda, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, September 2018, *Pengaruh Variasi Besar Sudut Saluran Inlet Terhadap Karakteristik Pembakaran Dalam Circular Disk Combustor*, Dosen Pembimbing: Lilis Yuliati dan Winarto.

Meso/micro-scale combustor adalah komponen yang bekerja menghasilkan panas yang didapat dari hasil pembakaran yang terjadi didalam ruang bakar dan selanjutnya panas tersebut akan diubah menjadi energi listrik oleh modul pengubah energi panas menjadi energi listrik yakni, *thermoelectric*. Penelitian dan pengembangan terus dilakukan untuk mendapat *meso/micro-scale combustor* yang baik yakni yang mempunyai efisiensi panas dan efisiensi pembakaran yang tinggi dan mudah diterapkan pada modul *thermoelectric*.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana pengaruh dari besar sudut saluran masuk terhadap karakteristik pembakaran (temperatur dinding *combustor*, visualisasi nyala api, *flame stability limit*) pada *circular disk combustor* dengan bahan bakar butana (C_4H_{10}). *Circular disk combustor* sendiri merupakan salah satu jenis *meso/micro-scale combustor* dengan bentuk disk dan saluran masuk reaktan pada arah yang divariasikan yang berguna untuk menyempurnakan kelemahan-kelemahan dari beberapa bentuk *combustor* sebelumnya. Besar sudut saluran masuk yang digunakan pada penelitian ini adalah 90° , 60° , 30° dan 0° dengan *combustor* yang terbuat dari tembaga dan memiliki diameter ruang bakar 28 mm dengan tebal 3 mm.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar sudut saluran masuk maka range *flame stability limit* yang dihasilkan semakin lebar, temperatur dinding *combustor* semakin tinggi, dan distribusi api di dalam ruang bakar semakin merata sedangkan untuk *combustor* dengan sudut saluran masuk 30° dan 0° tidak dapat menghasilkan pembakaran yang stabil.

Kata Kunci: Circular disk combustor, saluran masuk, karakteristik pembakaran.

SUMMARY

Ahmad Fahmi Irfanda, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, September 2018, *The Effect of Variations Inlet Angles on Burning Characteristics in Circular Disk Combustor*, Advisor: Lilis Yuliati and Winarto.

Meso/micro-scale combustor is a component that works to produce heat energy from combustion in the combustion chamber. Then the heat will be converted into electrical energy by a module that converts heat energy into electrical energy namely, thermoelectric. Research and development continues to be carried out to get a good meso/micro-scale combustor that has high heat efficiency and high combustion efficiency and is easily applied to thermoelectric modules.

This research was conducted to determine the influence of the angle of the inlet channel on the characteristics of combustion (combustor wall temperature, flame visualization, flame stability limit) on circular disk combustors with butane fuel (C₄H₁₀). Circular disk combustor is meso/micro-scale combustor disk type. Variations of reactant inlet direction is useful for perfecting the weaknesses of some forms of previous combustors. The angle of the inlet used in this study is 90°, 60°, 30° and 0° with a combustor made of copper and has a combustion chamber diameter of 28 mm with a thickness of 3 mm.

The results showed that the greater the angle of the inlet the range of flame stability limit produced was wider, the combustor wall temperature was higher, and the distribution of fire in the combustion chamber was more evenly distributed while for combustors with inlet angles 30° and 0° could not produce combustion stable.

Keywords: Circular disk combustor, inlet, combustion characteristics.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada saat ini, banyak dilakukan pengembangan dan penelitian pada bidang pembangkit listrik berskala mikro atau *micropower generator*. Salah satu pengembangan dan penelitian dilakukan pada salah satu jenis piranti penyedia sumber energinya yakni *meso/micro-scale combustor*. Dalam kerjanya, *meso/micro-scale combustor* menghasilkan panas yang didapat dari hasil pembakaran yang terjadi didalam ruang bakar dan selanjutnya panas tersebut akan diubah menjadi energi listrik oleh modul pengubah energi panas menjadi energi listrik yakni, *thermoelectric*. Penelitian dan pengembangan terus dilakukan untuk mendapat *meso/micro-scale combustor* yang baik yakni yang mempunyai efisiensi panas dan efisiensi pembakaran yang tinggi dan mudah diterapkan pada modul *thermoelectric*.

Mesoscale combustor dan *microscale combustor* sendiri mempunyai perbedaan dari segi dimensi ruang bakar yang digunakan. Menurut Maruta (2011), *mesoscale combustor* memiliki dimensi ruang bakar yang memiliki diameter atau panjang ruang bakar antara 1-10 mm dan *micro scale combustor* memiliki dimensi panjang karakteristik kurang dari 1 mm.

Menurut bentuknya, *mesoscale combustor* memiliki 2 bentuk dasar yakni *tube type* dan *disk type combustor*. *Tube type* memiliki keunggulan yakni nyala api yang stabil namun memiliki kekurangan yaitu waktu tinggal reaktan bahan bakar dan udara yang relatif cepat dan bentuknya yang silinder sulit diterapkan pada modul *thermoelectric*. Dan untuk *disk type* disini digunakan bentuk *circular* atau *circular disk combustor*. Untuk *circular disk combustor* memiliki kelebihan yakni, efisiensi termal yang lebih tinggi dari *tube type* dan dari bentuk permukaannya yang datar, *disk type* lebih mudah diterapkan dengan modul *thermoelectric* dan kekurangannya adalah *heat loss* hasil pembakarannya relatif lebih tinggi dari *tube type* (Katsuyoshi et al, 2009, p.99).

Beberapa kendala yang dihadapi dari *mesoscale combustor* antara lain adalah tingginya *heatloss* dari sistem ke lingkungan, waktu tinggal reaktan yang pendek dan tidak stabilnya nyala api yang menyebabkan pembakaran yang optimal dalam ruang bakar sulit tercapai. Dari pembakaran yang kurang optimal tersebut menyebabkan tingginya emisi CO hasil dari gas buang dari *mesoscale combustor* (Katsuyoshi et al, 2009, p.99).

Untuk meningkatkan efisiensi dari suatu *mesoscale combustor* dibutuhkan temperatur dinding yang tinggi dan seragam, dan nyala api yang stabil untuk mengoptimalkan pembakaran yang terjadi. Dari hasil penelitian Khaleghi (2015), cara paling efektif untuk mendapatkan nyala api stabil dalam *mesoscale combustor* adalah dengan membuat aliran yang terjadi dalam ruang bakar berputar atau *swirling flow*. Pada *circular disk combustor*, perputaran aliran yang terjadi sangat bergantung pada bagaimana reaktan memasuki ruang bakar, salah satunya adalah dengan memasukkan reaktan dari sisi keliling *circular disk combustor* dan mengondisikan sudut yang sesuai dari saluran masuknya agar dapat tercapai *swirling flow* dalam ruang bakar.

Dari penjelasan tersebut, maka pada penelitian ini akan mengamati pengaruh besar sudut saluran masuk terhadap karakteristik pembakaran yang terjadi pada *circular disk combustor* (bulat pipih). Adapun karakteristik yang diamati antara lain adalah visualisasi bentuk nyala api, *flame stability limit* dan temperatur dinding dari *circular disk combustor* hasil dari penyerapan panas pembakaran yang terjadi.

1.2 Rumusan Masalah

Dari penjelasan pada latar belakang, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh variasi besar sudut *inlet* terhadap *flame stability limit*, temperatur dinding ruang bakar, dan visualisasi nyala api pada *circular disk combustor* menggunakan bahan bakar butana (C_4H_{10}).

1.3 Batasan Masalah

Untuk mengidentifikasi faktor apa saja yang termasuk pada ruang lingkup sistem suatu masalah penelitian dan agar tidak bercampur faktor mana saja yang tidak termasuk pada ruang lingkup sistem suatu masalah penelitian maka diperlukan adanya batasan masalah. Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

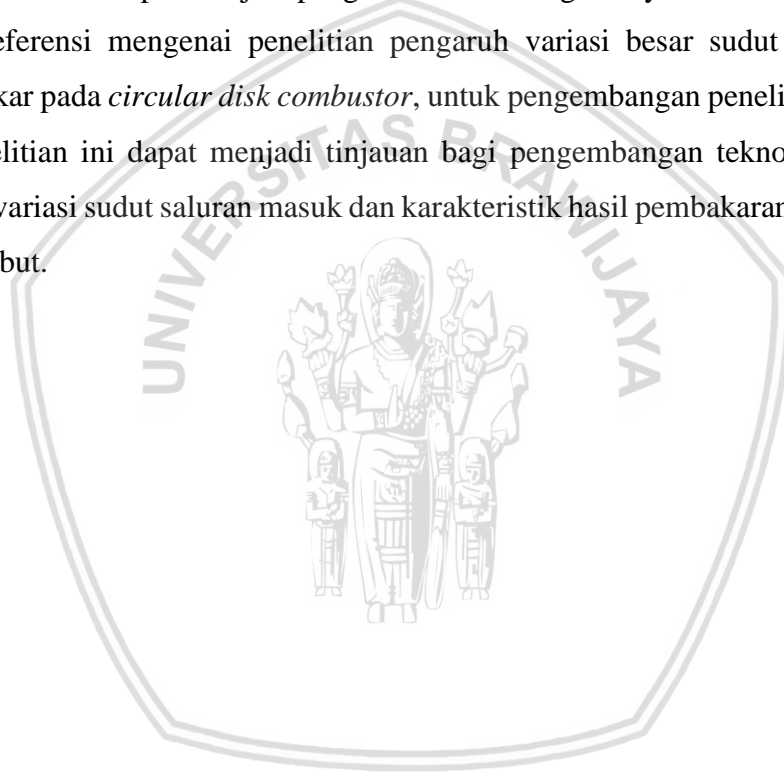
1. Penelitian dilakukan pada temperatur ruangan $27^0 - 30^0$ dan diasumsikan sifat dan propertis udara sama.
2. Bahan bakar yang digunakan diasumsikan terdiri dari 100% butana (C_4H_{10})
3. Komposisi udara yang digunakan sebagai oksidator diasumsikan mengandung 21% O_2 (oksigen) dan 79% N_2 (nitrogen)
4. Pembakaran yang terjadi dianggap *steady*
5. Debit udara dan bahan bakar dibatasi sampai 5.55 L/min dan 179 mL/min.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi besar sudut *inlet* pada *circular disk combustor* terhadap *flame stability limit*, temperatur dinding ruang bakar dan visualisasi nyala api pada *circular disk combustor* dengan bahan bakar butana (C_4H_{10}).

1.5 Manfaat Penelitian

1. Mahasiswa dapat mengetahui pengaruh variasi besar sudut saluran masuk reaktan pada *circular disk combustor* terhadap karakteristik pembakaran antara lain *flame stability limit*, temperatur dinding ruang bakar dan visualisasi nyala api.
2. Hasil penelitian ini dapat menjadi pengetahuan baru bagi masyarakat atau dapat menjadi tinjauan referensi mengenai penelitian pengaruh variasi besar sudut saluran masuk reaktan bakar pada *circular disk combustor*, untuk pengembangan penelitian berikutnya.
3. Hasil penelitian ini dapat menjadi tinjauan bagi pengembangan teknologi combustor mengenai variasi sudut saluran masuk dan karakteristik hasil pembakarannya dari variasi sudut tersebut.

