



**STUDY NUMERIK KARAKTERISTIK PEMBAKARAN
DENGAN VARIASI MATERIAL COMBUSTOR
SKALA MESO**

Skripsi

Oleh:
Ahmad Sa'dul Kholqi
NIM 151910101060

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2019**



**STUDY NUMERIK KARAKTERISTIK PEMBAKARAN
DENGAN VARIASI MATERIAL COMBUSTOR
SKALA MESO**

Skripsi

diajukan guna melengkapi skripsi dan memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Mesin (S1) dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh:

**Ahmad Sa'dul Kholqi
NIM 151910101060**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2019**

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan kepada:

1. Ibunda dan ayahanda tercinta yang telah memberikan kasih sayang dan dukungan tiada henti.
2. Keluarga yang memberi semangat dan motivasi.
3. Bapak, Andi Sanata S.T., M.T. dan Ibu Rika Dwi Hidayatul Qoryah, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing;
4. Dosen dan Staf Jurusan Teknik Mesin Universitas Jember.
5. Guru-guru dalam sekolah formal maupun non-formal yang telah memberikan banyak ilmu yang bermanfaat.
6. Teman-teman dan rekan-rekan yang memberi semangat dan motivasi.
7. Almamater Universitas Jember.

MOTO

“Hidup itu, sejak lahir hingga mati adalah Kuliah tanpa bangku”

(KH Hamim Djazuli)



PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Ahmad Sa'dul Kholqi

NIM : 151910101060

Menyatakan dengan sungguh – sungguh bahwa karya ilmiah yang berjudul “Study Numerik Karakteristik Pembakaran dengan Variasi Material Combustor skala Meso” adalah benar – benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi mana pun, dan 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 ada tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 11 Juli 2019

Yang Menyatakan,

Ahmad Sa'dul Kholqi

NIM 1519101060

SKRIPSI

STUDY NUMERIK KARAKTERISTIK PEMBAKARAN DENGAN VARIASI
MATERIAL COMBUSTOR SKALA MESO

Oleh

Ahmad Sa'dul Kholqi

NIM 151910101060

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Andi Sanata, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Rika Dwi Hidayatul Qoryah, S.T., M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Study Numerik Karakteristik Pembakaran Dengan Variasi Material Combustor Skala Meso” karya Ahmad Sa’dul Kholqi telah diuji dan disahkan pada:

Hari, tanggal : Kamis, 11 Juli 2019

Tempat : Ruang Ujian II, Lantai III Dekanat, Fakultas Teknik

Pembimbing

Pembimbing I

Andi Sanata, S.T., M.T.
NIP. 197505022001121001

Pembimbing II

Rika Dwi Hidayatul Q., S.T., M.T.
NIP. 760014642

Penguji

Penguji I

Dr Nasrul Ilminnafik, S.T, M.T.
NIP. 197111141999031002

Penguji II

Ir Dwi Djumhariyanto, M.T.
NIP. 196008121998021001

Mengesahkan
Dekan Fakultas Teknik,
Universitas Jember

Dr. Entin Hidayah, M. UM.
NIP. 196612151995032001

RINGKASAN

Study Numerik Karakteristik Pembakaran dengan Variasi Material Combustor skala Meso Ahmad Sa'dul Kholqi, 151910101060; 36 halaman; Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Micro Power Generator (MPG) adalah solusi untuk penggunaan piranti elektronik *portabel* yang menawarkan waktu *recharging* lebih cepat dan densitas energi yang lebih tinggi dibandingnng baterai. Pembakaran skala *meso* memiliki permasalahan berupa *stability limit* dimana batas api dapat menyala dan tidak *flashback* atau *blow-off*. Untuk meningkatkan kestabilan api dapat di perbaiki dengan *preheating* yang dapat diperoleh dengan resirkulasi panas. Resirkulasi panas dari pembakaran dapat dipengaruhi oleh konduktivitas termal (Zhou dkk., 2009). Semakin tinggi konduktivitas termal maka akan menghasilkan resirkulasi panas yang baik. *Computational fluid dynamics* (CFD) merupakan salah satu metode validasi yang digunakan untuk meneliti kestabilan pembakaran berskala mikro dan meso. Tahapan validasi pada proses pembakaran mikro yang telah dirancang dapat diteliti dan dioptimalkan melalui CFD. Karakteristik pembakaran *meso* sulit untuk dianalisis akibat keterbatasan alat ukur. Keterbatasan alat ukur mendorong penggunaan CFD untuk meneliti permasalahan ini. Metode penelitian yang digunakann adalah metode simulasi dengan menggunakan *software* ansys fluent. Simulasi dengan 2D digunakan dalam penelitian ini. Untuk mengetahui reaksi kimia yang terjadi dilakukan menggunakan metode *species transport*, dan *stiff chemistry solver* untuk mengetahui reaksi pembakaran yang terjadi. pembakaran menggunakan bahan bakar butane dengan *equivalent ratio* 1 dan kecepatan masuk 32 m/s. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Combustor copper* memiliki resirkulasi panas yang baik dan memiliki temperatur *axial inlet* (T_x) lebih tinggi disbanding combustor lainnya. Perbedaan properties termal akan mengakibatkan perbedaan distribusi temperature. Perbedaan ini akan mempengaruhi kecepatan aliran dan posisi *heat reactiaon*.

