



**PENGARUH VARIASI UKURAN *INLET MESO-SCALE*
COMBUSTOR PERSEGI TERHADAP KARAKTERISTIK
NYALA API DAN *ENERGY OUTPUT* PEMBAKARAN
BUTANA-UDARA**

*Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana pada
program studi S1 Teknik Mesin*

SKRIPSI

Oleh

Ach. Azwar Anas

201910101083

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER**

2025

PERSEMBAHAN

Dengan rasa puji tasyakur terhadap Allah SWT, skripsi ini saya persembahkan untuk :

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat, nikmat, dan karunia kepada penulis selama menjalani perkuliahan ini.
2. Keluarga saya khususnya kedua orang tua beserta kakak dan adik saya yang telah membantu mendukung, memberi semangat dan dorongan kepada saya untuk tetap berkembang.
3. Semua Dosen Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember yang senantiasa dengan ikhlas memberikan ilmunya dan juga arahan untuk menuju mahasiswa yang lebih baik kedepannya. Semoga Bapak/Ibu diberikan keberkahan dan kelancaran rezeki dunia maupun akhirat.
4. Dosen Pembimbing Akademik saya Bpk. Ir Muhammad Trifiananto, S.T., M.T. yang selalu memberikan bimbingan dan arahan selama menjalani perkuliahan saya.
5. Dosen Pembimbing Skripsi saya Bpk Dr. Ir. Andi Sanata, S.T., M.T. dan Bpk. Dr. Ir. Yuni Hermawan, S.T., M.T. yang selalu memberikan arahan, semangat dan memotivasi sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik sesuai harapan.
6. Dosen Penguji saya Bpk. Dr. Ir. Nasrul Ilminnafik, S.T., M.T dan Bpk. Ir. Sumarji, S.T., M.T. yang selalu mengarahkan dan memberikan saran yang baik dan membangun sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
7. Teknisi Laboratorium Konversi Energi Bpk. Ir. Agus Feriyanto, S.T., M.T. yang telah banyak membantu dan memberikan saran sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
8. Dulur-dulur M22 semua yang telah berproses Bersama.

MOTTO

“Gunakan waktu luang sebaik mungkin, serta diikuti dengan ibadah karena Allah
SWT”

(Bapak Dahlan & Ibu Mahsunah)



PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Ach. Azwar Anas

NIM : 201910101083

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul : *Pengaruh variasi ukuran inlet meso-scale combustor persegi terhadap karakteristik nyala api dan energy output pembakaran butana-udara* adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, Januari 2025

Yang menyatakan,

Ach. Azwar Anas

201910101083

HALAMAN PERSETUJUAN

Skripsi berjudul *Pengaruh variasi ukuran inlet meso-scale combustor persegi terhadap karakteristik nyala api dan energy output pembakaran butana-udara* telah diuji dan disetujui oleh Fakultas Teknik Universitas Jember pada :

Hari :
Tanggal : Januari 2025
Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Pembimbing

Tanda Tangan

1. Pembimbing Utama

Nama : Dr. Ir. Andi Sanata, S.T., M.T. (.....)
NIP : 197505022001121001

2. Pembimbing Anggota

Nama : Dr. Ir. Yuni Hermawan, S.T., M.T. (.....)
NIP : 197506152002121008

Penguji

1. Penguji Utama

Nama : Dr. Ir. Nasrul Ilminnafik, S.T., M.T. (.....)
NIP : 197111141999031002

2. Penguji Anggota

Nama : Ir. Sumarji, S.T., M.T. (.....)
NIP : 196802021997021001

ABSTRAK

Upaya dalam menstabilkan nyala api pada *combustor* skala kecil menjadi poin utama pada penelitian tentang perkembangan *Micro Power Generator (MPG)* dan *Micro Electro Mechanical System (MEMS)*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh ukuran diameter *inlet combustor* terhadap karakteristik nyala api dan *energy output* yang dihasilkan pada *meso-scale combustor* dengan penampang berbentuk persegi. Metode penelitian yang digunakan adalah melakukan eksperimen pada pembakaran butana-udara. Ukuran geometri pada *meso-scale combustor* berpenampang persegi ini mengikuti ukuran *meso-scale combustor* berpenampang silinder dengan menggunakan metode *backward facing step* yang telah diteliti sebelumnya. Bahan *combustor* menggunakan aluminium. Adapun hasil penelitian yaitu *flame mode map*, *stability limit*, dan visualisasi nyala api yang dihasilkan pada rasio *combustor* $D1/D2 = 0,7$ lebih luas dari pada rasio *combustor* $D1/D2 = 0,6$. Pada temperatur nyala api dan temperatur dinding *combustor* dengan rasio $D1/D2 = 0,7$ menghasilkan temperatur yang lebih tinggi. Sehingga, *energy output* yang dihasilkan juga lebih baik dari pada rasio *combustor* $D1/D2 = 0,6$.

Kata Kunci : *meso-scale combustor*, persegi, pembakaran, energi.

ABSTRACT

Efforts to stabilize the flame in a small-scale combustor are the main point in research on the development of Micro Power Generator (MPG) and Micro Electro Mechanical System (MEMS). This study aims to determine the effect of the combustor inlet diameter on the characteristics of the flame and the energy output produced in a meso-scale combustor with a square cross-section. The research method used is to conduct experiments on butane-air combustion. The geometric size of the meso-scale combustor with a square cross-section follows the size of the meso-scale combustor with a cylindrical cross-section using the backward facing step method that has been studied previously. The combustor material uses aluminum. The results of the study are the flame mode map, stability limit, and visualization of the flame produced at the combustor ratio $D1/D2 = 0.7$ are wider than the combustor ratio $D1/D2 = 0.6$. At the flame temperature and combustor wall temperature with a ratio of $D1/D2 = 0.7$ produces a higher temperature. Thus, the energy output produced is also better than the combustor ratio $D1/D2 = 0.6$.

Keywords: meso-scale combustor, square, combustion, energy.

RINGKASAN

Perkembangan tentang penelitian pembangkit listrik (MPG) dan *Micro Electro Mechanical System* (MEMS) telah menarik perhatian sebagai penerapan tenaga listrik berbasis portabel. Salah satu sumber energi yang didapatkan pada penerapan ini yakni pembakaran pada *meso-scale combustor* yang menghasilkan energi panas, kemudian dikonversikan menjadi energi listrik. Tantangan dalam pembakaran pada *meso-scale combustor* sampai saat ini yaitu upaya menstabilkan nyala api di dalam *meso-scale combustor*. Karena pada ruang bakar yang sangat kecil mengakibatkan kehilangan panas terhadap pembangkitan panas yang tinggi. Telah banyak penelitian yang sudah dilakukan seperti aplikasi jenis bahan bakar, desain geometri *meso-scale combustor*, dan penambahan *wire mesh* pada penampang *combustor* sebagai upaya menstabilkan nyala api dan efisiensi modul *heat transfer energy*.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bentuk penampang *meso-scale combustor* persegi terhadap karakteristik nyala api dan *energy output* yang dihasilkan oleh pembakaran butana-udara dengan memvariasikan ukuran diameter *inlet meso-scale combustor* serta menggunakan metode *backward facing step combustor*. Kelanjutan pada penelitian ini dapat memperoleh perbandingan hasil karakteristik nyala api dan *energy output* yang dihasilkan oleh *combustor* berpenampang persegi dengan *combustor* berpenampang lingkaran. Pada *combustor* berpenampang persegi yang akan dilakukan pada penelitian ini memiliki perbandingan ukuran diameter *inlet* dan penampang *combustor* yang sama.

Pada hasil penelitian didapati bahwa ukuran diameter *inlet meso-scale combustor* yang lebih besar menghasilkan *flame mode map*, *flame stability limit*, visualisasi nyala api, temperatur nyala api dan temperatur dinding *combustor*, serta *energy output* yang lebih baik dibandingkan ukuran diameter *inlet combustor* yang lebih kecil.

PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT memberikan kelancaran serta petunjuknya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “*Pengaruh variasi ukuran inlet meso-scale combustor persegi terhadap karakteristik nyala api dan energy output pembakaran butana-udara*” yang disusun untuk memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan pendidikan pada Program Studi S1 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Jember. Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terimakasih kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat, nikmat, dan karunia kepada :

1. Keluarga saya khususnya kedua orang tua beserta kakak dan adik saya yang telah membantu mendukung, memberi semangat, dan dorongan kepada saya untuk tetap berkembang.
2. Semua Dosen Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember yang senantiasa dengan ikhlas memberikan ilmunya dan juga arahan untuk menuju mahasiswa yang lebih baik kedepannya. Semoga Bapak/Ibu diberikan keberkahan dan kelancaran rezeki dunia maupun akhirat.
3. Dosen Pembimbing Akademik saya Bpk. Ir Muhammad Trifiananto, S.T., M.T. yang selalu memberikan bimbingan dan arahan selama menjalani perkuliahan saya.
4. Dosen Pembimbing Skripsi saya Bpk Dr. Ir. Andi Sanata, S.T., M.T. dan Bpk. Dr. Ir. Yuni Hermawan, S.T., M.T. yang selalu memberikan arahan, semangat, dan motivasi sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
5. Dosen Penguji saya Bpk. Dr. Ir. Nasrul Ilminnafik, S.T., M.T dan Bpk. Ir. Sumarji, S.T., M.T. yang selalu mengarahkan dan memberikan saran yang baik dan membangun sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
6. Teknisi Laboratorium Konversi Energi Bpk. Ir. Agus Feriyanto, S.T., M.T. yang telah membantu dan memberikan saran sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
7. Dulur-dulur M22 semua yang telah berproses Bersama.

DAFTAR ISI

HALAMAN DEPAN	i
PERSEMBAHAN.....	ii
MOTTO	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
RINGKASAN	viii
PRAKATA.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Penelitian Terdahulu	4
2.2 Pembakaran.....	6
2.2.1 Debit Bahan Bakar dan Udara	6
2.2.2 <i>Air Fuel Ratio</i> (AFR)	7
2.2.3 <i>Equivalent Ratio</i> (ϕ).....	7
2.2.4 <i>Flame Mode Map</i>	8
2.2.5 <i>Flame Stability Limit</i>	8
2.3 Butana	9
2.4 <i>Micro dan Meso-Scale Combustor</i>	10
2.5 <i>Backward facing step</i>	10
2.6 <i>Thermoelectric Generator</i>	11
2.7 Hipotesa	12
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	13
3.1 Metode Penelitian	13
3.2 Waktu dan Tempat.....	13
3.3 Alat dan Bahan.....	13
3.3.1 Alat.....	13
3.3.2 Bahan	13
3.4.1 Variabel Bebas	14
3.4.2 Variabel Terikat	14
3.5 Skematik Pengujian	15
3.5.1 Skema Instalasi Penelitian	15
3.5.2 Skematik <i>Combustor</i>	15

3.5.3	Skematik Pengambilan Temperatur Nyala Api dan Temperatur Dinding <i>Combustor</i>	16
3.5.4	Skematik Pengukuran <i>Energy Output</i>	16
3.6	Prosedur Penelitian	17
3.7	Diagram Alir Penelitian	18
BAB 4.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	19
4.1	<i>Flame Mode Map</i>	19
4.2	<i>Flame Stability Limit</i>	21
4.3	Visualisasi Nyala Api	22
4.4	Temperatur Nyala Api dan Temperatur Dinding <i>Combustor</i>	23
4.5	<i>Energy Output</i>	25
BAB 5.	PENUTUP.....	29
5.1	Kesimpulan	29
5.2	Saran	29
DAFTAR PUSTAKA.....		30
LAMPIRAN.....		33



