

**PENGARUH VARIASI BENTUK GEOMETRI *COMBUSTOR*
TERHADAP KARAKTERISTIK PEMBAKARAN DALAM *DISK*
*COMBUSTOR***

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**DHYAN GUSRIYANDI SUGIATMADJA
NIM. 145060200111034**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2018**



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah Subhana wa ta'ala atas rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi berjudul “**Pengaruh Variasi Bentuk Geometri Combustor Terhadap Karakteristik Pembakaran Dalam Disk Combustor**”.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang membantu penulis menyelesaikan skripsi ini, terutama kepada:

1. Kedua orang tua yang tersayang, Bapak Suwedi dan Mamah Yanti Maryanti dan juga Adik Dhyan Chairunissa yang tiada henti mendoakan, dan memberi semangat kepada penulis.
2. Bapak Winarto, ST., MT., Ph. D., selaku dosen pembimbing I dan Ibu Dr. Eng. Lilis Yuliati, ST., MT., selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan motivasi, bimbingan dan arahan demi kesempurnaan penulisan skripsi. dan sudah meluangkan waktu untuk membimbing penelitian dari awal hingga akhir.
3. Ibu Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT., selaku dosen wali yang tiada henti memberikan bimbingan selama penulis menyelesaikan studi di Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
4. Seluruh Dosen Pengajar dan Staff Administrasi Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang yang telah memberikan banyak ilmu pengetahuan yang sangat mendukung selama penyusunan skripsi.
5. Teman satu kelompok penelitian yang selalu semangat dalam melakukan penelitian Ashidieqy, Fahmi, Dimas.
6. Resti Cahyati yang selalu memberikan bantuan, semangat, dukungan, serta saran untuk mensukseskan penyelesaian skripsi.
7. Seluruh asisten Laboratorium Mesin-Mesin Fluida yang telah memberikan motivasi dan banyak pengalaman kepada penulis.
8. Keluarga besar M'14 atas semangat dan doanya kepada penulis.

Besar harapan penulis semoga penelitian ini bermanfaat. Penulis mohon maaf atas segala kekurangan dan kesalahan yang terdapat dalam penelitian ini.

Malang, Oktober 2018

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
RINGKASAN	vii
SUMMARY	viii
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 Klasifikasi Pembakaran Berdasarkan Cara Reaktan Terbakar Pada Zona Reaksi	10
2.2.2 Reaksi Pembakaran	11
2.2.3 Rasio Udara Dan Bahan Bakar (AFR)	12
2.2.4 Rasio Ekuivalen (ϕ)	13
2.2.5 Kestabilan Nyala Api (<i>Flame Stability Limit</i>)	14
2.3 Pembakaran Pada <i>Rectangular</i> dan <i>Circular Disk Combustor</i> Dengan Variasi Jumlah Saluran Masuk	14
2.4 Bahan Bakar Dan Klasifikasinya	15
2.4.1 Butana	16
2.5 Pembakaran Pada <i>Disk Combustor</i> Menggunakan Variasi Besar Sudut Saluran Masuk	17
2.6 Hipotesis	17
BAB III METODE PENELITIAN	19
3.1 Tempat dan Waktu Pelaksanaan	19
3.2 Variabel Penelitian	19
3.3 Peralatan Penelitian	20



3.4 Skema Instalasi Penelitian.....	27
3.5 Metode Pengambilan Data	28
3.6 Diagram Alir Penelitian.....	30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	31
4.1 Kalibrasi <i>Flowmeter</i>	31
4.2 Pengolahan dan Pembahasan Data Batas Kestabilan Nyala Api	33
4.3 Pembahasan Data Visualisasi Nyala Api	36
4.4 Pengolahan dan Pembahasan Data Temperatur Dinding <i>Combustor</i>	41
BAB V PENUTUP	45
5.1 Kesimpulan.....	45
5.2 Saran.....	45
DAFTAR PUSTAKA	



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Gas pada Udara Kering	11
Tabel 2.2 Massa Atom Relatif (Ar)	12
Tabel 2.3 <i>Properties</i> Gas Butana.....	16
Tabel 4.1 Data Kalibrasi <i>Flowmeter</i> Bahan Bakar Butana (C ₄ H ₁₀)	31
Tabel 4.2 Data Kalibrasi <i>Flowmeter</i> Udara.....	33
Tabel 4.3 Data <i>Flame Stability Limits Circular Disk Combustor</i>	34
Tabel 4.4 Data <i>Flame Stability Limits Rectangular Disk Combustor</i>	34
Tabel 4.5 Data Visualisasi Nyala Api pada Variasi Qf dengan $\phi = 1$	37
Tabel 4.6 Data Visualisasi Nyala Api pada Variasi ϕ dengan Qf = 90 ml/min	39
Tabel 4.7 Data Visualisasi Nyala Api pada Variasi ϕ dengan Qf = 135 ml/min	40
Tabel 4.8 Data Visualisasi Nyala Api pada Variasi ϕ dengan Qf = 179 ml/min	41
Tabel 4.9 Data Temperatur Dinding <i>Circular Disk Combustor</i> (°C)	42

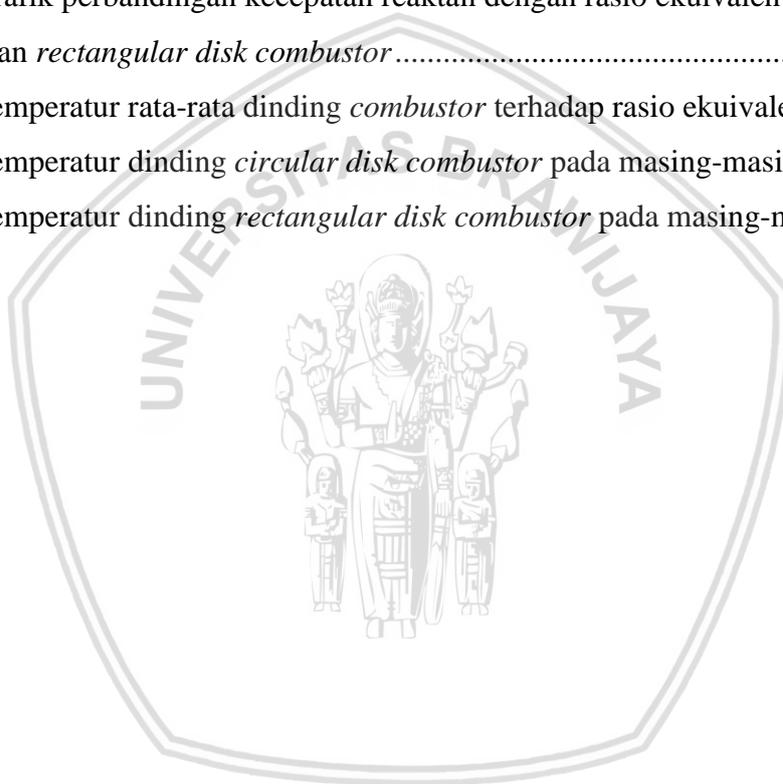


DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema <i>generator thermoelectric</i> dengan <i>combustor</i> yang diapit dua modul <i>thermoelectric</i>	5
Gambar 2.2 Pengaruh laju aliran massa dan rasio equivalensi terhadap suhu pada 4 titik pengukuran di dinding <i>combustor</i>	6
Gambar 2.3 (a) <i>Disk-type combustor</i> dan (b) <i>Tube-type combustor</i>	6
Gambar 2.4 (a)Perbandingan konsentrasi gas buang CO dengan <i>Spesific surface area</i> dan (b)Perbandingan temperatur gas buang dengan <i>Spesific surface area</i> pada <i>disk-type combustor</i>	7
Gambar 2.5 (a)Efek diameter <i>tube</i> pada konsentrasi gas buang CO dan (b)Efek rasio ekuivalen pada konsentrasi gas buang CO pada <i>tube-type combustor</i>	7
Gambar 2.6 Desain <i>meso-scale combustor</i>	8
Gambar 2.7 (a)temperatur saluran masuk udara dengan variasi <i>mass flow rate</i> , (b) dengan variasi rasio ekuivalen	8
Gambar 2.8 <i>Twin fluid type</i>	9
Gambar 2.9 Ilustrasi proses pembakaran.....	10
Gambar 2.10 (a)Pembakaran <i>premixed</i> dan (b)Pembakaran <i>non-premixed</i> atau difusi	10
Gambar 2.11 api <i>laminar</i> dan api <i>turbulent</i>	11
Gambar 2.12 Struktur ikatan molekul butana (C ₄ H ₁₀)	16
Gambar 3.1 <i>Tangential Circular Disk Combustor</i> dengan 4 inlet	20
Gambar 3.2 <i>Rectangular Disk Combustor</i> dengan 4 inlet.....	21
Gambar 3.3 Kaca Tahan Api	21
Gambar 3.4 Lem Tahan Panas (<i>FC-Fahrenheit</i>).....	22
Gambar 3.5 Tabung Butana (C ₄ H ₁₀).....	22
Gambar 3.6 Regulator Butana	23
Gambar 3.7 (a) <i>Flowmeter</i> Udara (b) <i>Flowmeter</i> Bahan Bakar	23
Gambar 3.8 (a) <i>Connector</i> Saluran Masuk (b) <i>T Connector</i>	24
Gambar 3.9 <i>Y – Connector</i>	24
Gambar 3.10 Pemantik	24
Gambar 3.11 Kompresor udara	25
Gambar 3.12 <i>Thermocouple type-k</i>	25
Gambar 3.13 <i>Data logger</i>	26
Gambar 3.14 Laptop	26



Gambar 3.15 kamera <i>DSLR</i>	26
Gambar 3.16 Skema penelitian.....	27
Gambar 3.17 Titik pengambilan data temperatur dinding <i>combustor circular disk combustor</i> (atas) <i>rectangular disk combustor</i> (bawah).....	29
Gambar 3.18 Diagram alir penelitian	30
Gambar 4.1 Kalibrasi <i>flowmeter</i> bahan bakar butana (C_4H_{10})	32
Gambar 4.2 Kalibrasi <i>flowmeter</i> udara.....	33
Gambar 4.3 Perbandingan debit reaktan dengan rasio ekuivalen pada <i>circular</i> dan <i>rectangular disk combustor</i>	35
Gambar 4.4 Grafik perbandingan kecepatan reaktan dengan rasio ekuivalen pada <i>circular</i> dan <i>rectangular disk combustor</i>	35
Gambar 4.5 Temperatur rata-rata dinding <i>combustor</i> terhadap rasio ekuivalen	42
Gambar 4.6 Temperatur dinding <i>circular disk combustor</i> pada masing-masing titik.....	43
Gambar 4.7 Temperatur dinding <i>rectangular disk combustor</i> pada masing-masing titik...	43



RINGKASAN

Dhyan Gusriyandi Sugiattmadja, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Oktober 2018, *Pengaruh Variasi Bentuk Geometri Combustor Terhadap Karakteristik Pembakaran Dalam Disk Combustor*, Dosen Pembimbing: Winarto, Lilis Yulianti.

Perkembangan teknologi dalam bidang pembakaran berskala mikro (*micro combustion*) semakin pesat, salah satunya pada *micropower generator* dimana salah satu komponen utamanya adalah *micro/meso scale combustor*. *Micro/meso scale combustor* berfungsi sebagai tempat terjadinya pembakaran, dimana panas hasil pembakaran tersebut akan dikonversikan menjadi energy listrik menggunakan modul *thermoelectric*. *Micro/meso scale combustor* memiliki berbagai bentuk, diantaranya ada *rectangular* dan *circular*. Maka dari itu dilakukan penelitian tentang pengaruh bentuk *combustor* terhadap karakteristik pembakaran dari kedua bentuk tersebut.

Pada penelitian ini alat yang digunakan memiliki besar volume yang sama yaitu 1728 mm³, bahan bakar yang digunakan butane (C₄H₁₀) dan material yang digunakan adalah tembaga. Tujuan dari penelitian ini untuk membandingkan pengaruh bentuk ruang bakar terhadap karakteristik pembakaran. Karakteristik pembakaran yang diteliti meliputi *flame stability limit*, visualisasi nyala api, dan temperatur dinding *combustor*. Nantinya dapat dibandingkan mana *combustor* yang memiliki karakteristik pembakaran yang lebih baik, seperti memiliki *range flame stability limit* yang lebih luas, visualisasi nyala api yang stabil dan, temperatur dinding yang lebih tinggi.

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa *combustor* dengan bentuk *circular* memiliki *range flame stability limit* lebih besar, visualisasi nyala api lebih stabil, dan memiliki temperatur dinding yang lebih tinggi.

Kata Kunci: *Circular disk combustor, micro/meso scale combustor, rectangular disk combustor*

SUMMARY

Dhyan Gusriyandi Sugiattmadja, *Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Brawijaya, October 2018, The Effect of Combustor Geometry Variations on Combustion Characteristics in Disk Combustor, Advisor: Winarto, Lilis Yuliati.*

Technological developments in the field of micro-scale combustion (micro combustion) are increasing rapidly, one of them is the micropower generator where one of its main components is the micro / meso scale combustor. Micro/meso scale combustor functions as a place for combustion, where the heat from the combustion will be converted into electrical energy using a thermoelectric module. Micro/meso scale combustor has various shapes such as rectangular and circular. Therefore, research on the effect of combustor shape on the combustion characteristics is carried out.

In this study the volume of circular and rectangular disk combustor are 1728 mm³, the fuel used is butane (C₄H₁₀) and the material used is copper. The purpose of this study is to compare the effect of combustion chamber on combustion characteristics. Characteristics of combustion studied include flame stability limit, flame visualization, and combustor wall temperature). Later it can be compared to which combustors have better combustion characteristics, such as having a wider range of flame stability limits, visualization of a stable flame and a higher wall temperature.

The results of this study indicate that combustors with circular shapes have a wider range of flame stability limits, more stable flame visualization, and higher wall temperature.