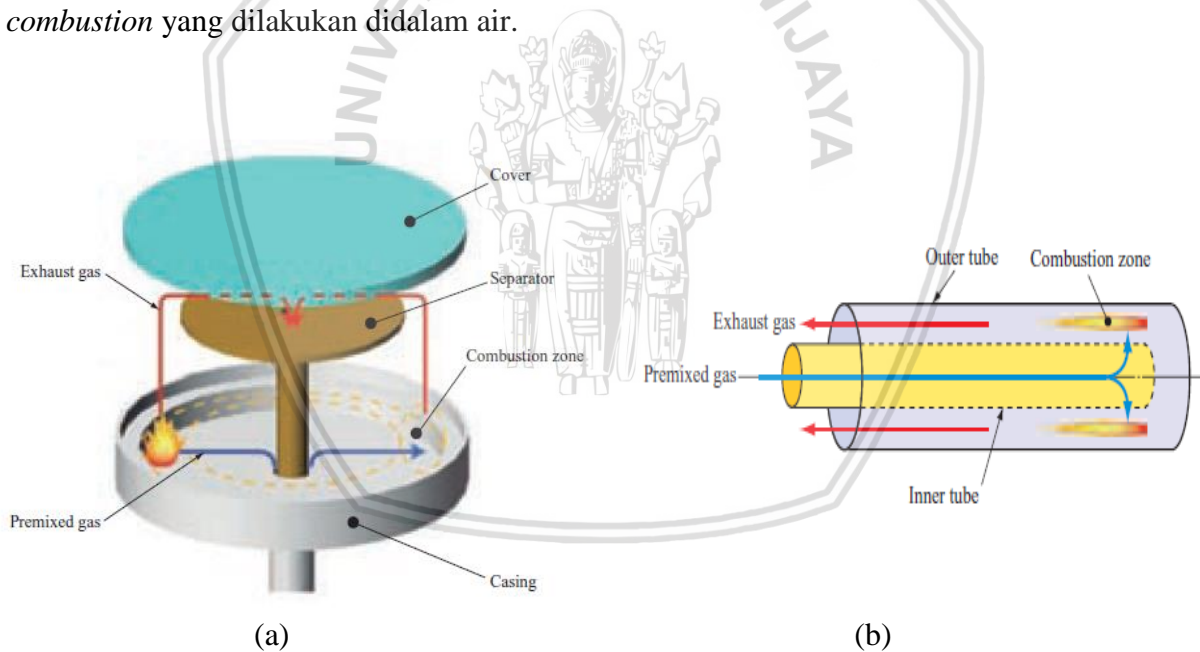




BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

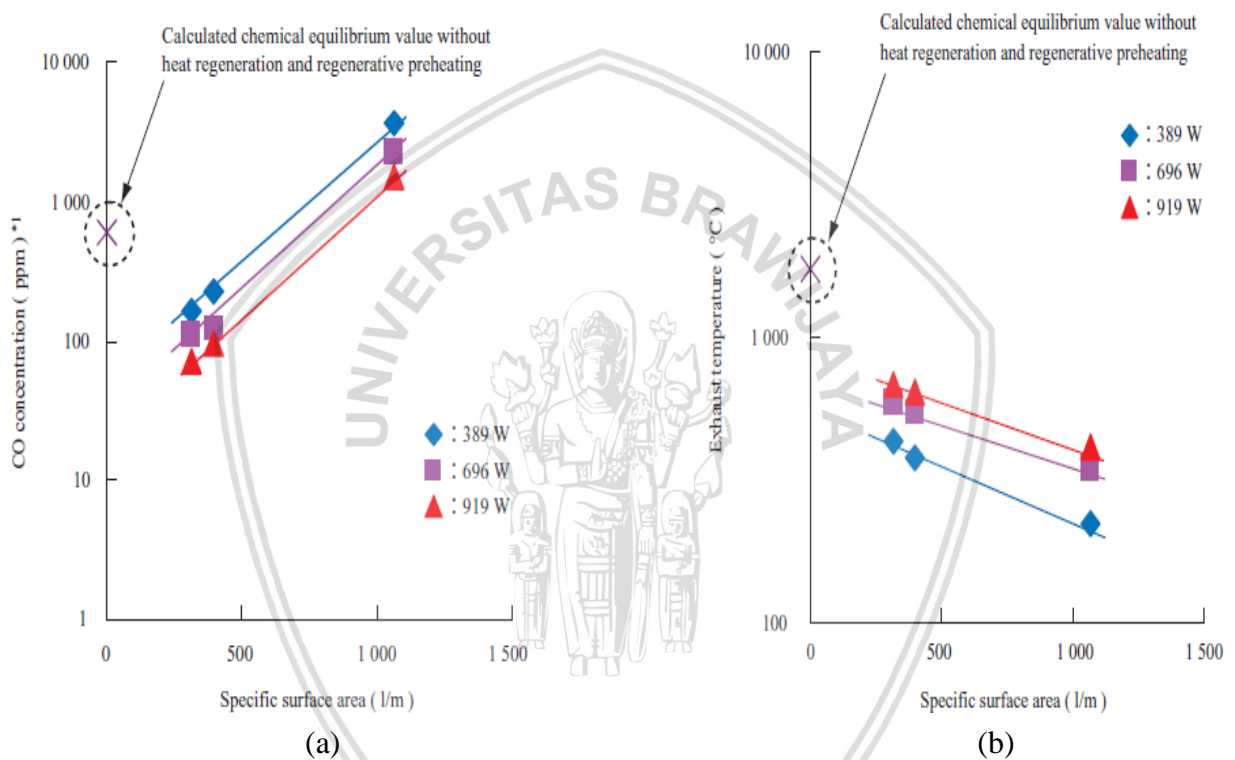
2.1 Penelitian Sebelumnya

Katsuyoshi et al. (2009) telah melaksanakan penelitian untuk mengetahui karakteristik dari dua jenis tipe *combustor*. Tipe pertama adalah *disk-type combustor* dengan penutup *water tank* dan tipe kedua adalah *tube-type combustor* dengan pengujian didalam air. Tujuan digunakannya air dalam penelitian ini untuk mengetahui *heat loss* dari proses pembakaran dari masing masing tipe *combustor* dengan penggunaan bahan bakar gas metana. Bagian bagian utama dari *disk-type combustor* yaitu *casing*, *separator* dan penutup berupa *water tank*. Penelitian menggunakan variasi jarak antara penutup dan separator untuk melihat *heat loss* yang terjadi. Pada *tube-type combustor* terdapat dua bagian utama yaitu *inner tube* dan *outer tube*. Penelitian menggunakan variasi diameter luar (*outer tube*) pada *micro combustion* yang dilakukan didalam air.



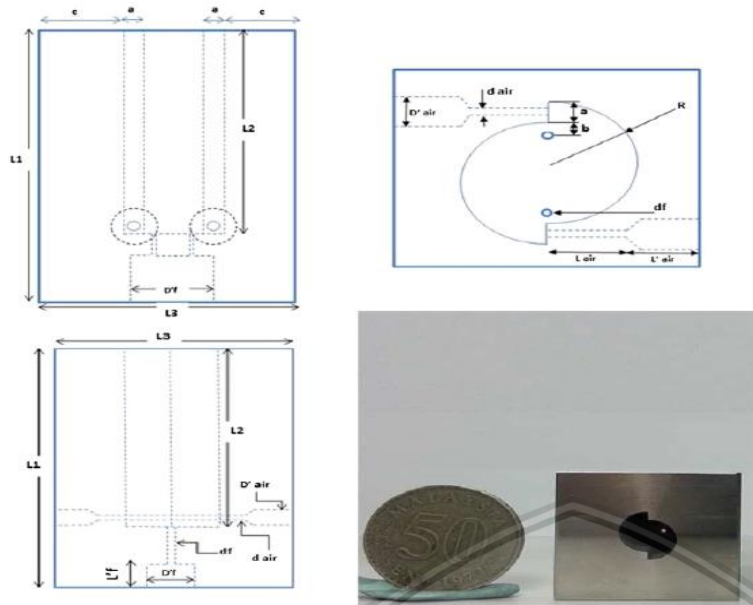
Gambar 2.1 Detail skema *combustor* (a) *disk-tube combustor* (b) *tube-disk combustor*
Sumber: Katsuyoshi et al. (2009)

Hasil penelitian untuk *disk-type combustor* adalah berkurangnya emisi gas CO pada gas buang berbanding lurus dengan pengurangan *surface-to-volume ratio* namun dari hasil penelitian diketahui juga bahwa ketika *surface-to-volume ratio* dikurangi akan didapat peningkatan temperatur gas buang yang berarti meningkatnya *heat loss* dari hasil pembakaran seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2. Pada *tube-type combustor* diperoleh hasil bahwa diameter antara *inner tube* dan *outer tube* sangat menentukan banyaknya emisi gas CO pada gas buang dan hasil gas buang dengan emisi CO paling sedikit didapatkan ketika *equivalen ratio* sebesar 0,8.



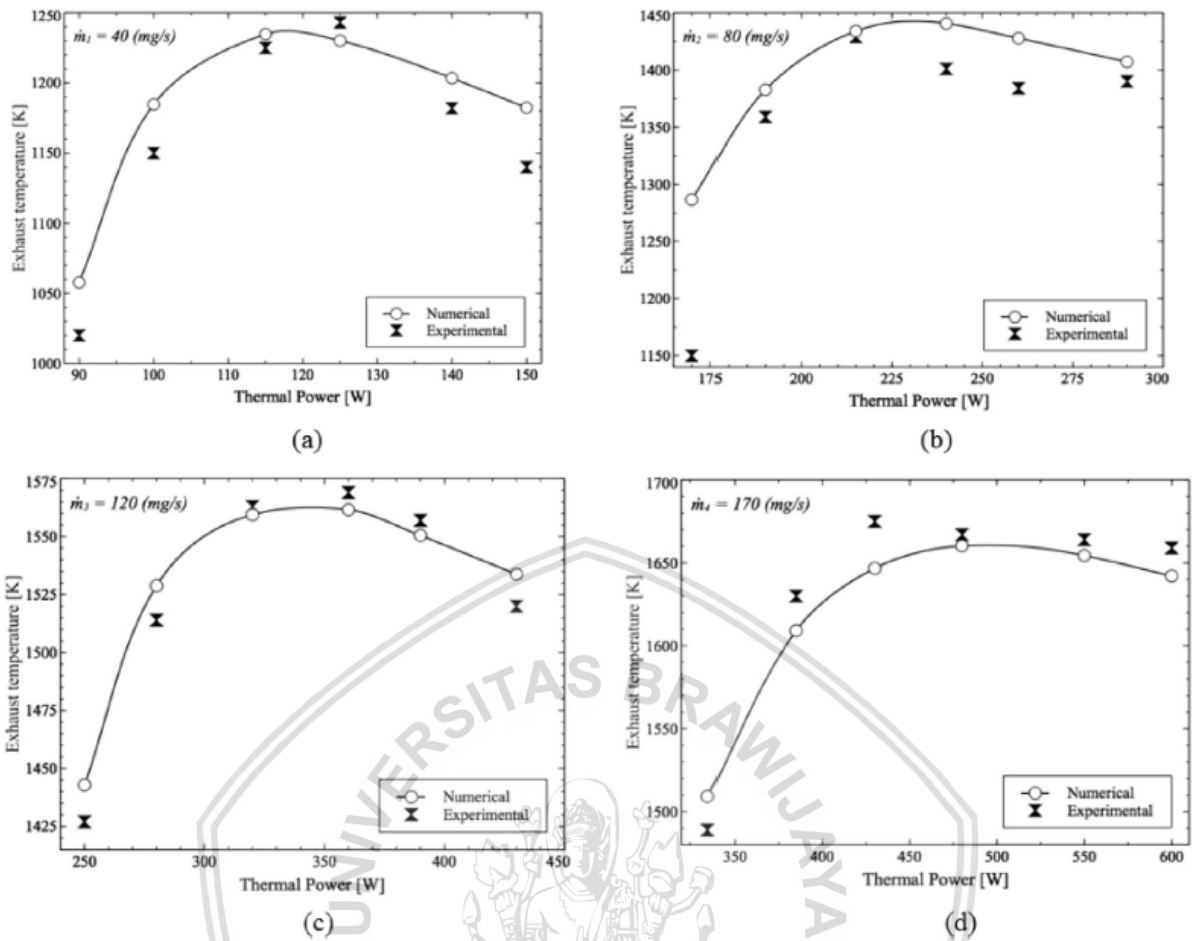
Gambar 2.2 (a) Pengaruh *surface area* terhadap jumlah emisi CO (b) Pengaruh *surface area* terhadap temperatur gas buang
Sumber: Katsuyoshi et al. (2009)

Khaleghi (2015) telah melaksanakan penelitian secara komputasi dan ekperimental tentang penggunaan aliran *vortex* terhadap kestabilan nyala api non-premix pada *meso-scale combustor* dengan jari-jari *combustion chamber* 5 mm dan bahan bakar yang digunakan adalah metana



Gambar 2.3 Desain meso-scale combustor
 Sumber: Khaleghi (2015)

Hasil dari penelitian ini adalah, dalam kondisi stoikiometrik terjadi peningkatan efisiensi termal seiring dengan meningkatnya *mass flow rate* dari reaktan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4. Hal ini menunjukkan semakin optimalnya pembakaran yang terjadi, namun *blow-off* terjadi untuk semua pembakaran dengan rasio ekuivalen 0.2 dan dibawahnya. Diketahui juga bahwa, teknik ini baik untuk diterapkan pada *combustor thermal-photovoltaic generator* karena prosentase *heat loss* yang diserap ke dinding dari keseluruhan *heat loss* meningkat menjadi 60%.



Gambar 2.4 Hubungan daya termal dan temperatur gas buang dengan variasi *mass flow rate*
Sumber: Khaleghi (2015)

Yoon et al. (2011) telah melakukan penelitian dengan tiga macam bentuk inlet yang berbeda pada nozzle untuk melihat bentuk aliran vortex yang terjadi. Bentuk yang digunakan antara lain yaitu, dengan tipe 1 menggunakan sudut 0° , diameter *swirler* 0,5 mm; tipe 2 dengan sudut 90° , diameter 1 mm; dan pada tipe 3 menggunakan sudut 90° , diameter 1,5 mm

Swirl angle	Type 1(0°)	Type 2(90°)	Type 3(90°)
Swirler shape			

Gambar 2.5 *Twin fluid type*
Sumber: Yoon et al (2011) *twin fluid type*

Dari hasil yang diperoleh menunjukkan hasil terbaik didapat pada alat tipe 2. Karena sudut sangat memengaruhi tekanan udara yang dialirkan, semakin besar sudut maka tekanan udara yang dihasilkan akan semakin besar dan menyebabkan semakin meratanya distribusi *spray* yang terjadi. Sebagai penerapan hasil pada *circular disk combustor* yang memiliki kesamaan geometri dengan *swirler nozzle* diatas. Dapat ditarik kesimpulan, sudut masuk sangat mempengaruhi hasil difusi turbulensi yang terjadi dalam ruang bakar sebagai akibat dari kecepatan tangensial dari aliran reaktan yang masuk. Semakin besar sudut saluran masuk maka semakin merata distribusi reaktan dalam ruang bakar dan waktu tinggal reaktan dalam ruang bakar meningkat.

2.2 Pembakaran

Pembakaran merupakan suatu reaksi yang dapat menghasilkan panas dan cahaya, hal itu terjadi 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.

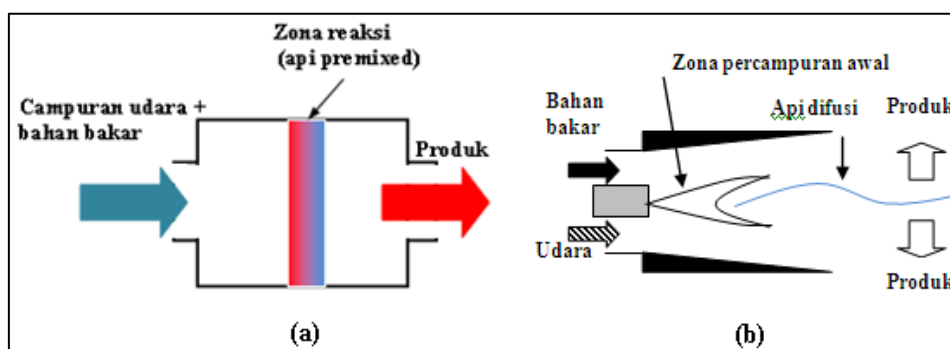
Energi aktivasi dibutuhkan sebagai pemicu dari molekul-molekul bahan bakar yang memiliki muatan agar melepaskan satu atau beberapa elektron dari kulit terluar atom atau memutus ikatan rantai molekul agar terjadi reaksi. Saat suatu reaksi pembakaran berlangsung, reaksi menghasilkan energi panas dan cahaya 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 dibawah ini.