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Visualisasi api dengan variasi rasio <i>combustor</i>	4
Gambar 2. 2 <i>Flammability limit map in ϕ-U plane</i>	5
Gambar 2. 3 Variasi bentuk <i>meso-scale combustor</i>	6
Gambar 2. 4 <i>Flame mode map</i> pada $D1/D2 = 0,7$	8
Gambar 2. 5 Grafik <i>flame stability limit for combustor</i> $D1/D2 = 0,7$	9
Gambar 2. 6 Struktur ikatan molekul butana C_4H_{10}	9
Gambar 2. 7 <i>Backward facing step</i>	11
Gambar 3. 1 Skematik Pengujian.....	15
Gambar 3. 2 Skematik <i>combustor</i> persegi	15
Gambar 3. 3 Skematik Pengambilan temperatur nyala api dan temperatur dinding <i>combustor</i>	16
Gambar 3. 4 Skematik pengambilan data <i>energy output</i>	16
Gambar 3. 5 Diagram alir penelitian.....	18
Gambar 4. 1 Grafik <i>flame mode map</i> pada rasio <i>combustor</i> $D1/D2 = 0,6$	19
Gambar 4. 2 Grafik <i>flame mode map</i> pada rasio <i>combustor</i> $D1/D2 = 0,7$	20
Gambar 4. 3 Grafik <i>flame stability limit</i> pada rasio <i>combustor</i> $D1/D2 = 0,6$ dan $0,7$	21
Gambar 4. 4 Grafik perbandingan hasil temperatur nyala api	24
Gambar 4. 5 Grafik temperatur dinding terhadap jarak titik dari <i>step</i>	25
Gambar 4. 6 Grafik hasil beda temperatur ΔT TEG	26
Gambar 4. 7 Grafik hasil output daya	27
Gambar 4. 8 Grafik hasil <i>output</i> tegangan	27
Gambar 4. 9 Grafik hasil arus listrik.....	27

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Visualisasi nyala api pada <i>flame mode combustor</i> 0,6 dan 0,7.....	22
Tabel 4. 2 Data variasi debit pada $\phi = 1$ untuk <i>combustor</i> 0,6 dan 0,7.....	24
Tabel 4. 3 Data pengujian TEG pada $\phi = 1$ dan $v_{reaktan} = 14,45$ cm/s	26



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembakaran skala kecil telah menarik perhatian karena potensi penerapannya pada sumber panas mini dan tenaga mekanis. Hal ini didasarkan bahwa kepadatan energi bahan bakar hidrokarbon hampir dua kali lipat lebih tinggi dibandingkan baterai yang ada. Kepadatan energi bahan bakar yang besar dapat dimanfaatkan dengan baik jika konverter energi memiliki efisiensi yang tinggi. Konverter sumber energi berbasis pembakaran portabel yang dimaksud adalah *combustor* dan *Thermal Photo Voltaic* (TPV) atau *Thermal Electric* (TE) (Adiwidodo dkk., 2020). Salah satu ide kreatifnya adalah perkembangan tentang pembangkit listrik *Micro Power Generator* (MPG) dan *Micro Electro Mechanical System* (MEMS). Keberhasilan dalam memanfaatkan energi spesifik hidrokarbon untuk pembangkit listrik dapat berkontribusi pada revolusi industri tenaga listrik portabel dan memungkinkan terciptanya sejumlah perangkat inovatif. (Miesse dkk., 2004).

Namun, tantangan dalam menstabilkan pembakaran dalam *micro/meso combustor* adalah membuat nyala api stabil, karena dengan mereduksi ukuran ke skala mikro/meso mengakibatkan meningkatnya rasio kehilangan panas terhadap pembangkitan panas yang tinggi (Vijayan dkk., 2010). Stabilisasi nyala api sangat tidak mudah pada desain *micro/meso combustor* ini, dimana rasio permukaan yang tinggi terhadap volume yang lebih kecil mengakibatkan kehilangan panas semakin meningkat sehingga nyala api mengalami kehilangan panas yang berlebihan melalui dinding bakar, yang akan menekan penyalaan api dan bahkan mematikan reaksi (Pan dkk., 2015). Dengan demikian efisiensi pembakaran menurun seiring dengan pengurangan ukuran ruang bakar mikro (Khaleghi dkk., 2016).

Stabilisasi nyala api bisa dilakukan dengan mengaplikasikan penggunaan laluan bertingkat *sudden expansion* atau dikenal dengan istilah *Backward facing step*. Penggunaan *Backward facing step* akan meningkatkan stabilisasi nyala api pembakaran. Termasuk peningkatan ukuran aliran resirkulasi dan kecepatan masuk

reaktan pada ruang bakar (Sanata dkk., 2020). Penggunaan ruang bakar slot persegi panjang menghasilkan peta stabilisasi nyala api yang sangat luas (Adiwidodo dkk., 2016). Beliau juga memperjelas pada penelitian nya (Adiwidodo., 2020) yang membandingkan antara saluran persegi panjang dan persegi dengan hasil peta stabilitas yang lebih luas daripada saluran tabung silinder. Kemudian suhu dinding *combustor* saluran persegi lebih tinggi daripada saluran silinder. Pada penelitian J. Li dkk., 2010 mengatakan dibandingkan dengan tabung silinder, keuntungan yang ditawarkan oleh saluran yang berbentuk persegi adalah fluks radiasi yang normal pada sel PV. Untuk meningkatkan *output* daya, diinginkan suhu dinding yang lebih tinggi dan distribusi yang seragam di sepanjang dinding ruang bakar.

Berdasarkan uraian di atas, pada penelitian ini akan dilakukan penelitian tentang pemanfaatan *backward facing step* pada *combustor* persegi terhadap karakteristik nyala api dan *energy output* melalui konverter *thermo electric*. Pada penelitian ini akan diberikan variasi ukuran bagian *inlet combustor* dengan ukuran *outlet combustor* yang konstan pada laluan *meso-scale combustor* persegi.

1.2 Rumusan Masalah

Pada penelitian ini diberikan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi ukuran *inlet meso-scale combustor* persegi terhadap *flame mode map*?
2. Bagaimana pengaruh variasi ukuran *inlet meso-scale combustor* persegi terhadap *flame stability limit*?
3. Bagaimana pengaruh variasi ukuran *inlet meso-scale combustor* persegi terhadap visualisasi nyala api?
4. Bagaimana pengaruh variasi ukuran *inlet meso-scale combustor* persegi terhadap temperatur nyala api dan temperatur dinding *combustor*?
5. Bagaimana pengaruh variasi ukuran *inlet meso-scale combustor* persegi terhadap *energy output*?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini, yaitu :

1. Bahan bakar dan oksidator menggunakan gas butana dan udara.
2. Jenis *Thermal Electric* yaitu TEG SP1848-27145SA sebagai konverter sumber energi *output*.
3. Sistem pendingin menggunakan *heatsink fan* dengan kecepatan RPM 10000.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian yang dilakukan adalah :

Untuk mengetahui karakteristik nyala api dan *energy output* yang dihasilkan pada *meso-scale combustor* berpenampang persegi.

1.5 Manfaat Penelitian

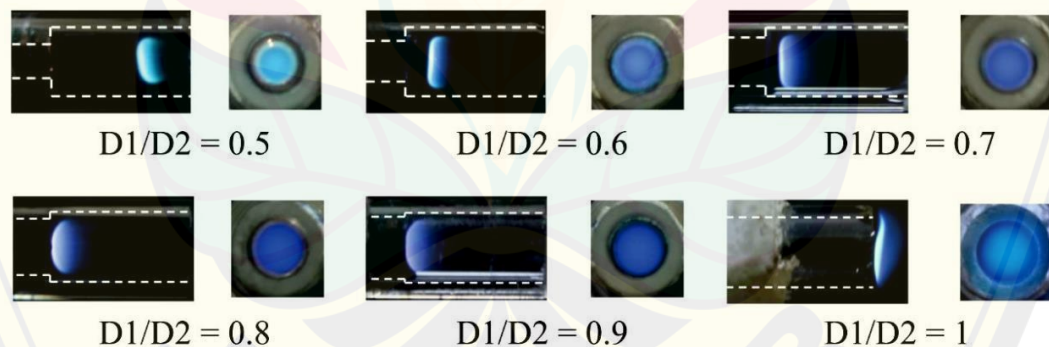
Adapun manfaat penelitian ini antara lain :

1. Salah satu ide yang dapat dikembangkan dalam penelitian pada pembakaran berskala *meso*.
2. Menambah wawasan dan ilmu pengetahuan tentang *meso-scale combustor* dan modifikasi bentuk *meso-scale combustor* terhadap karakteristik nyala api.
3. Adanya referensi baru untuk penelitian selanjutnya mengenai fungsi dari modifikasi bentuk *outlet meso-combustor* persegi.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Sanata dkk. (2019) meneliti tentang pengaruh *backward facing step* terhadap stabilitas pembakaran pada area kontak silinder *meso-scale combustor*. Oksidator dan bahan bakar yang digunakan adalah udara dan butana (C_4H_{10}). Material yang digunakan pada *inlet meso-scale combustor* berbahan dasar tembaga, sedangkan material pada *outlet combustor* menggunakan *quartz glass* yang bertujuan untuk mengamati visualisasi nyala api dan posisi nyala api. Pada fenomena Gambar 2.1 tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin kecil ukuran *diameter inlet meso-scale combustor* maka posisi nyala api yang dihasilkan semakin jauh dari *backward facing step*, hal ini disebabkan oleh peningkatan kecepatan reaktan pada saluran *inlet combustor* dan pembesaran ukuran sirkulasi aliran atau aliran *vortex*. Selain itu hasil dari penelitian tersebut mengatakan bahwa semakin besar ukuran diameter *inlet combustor* maka *flame stability limit* semakin luas.



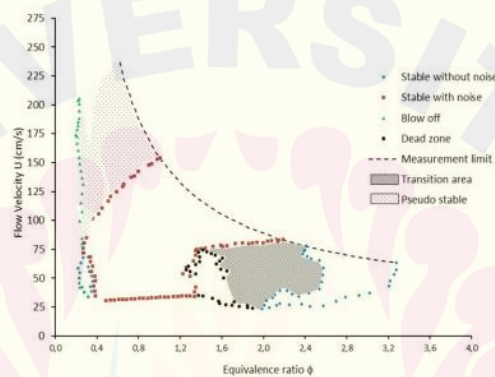
Gambar 2. 1 Visualisasi api dengan variasi rasio *combustor*

Sumber: Sanata dkk., 2019

Wibowo (2020) mengungkapkan hasil voltase *output* dan arus listrik *output* dari hasil penelitian *meso-combustor* Sanata dkk, (2019) menggunakan rangkaian *Thermoelectric Generator* (TEG). Pada variasi diameter *inlet* terbesar 4,2 mm menghasilkan *output* arus listrik yakni sebesar 20,35 mW dimana

temperatur ruang bakar 1012,75 C. Sedangkan pada variasi diameter *inlet* 3,3 mm menghasilkan *output* arus listrik sebesar 18,13 mW dengan temperatur ruang bakar 970,92 C.