Keyword: *Circular disk combustor, micro/meso scale combustor, rectangular disk combustor*

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



Dhyan Gusriyandi Sugiadmadja

NIM. 145060200111034

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH VARIASI BENTUK GEOMETRI COMBUSTOR TERHADAP
KARAKTERISTIK PEMBAKARAN DALAM *DISK COMBUSTOR***

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



DHYAN GUSRIYANDI SUGIATMADJA

NIM. 145060200111034

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

Dosen Pembimbing I

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

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Lilis Yulianti, ST., MT.
NIP. 19750702 200003 2 001

Mengetahui,
Ketua Program Studi S1



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





UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 134/UN10.F07.12.21/PP/2018

Sertifikat ini diberikan kepada :

DHYAN GUSRIYANDI SUGIATMADJA

Dengan Judul Skripsi :

**PENGARUH VARIASI BENTUK GEOMETRI COMBUSTOR TERHADAP KARAKTERISTIK
PEMBAKARAN DALAM DISK COMBUSTOR**

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

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

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

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

JUDUL SKRIPSI:

**Pengaruh Variasi Bentuk Geometri *Combustor* Terhadap Karakteristik Pembakaran
Dalam *Disk Combustor***

Nama Mahasiswa : Dhyan Gusriyandi Sugiattmadja

NIM : 145060200111034

Program Studi : Teknik Mesin

Minat : Teknik Konversi Energi

KOMISI PEMBIMBING

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

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

TIM DOSEN PENGUJI

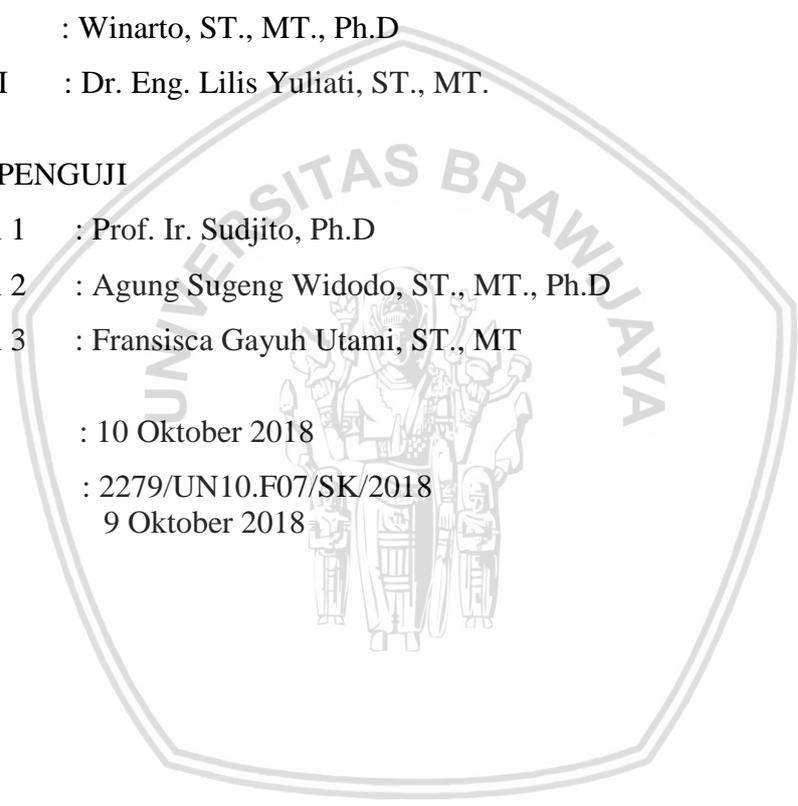
Dosen Penguji 1 : Prof. Ir. Sudjito, Ph.D

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



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada era beberapa tahun belakangan ini, telah terjadi perkembangan teknologi yang cukup pesat. Seperti pada perkembangan teknologi di bidang pembakaran mikro atau disebut juga *micro combustion*. Salah satu perkembangan teknologi di bidang *micro combustion* adalah *micropower generator*. Dimana *micropower generator* itu sendiri merupakan alat yang berpotensi untuk menghasilkan energi panas dan dapat dimanfaatkan sebagai sumber pembangkit listrik yang berskala kecil (*micro*). Komponen utama yang terdapat pada *micropower generator* adalah ruang bakar atau seringkali disebut *combustor*. *Combustor* merupakan tempat terjadinya proses pembakaran berskala *meso* maupun *micro*.

Maruta, et al. (2011) terdapat dua jenis *micropower generator*, yaitu *micropower generator* dengan modul pengkonversi untuk menghasilkan energi listrik dari panas hasil pembakaran dan *micropower generator* yang menggunakan siklus daya konvensional. Terdapat perbedaan prinsip kerja pada kedua jenis *micropower generator* tersebut, pada tipe *micropower generator* yang pertama perubah energi panas menjadi energi listrik menggunakan modul *thermoelectric* atau *thermophotovoltaic*. Sedangkan pada tipe *micropower generator* yang kedua energi listrik yang dihasilkan berasal dari energi panas hasil pembakaran yang memutar turbin berskala mikro. Dari dua jenis *micropower generator* yang telah disebutkan memiliki sumber energi yang berasal dari hasil pembakaran di dalam meso atau *micro-scale combustor*.

Micro-scale combustor dan *meso-scale combustor* memiliki perbedaan, perbedaan ini terletak pada ruang bakarnya. Dimana pada *micro-scale combustor* ruang bakarnya memiliki panjang karakteristik kurang dari 1 mm, sedangkan pada *meso-scale combustor* ruang bakarnya memiliki panjang karakteristik lebih dari 1 mm. *Micro* atau *meso-scale combustor* digunakan untuk mengubah energi kimia menjadi energi thermal.

Ditinjau dari bentuknya, *combustor* terbagi menjadi empat bentuk, yaitu *swiss roll*, *disk-type*, *rectangular slot* dan *tube-type*. *Tube-type* mempunyai keunggulan nyala api yang lebih baik dan lebih stabil nyala apinya, namun memiliki kekurangan yaitu waktu tinggal reaktan yang hanya sebentar dan sulitnya pengaplikasian *thermophotovoltaic* atau *thermoelectric* dikarenakan pada *tube-type* tidak adanya permukaan datar. *Disk-type* mempunyai keunggulan yaitu efisiensi thermalnya lebih tinggi dibandingkan dengan tipe lainnya dan

thermophotovoltaic atau *thermoelectric* lebih mudah diaplikasikan dikarenakan memiliki bidang kontak yang luas dan datar. Katsuyosi, et al., (2009), tetapi terdapat kekurangan yaitu sering terjadinya heat loss dari panas hasil pembakaran. Apabila terjadi *heatloss* dapat menyebabkan api sulit untuk menyebar dan apabila terlalu banyak panas yang terbuang maka api akan padam.

Cozzi, et al. (2006) mengatakan bahwa kecilnya dimensi ruang bakar menyebabkan waktu tinggal reaktan yang semakin singkat.

Menurut Khalegi, et al. (2015) Cara alternatif yang dapat dilakukan dan mudah untuk menstabilkan nyala api pada *meso-scale combustion* adalah dengan cara membuat alirannya turbulen atau berputar di dalam ruang bakar yang disebut juga aliran *swirl*. Aliran *swirl* berfungsi untuk mencapai kestabilan nyala api pada proses pembakaran, hal ini disebabkan pada aliran *swirl* api yang terdapat pada *combustor* berputar lebih lama sebelum keluar melalui saluran gas buang.

Setelah penjabaran di atas maka dapat dilakukan penelitian menggunakan *combustor* dengan bentuk *circular* dan *rectangular disk combustor*. Beberapa faktor yang mempengaruhi aliran dalam *combustor* dengan sisi masuk tangensial yaitu bentuk dari *combustor* itu sendiri, tebal ruang bakar *combustor*, kecepatan masuk reaktan ke dalam *combustor*. Pada penelitian akan diamati penggunaan *disk type combustor* dengan variasi pengaruh bentuk geometri *Combustor* terhadap *flame stability limit*, visualisasi nyala api serta temperatur dinding ruang bakar dengan menggunakan *circular* dan *rectangular disk combustor*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka rumusan masalah dari penelitian ini adalah bagaimana pengaruh bentuk *circular* dan *rectangular disk combustor* terhadap karakteristik pembakaran meliputi *flame stability limit*, visualisasi bentuk nyala api, dan temperatur dinding *combustor* menggunakan bahan bakar butana.

1.3 Batasan Masalah

Agar apa yang akan diteliti lebih jelas dan tidak melebar ke hal-hal lain, maka diberikan batasan penelitian sebagai berikut.

1. Tidak terdapat kebocoran pada alat
2. *Losses* yang terjadi pada tiap saluran dianggap sama
3. Bahan bakar yang digunakan adalah murni 100% butana (C_4H_{10}).

4. Udara berasal dari kompresor yang diasumsikan terdiri dari 79% N_2 dan 21% O_2 . Pembakaran yang terjadi dianggap *steady*

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik pembakaran seperti kesetabilan pembakaran, visualisasi bentuk nyala api, temperatur dinding *combustor* dan gas hasil pembakaran pada *disk combustor* dengan dua bentuk yang berbeda, yaitu *circular* dan *rectangular*.

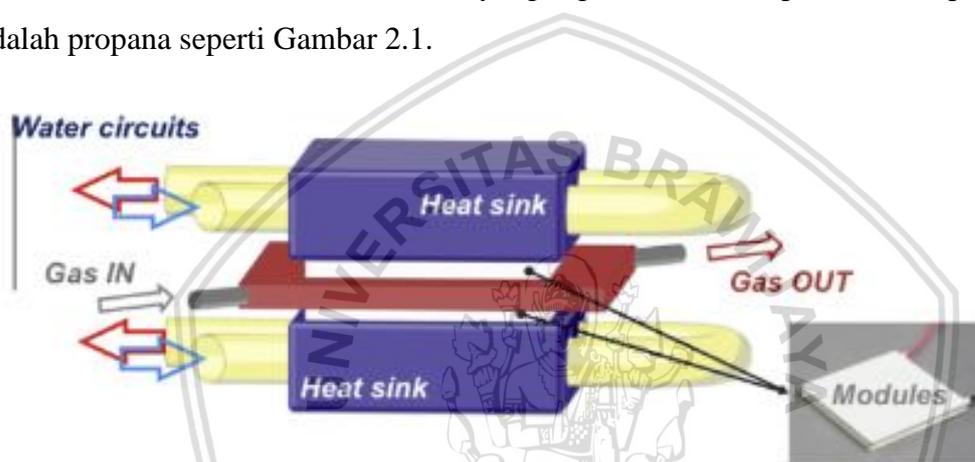
1.5 Manfaat Penelitian

1. Mahasiswa dapat mengetahui pengaruh penggunaan dua macam bentuk *combustor* terhadap karakteristik pembakaran seperti, kestabilan nyala api, visualisasi bentuk nyala api, dan temperatur dinding *combustor* pada *rectangular* dan *circular disk combustor*.
2. Mahasiswa mampu menganalisa karakteristik pembakaran pada *rectangular* dan *circular disk combustor* yang meliputi kestabilan nyala api, visualisasi bentuk nyala api dan temperatur dinding *combustor*.
3. Hasil penelitian ini dapat memberikan pengetahuan baru kepada masyarakat mengenai penggunaan bahan bakar butana pada *rectangular* dan *circular disk combustor*, serta dapat dijadikan referensi untuk penelitian selanjutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Merotto, (2015) melaksanakan penelitian tentang penggunaan dua modul *thermoelectric* yang diletakkan pada permukaan *combustor* (bagian panas) dan lainnya diletakkan didekat dua *water-cooled heat sink* (bagian dingin) dimana adanya perbedaan temperatur yang dihasilkan akan menghasilkan tegangan listrik dengan cara memberi variasi pada *mass flow rate* dan rasio ekuivalen. Bahan bakar yang digunakan dalam pembakaran pada *combustor* adalah propana seperti Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Skema generator *thermoelectric* dengan *combustor* yang diapit dua modul *thermoelectric*

Sumber: Merotto (2015)

Hasil penelitian didapatkan data Meningkatnya rasio ekuivalen dan laju aliran massa akan meningkatkan suhu dinding *combustor*. Tetapi peningkatan terjadi hanya sampai rasio ekuivalen = 1 dan setelah itu cenderung konstan. Hal yang sama terjadi pada tiap-tiap laju aliran massa, dapat dilihat juga pada Gambar 2.2 temperatur gas buang selalu lebih tinggi dibanding temperatur pada dinding *combustor*.

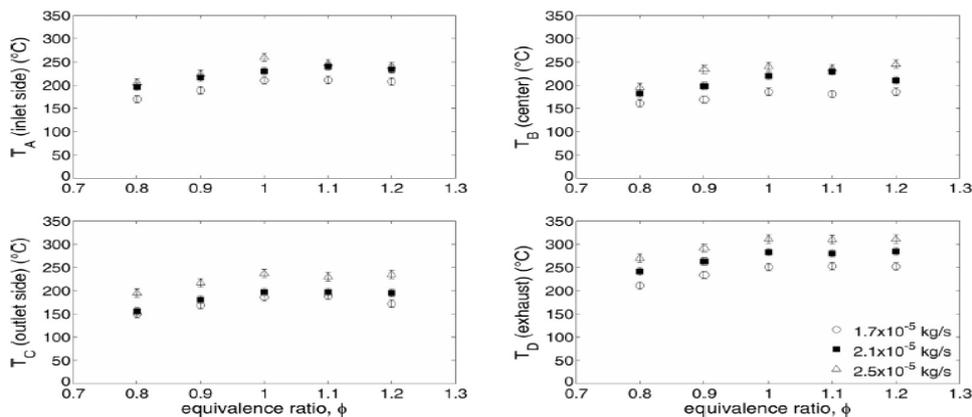
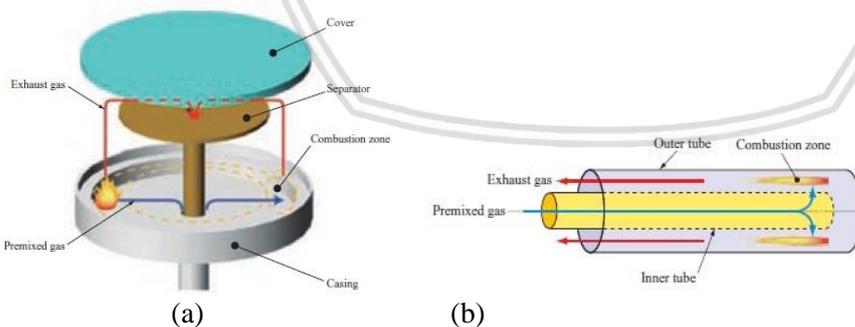


Fig. 3. Temperature vs equivalence ratio at four different locations on the combustor wall and at three different mass flow rates.

Gambar 2.2 Pengaruh laju aliran massa dan rasio equivalensi terhadap suhu pada 4 titik pengukuran di dinding *combustor*

Sumber: Merotto (2015)

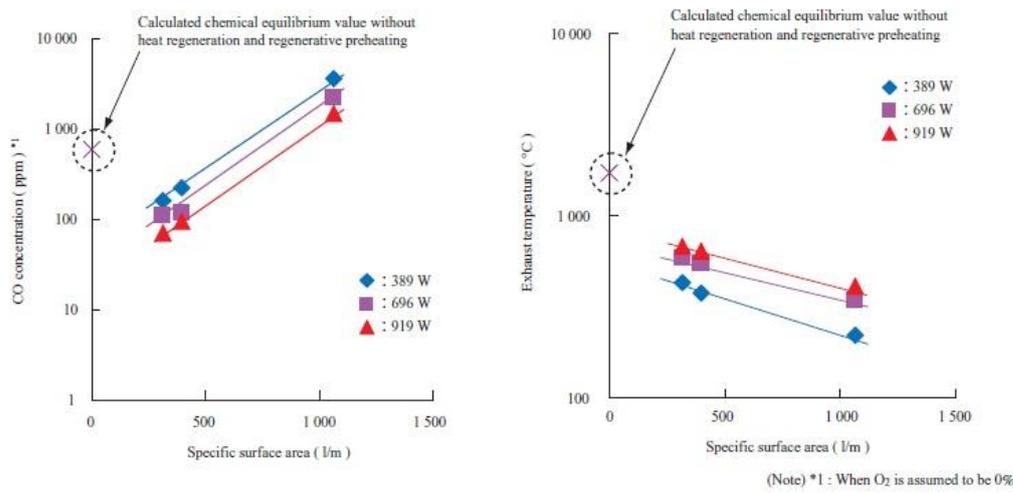
Katsuyoshi, (2009) melakukan penelitian tentang dua bentuk *micro-combustor*, yaitu *disk-type* dan *tube-type combustor*. Seperti pada Gambar 2.3 *disk-type micro-combustor* memiliki tiga bagian, yaitu *casing*, yang memiliki fungsi membatasi reaksi pembakaran yang terjadi agar tetap di dalam sistem. separator atau pemisah yang berfungsi sebagai menyeparasikan reaktan keseluruhan ruang bakar, dan *cover* sebagai penutupnya. Dengan memberikan variasi jarak antara penutup dan separator untuk melihat *heat loss* yang terjadi. Sedangkan *tube-type combustor* terdiri dari dua bagian, yaitu *inner tube* dan *outer tube* dengan memberi variasi diameter luar *outer tube* yang diteliti didalam air. Penelitian didalam air berfungsi untuk mengetahui *heat loss* yang terjadi selama proses pembakaran melalui *outer tube*, dan dalam proses pembakaran ini bahan bakar yang digunakan adalah gas metana.