Gambar 2.6 Ilustrasi proses pembakaran
Sumber: Wardana (2008)

2.2.1 Pembakaran *Premixed*

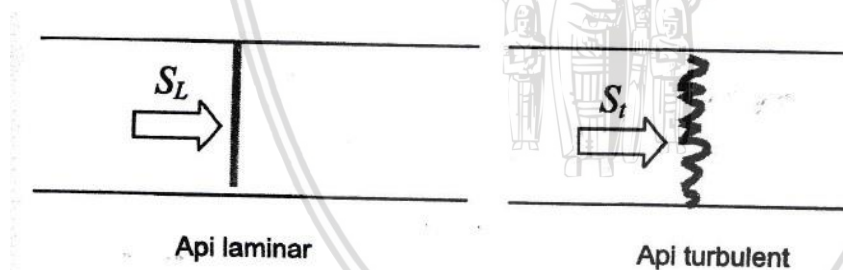
Dalam prosesnya apabila dilihat dari cara reaktan atau campuran bahan bakar dan udara terbakar, pembakaran dibedakan menjadi dua yaitu pembakaran *premixed* dan pembakaran *non-premixed* atau difusi. Suatu proses pembakaran diklasifikasikan sebagai pembakaran *premixed* apabila, reaktan (bahan bakar dan udara) dalam pembakaran telah bercampur terlebih dahulu sebelum masuk ke zona reaksi. Dan apabila sebaliknya yakni, kondisi reaktan (udara dan bahan bakar) tidak bercampur sebelum masuk zona reaksi maka pembakaran tersebut diklasifikasikan sebagai pembakaran difusi. Kelebihan dari pembakaran *premixed* adalah dapat meningkatkan efisiensi pembakaran karena jumlah campuran bahan bakar dan udara dapat kita sesuaikan terlebih dahulu untuk mencapai stoikiometrik sebelum masuk ke zona reaksi.



Gambar 2.7 (a) Pembakaran *premixed* (b) Pembakaran difusi
Sumber: Wardana (2008)

Gambar 2.7 menunjukkan perbedaan proses masuk dan bercampurnya reaktan antara pembakaran *premixed* dan pembakaran difusi. Gambar 2.7 (a) menunjukkan proses pembakaran *premixed* yakni, pencampuran udara dan bahan bakar telah berlangsung terlebih dahulu sebelum memasuki zona reaksi. Pada Gambar 2.7 (b) menunjukkan proses pembakaran difusi yakni, udara dan bahan bakar bercampur menjadi reaktan saat masuk ke dalam zona reaksi. Awalnya udara dan bahan bakar masuk melalui saluran yang berbeda dan bercampur pada zona pencampuran awal yang selanjutnya keluar dalam bentuk produk setelah terbakar di zona reaksi.

Dalam pembakaran *premixed*, api yang terjadi secara garis besar diklasifikasikan menjadi dua yaitu api *premixed* turbulen dan api *premixed* laminar. Pada penelitian digunakan api *premixed* turbulen, karena memiliki kelebihan yakni, aliran turbulen pada api *premixed* turbulen mampu meningkatkan rambatan panas yang dihasilkan menuju ke dinding ruang bakar. Hal ini merupakan *heatloss* jika ditinjau dari reaksi pembakaran yang terjadi namun jika ditinjau dari fungsi *circular disk combustor*, hal ini meningkatkan energi panas yang diserap untuk diubah menjadi energi listrik. Kecepatan nyala api turbulen bergantung pada jenis aliran yang dinyatakan dalam intensitas turbulensi (V'_{rms}) dan dapat meningkat sampai 30 kali lebih besar dari kecepatan nyala api laminar.



Gambar 2.8 Perbedaan api laminar dan api turbulen
Sumber: Wardana (2008)

2.2.2 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.

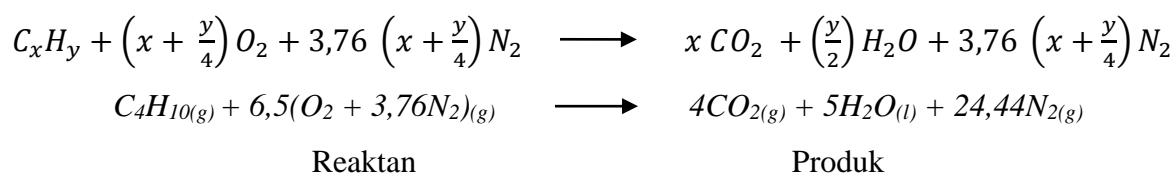
Agar suatu reaksi kimia pembakaran dapat berlangsung dengan baik, reaksi kimia pembakaran yang terjadi harus memenuhi 2 hal yaitu kesetimbangan massa dan kesetimbangan energi. Kesetimbangan massa atau stoikiometrik yaitu kondisi pembakaran dimana semua atom dari reaktan yakni pengoksidasi dan bahan bakar 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 O₂ membentuk CO₂ dan H₂O.

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 prosentase yang relative kecil maka, dalam komposisi penyusun reaksi kimia udara kita asumsikan terdiri dari gas nitrogen 79% dan gas oksigen 21%. Berikut ini tabel asumsi prosentase volume dan massa gas udara kering.

Tabel 2.1
Prosentase Volume dan Massa Gas Pada Udara Kering

Gas	Volume (%)	Massa (%)
Nitrogen (N ₂)	78,088	75,527
Oksigen (O ₂)	20,949	23,143
Argon (Ar)	0,930	1,282
Karbondioksida (CO ₂)	0,030	0,045

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



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. Dan pada pembakaran dalam *circular*

disk combustor waktu tinggal reaktan dalam ruang bakar relatif cepat sehingga banyak reaktan yang keluar sebelum terbakar sempurna.

2.2.3 Air Fuel Ratio (AFR)

Air fuel ratio merupakan faktor yang mempengaruhi kesempurnaan suatu proses pembakaran yaitu rasio perbandingan massa oksidator atau udara dengan massa dari bahan bakar, atau bisa ditinjau dari rasio perbandingan antara mol oksidator atau udara dengan mol bahan bakar. Persamaan *air fuel ratio* pada pembakaran dituliskan dalam rumus sebagai berikut

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

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

Keterangan

(AFR) = Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi stoikiometrik

N_{udara} = Jumlah mol udara (mol)

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

M_{udara} = Massa udara (kg)

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

Berdasarkan persamaan (2.1) dapat kita ketahui nilai *air fuel ratio* stoikiometrik untuk bahan bakar butana

➤ Massa atom relatif (Ar)

Karbon (C) = 12

Hidrogen (H) = 1

Oksigen (O) = 16

Nitrogen (N) = 14

➤ *Air Fuel Ratio* (AFR) stoikiometrik butana berdasarkan jumlah mol

$$\begin{aligned} \text{AFR} &= \frac{N_{\text{udara}}}{N_{\text{bahan bakar}}} \\ \text{AFR} &= \frac{6,5 \times (1 + 3,76)}{1} \\ &= 30,94 \frac{\text{mol}_{\text{udara}}}{\text{mol}_{\text{bahan bakar}}} \end{aligned}$$

➤ *Air Fuel Ratio* (AFR) stoikiometrik butana berdasarkan massa

$$\begin{aligned} \text{AFR} &= \frac{M_{\text{udara}}}{M_{\text{bahan bakar}}} \\ \text{AFR} &= \frac{(6,5 \cdot (2 \times 16)) + (6,5 \cdot (3,76 \times 14 \times 2))}{(1 \cdot ((12 \times 4) + 10))} \\ &= \frac{892,32}{58} \\ &= 15,38 \frac{\text{kg}_{\text{udara}}}{\text{kg}_{\text{bahan bakar}}} \end{aligned}$$

Setelah didapatkan perbandingan massa udara dan massa bahan bakar, kita dapat mengetahui perbandingan volume udara dan volume bahan bakar dengan menggunakan rumus dasar masa jenis. Rumus tersebut dapat dituliskan sebagai berikut

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

Keterangan

- ρ : massa jenis (gr/cm^3)
 m : massa (gr)
 v : volume (cm^3)

Pada asumsi suhu ruangan sebesar $27^\circ C$ diketahui bahwa massa jenis udara sebesar $0,0012 \text{ gr/cm}^3$ atau $1,2 \text{ kg/m}^3$ dan massa jenis bahan bakar butana adalah sebesar $0,00248 \text{ gr/cm}^3$ atau $2,48 \text{ kg/m}^3$. maka volume udara dan volume bahan bakar sesuai *air fuel ratio* stoikiometrik adalah

$$V_{\text{udara}} \equiv \frac{m}{\rho} \dots \dots \dots (2-4)$$

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

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

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

Maka perbandingan antara volume udara dan bahan bakar sesuai *air fuel ratio* stoikiometrik adalah

$$\begin{aligned} V_{\text{udara}} & : V_{\text{bahan bakar}} \\ 743,6 \text{ dm}^3 & : 23,39 \text{ dm}^3 \\ 31,79 \text{ L} & : 1 \text{ L} \end{aligned}$$

2.2.4 Rasio Ekuivalen

Reaksi pembakaran aktual yang sesuai dengan perbandingan rasio udara dan bahan bakar pada kesetimbangan masa atau stoikiometrik hampir tidak mungkin tercapai. Maka dari itu, digunakan suatu tetapan nilai rasio perbandingan antara *AFR* stokiometri dan *AFR* aktual yang digunakan pada saat pembakaran yang disebut rasio ekuivalen. Rasio ekuivalen berfungsi untuk mengetahui nilai atau besar campuran dari bahan bakar dan udara dan pengelompokan kadar suatu pencampuran udara dan bahan bakar yang digunakan dalam proses pembakaran. Yang dituliskan dengan rumus.

$$\phi = \frac{(AFR)_s}{(AFR)_a} \dots\dots\dots(2-6)$$

Keterangan :

- ϕ = Rasio ekuivalen
- AFR_s = Rasio udara dan bahan bakar dengan kondisi stoikiometrik
- AFR_a = Rasio udara dan bahan bakar dengan kondisi aktual

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

- $\Phi > 1$ (*fuel-rich mixture*) Terdapat kelebihan bahan bakar dan campurannya disebut sebagai campuran kaya bahan bakar
- $\Phi < 1$ (*fuel-lean mixture*) Campuran miskin bahan bakar
- $\Phi = 1$ Campuran sesuai stoikiometrik

2.2.5 Batas Kestabilan Nyala Api (*Flame Stability Limit*)

Suatu batas komposisi campuran oksidator dan bahan bakar untuk terjadinya suatu reaksi pembakaran dengan nyala api stabil disebut batas kestabilan nyala api (*Flame Stability Limit*). Pada batas tersebut terdapat batas maksimum dan batas minimum suatu pembakaran dapat terjadi dengan stabil. daerah rentang antara dua batas tersebut adalah daerah stabilitas nyala api. Sebagai contoh, suatu api tidak akan menyala stabil dari campuran antara gas alam

dan udara sebagai oksidator jika prosentase dari gas alam kurang dari 4% atau lebih dari 15%.

Pada prosentase konsentrasi bahan bakar rendah dibawah batas mampu nyala api minimum, dalam suatu campuran tersebut mungkin bisa terjadi penyalaan api namun energi hasil penyalaan api tidak cukup digunakan sebagai energi aktivasi untuk menyalakan api pada lapisan campuran selanjutnya atau didekatnya. Dengan naiknya prosentase konsentrasi bahan bakar maka energi hasil pembakaran juga meningkat sampai ke titik dimana energi hasil pembakaran mampu digunakan sebagai energi aktivasi untuk menyalakan campuran bahan bakar dan udara didekatnya.

Sedangkan, pada prosentase konsentrasi bahan bakar tinggi diatas batas mampu nyala api maksimum. Dalam campuran tersebut udara sebagai oksidator reaksi pembakaran tidak mencukupi untuk mereaksi bahan bakar yang menyebabkan api tidak mampu menyala stabil.

2.3 Bahan Bakar

Bahan bakar merupakan sumber energi dalam reaksi pembakaran yang 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 (CO₂) dan air (H₂O). Bahan bakar dibagi menjadi dua kelompok besar berdasarkan prosesnya yakni, 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 juga diklasifikasikan menjadi 3 dari bentuknya yaitu, bahan bakar cair, bahan bakar padat dan bahan bakar gas. Berdasarkan cara pembuatannya bahan bakar dibedakan menjadi 2 juga yaitu, bahan bakar alami dan sintesis atau buatan. Bahan bakar yang dapat secara langsung dapat diambil dari alam dan tidak ada campur tangan manusia untuk meningkatkan nilai kalornya disebut bahan bakar alami, contohnya adalah bahan bakar gas yaitu gas alam. Dan bahan bakar yang terlebih dahulu diproses secara kimia atau proses fisika untuk menambah nilai kalornya disebut bahan bakar sintesis atau buatan. Salah satu contoh bahan bakar sintesis atau buatan adalah bahan bakar gas butana (C₄H₁₀).

Butana atau *n*-butana merupakan alkana dengan empat atom karbon CH₃CH₂CH₂CH₃ yang ditunjukkan dengan awalan-but dan memiliki susunan rantai lurus. Nama *n*-butana digunakan sebagai nama kolektif dari butana dan butana juga memiliki isomer yaitu

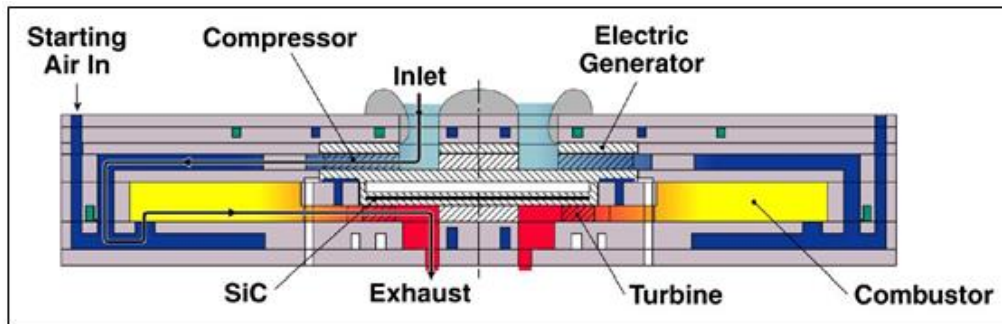
isobutana atau dapat disebut metilpropana $\text{CH}(\text{CH}_3)_3$. Karena butana memiliki sifat sangat mudah terbakar, tidak berwarna, dan mudah dicairkan maka dalam penelitian ini digunakan butana sebagai bahan bakar. Karakteristik dari bahan bakar gas butana antara lain.