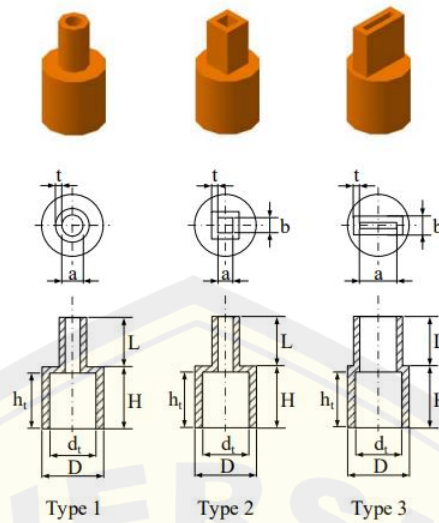
Adiwidodo dkk. (2016) melakukan pengukuran *flame stability limit* pada *meso-scale combustor* berbentuk slot persegi panjang. Bahan bakar yang digunakan adalah LPG dan oksigen murni sebagai oksidator. Kisaran rasio ekuivalensi pembakaran sangat luas berkisar antara $\phi = 0,2$ hingga $\phi = 3,28$ meliputi *stable without noise*, *stable with noise*, *transition zone*, *dead zone*, *pseudo stable*, dan *blow off* seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 *Flammability limit map in ϕ -U plane*

Sumber : Adiwidodo dkk., 2016

Adiwidodo dkk. (2020) melanjutkan penelitian sebelumnya dengan membandingkan karakteristik nyala api antara *combustor* pada penelitiannya sebelumnya dengan penampang berbentuk lingkaran, persegi, dan persegi panjang seperti pada Gambar 2.3. Bahan bakar yang digunakan sama yaitu LPG dan udara sebagai oksidator. Bentuk nyala api yang dihasilkan dari pada kecepatan reaktan $U = 100$ cm/s pada *meso-scale combustor* persegi panjang mempunyai penerangan dinding ruang bakar paling tinggi. Panas yang dihasilkan oleh nyala api dilepaskan untuk memanaskan dinding api. Tetapi hal ini menunjukkan bahwa kehilangan panas pada ruang bakar persegi panjang paling tinggi. Kemudian untuk suhu dinding yang tertinggi sampai terendah masing-masing yaitu ruang bakar persegi panjang, ruang bakar persegi, dan ruang bakar lingkaran.

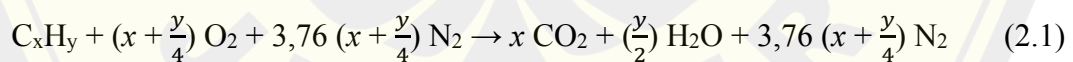
Gambar 2. 3 Variasi bentuk *meso-scale combustor*

Sumber : Adiwidodo dkk., 2020

2.2 Pembakaran

Proses pembakaran adalah sebuah reaksi kimia antara bahan bakar dan oksigen. Pada proses pembakaran membutuhkan jumlah bahan bakar dan oksigen dengan perbandingan tertentu, atau disebut dengan rasio antara jumlah bahan bakar dan oksigen. Laju aliran massa pada setiap bahan bakar berbeda-beda sehingga memerlukan rasio pembakaran tersebut (Nugroho dkk., 2021).

Menurut McAllister, 2011 persamaan reaksi kimia untuk pembakaran antara udara dan bahan bakar butana pada kondisi stoikiometri dapat dijelaskan pada persamaan berikut :



2.2.1 Debit Bahan Bakar dan Udara

Debit bahan bakar dan udara merupakan jumlah volume bahan bakar dan udara yang mengalir tiap satuan waktu. Besarnya debit bahan bakar dan udara sangat mempengaruhi karakteristik nyala api dan temperatur pada *meso scale combustor*, karena debit aliran berhubungan dengan kecepatan aliran campuran bahan bakar dan udara. Semakin tinggi kecepatan reaktan maka akan semakin baik

nyala api, namun kecepatan reaktan yang terlalu tinggi akan mengurangi *fuel residence time* (Ju & Maruta, 2011). Debit bahan bakar dan udara dapat dicari menggunakan persamaan berikut :

$$v_r = \frac{Q_a + Q_f}{A} \quad (2.2)$$

Keterangan :

v_r = Kecepatan reaktan (m/s)

Q_a = Debit udara (mL/min)

Q_f = Debit bahan bakar (mL/min)

A = Penampang *combustor* (m²)

2.2.2 Air Fuel Ratio (AFR)

Dua parameter yang sering digunakan untuk mengukur jumlah bahan bakar dan udara dalam proses pembakaran tertentu adalah rasio udara-bahan bakar dan kebalikannya, rasio bahan bakar-udara. Rasio udara-bahan bakar hanyalah rasio jumlah udara dalam reaksi terhadap jumlah bahan bakar. Rasio tersebut dapat ditulis berdasarkan molar (mol udara dibagi dengan mol bahan bakar) atau berdasarkan massa (massa udara dibagi dengan massa bahan bakar). Adapun perhitungan AFR sebagai berikut

$$(AFR)_{stoic} = \left(\frac{N_{air}}{N_{fuel}} \right)_{stoic} \quad \text{atau} \quad (AFR)_{stoic} = \left(\frac{M_{air}}{M_{fuel}} \right)_{stoic} \quad (2.3)$$

Sumber : Wardana (2008)

Keterangan :

$(AFR)_{stoic}$ = rasio udara dan bahan bakar secara stoikiometri

N_{air} = Jumlah mol udara (mol)

N_{fuel} = Jumlah mol bahan bakar (mol)

M_{air} = massa molekul udara (kg)

M_{fuel} = massa molekul bahan bakar (kg)

2.2.3 Equivalent Ratio (ϕ)

Rasio ekuivalensi atau *equivalent ratio* adalah perbandingan antara rasio udara-bahan bakar stoikiometri terhadap rasio udara-bahan bakar aktual.

$$\phi = \frac{AFR_{stoic}}{AFR_{actual}} \quad (2.4)$$

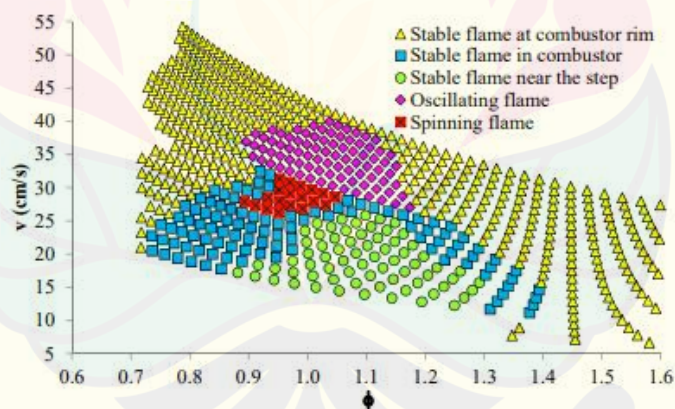
Keterangan:

- ϕ : rasio ekuivalen atau *equivalent ratio*
 AFR_{stoic} : rasio udara dan bahan bakar pada kondisi stoikiometri
 AFR_{actual} : rasio udara dan bahan bakar pada kondisi aktual

Menurut Moran (2004), reaktan dikatakan membentuk campuran ramping ketika rasio ekuivalensi kurang dari satu. Ketika rasio lebih besar dari satu, reaktan dikatakan membentuk campuran kaya atau sebaliknya.

2.2.4 Flame Mode Map

Bentuk *flame mode* dipetakan sebagai *flame mode map* dalam grafik kecepatan aliran reaktan (v) terhadap *equivalence ratio* (ϕ). *Flame mode map* yang terbentuk pada grafik kecepatan reaktan (v) terhadap *equivalence ratio* (ϕ) tergantung pada kecepatan aliran reaktan dan *equivalence ratio* pada masing-masing variasi rasio pada setiap *combustor* (Sanata dkk., 2020).



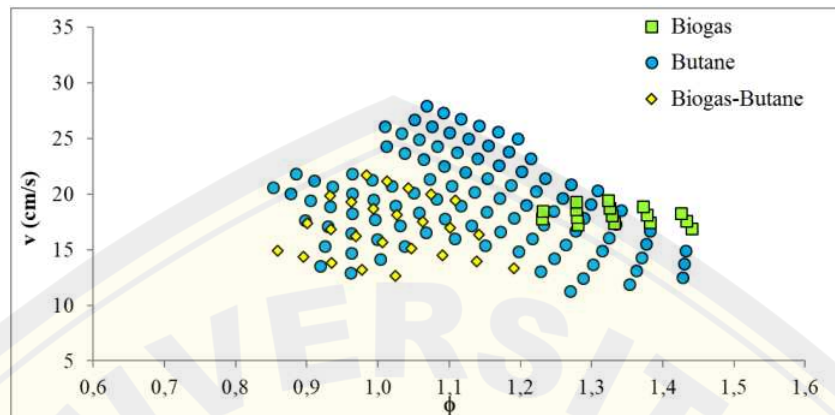
Gambar 2. 4 *Flame mode map* pada $D1/D2 = 0,7$

Sumber : Sanata dkk., 2020

2.2.5 Flame Stability Limit

Flame Stability Limit adalah kondisi nyala api yang berada di dekat *backward facing step* menyala terus menerus tanpa padam. Dengan semakin kecilnya ukuran *backward facing step*, maka terjadi kesetimbangan resirkulasi

massa dan panas yang lebih baik dan akan memberikan peningkatan stabilitas nyala api. *Flame stability limit* pada *meso-scale combustor* dapat ditunjukkan pada Gambar 2.5 grafik antara kecepatan reaktan (v_{reaktan}) terhadap rasio ekuivalen.

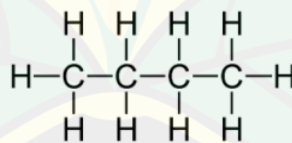


Gambar 2. 5 Grafik *flame stability limit for combustor* $D1/D2 = 0,7$

Sumber : Sanata dkk., 2023

2.3 Butana

Butana adalah salah satu dari dua hidrokarbon jenuh atau alkana, dengan rumus kimia C_4H_{10} . Dalam n-butana (normal), rantai butana bersifat kontinu dan tidak bercabang, sedangkan di i-butana (iso-butana), salah satu atom karbon membentuk cabang ke arah samping (Nolan dkk., 2014). Berikut struktur ikatan molekul butana pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Struktur ikatan molekul butana C_4H_{10}

Sumber : Wardana., 2008

Sifat butana tidak memiliki warna, mudah terbakar, dan mudah untuk mencair pada kondisi temperatur ruangan juga pada tekanan yang rendah, sehingga aman dan mudah untuk disimpan di dalam tabung kecil (Wardana., 2008).

2.4 *Micro dan Meso-Scale Combustor*

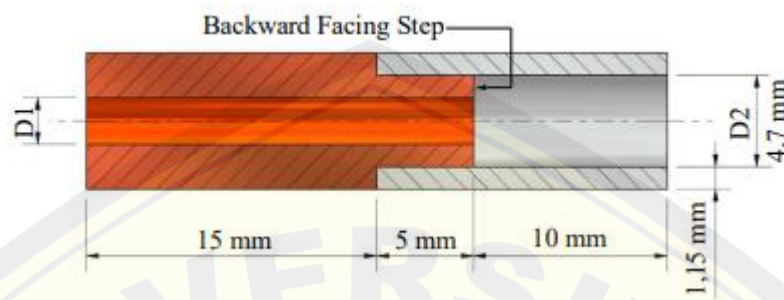
Micro dan *meso-scale combustion* adalah proses pembakaran dalam bentuk skala kecil yang digunakan sebagai sumber energi pada sistem *Micro Power Generator* (MPG). Menurut Aravind dkk. (2019) densitas energi yang dihasilkan oleh pembakaran hidrokarbon pada *combustor* dapat berpotensi besar untuk dijadikan sumber energi listrik dengan cara pembakaran skala *micro* dan *meso*. Adapun bentuk-bentuk *combustor* ini sudah banyak variasi yang telah ditemukan dan diteliti. Pada penelitian ini membandingkan *combustor* dengan saluran penampang silinder dengan *combustor* penampang persegi.

