

**PENGARUH JUMLAH DAN ARAH SALURAN MASUK TERHADAP
KARAKTERISTIK PEMBAKARAN PADA
*RECTANGULAR DISK COMBUSTOR***

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



DIMAS SAYEKTI SUBARCAH PUTRA
NIM. 145060201111079

UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2018



LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH JUMLAH DAN ARAH SALURAN MASUK TERHADAP
KARAKTERISTIK PEMBAKARAN PADA
RECTANGULAR DISK COMBUSTOR**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



DIMAS SAYEKTI SUBARCAH PUTRA
NIM. 145060201111079

Skripsi ini telah di revisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 18 Oktober 2018

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

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

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

Mengetahui,
Ketua Program Studi S1



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



JUDUL SKRIPSI

Pengaruh Jumlah dan Arah Saluran Masuk terhadap Karakteristik Pembakaran pada
Rectangular Disk Combustor

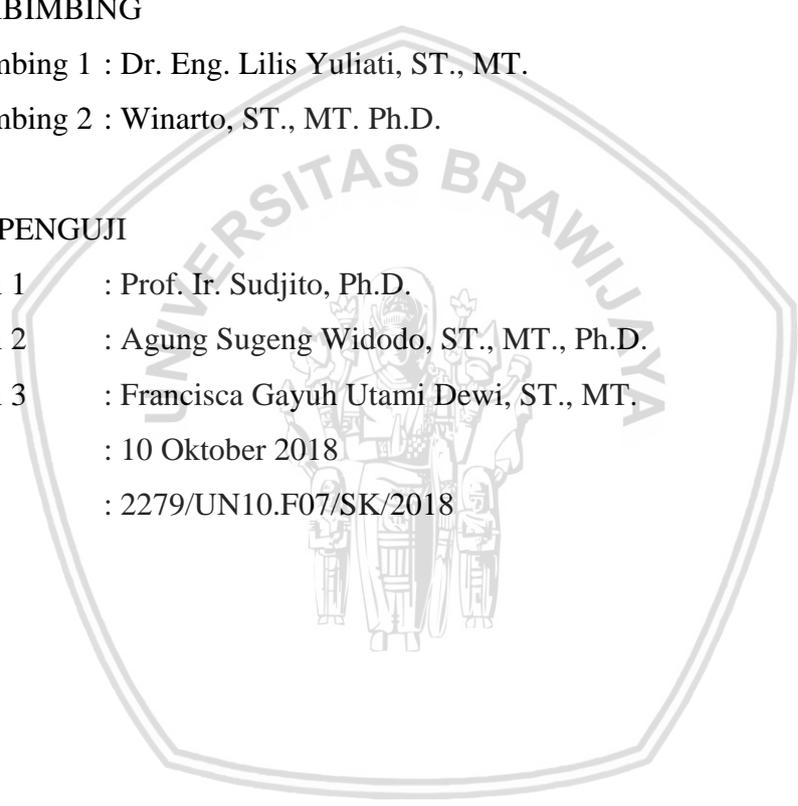
Nama Mahasiswa : Dimas Sayekti Subarkah Putra
NIM : 145060201111079
Program Studi : Teknik Mesin
Minat : Teknik Konversi Energi

KOMISI PEMBIMBING

Dosen Pembimbing 1 : Dr. Eng. Lilis Yuliati, ST., MT.
Dosen Pembimbing 2 : Winarto, ST., MT. Ph.D.

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Prof. Ir. Sudjito, Ph.D.
Dosen Penguji 2 : Agung Sugeng Widodo, ST., MT., Ph.D.
Dosen Penguji 3 : Francisca Gayuh Utami Dewi, ST., MT.
Tanggal Ujian : 10 Oktober 2018
SK Penguji : 2279/UN10.F07/SK/2018



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas didalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan orang lain untuk memperoleh gelar akademik disuatu 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 disebarkan sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata didalam 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, 18 Oktober 2018

Mahasiswa,



Dimas Sayekti Subarkah Putra

NIM. 145060201111079

UNIVERSITAS BRAWIJAYA





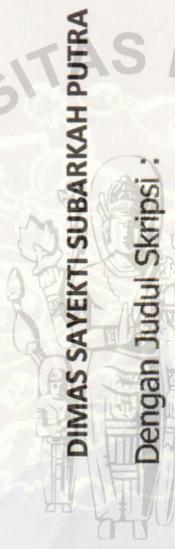
**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA**



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 133/UN10.F07.12.21/PP/2018

Sertifikat ini diberikan kepada :



DIMAS SAYEKTI SUBARKAH PUTRA
Dengan Judul Skripsi :

**PENGARUH JUMLAH DAN ARAH SALURAN MASUK TERHADAP KARAKTERISTIK
PEMBAKARAN PADA RECTANGULAR 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

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

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

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



*Teriring Ucapan Terima Kasih Kepada:
Orang Tua dan Keluarga tercinta*



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat, hidayah dan karunia-Nya yang telah memudahkan dan memberikan kelancaran serta diberi ketabahan dan kesabaran kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi berjudul **“Pengaruh Jumlah dan Arah Saluran Masuk terhadap Karakteristik Pembakaran pada *Rectangular Disk Combustor*”** dengan baik. Tak lupa sholawat serta salam semoga tetap tercurahkan kepada junjungan kita Rasulullah SAW yang telah membawa kita dari jalan yang gelap menuju ke jalan yang terang-benderang.

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

1. Keluargaku yang tercinta dan berbahagia, (Bapak Subarkah, Ibu Sukiyati, Mbak Ririn, Mbak Fifin, Mas Huda, Mas Andi, Mas Danang, Rahmat, Mbak Puspa, Mbak Mina, Evan, Rama, Billa, Alya) yang tiada henti mendoakan dan memberikan motivasi kepada penulis.
2. Seluruh keluarga besar di Ngawi dan Klaten yang tiada henti mendoakan dan memberikan motivasi kepada penulis.
3. Ibu Dr. Eng. Lilis Yulianti, ST., MT. selaku dosen pembimbing I sekaligus ketua program studi S2 Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang yang telah memberikan bimbingan, motivasi dan ilmu yang bermanfaat serta pengarahannya dalam menyelesaikan skripsi ini.
4. Bapak Winarto, ST., MT., Ph.D. selaku dosen pembimbing II sekaligus kepala laboratorium mesin – mesin fluida Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang yang sudah meluangkan waktu untuk membimbing demi kesempurnaan penulisan skripsi ini dari awal hingga akhir penelitian.
5. Bapak Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D. selaku ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
6. Bapak Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng., Ph.D. selaku sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
7. Bapak Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT. selaku ketua program studi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.

8. Ibu Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT. selaku ketua kelompok dasar keahlian konsentrasi (KKDK) Teknik Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
9. Bapak Ir. Hastono Wijaya, MT. selaku dosen penasehat akademik yang tiada henti memberikan motivasi dan bimbingan selama penulis menyelesaikan studi di Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
10. Seluruh dosen pengajar, staf dan karyawan Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang yang telah memberikan bantuan sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
11. Teman skripsi seperjuangan, (Fahmi, Dhyan, Ash) yang telah berbagi pengalaman suka dan duka selama mengerjakan skripsi ini.
12. Teman laboratorium mesin-mesin fluida yang telah meminjamkan laboratoriumnya demi kelancaran pengerjaan penelitian skripsi ini.
13. Teman-teman GERANAD, SEGO, SMAM 1 Gresik, SMPM 12 GKB, SDM 1 Gresik, TK Islam Bakti 5 GKB yang telah memberikan motivasinya kepada penulis.
14. Teman-teman di Malang, kost seventina yang telah memberikan bantuan dan motivasinya dalam terselesaikannya skripsi ini.
15. Seluruh keluarga besar M'14 dimana atas doa, dukungan, dan bantuannya selama ini skripsi dapat terselesaikan dengan baik dan membuat penulis mendapatkan pelajaran yang sangat berarti dalam kehidupan ini.
16. Vera F.N. yang telah memberikan dukungan dan motivasi untuk menyelesaikan skripsi ini.
17. Seluruh keluarga besar mahasiswa mesin (KBMM) Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang yang telah memberikan bantuan kepada penulis.
18. 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. Penulis berharap agar skripsi ini dapat bermanfaat sehingga dapat menjadi referensi untuk dikembangkan pada penelitian selanjutnya demi kemajuan kita semua.

Malang, 18 Oktober 2018

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	viii
RINGKASAN	ix
SUMMARY	x
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 <i>Micropower Generator Dan Meso/Micro-scale Combustor</i>	8
2.3 Pembakaran	10
2.3.1 Klasifikasi Pembakaran Berdasarkan Cara Reaktan Terbakar Pada Zona Reaksi	11
2.3.2 Reaksi Kimia Pada Proses Pembakaran	12
2.3.3 Rasio Udara Dan Bahan Bakar (<i>AFR</i>)	13
2.3.4 Rasio Ekuivalen (ϕ)	15
2.3.5 Batas Kestabilan Nyala Api (<i>Flame Stability Limits</i>) Dan Sifat Nyala Api	16
2.3.6 Kecepatan Reaktan ($V_{reaktan}$) Pada Saluran Masuk Dengan Variasi Jumlah Saluran	16
2.4 Bahan Bakar Dan Klasifikasinya	17
2.4.1 Butana (C_4H_{10})	17
2.5 Hipotesis	18
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	27
3.6 Diagram Alir Penelitian	29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Kalibrasi <i>Flowmeter</i>	31
4.2 Batas Kestabilan Nyala Api	33
4.3 Visualisasi Nyala Api	36



4.4 Temperatur Dinding *Combustor* 39

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 43

5.1 Kesimpulan 43

5.2 Saran..... 43

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Komposisi Gas pada Udara Kering	13
Tabel 2.2	Massa Atom Relatif (A_r)	14
Tabel 4.1	Data kalibrasi <i>flowmeter</i> bahan bakar butana (C_4H_{10}).....	32
Tabel 4.2	Data kalibrasi <i>flowmeter</i> udara	33
Tabel 4.3	Data batas kestabilan nyala api untuk <i>rectangular disk combustor</i> dengan satu saluran masuk	34
Tabel 4.4	Data batas kestabilan nyala api untuk <i>rectangular disk combustor</i> dengan dua saluran masuk	34
Tabel 4.5	Data batas kestabilan nyala api untuk <i>rectangular disk combustor</i> dengan empat saluran masuk	35
Tabel 4.6	Pengambilan data temperatur <i>combustor</i> pada <i>rectangular disk combustor</i>	40



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	(a) <i>Disk-type combustor</i> dan (b) <i>Tube-type combustor</i>	5
Gambar 2.2	Efek <i>specific area</i> terhadap konsentrasi gas buang CO dan temperatur gas buang pada <i>disk-type</i>	6
Gambar 2.3	(a) Efek diameter <i>outer tube</i> terhadap konsentrasi gas buang CO dan (b) Efek rasio ekuivalen terhadap konsentrasi gas buang CO pada <i>tube-type</i>	6
Gambar 2.4	(a) Skema <i>thermoelectric micropower generator</i> dengan <i>meso-scale combustor</i> yang diapit dua modul <i>thermoelectric</i> (b) dimensi <i>rectangular meso-scale combustor</i>	7
Gambar 2.5	Temperatur rata-rata pada <i>combustor</i> dengan variasi <i>mass flow rate</i>	7
Gambar 2.6	Perbandingan temperatur ditiap lokasi terhadap rasio ekuivalen dengan variasi <i>mass flow rate</i>	8
Gambar 2.7	<i>Micropower generator</i> yang menggunakan prinsip siklus daya konvensional	9
Gambar 2.8	<i>Thermoelectric micropower generator</i>	9
Gambar 2.9	<i>Thermophotovoltaic micropower generator</i>	10
Gambar 2.10	Ilustrasi proses pembakaran	11
Gambar 2.11	(a) Pembakaran <i>premixed</i> dan (b) Pembakaran <i>non-premixed</i> atau difusi.....	12
Gambar 2.12	Api <i>premixed laminar</i> dan api <i>premixed turbulent</i>	12
Gambar 2.13	Struktur ikatan molekul butana (C ₄ H ₁₀).....	18
Gambar 3.1	<i>Rectangular disk combustor</i> dengan satu saluran.....	20
Gambar 3.2	<i>Rectangular disk combustor</i> dengan dua saluran.....	20
Gambar 3.3	<i>Rectangular disk combustor</i> dengan empat saluran.....	21
Gambar 3.4	Kaca Tahan Panas Api	21
Gambar 3.5	Lem Tahan Panas Api.....	22
Gambar 3.6	Kompresor.....	22
Gambar 3.7	Tabung bahan bakar butana (C ₄ H ₁₀)	23
Gambar 3.8	Regulator butana	23
Gambar 3.9	(a) <i>Flowmeter</i> udara dan (b) <i>Flowmeter</i> bahan bakar.....	24
Gambar 3.10	<i>Y-Connector</i>	24
Gambar 3.11	<i>T-Connector</i>	25
Gambar 3.12	<i>Inlet Connector</i>	25
Gambar 3.13	Selang/Pipa Saluran	25
Gambar 3.14	Pemantik	26
Gambar 3.15	Skema instalasi penelitian.....	27
Gambar 3.16	Titik pengambilan data temperatur dinding <i>combustor</i>	28
Gambar 3.17	Diagram alir penelitian	29
Gambar 4.1	Grafik kalibrasi <i>flowmeter</i> bahan bakar butana (C ₄ H ₁₀).....	32
Gambar 4.2	Grafik kalibrasi <i>flowmeter</i> udara	33
Gambar 4.3	Grafik batas kestabilan nyala api perbandingan antara kecepatan reaktan dengan rasio ekuivalen berbeda pada <i>rectangular disk combustor</i>	35
Gambar 4.4	Visualisasi nyala api pada <i>rectangular disk combustor</i> dengan satu saluran masuk.....	36
Gambar 4.5	Visualisasi nyala api pada $\phi = 1$ dengan debit yang berbeda	37

Gambar 4.6	Visualisasi nyala api pada $Q_f = 72$ ml/min dengan rasio ekuivalen berbeda.....	38
Gambar 4.7	Visualisasi nyala api pada $Q_f = 107$ ml/min dengan rasio ekuivalen berbeda.....	38
Gambar 4.8	Visualisasi nyala api pada $Q_f = 179$ ml/min dengan rasio ekuivalen berbeda.....	39
Gambar 4.9	Grafik perbandingan temperatur dinding <i>combustor</i> dengan jarak dari titik pusat <i>combustor</i>	40
Gambar 4.10	Grafik perbandingan temperatur dinding <i>combustor</i> dengan rasio ekuivalen berbeda pada <i>rectangular disk combustor</i>	41



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1.	Kecepatan reaktan yang dihasilkan pada tiap saluran masuk



RINGKASAN

Dimas Sayekti Subarkah Putra, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Agustus 2018, *Pengaruh Jumlah dan Arah Saluran Masuk terhadap Karakteristik Pembakaran pada Rectangular Disk Combustor*, Dosen Pembimbing : Lilis Yuliati dan Winarto.