Karakteristik butana :

- Rumus kimia : C_4H_{10}
- Titik leleh : $-140\text{ }^\circ\text{C}$ pada tekanan 1 atm
- Titik didih : $-1\text{ }^\circ\text{C}$ pada tekanan 1 atm
- *Flash point* : $-60\text{ }^\circ\text{C}$ pada tekanan 1 atm
- Densitas : $2,48\text{ kg/m}^3$ pada temperatur $15\text{ }^\circ\text{C}$
- *Autoignition* temperatur : $405\text{ }^\circ\text{C}$
- *Higher heating value* : $49,5\text{ MJ/kg}$

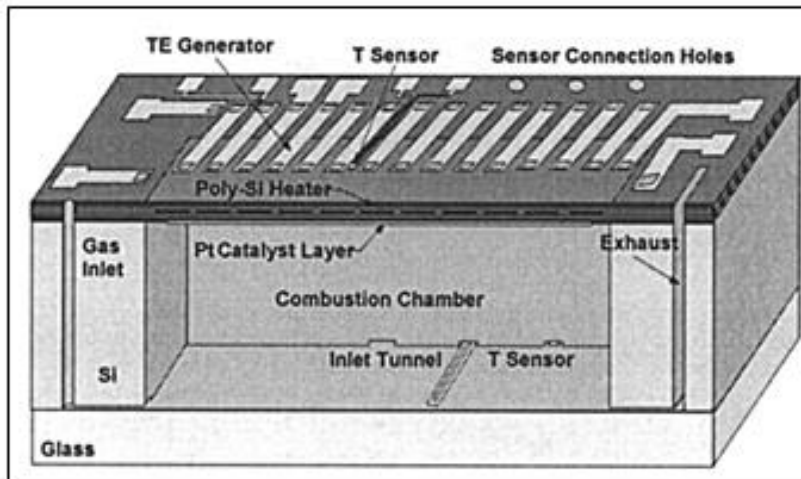
2.4 Micropower Generator (MPG) dan Micro/Meso-Scale Combustor

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 generator pada umumnya seperti, generator turbin gas yang memanfaatkan pembakaran untuk memutar turbin yang dalam *micro power generator* digunakan turbin 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*.



Gambar 2.9 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 2.10 Micropower generator dengan prinsip *thermoelectric*
Sumber : Fernandez-Pello, et al, 2002

2.5 Pembakaran Pada *Disk Combustor* Menggunakan Variasi Besar Sudut Saluran Masuk

Pembakaran yang stabil pada *circular disk combustor* tidak mudah dicapai beberapa penyebabnya yakni, aliran udara dan bahan bakar atau aliran reaktan yang masuk kurang mendukung agar terjadi pencampuran antara udara dan bahan bakar, dan kurangnya waktu tinggal reaktan dalam ruang bakar. Kecepatan tangensial aliran yang masuk merupakan komponen utama dari aliran *vortex* dalam ruang bakar yang digunakan untuk menstabilkan nyala api non-premixed pada *meso-scale combustor* (Khaleghi, 2015). Aliran *vortex* memiliki pengaruh penting karena digunakan sebagai bantuan untuk mencapai stabilitas pembakaran. Pada pengaplikasiannya sebuah pusaran (*swirl*) yang kuat digunakan untuk meningkatkan momentum antara aliran aksial dengan tangensial sehingga mempercepat waktu pencampuran bahan bakar dan udara, dan meningkatkan waktu tinggal reaktan dalam ruang bakar.

Besar sudut saluran masuk sangat menentukan kecepatan tangensial dari suatu aliran yang masuk pada *circular disk combustor* (Yoon et al. 2011), yang nantinya akan sangat berpengaruh pada proses pembakaran pada *circular disk combustor*. Oleh karena itu perbandingan besar sudut saluran masuk dibuat agar pembakaran yang terjadi pada *disk combustor* bisa lebih stabil sehingga membuat temperatur yang dihasilkan lebih tinggi dan lebih merata.

2.7 Hipotesis

Dari teori yang telah dijelaskan diambil hipotesis bahwa, semakin besar sudut *inlet* pada *disk combustor* yaitu sampai 90° akan mengakibatkan perputaran aliran reaktan dalam *combustor* semakin yang menjadikan pembakaran lebih stabil dan menghasilkan temperatur lebih tinggi dan lebih merata.



BAB III METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental nyata (*true experimental research*). Penelitian dilakukan dengan melihat hasil secara nyata, yang akan di dapatkan data (*flame stability limits*, temperatur dinding *circular disk combustor*, dan visualisasi nyala api) dan ditampilkan dalam grafik yang telah di plot. Dari data yang didapatkan dalam penelitian akan dibandingkan dan diberikan kesimpulan tentang penelitian ini.

3.1 Tempat dan Waktu Pelaksanaan

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Mesin-Mesin Fluida, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya di Jalan Mayjend Haryono Nomer 167, Malang, Jawa Timur, Indonesia pada bulan Maret 2018 sampai Juni 2018.

3.2 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang ditentukan sendiri oleh peneliti dan tidak terpengaruh oleh variabel lainnya. Variabel bebas yang digunakan adalah :

- Variasi besar sudut saluran masuk *Circular Disk Combustor* 0° , 30° , 60° dan 90° .
- Rasio Ekuivalen (ϕ)

Rasio ekuivalen divariasikan dengan mengatur debit udara dan bahan bakar divariasikan pada batas atas dan batas bawah dimana masih memungkinkan terjadinya pembakaran stabil pada *Circular Disk Combustor*.

2. Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang hasilnya dipengaruhi oleh variabel bebas yang didapat dari hasil penelitian. Variabel terikat penelitian ini adalah:

- *Flame Stability Limits*
- Temperatur Dinding *Combustor*
- Visualisasi Nyala Api

3. Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang nilainya dijaga tetap pada proses penelitian berlangsung, berikut variabel terkontrol pada penelitian ini:

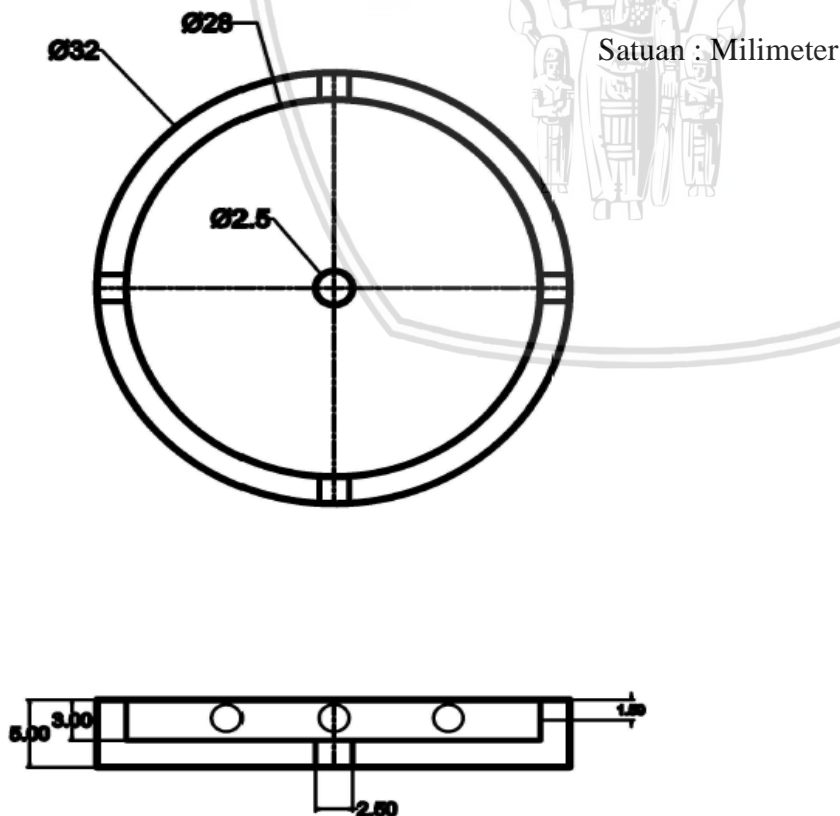
- Material *Combustor* menggunakan Tembaga (*Cu*)
- Dimensi ruang bakar *Circular Disk Combustor* berdiameter 28 mm
- Dimensi ruang bakar *Circular Disk Combustor* dengan tebal 3 mm

3.3 Peralatan Penelitian

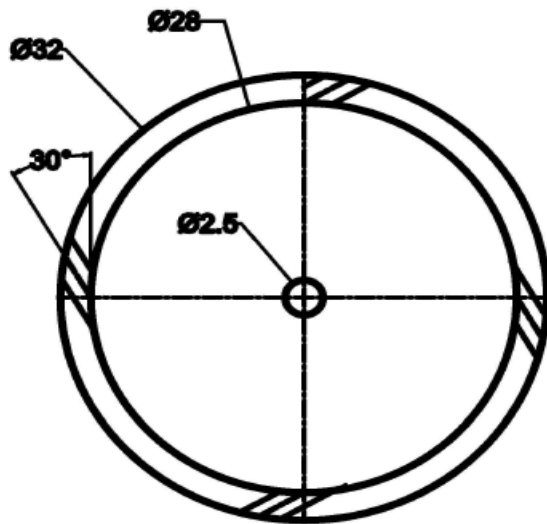
Peralatan penelitian yang digunakan dalam penelitian ini akan dijelaskan sebagai berikut.

1. *Circular Disk Combustor*

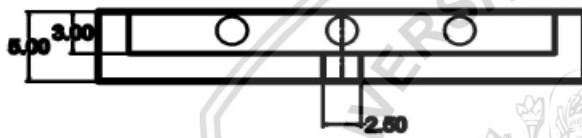
Circular Disk Combustor adalah alat utama pada penelitian ini, dimana akan diamati hasil pembakaran di dalam *meso-scale combustor*. Penelitian ini menggunakan 4 buah *combustor* dengan besar sudut saluran masuk 0° , 30° , 60° dan 90° ; material *combustor* yang digunakan adalah tembaga; untuk desain dan dimensi lebih detailnya dapat dilihat pada gambar 3.1 dst.



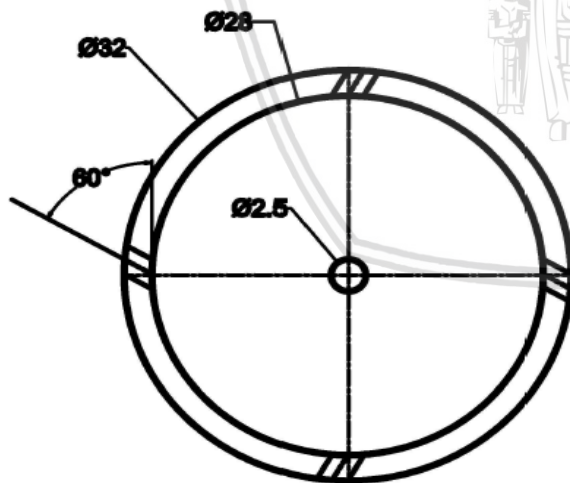
Gambar 3.1 *Circular Disk Combustor* dengan sudut inlet 0°



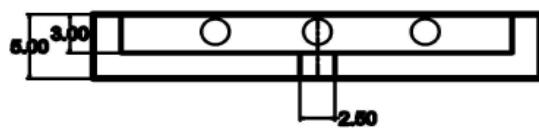
Satuan : Milimeter



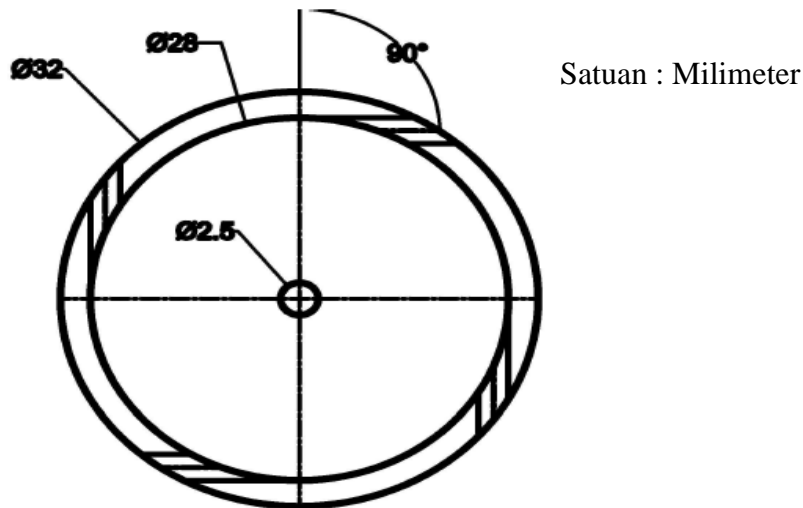
Gambar 3.2 Circular Disk Combustor dengan sudut inlet 30°



Satuan : Milimeter



Gambar 3.3 Circular Disk Combustor dengan sudut inlet 60°



Gambar 3.4 Circular Disk Combustor dengan sudut inlet 90°

Spesifikasi :

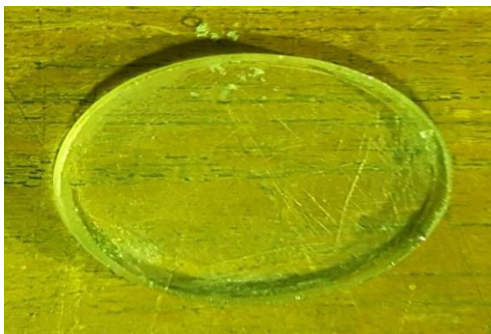
Material : Tembaga (Cu)

Densitas : 8,96 g/cm³

Titik Lebur : 1084,62°C

2. Kaca Tahan Api

Kaca tahan api digunakan untuk menutup permukaan *Tangential Circular Disk Combustor*, selain itu digunakan kaca tahan api karena untuk pengambilan data visualisasi nyala api dibutuhkan material yang transparan namun tahan terhadap suhu hasil pembakaran.



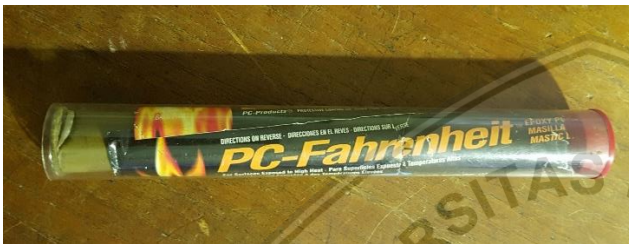
Gambar 3.5 Kaca Tahan Api

Spesifikasi :

- Merk : *Pyrex*
- Bahan : *Borosilicate*
- Suhu Maksimal : 500°C

3. Lem Tahan Api (*PC-Fahrenheit*)

Lem tahan api berfungsi sebagai penggabung antara kaca tahan api yang mampu menahan panas hingga 260° dengan *Circular Disk Combustor*. Selain itu juga sebagai isolator agar panas tidak berpindah ke lingkungan.