Berdasarkan penelitian sebelumnya terkait bentuk penampang *combustor* persegi mempunyai kelebihan dan kelemahan jika dibandingkan dengan *combustor* berpenampang lingkaran atau saluran silinder. Saluran *combustor* persegi memiliki keunggulan terhadap realisasi perangkat listrik mini yang menggunakan saluran berpenampang persegi untuk pengepakan yang lebih baik (Dettaroy dkk., 2019). Namun pada perbandingan ekuivalensi dan laju aliran masuk yang sama, energi panas yang dilepaskan pada *combustor* penampang persegi lebih banyak daripada *combustor* silinder. Sehingga suhu dinding dan suhu ruang bakar pada *combustor* persegi lebih tinggi daripada *combustor* silinder (Pan dkk., 2020). Warna nyala api pada *combustor* persegi juga lebih terang menunjukkan bahwa kehilangan panas yang dihasilkan oleh *combustor* persegi lebih banyak dibandingkan dengan *combustor* silinder (Adiwidodo dkk., 2020).

2.5 *Backward facing step*

Backward facing step atau *Sudden Expansion* adalah salah satu bentuk inovasi yang bertujuan untuk memaksimalkan pembakaran pada *combustor*. *Backward facing step* merupakan upaya pembesaran ekspansi geometri pada ruang bakar *combustor*. Dari penelitian yang dilakukan oleh Sanata dkk (2020), memperoleh hasil bahwa penggunaan *backward facing step* pada *combustor* memiliki karakteristik pembakaran yang lebih baik dibandingkan dengan *combustor* tanpa *backward facing step*. *Combustor* dengan *backward facing step*

memiliki nyala api yang dapat diposisikan sesuai dengan rasio perbandingan antara diameter *inlet* dengan diameter *outlet*. *Backward facing step* mengakibatkan aliran turbulen yang terbentuk pada fluida di dalam *combustor*. *Backward facing step / sudden expansion* dapat dilihat pada Gambar 2.7 di bawah ini.



Gambar 2. 7 *Backward facing step*

Sumber : Sanata dkk., 2020

2.6 Thermoelectric Generator

Thermoelectric Generator adalah tipe pembangkit listrik skala mikro yang menggunakan elemen *thermoelectric* sebagai pengubah energi panas dari *combustor* menjadi energi listrik. Prinsip kerja dari termoelektrik adalah berdasarkan efek Seebeck yaitu jika 2 buah logam yang berbeda disambungkan salah satu ujungnya, kemudian diberikan suhu yang berbeda pada sambungan, maka terjadi perbedaan tegangan pada ujung yang satu dengan ujung yang lain. Proses konversi langsung dari suatu perbedaan suhu menjadi tegangan listrik atau sebaliknya, perangkat modul termoelektrik menghasilkan tegangan ketika ada suhu yang berbeda di setiap sisi termoelektrik (Rizaldi & Edahwati., 2022).

Micro-thermophotovoltaic Power Generator adalah tipe pembangkit listrik skala mikro yang bekerja dengan memanfaatkan pancaran radiasi dari *emitter* yang selanjutnya akan dikonversi menjadi energi listrik dengan menggunakan sel *photovoltaic*. Sel *photovoltaic* berfungsi sebagai penerima pancaran radiasi foton dari pancaran emisi termal pada *emitter*, material sel *photovoltaic* biasanya terbuat dari bahan gallium antimonide (GaSb) dan mampu bekerja pada rentang suhu 900 C hingga 1300 C (Prabowo, 2017).

2.7 Hipotesa

Berdasarkan dari beberapa penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan penelitian ini dapat memperoleh hipotesa bahwa :

1. *Flame mode map* : Semakin tinggi rasio $D1/D2$ combustor, daerah *flachback* yang terbentuk semakin sempit karena pada rasio $D1/D2$ combustor yang lebih besar sehingga aliran jet melemah dan stabilitas nyala api dikontrol oleh aliran *vortex* dan kecepatan rata-rata (Sanata dkk., 2020)
2. *Flame stability limit* : semakin tinggi rasio $D1/D2$ combustor *flame stability limit* yang dihasilkan semakin luas dan terjadi di daerah kecepatan reaktan yang lebih tinggi. Hal ini dikarenakan aliran jet dan kecepatan reaktan yang melemah akibat aliran *vortex* (Sanata dkk., 2020)
3. Visualisasi nyala api : rasio $D1/D2$ combustor yang lebih besar menghasilkan posisi nyala api lebih stabil menempel pada *backward facing step* karena aliran jet yang semakin lemah dan aliran *vortex* yang mendukung reaksi pembakaran yang lebih baik dibandingkan rasio $D1/D2$ combustor yang lebih kecil (Sanata dkk., 2020)
4. Temperatur nyala api dan dinding : ukuran rasio $D1/D2$ combustor yang lebih besar akan menghasilkan temperatur nyala api yang lebih tinggi serta diikuti temperatur dinding combustor yang lebih tinggi juga, karena ukuran rasio $D1/D2$ yang lebih besar akan mengakibatkan resirkulasi panas dan reaktan yang semakin meningkat (Sanata dkk., 2023).
5. *Energy output* : semakin besar diameter *inlet combustor* maka semakin tinggi hasil *energy output*, karena diameter *inlet* yang lebih besar memungkinkan aliran massa campuran udara dan bahan bakar yang lebih besar. Sehingga meningkatkan densitas bahan bakar di dalam combustor, yang menghasilkan pembakaran lebih efisien dan transfer energi yang lebih tinggi (Wibowo., 2021).

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metodologi penelitian yang dilakukan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental yaitu dengan meneliti hasil *flame mode map*, *flame stability limit*, visualisasi nyala api, temperatur nyala api dan temperatur dinding *combustor*, serta *energy output* yang dihasilkan pada pembakaran butana-udara dengan variasi diameter *inlet meso-scale combustor* persegi.

3.2 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Konversi Energi Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Jember dan waktu penelitian direncanakan pada bulan Agustus sampai dengan bulan Desember 2024.

3.3 Alat dan Bahan

3.3.1 Alat

- | | |
|---|---|
| a. <i>Meso-scale combustor</i> persegi | h. Regulator butana |
| b. <i>Combustor holder</i> | i. <i>Handphone camera</i> |
| c. <i>Mixer holder</i> | j. Korek / Pemantik |
| d. <i>Mixer</i> | k. <i>Thermocouple type K</i> |
| e. <i>Flowmeter</i> udara dan bahan bakar | l. <i>Data logger</i> |
| f. Kompresor udara | m. <i>Thermoelectric generator</i> bertipe TEG SP1848-27145SA |
| g. Selang | n. <i>Heatsink fan</i> |
| | o. <i>Cooling fin</i> |
| | p. Laptop ASUS A456U |

3.3.2 Bahan

- a. Gas butana

3.4 Variabel Penelitian

3.4.1 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang nilai / besarannya ditentukan oleh peneliti dan memiliki pengaruh terhadap hasil penelitian yang diamati. Adapun variabel bebas di dalam penelitian ini berupa :

- a. Ukuran *inlet meso-scale combustor* (D_{in}) yaitu : 2,8 mm (60% D_{out}) dan 3,3 mm (70% D_{out}) dan ukuran *outlet meso-scale combustor* persegi ($D_{out} = 4,7 \text{ mm} \times 4,7 \text{ mm}$).
- b. Debit bahan bakar & udara masing-masing adalah 2-20 mL/min dan 50-500 mL/min.

3.4.2 Variabel Terikat

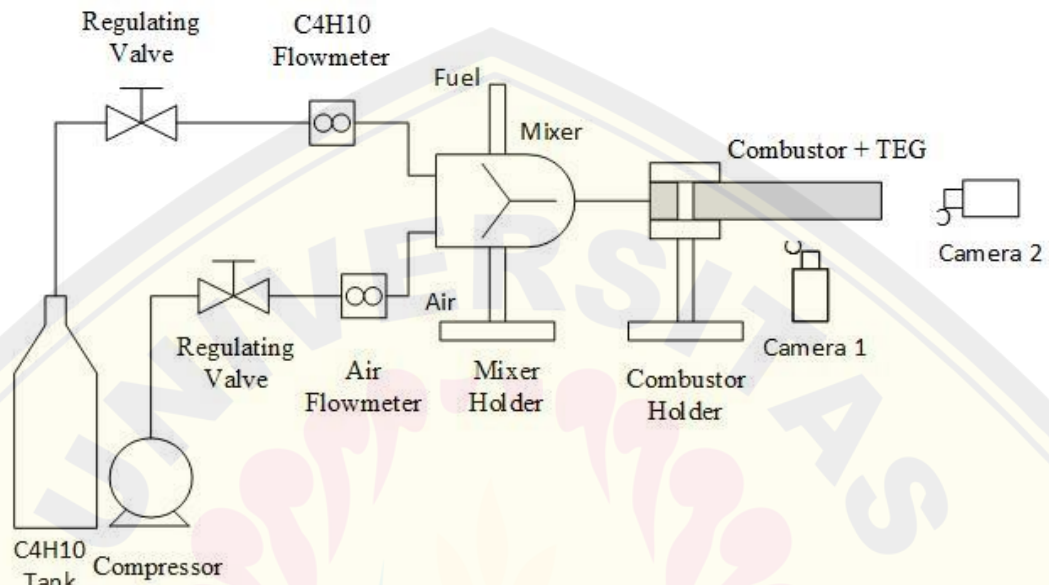
Variabel terikat merupakan variabel yang nilainya / besarannya dipengaruhi oleh variabel bebas dan diperoleh setelah melakukan penelitian. Terdapat beberapa variabel terikat pada penelitian ini yakni:

- a. *Flame Mode Map*,
- b. *Flame Stability Limit*,
- c. Visualisasi nyala api,
- d. Temperatur nyala api dan temperatur dinding *combustor*,
- e. *Energy output*.