Kebutuhan energi listrik dapat terpenuhi dengan baik dengan bantuan *micropower generator*, yaitu alat pembangkit listrik berskala mikro. Dimana memiliki komponen berupa *combustor* yang mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi panas dan alat pengkonversi energi berupa modul *thermoelectric* yang mengubah energi panas menjadi energi listrik.

Combustor yang digunakan berjenis *meso-scale combustor* yang memiliki *physical length scale combustor* lebih dari 1 mm. Bentuk *combustor* berjenis *rectangular disk-type* yang memiliki keunggulan berupa memiliki efisiensi termal yang baik dan dapat diterapkan pada modul *thermoelectric* yang juga berbentuk *rectangular*. Material terbuat dari tembaga dan memiliki ukuran 25 x 25 mm dengan tebal 3 mm. Karakteristik pembakaran yang diteliti didalam *combustor* pada penelitian ini meliputi batas kestabilan nyala api, visualisasi nyala api, dan temperatur dinding *combustor*. Dimana pembakaran sempurna dan tidak sempurna yang dihasilkan didalam *meso-scale combustor* dipengaruhi oleh waktu tinggal reaktan yang bergantung pada kecepatan reaktan yang dihasilkan dan dapat berubah pada *combustor* dengan jumlah saluran masuk yang berbeda. Maka dari itu, pada penelitian ini menguji pengaruh jumlah saluran masuk terhadap karakteristik pembakaran pada *rectangular disk combustor* menggunakan pembakaran *premixed* dengan bahan bakar butana (C_4H_{10}) dan oksidator berupa udara bebas yang disuplai dari kompresor. Jumlah saluran masuk yang digunakan pada penelitian ini adalah 1, 2, dan 4 dengan arah saluran masuk sesuai desain *combustor*.

Pada penelitian ini menghasilkan dimana semakin banyak jumlah saluran masuk maka nyala api akan semakin stabil pada interval rasio ekuivalen yang lebih luas, visualisasi nyala api yang dihasilkan didalam *combustor* semakin merata, dan temperatur dinding *combustor* semakin meningkat. Sedangkan untuk saluran masuk 1 tidak dapat menghasilkan nyala api yang stabil.

Kata Kunci : jumlah dan arah saluran masuk, karakteristik pembakaran, pembakaran *premixed, rectangular disk combustor*.

SUMMARY

Dimas Sayekti Subarkah Putra, *Mechanical Engineering, The Faculty Of Engineering, University of Brawijaya, August 2018, The Effect of the Number and Direction of Reactant Inlet on the Combustion Characteristics in Rectangular Disk Combustor, Academic Supervisor : Lilis Yuliati and Winarto.*

Electrical energy needs can be met properly with the help of micropower generators, which are micro-scale power generation equipment. Where it has a component in the form of a combustor that converts the chemical energy of a fuel into heat energy and an energy converter device in the form of a thermoelectric module that converts heat energy into electrical energy.

Combustor used is a meso-scale combustor type that has a combustor physical length scale of more than 1 mm. Rectangular disk-type combustor type that has the advantage of having good thermal efficiency and can be applied to thermoelectric modules which are also rectangular in shape. The material is made of copper and has a size of 25 x 25 mm with a thickness of 3 mm. The combustion characteristics studied in the combustor in this study include flame stability limits, flame visualization, and combustor wall temperatures. Where complete and imperfect combustion produced in meso-scale combustors is affected by the residence time of the reactants which depend on the speed of the reactants produced and can change in the combustor with the number of different reactant inlets. Therefore, this study examines the effect of the number of reactant inlet on the combustion characteristics of the rectangular combustor disks using premixed combustion with butane fuel (C_4H_{10}) and oxidizers in the form of free air supplied from the compressor. The number of reactant inlets used in this study are 1, 2, and 4 with inlet directions according to the combustor design.

In this study resulted in the more number of reactant inlets, the more stable the flame will be at the wider equivalent ratio interval, the visualization of the flame produced in the combustor is evenly distributed, and the combustor wall temperature increases. Whereas for inlet 1 cannot produce a stable flame.

Keywords : the number and direction of reactant inlet, combustion characteristics, premixed combustion, rectangular disk combustor.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dengan adanya *micropower generator* sebagai alat pembangkit listrik berskala mikro diharapkan akan sangat membantu memenuhi kebutuhan energi listrik bagi kehidupan manusia. *Micropower generator* memiliki komponen berupa *combustor* yang menghasilkan energi panas dan alat pengkonversi energi. Prinsip kerjanya yaitu, *combustor* yang digunakan menghasilkan *micro combustion* yang mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi panas yang kemudian dikonversikan menjadi energi listrik menggunakan alat pengkonversi energi.

Menurut Fernandez et al. (2002) *micropower generator* terbagi menjadi dua jenis menurut alat pengkonversi energinya, yaitu *micropower generator* yang menggunakan siklus daya konvensional seperti pada turbin gas berskala mikro dan *micropower generator* yang menggunakan modul *thermoelectric* atau *thermophotovoltaic* sebagai alat pengkonversi energi dari energi panas/cahaya menjadi energi listrik.

Menurut Merotto et al. (2016) *combustor* pada *thermoelectric micropower generator* memiliki kelebihan dibandingkan dengan *fuel cell* dan sistem pembakaran jenis lainnya yaitu alatnya cocok untuk sistem *portable* yang memiliki desain sederhana dengan menggunakan sumber energi yang sedikit atau lebih hemat, lebih tahan lama, dan memiliki densitas energi yang tinggi. Kekurangan *combustor* pada *thermoelectric micropower generator* yaitu *combustor*-nya menghasilkan temperatur hasil pembakaran tidak lebih dari 250 °C yang tidak sesuai untuk standar *combustor* pada umumnya. Akan tetapi, pembakarannya sangat cocok diterapkan pada modul *thermoelectric* yang membutuhkan temperatur tidak lebih dari 250 °C.

Menurut Maruta et al. (2011) *micro combustion* merupakan proses pembakaran pada *combustor* yang memiliki karakteristik dimensi yang mendekati *quenching distance* atau jarak minimal nyala api bisa merambat didalam ruang bakar. *Combustor* yang dimensinya mendekati *quenching distance* disebut dengan *micro combustor* dan terbagi menjadi dua jenis menurut *physical length scale combustor* yang menyatakan panjang *combustor*, yaitu *meso-scale combustor* yang memiliki *length scale combustor* lebih dari 1 mm dan *micro-scale combustor* yang memiliki *length scale combustor* kurang dari 1 mm. Bentuk

combustor terbagi menjadi bermacam tipe, yaitu *disk-type*, *tube-type*, *swiss-roll*, dan *rectangular slot*.

Menurut Katsuyoshi et al. (2009) *combustor* pada umumnya memiliki bentuk yaitu *disk-type* dan *tube-type*. *Disk-type* memiliki kelebihan yaitu, efisiensi termal yang lebih baik dari tipe lain dan memiliki permukaan yang datar sehingga mudah digunakan untuk penerapan modul *thermoelectric*. Sedangkan untuk *tube-type* memiliki kelebihan yaitu, kestabilan nyala apinya sangat baik akan tetapi waktu tinggal reaktan sangat singkat dan penerapan untuk modul *thermoelectric* pada bentuk *combustor* ini akan sulit karena tidak memiliki permukaan yang datar.

Kekurangan pada *meso-scale combustor* yaitu, memiliki dimensi *combustor* yang relatif lebih kecil dari *combustor* pada umumnya dimana *surface-to-volume ratio*-nya diperkecil yang menyebabkan *heat loss*-nya pun meningkat dan waktu tinggal reaktan didalam *combustor* menjadi singkat. *Heat loss* yang meningkat menyebabkan ketidakstabilan nyala api sehingga terjadinya nyala api pada ruang bakar sangat sulit. Dan waktu tinggal reaktan di dalam *combustor* yang singkat menyebabkan pembakaran menjadi tidak sempurna. Akan tetapi, konsentrasi gas buang CO yang dihasilkan akan semakin kecil dengan mengurangi *surface-to-volume ratio combustor*.

Menurut Febrianto et al. (2015) dengan menggunakan *swirling flow* yang memiliki keunggulan yaitu, waktu tinggal reaktan bisa menjadi lebih lama sehingga pembakaran bisa menjadi lebih sempurna, temperatur dinding *combustor* juga akan meningkat, nyala api yang dihasilkan lebih stabil dan terdistribusi merata pada *combustor*.

Menurut Reddy et al. (2017) semakin banyak jumlah saluran masuk pada *circular disk combustor* dengan sisi *inlet* arah *tangential* yang membuat alirannya berputar maka kecepatan reaktan yang dihasilkan semakin menurun dan distribusi reaktan ke dalam *combustor* semakin baik yang akan meningkatkan waktu tinggal reaktan didalam *combustor* menjadi semakin lama, sehingga pembakaran akan semakin stabil dengan distribusi api yang merata namun temperatur dinding *combustor* akan semakin kecil.

Pada uraian diatas diketahui pembakaran sempurna dan tidak sempurna pada *meso-scale combustor* dipengaruhi oleh waktu tinggal reaktan yang bergantung pada kecepatan reaktan yang dihasilkan dan dapat berubah pada *combustor* dengan jumlah saluran masuk yang berbeda. Dan untuk bentuk *rectangular disk-type*, dimana pada bentuk ini memiliki efisiensi termal yang baik dan dapat diterapkan pada modul *thermoelectric* yang juga berbentuk *rectangular*. Maka dari itu, pada penelitian ini akan menguji tentang pengaruh jumlah saluran masuk terhadap karakteristik pembakaran yang meliputi, batas kestabilan

nyala api, visualisasi nyala api, dan temperatur dinding *combustor* dengan jenis pembakaran *premixed* berbahan bakar butana (C_4H_{10}) yang terjadi pada *meso-scale combustor* berbentuk *rectangular disk-type*.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh jumlah dan arah saluran masuk terhadap batas kestabilan nyala api, visualisasi nyala api, dan temperatur dinding *combustor* pada *rectangular disk combustor* menggunakan bahan bakar butana (C_4H_{10}).

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini terarah, maka batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Komposisi udara bebas diasumsikan terdiri atas 79% nitrogen (N_2) + 21% oksigen (O_2), dan dianggap tidak berubah.
2. Pengambilan data dilakukan pada temperatur 27 °C - 30 °C, dan propertis udara dianggap tidak berubah dimana pengaruh lingkungan terhadap pembakaran pada *combustor* dianggap sama.
3. Bahan bakar yang digunakan diasumsikan terdiri dari 100% butana murni (C_4H_{10}).
4. Proses pembakaran terjadi dalam keadaan *steady*.
5. Kecepatan reaktan di tiap saluran masuk dianggap sama dan *steady*.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana pengaruh jumlah dan arah saluran masuk terhadap batas kestabilan nyala api, visualisasi nyala api, dan temperatur dinding *combustor* pada *rectangular disk combustor* menggunakan bahan bakar butana (C_4H_{10}).

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mahasiswa dapat mengetahui, memahami dan menganalisis pengaruh jumlah dan arah saluran masuk pada *rectangular disk combustor* terhadap karakteristik pembakaran yang meliputi, batas kestabilan nyala api, visualisasi nyala api, dan temperatur dinding *combustor*.

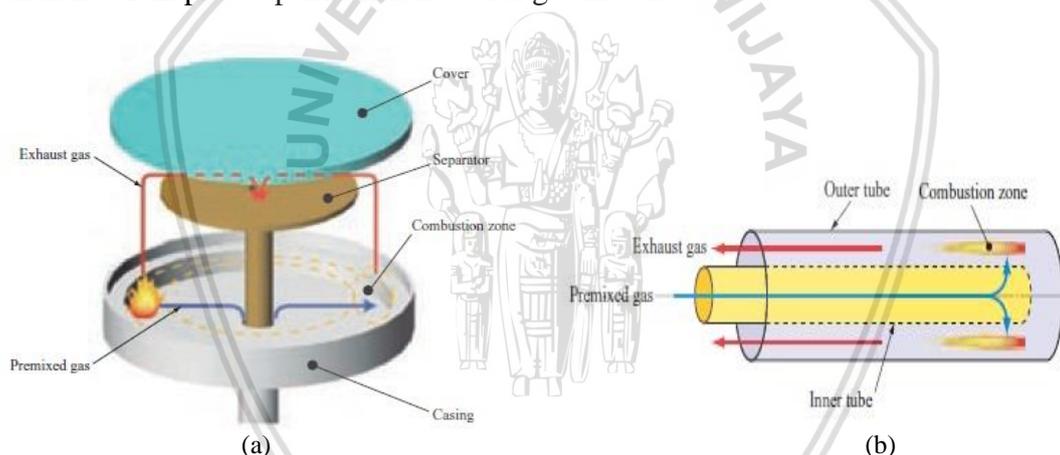
2. Alat *rectangular disk combustor* pada penelitian ini kedepannya dapat diterapkan pada *micropower generator* menggunakan modul *thermoelectric* sebagai alat pembangkit energi listrik berskala mikro.
3. Hasil penelitian ini bisa memberi pengetahuan baru kepada masyarakat khususnya di kalangan pendidikan sebagai referensi untuk dikembangkan pada penelitian selanjutnya.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