Gambar 3.6 Lem Tahan Panas (*PC-Fahrenheit*)

Spesifikasi :

- Merk : *PC-Fahrenheit*
- Berat : 180 gr

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 3.7 Butana (C_4H_{10})

Spesifikasi :

- Merk : WINN GAS
- Berat bersih : 235 gr

5. Regulator Butana

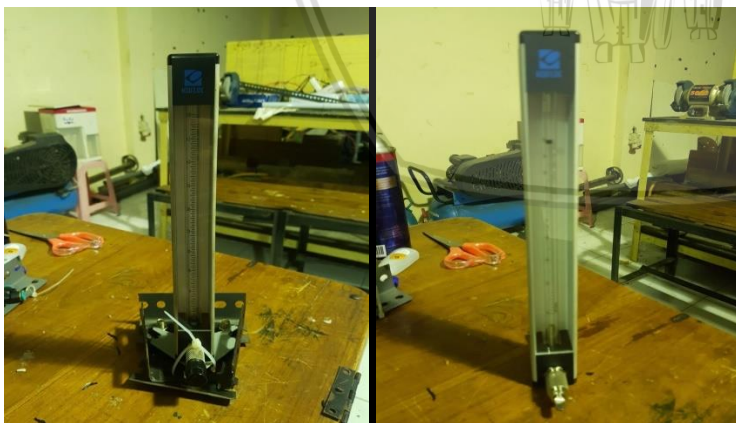
Regulator Butana digunakan untuk mengalirkan bahan bakar butana dari tabung butana menuju *flowmeter*. Dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 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* harus dikalibrasi terlebih dahulu. *Flowmeter* dapat dilihat pada Gambar 3.9.



(a)

(b)

Gambar 3.9 (a) *Flowmeter* Udara (b) *Flowmeter* Bahan Bakar

Spesifikasi :

Flowmeter Udara

- Merk : Kofloc
- Seies : RK-1250
- Jenis : *Flowmeter* Udara
- Tekanan kerja : 0,1 Mpa
- *Minimum flow* : 0,5 Liter/min
- *Maximum flow*: 5,0 Liter/min

Flowmeter Bahan Bakar

- Merk : Kofloc
- Series : RK-1250
- jenis : *Flowmeter* butana (C_4H_{10})
- Tekanan Kerja : 0,1 Mpa
- *Minimum flow* : 10 ml/min
- *Maximum flow* : 100 ml/min

7. *T Connector* dan *Connector* Saluran Masuk

T connector berfungsi untuk membagi 2 saluran reaktan yang berasal dari *mixing chamber*, sedangkan *connector* saluran masuk berfungsi untuk menghubungkan reaktan dengan *Circular Disk Combustor*.



(a)

(b)

Gambar 3.10 (a) *Connector* Saluran Masuk (b) *T Connector*

8. *Y - Connector*

Y- Connector berfungsi pengganti *mixing chamber* untuk mencampur udara dan bahan bakar sebelum masuk ke *Circular Disk Combustor*.



Gambar 3.11 Y – Connector

9. Pemantik

Pemantik berfungsi untuk memberikan energi aktivasi agar terjadi pembakaran di dalam *Circular Disk Combustor* dapat dilihat pada gambar 3.12.



Gambar 3.12 Pemantik

10. Kompresor

Kompresor digunakan untuk menyuplai udara (oksidator) pada *Circular Disk Combustor*, udara yang digunakan adalah udara bebas. Dapat dilihat pada gambar 3.13.



Gambar 3.13 Kompresor udara

Spesifikasi :

- Merk : Lakoni
- *Power* : 0,75 HP/0,5 KW
- *Voltage* : 220 V/50 Hz
- *Outlet pressure* : 8 Bar
- Kapasitas tangki : 10 Liter
- *Rated speed* : 2850 rpm
- *Flow* : 120 Liter/min

11. *Thermocouple*

Thermocouple adalah sebuah sensor suhu yang digunakan untuk mengukur temperatur dinding *combustor* pada *Circular Disk Combustor*.

Spesifikasi :

- Tipe : *K-Type*
- *Range* suhu : -270° C – 1320°C

12. *Data Logger*

Data logger digunakan untuk menerima data temperatur dinding *Circular Disk Combustor*.

Spesifikasi :

- Merk : Advantech
- *Channels* : 8
- *Input Type* : mV, V, mA
- *Input range* : J,K,T,E,R,S, dan B
- *Accuracy* : ±0.1%

13. Laptop

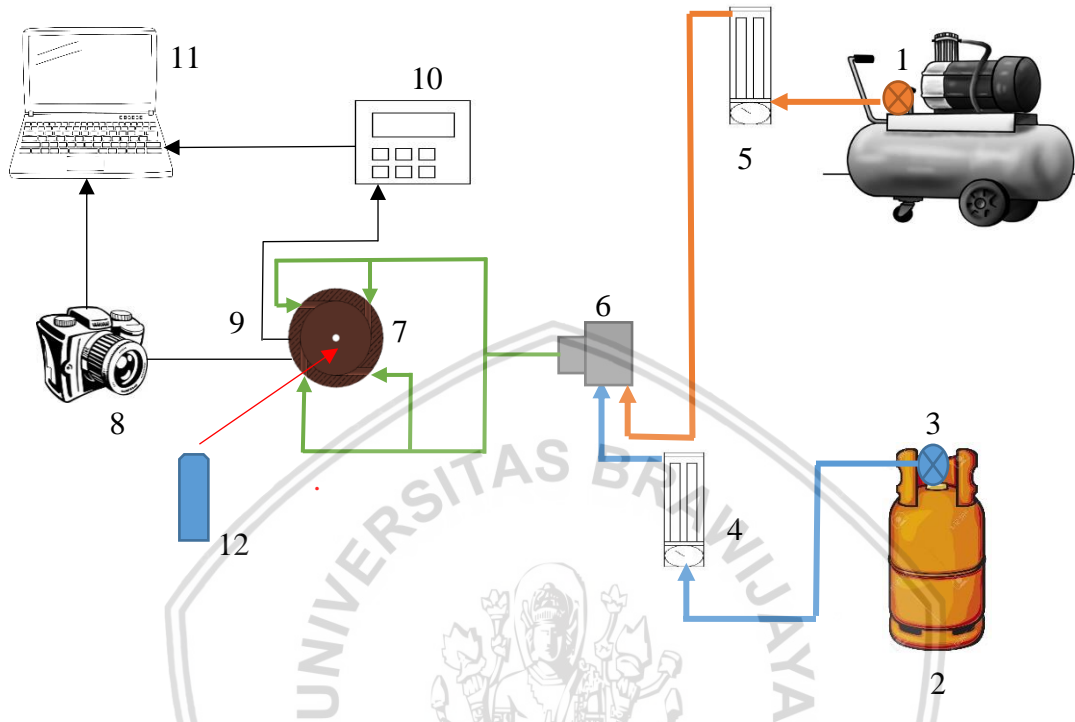
Digunakan untuk menyimpan dan mengolah data hasil penelitian.

14. Kamera

Kamera digunakan untuk mengambil data visualisasi nyala api.

3.4 Skema Instalasi Penelitian

Berikut ini merupakan skema instalasi penelitian.



Gambar 3.14 Skema penelitian

Keterangan:

- | | |
|---|------------------------|
| 1. Kompresor | 7. <i>Combustor</i> |
| 2. Bahan bakar | 8. Kamera |
| 3. Regulator | 9. <i>Thermocouple</i> |
| 4. <i>Flowmeter</i> bahan bakar | 10. <i>Data Logger</i> |
| 5. <i>Flowmeter</i> udara | 11. Laptop |
| 6. <i>Y-Connector</i> (<i>Mixing Chamber</i>) | 12. Pemantik |

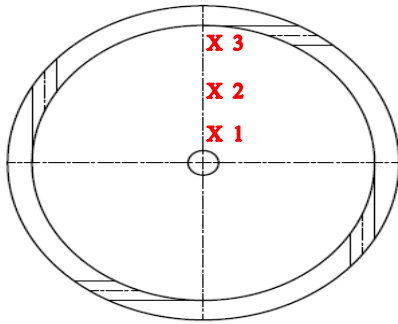
3.5 Metode Pengambilan Data

Metode pengambilan data pada penelitian ini adalah:

1. Menyiapkan *Circular Disk Combustor* dengan baik, dan tanpa kebocoran di tiap sisinya.
2. Mengkalibrasi *flowmeter* bahan bakar.

Proses kalibrasi dimulai dengan mengisi penuh air pada bak penampung dan memasukan gelas ukur sampai terisi penuh dan diposisikan terbalik kemudian alirkan bahan bakar dari tabung butana melalui selang yang telah diatur debit terbacanya pada *flowmeter* bahan bakar. Ujung selang tersebut dimasukan kedalam gelas ukur dimana volume air pada gelas ukur akan terdesak keluar karena volume air ditempati oleh gas butana, setelah bahan bakar mulai masuk kedalam gelas ukur secara perlahan gelas ukur ditarik ke atas sehingga permukaan air dalam gelas ukur dan di luar gelas ukur tetap sejajar, posisi ujung selang dengan permukaan air di dalam gelas ukur dan di luar gelas ukur harus tetap sejajar agar tekanan yang ada tetap sama. Tetapkan sebuah volume patokan untuk mengukur waktu yang dibutuhkan agar gas butana tersebut dapat mengisi volume tersebut

3. Menyusun peralatan sesuai dengan instalasi alat pada sub bab 3.4.
4. Mulai pengambilan dari *flame stability terlebih dahulu*.
5. Alirkan udara dan bahan bakar.
6. Pemantik api dengan pemantik sampai api menyala stabil atau dapat menyala lebih dari 3 menit.
7. Data *flame stability limits* diambil dengan cara memvariasikan debit bahan bakar dan debit udara pada perbandingan rasio ekuivalen tertentu sampai ditemukan batas bawah dan batas atas dimana masih memungkinkan terjadinya pembakaran.
8. Pengambilan data visualisasi nyala api *combustor* dengan rasio ekuivalen 1 dengan berbagai macam debit bahan bakar dan berbagai macam rasio ekuivalen.
9. Pengambilan gambar menggunakan kamera $\alpha 600$ dengan skala makro, dengan sudut tegak lurus dengan arah *Circular Disk Combustor*.
10. Pengambilan data temperatur dinding *combustor* menggunakan *thermocouple* tipe K yang di catat oleh data *logger*, yang akan di simpan di laptop pada rasio ekuivalen 1.
11. Titik pengambilan data temperatur dinding *Circular Disk Combustor* dilakukan pada jarak 3, 7, 14mm terhadap sumbu utama sepanjang diameter *combustor*, seperti pada gambar 3.15.
12. Pengambilan data temperatur gas buang menggunakan *thermocouple* yang dihubungkan dengan data *logger* dan disimpan pada laptop.



Gambar 3.15 Titik pengambilan data temperatur dinding *circular disk combustor*

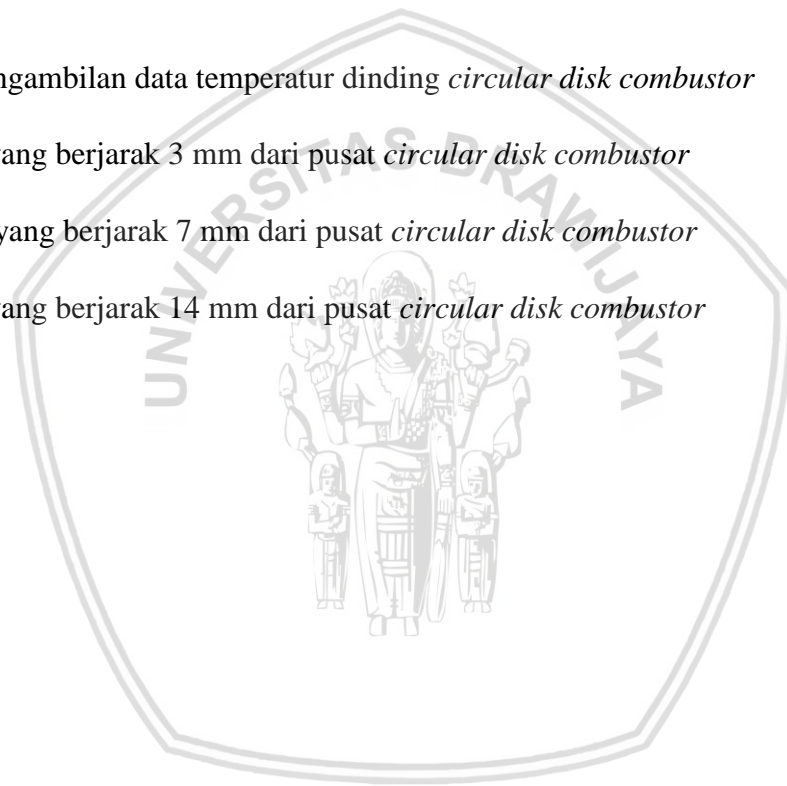
Keterangan:

X : Titik pengambilan data temperatur dinding *circular disk combustor*

X1: Titik 1 yang berjarak 3 mm dari pusat *circular disk combustor*

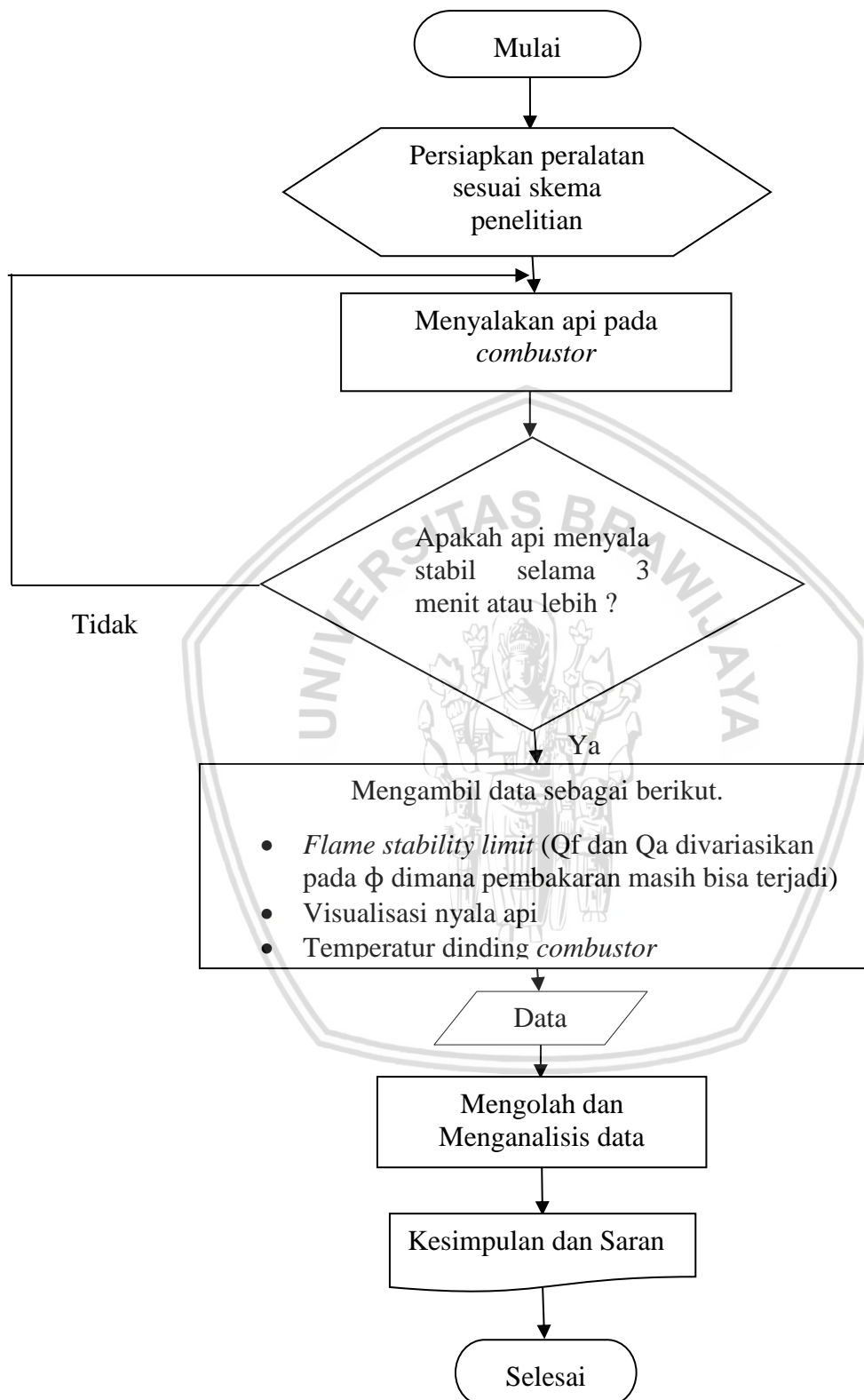
X2: Titik 2 yang berjarak 7 mm dari pusat *circular disk combustor*

X3: Titik 3 yang berjarak 14 mm dari pusat *circular disk combustor*



3.6 Diagram Alir Penelitian

Berikut ini merupakan diagram alir dari penelitian yang akan dilaksanakan.



Gambar 3.16 Diagram alir penelitian



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kalibrasi Flowmeter

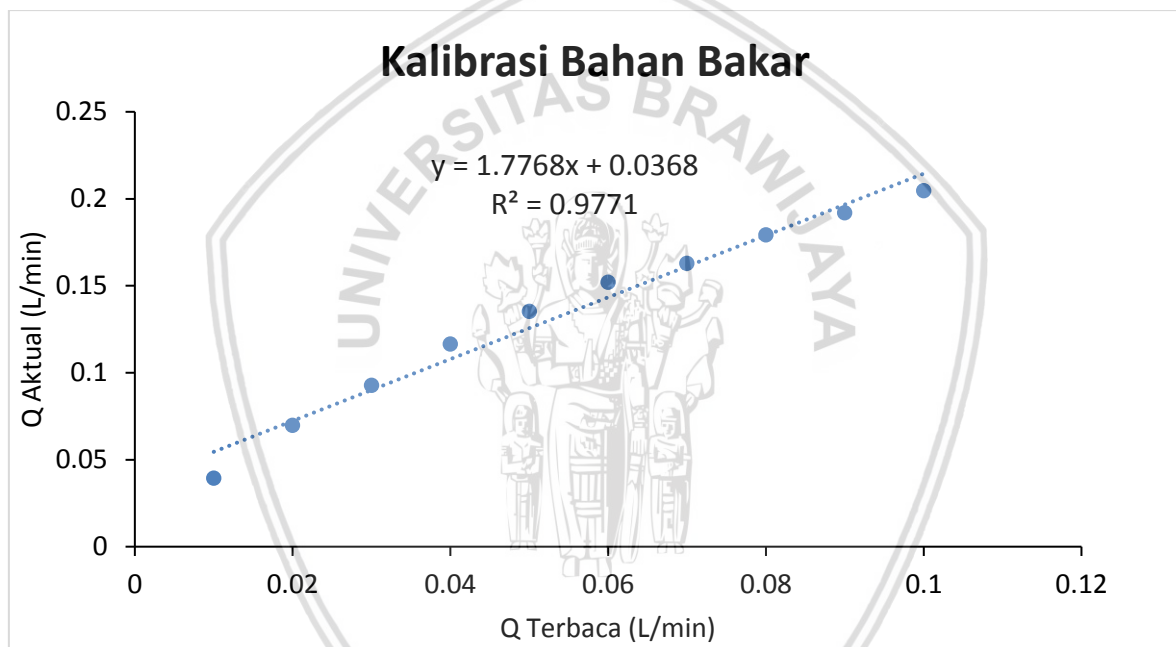
Data hasil penelitian ini didapat dengan metode *experimental research* tentang pengaruh besar sudut saluran masuk diantaranya adalah 90° , 60° , 30° dan 0° terhadap karakteristik pembakaran dengan pembakaran *premixed* yang terjadi pada *meso-scale combustor* berbentuk *disk-type circular* atau *circular 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 dengan 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 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 berikut ini.

Tabel 4.1

Data kalibrasi *flowmeter* bahan bakar butana (C_4H_{10})

Q_{terbaca} (ml/min)	Waktu (s)	$V_{\text{gelas ukur}}$ (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.

$$y = 1,7768x + 36,751$$

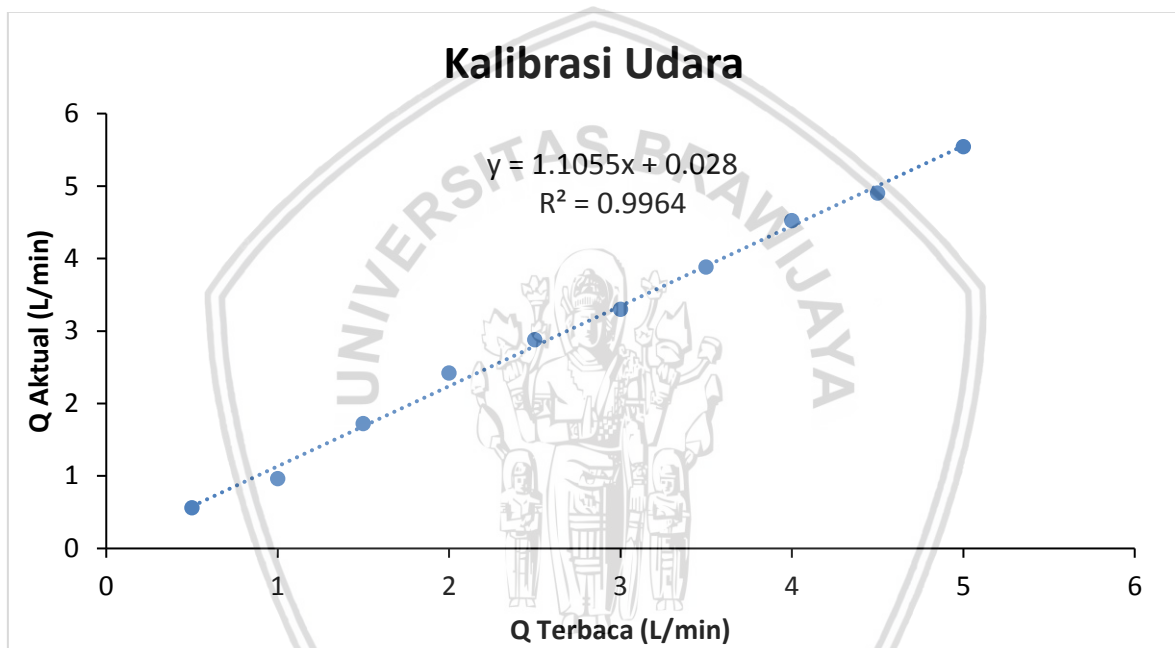
Dimana :

y : Q_f aktual (L/min)

x : Q_f terbaca (L/min)

Tabel 4.2
Data kalibrasi *flowmeter* udara

Q_{terbaca} (L/min)	Waktu (s)	$V_{\text{gelas ukur}}$ (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 Pengolahan dan Pembahasan Data Batas Kestabilan Nyala Api

Data batas kestabilan nyala api atau *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 minimum dan maksimum yang bertujuan untuk mengetahui kebutuhan debit reaktan atau campuran udara dan bahan bakar dimana pembakaran yang dihasilkan masih memiliki nyala api yang stabil yaitu mampu menyala selama minimal 3 menit. Untuk mengetahui rasio ekuivalen dan kecepatan reaktan dapat dijelaskan dengan contoh perhitungan berikut ini dimana diketahui $(AFR)_{stoikiometri} = 30,94$.

Perhitungan untuk $\phi = 1$

$$\bullet \phi = \frac{(AFR)_{stoikiometri}}{(AFR)_{aktual}} \dots\dots\dots (4-1)$$

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

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

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

$$\bullet V_{reaktan} = \frac{Q_f + Q_a}{3,14 \times r^2 \times \Sigma Inlet} \dots\dots\dots (4-2)$$

$$V_{reaktan} = \frac{(55 + 2239) \text{ ml/s}}{\frac{(3,14 \times 0,8^2 \times 4)}{100} \text{ cm}^2}$$

$$V_{reaktan} = 475.54 \text{ cm/s}$$

Tabel 4.3

Data *flame stability limits circular disk combustor* dengan sudut inlet 90°

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)	Tidak Stabil	Padam
0.67			90	4.1		872.57	X	X
0.7	55	2.2	90	4.0	475.54	849.65	X	X
0.8	55	2.1	143	5.6	452.62	1181.60	X	X
1	55	1.7	179	5.6	360.94	1188.97	X	X
1.4	55	1.1	179	4.0	246.33	868.07	X	X
1.8	55	0.9	179	3.2	200.49	707.62	X	X
2.2	55	0.8	108	1.5	177.57	326.15	X	X
2.4	55	0.7	108	1.4	154.65	303.23	X	X

Tabel 4.4

Data *flame stability limits circular disk combustor* dengan sudut inlet 60°

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)	Tidak Stabil	Padam
0.67								
0.7			90	3.3		712.1	X	X
0.8	90	3.5	135	5.6	735.0	1179.8	X	X
1.0	72	2.2	179	5.6	479.2	1189.0	X	X
1.4	72	1.6	179	4.0	341.7	868.1	X	X
1.8	72	1.2	179	3.2	272.9	707.6	X	X
2.2			108	1.5		280.3	X	X
2.4			108	1.4		303.2	X	X

Tabel 4.5

Data *flame stability limits circular disk combustor* dengan sudut inlet 30°

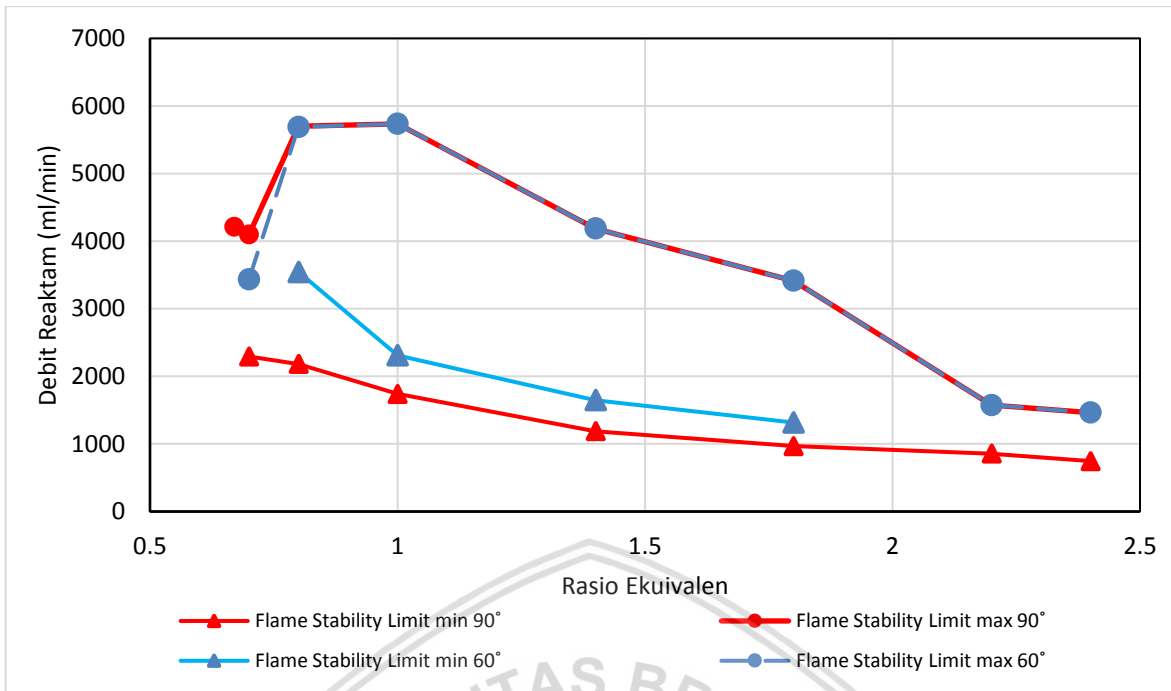
Rasio Ekuivalen (ϕ)	Q_f min (ml/min)	Q_a min (L/min)	Q_f maks (ml/min)	Q_a maks (L/min)	$V_{reaktan}$ min (cm/s)	$V_{reaktan}$ maks (cm/s)	Tidak Stabil	Padam
0.67	X	X	X	X	X	X	✓	✓
0.7	X	X	X	X	X	X	✓	✓
0.8	X	X	X	X	X	X	✓	✓
1.0	X	X	X	X	X	X	✓	✓
1.4	X	X	X	X	X	X	✓	✓
1.8	X	X	X	X	X	X	✓	✓
2.2	X	X	X	X	X	X	✓	✓
2.4	X	X	X	X	X	X	✓	✓