SUMMARY

Numerical Study Of Characteristics Combustion With Variation Meso Scale Combustor Material; Ahmad Sa'dul Kholqi, 151910101060; 2018; 36 pages; Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Micro Power Generator (MPG) is a solution for the use of portable electronic devices that offer faster recharging time and higher energy density compared to batteries. The meso scale combustion has a problem in the form of a stability limit where the fire limit can be lit and not flashback or blow-off. To improve the stability of the fire, it can be improved by preheating which can be obtained by heat reculation. Heat recirculation from combustion can be influenced by thermal conductivity (Zhou et al., 2009). The higher the thermal conductivity it will produce good heat recirculation. Computational fluid dynamics (CFD) is one of the validation methods used to examine micro and meso scale combustion stability. The stages of validation in the micro combustion process that has been designed can be researched and optimized through CFD. The characteristics of meso combustion are difficult to analyze due to the limitations of measuring instruments. Limitations of measurement tools encourage the use of CFDs to examine this issue. The research method used is a simulation method using ansys fluent software. 2D simulations are used in this study. To find out the chemical reaction that occurs is done using the species transport method, and the stiff chemistry solver to find out the burning reaction that occurs. combustion uses butane fuel with an equivalent ratio of 1 and an entry speed of 32 m / s. The results showed that Combustor copper had good heat recirculation and had a higher axial inlet (Tx) temperature than other combustors. Differences in thermal properties will result in differences in temperature distribution. This difference will affect the flow speed and heat reactiaon position.

PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Allah SWT, atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Study Numerik Karakteristik Pembakaran dengan Variasi Material Combustor skala Meso”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Bapak, Andi Sanata S.T., M.T. dan Ibu Rika Dwi Hidayatul Qoryah, S.T., M.T selaku Dosen Pembimbing;
2. Bapak Dr Nasrul Ilminnafik S.T, M.T. dan bapak Ir Dwi Djumhariyanto, M.T. selaku dosen penguji.
3. Ayah, Ibu, Adik-adik, dan keluarga yang telah memberikan dukungan non – materiil dan materiil;
4. Guru- guru yang telah memeberikan ilmu yang bermanfaat.
5. Teman-teman yang telah membantu, memberi semngat, motivasi, dan dukungan.
6. Civitas akademika Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Jember, 11 Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

Cover	i
Halaman Judul	ii
PERSEMBAHAN	iii
MOTO	iv
PERNYATAAN	v
SKRIPSI	vi
PENGESAHAN	vii
RINGKASAN	viii
SUMMARY	ix
PRAKATA	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan masalah	2
1.3 Batasan masalah.....	2
1.4 Tujuan penelitian	2
1.5 Manfaat penelitian.....	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Sistem tenaga mikro (Micro Power Generator).....	4
2.1.1 <i>Termo-photovoltaik (TPV)</i>	4
2.1.2 Mekanisme <i>Micro Power Generator</i>	5
2.1.3 Pembakaran Skala Kecil.....	6
2.2 Pembakaran	6
2.6.1. Klasifikasi pembakaran berdasarkan campuran bahan bakar	7
2.6.2. Rasio udara dan bahan bakar (AFR).....	7
2.6.3. <i>Equivalence ratio</i>	8
2.6.4. <i>Stability Limit</i>	8
2.3 Aliran Fluida.....	9