3.5 Skematik Pengujian

3.5.1 Skema Instalasi Penelitian

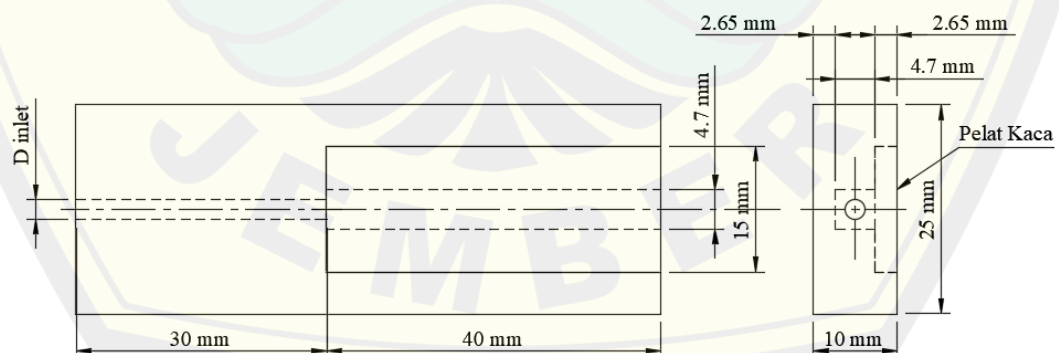
Berikut skema instalasi yang akan dilakukan penelitian ini sebagai berikut yang akan ditampilkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Skematik Pengujian

3.5.2 Skematik *Combustor*

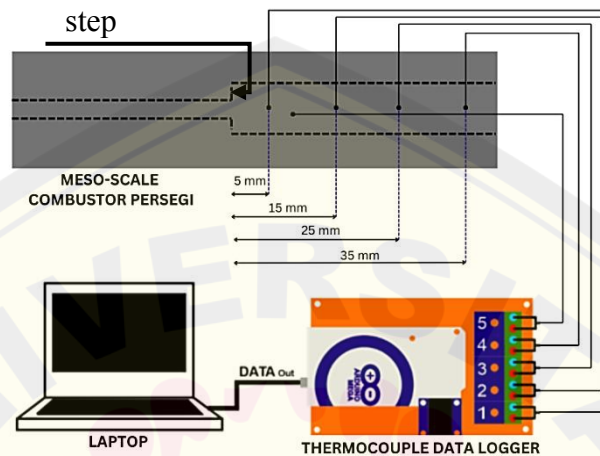
Berikut ukuran detail dari *meso-combustor* persegi yang akan digunakan sebagai penelitian pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Skematik *combustor* persegi

3.5.3 Skematik Pengambilan Temperatur Nyala Api dan Temperatur Dinding *Combustor*

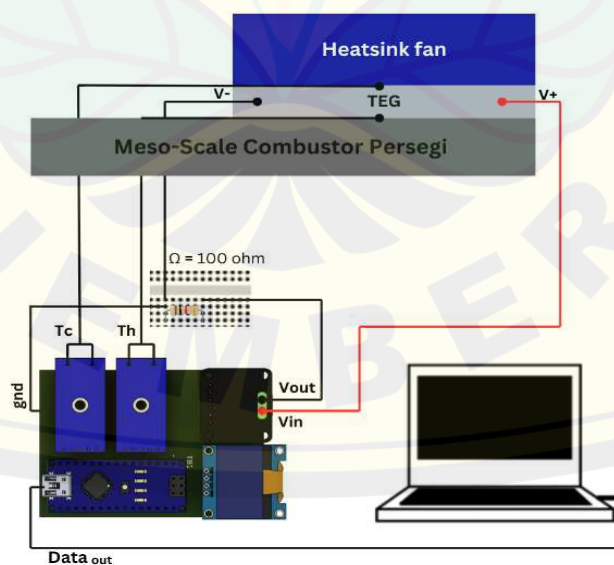
Skematik pengambilan data temperatur nyala api dan temperatur dinding dapat dilihat seperti Gambar 3.3 sebagai berikut.



Gambar 3. 3 Skematik Pengambilan temperatur nyala api dan temperatur dinding *combustor*

3.5.4 Skematik Pengukuran *Energy Output*

Perencanaan skema pengukuran suhu *output* dapat dilihat pada Gambar 3.4 sebagai berikut :



Gambar 3. 4 Skematik pengambilan data *energy output*

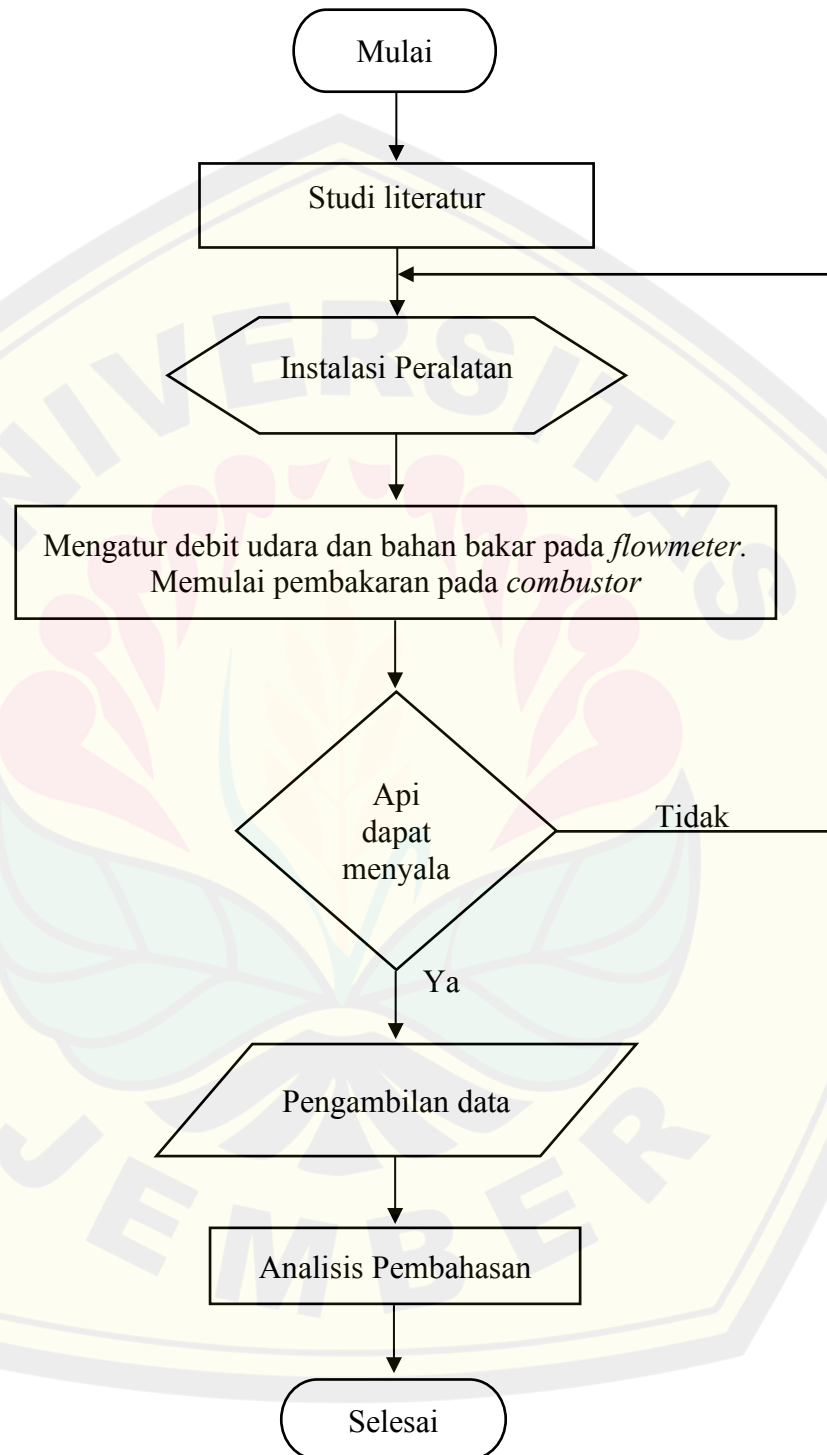
3.6 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan memiliki tahapan sebagai berikut :

1. Siapkan alat-alat dan bahan yang sudah dikalibrasi untuk melakukan instalasi penelitian
2. Melakukan proses instalasi sesuai dengan skema pada metode penelitian. Pastikan alat dan bahan yang terpasang aman dan tidak terjadi kebocoran.
3. Melakukan pengaturan pada *flowmeter* udara dengan cara membuka regulator udara dari kompresor, lalu membuka katup *flowmeter* udara secara perlahan hingga indikator *flowmeter* menunjuk pada skala yang ditentukan.
4. Melakukan pengaturan pada *flowmeter* gas butana dengan cara membuka regulator gas butana dari tabung gas butana, lalu membuka katup *flowmeter* butana secara perlahan hingga indikator *flowmeter* menunjuk pada skala yang ditentukan.
5. Melakukan penyalaan api pada *combustor*. Ketika api sudah menyala maka lakukanlah pengaturan debit bahan bakar dan udara. Mengatur debit bahan bakar dari terkecil hingga terbesar. Setiap debit bahan bakar dilakukan pengamatan pada debit udara dari terkecil hingga terbesar.
6. Melakukan pengamatan dan pengambilan data pada pengambilan gambar visualisasi nyala api, suhu nyala api dan suhu dinding *combustor*, dan *energy output*.
7. Jika data yang diambil sudah cukup, maka lakukanlah proses pengolahan dan analisa data hasil penelitian.
8. Laporan hasil penelitian.

3.7 Diagram Alir Penelitian

Berikut diagram alir penelitian yang akan dilakukan pada Gambar 3.5 sebagai berikut :



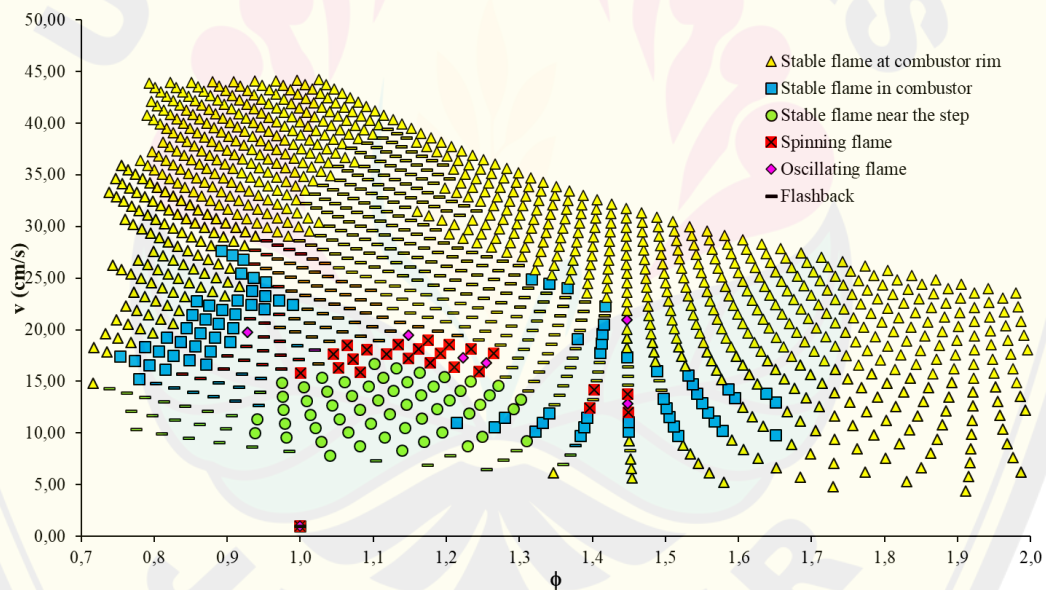
Gambar 3. 5 Diagram alir penelitian

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Flame Mode Map

Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 menunjukkan hasil *flame mode map* oleh kecepatan reaktan ($v_{reaktan}$) terhadap rasio ekuivalen. Bentuk nyala api yang dihasilkan antara lain *stable flame at combustor rim*, *stable flame in combustor*, *stable flame near the step*, *spinning flame*, *oscillating flame*, *oscillating spinning flame*, *blowoff*, dan *flashback*.