Gambar 2.3 (a) *Disk-type combustor* dan (b) *Tube-type combustor*

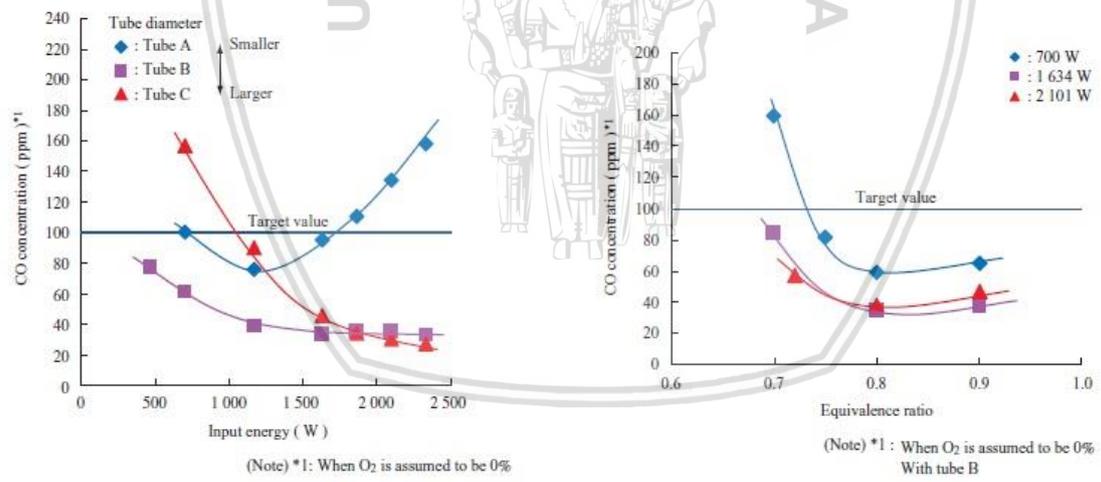
Sumber: Katsuyoshi (2009)

Hasil yang didapatkan dalam penelitian *disk-type combustor* adalah emisi gas buang CO yang dapat berkurang dengan cara mengurangi *surface-to-volume ratio* akan tetapi temperatur gas yang dibuang akan meningkat sehingga *heatloss* yang terjadi lebih besar, seperti pada Gambar 2.4.



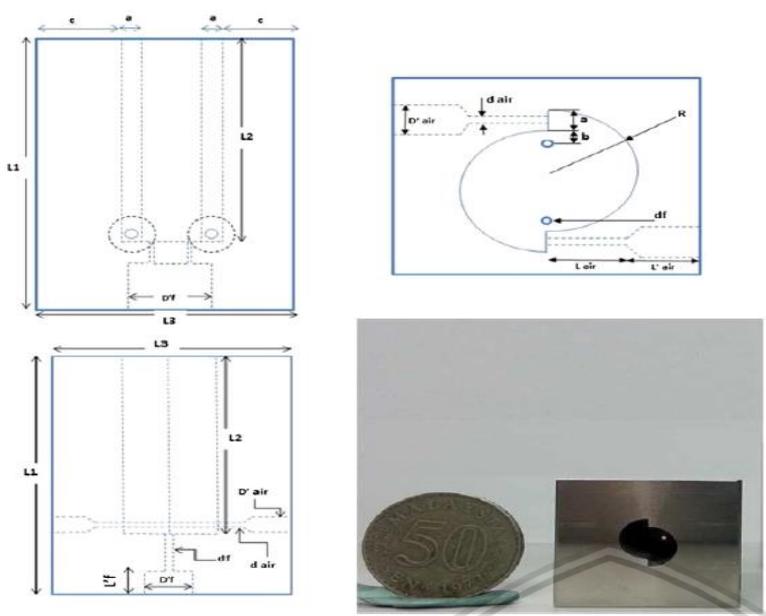
(a) (b)
 Gambar 2.4 (a) Perbandingan konsentrasi gas buang CO dengan *Spesific surface area* dan (b) Perbandingan temperatur gas buang dengan *Spesific surface area* pada *disk-type combustor*
 Sumber: Katsuyoshi (2009)

Sedangkan pada *tube-type combustor* konsentrasi gas buang CO yang dihasilkan bergantung pada diameter antara *inner tube* dan *outer tube* sehingga pada rasio ekuivalen 0,8 menghasilkan konsentrasi gas buang CO yang paling sedikit. Bisa dilihat pada Gambar 2.5.



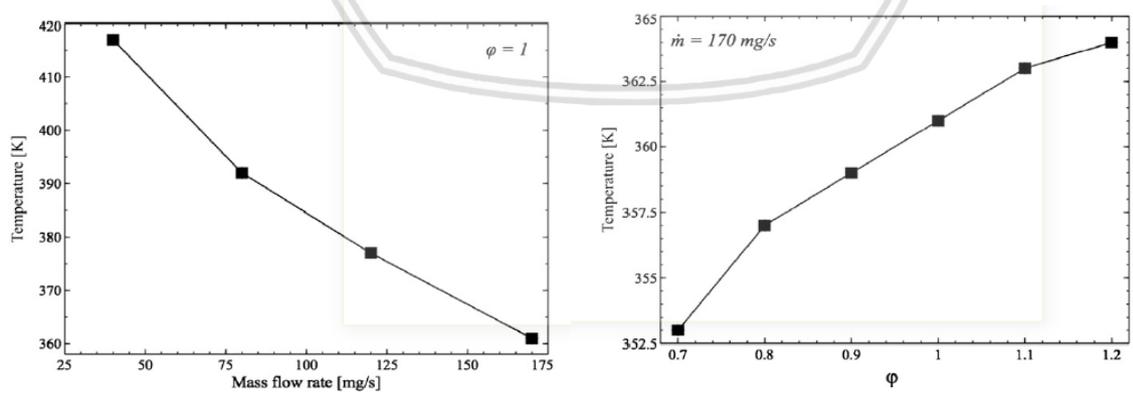
(a) (b)
 Gambar 2.5 (a) Efek diameter *tube* pada konsentrasi gas buang CO dan (b) Efek rasio ekuivalen pada konsentrasi gas buang CO pada *tube-type combustor*
 Sumber: Katsuyoshi (2009)

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 seperti pada Gambar 2.6 dan bahan bakar yang digunakan adalah metana.



Gambar 2.6 Desain meso-scale combustor
 Sumber: Khaleghi (2015)

Data yang didapatkan dari penelitian adalah apabila *mass flow rate* dari udara meningkat maka temperatur dinding juga akan meningkat pada saat itulah terjadi kondisi stokiometri. Namun disamping berapapun nilai *mass flow rate* dari udara, apabila nilai rasio ekuivalennya dibawah 0.2 maka api yang dihasilkan akan padam. Selain itu didapat hasil bahwa meningkatnya temperatur nyala api akan berbanding lurus dengan peningkatan temperatur dinding sisi dalam pada ruang bakar, tetapi rasio ekuivalen sangat mempengaruhi dalam peningkatan temperatur dinding sisi dalam pada ruang bakar, yang turut serta memengaruhi juga *flame stability* dan *heat loss* pada *micro/meso-scale combustor* hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.7.



(a)(b)
 Gambar 2.7 (a) Temperatur saluran masuk udara dengan variasi *mass flow rate*, (b) dengan variasi rasio ekuivalen
 Sumber: Khaleghi (2015)



Yoon, *et al.* (2011), melakukan penelitian dengan tiga macam bentuk *swirl* pada *disk type combustor* 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 2.8 *Twin fluid type*

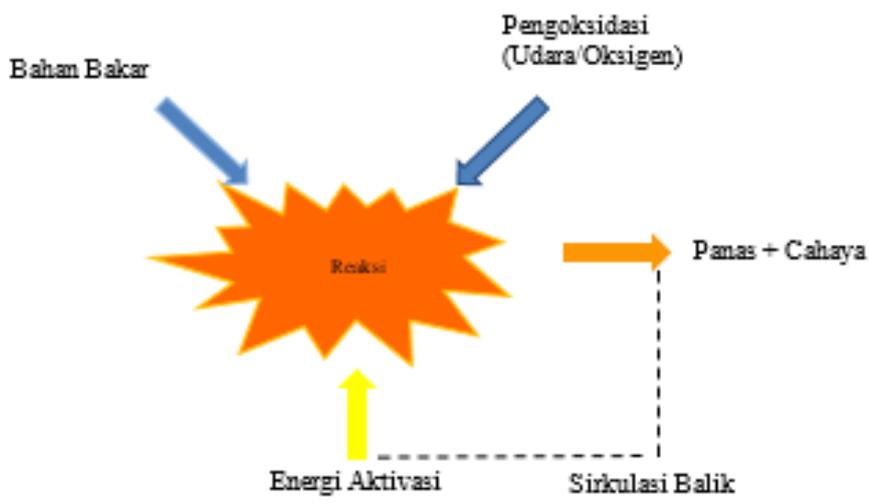
Sumber: Yoon et al (2011) *twin fluid type*

Dari hasil yang diperoleh menunjukkan hasil terbaik didapat pada alat tipe 2. Karena sudut sangat memengaruhi tekanan udara yang dialirkan, semakin kecil sudut maka tekanan udara yang dihasilkan akan semakin besar dan menyebabkan semakin meratanya distribusi *spray* yang terjadi sebagai hasil dari bentuk *disk* pada *combustor* yang memiliki bentuk ruang bakar lebih besar dari pada bentuk saluran masuk atau sudut *spray* maka bentuk aliran pada daerah ini akan mengalami pembesaran. Dengan begitu, diketahui bahwa sudut masuk (*swirl*) sangat mempengaruhi sudut *spray* atau sudut keluar yang terjadi yang bersambung dengan hasil difusi turbulensi yang terjadi sebagai akibat dari kecepatan aliran udara yang masuk.

2.2 Pembakaran

Menurut Wardana, (2008) Pembakaran adalah reaksi kimia antara bahan bakar dan pengoksidasi (oksigen atau udara) yang dapat menghasilkan panas dan cahaya. proses pembakaran terjadi apabila ada:

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

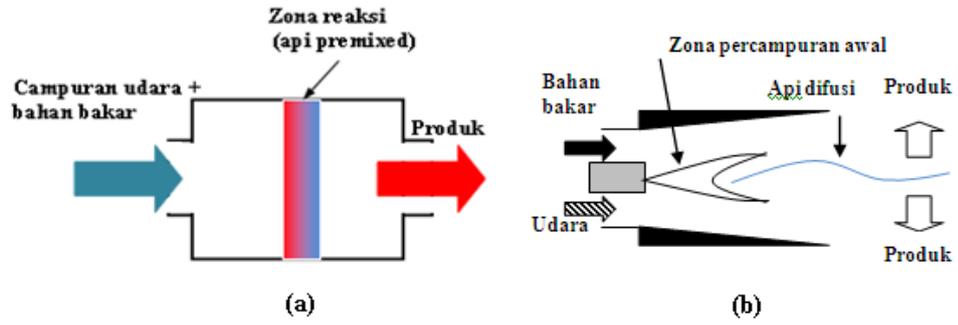


Gambar 2.9 Ilustrasi proses pembakaran
 Sumber: Wardana (2008)

Pada proses pembakaran berkelanjutan energi aktivasi diperoleh dari sirkulasi balik panas hasil pembakaran. Energi aktivasi adalah energi yang dibutuhkan untuk mengaktifkan molekul-molekul bahan bakar. Molekul aktif adalah molekul yang bermuatan. Jadi agar reaksi pembakaran dapat terjadi maka molekul-molekul bahan bakar dibuat bermuatan dengan cara melepaskan satu atau beberapa elektron dari kulit terluar atom atau memutus ikatan rantai molekul.

2.2.1 Klasifikasi Pembakaran Berdasarkan Cara Reaktan Terbakar Pada Zona Reaksi

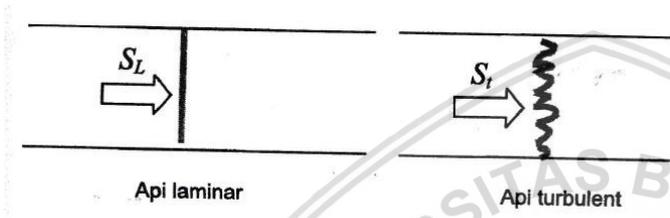
Pembakaran diklasifikasikan menjadi dua berdasarkan cara reaktan terbakar di dalam zona reaksi yakni, pembakaran *premixed* dan pembakaran *non-premixed* atau difusi. Pembakaran *premixed* adalah proses pembakaran dimana reaktan (bahan bakar dan udara) telah bercampur terlebih dahulu secara mekanik menggunakan *mixing chamber* pada umumnya sebelum dibakar. Sedangkan pembakaran *non-premixed* adalah proses pembakaran dimana reaktan (bahan bakar dan udara) tidak bercampur sebelum terbakar seperti terlihat pada Gambar 2.10 (Wardana, 2008).



Gambar 2.10 (a) Pembakaran *premixed* dan (b) Pembakaran *non-premixed* atau difusi
 Sumber: Wardana (2008)



Kelebihan pembakaran *premixed* adalah 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 stokiometrik. Api *premixed* dibagi menjadi dua yaitu api *premixed* laminar dan api *premixed* turbulen. Kelebihan api *premixed* turbulen adalah dapat meningkatkan rambatan api dimana kecepatan nyala apinya tidak tergantung pada properti dari gas tetapi tergantung pada jenis alirannya. Kecepatan nyala api turbulen tergantung pada intensitas turbulensi, V_{rms} dan dapat meningkat sampai 30 kali lebih besar daripada kecepatan nyala api laminar.



Gambar 2.11 Api laminar dan api turbulent
Sumber: Wardana (2008)

2.2.2 Reaksi Pembakaran

Ada dua hal yang sangat penting agar proses pembakaran dapat berlangsung yaitu adanya kesetimbangan massa dan kesetimbangan energi. Kesetimbangan massa diperlukan untuk mencapai stoikiometri. Dan kesetimbangan energi diterapkan ketika proses pembakaran berlangsung.

Pembakaran stokiometrik adalah pembakaran dimana semua atom dari pengoksidasi bereaksi secara kimia untuk menjadi berbagai produk hasil pembakaran. Pengoksidasi yang digunakan adalah udara yang dianggap terdiri dari 21% O₂ dan 79% N₂ seperti pada Tabel 2.1.