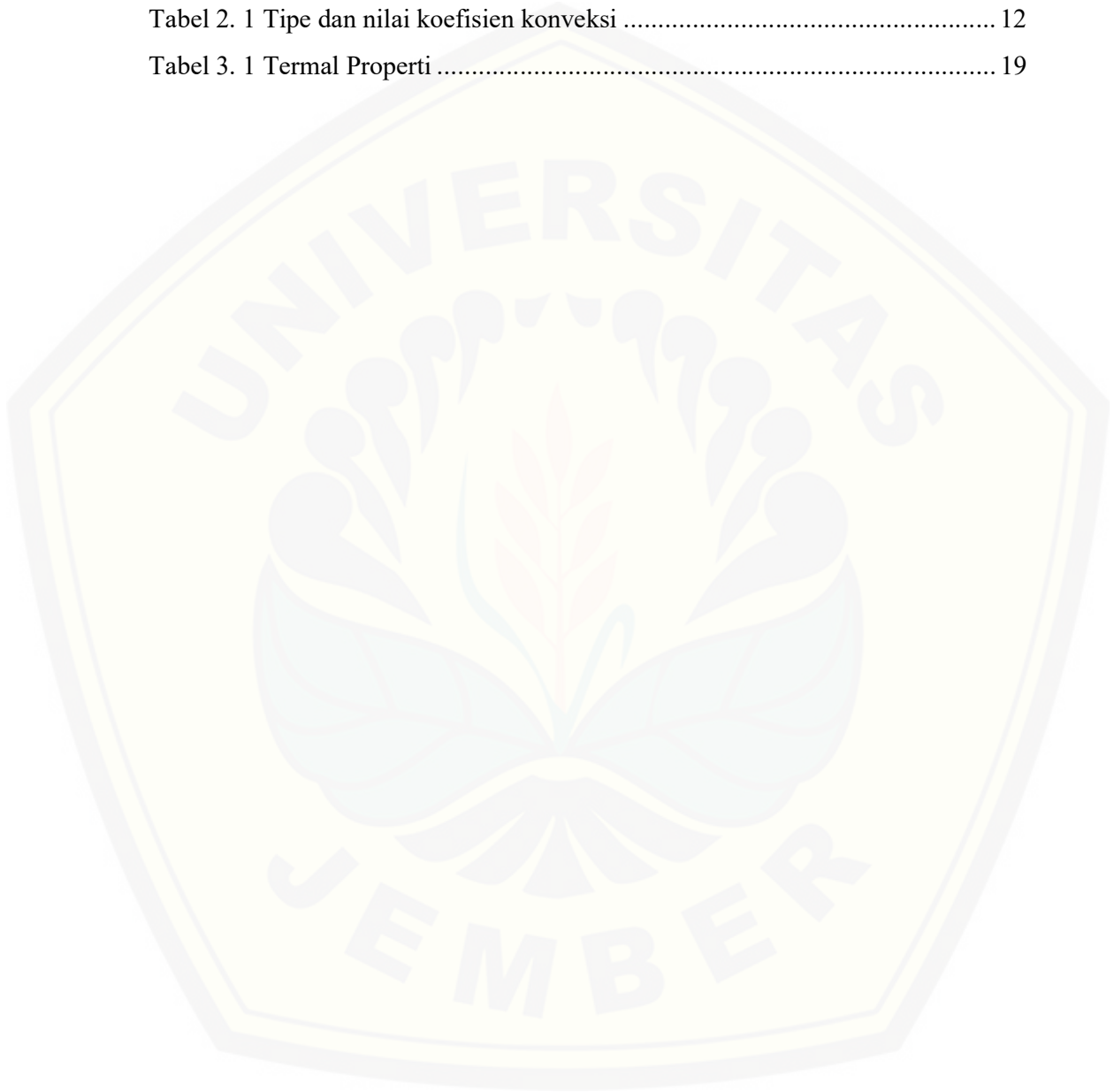
2.4 Material <i>Combustor</i>	10
2.5 <i>Computational Fluid Dynamics</i> (CFD).....	13
2.6 Proses simulasi.....	14
2.6.1. Pembuatan geometri	14
2.6.2. Meshing.....	14
2.6.3. Pendefinisian sifat fisis dan fluid propertis.....	15
2.6.4. Menentukan kondisi batas.....	16
2.6.5. <i>Solver</i>	16
2.6.6. <i>Postprosesing</i>	17
2.7 Penelitian Pembakaran sebelumnya.....	17
2.8 Hipotesis.....	18
BAB 3. METODOLOGI	19
3.1. Metode Penelitian.....	19
3.2. Waktu Penelitian dan Tempat Penelitian	19
3.3. Variabel Penelitian	19
3.3.1 Variable Bebas	19
3.3.2 Variabel Terikat.....	20
3.3.3 Variabel kontrol.....	20
3.4. Alat Penelitian.....	21
3.5. Prosedur Penelitian.....	21
3.6. Diagram Alir	25
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	26
4.1. Hasil simulasi <i>meso combustion</i>	26
4.2. Distribusi Temperatur.....	26
4.3. Fenomena aliran.....	31
4.4. <i>Heat reaction</i>	32
BAB 5. PENUTUP	35
5.1. Kesimpulan	35
5.2. Saran.....	36
DAFTAR PUSTAKA	37
LAMPIRAN	39