Tabel 4.6

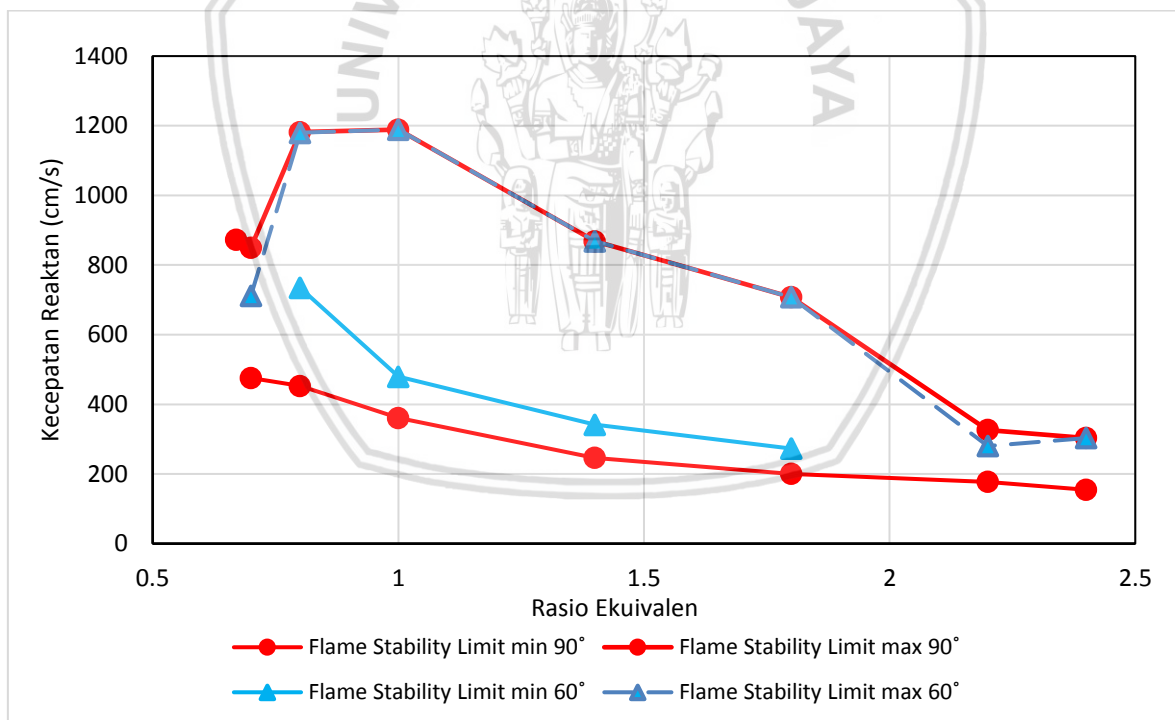
Data *flame stability limits circular disk combustor* dengan sudut inlet 0°

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)	Tidak Stabil	Padam
0.67	X	X	X	X	X	X	✓	✓
0.7	X	X	X	X	X	X	✓	✓
0.8	X	X	X	X	X	X	✓	✓
1.0	X	X	X	X	X	X	✓	✓
1.4	X	X	X	X	X	X	✓	✓
1.8	X	X	X	X	X	X	✓	✓
2.2	X	X	X	X	X	X	✓	✓
2.4	X	X	X	X	X	X	✓	✓

Dari rumus dan tabel diatas maka kita mendapatkan grafik perbandingan kecepatan reaktan dengan rasio ekuivalen dan grafik perbandingan debit total reaktan dengan rasio ekuivalen.



Gambar 4.3 Perbandingan kestabilan nyala api sudut inlet 90° dan 60° pada ϕ dan debit reaktan yang divariasikan.



Gambar 4.4 Perbandingan kestabilan nyala api sudut inlet 90° dan 60° pada ϕ dan kecepatan reaktan yang divariasikan.

Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 menjelaskan bahwa kestabilan nyala api dengan menunjukkan batas maksimum dan batas minimum dimana api masih bisa menyala dengan variasi besar sudut saluran masuk reaktan pada *circular disk combustor*. Pada *circular disk*

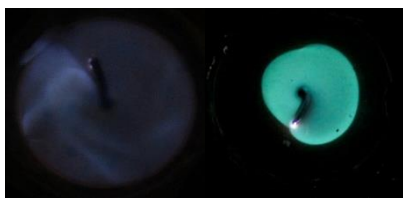
combustor dengan sudut saluran masuk reaktan 90° , api bisa menyala dari rasio ekuivalen 0,67 sampai rasio ekuivalen 2,4 dan pada sudut saluran masuk reaktan 60° api bisa menyala pada rasio ekuivalen 0,7 sampai 2,4. Pada sudut saluran masuk reaktan 90° api bisa menyala rata-rata pada debit bahan bakar sebesar 55 ml/min sampai 179 ml/min sedangkan pada *circular disk combustor* dengan sudut saluran masuk reaktan 60° , api bisa menyala dengan debit bahan bakar 72 ml/min sampai 179 ml/min.

Pada sudut saluran masuk reaktan 90° , api tetap bisa menyala pada debit bahan bakar 55 ml/min namun pada sudut saluran masuk reaktan 60° , api hanya bisa menyala pada debit bahan bakar 72 ml/min. Hal ini dikarenakan pada sudut saluran masuk reaktan 90° menyebabkan aliran masuk reaktan lebih mudah berputar dalam ruang bakar dan mengakibatkan waktu tinggal reaktan lebih lama dalam ruang bakar. Hasilnya percampuran antara bahan bakar dan udara dalam ruang bakar lebih sempurna serta campuran reaktan lebih tersebar keseluruh ruang bakar daripada *combustor* sudut saluran masuk reaktan 60° . Dengan sempurnanya percampuran reaktan yang terjadi mengakibatkan pembakaran stabil lebih mudah terjadi. Selain itu lamanya waktu tinggal reaktan dalam ruang bakar mampu menyempurnakan pembakaran yang terjadi karena *heat generation* dalam ruang bakar lebih besar dan memudahkan pembakaran yang stabil terjadi.

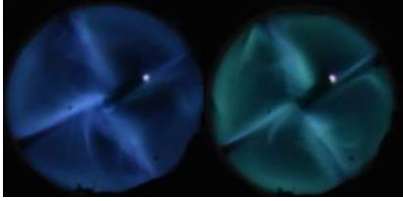
4.3 Pembahasan Data Visualisasi Nyala Api

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 dari besar sudut saluran masuk pada kenaikan rasio ekuivalen dan kenaikan debit reaktan.

Pada *circular disk combustor* dengan sudut saluran masuk reaktan 30° dan 0° , waktu tinggal reaktan dalam ruang bakar sangat rendah sehingga *heat generation* yang terjadi tidak mampu untuk menstabilkan nyala api. Yang terjadi adalah api hanya mampu menyala saat ruang bakar dipantik oleh pemantik, hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6



Gambar 4.5 Visualisasi nyala api pada *circular disk combustor* dengan sudut saluran masuk 30°



Gambar 4.6 Visualisasi nyala api pada *circular disk combustor* dengan sudut saluran masuk 0°

Tabel 4.7
Data visualisasi nyala api pada variasi Q_f dengan $\phi = 1$

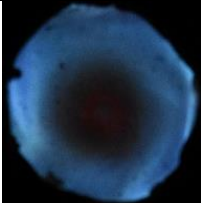
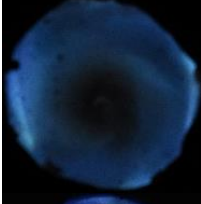
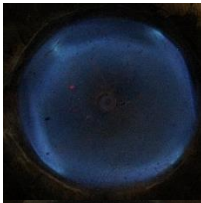




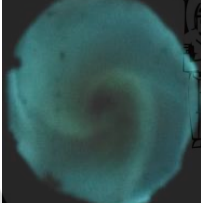
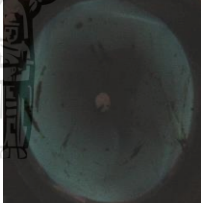
Debit bahan bakar (ml/min)	Combustor dengan sudut inlet 90°	Combustor dengan sudut inlet 60°
$Q_f = 55$		
$Q_f = 72$		
$Q_f = 90$		
$Q_f = 108$		
$Q_f = 135$		
$Q_f = 143$		
$Q_f = 179$		

Tabel 4.7 menunjukkan visualisasi bentuk nyala api pada rasio ekuivalen (ϕ) 1 dan debit reaktan dari 55 ml/min sampai 179 ml/min dengan variasi besar sudut saluran masuk. Pada tabel diatas terlihat bahwa *circular disk combustor* dengan sudut saluran masuk 90° bisa menyala pada debit bahan bakar 55 ml/min karena dengan sudut saluran masuk 90° mampu mengondisikan aliran reaktan dalam ruang bakar agar terjadi perputaran dalam ruang bakar dan akhirnya keluar melalui saluran *exhaust*. Dengan begitu aliran reaktan mampu memiliki waktu tinggal dalam ruang bakar lebih lama dalam ruang bakar daripada *circular disk combustor* dengan sudut saluran masuk 60° . *Circular disk combustor* dengan sudut saluran masuk 60° juga memungkinkan suatu aliran reaktan dalam ruang bakar untuk terjadi *swirling flow* sebelum akhirnya terbuang melalui saluran *exhaust*, 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 sudut saluran masuk 90° dengan debit bahan bakar 55 ml/min reaktan sudah bisa terbakar. Berbeda dengan sudut saluran masuk 60° , membutuhkan debit 72 ml/min karena kecepatan tangensial reaktan dalam ruang bakar dengan sudut saluran masuk 90° lebih besar sehingga aliran reaktan lebih mudah berputar dalam ruang bakar.

Dalam visualisasi nyala api, terlihat pada debit bahan bakar 108 ml/min nyala api dalam *circular disk combustor* dengan sudut saluran masuk 60° lebih memenuhi ruang bakar daripada yang terjadi pada sudut saluran masuk 90° . Hal ini terjadi karena kecepatan tangensial reaktan hasil sudut saluran masuk 90° lebih tinggi daripada sudut saluran masuk 60° , menyebabkan bahan bakar dalam campuran reaktan cenderung terkumpul pada sisi radial ruang bakar karena kecepatan tangensial yang tinggi akan menghasilkan gaya sentrifugal yang tinggi (prinsip alat *sentrifuge*). Hasilnya pembakaran pada sudut saluran masuk 90° lebih terkonsentrasi pada sisi radial *circular disk combustor* daripada sudut saluran masuk 60° .

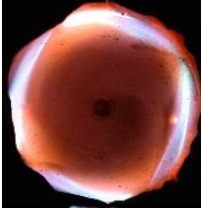

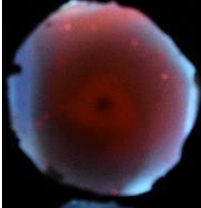
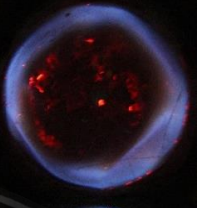



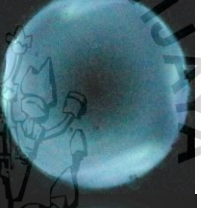
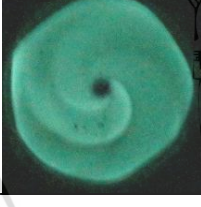
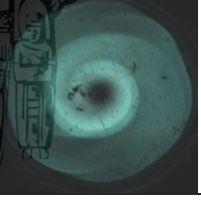
Dari visualisasi nyala api juga terlihat bahwa pada debit 135 ml/min sampai 179 ml/min material *circular disk combustor* mulai memerah. Pada *circular disk combustor* dengan sudut 90° warna merah dari material *circular disk combustor* menyatu dengan warna nyala api dan pada *circular disk combustor* dengan sudut 60° warna material terlihat bercak bercak merah dan baru pada debit bahan bakar 179 ml/menit warna material mulai merata dan menyatu dengan warna api. Hal ini menunjukkan perbedaan signifikan *heat loss* pembakaran ke dinding *combustor* antara dua *combustor*. Pada sudut 90° perputaran aliran atau *swirling flow* yang terjadi mengakibatkan perpindahan panas ke dinding *combustor* terjadi secara merata daripada pembakaran pada *circular disk combustor* dengan sudut saluran masuk 60° .

Tabel 4.8
Data visualisasi nyala api pada variasi ϕ dengan $Q_f = 90$ ml/min

Rasio Ekuivalen	Combustor dengan sudut inlet 90°	Combustor dengan sudut inlet 60°
$\phi = 0.7$		
$\phi = 0.8$		
$\phi = 1$		
$\phi = 1,4$		
$\phi = 2$		

Pada Tabel 4.8 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. Perbedaan disini adalah *circular disk combustor* dengan sudut saluran masuk 90° mampu menyala dengan debit bahan bakar 90 ml/min dan nilai rasio ekuivalen 0,7 seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.

Tabel 4.9
Data visualisasi nyala api pada variasi ϕ dengan $Q_f = 135$ ml/min

Rasio Ekuivalen	Combustor dengan sudut inlet 90°	Combustor dengan sudut inlet 60°
$\phi = 0,7$		
$\phi = 0,8$		
$\phi = 1$		
$\phi = 1,4$		
$\phi = 2$		

Pada Tabel 4.9 menunjukkan 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 jumlah saluran masuk.


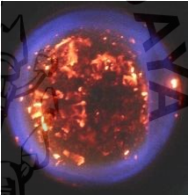
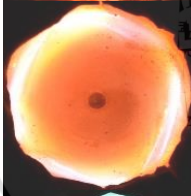
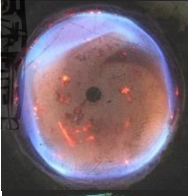
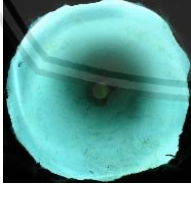
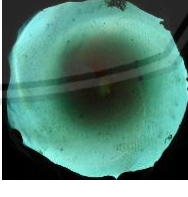


Pada kedua variasi, seiring dengan meningkatnya jumlah rasio ekuivalen maka warna nyala api yang dihasilkan akan semakin terang lalu menuju ke kehijau-hijauan, warna kehijau-hijauan disini menunjukkan reaktan yang terbakar disini adalah campuran udara dan bahan bakar dengan kondisi kaya bahan bakar. Bahan bakar yang berlebih akan menimbulkan senyawa radikal C_2 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 0.7 sampai dengan rasio ekuivalen 1. Pada sudut saluran masuk 90° , persebaran pembakaran lebih merata daripada sudut saluran masuk 60° . Hal ini terjadi karena ada sudut saluran masuk 90° , waktu tinggal reaktan dalam ruang bakar lebih lama daripada sudut saluran masuk 60° yang menyebabkan api dapat menyebar lebih merata dalam ruang bakar sebelum reaktan terbuang melalui saluran exhaust.