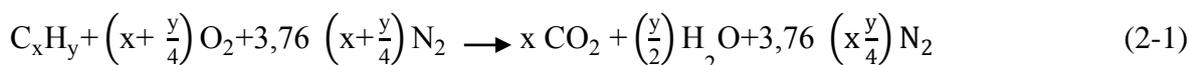
Tabel 2.1
Komposisi Gas pada Udara Kering

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)

Pada Tabel 2.1 kita mengetahui bahwa pada 1 mol O₂ pada udara juga terkandung 3,76 mol N₂ maka, persamaan reaksi kimia untuk pembakaran stoikiometri dengan bahan bakar

butana (C₄H₁₀) dengan udara, dimana C_xH_y pada butana (C₄H₁₀) adalah x = 4 dan y = 10 dengan memasukkannya pada persamaan reaksi kimia 2-1 berikut ini.



2.2.3 Rasio Udara dan Bahan Bakar (AFR)

Rasio udara dan bahan bakar (*Air Fuel Ratio* atau AFR) adalah perbandingan rasio massa udara dan bahan bakar atau juga perbandingan mol udara dan bahan bakar seperti pada persamaan 2-2 berikut.

$$(AFR)_{\text{Stoik}} = \left(\frac{N_{\text{Udara}}}{N_{\text{Bahan Bakar}}}\right)_{\text{Stoik}} \quad \text{atau} \quad \left(\frac{M_{\text{Udara}}}{M_{\text{Bahan Bakar}}}\right)_{\text{Stoik}} \quad (2-2)$$

Sumber: Wardana (2008)

Keterangan:

(AFR)_{stoik} = Perbandingan udara dan bahan bakar dalam stoikiometri

N_{Udara} = Jumlah mol udara (mol)

N_{Bahan Bakar} = Jumlah mol bahan bakar (mol)

M_{Udara} = Jumlah massa udara (kg)

M_{Bahan Bakar} = Jumlah massa bahan bakar (kg)

Perhitungan AFR_{stoik} berdasarkan mol dan massa untuk butana (C₄H₁₀) adalah menggunakan persamaan 2-3 dan Tabel 2.2.

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)

$$\bullet \quad (AFR)_{\text{Stoik}} = \left(\frac{N_{\text{Udara}}}{N_{\text{Bahan Bakar}}}\right)_{\text{Stoik}} \quad (2-3)$$

$$(AFR)_{\text{Stoik}} = \left(\frac{6,5 (1+3,76)}{1}\right)_{\text{Stoik}}$$

$$(AFR)_{\text{Stoik}} = \left(\frac{6,5 (4,76)}{1}\right)_{\text{Stoik}}$$

$$(AFR)_{\text{Stoik}} = 30,94 \left(\frac{\text{mol}_{\text{udara}}}{\text{mol}_{\text{bahan bakar}}}\right)$$

- $(AFR)_{\text{Stoik}} = \left(\frac{M_{\text{Udara}}}{M_{\text{Bahan Bakar}}} \right)_{\text{Stoik}}$
- $(AFR)_{\text{Stoik}} = \left(\frac{6,5 (2 \times 16 + (3,76 \times 14 \times 2))}{4 \times 12 + 1 \times 10} \right)_{\text{Stoik}}$
- $(AFR)_{\text{Stoik}} = \left(\frac{6,5 (32 + 105,28)}{58} \right)_{\text{Stoik}}$
- $(AFR)_{\text{Stoik}} = \left(\frac{892,32}{58} \right)_{\text{Stoik}}$
- $(AFR)_{\text{Stoik}} = 15,384 \left(\frac{\text{kg}_{\text{udara}}}{\text{kg}_{\text{bahan bakar}}} \right)$

Dan untuk mengetahui perbandingan volume udara dan bahan bakar adalah dengan perbandingan massa udara dan bahan bakar dengan massa jenis udara dan bahan bakar dengan persamaan 2-4 sebagai berikut.

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$v = \frac{m}{\rho} \tag{2-4}$$

Sumber: Cengel (2006)

Keterangan:

v = Volume (m^3 atau cm^3)

m = Massa (kg atau gr)

ρ = Massa jenis (kg/m^3 atau gr/cm^3)

Massa jenis udara pada suhu 27 °C adalah 1,2 kg/m^3 atau 0,0012 gr/cm^3 dan massa jenis butana adalah 2,48 kg/m^3 atau 0,00248 gr/cm^3 dimana 1 $\text{kg}/\text{m}^3 = 10^{-3} \text{gr}/\text{cm}^3$. Perhitungan perbandingan volume udara dan bahan bakar adalah dengan persamaan 2-5 berikut ini.

- $v_{\text{udara}} (\text{cm}^3) : v_{\text{bahan bakar}} (\text{cm}^3) \tag{2-5}$

$$\frac{m_{\text{udara}}}{\rho_{\text{udara}}} (\text{cm}^3) : \frac{m_{\text{bahan bakar}}}{\rho_{\text{bahan bakar}}} (\text{cm}^3)$$

$$\frac{892,32}{0,0012} (\text{cm}^3) : \frac{58}{0,00248} (\text{cm}^3)$$

$$743600 (\text{cm}^3) : 23387,096 (\text{cm}^3) \text{ dimana } 10^3 \text{ cm}^3 = 1 \text{ dm}^3 = 1 \text{ liter}$$

$$743,6 (\text{dm}^3) : 23,39 (\text{dm}^3)$$

$$31,79 (\text{liter}) : 1 (\text{liter})$$

2.2.4 Rasio Ekuivalen (Φ)

Rasio ekuivalen atau *equivalence ratio* (Φ) adalah perbandingan antara AFR stoikiometri dengan AFR aktual dengan persamaan sebagai berikut.



$$\phi = \frac{(AFR)_{\text{stoikiometri}}}{(AFR)_{\text{aktual}}} \quad (2-6)$$

Sumber: Wardana (2008)

Keterangan:

ϕ = Rasio ekuivalen atau *equivalence ratio*

$(AFR)_{\text{stoikiometri}}$ = Rasio perbandingan udara dan bahan bakar dalam stoikiometri

$(AFR)_{\text{aktual}}$ = Rasio perbandingan udara dan bahan bakar secara aktual

Nilai rasio ekuivalen bisa menentukan seberapa banyak campuran antara udara dan bahan bakar selama pembakaran seperti dibawah ini.

- $\phi > 1$ campuran kaya bahan bakar (*fuel-rich mixture*) dimana bahan bakar kandungannya di dalam campurannya lebih banyak dibandingkan dengan udaranya.
- $\phi = 1$ campuran stoikiometrik dimana bahan bakar dan udara berada pada kadar yang sama dan semua atomnya terikat untuk terjadi reaksi kimia.
- $\phi < 1$ campuran miskin bahan bakar (*fuel-lean mixture*) dimana bahan bakar kandungannya didalam campurannya lebih sedikit dibandingkan dengan udaranya.

2.2.5 Kestabilan Nyala Api (*Flame Stability Limit*)

Kestabilan nyala api atau *flame stability limit* adalah suatu batasan komposisi campuran udara dan bahan bakar dimana pada campuran tersebut dapat terjadi pembakaran dengan nyala api stabil dalam stokiometri. Daerah stabilitas nyala api dibatasi oleh batas minimum dan maksimum debit reaktan yang memasuki *combustor* dimana batas ini adalah untuk mengetahui kebutuhan debit reaktan atau campuran udara dan bahan bakar agar terjadi pembakaran dengan nyala api yang stabil.

Batas minimum nyala api adalah batas terendah campuran udara dan bahan bakar yang memungkinkan terjadinya proses pembakaran dengan nyala api yang stabil. Sebaliknya, batas maksimum nyala api adalah batas tertinggi campuran udara dan bahan bakar yang memungkinkan terjadinya suatu proses pembakaran dengan nyala api yang stabil.

2.3 Pembakaran pada *Rectangular* dan *Circular Disk Combustor* Dengan Variasi Jumlah Saluran Masuk

Pada penelitian ini menggunakan *combustor* jenis *disk-type* yang memiliki efisiensi termalnya yang baik dan dengan bentuknya yang *rectangular* membuat dimensi *combustor* menjadi lebih luas dari bentuk yang lainnya sehingga dapat dengan mudah diterapkan pada *thermoelectric*. Pada *circular combustor* memiliki keuntungan dari bentuknya yg membulat.

Sehingga aliran dalam *combustor* lebih stabil sehingga tidak terjadi turbulensi yang berlebihan. Walaupun dengan dimensi *combustor* yang kecil waktu tinggal reaktan didalam *combustor* akan menjadi lebih cepat dan akan terbuang percuma melalui saluran gas buang atau bisa dikatakan *heat loss*, maka dari itu dibuatlah *swirling flow* dengan begitu waktu tinggal reaktan akan menjadi lebih lama dan pembakaran yang dihasilkan memiliki nyala api yang stabil.

Swirling flow atau pusaran dapat meningkatkan momentum antara aliran aksial dengan tangensial sehingga mempercepat waktu pencampuran bahan bakar dan udara yang masuk ruang bakar dengan menggunakan sebuah *single hole-nozzle* yang menghasilkan pembakaran nyala api yang mengikuti bentuk *combustor* yang berbentuk *rectangular* dimana pusaran yang dihasilkan lebih luas dan menyebar merata pada tiap sudut ruang bakar. Dan dengan banyaknya jumlah saluran maka kecepatan reaktan semakin meningkat dan dengan meningkatnya kecepatan reaktan maka *swirling flow* atau pusaran akan semakin kuat.

2.4 Bahan Bakar Dan Klasifikasinya

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.

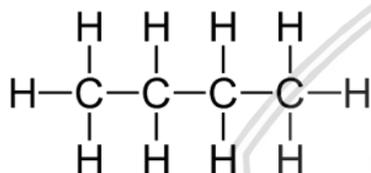
Bahan bakar berdasarkan masa penggunaannya dibagi menjadi dua yakni, bahan bakar terbarukan dan bahan bakar tak terbarukan. Bahan bakar tak terbarukan adalah seperti bahan bakar fosil yang sewaktu-waktu bisa habis. Sedangkan bahan bakar terbarukan adalah bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar fosil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

Bahan bakar berdasarkan wujudnya di bagi menjadi tiga yakni, 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) (Wardana, 2008).

2.4.1 Butana

Butana adalah bahan bakar jenis senyawa hidrokarbon alkana dengan rumus kimia C_4H_{10} dengan penamaan kimia awalan but- yang berarti memiliki empat atom karbon (C) dan akhiran -ana berasal dari alkana yang berarti memiliki ikatan tunggal atau rantai lurus yang menyusun atom karbon tersebut yaitu dengan atom hidrogen (H) seperti terlihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Struktur ikatan molekul butana (C_4H_{10})

Sumber: Wardana (2008)

Butana memiliki sifat yakni, tidak bewarna, mudah terbakar, dan mudah untuk mencair pada kondisi temperatur ruangan dengan tekanan yang rendah, sehingga butana aman dan mudah untuk disimpan didalam tabung yang kecil dan memiliki tekanan rendah. Butana juga mudah diperoleh dari proses destilasi minyak bumi dan biasa digunakan untuk keperluan perkemahan sebagai bahan bakar karena mudah dibawa dengan tabungnya yang kecil. Butana memiliki *properties* seperti pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3

Properties Gas Butana

Rumus Kimia	C_4H_{10}
Massa molekul	58,12 g/mol
Densitas	2,593 kg/m ³
<i>Autoignition temperature</i>	405°C
Fase gas	15 °C pada tekanan 1 atm
Fase cair	0 °C pada tekanan 1 atm
<i>Flash point</i>	-60 °C pada tekanan 1 atm
<i>Higher heating value</i>	49,5 MJ/kg
<i>Lower heating value</i>	45,75 MJ/kg
<i>Lower limit of flammability</i>	1,7
<i>Upper limit of flammability</i>	7,8

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

Geometri dari *combustor* merupakan salah satu komponen utama pengondisi aliran reaktan untuk membentuk aliran *vortex* yang bertujuan menstabilkan nyala api non-premixed pada *micro-scale combustor*. Unsur pembentuk aliran *vortex* antara lain adalah sudut aliran masuk, kecepatan tangensial aliran masuk dan geometri ruang bakar. Sudut aliran masuk, dan kecepatan tangensial, kecepatan tangensial tersebut menimbulkan sebuah pusaran (*swirl*). Selain dari itu geometri dari *combustor* juga berpengaruh pada pengondisian udara dalam ruang bakar. Penggunaan *swirl* memiliki pengaruh penting karena digunakan sebagai bantuan untuk mencapai stabilitas pembakaran. Pada pengaplikasiannya pusaran (*swirl*) yang kuat digunakan untuk meningkatkan momentum antara aliran aksial dengan tangensial sehingga mempercepat waktu pencampuran bahan bakar dan udara serta meningkatkan waktu tinggal bahan bakar. Kekuatan pusaran yang terjadi diatur atau dikontrol dengan variasi jumlah aliran udara tangensial. Campuran bahan bakar dan udara dimasukkan ke ruang bakar menggunakan sebuah nozel (*single hole-nozle*). Aliran *swirl* banyak diaplikasikan pada *swirl atomizer*, *burner* turbin gas.

Bentuk dasar dari *vortex* lingkaran, dengan geometri yang lingkaran juga maka, aliran yang melalui dinding *combustor* akan terbantu dalam pembentukan *swirl* dari gaya normal dinding yang berbentuk lingkaran. Dengan geometri *combustor* yang *rectangular*, maka *vortex* dari ruang bakar hanya dibentuk dari kecepatan tangensial aliran masuk dan sudut aliran masuk karena gaya normal dari dinding tidak berperan banyak untuk pembentukan *swirl* didalam ruang bakar. Oleh karena itu perbandingan dari bentuk geometri ruang bakar dibuat agar pembakaran yang terjadi pada *meso-scale combustor* bisa lebih stabil sehingga membuat temperatur yang dihasilkan bisa lebih tinggi.

2.6 Hipotesis

Perbedaan bentuk *combustor* antara *circular disk combustor* dan *rectangular d combustor*, akan mengakibatkan berbedanya pola aliran reaktan yang mengalir dalam *combustor*. Hal ini dikarenakan pada *circular disk combustor* reaktan akan mengalir lancar di dalam *combustor* tanpa terjadinya diskontinuitas aliran, dikarenakan tidak terdapatnya sudut-sudut pada *circular disk combustor*. Yang nantinya akan berefek pada karakteristik pembakaran yang lebih baik pada *circular disk combustor*.

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 *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:

1. Variabel Bebas

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

- a. Variasi bentuk *combustor*: *Circular* dan *Rectangular Disk Combustor*
- b. Debit udara dan debit bahan bakar

Debit udara dan bahan bakar divariasikan pada batas atas dan batas bawah dimana masih memungkinkan terjadinya nyala api pembakaran pada *Circular* dan *Rectangular Disk Combustor* dengan rasio ekuivalen yang masih dapat menimbulkan pembakaran.