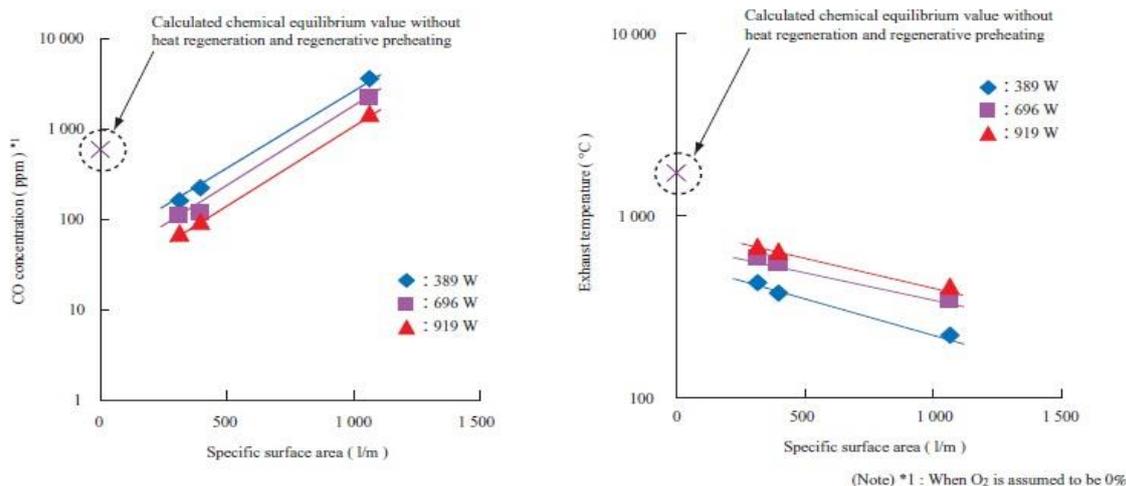
2.1 Penelitian Sebelumnya

Katsuyoshi (2009) melakukan penelitian tentang dua bentuk *micro-combustor*, yaitu *disk-type* dan *tube-type combustor*. *Disk-type micro-combustor* terdiri dari tiga bagian, yaitu *casing*, *separator* atau pemisah dan *water tank* sebagai penutup/*cover*-nya, yang divariasikan adalah jarak antara penutup dan separator untuk melihat *heat loss* yang terjadi dan konsentrasi gas buang CO. Sedangkan *tube-type combustor* terdiri dari dua bagian dalam dan luar yaitu *inner tube* dan *outer tube*, yang divariasikan adalah diameter luar *outer tube* yang diteliti didalam air. Dilakukannya penelitian didalam air guna mengetahui *heat loss* yang terjadi selama proses pembakaran melalui *outer tube*, dan bahan bakar yang digunakan dalam proses pembakaran adalah gas metana.



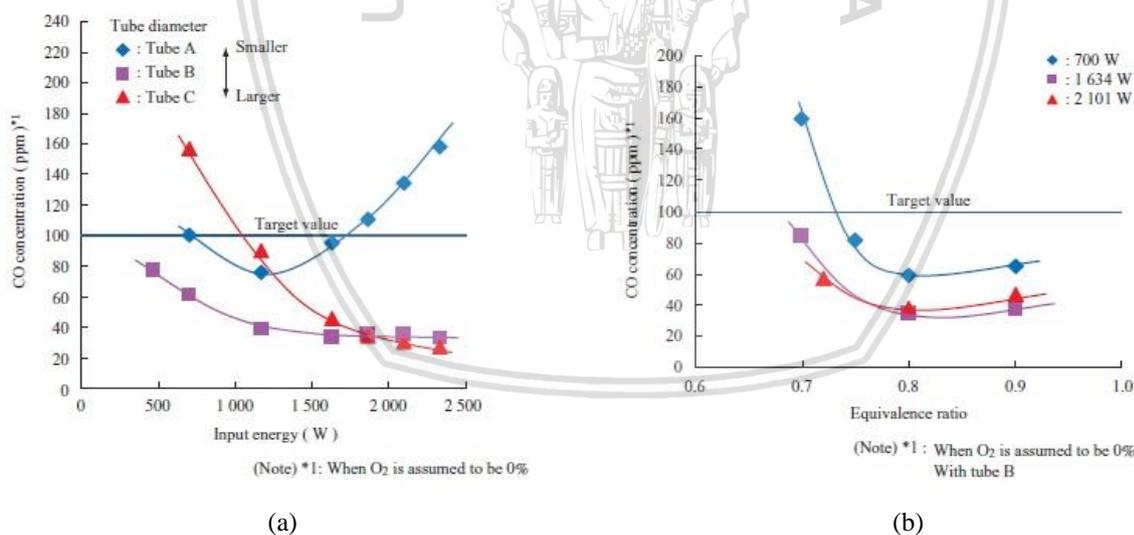
Gambar 2.1 (a) *Disk-type combustor* dan (b) *Tube-type combustor*
Sumber: Katsuyoshi (2009)

Penelitian pada *disk-type combustor* dihasilkan konsentrasi gas buang CO yang dapat berkurang dengan mengurangi *surface-to-volume ratio* akan tetapi meningkatkan temperatur gas buang yang menyebabkan banyaknya panas yang terbuang atau *heat loss* meningkat seperti terlihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Efek *specific area* terhadap konsentrasi gas buang CO dan temperatur gas buang pada *disk-type*
 Sumber: Katsuyoshi (2009)

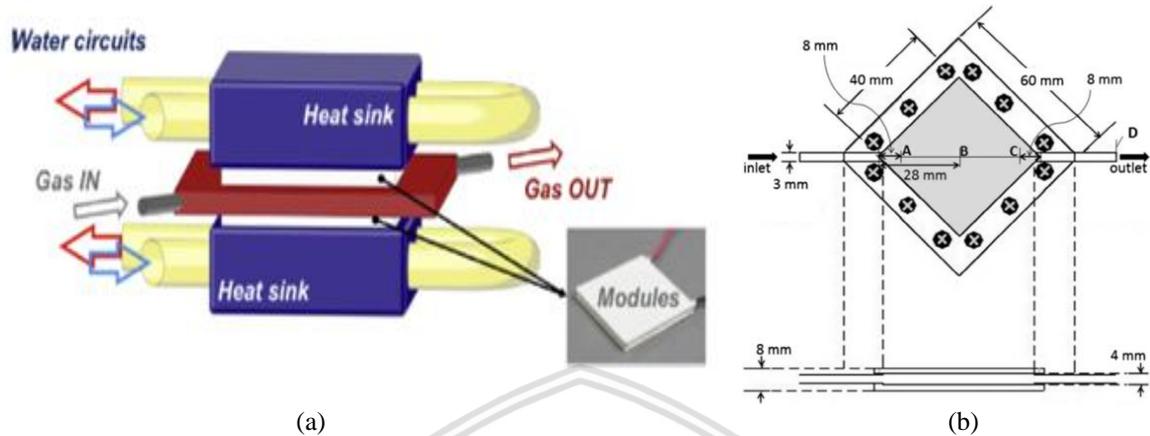
Sedangkan pada *tube-type combustor* dihasilkan konsentrasi gas buang CO yang dihasilkan paling sedikit adalah pada *outer tube* B dengan rasio ekuivalen $\phi = 0,8$ yang bisa dilihat pada Gambar 2.3. Konsentrasi gas buang CO yang dihasilkan sangat tergantung pada jarak antara *outer tube* dan *inner tube*.



Gambar 2.3 (a) Efek diameter *outer tube* terhadap konsentrasi gas buang CO dan (b) efek rasio ekuivalen terhadap konsentrasi gas buang CO pada *tube-type*
 Sumber: Katsuyoshi (2009)

Merotto (2016) melakukan penelitian tentang penggunaan dua modul *thermoelectric* yang mengapit permukaan *meso-scale combustor* dibagian sisi *hot side* dan pada sisi lain tiap modul diapit dua *water-cooled heat sink* dibagian sisi *cold side* dimana perbedaan temperatur yang dihasilkan akan menghasilkan energi listrik. *Meso-scale combustor*-nya berbentuk *rectangular* dan datar sehingga mudah diapit dengan modul *thermoelectric* dan

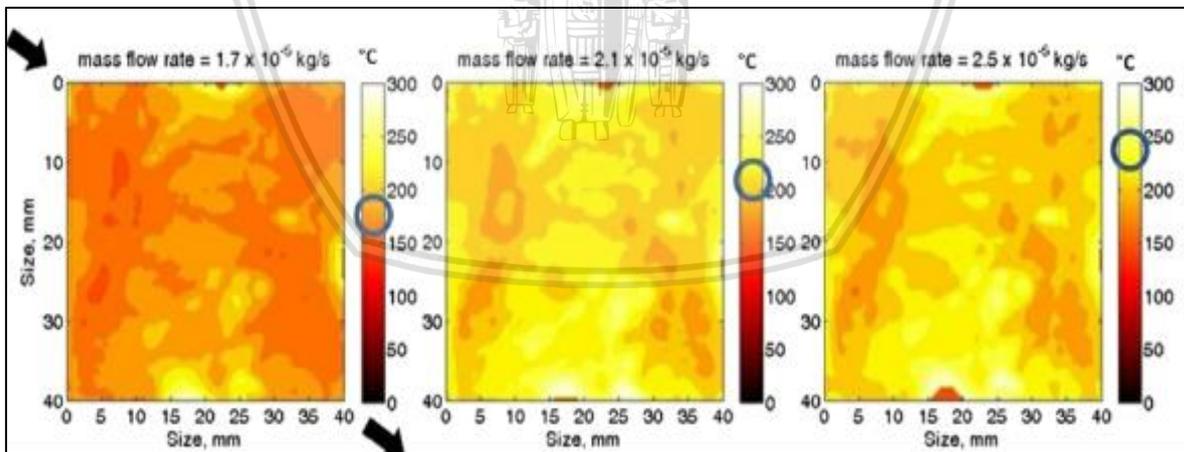
hanya memiliki satu saluran masuk dan satu saluran keluar yang searah seperti pada Gambar 2.4. Bahan bakar yang digunakan adalah propana, yang divariasikan adalah *mass flow rate* dan rasio ekuivalen.



Gambar 2.4 (a) Skema *thermoelectric micropower generator* dengan *meso-scale combustor* yang diapit dua modul *thermoelectric* (b) dimensi *rectangular meso-scale combustor*

Sumber: Merotto (2016)

Hasil penelitian pada *combustion stability limit* paling rendah terjadi pada rasio ekuivalen $\phi = 0,8$ untuk *mass flow rate* = $2,5 \times 10^{-5}$ kg/s. Pada *mass flow rate* = $2,5 \times 10^{-5}$ kg/s juga menghasilkan temperatur rata-rata paling tinggi pada *combustor* yang bisa dilihat pada Gambar 2.5.



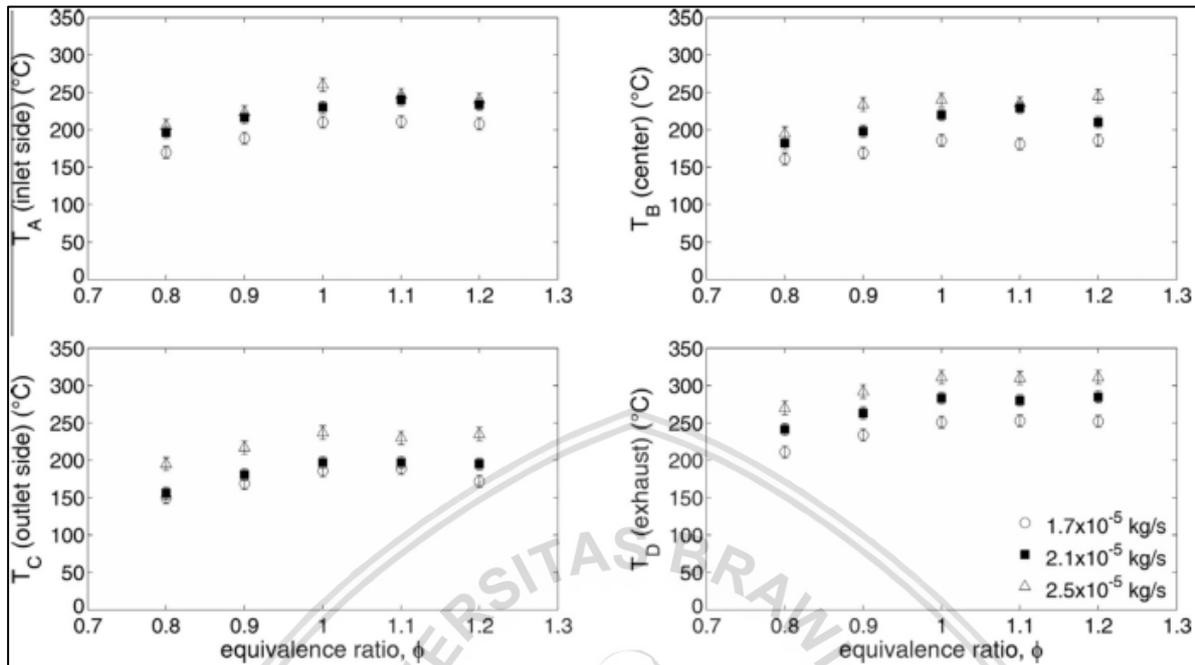
Gambar 2.5 Temperatur rata-rata pada *combustor* dengan variasi *mass flow rate*

Sumber: Merotto (2016)

Temperatur dinding *combustor* akan meningkat sampai pada rasio ekuivalen $\phi = 1$ kemudian mulai konstan seiring meningkatnya rasio ekuivalen dan kondisinya sama pada temperatur lainnya pada tiap lokasi. Temperatur rata-rata meningkat seiring meningkatnya *mass flow rate*. Kemudian pada temperatur gas buang menghasilkan temperatur diatas 300



°C yang secara keseluruhan temperaturnya lebih tinggi daripada temperatur dinding *combustor* seperti pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Perbandingan temperatur di tiap lokasi terhadap rasio ekuivalen dengan variasi *mass flow rate*

Sumber: Merotto (2016)

2.2 Micropower Generator Dan Meso/Micro-scale Combustor

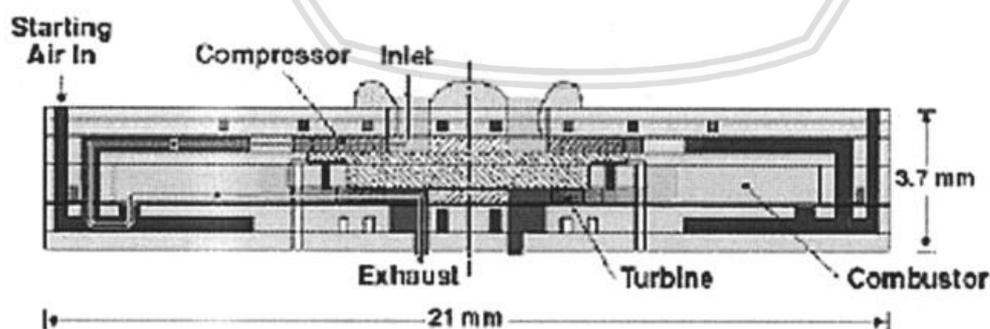
Micropower generator adalah alat pembangkit listrik berskala mikro yang memiliki komponen berupa *combustor* yang menghasilkan energi panas dan alat pengkonversi energi. Prinsip kerja *micropower generator* yaitu, *combustor* yang digunakan menghasilkan *micro combustion* yang mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi panas yang kemudian akan dikonversikan menjadi energi listrik menggunakan alat pengkonversi energi. *Micro combustion* adalah proses pembakaran pada *combustor* yang memiliki karakteristik dimensi yang mendekati *quenching distance* atau jarak minimal nyala api bisa merambat didalam ruang bakar. *Combustor* yang dimensinya mendekati *quenching distance* disebut dengan *micro combustor*. *Micro combustor* dibagi menjadi dua berdasarkan *physical length scale combustor* yang menyatakan panjang *combustor*, yaitu *meso-scale combustor* yang memiliki *length scale combustor* lebih dari 1 mm dan *micro-scale combustor* yang memiliki *length scale combustor* kurang dari 1 mm (Maruta, 2011).