Tabel 4.10

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

Rasio Ekuivalen	Combustor dengan sudut inlet 90°	Combustor dengan sudut inlet 60°
$\phi = 0,8$		
$\phi = 0,9$		
$\phi = 1$		
$\phi = 1,4$		
$\phi = 2$		

Pada Tabel 4.10 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 sudut diatas. Sudut saluran masuk 90° , menghasilkan nyala api yang lebih merata.

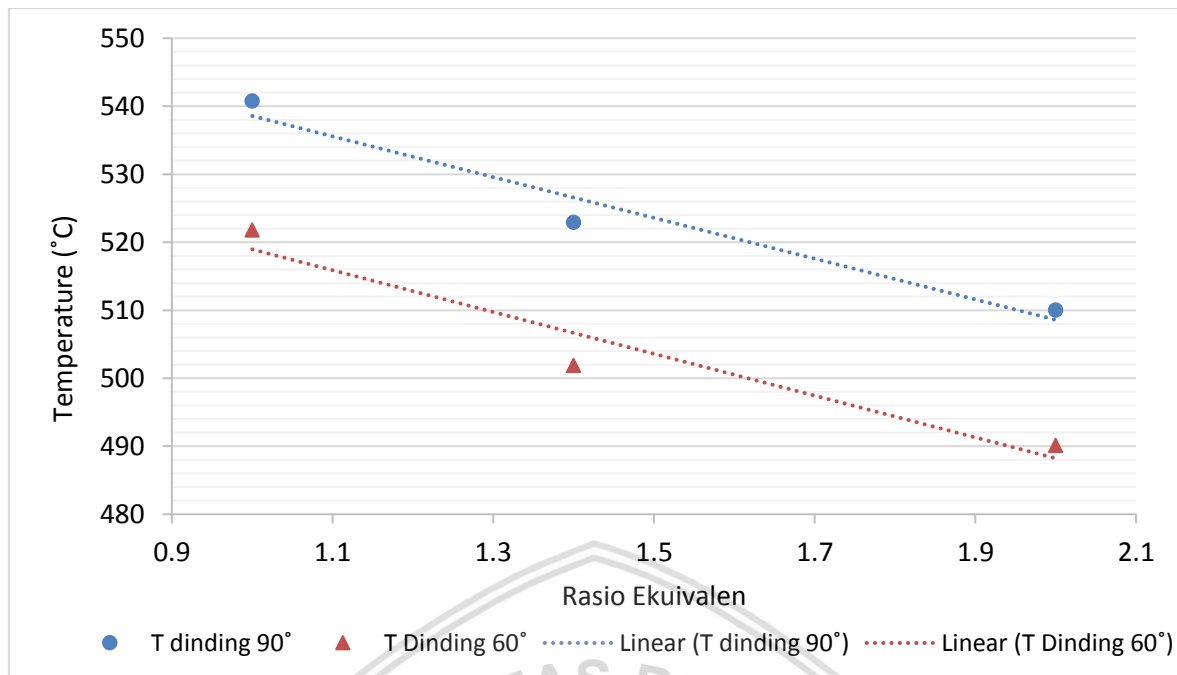
4.4 Pengolahan dan Pembahasan Data Temperatur Dinding *Combustor*

Titik pengambilan temperatur dinding *tangential 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 sudut saluran masuk.

Tabel 4.11
Data Temperatur Dinding *Circular Disk Combustor* ($^\circ\text{C}$)

Sudut Inlet	Titik	T pada Rasio Ekuivalen ($^\circ\text{C}$)		
		1	1.4	2
90°	1	529.66	516.47	493.12
	2	543.32	524.45	518.01
	3	549.29	527.87	519.01
	rata-rata	540.76	522.93	510.05
60°	1	499.81	471.32	459.19
	2	528.28	515.85	505.50
	3	537.34	518.54	505.67
	rata-rata	521.81	501.91	490.12

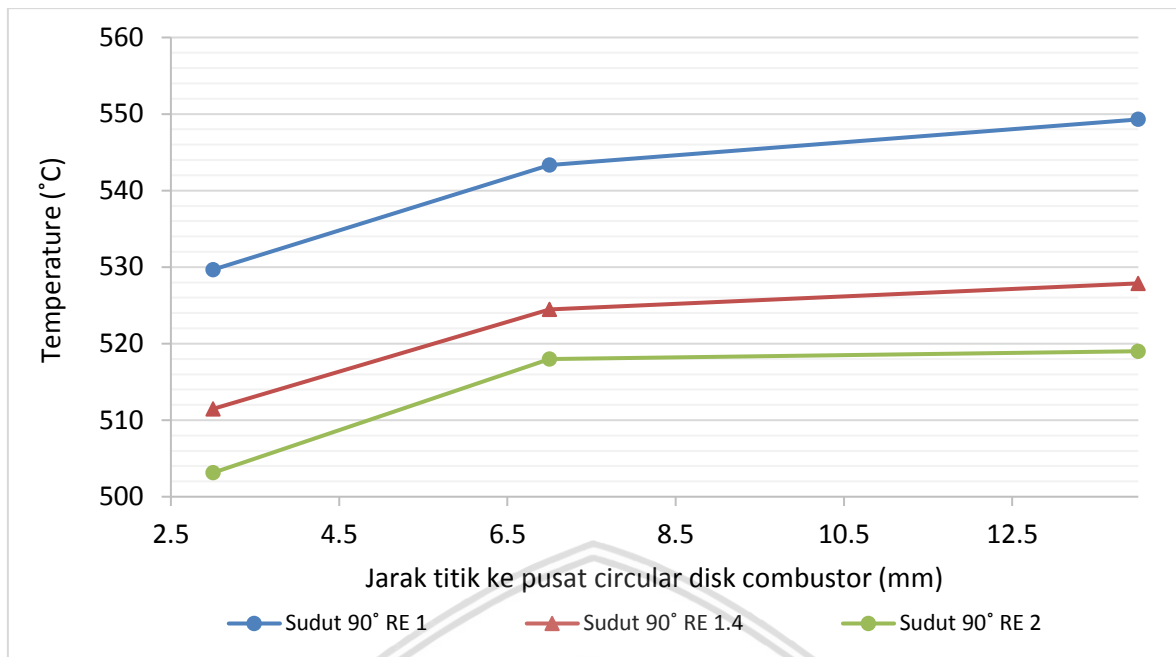
Pada Tabel 4.11 didapatkan 528.28 nilai 459.19 temperatur dinding *combustor* dengan variasi jumlah saluran masuk, dan dapat diplot kedalam Gambar 4.7



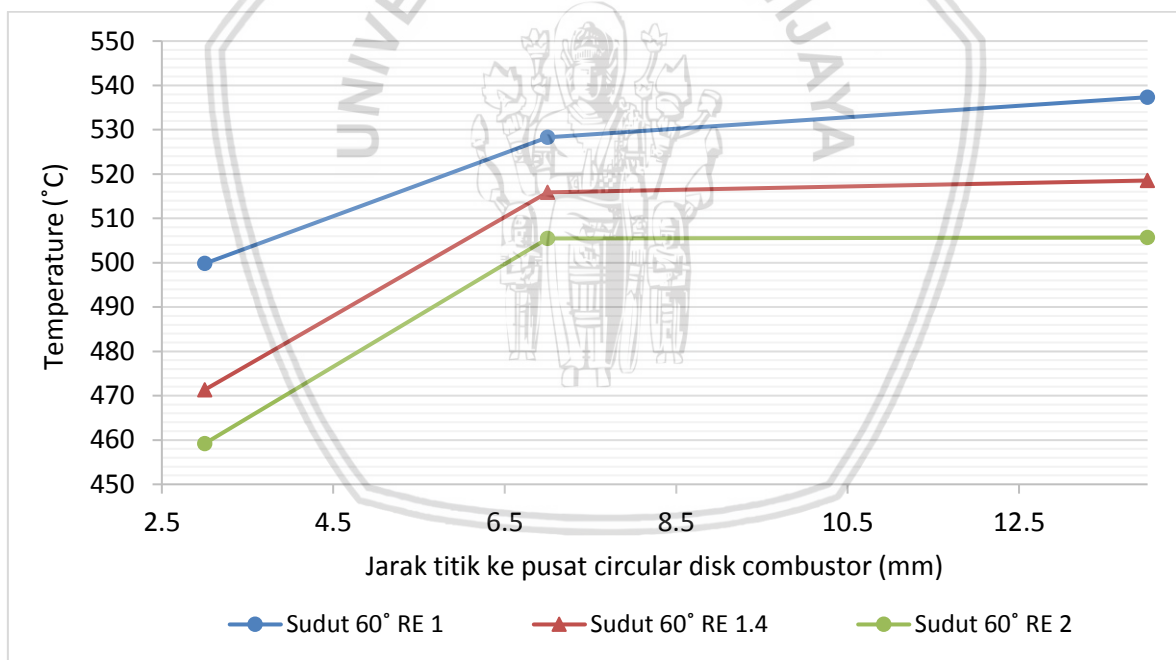
Gambar 4.7 Perbandingan temperatur rata-rata dinding *combustor* terhadap rasio ekuivalen yang divariasikan pada debit bahan bakar 135 ml/min.

Pada Gambar 4.7 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. Sedangkan 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 saat terjadi reaksi pembakaran.

Pada sudut saluran masuk 90°, temperatur dinding pada semua rasio ekuivalen yang diukur lebih tinggi daripada sudut saluran masuk 60° karena circular disk combustor dengan sudut masuk 90° memiliki waktu tinggal lebih lama dan aliran reaktan lebih stabil daripada sudut saluran masuk 60°. Hal ini menyebabkan pembakaran yang stabil sekaligus meningkatkan *heat loss* dari pembakaran ke dinding *combustor* (Khaleghi, 2015). Dan terbukti pada grafik Gambar 4.7



Gambar 4.8 Temperatur dinding *combustor* dengan sudut *inlet* 90° pada masing-masing titik



Gambar 4.9 Temperatur dinding *combustor* dengan sudut *inlet* 60° pada masing-masing titik.

Pada kedua gambar di atas, menunjukkan perbedaan pada keseragaman temperature dinding. Pada *combustor* dengan sudut saluran masuk 90° terlihat grafiknya hampir linier menunjukkan distribusi temperaturnya seragam berbeda dengan sudut saluran masuk 60° yang memiliki perbedaan antara titik ke 2 dan ke 1 yang cukup signifikan, hal ini

menunjukkan pembakaran yang terjadi kurang merata yang menyebabkan distribusi temperature masih terakumulasi pada titik 3 dan 2.

Pada titik 3 dan 2 memiliki temperatur yang tinggi karena pembakaran pada kecepatan reaktan yang tinggi cenderung terdorong oleh gaya tangensial akibat kecepatan reaktan yang tinggi. Hasilnya, pembakaran terakumulasi di sisi keliling ruang bakar dan menyebabkan perbedaan temperatur yang tinggi antara aliran reaktan yang terbakar dengan dinding *combustor* pada titik 3 dan 2.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian tentang pengaruh jumlah saluran masuk terhadap karakteristik pembakaran pada *circular disk combustor* dengan variasi besar sudut saluran masuk dan pembakaran *premixed* dengan bahan bakar butana adalah sebagai berikut:

1. Pembakaran pada sudut saluran masuk 90° atau *tangential inlet* menghasilkan pembakaran yang lebih stabil dan merata dibandingkan dengan pembakaran pada sudut saluran masuk 60° .
2. Semakin besar sudut saluran masuk maka *range flame stability limit* yang dihasilkan akan semakin lebar.
3. Semakin besar sudut saluran masuk maka temperatur dinding *combustor* akan semakin tinggi.
4. *Circular disk combustor* dengan sudut saluran masuk 30° dan 0° tidak dapat menghasilkan pembakaran yang stabil.

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh diameter saluran masuk terhadap karakteristik pembakaran pada *circular disk combustor*.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh diameter ruang bakar terhadap karakteristik pembakaran pada *circular disk combustor*.
3. 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.
- Djafar, Z., Putra N., Koestoer, R. A. (2010). Pengaruh Variasi Temperatur Fluida Panas terhadap Karakteristik Modul Termoelektrik Generator. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Depok: Universitas Indonesia.
- Katsuyoshi, T., Soichiro, K., Taku, M., Toshiyuki, S. (2009). *Development Of The Micro Combustor*. *Engineering Review* vol 42 no 2. Page 97-101.
- Maruta, K. (2011). *Micro And Mesoscale Combustion*. *Proceedings of The Combustion Institute* vol 33 Issue 1 Page 125-150.
- Mostafa Khaleghi, Seyed Ehsan Hosseini, Mazlan Abdul Wahid (2015). *Investigations of asymmetric non-premixed meso-scale vortex combustion*. *Applied Thermal Engineering* 81 Page 140-153
- Ragang Aji W., Lilis Y., Haslinda K. (2017). Karakteristik Pembakaran Pada *Circular Disk Combustor* Dengan *Inlet* Reaktan Pada Arah Radial Dan Tangensial. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Soon Hyun Yoon, Do Yeon Kim, Dong Keon Kim and Bong Hwan Kim. (2010), *Effect of Nozzle Geometry for Swirl Type Twin-fluid Water Mist Nozzle on The Spray Characteristic*. Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, Korea
- Wardana, I.N.G. (2008). Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran. PT. Danar Wijaya. Malang: Brawijaya University Press.
- Youngsuk, N., Yi Xiang, Y., Andrej, L., Peter, B., Ivan, C., Marin, S., Evelyn, N. W. (2014). *Solar Thermophotovoltaic Energy Conversion Systems with Two-Dimensional Tantalum Photonic Crystal Absorbers and Emitters*. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 122 Page 287-296.