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Densitas energi dengan beberapa system.....	4
Gambar 2. 2 Mekanisme <i>TPV</i>	5
Gambar 2. 3 Mekanisme <i>MPG</i>	5
Gambar 2. 4 Aliran <i>Sudden Ekspansion</i>	10
Gambar 2. 5 <i>Kerangka interkoneksi tiga elemen utama dalam analisis</i>	13
Gambar 2. 6 Geometri asli dan geometri simulasi	14
Gambar 2. 7 Diagram alir dari beberapa variasi.....	15
Gambar 2. 8 Prosedur solusi	16
Gambar 3. 1 Geometri <i>Combustor</i> dan skema simulasi	20
Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian	25
Gambar 4. 1 <i>Mesh</i>	26
Gambar 4. 2 Kontur Temperatur	27
Gambar 4. 3 Grafik korelasi jarak dari <i>inlet</i> terhadap temperatur dinding luar ..	28
Gambar 4. 4 Grafik korelasi jarak dari <i>inlet</i> dengan <i>heat flux</i>	29
Gambar 4. 5 Grafik korelasi jarak <i>inlet</i> terhadap temperatur <i>axial</i>	30
Gambar 4. 6 <i>Patch line velocity</i>	31
Gambar 4. 7 Kontur <i>heat reaction</i>	32
Gambar 4. 8 Grafik korelasi jarak dari <i>inlet</i> terhadap <i>heat reaction</i>	33

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Tipe dan nilai koefisien konveksi	12
Tabel 3. 1 Termal Properti	19



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Micro Power Generator (MPG) adalah sebuah piranti untuk mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi listrik dengan memanfaatkan pembakaran skala *meso* pada *meso combustor*. MPG digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik perangkat elektronik portable. Kelemahan baterai litium sebagai pemasok energi adalah biaya produksi yang mahal dan waktu isi ulang lama. Kelemahan dari penggunaan baterai litium yaitu dapat memberi pilihan untuk beralih MPG yang efisien untuk memasok perangkat *portable*. MPG berbahan bakar hidrokarbon memungkinkan untuk waktu pengisian yang cepat dan memiliki densitas energi yang tinggi. Kepadatan energi sistem MPG dengan *meso combustor* diperkirakan mencapai 10Wh/kg (Chigier dan Gemci, 2013).

Pembakaran skala *meso* memiliki permasalahan berupa *stability limit* dimana batas api dapat menyala dan tidak *flashback* atau *blow-off*. Parameter *stability limit* adalah *Equivalent ratio* dan kecepatan masuk reaktan. Raimondeau dkk, (2002), menggunakan *software Computational Fluid Dynamic* (CFD) untuk meneliti pembakaran metana (CH_4) dalam *micro combustor tube* dua dimensi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *preheating* dapat meningkatkan kestabilan. Efek *preheating* dapat diperoleh dengan resirkulasi panas. Resirkulasi panas dari pembakaran dapat dipengaruhi oleh konduktivitas termal (Zhou dkk., 2009). Semakin tinggi konduktivitas termal maka akan menghasilkan resirkulasi panas yang baik. Konduktivitas termal yang tinggi akan meningkatkan *heat loss* dan menyebabkan api mudah padam (Kaisare dkk., 2008). *Heat losses* dapat dipengaruhi oleh koefisien konveksi, emisivitas dan beda temperatur sehingga dapat mengakibatkan pendinginan termal pada dinding *combustor*.