2. Variabel Terikat

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

- a. *Flame Stability Limits*
- b. Temperatur Dinding *Combustor*
- c. 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)
- Volume ruang bakar Circular dan Rectangular Disk Combustor besarnya sama yaitu 1728 mm^3
- Sudut *inlet* pada *circular disk combustor* sebesar 90°

3.3 Peralatan Penelitian

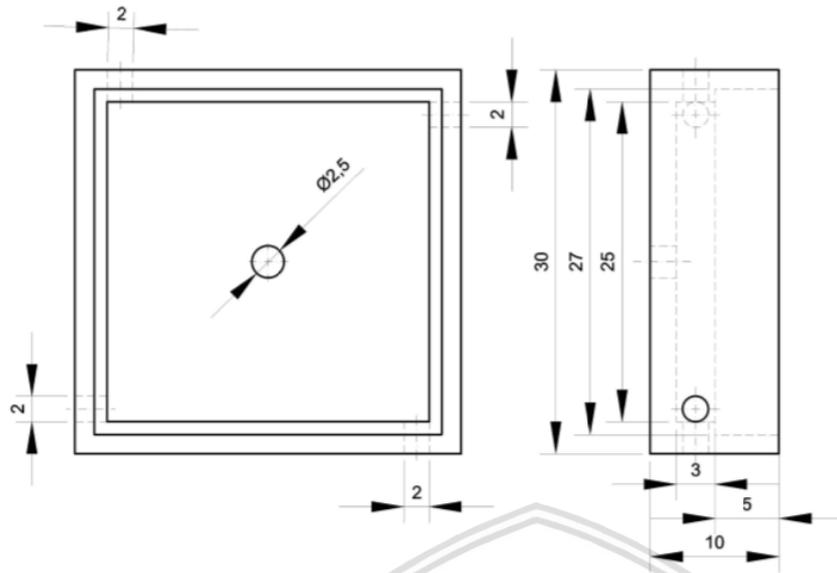
Peralatan penelitian yang digunakan dalam penelitian ini akan dijelaskan sebagai berikut.

1. *Circular dan Rectangular Disk Combustor*

Circular dan Rectangular Disk Combustor adalah alat utama pada penelitian ini, dimana akan diamati hasil pembakaran di dalam *meso-scale combustor*. Penelitian ini menggunakan 2 buah *combustor* dengan 4 saluran inlet; material *combustor* yang digunakan adalah tembaga; untuk desain dan dimensi lebih detailnya dapat dilihat pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2.



Gambar 3.1 Tangential circular disk combustor dengan 4 inlet



Gambar 3.2 Rectangular Disk Combustor dengan 4 inlet

Spesifikasi:

- a. Material: Tembaga (Cu)
 - b. Densitas: $8,96 \text{ g/cm}^3$
 - c. Titik Lebur: $1084,62^\circ\text{C}$
2. Kaca Tahan Api

Kaca tahan api dalam Gambar 3.3 digunakan untuk menutup permukaan *Disk Combustor*, penggunaan sebagai penutup permukaan *combustor* bertujuan untuk memudahkan melihat visualisasi nyala api dan kaca tersebut memiliki keunggulan menahan panas hingga suhu 500°C .



Gambar 3.3 Kaca tahan api

Spesifikasi:

- a. Merk: *Pyrex*
- b. Bahan: *Borosilicate*
- c. Suhu Maksimal : 500°C

3. Lem Tahan Api (PC-Fahrenheit)

Lem tahan api pada Gambar 3.4 berfungsi sebagai penggabung antara kaca tahan api yang mampu menahan panas hingga 260°. sehingga pada proses pembakaran lem tidak ikut terbakar, meleleh ataupun menguap. Selain itu juga sebagai isolator agar panas tidak berpindah ke lingkungan.



Gambar 3.4 Lem tahan panas (FC-Fahrenheit)

Spesifikasi:

- a. Merk: *FC-Fahrenheit*
 - b. Berat: 180 gr
- ### 4. Butana (C₄H₁₀)

Butana (C₄H₁₀) dalam Gambar 3.5 berfungsi sebagai bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini. Kandungan Butana yang digunakan diasumsikan mengandung murni 100% butana (C₄H₁₀).



Gambar 3.5 Tabung butana (C₄H₁₀)

Spesifikasi:

- a. Merk: WINN GAS
 - b. Berat bersih: 235 gr
- ### 5. Regulator Butana

Regulator Butana digunakan untuk mengalirkan bahan bakar *butana* dari tabung *butane* menuju *flowmeter*. Dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 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 3.7.



(a) (b)

Gambar 3.7 (a) *Flowmeter* udara (b) *Flowmeter* bahan bakar

Spesifikasi:

Flowmeter Udara

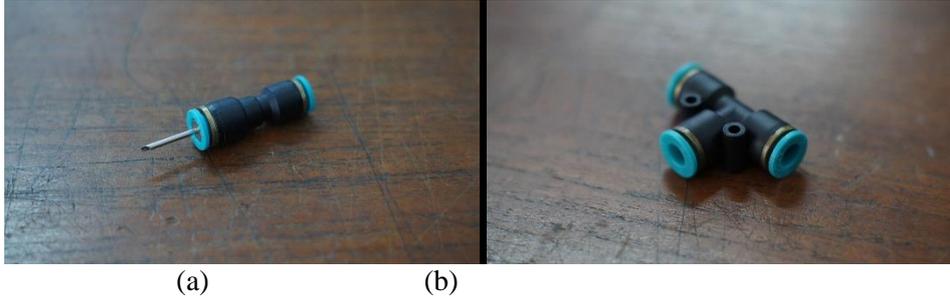
- a. Merk: Kofloc
- b. Jenis: *Flowmeter* udara
- c. *Minimum flow*: 0,5 L/min
- d. *Maximum flow*: 5 L/min
- e. Skala terkecil: 0.5 L/min

Flowmeter Bahan Bakar

- a. Merk: Kofloc
- b. Jenis: *Flowmeter* Udara
- c. *Maximum flow*: 100 ml/min
- d. *Minimum flow*: 10 ml/min
- e. Skala terkecil: 10 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 *Disk Combustor*.



Gambar 3.8 (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 *Disk Combustor*.



Gambar 3.9 *Y - Connector*

9. Pemantik

Pemantik berfungsi untuk memberikan energi aktivasi agar terjadi pembakaran di dalam *Disk Combustor* dapat dilihat pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Pemantik



10. Kompresor

Kompresor digunakan untuk menyuplai udara (oksidator) pada *Disk Combustor*, udara yang digunakan adalah udara bebas. Dapat dilihat pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 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 *Tangential Circular Disk Combustor*.



Gambar 3.12 Thermocouple type-k

Spesifikasi:

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

12. Data Logger

Data logger pada Gambar 3.13 digunakan untuk menerima data temperatur dinding *Tangential Circular Disk Combustor*.



Gambar 3.13 Data logger

Spesifikasi:

- a. Merk: Advantech
- b. Channels: 8
- c. Input Type: mV, V, mA
- d. Input range: J, K, T, E, R, S, dan B
- e. Accuracy: $\pm 0.1\%$

13. Laptop

Laptop dalam Gambar 3.14 digunakan untuk menyimpan dan mengolah data hasil penelitian.



Gambar 3.14 Laptop

14. Kamera

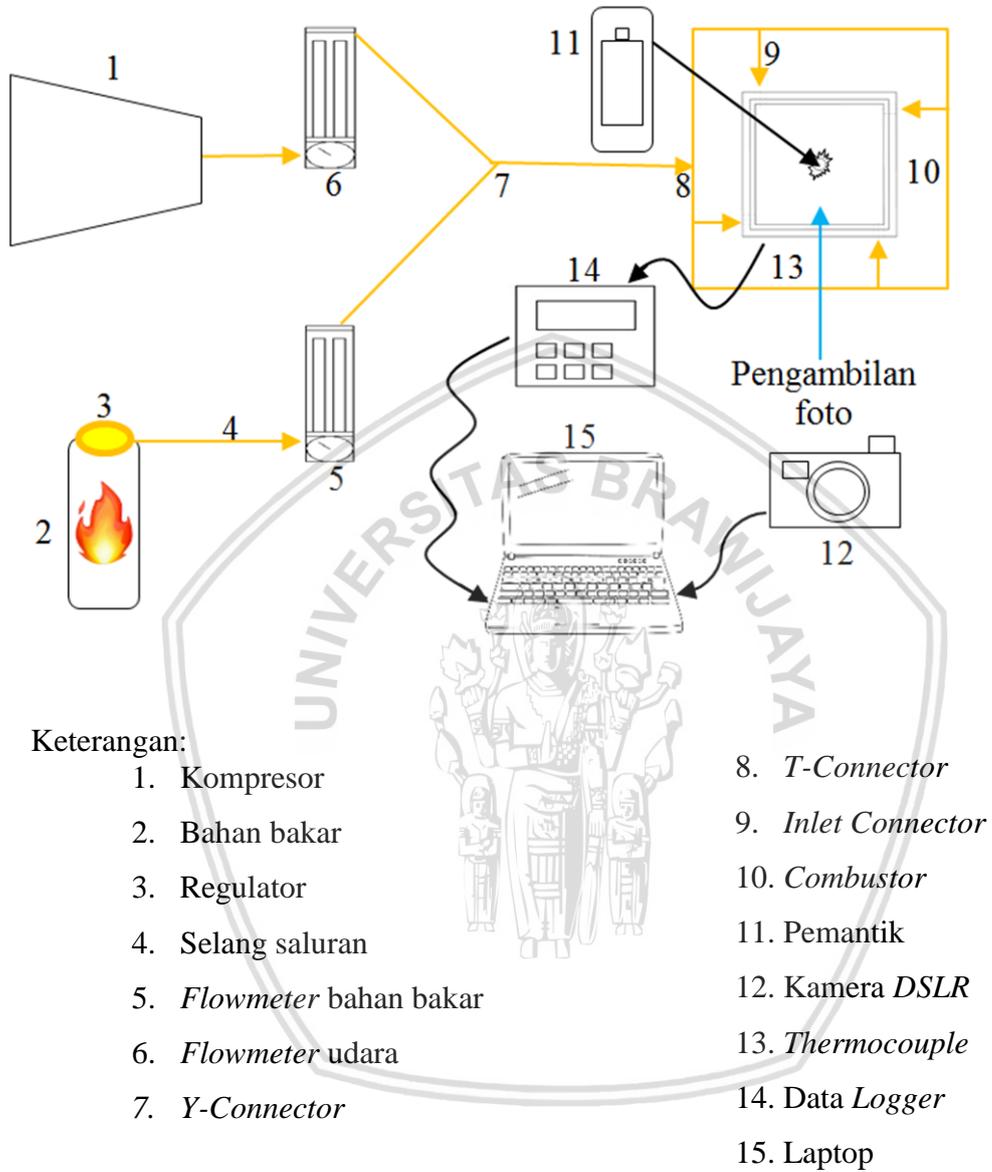
Kamera pada Gambar 3.15 digunakan untuk mengambil data visualisasi nyala api.



Gambar 3.15 kamera DSLR

3.4 Skema Instalasi Penelitian

Gambar 3.16 merupakan skema instalasi penelitian.



Gambar 3.16 Skema penelitian

3.5 Metode Pengambilan Data

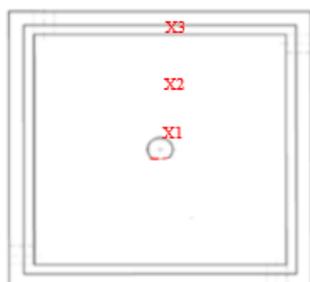
Metode pengambilan data pada penelitian ini adalah:

1. Menyiapkan *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

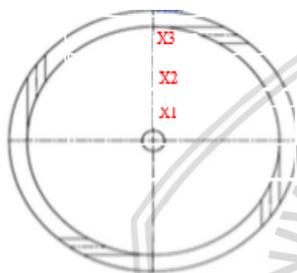
3. Menyusun peralatan sesuai dengan instalasi alat pada subbab 3.4.
4. Me-mulai pengambilan data *flame stability limit* terlebih dahulu.
5. Buka katup regulator dan katup kompresor.
6. Buka katup *flowmeter*
7. Masukan kabel pemantik api kedalam *combustor* (tanpa menyentuh tembaga)
8. Setelah kabel berada dalam *combustor*, nyalakan pemantik agar kabel memantikan api, dan api menyala selama 3 menit.
9. 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.
10. Putar katup *flowmeter* udara dan bahan bakar secara perlahan hingga dapat ditentukan batas atas dan batas bawah dimana masih terjadinya pembakaran di dalam *combustor*
11. Pengambilan data visualisasi nyala api *combustor* dengan rasio ekuivalen 1 dengan berbagai macam debit bahan bakar dan berbagai macam rasio.
12. Pengambilan gambar menggunakan kamera *DSLR*, dengan sudut tegak lurus dengan arah *Disk Combustor*.
13. 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 dengan debit bahan bakar 150 ml/min.

14. Titik pengambilan data temperatur dinding pada *Rectangular Disk Combustor* dilakukan pada jarak 1.8, 4.5, 6.2 mm dan pada *Circular Disk Combustor* dilakukan pada jarak 3, 7, 14 mm dari titik pusat combustor, seperti pada Gambar 3.17.
15. Pengambilan data temperatur gas buang menggunakan *thermocouple* yang dihubungkan dengan data *logger* dan disimpan pada laptop.



Keterangan:

- X1** : Titik 1 dengan jarak 3 mm dari titik pusat *combustor*
- X2** : Titik 2 dengan jarak 6,2 mm dari titik pusat *combustor*
- X3** : Titik 3 dengan jarak 12,5 mm dari titik pusat *combustor*



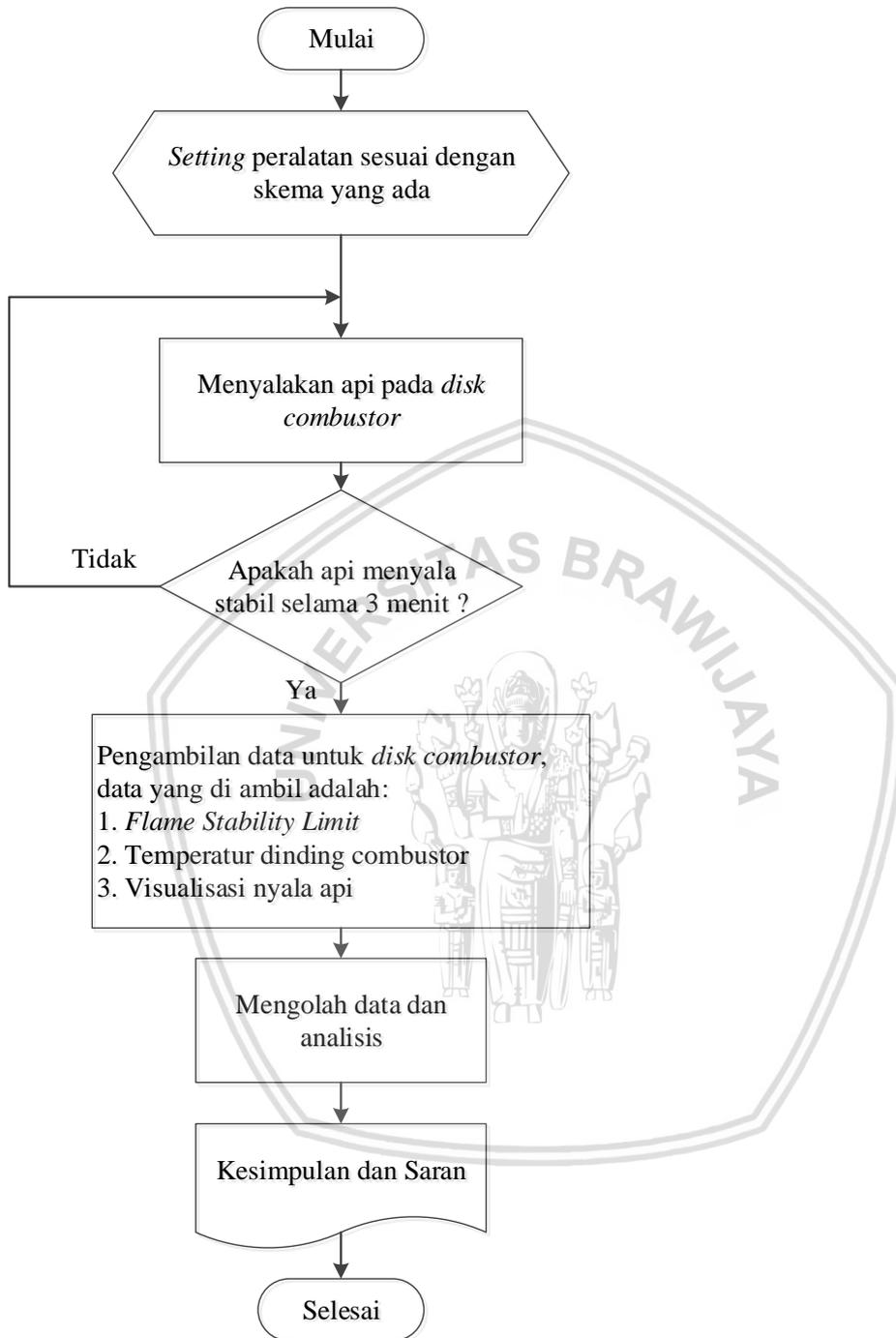
Keterangan:

- X1** : Titik 1 dengan jarak 3 mm dari titik pusat *combustor*
- X2** : Titik 2 dengan jarak 7 mm dari titik pusat *combustor*
- X3** : Titik 3 dengan jarak 14 mm dari titik pusat *combustor*

Gambar 3.17 Titik pengambilan data temperatur dinding *combustor circular disk combustor* (atas) *rectangular disk combustor* (bawah)

3.6 Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.18 merupakan diagram alir dari penelitian yang akan dilaksanakan.