Combustor pada umumnya memiliki bentuk yaitu *disk-type* dan *tube-type*. *Disk-type* memiliki kelebihan yaitu, efisiensi termal yang lebih baik dari tipe lain dan memiliki permukaan yang datar dan dimensi yang luas sehingga mudah digunakan untuk penerapan modul *thermoelectric*. Sedangkan untuk *tube-type* memiliki kelebihan yaitu, kestabilan

nyala apinya sangat baik akan tetapi waktu tinggal reaktan sangat singkat dan penerapan untuk modul *thermoelectric* pada bentuk *combustor* ini akan sulit karena tidak memiliki permukaan yang datar (Katsuyoshi, 2009).

Combustor pada *thermoelectric micropower generator* memiliki kelebihan dibandingkan dengan *fuel cell* dan sistem pembakaran jenis lainnya yaitu alatnya cocok untuk sistem *portable* yang memiliki desain sederhana dengan menggunakan sumber energi yang sedikit atau lebih hemat, lebih tahan lama, dan memiliki densitas energi yang tinggi. Kekurangan *combustor* pada *thermoelectric micropower generator* yaitu *combustor*-nya menghasilkan temperatur hasil pembakaran tidak lebih dari 250 °C yang tidak sesuai untuk standar *combustor* pada umumnya. Akan tetapi, pembakarannya sangat cocok diterapkan pada modul *thermoelectric* yang membutuhkan temperatur tidak lebih dari 250 °C (Merotto, 2016).

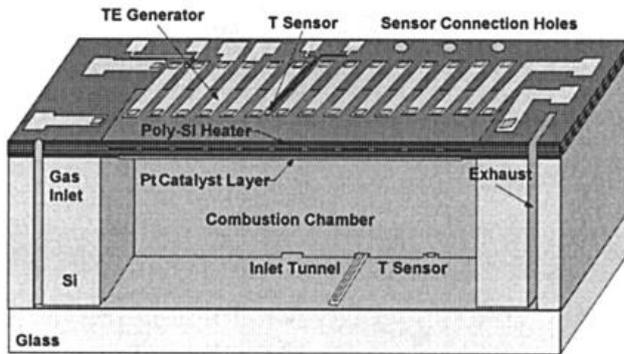
Micropower generator dibagi menjadi dua menurut alat pengkonversi energinya yaitu, *Micropower generator* yang menggunakan siklus daya konvensional, seperti pada turbin gas skala mikro dengan prinsip kerja sama dengan turbin gas, yang menghasilkan energi panas dari micro combustion untuk memutar turbin berskala mikro dan *Micropower generator* yang menggunakan modul pengkonversi energi *thermophotovoltaic/thermoelectric* dari energi panas/cahaya menjadi energi listrik. *Thermophotovoltaic/thermoelectric micropower generator* memiliki kesamaan dalam sumber energinya yaitu energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran dan memiliki perbedaan dalam hal prinsip kerja juga komponen didalamnya untuk mengkonversi energi (Fernandez-Pello, 2002).



Gambar 2.7 *Micropower generator* yang menggunakan prinsip siklus daya konvensional
Sumber: Fernandez-Pello (2002)

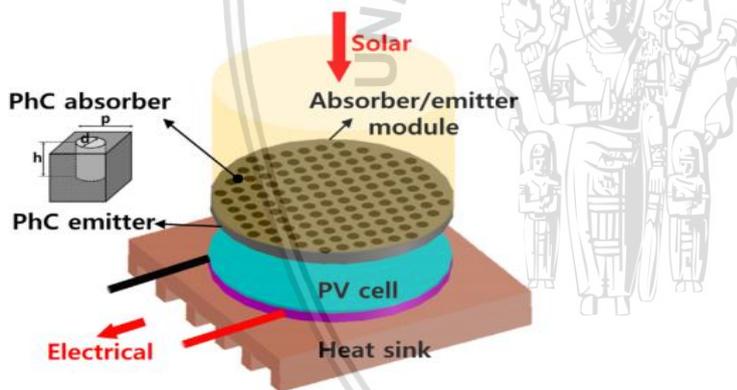
Thermoelectric micropower generator memiliki prinsip kerja dari efek *seebeck* yang ditemukan oleh Thomas Johann Seebeck pada tahun 1821 yaitu jika terdapat dua logam yang berbeda disambungkan salah satu ujungnya pada suatu rangkaian tertutup, kemudian

jika terjadi perbedaan temperatur diantara kedua sambungan maka akan menghasilkan energi listrik (Djafar, 2010).



Gambar 2.8 Thermoelectric micropower generator
Sumber: Fernandez-Pello (2002)

Thermophotovoltaic micropower generator memiliki prinsip kerja yaitu, mengkonversi energi panas dari hasil pembakaran menjadi energi foton cahaya menggunakan modul *absorber* atau *emitter* yang kemudian dikonversikan menjadi energi listrik menggunakan sel *photovoltaic* (Youngsuk Nam, 2014).

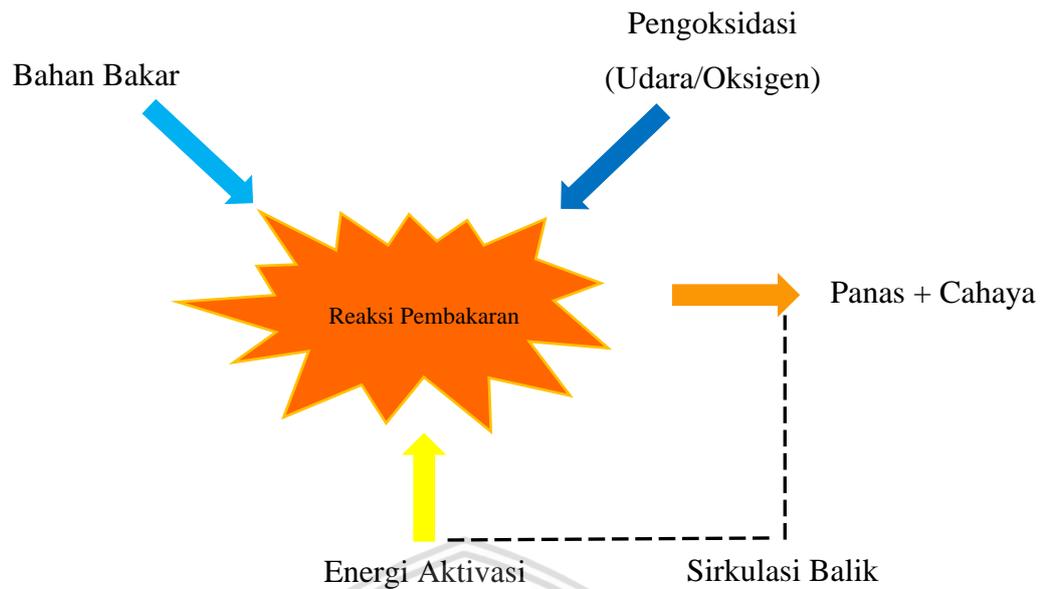


Gambar 2.9 Thermophotovoltaic micropower generator
Sumber: Youngsuk Nam (2014)

2.3 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

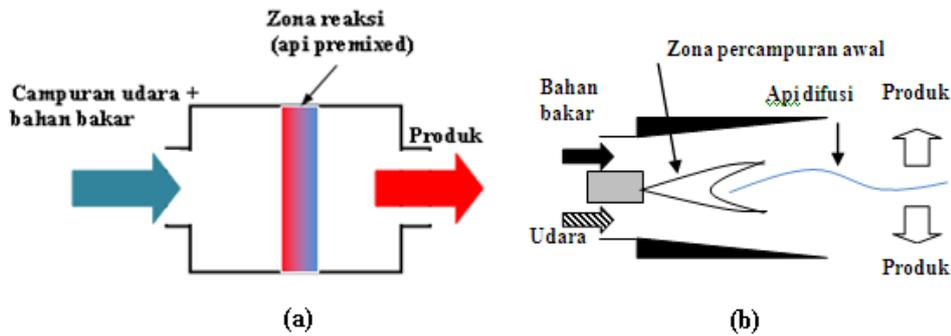


Gambar 2.10 Ilustrasi proses pembakaran
Sumber: Wardana (2008)

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 dan dapat diperoleh melalui pemantik. 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 (Wardana, 2008).

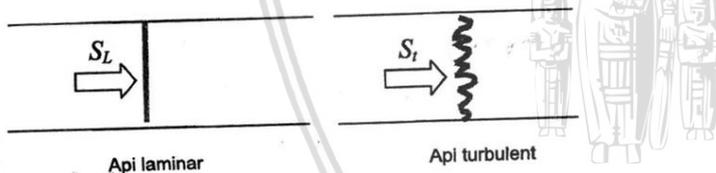
2.3.1 Klasifikasi Pembakaran Berdasarkan Cara Reaktan Terbakar Pada Zona Reaksi

Pembakaran diklasifikasikan menjadi dua berdasarkan cara reaktan terbakar di dalam zona reaksi yaitu, pembakaran *premixed* dan pembakaran *non-premixed* atau difusi. Pembakaran *premixed* adalah proses pembakaran dimana reaktan (bahan bakar dan udara) telah bercampur terlebih dahulu secara mekanik biasanya menggunakan alat berupa *mixing chamber* sebelum terbakar. Sedangkan pembakaran *non-premixed* adalah proses pembakaran dimana reaktan (bahan bakar dan udara) tidak bercampur sebelum terbakar (Wardana, 2008) seperti terlihat pada Gambar 2.11 berikut ini.



Gambar 2.11 (a) Pembakaran *premixed* dan (b) Pembakaran *non-premixed* atau difusi
Sumber: Wardana (2008)

Kelebihan pembakaran *premixed* yaitu dapat meningkatkan efisiensi pembakaran karena jumlah campuran bahan bakar dan udara dapat kita sesuaikan terlebih dahulu sehingga kadar oksigen pada udara dan bahan bakar berada pada kadar dimana dapat terikat seluruh campurannya sehingga bahan bakar dapat terbakar seluruhnya atau bisa disebut kondisi stokiometrik. Api *premixed* dibagi menjadi dua yaitu api *premixed* laminar dan api *premixed* turbulen. Kelebihan api *premixed* turbulen yaitu dapat meningkatkan rambatan api dimana kecepatan nyala apinya tidak tergantung pada properti dari gas tetapi tergantung pada jenis aliran, intensitas turbulensi, dan V_{rms} yang dapat meningkat sampai 30 kali lebih besar daripada kecepatan nyala api laminar (Wardana, 2008).



Gambar 2.12 Api *premixed* laminar dan api *premixed* turbulent
Sumber: Wardana (2008)

2.3.2 Reaksi Kimia Pada Proses 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 (Wardana, 2008).

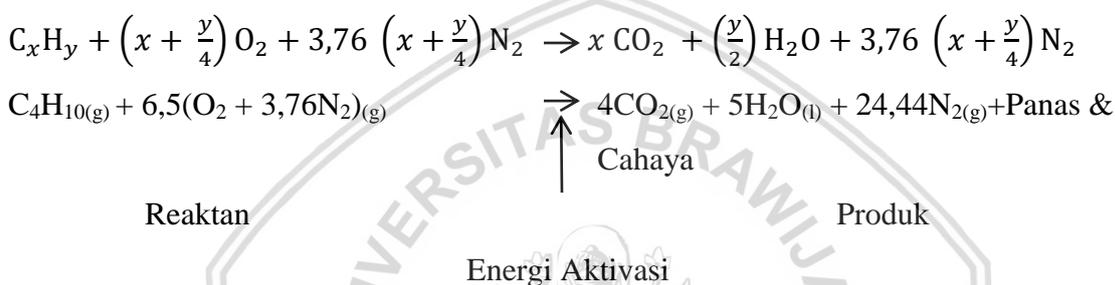
Pembakaran stokiometrik adalah pembakaran dimana semua atom dari pengoksidasi bereaksi secara kimia untuk menjadi berbagai produk hasil pembakaran. Pengoksidasi yang digunakan adalah udara yang dianggap terdiri dari 21% O_2 dan 79% N_2 seperti pada Tabel 2.1.

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)

Komposisi udara pada 1 mol O₂ juga terkandung 3,76 mol N₂, maka persamaan reaksi kimia untuk pembakaran stoikiometri antara bahan bakar butana dengan udara dimana C_xH_y pada butana (C₄H₁₀) adalah $x = 4$ dan $y = 10$ dengan memasukkannya pada persamaan reaksi kimia proses pembakaran dengan kesetimbangan massa dan energi berikut ini.