Computational fluid dynamics (CFD) merupakan salah satu metode validasi yang digunakan untuk meneliti kestabilan pembakaran berskala mikro dan meso. Tahapan validasi pada proses pembakaran mikro yang telah dirancang dapat diteliti

dan dioptimalkan secara menyeluruh (Kurdyumov dkk., 2009). Karakteristik pembakaran *meso* sulit untuk dianalisis akibat keterbatasan alat ukur. Keterbatasan alat ukur mendorong penggunaan CFD untuk meneliti permasalahan ini.

Berdasarkan penelitian sebelumnya, dapat diperoleh data dan referensi pendukung berupa geometri dan *stability limit*. Penelitian ini mencoba meneliti tentang pengaruh jenis material *combustor* berskala *meso* dengan metode simulasi CFD. Metode CFD berfungsi untuk mengetahui karakter termal dari pembakaran.

1.2 Rumusan masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Bagaimana hasil perbandingan *combustor* dengan material yang berbeda terhadap distribusi termal pembakaran?
- b. Bagaimana hasil perbandingan *combustor* dengan material yang berbeda terhadap pola kecepatan aliran?
- c. Bagaimana hasil perbandingan *combustor* dengan material yang berbeda terhadap *heat reaction*?

1.3 Batasan masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Geometri tetap dan tidak membahas pengaruh besar *expantion ratio*.
- b. Penelitian ini tidak meneliti *flammability*.
- c. Material *combustor quartz glass, stainless steel*, dan tembaga (Cu).
- d. Bahan bakar butana dan udara.
- e. *Equivalen ratio* dan kecepatan masuk tetap.

1.4 Tujuan penelitian

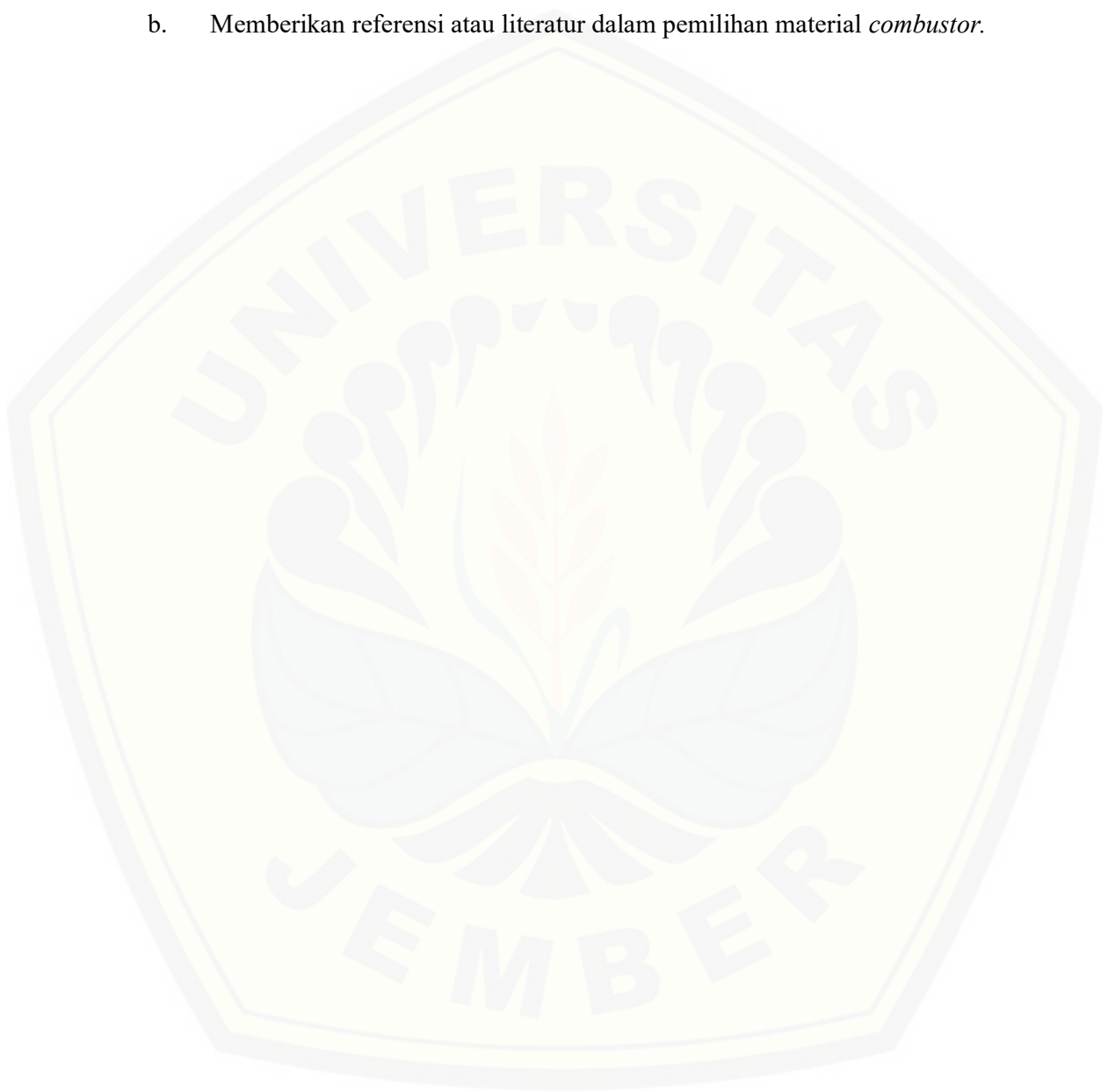
Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Untuk mengetahui pengaruh material terhadap karakter distribusi termal pembakaran.
- b. Untuk mengetahui pengaruh material terhadap pola kecepatan aliran.
- c. Untuk mengetahui pengaruh material terhadap *heat reaction*.