Gambar 3.18 Diagram alir penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

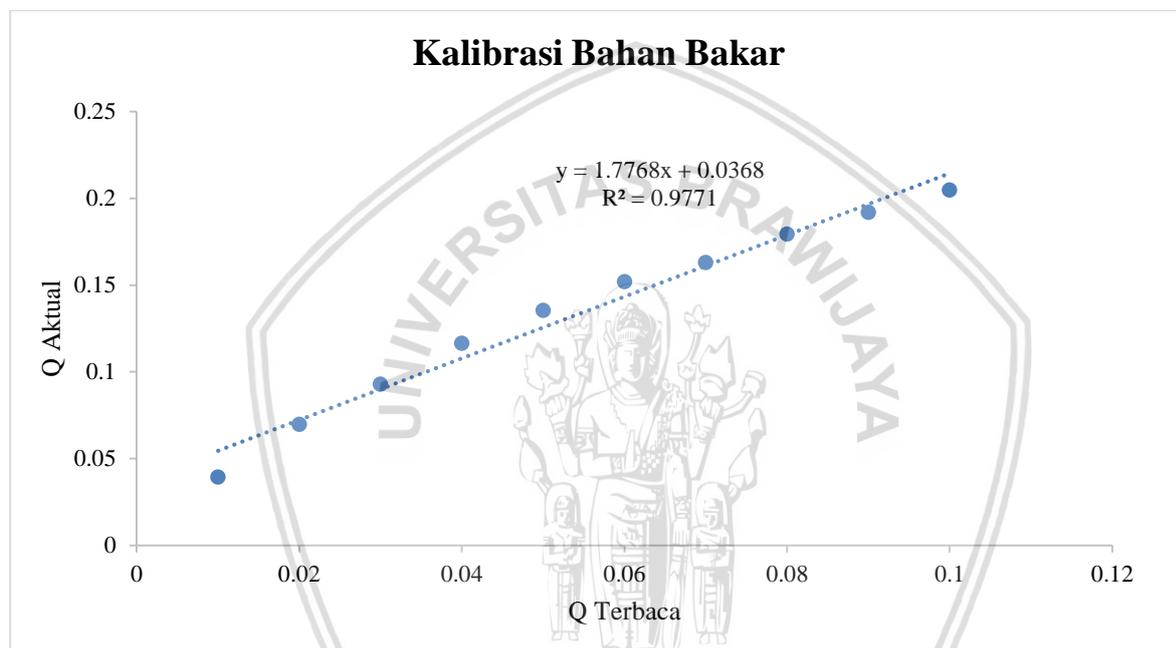
4.1 Kalibrasi *Flowmeter*

Data hasil penelitian ini didapat dari penelitian dengan metode *experimental research* tentang pengaruh bentuk *combustor* diantaranya adalah *circular* dan *rectangular* terhadap karakteristik pembakaran dengan pembakaran *premixed* yang terjadi pada *meso-scale combustor* berbentuk *disk-type combustor* dengan bahan bakar butana (C_4H_{10}). Pengambilan data karakteristik pembakaran yang diambil pada penelitian ini meliputi batas kestabilan nyala api, visualisasi nyala api, temperatur dinding *combustor*.

Pengukuran debit bahan bakar dan udara menggunakan *flowmeter*. *Flowmeter* yang digunakan adalah *flowmeter* bahan bakar dan *flowmeter* udara. Sebelum melakukan pengambilan data, perlu dilakukan kalibrasi pada *flowmeter* untuk mengetahui hubungan antara debit yang terbaca pada *flowmeter* dan debit aktualnya. Kalibrasi *flowmeter* dapat dilakukan dengan beberapa tahapan. Dimulai dengan mengisi air hingga penuh pada bak penampung. Kemudian siapkan gelas ukur sesuai lalu isi penuh dengan air dan posisikan gelas ukur secara terbalik kemudian sedikit ditarik keatas permukaan air dimana tidak ada air yang keluar saat posisi gelas ukur sudah terbalik dan berdiri tegak. Setelah itu 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 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 (C₄H₁₀)

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 Kalibrasi *flowmeter* bahan bakar butana (C₄H₁₀)

Dari *trendline* pada Gambar 4.1 dihasilkan persamaan berikut ini.

$$y = 1,7768x + 0,0368$$

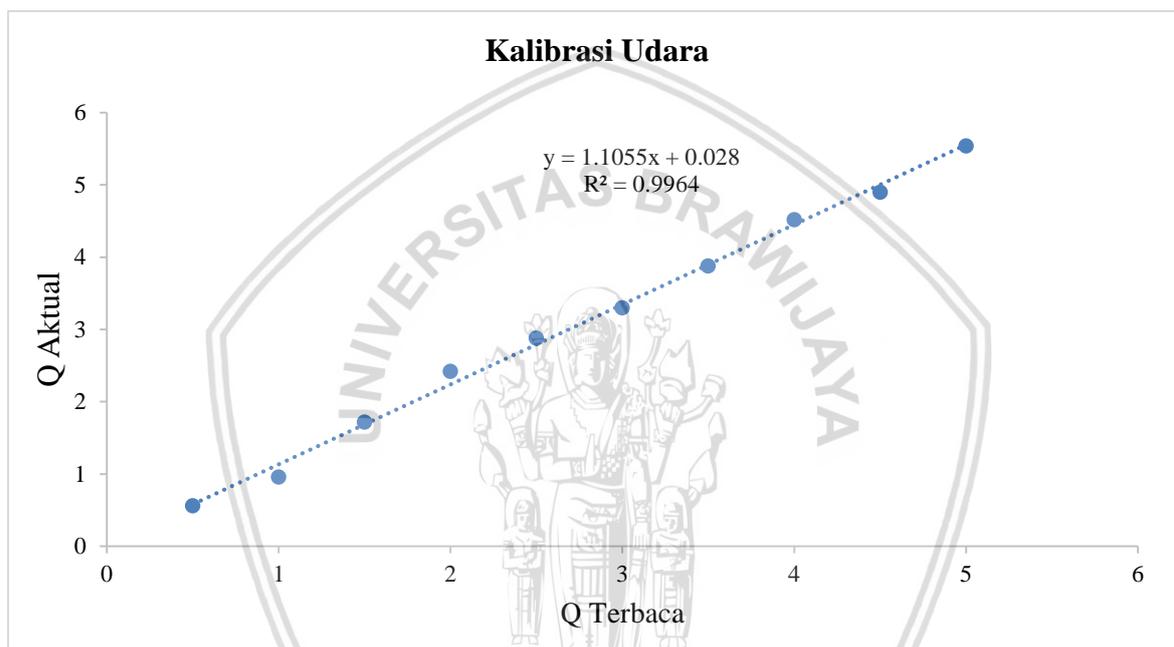
Dimana:

$$y = Q_f \text{ aktual (l/min)}$$

$$x = Q_f \text{ terbaca (l/min)}$$

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 Kalibrasi *flowmeter* udara

Dari *trendline* pada Gambar 4.2 dihasilkan persamaan berikut ini.

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

Dimana:

$$y = Q_a \text{ aktual (l/min)}$$

$$x = Q_a \text{ terbaca (l/min)}$$

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. Untuk mengetahui rasio

ekuivalen dan kecepatan reaktan dapat dijelaskan dengan contoh perhitungan berikut ini dimana diketahui $(AFR)_{stoikiometri}=30,94$ dan $\phi=1$.

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

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

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

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

Setelah mengetahui kestabilan pembakaran debit bahan bakar maka dapat diketahui kecepatan reaktan pada saluran masuk ruang bakar sehingga api dapat menyala dengan stabil. Berikut perhitungan kecepatan reaktan pada debit udara bernilai 2128 ml/min dan debit bahan bakar bernilai 55 ml/min:

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

$$V_{reaktan} = \frac{(55+2128)}{60} \text{ ml/s}$$

$$V_{reaktan} = \frac{(3,14 \times 0,8^2 \times 4)}{100} \text{ cm}^2$$

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

Hasil dari percobaan dan perhitungan kecepatan reaktan pada masing-masing debit reaktan maka didapatkanlah tabel hasil perhitungan kestabilan nyala api pada Tabel 4.3 dan 4.4.

Tabel 4.3

Data Flame Stability Limits Circular Disk Combustor

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
1.2	55	1.1	179	4.6	246.33	868.07	✓	X

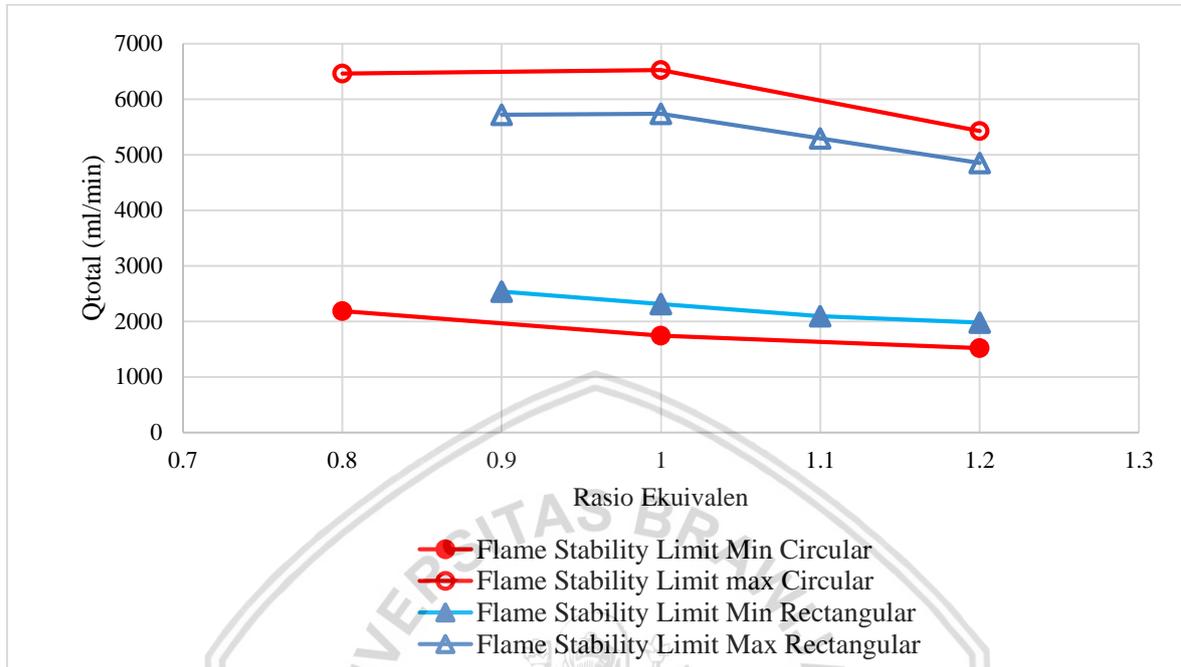
Tabel 4.4

Data Flame Stability Limits Rectangular Disk Combustor

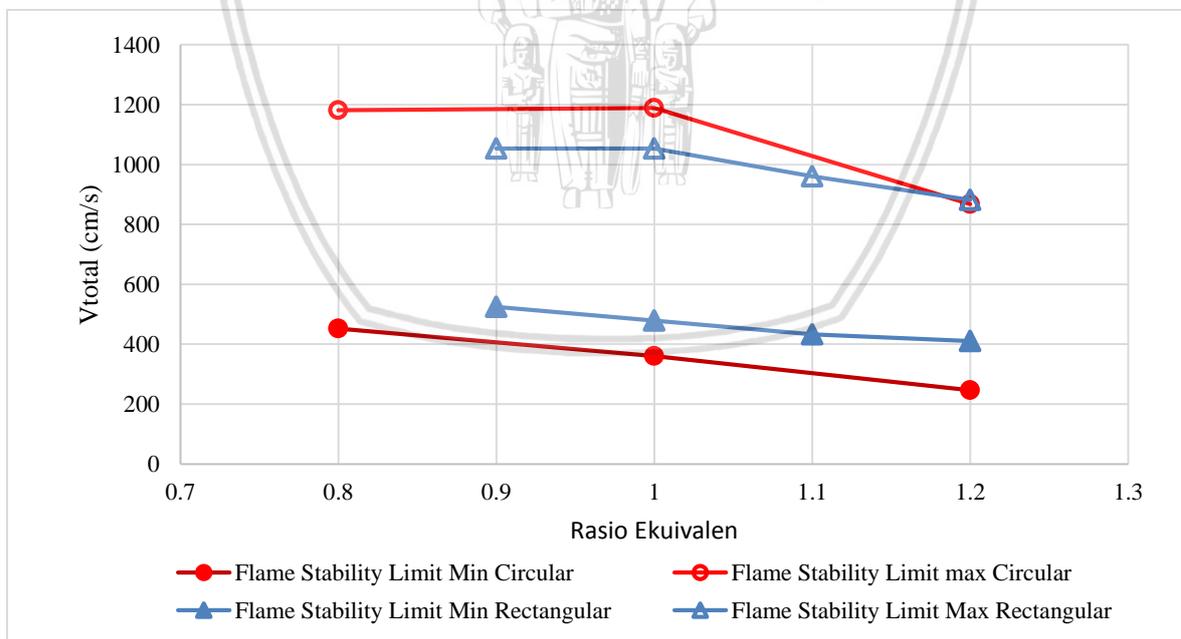
Rasio Ekuivalen (ϕ)	Q_f min (ml/min)	Q_a min (L/min)	Q_f maks (ml/min)	Q_a maks (L/min)	$V_{reaktan}$ min (cm/s)	$V_{reaktan}$ maks (cm/s)	Stabil	Padam
0,8	-	-	-	-	-	-	X	✓
0,9	72	2.5	161	5.6	525.07	1053,39	✓	X
1	72	2.2	179	5.6	479.23	1053,28	✓	X
1,1	72	2.0	179	5.1	433.39	960,31	✓	X
1,2	72	1,9	179	4.7	410.46	881,66	✓	X



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



Gambar 4.3 Perbandingan debit reaktan dengan rasio ekuivalen pada *circular* dan *rectangular disk combustor*



Gambar 4.4 Grafik perbandingan kecepatan reaktan dengan rasio ekuivalen pada *circular* dan *rectangular disk combustor*

Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 menjelaskan tentang kestabilan nyala api dengan menunjukkan batas maksimum dan batas minimum dimana api masih bisa menyala dengan variasi bentuk pada *Combustor*. Pada *circular disk combustor*, api bisa menyala dari rasio



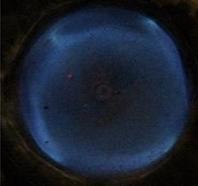
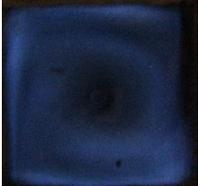
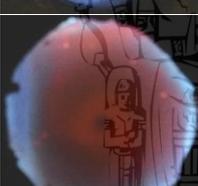
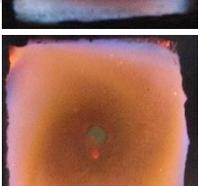
ekuivalen 0,8 sampai rasio ekuivalen 1,2 dan pada *rectangular disk combustor* api bisa menyala pada rasio ekuivalen 0,9 sampai 1,2. Pada *circular disk combustor* api bisa menyala rata-rata pada debit bahan bakar sebesar 55 ml/min sampai 179 ml/min sedangkan pada *rectangular disk combustor*, api bisa menyala pada debit bahan bakar 72 ml/min sampai 179 ml/min.