2.3.3 Rasio Udara Dan Bahan Bakar (AFR)

Rasio udara dan bahan bakar (*air-to-fuel ratio* atau *AFR*) adalah perbandingan massa udara dan bahan bakar atau juga perbandingan mol udara dan bahan bakar seperti pada Persamaan (2-1) berikut.

$$(AFR)_{Stoik} = \left(\frac{N_{Udara}}{N_{Bahan\ Bakar}}\right)_{Stoik} \text{ atau } (AFR)_{Stoik} = \left(\frac{M_{Udara}}{M_{Bahan\ Bakar}}\right)_{Stoik} \dots(2-1)$$

Sumber: Wardana (2008)

dengan :

$(AFR)_{Stoik}$: Rasio udara dan bahan bakar secara 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 (2-1) dan Tabel 2.2 sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \bullet (AFR)_{Stoik} &= \left(\frac{N_{Udara}}{N_{Bahan Bakar}} \right)_{Stoik} \\
 &= \left(\frac{6,5 (1 + 3,76)}{1} \right)_{Stoik} \\
 &= \left(\frac{6,5 (4,76)}{1} \right)_{Stoik} \\
 &= 30,94 \left(\frac{\text{mol}_{udara}}{\text{mol}_{bahan bakar}} \right)
 \end{aligned}$$

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)

$$\begin{aligned}
 \bullet (AFR)_{Stoik} &= \left(\frac{M_{Udara}}{M_{Bahan Bakar}} \right)_{Stoik} \\
 &= \left(\frac{6,5 (2 \times 16 + (3,76 \times 14 \times 2))}{4 \times 12 + 1 \times 10} \right)_{Stoik} \\
 &= \left(\frac{6,5 (32 + 105,28)}{58} \right)_{Stoik} \\
 &= \left(\frac{892,32}{58} \right)_{Stoik} \\
 &= 15,38 \left(\frac{\text{kg}_{udara}}{\text{kg}_{bahan bakar}} \right)
 \end{aligned}$$

Dan untuk mengetahui perbandingan volume antara udara dan bahan bakar adalah dengan perbandingan massa udara dengan massa jenis udara dan massa bahan bakar dengan massa jenis bahan bakar dengan Persamaan (2-2) sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \rho &= \frac{m}{v} \\
 v &= \frac{m}{\rho} \dots \dots \dots (2-2)
 \end{aligned}$$

Sumber: Cengel (2006)

dengan :

v : Volume (m³ atau cm³)

m : Massa (kg atau gr)



ρ : Massa jenis (kg/m^3 atau gr/cm^3)

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

$$\bullet \quad v_{\text{udara}} (\text{cm}^3) : v_{\text{bahan bakar}} (\text{cm}^3)$$

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

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

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

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

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

2.3.4 Rasio Ekuivalen (ϕ)

Rasio ekuivalen atau *equivalence ratio* (ϕ) adalah perbandingan antara *AFR stoikiometri* dengan *AFR aktual* dengan Persamaan (2-3) sebagai berikut.

$$\phi = \frac{(AFR)_{\text{stoikiometri}}}{(AFR)_{\text{aktual}}} \dots \dots \dots (2-3)$$

Sumber: Wardana (2008)

dengan :

ϕ : Rasio ekuivalen atau *equivalence ratio*

$(AFR)_{\text{stoikiometri}}$: Rasio perbandingan udara dan bahan bakar secara 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 sebagai berikut.

- $\phi > 1$ 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.

2.3.5 Batas Kestabilan Nyala Api (*Flame Stability Limits*) Dan Sifat Nyala Api

Batas kestabilan nyala api atau *flame stability limits* adalah suatu batasan komposisi campuran udara dan bahan bakar daerah pada bidang $V_{reaktan} - \phi$ dimana pembakaran yang dihasilkan memiliki nyala api yang stabil didalam *combustor* yaitu, batas minimum dan maksimum.

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

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

- *Flashback* ($S_L > V_u$) dimana kecepatan pembakaran (S_L) lebih besar dari kecepatan reaktan (V_u) yang menyebabkan nyala api merambat kembali menuju sumber bahan bakar yaitu menuju ke tabung bahan bakar.
- Nyala api stabil ($S_L = V_u$) dimana kecepatan reaktan (V_u) dan kecepatan pembakaran (S_L) memiliki nilai yang sama.
- *Blow-off* ($S_L < V_u$) dimana kecepatan reaktan (V_u) lebih besar dari kecepatan pembakaran (S_L) yang menyebabkan nyala api akan langsung padam.
- *Lift-off* dimana nyala api stabil pada jarak tertentu jauh dari mulut *combustor* dan tidak menempel permukaan mulut *combustor* atau bisa dikatakan nyala api terangkat.

2.3.6 Kecepatan Reaktan ($V_{reaktan}$) Pada Saluran Masuk Dengan Variasi Jumlah Saluran

Kecepatan reaktan pada saluran masuk dapat dirumuskan dengan Persamaan (2-4) berikut ini.

$$V_{reaktan} = \frac{Q_{reaktan}}{A_{inlet}}$$

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

Sumber: Cengel (2006)

dengan :

$V_{reaktan}$: Kecepatan reaktan (cm/s)

$Q_{reaktan}$: Debit reaktan (ml/min)

A_{inlet} : Luas penampang pada saluran masuk (mm²)

$\Sigma Inlet$: Jumlah saluran masuk

Semakin meningkatnya jumlah saluran masuk maka kecepatan reaktan yang dihasilkan akan menurun. Hal ini dikarenakan kecepatan reaktan berbanding terbalik dengan jumlah saluran masuk. Semakin meningkatnya jumlah saluran masuk maka nilai dari luas penampang saluran masuk akan semakin besar begitu juga sebaliknya.

2.4 Bahan Bakar Dan Klasifikasinya

Bahan bakar merupakan sumber energi dalam reaksi pembakaran berupa energi kimia. Kandungan utama dari bahan bakar adalah karbon (C) dan hidrogen (H), sedangkan kandungan minoritas bahan bakar adalah nitrogen (N), sulfur (S), oksigen (O), karbondioksida (CO₂) dan air (H₂O) (Wardana, 2008).

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

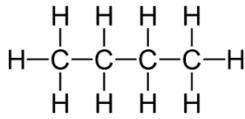
Bahan bakar berdasarkan masa penggunaannya dibagi menjadi dua yaitu, bahan bakar terbarukan dan bahan bakar tak terbarukan. Bahan bakar tak terbarukan adalah seperti bahan bakar fosil yang sewaktu-waktu bisa habis. Sedangkan bahan bakar terbarukan adalah bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar fosil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

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

2.4.1 Butana

Butana adalah bahan bakar jenis senyawa hidrokarbon alkana dengan rumus kimia C₄H₁₀ 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 2.13 berikut.



Gambar 2.13 Struktur ikatan molekul butana (C_4H_{10})

Sumber: Wardana (2008)

Butana memiliki sifat yaitu, tidak bewarna, mudah terbakar, dan mudah untuk mencair pada kondisi temperatur ruangan juga pada tekanan yang rendah, sehingga butana aman dan mudah untuk disimpan didalam tabung yang kecil. 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* sebagai berikut.

- Rumus kimia : C_4H_{10}
- Massa molar : 58,12 g/mol
- Massa jenis (gas) : 2,48 kg/m³ pada (15 °C, 1 atm)
- Suhu swanyala : 405 °C
- Titik lebur : -140 °C pada tekanan 1 atm
- Titik didih : -1 °C pada tekanan 1 atm
- Titik nyala : -60 °C pada tekanan 1 atm
- *Heat of combustion* : 49700 kJ/kg

2.5 Hipotesis

Semakin banyak jumlah saluran masuk maka kecepatan reaktan akan menurun sehingga waktu tinggal reaktan didalam *combustor* akan lebih lama dimana reaktan akan tersebar merata pada *combustor* yang menyebabkan visualisasi nyala api yang dihasilkan didalam *combustor* semakin merata, nyala api akan semakin stabil pada interval rasio ekuivalen yang lebih luas, dan temperatur dinding *combustor* akan semakin meningkat.

BAB III METODE PENELITIAN

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

3.1 Tempat dan Waktu Pelaksanaan

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

3.2 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Variabel Bebas

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

- Variasi jumlah saluran masuk berjumlah 1, 2, dan 4 dengan arah saluran masuk sesuai desain *combustor* pada Gambar 3.1, 3.2, dan 3.3.
- Debit bahan bakar (Q_f) dan debit udara (Q_a) divariasikan pada rasio ekuivalen (ϕ) tertentu dimana proses pembakaran masih bisa terjadi.

2. Variabel Terikat

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

- Batas kestabilan nyala api atau *flame stability limits*
- Visualisasi nyala api
- Temperatur dinding *combustor*

3. Variabel Terkontrol

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

- Material *combustor* menggunakan Tembaga (Cu)
- Ukuran *combustor* berukuran 25 x 25 mm

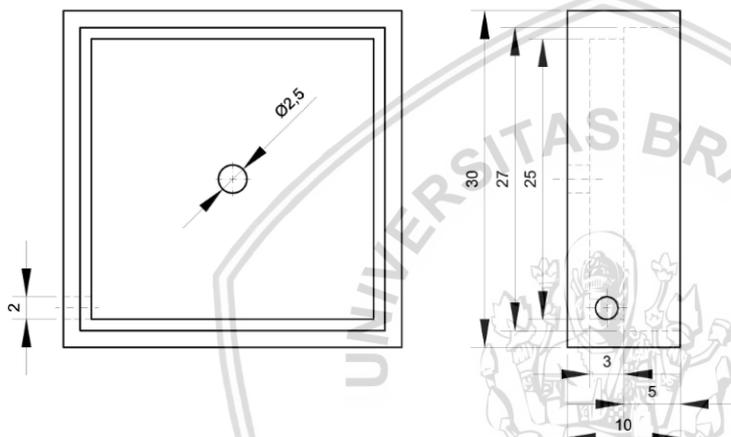
- Tebal *combustor* berukuran 3 mm

3.3 Peralatan Penelitian

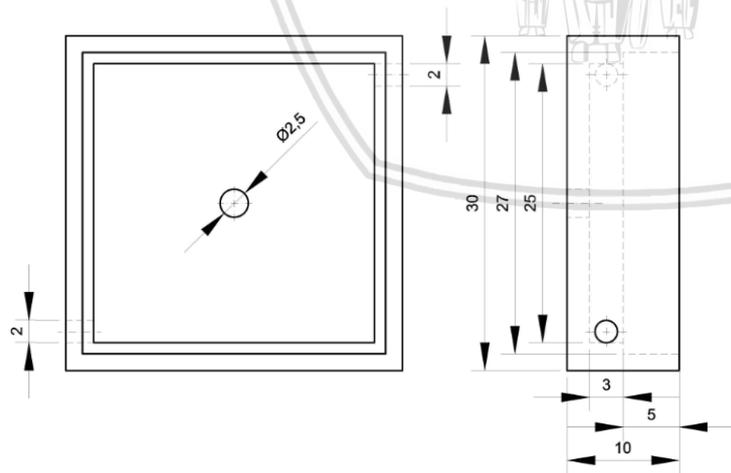
Peralatan penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. *Rectangular Disk Combustor*

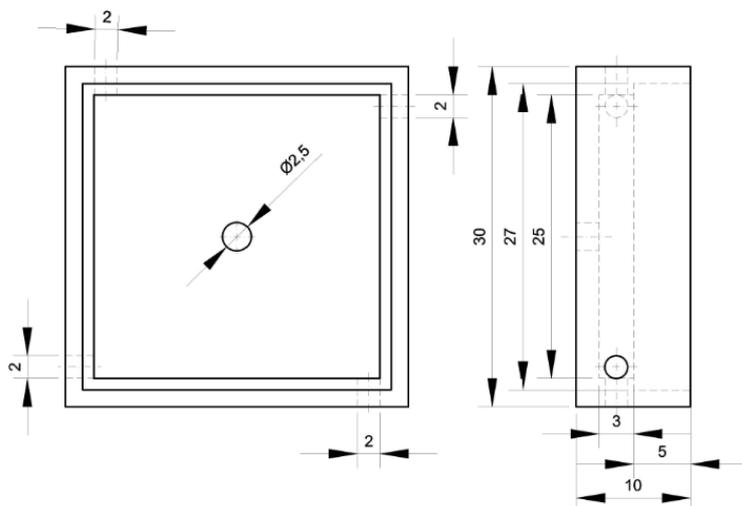
Rectangular disk combustor dimana sebagai alat utama dalam penelitian ini yang akan diamati karakteristik pembakarannya. Penelitian ini menggunakan 3 buah *combustor* dengan jumlah saluran masuk berjumlah 1,2, dan 4, *rectangular disk combustor* berjenis *meso-scale combustor* dengan material yang dipakai adalah tembaga dan dimensi satuannya adalah milimeter.



Gambar 3.1 *Rectangular disk combustor* dengan satu saluran masuk



Gambar 3.2 *Rectangular disk combustor* dengan dua saluran masuk



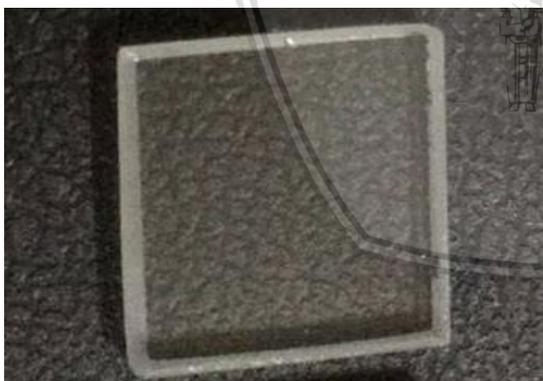
Gambar 3.3 Rectangular disk combustor dengan empat saluran masuk

Spesifikasi material tembaga (Cu):

- Massa jenis : 8,96 g/cm³
- Titik lebur : 1084,62 °C

2. Kaca Tahan Panas Api

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



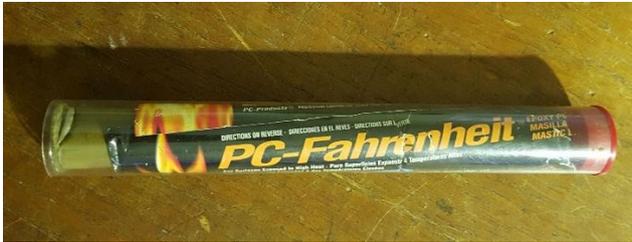
Gambar 3.4 Kaca Tahan Panas Api

Spesifikasi kaca:

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

3. Lem Tahan Panas Api

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



Gambar 3.5 Lem Tahan Panas Api

Spesifikasi lem:

- Merk : *PC-Fahrenheit*
- Berat : 180 gr
- Suhu maksimal : 260 °C

4. Kompresor

Kompresor digunakan untuk menyuplai udara bebas diasumsikan terdiri atas 79% nitrogen (N_2) & 21% oksigen (O_2), dan dianggap tidak berubah.