1.5 Manfaat penelitian

Manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut :

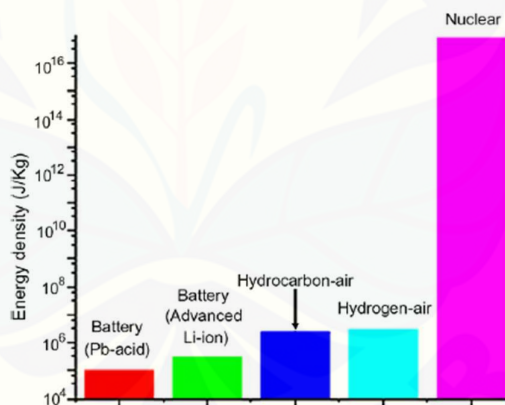
- a. Ikut serta dalam pengembangan penelitian pembakaran berskala *meso*.
- b. Memberikan referensi atau literatur dalam pemilihan material *combustor*.



BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem tenaga mikro (Micro Power Generator)

Micro Power Generator (MPG) adalah alternatif pensupai energi listrik sekala kecil dengan bahan bakar hidrogen atau hidrokarbon. Hidrogen dan hidrokarbon dipilih sebagai penyimpan energi karena memiliki densitas energi yang tinggi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Penelitian sebelumnya tentang *Micro-electromechanical system* (MEMS) diharapkan menghasilkan efisiensi tinggi akan tetapi pada kenyataannya masih memiliki efisiensi yang relatif rendah. Sistem tenaga mikro berbasis pembakaran telah berhasil dibuat prototipe, termasuk turbin gas mikro, perangkat termoelektrik mikro, dan sistem mikro *thermo-photovoltaik* (TPV).

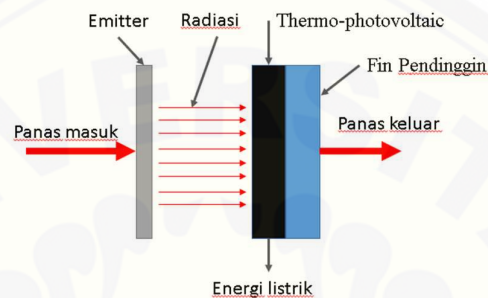


Gambar 2.1 Densitas energi dengan beberapa sistem (Chou dkk., 2011)

2.1.1 *Thermo-photovoltaik* (TPV)

Thermo-photovoltaic (TPV) merupakan perangkat yang dapat mengubah energi panas menjadi energi listrik secara langsung dengan memanfaatkan sifat-sifat dari material tertentu. TPV dapat bekerja ketika terdapat perbedaan temperatur yang terjadi di kedua sisi. Temperatur kerja antara 800-1700°C memungkinkan diaplikasikan dalam *micro power generator* dengan memanfaatkan panas dari reaksi pembakaran.