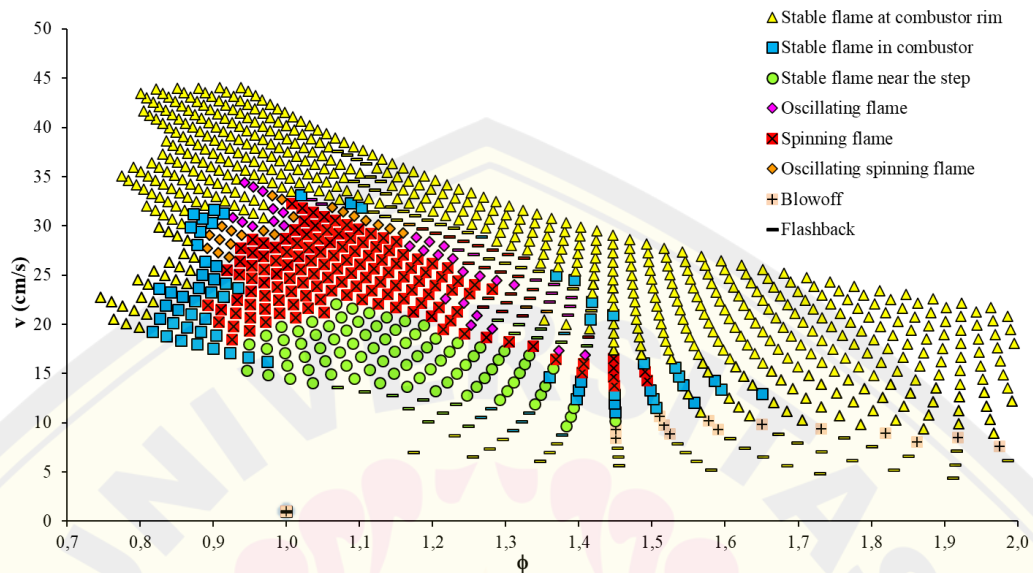
Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 pada rasio $D1/D2 = 0,6$ daerah *stable flame the near step* sangat sempit pada kecepatan reaktan rendah. Dengan meningkatnya kecepatan reaktan, nyala api berputar (*spinning flame*), berisolasi (*oscillating flame*), hingga *flashback*.



Gambar 4. 1 Grafik *flame mode map* pada rasio *combustor* $D1/D2 = 0,6$

Sementara untuk rasio $D1/D2 = 0,7$ pada Gambar 4.2, nyala api *stable flame the near step* menjadi lebih lebar sementara daerah nyala api *flashback* menjadi lebih sempit. Mode nyala api *flashback* digantikan oleh nyala api berputar (*spinning*

flame) yang lebih lebar. Kemudian semakin tinggi kecepatan reaktan nyala api membentuk *oscillating flame* dan *oscillating spinning flame*.



Gambar 4. 2 Grafik *flame mode map* pada rasio *combustor* $D1/D2 = 0,7$

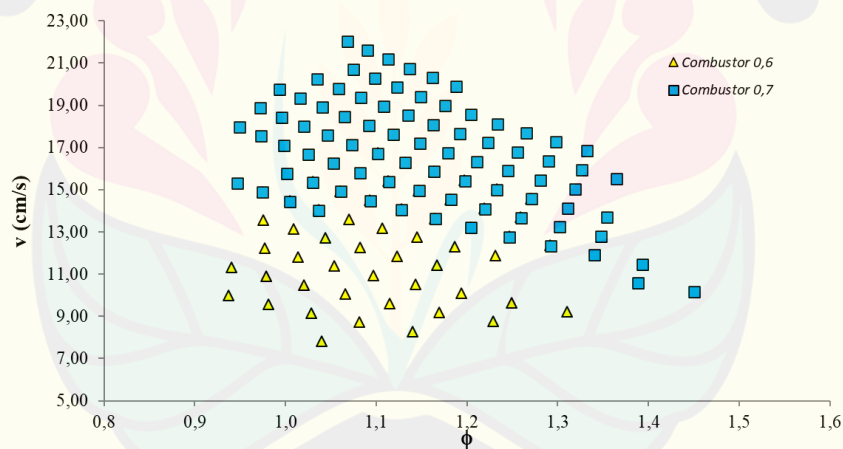
Stable flame at combustor rim adalah saat nyala api berada di mulut penampang *combustor*. *Stable flame in combustor* adalah saat nyala api berada pada di dalam penampang *combustor*, sama halnya dengan *stable flame the near step* berada pada di dalam *combustor* tetapi posisi nyala api nempel pada *step* dengan jarak maksimal 1 mm dari *backward facing step*. *Oscillating flame* adalah nyala api yang bergerak maju mundur, sementara *spinning flame* yaitu nyala api yang berada pada di dalam penampang *combustor* tetapi berbentuk seperti huruf X. kemudian *oscillating spinning flame* adalah nyala api yang berbentuk X dan bergerak maju mundur. *Blowoff* ketika nyala api menghembuskan dari dalam *combustor* menuju keluar dan mati, sedangkan *flashback* adalah kebalikan dari *blowoff* yaitu api yang bergerak dari luar penampang menuju ke dalam dan mati.

Pada Gambar 4.1 menunjukkan rasio $D1/D2 = 0,6$ dengan mode nyala api *stable flame the near step* terbentuk pada kecepatan reaktan yang rendah, dengan seiring meningkatnya kecepatan reaktan mode nyala api berubah menjadi *stable flame in combustor* dan *spinning flame* hingga *flashback*. Pada fenomena ini nyala

api stabil sudah dikontrol oleh aliran *vortex* yang terbentuk pada *backward facing step* (Sanata dkk., 2020). Kemudian ukuran diameter *inlet combustor* ditingkatkan menjadi rasio $D1/D2 = 0,7$ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 menghasilkan *stable flame the near step* menjadi lebih luas dan berada di area kecepatan reaktan yang lebih tinggi. Sementara daerah mode nyala api *flashback* pada kecepatan reaktan tinggi digantikan oleh *spinning flame* dan *oscillating flame* serta *oscillating spinning flame*. Hal ini dikarenakan mode nyala api dipengaruhi oleh aliran *vortex* yang semakin melemah sehingga terjadi *oscillating flame* (Sanata dkk., 2020).

4.2 Flame Stability Limit

Setelah mendapatkan data *flame mode map* pada kedua variasi *combustor* maka diperoleh nyala api yang stabil pada *backward facing step combustor*. Berikut hasil nyala api stabil dari kedua rasio $D1/D2$ *combustor* persegi yang disajikan grafik pada Gambar 4.3



Gambar 4. 3 Grafik *flame stability limit* pada rasio *combustor* $D1/D2 = 0,6$ dan $0,7$

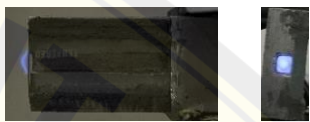
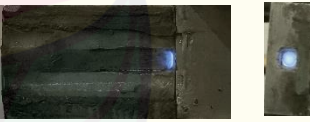
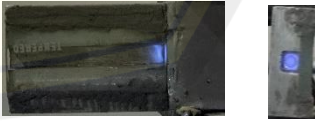
Flame stability limit adalah suatu kondisi nyala api yang dapat menyala dengan stabil di dekat *backward facing step* di dalam *combustor* (Sanata dkk., 2020). Pada *combustor* $D1/D2 = 0,6$ *flame stability limit* tersebar pada kisaran rasio ekuivalen $\phi = 0,9$ hingga $\phi = 1,3$ dengan kecepatan reaktan dari $v_{reaktan} = 7,8$ cm/s hingga $v_{reaktan} = 16,71$ cm/s. Sementara pada *combustor* $D1/D2 = 0,7$ tersebar lebih luas pada kisaran rasio ekuivalen $\phi = 0,95$ hingga $\phi = 1,45$ dengan kecepatan reaktan $v_{reaktan} = 10,15$ cm/s hingga $v_{reaktan} = 22,03$ cm/s. Ini menunjukkan perilaku

nyala api pada rasio $D1/D2 = 0,6$ masih dominan dikontrol oleh aliran jet, sedangkan rasio $D1/D2 = 0,7$ nyala api sudah dominan dikontrol oleh aliran *vortex* yang menjaga kestabilan nyala api (Sanata dkk., 2020).

4.3 Visualisasi Nyala Api

Pada Tabel 4.1 menunjukkan visualisasi nyala api pada *meso-scale combustor* persegi dengan variasi ukuran *inlet combustor*.

Tabel 4. 1 Visualisasi nyala api pada *flame mode combustor* 0,6 dan 0,7

No	Flame mode	$D1/D2 = 0,6$	$D1/D2 = 0,7$
1	<i>Stable flame at combustor rim</i>	 $\phi = 0,77$ $v = 35,05 \text{ cm/s}$	 $\phi = 0,77$ $v = 35,05 \text{ cm/s}$
2	<i>Stable flame in combustor</i>	 $\phi = 1,53$ $v = 15,59 \text{ cm/s}$	 $\phi = 1,53$ $v = 15,59 \text{ cm/s}$
3	<i>Stable flame near the step</i>	 $\phi = 1,00$ $v = 14,45 \text{ cm/s}$	 $\phi = 1,00$ $v = 14,45 \text{ cm/s}$
4	<i>Oscillating flame</i>	 $\phi = 0,93$ $v = 19,72 \text{ cm/s}$	 $\phi = 1,00$ $v = 28,64 \text{ cm/s}$
5	<i>Spinning flame</i>	 $\phi = 1,18$ $v = 18,98 \text{ cm/s}$	 $\phi = 1,18$ $v = 18,98 \text{ cm/s}$

6	<i>Oscillating spinning flame</i>		 $\phi = 1,03$ $v = 29,11 \text{ cm/s}$
---	-----------------------------------	--	--

Perbedaan nyala api yang tertera pada Tabel 4.1 disebabkan oleh variasi D1/D2 pada ruang bakar, yang menghasilkan perbedaan perilaku kecepatan aliran reaktan. Perilaku kecepatan reaktan antara lain aliran jet, aliran *vortex*, dan kecepatan rata-rata (Sanata dkk., 2020). Pada keadaan *stable flame at combustor rim* nyala api yang dihasilkan oleh *combustor* rasio D1/D2 = 0,6 lebih tebal dan mengalami peregangan menjauhi tepi pembakar. Sedangkan *combustor* rasio D1/D2 = 0,7 bentuk nyala api cenderung tipis. Kemudian pada keadaan *stable flame in combustor* terjadi saat nyala api berada di zona reaksi pembakar, *combustor* rasio D1/D2 = 0,6 posisi nyala api berada jauh dari *backward facing step* pembakar. Sementara rasio *combustor* ditingkatkan menjadi D1/D2 = 0,7 posisi nyala api menjadi lebih dekat dengan *backward facing step*. Lalu pada keadaan *stable flame the near step* D1/D2 = 0,6 nyala api hampir berbentuk *spinning flame*, hal ini dikarenakan pada rasio yang lebih kecil tidak mampu stabil pada kecepatan $v_{reaktan}$ yang semakin tinggi seperti yang dijelaskan pada pembahasan 4.1 aliran *vortex* mulai melemah (Sanata dkk., 2020). Sementara *combustor* rasio D1/D2 = 0,7 mampu menghasilkan nyala api yang stabil yang menempel pada *backward facing step*. pada keadaan *spinning flame*, *oscillating flame*, dan *oscillating spinning flame* dihasilkan oleh aksi gabungan dari aliran jet dan aliran *vortex* (Sanata dkk., 2020).

4.4 Temperatur Nyala Api dan Temperatur Dinding Combustor

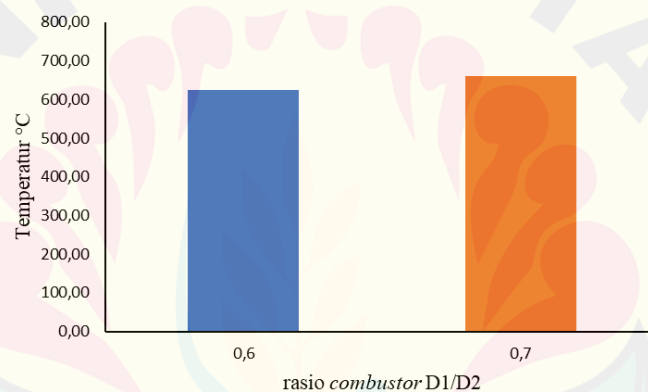
Berdasarkan dari hasil data *flame stability limit* yang tertera pada Gambar 4.3 selanjutnya dilakukan pengambilan data temperatur nyala api dan temperatur dinding *combustor* pada rasio ekuivalen $\phi = 1$ dan kecepatan $v_{reaktan}$ yang sama dapat dilihat pada Tabel 4.2 sebagai berikut.