Pada *circular disk combustor*, api masih bisa menyala pada debit bahan bakar 55 ml/min namun pada *rectangular disk combustor*, api hanya bisa menyala pada debit bahan bakar 72 ml/min. Hal ini dikarenakan pada *circular disk combustor* bentuk aliran reaktan yang berada di dalam *combustor* lebih stabil dibandingkan dengan *rectangular disk combustor*. Hal ini disebabkan karena pada *circular disk combustor* tidak terdapat sudut-sudut pada *combustor*, oleh sebab hal tersebut maka reaktan yang masuk kedalam *combustor* bisa lebih cepat menyebar didalam *combustor* tanpa terjadi diskontinuitas aliran. Sehingga dengan debit reaktan yang lebih sedikit, penyebaran reaktan di dalam *combustor* lebih merata dan tidak banyak reaktan yang terbuang sia-sia. Berbeda pada *rectangular disk combustor*, dikarenakan terdapat sudut-sudut pada *rectangular disk combustor* maka reaktan yang masuk kedalam *combustor* mengalami diskontinuitas aliran, dan dikarenakan terjadi diskontinuitas pergerakan reaktan di dalam *combustor* jadi tidak stabil sehingga penyebaran reaktan di dalam *combustor* tidak merata dan banyak juga reaktan yang keluar begitu saja melalui lubang exhaust. Maka dari itu pada *rectangular disk combustor* diperlukan debit reaktan minimum yang lebih besar dibandingkan dengan *circular disk combustor*, agar kondisi didalam *combustor* selalu terisi reaktan dan tidak ada jeda reaktan habis terbuang di dalam *combustor* yang akan mengakibatkan padamnya api di dalam *combustor*. Padamnya api di dalam *combustor* diakibatkan waktu tinggal reaktan yang rendah, sehingga heat generation yang terjadi tidak mampu menstabilkan nyala api. Hal inilah yang menyebabkan perlunya debit reaktan yang lebih besar pada *rectangular disk combustor*.

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 diambil pada beberapa titik untuk mengetahui pengaruh dari bentuk ruang bakar pada kenaikan rasio ekuivalen dan kenaikan debit reaktan.

Tabel 4.5
Data Visualisasi Nyala Api pada Variasi Q_f dengan $\phi = 1$

Debit bahan bakar (ml/min)	<i>Circular disk combustor</i>	<i>Rectangular disk combustor</i>
$Q_f = 55$		
$Q_f = 72$		
$Q_f = 90$		
$Q_f = 108$		
$Q_f = 135$		
$Q_f = 143$		
$Q_f = 179$		

Pada Tabel 4.5 diatas menunjukkan visualisasi bentuk nyala api pada rasio ekuivalen (ϕ) 1 dan besar debit bahan bakar dari 55 ml/min sampai 179 ml/min dengan variasi bentuk *combustor*. Pada tabel diatas terlihat bahwa *circular disk combustor* bisa menyala pada debit bahan bakar 55 ml/min karena dengan bentuknya yang lingkaran (*circular*) reaktan yang masuk langsung berputar di dalam *combustor* tanpa adanya gaya norma dari dinding-dinding *combustor* dan *circular disk combustor* mampu mengondisikan aliran reaktan dalam ruang

bakar agar terjadi perputaran (*swirling flow*) dalam ruang bakar dan setelah berputar di dalam ruang bakar reaktan keluar melalui lubang *exhaust*. Maka dari itu aliran reaktan pada *circular disk combustor* memiliki waktu tinggal reaktan di dalam ruang bakar yang lebih lama dibandingkan dengan *rectangular disk combustor*. *Rectangular disk combustor* juga dapat memungkinkan terjadinya suatu aliran reaktan yang berputar (*swirling flow*) di dalam ruang bakar sebelum akhirnya keluar melalui lubang *exhaust*, akan tetapi kecepatan yang dibutuhkan dan juga debit reaktan yang dibutuhkan harus lebih besar agar perputaran aliran reaktan di dalam *combustor* menjadi stabil sehingga dapat terjadi pembakaran yang stabil dalam ruang bakar Yoon, *et al.* (2011). Tidak menyalanya api pada *rectangular disk combustor* dengan debit 55 ml/min dikarenakan bentuk dari *combustor* itu sendiri. Dimana pada *rectangular disk combustor* memiliki sisi yang rata dan terdapat sudut-sudut pada ruang bakarnya sehingga reaktan yang masuk kedalam *combustor* tidak membentuk aliran berputar tapi langsung keluar menuju lubang *exhaust*. Hasilnya, pada *circular disk combustor* dengan debit bahan bakar 55 ml/min reaktan sudah bisa terbakar. Berbeda dengan *rectangular disk combustor*, membutuhkan debit 72 ml/min baru bisa menyala.

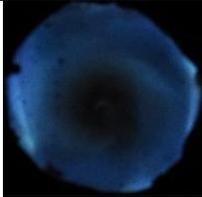
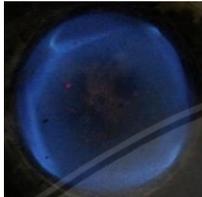
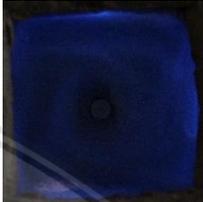
Pada Tabel 4.5 visualisasi nyala api dapat dilihat pada debit bahan bakar 108 ml/min nyala api dalam *circular* dan *rectangular disk combustor* api yang menyala hanya pada sisi-sisi dari kedua *combustor* saja. Hal ini disebabkan oleh karena bahan bakar yang sudah bercampur dengan udara dan menjadi reaktan cenderung berkumpul pada sisi-sisi *combustor*. Penyebab dari berukumpulnya reaktan di sisi-sisi *combustor* karena tingginya kecepatan reaktan yang masuk kedalam *combustor* sehingga timbulah gaya sentrifugal. Dimana semakin tinggi kecepatan tangensial akan menghasilkan gaya sentrifugal yang tinggi (prinsip alat *sentrifuge*). Hasilnya pada debit bahan bakar 108 ml/min pembakaran yang terjadi pada kedua *combustor* mulai terkonsentrasi pada sisi radial dari kedua *combustor*.

Pada Tabel 4.5 visualisasi nyala api juga terlihat bahwa pada debit 135 ml/min material *circular disk combustor* mulai memerah. Pada *circular disk combustor* warna merah dari material *circular disk combustor* menyatu dengan warna nyala api. Akan tetapi pada *rectangular disk combustor* material yang mulai berwarna merah hanya pada bagian sisi saja, dibagian tengah hanya terdapat titik-titik merah. Baru pada debit bahan bakar 179 ml/min warna material mulai merata dan menyatu dengan warna api. Hal ini menunjukkan perbedaan signifikan panas hasil pembakaran yang melalui dinding *combustor* antara kedua *combustor*. Pada *circular disk combustor* perputaran aliran (*swirling flow*) terjadi secara baik sehingga perpindahan panas ke dinding *combustor* terjadi secara merata. Berbeda dengan *rectangular disk combustor* dimana ruang bakarnya memiliki sudut-sudut yang

menyebabkan aliran reaktan di dalam ruang bakar mengalami diskontinuitas, sehingga perpindahan panas hasil pembakaran ke dinding *combustor* tidak merata.

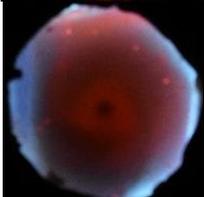
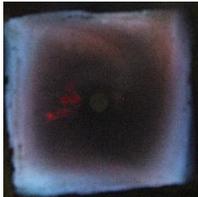
Tabel 4.6

Visualisasi Nyala Api pada Variasi ϕ dengan $Q_f = 90$ ml/min

Rasio Ekuivalen	<i>Circular disk combustor</i>	<i>Rectangular disk combustor</i>
$\phi = 0.8$		-
$\phi = 1$		
$\phi = 1.2$		

Pada Tabel 4.6 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 hal ini dikarenakan pada saat rasio ekuivalen rendah kecepatan reaktan yang masuk ke dalam ruang bakar semakin tinggi sehingga menimbulkan gaya sentrifugal yang tinggi juga. Oleh sebab itu reaktan pada *rectangular disk combustor* dengan rasio ekuivalen 0,8 tidak menyala. Hal ini disebabkan kecepatan reaktan yang tinggi sehingga ketika reaktan memasuki ruang bakar, aliran reaktan menjadi turbulen lalu dikarenakan rasio ekuivalensinya yang rendah sehingga campuran reaktan menjadi miskin bahan bakar seperti yang dapat dilihat pada gambar *circular disk combustor* pada Tabel 4.6. Dimana api yang terbakar di dalam ruang bakar berwarna biru, maka hal ini lah yang membuat bahan bakar pada *rectangular disk combustor* tidak sempat terbakar di dalam ruang bakar.

Tabel 4.7
Data Visualisasi Nyala Api pada Variasi ϕ dengan $Q_f = 135$ ml/min

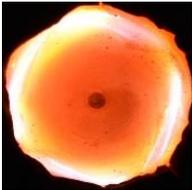
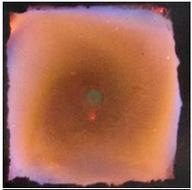
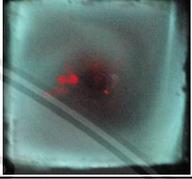
Rasio Ekuivalen	<i>Circular disk combustor</i>	<i>Rectangular disk combustor</i>
$\phi = 0,8$		-
$\phi = 1$		
$\phi = 1,2$		

Pada Tabel 4.7 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 dan dua macam variasi bentuk

Pada rasio ekuivalen rendah api tidak penuh memenuhi seluruh ruang bakar namun seiring naiknya rasio ekuivalen maka api akan semakin merata hal ini dikarenakan pada saat rasio ekuivalen rendah kecepatan reaktan yang masuk ke dalam ruang bakar semakin tinggi sehingga menimbulkan gaya sentrifugal yang tinggi juga. Oleh sebab itu reaktan pada *rectangular disk combustor* dengan rasio ekuivalen 0,8 tidak menyala. Hal ini disebabkan kecepatan reaktan yang tinggi sehingga ketika reaktan memasuki ruang bakar, aliran reaktan menjadi turbulen lalu dikarenakan rasio ekuivalensinya yang rendah sehingga campuran reaktan menjadi miskin bahan bakar seperti yang dapat dilihat pada gambar *circular disk combustor* pada Tabel 4.7. Dimana api yang terbakar di dalam ruang bakar berwarna biru, maka hal ini lah yang membuat bahan bakar pada *rectangular disk combustor* tidak sempat terbakar di dalam ruang bakar.

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.

Tabel 4.8
 Data Visualisasi Nyala Api pada Variasi ϕ dengan $Q_f = 179$ ml/min

Rasio Ekuivalen	<i>Circular disk combustor</i>	<i>Rectangular disk combustor</i>
$\phi = 0,8$	-	-
$\phi = 1$		
$\phi = 1,2$		

Pada Tabel 4.8, dapat dilihat dari perbedaan visualisasi nyala api dengan debit bahan bakar tinggi yakni 179 ml/min dengan berbagai macam variasi rasio ekuivalen dan variasi bentuk *combustor*.

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 bentuk *combustor* tersebut. Sehingga *circular disk combustor* lebih berwarna merah dibanding *rectangular disk combustor* dikarenakan pada *rectangular disk combustor* persebaran panasnya tidak merata disebabkan adanya diskontinuitas aliran pada *rectangular disk combustor*.

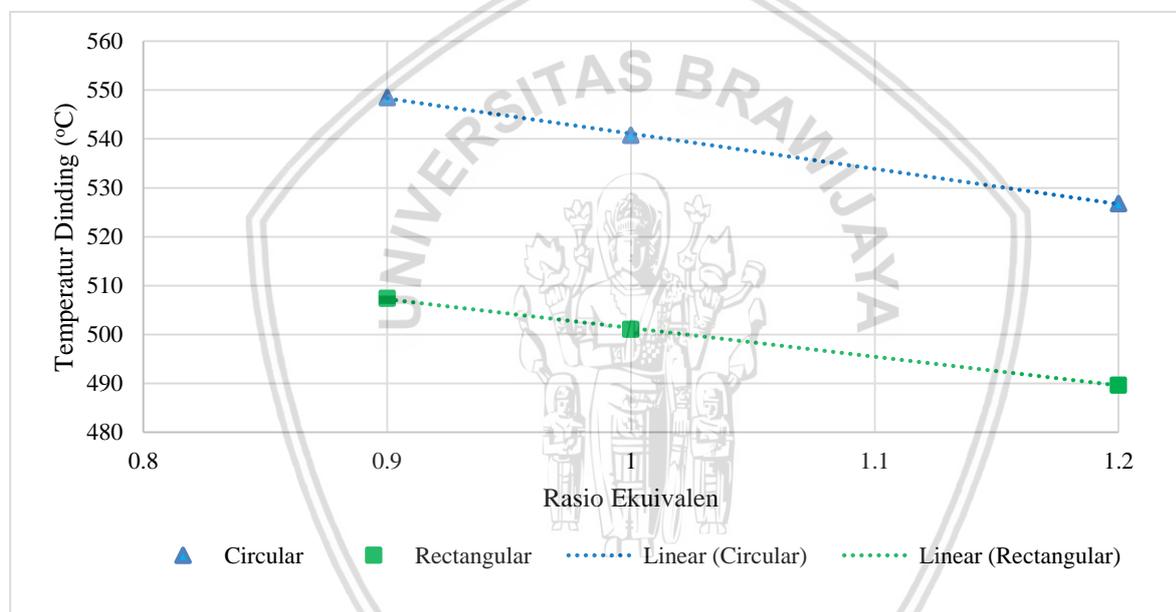
4.4 Pengolahan dan Pembahasan Data Temperatur Dinding *Combustor*

Titik pengambilan temperatur dinding *circular* dan *rectangular disk combustor* terletak pada 3 titik. Pada *circular disk combustor* 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*. Lalu pada *rectangular disk combustor* titik 1 berada pada jarak 1,8 mm dari titik pusat *combustor*, titik 2 dengan jarak 4,5 mm dari titik pusat *combustor*, dan titik 3 dengan jarak 6,2 mm dari titik pusat *combustor*. Temperatur diambil pada $Q_f = 135$ ml/min dengan memvariasikan rasio ekuivalen, dikarenakan pada debit tersebut adalah debit yang menjangkau semua variasi pada masing-masing variasi bentuk *combustor*.