Gambar 3.6 Kompresor

Spesifikasi kompresor:

- Merk : Lakoni
- Daya : 0,75 HP/0,5 KW
- Tegangan : 220 V/50 Hz
- Tekanan keluar : 8 bar
- Kapasitas tangki : 10 Liter
- *Rated speed* : 2850 rpm
- *Flow* : 120 Liter/min

5. Tabung Bahan Bakar Butana (C_4H_{10})

Tabung bahan bakar butana (C_4H_{10}) digunakan untuk menyimpan butana (C_4H_{10}) sebagai bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini. Bahan bakar yang digunakan diasumsikan mengandung 100% butana (C_4H_{10}).



Gambar 3.7 Tabung bahan bakar butana (C_4H_{10})

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

- Merk : WINN GAS
- Berat bersih : 235 gr

6. Regulator Butana

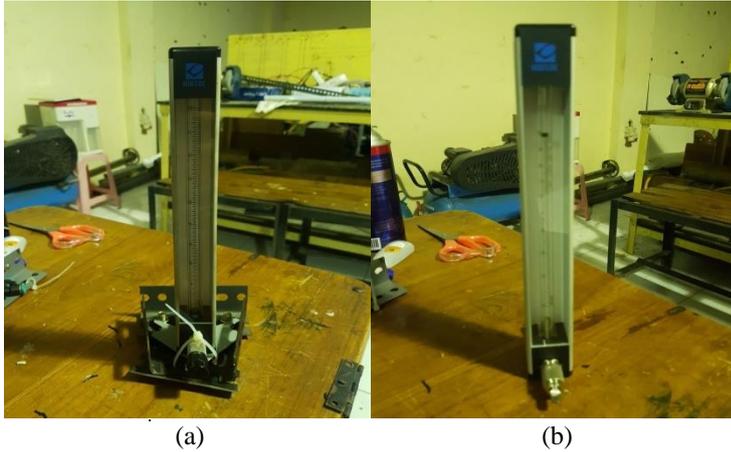
Regulator Butana digunakan sebagai katup dan untuk mengalirkan bahan bakar butana (C_4H_{10}) dari tabung bahan bakar butana (C_4H_{10}) menuju *flowmeter* bahan bakar.



Gambar 3.8 Regulator butana

7. *Flowmeter* Udara dan *Flowmeter* Bahan Bakar

Flowmeter pada penelitian ini digunakan untuk mengukur debit udara dan bahan bakar yang mengalir menuju *combustor*.



(a)

(b)

Gambar 3.9 (a) *Flowmeter* udara dan (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

Spesifikasi *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

8. Y-Connector

Y-Connector berfungsi untuk menyatukan dua saluran dimana mencampur udara dan bahan bakar sebelum masuk ke dalam *rectangular disk combustor*.



Gambar 3.10 Y-Connector

9. T-Connector

T-Connector berfungsi untuk membagi 2 saluran reaktan yang berasal dari Y-Connector.



Gambar 3.11 T-Connector

10. Inlet Connector

Inlet Connector berfungsi sebagai penghubung masuknya reaktan kedalam *rectangular disk combustor*.



Gambar 3.12 Inlet Connector

11. Selang/Pipa Saluran

Selang/pipa saluran berfungsi menghubungkan atau mengalirkan reaktan dari kompresor dan tabung bahan bakar menuju *rectangular disk combustor*.



Gambar 3.13 Selang/pipa saluran

12. Pemantik

Pemantik berfungsi sebagai energi aktivasi sehingga terjadi proses pembakaran di dalam *combustor*. Pemantik ditenagai baterai dihubungkan dengan kabel yang mengalirkan arus listrik dan menghasilkan *spark* yang kemudian akan menyalakan api.



Gambar 3.14 Pemantik

Spesifikasi baterai:

- Merk : ABC
- Tegangan : 1,5 V

13. Kamera

Kamera digunakan untuk mengambil foto data visualisasi nyala api.

14. Thermocouple

Thermocouple adalah sebuah alat sensor suhu yang digunakan untuk mengukur temperatur dinding *combustor* pada *rectangular disk combustor*.

Spesifikasi *thermocouple* :

- Tipe : K-Type
- *Temperature range* : -270 °C – 1320 °C

15. Data Logger

Data logger digunakan untuk menerima data temperatur dinding *rectangular disk combustor* dari *thermocouple*.

Spesifikasi data *logger*:

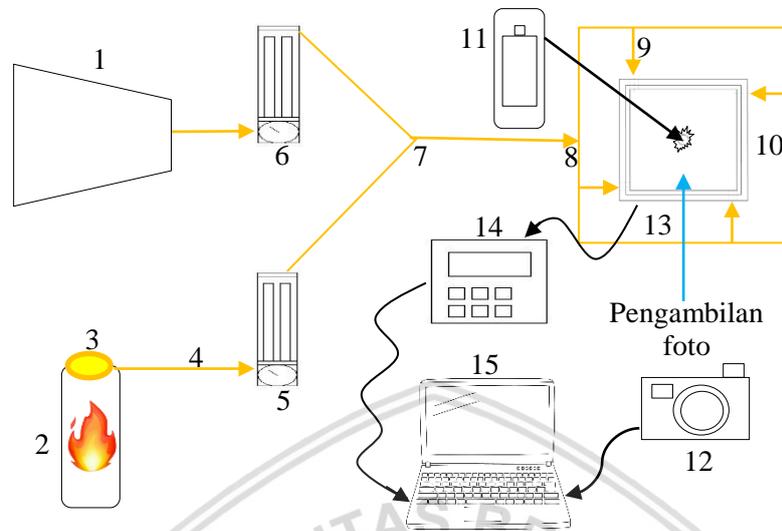
- Merk : Advantech
- *Channels* : 8
- *Input type* : mV, V, mA
- *Input range* : J,K,T,E,R,S, dan B
- *Accuracy* : ±0.1%

16. Laptop

Digunakan untuk menyimpan dan mengolah data hasil penelitian.

3.4 Skema Instalasi Penelitian

Skema instalasi peralatan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.



Keterangan:

- | | |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| 1. Kompresor | 9. <i>Inlet Connector</i> |
| 2. Tabung bahan bakar | 10. <i>Rectangular disk combustor</i> |
| 3. Regulator bahan bakar | 11. Pemantik |
| 4. Selang/pipa saluran | 12. Kamera |
| 5. <i>Flowmeter</i> bahan bakar | 13. <i>Thermocouple</i> |
| 6. <i>Flowmeter</i> udara | 14. <i>Data Logger</i> |
| 7. <i>Y-Connector</i> | 15. Laptop |
| 8. <i>T-Connector</i> | |

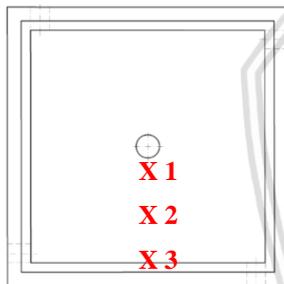
Gambar 3.15 Skema instalasi penelitian

3.5 Metode Pengambilan Data

Metode pengambilan data pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Menyiapkan *rectangular disk combustor* dan memastikan tidak ada kebocoran atau kerusakan.
2. Persiapkan peralatan sesuai dengan skema penelitian dan melakukan kalibrasi *flowmeter*.
3. Melakukan pengambilan data batas kestabilan nyala api/*flame stability limit* sekaligus data visualisasi nyala api menggunakan kamera. Data batas kestabilan nyala api dan visualisasi nyala api didapat dengan metode observasi.
4. Membuka katup regulator bahan bakar yang terpasang pada tabung butana dan katup udara pada kompresor.
5. Mengatur debit bahan bakar butana menggunakan *flowmeter* bahan bakar dan mengatur debit udara menggunakan *flowmeter* udara.

6. Menyalakan api pada *rectangular disk combustor* dengan pemantik dan mengusahakan membuat nyala api bertahan 3 menit atau lebih.
7. Debit bahan bakar butana dan debit udara divariasikan pada rasio ekuivalen tertentu sampai menemukan debit batas minimum dan maksimum.
8. Pengambilan data dilakukan pada campuran debit bahan bakar butana dan udara di mana api masih dapat menyala stabil selama 3 menit atau lebih dan tidak padam.
9. Mencatat nilai-nilai debit udara dan bahan bakar ketika api menyala dengan stabil selama 3 menit atau lebih.
10. Melakukan pengambilan data temperatur dinding *combustor* menggunakan *thermocouple* yang terhubung dengan data *logger* dan laptop, data temperatur berupa data kuantitatif. *Thermocouple* diletakkan pada titik-titik dimana masih berada dalam daerah *flame stability limit* pada dinding *combustor* seperti pada Gambar 3.16 berikut ini.



Keterangan:

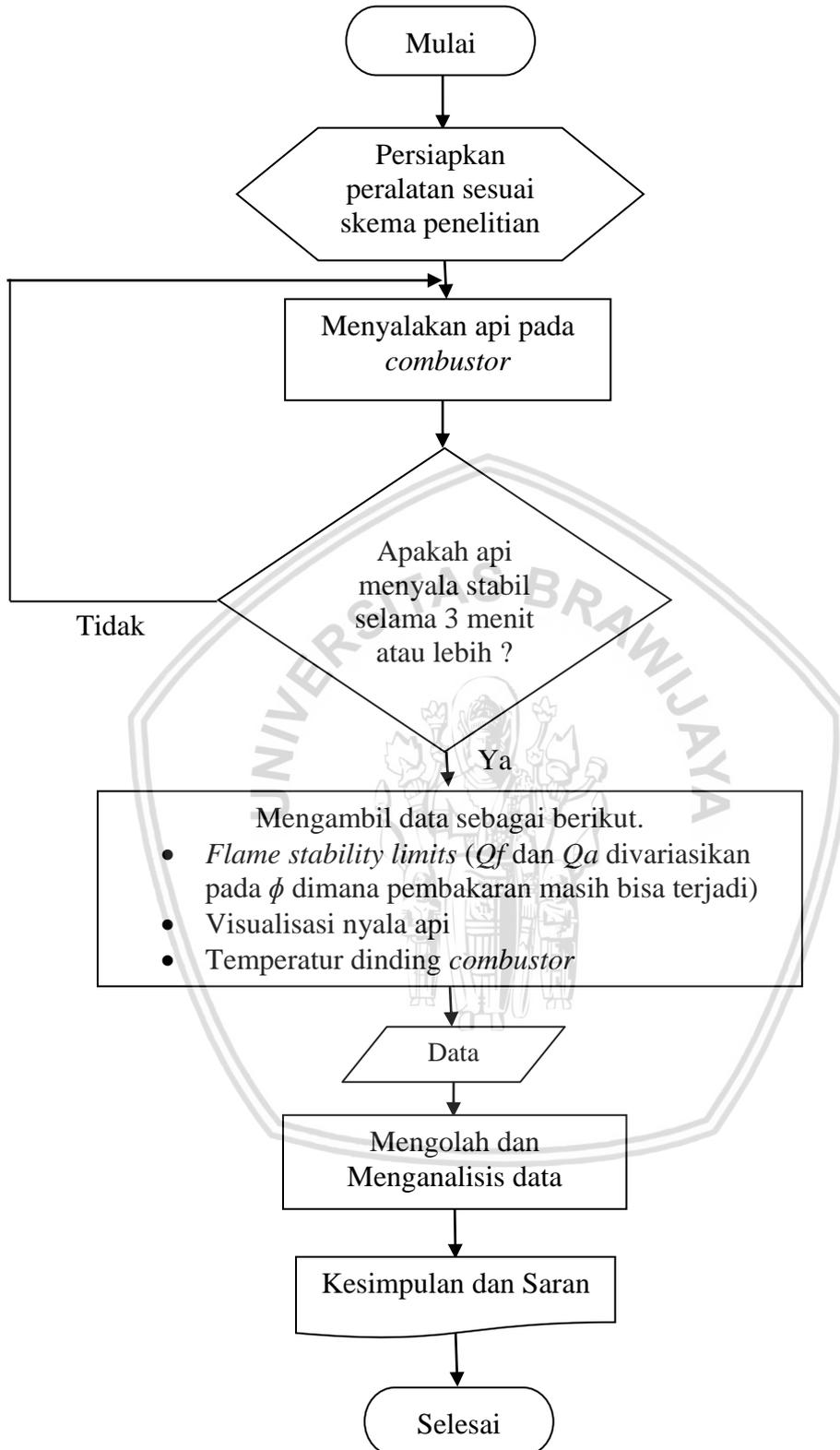
X 1 : Titik 1 dengan jarak 3 mm dari titik pusat *combustor*

X 2 : Titik 2 dengan jarak 6,2 mm dari titik pusat *combustor*

X 3 : Titik 3 dengan jarak 12,5 mm dari titik pusat *combustor*

Gambar 3.16 Titik pengambilan data temperatur dinding *combustor*

3.6 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.17 Diagram alir penelitian



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

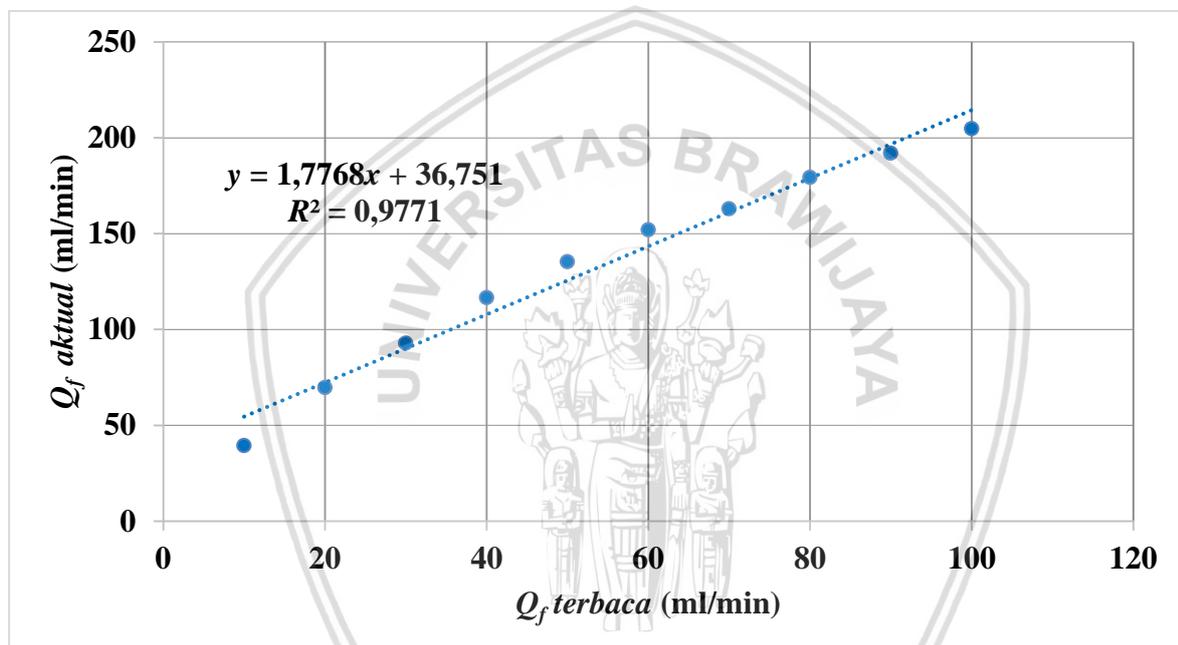
4.1 Kalibrasi Flowmeter

Data hasil penelitian ini didapat dari penelitian dengan metode *experimental research* tentang pengaruh jumlah saluran masuk terhadap karakteristik pembakaran menggunakan pembakaran *premixed* yang terjadi pada *meso-scale combustor* berbentuk *rectangular disk-type* 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*.