Tabel 4. 2 Data variasi debit pada $\phi = 1$ untuk *combustor* 0,6 dan 0,7

No	D_{in}/D_{out}	ϕ	$Q_{f_{aktual}}$ (mL/min)	$Q_{a_{aktual}}$ (mL/min)	$V_{reaktan}$ (cm/s)
1	0,6	1	6,02	185,44	14,45
2	0,7	1	6,02	185,44	14,45

a. Temperatur Nyala Api

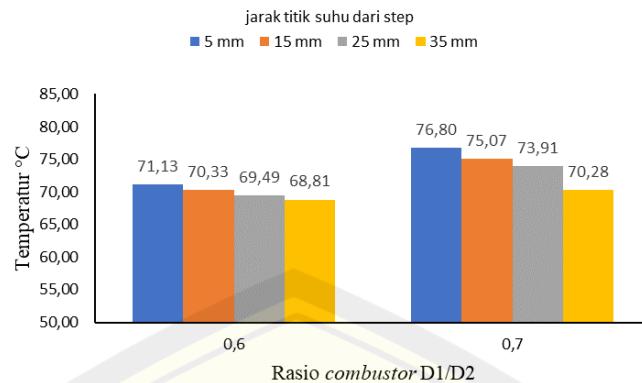
Rata-rata temperatur nyala api yang diperoleh dalam rentang waktu 3 menit disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.4. Rasio $D1/D2 = 0,7$ mempunyai temperatur yang lebih tinggi yaitu $661,35^{\circ}\text{C}$, sedangkan rasio $D1/D2 = 0,6$ memperoleh temperatur nyala api yang lebih rendah yaitu $624,10^{\circ}\text{C}$.



Gambar 4. 4 Grafik perbandingan hasil temperatur nyala api

b. Temperatur dinding *combustor*

Temperatur dinding *combustor* dihasilkan pada 4 titik dari titik yang mendekati saluran masuk reaksi (*step*) hingga titik yang mendekati *exit combustor*, sebagaimana yang telah disajikan pada Gambar 4.5



Gambar 4. 5 Grafik temperatur dinding terhadap jarak titik dari *step*

Pada kondisi rasio ekuivalen $\phi = 1$ dan $v_{\text{reaktan}} = 14,45$ yang sama, temperatur nyala api yang dihasilkan *combustor* rasio D1/D2 = 0,7 lebih tinggi dibandingkan *combustor* rasio D1/D2 = 0,6. Hal ini menunjukkan variasi diameter *inlet* pada *backward facing step* mempengaruhi temperatur nyala api, ketika diameter *inlet* ditingkatkan maka temperatur nyala api akan meningkat, seiring meningkatnya temperatur nyala api juga menyebabkan temperatur dinding juga meningkat. Meningkatnya ukuran rasio D1/D2 = 0,7 maka akan terjadi resirkulasi panas dan massa yang cukup untuk terjadinya nyala api yang stabil di dalam ruang bakar sehingga akan diperoleh temperatur nyala api, selain itu temperatur dinding rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan dengan ukuran *combustor* rasio D1/D2 yang lebih kecil (Sanata dkk., 2023).

4.5 Energy Output

Selanjutnya pengambilan data pengujian TEG didapatkan dari hasil pengaplikasian *thermoelectric generator* dimana beda temperatur ΔT_{TEG} yang sudah stabil dalam rentang waktu 3 menit. Data *energy output* yang dihasilkan berupa temperatur nyala api (T_i), beda temperatur yang dihasilkan oleh kedua suhu panas dan suhu dingin (ΔT_{TEG}), daya (mW), tegangan (V), dan arus listrik (mA).

Tabel 4.3 menyajikan data pengujian TEG pada kedua rasio *combustor* dengan $\phi = 1$ dan $v = 14,45$ cm/s.

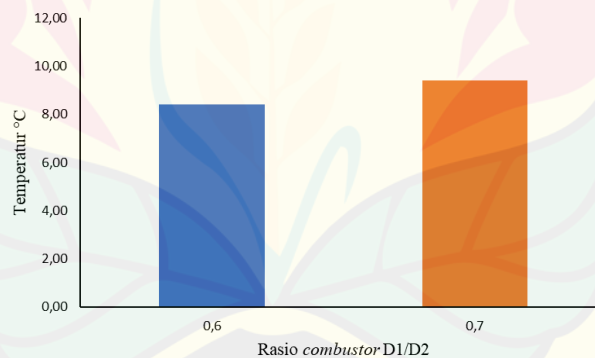
Tabel 4. 3 Data pengujian TEG pada $\phi = 1$ dan $v_{reaktan} = 14,45$ cm/s

$v_{reaktan} = 14,45$ cm/s			$\phi = 1$			
No	Rasio D1/D2	T_i (°C)	$\bar{x}\Delta T_{TEG}$ (°C)	Daya (mW)	Tegangan (V)	Arus listrik (mA)
1	0,6	624,10	8,422	2	0,43	3,66
2	0,7	661,35	9,407	2	0,42	3,92

Pengambilan data pada Tabel diatas merupakan data hasil *thermoelectric generator* yang dihasilkan dalam rentang waktu 3 menit dan saat beda temperatur ΔT TEG stabil.

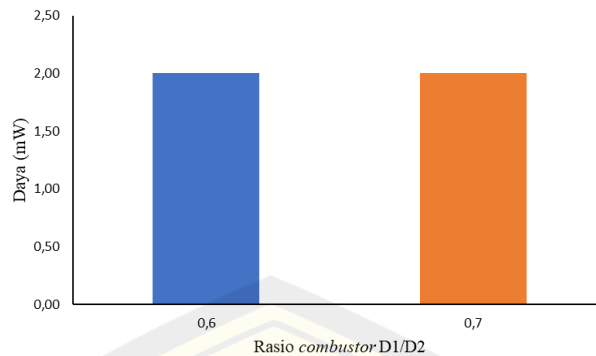
a. Beda temperatur dinding TEG

Data temperatur dinding TEG yang telah diperoleh pada Tabel 4.3 dikonversikan menjadi grafik untuk memudahkan dalam menggambarkan perbandingan beda suhu dinding pada kedua variasi *combustor*. Grafik rata-rata beda temperatur dinding TEG ($\bar{x}\Delta T_{TEG}$) akan ditampilkan pada Gambar 4.6 sebagai berikut.

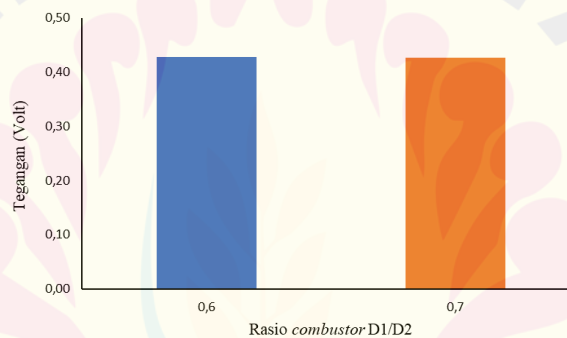
Gambar 4. 6 Grafik hasil beda temperatur ΔT TEG

b. Output energi listrik

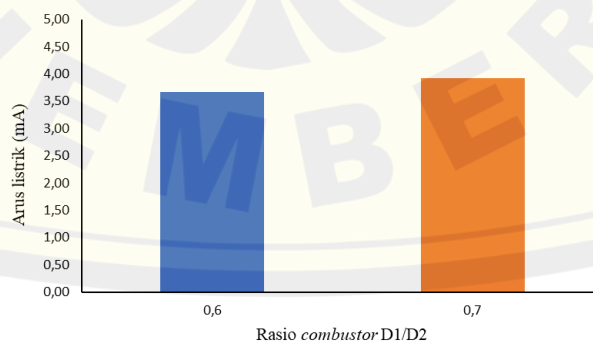
Pada Gambar 4.7 perbandingan daya yang diperoleh daripada kedua variasi ukuran *inlet meso-scale combustor* dengan $\phi = 1$ dan kecepatan $v_{reaktan} = 14,45$ cm/s menghasilkan besaran daya yang sama yaitu $P = 2$ mW.

Gambar 4. 7 Grafik hasil *output* daya

Selanjutnya pada Gambar 4.8 menunjukkan bahwa tegangan listrik daripada perbedaan ukuran *inlet meso-scale combustor* persegi menghasilkan tegangan yang sama.

Gambar 4. 8 Grafik hasil *output* tegangan

Lalu pada Gambar 4.9 menunjukkan hasil arus listrik dari perbandingan kedua rasio ukuran *inlet meso-scale combustor* persegi. *Combustor* dengan rasio $D1/D2 = 0,7$ menghasilkan arus listrik yang tinggi.



Gambar 4. 9 Grafik hasil arus listrik

Hasil *energy output* mengikuti temperatur nyala api dan temperatur dinding *combustor*, semakin tinggi temperatur maka semakin tinggi *energy output* yang dihasilkan. Hasil beda temperatur sisi panas dan dingin pada *combustor* rasio $D1/D2 = 0,7$ lebih besar dibandingkan *combustor* rasio $D1/D2 = 0,6$. Hasil daya dan tegangan pada kedua variasi rasio *combustor* ini sama dan arus listrik yang dihasilkan pada *combustor* rasio $D1/D2 = 0,7$ lebih tinggi daripada rasio $D1/D2 = 0,6$. Meskipun perbedaan pada hasil *energy output* tersebut tidak signifikan, tetapi kedua variasi rasio *combustor* $D1/D2$ tersebut mampu menghasilkan *energy output* yang konsisten stabil. Pengambilan data *energy output* pada penelitian ini untuk mengetahui apakah hasil beda temperatur, daya, tegangan, dan arus listrik terjaga dan stabil.

Pada penelitian Aravind dkk., 2018 menjelaskan bahwa dengan meningkatkan kecepatan reaktan dapat menyebabkan nilai *total thermal input*. Sementara pada rasio *combustor* $D1/D2 = 0,7$ mempunyai daerah stabil yang lebih luas dan memiliki variasi kecepatan reaktan yang lebih tinggi dibandingkan rasio $D1/D2 = 0,6$ maka diameter inlet yang lebih besar juga dapat meningkatkan *energy output* pada *meso-combustor* persegi.

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan berdasarkan hasil dan pembahasan pada penelitian pengaruh variasi diameter *inlet combustor* terhadap karakteristik nyala api dan *energy output* pada *meso-scale combustor* persegi sebagai berikut :

1. Daerah *flashback* yang terbentuk pada rasio *combustor* yang lebih tinggi menjadi sempit dan digantikan oleh *spinning flame mode*.
2. *Flame stability limit* yang dihasilkan oleh *combustor* rasio $D1/D2 = 0,7$ lebih luas dibandingkan rasio $D1/D2 = 0,6$ dan terdapat di daerah kecepatan reaktan yang lebih tinggi.
3. Visualisasi nyala api yang dihasilkan *combustor* rasio $D1/D2 = 0,7$ menghasilkan bentuk dan posisi nyala api lebih dekat dengan *backward facing step* akibat aliran *vortex* terbentuk pada diameter *inlet combustor* yang lebih besar.
4. Temperatur nyala api dan temperatur dinding *combustor* pada *combustor* rasio $D1/D2 = 0,7$ mencapai temperatur yang lebih tinggi dibandingkan *combustor* rasio $D1/D2 = 0,6$.
5. Kedua variasi rasio *combustor* menghasilkan *energy output* berupa daya dan tegangan yang sama, beda temperatur dan arus listrik yang tidak signifikan. Tetapi kedua variasi rasio *combustor* mampu menghasilkan *energy output* yang stabil dan terjaga.