Tabel 4.9
Data Temperatur Dinding *Circular Disk Combustor* (°C)

Sudut Inlet	Titik	T pada Rasio Ekuivalen (°C)		
		0.9	1	1.2
<i>Circular</i>	1	538,86	529,66	520,43
	2	549,83	543,32	528,33
	3	556,74	549,29	531,68
	rata-rata	548,48	540,76	526,81
<i>Rectangular</i>	1	465,45	451,65	436,66
	2	524,67	521,04	511,17
	3	532,22	530,45	521,2
	rata-rata	507,44	501,05	489,68

Pada Tabel 4.9 didapatkan nilai temperatur dinding *combustor* dengan variasi jumlah saluran masuk, dan dapat diplot kedalam Gambar 4.5.

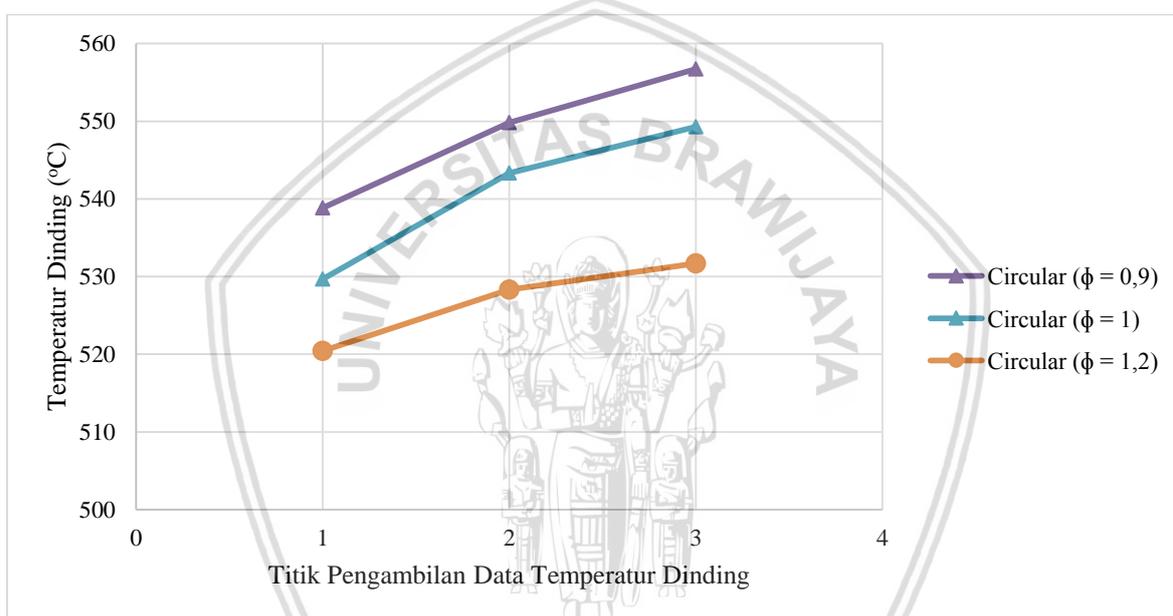


Gambar 4.5 Temperatur rata-rata dinding *combustor* terhadap rasio ekuivalen

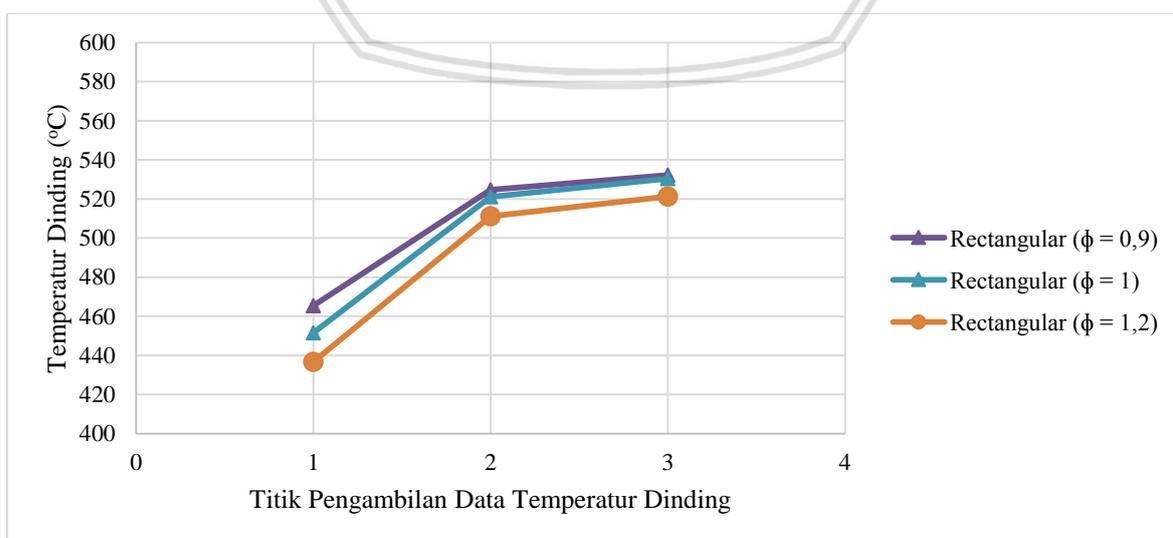
Dapat dilihat pada Gambar 4.5 hasil yang didapatkan adalah pada saat nilai rasio ekuivalen semakin naik, temperatur pada dinding *combustor* semakin menurun. Hal ini dikarenakan pada saat debit bahan bakar konstan dan nilai rasio ekuivalen semakin besar, pembakaran yang terjadi di ruang bakar memiliki kondisi kaya bahan bakar. Sehingga banyak bahan bakar yang terbuang begitu saja menuju lubang *exhaust* sebelum bias terbakar habis. Sehingga penyerapan kalor hasil pembakaran oleh dinding lebih sedikit. Berbeda dengan sebaliknya disaat nilai rasio ekuivalen semakin mendekati 1, temperatur yang dihasilkan oleh pembakaran semakin tinggi sehingga kalor yang diserap oleh dinding *combustor* lebih banyak. Hal ini disebabkan pada saat nilai rasio ekuivalen mendekati 1 debit

udara semakin meningkat sehingga dapat mengimbangi jumlah bahan bakar yang seharusnya terbakar.

Pada *circular disk combustor*, temperatur dinding pada semua rasio ekuivalen yang diukur lebih tinggi daripada *rectangular disk combustor* karena *circular disk combustor* memiliki kecepatan tangensial didalam ruang bakar yang lebih tinggi dan minim dari gangguan diskontinuitas aliran reaktan dalam ruang bakar. Tidak seperti pada *rectangular disk combustor*, dimana perputaran aliran reaktan dibantu oleh saluran masuk lainnya sehingga reaktan pada *rectangular disk combustor* mengalami diskontinuitas aliran yang menyebabkan banyak bahan bakar yang tidak ikut terbakar melainkan langsung keluar menuju lubang *exhaust*.

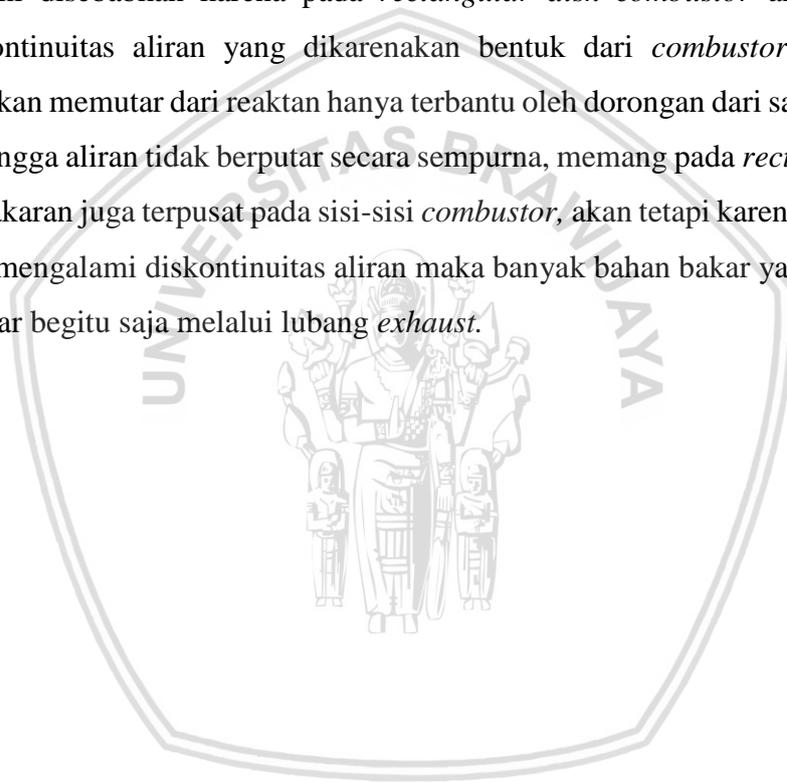


Gambar 4.6 Temperatur dinding *circular disk combustor* pada masing-masing titik



Gambar 4.7 Temperatur dinding *rectangular disk combustor* pada masing-masing titik

Pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 kedua grafik memiliki kecenderungan yang sama, yaitu mempunyai titik temperatur tertinggi pada titik 3 dan titik temperatur terendah pada titik 1. *Circular* dan *rectangular disk combustor* cenderung mengalami kenaikan temperatur dari titik 1 hingga titik 3. Titik 3 merupakan titik tertinggi dari kedua *combustor*, ini disebabkan karena pada titik 3 merupakan pusat berkumpulnya nyala api dari pembakaran, sehingga konsentrasi panas tertinggi terdapat pada titik 3. Titik 1 merupakan titik terendah dari kedua *combustor*, hal ini disebabkan karena pada titik 1 penyerapan panas menuju dinding *combustor* hanya bersumber dari panas sisa pembakaran dan tidak adanya api pada titik 1. Suhu yang dimiliki *rectangular disk combustor* lebih rendah dibanding *circular disk combustor*, hal ini disebabkan karena pada *rectangular disk combustor* aliran reaktan mengalami diskontinuitas aliran yang dikarenakan bentuk dari *combustor* itu sendiri. Sehingga pergerakan memutar dari reaktan hanya terbantu oleh dorongan dari saluran masuk yang lainnya sehingga aliran tidak berputar secara sempurna, memang pada *rectangular disk combustor* pembakaran juga terpusat pada sisi-sisi *combustor*, akan tetapi karena pergerakan reaktannya yang mengalami diskontinuitas aliran maka banyak bahan bakar yang tidak ikut terbakar dan keluar begitu saja melalui lubang *exhaust*.



BAB V PENUTUP

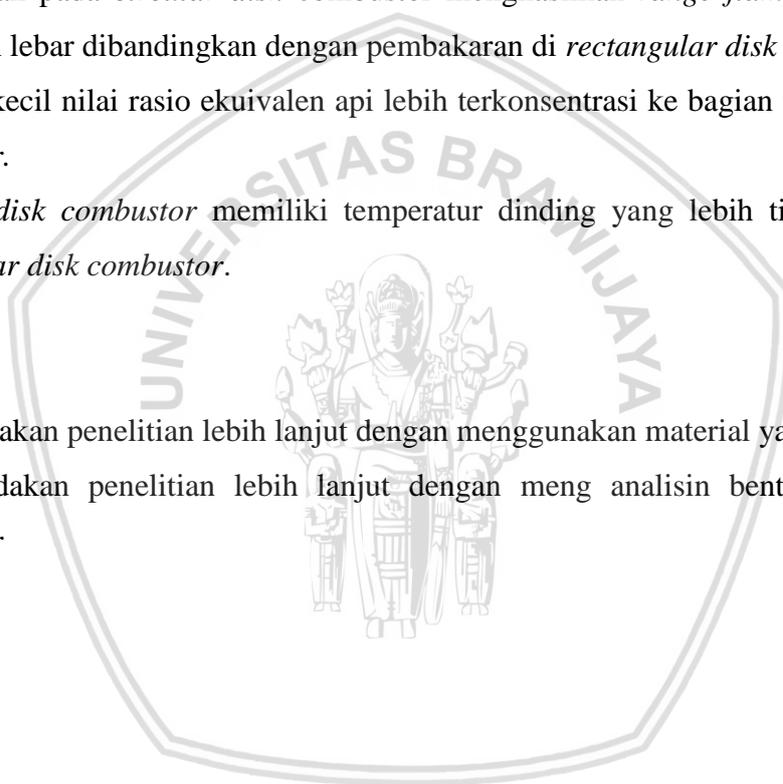
5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian eksperimental pengaruh bentuk geometri *combustor* terhadap karakteristik pembakaran yang meliputi *flame stability limit*, visualisasi nyala api, dan temperatur dinding *combustor* dengan menggunakan bahan bakar butana (C_4H_{10}) yang dianggap memiliki komposisi murni 100% butana, didapat kesimpulan sebagai berikut.

1. Pembakaran pada *circular disk combustor* menghasilkan *range flame stability limit* yang lebih lebar dibandingkan dengan pembakaran di *rectangular disk combustor*.
2. Semakin kecil nilai rasio ekuivalen api lebih terkonsentrasi ke bagian tepi pada kedua *combustor*.
3. *Circular disk combustor* memiliki temperatur dinding yang lebih tinggi dibanding *rectangular disk combustor*.

5.2 Saran

1. Perlu diadakan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan material yang berbeda.
2. Perlu diadakan penelitian lebih lanjut dengan menganalisis bentuk aliran pada *combustor*



DAFTAR PUSTAKA

- Cengel, Y. 2006. *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications*. New York: McGraw-Hill.
- Cozzi, F., Olivani A., Coghe A., Luchetti A., Tonazzo F. 2006. Experimental Investigation of a Mesoscale *Combustor*. *Jurnal*. Milan: Politecnico di Milano.
- Elsair, R. 2012. *Fundamentals of Chemistry*. Frederiksberg: Ventus Publishing ApS.
- 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.
- L. Merotto, C. Fanciulli, R. Donde, S. De liliis. 2015. *Study of a thermoelectric generator based on a catalytic premixed meso-scale combustor* Page 348-349
- 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.
- Reddy, W., Yuliati, L., Purnami. 2017. *Pengaruh Jumlah Saluran Masuk terhadap Karakteristik Pembakaran pada Tangential Circular disk combustor*. Skripsi. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- 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 Tthe 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.
- Warneck, P. 1988. *Chemistry of the Natural Atmosphere*. London: Academic Press, Inc.