Sebelum melakukan pengambilan data, *flowmeter* dikalibrasi terlebih dahulu untuk mengetahui hubungan antara debit yang terbaca pada *flowmeter* dan debit secara aktualnya. Proses kalibrasi *flowmeter* dimulai dengan mengisi air hingga penuh pada bak penampung. Kemudian siapkan gelas ukur lalu isi penuh dengan air dan posisikan terbalik sedikit ditarik keatas permukaan air dimana air masih terisi penuh pada gelas ukur yang berada pada posisi tegak. Alirkan udara/bahan bakar butana (C_4H_{10}) dari kompresor/tabung bahan bakar butana (C_4H_{10}) menggunakan selang menuju *flowmeter* dengan mengatur debit yang terbaca pada *flowmeter*. Selang dari *flowmeter* yang sudah diatur debit yang terbaca dimasukkan pada gelas ukur yang terisi penuh dengan air. Udara/bahan bakar butana (C_4H_{10}) mulai mengalir kedalam gelas ukur dan volume air pada gelas ukur akan terus berkurang dikarenakan udara/bahan bakar butana (C_4H_{10}) 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_f terbaca (ml/min)	Waktu (s)	$V_{gelas\ ukur}$ (ml)	Q_f 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 Grafik kalibrasi *flowmeter* bahan bakar butana (C_4H_{10})

Dari *trendline* pada grafik kalibrasi *flowmeter* bahan bakar butana (C_4H_{10}) dihasilkan Persamaan (4-1) berikut ini.

$$y = 1,7768x + 36,751 \dots \dots \dots (4-1)$$

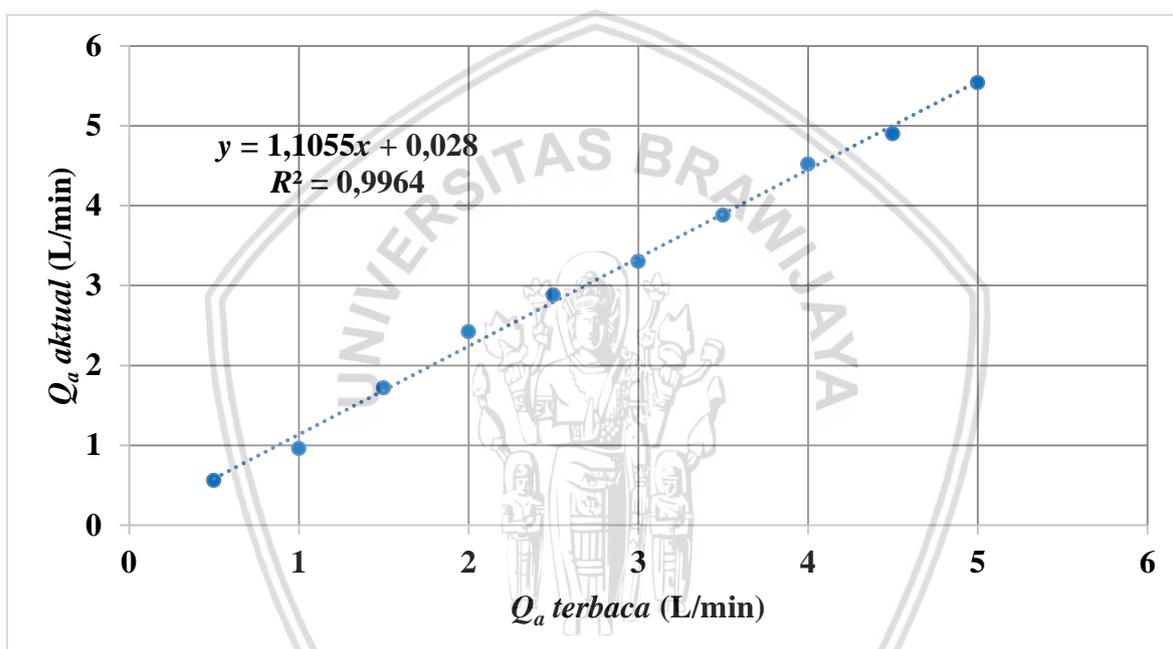
dengan :

y : Q_f aktual (ml/min)

x : Q_f terbaca (ml/min)

Tabel 4.2
Data kalibrasi *flowmeter* udara

Q_a terbaca (L/min)	Waktu (s)	$V_{gelas\ ukur}$ (ml)	Q_a 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 Grafik kalibrasi *flowmeter* udara

Dari *trendline* pada grafik kalibrasi *flowmeter* udara dihasilkan Persamaan (4-2) berikut ini.

$$y = 1,1055x + 0,028 \dots \dots \dots (4-2)$$

dengan :

y : Q_a aktual (L/min)

x : Q_a terbaca (L/min)

4.2 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 maksimum dan minimum 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 nilai rasio ekuivalen (ϕ) dan kecepatan reaktan ($V_{reaktan}$) dapat dijelaskan dengan contoh perhitungan Persamaan (4-3) dan (4-4) pada $\phi = 1$ berikut ini dimana diketahui $(AFR)_{stoikiometri} = 30,94$.

$$\bullet \phi = \frac{(AFR)_{stoikiometri}}{(AFR)_{aktual}} \dots\dots\dots (4-3)$$

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

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

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

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

$$V_{reaktan} = \frac{(72 + 2237) \text{ ml/s}}{\frac{(3,14 \times 0,8^2 \times 4)}{100} \text{ cm}^2}$$

$$V_{reaktan} = 479 \text{ cm/s}$$

Tabel 4.3
Data batas kestabilan nyala api untuk *rectangular disk combustor* dengan satu saluran masuk

Rasio Ekuivalen (ϕ)	$Q_{f \text{ min}}$ (ml/min)	$Q_{a \text{ min}}$ (L/min)	$Q_{f \text{ maks}}$ (ml/min)	$Q_{a \text{ maks}}$ (L/min)	$V_{reaktan \text{ min}}$ (cm/s)	$V_{reaktan \text{ maks}}$ (cm/s)	Tidak Stabil	Padam
0,8	-	-	-	-	-	-	✓	✓
0,9	-	-	-	-	-	-	✓	✓
1	-	-	-	-	-	-	✓	✓
1,1	-	-	-	-	-	-	✓	✓
1,2	-	-	-	-	-	-	✓	✓

Tabel 4.4
Data batas kestabilan nyala api untuk *rectangular disk combustor* dengan dua saluran masuk

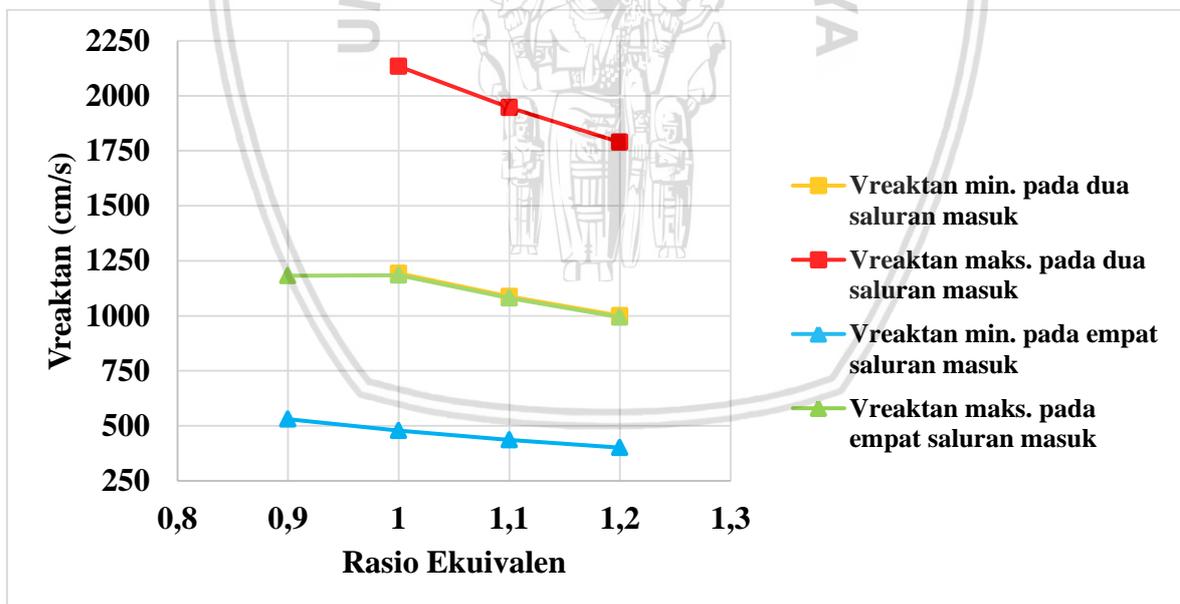
Rasio Ekuivalen (ϕ)	$Q_{f \text{ min}}$ (ml/min)	$Q_{a \text{ min}}$ (L/min)	$Q_{f \text{ maks}}$ (ml/min)	$Q_{a \text{ maks}}$ (L/min)	$V_{reaktan \text{ min}}$ (cm/s)	$V_{reaktan \text{ maks}}$ (cm/s)	Stabil	Padam
0,8	-	-	-	-	-	-	X	✓
0,9	-	-	-	-	-	-	X	✓
1	90	2,786	161	4,985	1192,73	2134,04	✓	X
1,1	90	2,533	161	4,532	1087,7	1946,1	✓	X
1,2	90	2,322	161	4,154	1000,17	1789,49	✓	X

Tabel 4.5

Data batas kestabilan nyala api untuk *rectangular disk combustor* dengan empat saluran masuk

Rasio Ekuivalen (ϕ)	Q_{fmin} (ml/min)	Q_{amin} (L/min)	Q_{fmaks} (ml/min)	Q_{amaks} (L/min)	$V_{reaktan min}$ (cm/s)	$V_{reaktan maks}$ (cm/s)	Stabil	Padam
0,8	-	-	-	-	-	-	X	✓
0,9	72	2,485	161	5,539	530,18	1181,86	✓	X
1	72	2,237	179	5,535	478,65	1184,73	✓	X
1,1	72	2,033	179	5,032	436,49	1080,4	✓	X
1,2	72	1,864	179	4,613	401,37	993,4	✓	X

Dari data dengan memvariasikan debit udara pada debit bahan bakar yang tetap dihasilkan pada satu saluran masuk menghasilkan nyala api yang tidak stabil dan akan padam ketika tidak dipantik secara terus-menerus. Pada dua saluran masuk nyala api hanya bisa menyala stabil pada $\phi = 1, 1.1, \text{ dan } 1.2$. Pada empat saluran masuk nyala api hanya bisa menyala stabil pada $\phi = 0.9, 1, 1.1, \text{ dan } 1.2$. Pada dua saluran masuk hanya bisa menyala stabil pada Q_f sebesar 90 ml/min hingga 161 ml/min. Pada empat saluran masuk hanya bisa menyala stabil pada Q_f sebesar 72 ml/min hingga 179 ml/min.



Gambar 4.3 Grafik batas kestabilan nyala api perbandingan antara kecepatan reaktan dengan rasio ekuivalen berbeda pada *rectangular disk combustor*

Pada Gambar 4.3 Semakin meningkatnya jumlah saluran masuk maka kecepatan reaktan yang dihasilkan akan menurun selanjutnya interval ϕ dimana api dapat menyala dengan stabil akan semakin luas. Dikarenakan jumlah saluran masuk berbanding terbalik dengan kecepatan reaktan yang dihasilkan.

Pada *Gambar 4.3* terlihat semakin meningkatnya nilai rasio ekuivalen maka kecepatan reaktan yang dihasilkan akan semakin menurun yang disebabkan karena udara semakin sedikit untuk mengikat dan membakar bahan bakar ($\phi > 1$) sehingga kecepatan reaktan yang dihasilkan menurun.

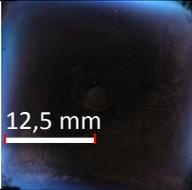
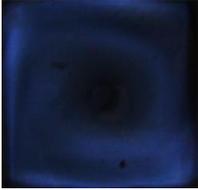
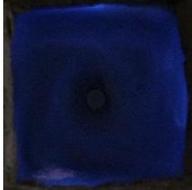
4.3 Visualisasi Nyala Api

Pengambilan data visualisasi nyala api diambil menggunakan kamera pada rasio ekuivalen (ϕ) dimana pembakaran yang dihasilkan masih memiliki nyala api yang stabil pada variasi debit bahan bakar pada $\phi = 1$ dan variasi rasio ekuivalen pada debit bahan bakar (Q_f) = 72, 107, dan 179 ml/min.



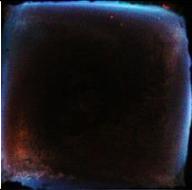
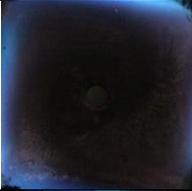
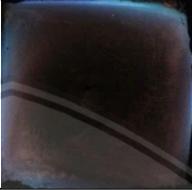
Gambar 4.4 Visualisasi nyala api pada *rectangular disk combustor* dengan satu saluran masuk.