5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya mengenai penelitian pada *meso-scale combustor* persegi ini adalah sebagai berikut.

1. Memilih modul *thermoelectric generator* yang lebih efisien pada percobaan selanjutnya.
2. Melakukan percobaan pada variasi ukuran *combustor* dengan *backward facing step* $D1/D2 = 0,8$ dan $0,9$.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiwidodo, S. W. (2016). Flame Stability Measurement on Rectangular Slot Meso-scale Combustor. *Applied Mechanics and Materials, DCCCXXXVI*, 272-276. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.836.271
- Adiwidodo, S. W. (2020). Performance of Cylindrical and Planar Meso-scale Combustor with Double Narrow Slit Flame Holder for Micropower Generator. *Energy-saving technologies and equipment*, 35-43.
- Aravind, B. &. (2019). Development of Small-Scale Thermoelectric Power Generators Using Different Micro-combustor Configurations for Standalone Power Applications . 117-135.
- Aravind, B. K. (2018). Eksperimental Investigation on a New High Intensity Dual Microcombustor Based Thermoelectric Micropower Generator. *Applied Energy*, 1173-1181. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.022
- DuttaRoy, R, S. C. (2019). Experimental investigation of flame propagation in a meso-combustor. *Power and Energy*, 1-16.
- J. Li, S. C. (2010). Experimental investigation of porous media combustion in a planar micro-combustor. *fuel*, 708-715.
- Ju, Y. &. (2011). Microscale combustion: Technology development and fundamental research. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(6), 669-715.
- Khaleghi, M. W. (2016). Influence of Modified Air on Combustion Characteristics in Meso_scale Vortex Combustor. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, eISSN 2180-3722.
- McAllister, S. C.-P. (2011). *Fundamentals of Combustion Processes*. New York: Springer Science and Business Media.
- Miesse, C. M. (2004). Submillimeter Combustion. *AIChE Journal*, 3206-3214.
- Moran, M. J. (2004). *Fundamental of Engineering Thermodynamics*. Jakarta: Erlangga.
- Nolan, D. P. (2014). *Handbook of fire and explosion protection engineering principles : for oil, gas, chemical and related facilities*. Burlington, MA: Elsevier Inc.

- Nugroho, A. A. (2021, November). Pelatihan Penggunaan Kompor Biomassa Guna Meningkatkan Produktivitas Pedagang Gorengan. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 1(2), 157-161. doi:10.54259/pakmas.v1i2.127
- Pan, J. W. (2015). Hydrogen/oxygen premixed combustion characteristic in micro porous media combustor. *Applied Energy*, 1-6.
- Pan, J. Y. (2020). Study on Combustion Characteristics of Premixed Methane/Oxygen in Meso Combustors with Different Cross-section. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*. doi:https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108025
- Prabowo, E. R. (2017). Karakteristik Distribusi Temperatur pada Meso Combustor dengan Sudden Expansion. In *Skripsi*. Jember: Program Sarjana Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.
- Rizaldi, R. &. (2022, November). Analisa Termoelektrik Generator dan Motor DC + Kipas Dengan Perbedaan Alas Konduktor. *Jurnal Flywheel*, XIII, 14-22.
- Sanata, A. S. (2023). Characterization of Biogas as an Alternative Fuel in Micro-Scale Combustion Technology. *The International Journal of Integrated Engineering*, XV(4), 64-76.
- Sanata, A. W. (2019). Effect of Backward Facing Step on Combustion Stability in a Constant Contact Area Cylindrical Meso-scale Combustor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/8(1729-3774).
- Sanata, A. Y. (2020). Flame Behavior Inside Constant Diameter Cylindrical Meso-scale Combustor with Different Backward facing Step. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 44-51. doi:10.15587/1729-4061.2020.197988
- Soegiharto, A. F. (2019). The Use of Heat Circulator for Flammability in Mesoscale Combustor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729-3774*.
- Suyanto, A. S. (2020). Pengaruh Panjang Resirkulator Kalor terhadap Kestabilan Nyala Butana di dalam meso-scale combustor. *Seminar Nasional Teknologi dan Rekayasa (SENTRA)*, 1-163.
- Vijayan, V. G. (2010). Combustion and Heat Transfer at Meso-scale with Thermal Recuperation. *Department of Mechanical Engineering, University of Maryland, College Park, MD 20742, United States*, 2628-2639.
- Wardana, I. (2008). *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*. Malang: Brawijaya University Press.

Wibowo, D. A. (2020). Variasi Diameter Inlet Meso-Scale Combustor Dengan Sudden Expansion Terhadap Output Daya Listrik Thermoelectric Generator. In *Skripsi*. Jember: Program Studi S1 Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember.

Yadav, S. Y. (2015). Eksperimental Studies on a Micro Power Generator Using Thermo-electric Modules Mounted on a Micro-combustor. *Energy Conversion and Management* 99, 1-7. doi:10.1016



LAMPIRAN

1. AFR stoikiometri

Persamaan yang digunakan untuk menyatakan nilai dari rasio udara dan bahan bakar adalah sebagai berikut:

$$(AFR)_{stoic} = \left(\frac{M_{air}}{M_{fuel}} \right)_{stoic} \quad (2.2)$$

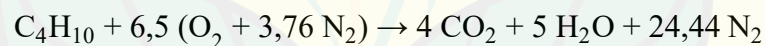
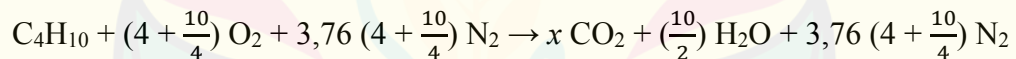
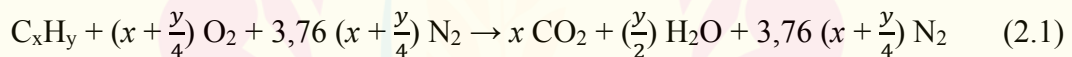
Keterangan :

$(AFR)_{stoic}$ = rasio udara dan bahan bakar berdasarkan massa (mol_{air}/mol_{fuel})

M_{air} = massa molekul udara (kg)

M_{fuel} = massa molekul bahan bakar (kg)

Reaksi pembakaran bahan bakar butana dengan oksidator udara dapat ditulis sebagai berikut :



Persamaan reaksi pembakaran gas butana dengan oksidator berupa udara pada kondisi stoikiometrik memerlukan 6,5 mol udara pada setiap 1 mol butana. Maka perhitungan hasil AFR stoikiometri sebagai berikut.

➤ AFR stoikiometri

$$\begin{aligned} AFR_{stoic} &= \left(\frac{M_{air}}{M_{fuel}} \right)_{stoic} \\ &= \left(\frac{6,5 \text{ mol } (0,02896 \text{ kg/mol})}{1 \text{ mol } (58,12 \text{ kg/mol})} \right) \\ &= \left(\frac{0,02896 \text{ kg}}{0,05812 \text{ kg}} \right) \end{aligned}$$

$$= 0,4983 \frac{\text{kg udara)}}{\text{kg butana}})$$

2. AFR aktual

AFR aktual dapat diperoleh dengan menghitung perbandingan debit udara dan debit bahan bakar. Berikut adalah salah satu contoh perhitungan untuk mencari nilai dari AFR aktual

➤ AFR aktual

$$\begin{aligned} \bullet \text{ AFR}_{\text{aktual}} &= \frac{Q_a}{Q_f} \\ \bullet \text{ AFR}_{\text{aktual}} &= \frac{202,5266 \text{ mL/min} \times \rho_{\text{air}}}{6,5538 \text{ mL/min} \times \rho_{\text{butane}}} \\ &= \frac{202,5266 \text{ mL/min} \times 1,184 \text{ kg/m}^3}{6,5538 \text{ mL/min} \times 2,48 \text{ kg/m}^3} \\ &= \frac{202,5266 \text{ mL/min} \times 0,001184 \text{ kg/L}}{6,5538 \text{ mL/min} \times 0,00248 \text{ kg/L}} \\ &= \frac{202,5266 \text{ mL/min} \times 0,001184 \text{ g/mL}}{6,5538 \text{ mL/min} \times 0,00248 \text{ g/mL}} \\ &= \frac{0,2398 \text{ g/min udara}}{0,0163 \text{ g/min butana}} \\ &= \frac{0,0002398 \text{ kg udara}}{0,0000163 \text{ kg butana}} \\ &= 14,71 \frac{\text{kg udara}}{\text{kg butana}} \end{aligned}$$

3. Rasio ekuivalen (ϕ)

Perhitungan rasio ekuivalen merupakan perbandingan antara AFR stoikiometri dengan AFR aktual, adapun rumus equivalen rasio sebagai berikut:

Adapun rumus untuk menghitung *equivalent ratio*, adalah sebagai berikut:

$$\phi = \frac{\text{AFR}_{\text{stoic}}}{\text{AFR}_{\text{actual}}} \quad (2.4)$$

Keterangan :

ϕ : *equivalent ratio*

$\text{AFR}_{\text{stoic}}$: rasio udara bahan bakar pada kondisi stoikiometri

$\text{AFR}_{\text{actual}}$: rasio udara bahan bahan bakar pada kondisi aktual

dengan hasil perhitungan sebelumnya maka dapat dilakukan perhitungan dengan persamaan sebagai berikut.

a. Diketahui :

➤ Air Fuel Ratio (AFR) :

- $AFR_{\text{stoikiometri}} = 0,4983 \frac{\text{kg udara}}{\text{kg butana}}$
- $AFR_{\text{aktual}} = 14,71 \frac{\text{kg udara}}{\text{kg butana}}$

b. Ditanya :

➤ Rasio ekuivalen (ϕ)

c. Penyelesaian :

➤ Rasio ekuivalen (ϕ)

$$\begin{aligned}
 \phi &= \frac{AFR_{\text{stoikiometri}}}{AFR_{\text{aktual}}} \\
 &= \frac{0,4983}{14,71} \\
 &= 0,03
 \end{aligned}$$

Jadi, Pembakaran pada debit butana 6,5538 mL/min dan debit udara 202,5266 mL/min adalah pembakaran dengan rasio <1 atau pembakaran campuran miskin bahan bakar.

4. Kecepatan Reaktan (V_{reak})

Perhitungan kecepatan reaktan digunakan sebagai acuan pada perbandingan energi yang dihasilkan tiap masing-masing variasi rasio diameter combustor. kecepatan reaktan yang dihitung pada saat aliran reaktan berada di ruang bakar. Berikut adalah salah satu contoh perhitungan yang dilakukan untuk mencari kecepatan aliran reaktan pada ruang bakar meso-scale combustor.

a. Diketahui :

➤ Debit bahan bakar, udara dan diameter ruang bakar :

- $Q_a = 202,53 \text{ ml/min}$
- $Q_f = 6,55 \text{ ml/min}$
- $D_{\text{out}} = 4,7 \text{ mm}$

b. Ditanya :

➤ V_{reak} (cm/s)

c. Penyelesaian :

➤ V_{reak} (cm/s)

$$\begin{aligned} \bullet \quad V_{reak} &= \frac{\left(\frac{Qa + Qf}{60} \right)}{\left(\frac{p \times l}{100} \right)} \\ &= \frac{\left(\frac{202,53 + 6,55}{60} \right)}{\left(\frac{4,7 \times 4,7}{100} \right)} \\ &= 15,77 \text{ cm/s} \end{aligned}$$