Pada *Gambar 4.4*, nyala api yang dihasilkan tidak stabil pada *rectangular disk combustor* dengan satu saluran masuk dikarenakan kecepatan reaktan yang terlalu tinggi sehingga reaktan sudah keluar dari ruang bakar sebelum sempat terbakar melalui saluran buang. Dan nyala api tidak stabil tersebut akan padam ketika tidak dipantik terus-menerus menggunakan pemantik.

Debit bahan bakar (ml/min)	Combustor dengan dua saluran masuk	Combustor dengan empat saluran masuk
$Q_f = 72$	–	
$Q_f = 90$		
$Q_f = 107$		
$Q_f = 143$		
$Q_f = 179$	–	

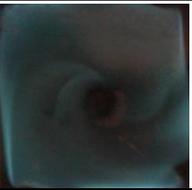
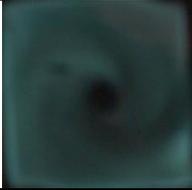
Gambar 4.5 Visualisasi nyala api pada $\phi = 1$ dengan debit yang berbeda

Pada Gambar 4.5 semakin meningkatnya debit bahan bakar nyala api yang dihasilkan semakin merata. Hal tersebut terjadi dikarenakan semakin banyak debit bahan bakar yang masuk semakin banyak juga bahan bakar yang tersebar dan terbakar didalam *combustor* sehingga nyala api yang dihasilkan semakin merata.

Rasio Ekuivalen	Combustor dengan dua saluran masuk	Combustor dengan empat saluran masuk
$\phi = 0,9$	–	
$\phi = 1$	–	
$\phi = 1,1$	–	

Gambar 4.6 Visualisasi nyala api pada $Q_f = 72$ ml/min dengan rasio ekuivalen berbeda

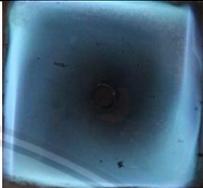
Pada Gambar 4.6 nyala api yang dihasilkan terkonsentrasi pada bagian tepi kemudian semakin ketengah semakin gelap dikarenakan reaktan sudah habis terbakar pada bagian tepi. Dan bagian gelap tersebut hanya berupa hasil sisa pembakaran yang akan keluar melalui saluran buang.

Rasio Ekuivalen	Combustor dengan dua saluran masuk	Combustor dengan empat saluran masuk
$\phi = 0,9$	–	
$\phi = 1$		
$\phi = 1,1$		

Gambar 4.7 Visualisasi nyala api pada $Q_f = 107$ ml/min dengan rasio ekuivalen berbeda

Pada Gambar 4.7, empat saluran masuk menghasilkan nyala api yang lebih merata daripada dua saluran masuk dikarenakan pada empat saluran masuk menghasilkan kecepatan reaktan yang lebih lambat sehingga waktu tinggal reaktan didalam combustor

akan lebih lama, pembakaran yang dihasilkan pun juga akan semakin sempurna karena semua bahan bakar terbakar habis dan memenuhi seluruh ruang bakar.

Rasio Ekuivalen	<i>Combustor</i> dengan dua saluran masuk	<i>Combustor</i> dengan empat saluran masuk
$\phi = 0,9$	–	–
$\phi = 1$	–	
$\phi = 1,1$	–	

Gambar 4.8 Visualisasi nyala api pada $Q_f = 179$ ml/min dengan rasio ekuivalen berbeda

Pada Gambar 4.8 terlihat bagian nyala api pada bagian tengah *combustor* meredup disebabkan karena tegangan geser pada lapisan reaktan yang terjadi dari tepi kemudian berputar semakin ketengah menuju saluran buang semakin ketengah kecepatan reaktan yang dihasilkan akan semakin cepat.

Pada Gambar 4.8 terlihat semakin meningkatnya nilai rasio ekuivalen membuat warna nyala api yang dihasilkan menjadi semakin kehijauan yang menandakan kaya akan bahan bakar atau *fuel-rich mixture* dikarenakan adanya radikal C_2 yang menghasilkan radiasi warna hijau. Sebaliknya semakin menurunnya nilai rasio ekuivalen warna yang dihasilkan semakin biru dikarenakan adanya radikal OH yang menghasilkan radiasi warna biru.

4.4 Temperatur Dinding *Combustor*

Pengambilan data temperatur dinding *combustor* menggunakan *thermocouple* berjenis tipe-K dengan *temperature range* berkisar antara -270 °C – 1320 °C yang dihubungkan dengan *data logger* dan laptop.

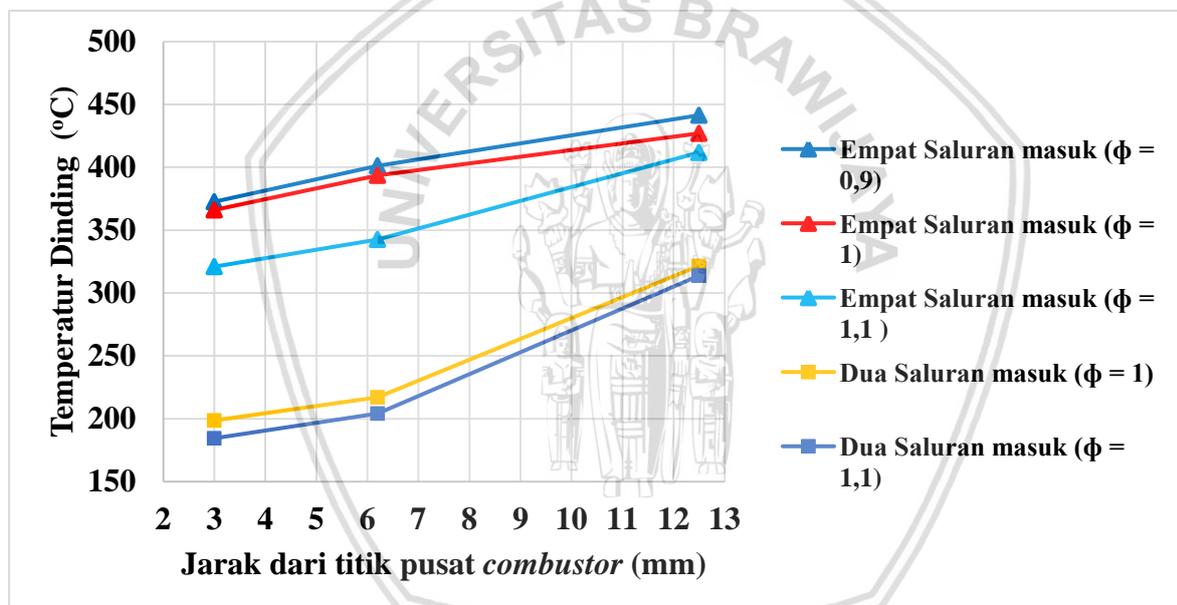
Pengambilan data temperatur dinding disetiap titik diambil pada sampel $Q_f = 107$ ml/min. *Thermocouple* diletakkan pada 3 titik pengambilan data temperatur dinding selama 3 menit yaitu pada titik 1 dengan jarak 3 mm dari titik pusat *combustor*, titik 2 dengan

jarak 6,2 mm dari titik pusat *combustor*, dan titik 3 dengan jarak 12,5 mm dari titik pusat *combustor* dan dimasukkan pada Tabel 4.6 berikut ini.

Tabel 4.6

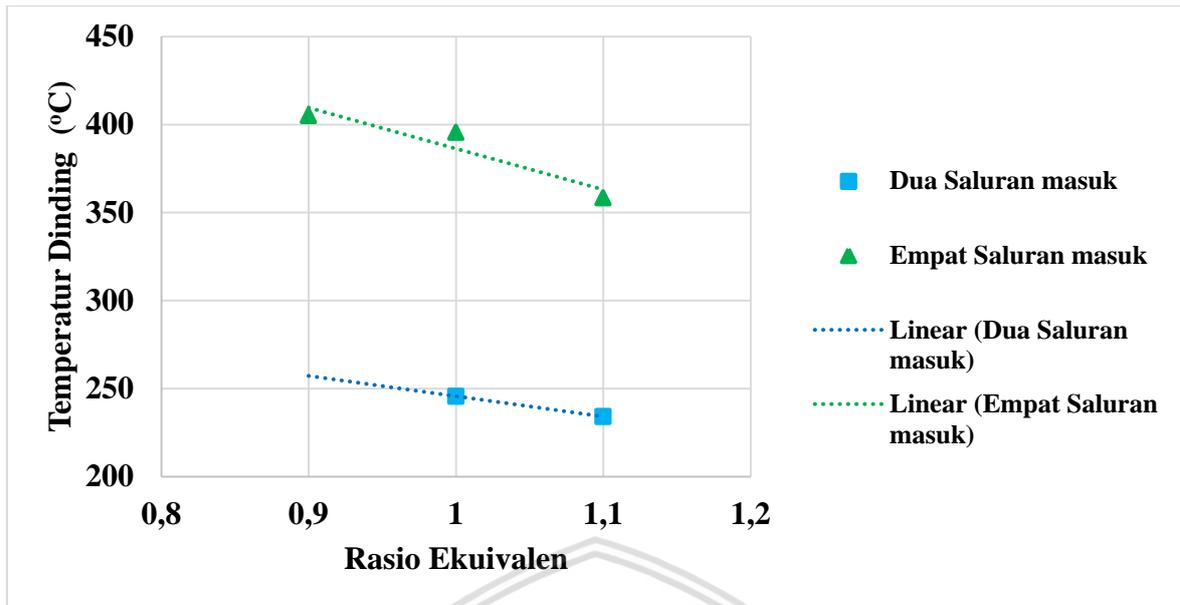
Pengambilan data temperatur *combustor* pada *rectangular disk combustor*

Jumlah Saluran	Titik	$\phi = 0,9$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\phi = 1$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\phi = 1,1$ ($^{\circ}\text{C}$)
2	1	-	198,6	184,53
	2	-	216,97	204,04
	3	-	321,51	313,73
Rata-rata		-	245,69	234,1
4	1	372,65	366,05	321,03
	2	401,12	393,63	342,49
	3	441,32	427,03	411,7
Rata-rata		405,03	395,57	358,4



Gambar 4.9 Grafik perbandingan temperatur dinding *combustor* dengan jarak dari titik pusat *combustor*

Pada Gambar 4.9 temperatur paling tinggi dihasilkan pada titik 3 kemudian pada titik 2 dan yang paling rendah pada titik 1. Hal ini dikarenakan seperti pada data visualisasi nyala api diatas dimana nyala api pembakaran yang dihasilkan terkonsentrasi pada bagian tepi *combustor* yang berada dekat pada titik 3 dimana panas lebih merata pada bagian ini kemudian temperatur semakin turun semakin ketengah karena bahan bakar sudah habis terbakar pada bagian tepi *combustor*.



Gambar 4.10 Grafik perbandingan temperatur dinding *combustor* dengan rasio ekuivalen berbeda pada *rectangular disk combustor*

Pada Gambar 4.10 terdapat nilai rasio ekuivalen yang semakin menurun membuat temperatur dinding yang dihasilkan semakin meningkat. Hal ini dikarenakan pada nilai rasio ekuivalen yang rendah, debit udara yang masuk lebih banyak sehingga kecepatan reaktan yang dihasilkan semakin cepat. Selanjutnya perpindahan panas konveksi dari panas pembakaran ke dinding *combustor* yang dihasilkan akan semakin besar sehingga temperatur dinding yang dihasilkan juga akan semakin besar.



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan penelitian ini tentang pengaruh jumlah dan arah saluran masuk terhadap karakteristik pembakaran menggunakan pembakaran *premixed* yang terjadi pada *meso-scale combustor* berbentuk *rectangular disk-type* dengan bahan bakar butana (C_4H_{10}) adalah sebagai berikut.

1. Semakin banyak jumlah saluran masuk maka nyala api akan stabil pada interval rasio ekuivalen yang lebih luas.
2. Semakin banyak jumlah saluran masuk maka visualisasi nyala api pada *combustor* akan semakin merata.
3. Semakin banyak jumlah saluran masuk maka temperatur dinding *combustor* akan semakin meningkat.
4. *Combustor* dengan saluran masuk 1 tidak dapat menghasilkan nyala api yang stabil dan akan padam jika tidak dipantik secara terus-menerus.

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang penggunaan bahan bakar yang lain selain bahan bakar butana.
2. Perlu dilakukan pemilihan lem yang lebih tahan panas terhadap suhu tinggi, tahan lama dan kuat sehingga tidak terjadi kebocoran pada alat.

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.
- Elsair, R. (2012). *Fundamentals of Chemistry*. Frederiksberg: Ventus Publishing ApS.
- Febrianto, W., Yuliati, L., Hamidi, N. (2015). Karakteristik Pembakaran Heksana pada *Meso-scale Combustor* dengan *Preheated Multiple Tangential Fuel Inlet*. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Fernandez-Pello, C. (2002). *Micropower Generation Using Combustion: Issues and Approaches. Proceedings of The Combustion Institute Volume 29 Issues 1 Page 883-899*. Berkeley: University of California.
- Katsuyoshi, T., Soichiro, K., Taku, M., Toshiyuki, S. (2009). *Development Of The Micro Combustor. Engineering Review vol 42 no 2. Page 97-101*.
- Mahandari, C. P., Kartika, D. (2010). *Flame Lift-up on A Bunsen Burner*. Jakarta: A Preliminary Study.
- Maruta, K. (2011). *Micro And Mesoscale Combustion. Proceedings of The Combustion Institute vol 33 Issue 1 Page 125-150*.
- Merotto, L., Fanciulli, C., Donde, R., De Luliis, S. (2016). *Study of a Thermoelectric Generator based on a Catalytic Premixed Meso-Scale Combustor. Applied Energy 162 Page 346-353*.
- Reddy, W., Yuliati, L., Purnami. (2017). Pengaruh Jumlah Saluran Masuk terhadap Karakteristik Pembakaran pada *Tangential Circular Disk Combustor*. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Wardana, I.N.G. (2008). *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*. PT. Dinar Wijaya. Malang: Brawijaya University Press.
- Warneck, P. (1988). *Chemistry of the Natural Atmosphere*. London: Academic Press, Inc.
- 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*.