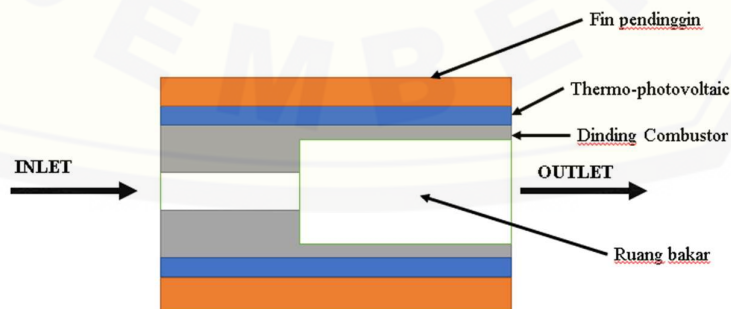
Mekanisme TPV mengubah energi panas menjadi radiasi dan ditangkap oleh elemen *photovoltaic* (PV). Element PV akan merubah hasil radiasi menjadi energi listrik dan sebagian panas akan di buang (Mustafa dkk., 2017). Mekanisme TPV diilustrasikan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Mekanisme TPV

2.1.2 Mekanisme *Micro Power Generator*

Micro Power generator (MPG) adalah generator yang mengubah energi panas menjadi energi listrik. Mekanisme kerja MPG dijelaskan pada Gambar 2.3. Bahan bakar dan udara dimasukkan kedalam ruang bakar melalui saluran *inlet*. Reaksi pembakaran akan terjadi di ruang bakar. Panas yang dihasilkan dari pembakaran dipindahkan menuju perangkat TPV yang ada di luar *combustor*. Sel TPV bagian luar diberikan pendingin berupa fin pendingin yang dapat menjaga temperatur TPV.



Gambar 2. 3 Mekanisme MPG

2.1.3 Pembakaran Skala Kecil

Pembakaran skala kecil diklasifikasikan menurut ukuran menjadi beberapa macam diantaranya:

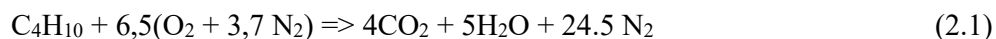
- a. Pembakaran mikro adalah pembakaran dengan diameter *combustor* kurang dari 1 mm.
- b. Pembakaran skala meso adalah pembakaran dengan diameter *combustor* 1-10mm.
- c. Pembakaran skala makro adalah pembakaran dengan diameter *combustor* lebih dari 10 mm.

Mempertahankan api dalam pembakaran skala kecil merupakan suatu fenomena yang menarik. Pembakaran skala kecil bergantung pada volume dan luas permukaan *combustor* atau rasio *surface to volume* (S/V) rasio. Karena nilai (S/V) rasio yang besar dapat menyebabkan *heat loss* dalam pembakaran (Ju dan Maruta, 2011).

2.2 Pembakaran

Pembakaran merupakan merupakan proses reaksi kimia rumit, dimana terputusnya ikatan ion dari reaktan dan tersusun ulang menjadi produk baru. Reaksi oksidasi terjadi cepat dari bahan bakar dan oksidator yang menghasilkan energi. Terdapat tiga elemen kimia yang mudah terbakar karbon, hidrogen dan sulfur (Bejan, A., 1996). Pembakaran dikatakan sempurna jika terdapat pasokan oksigen dan bahan bakar yang cukup untuk dirubah semua menjadi karbondioksida dan uap air. Oksigen (O₂) merupakan salah satu unsur yang ada di udara bebas dengan kadar sekitar 21% dan Nitrogen dengan kadar sekitar 79%. Nitrogen dapat mengurangi efisiensi pembakaran karena bercampur dengan oksigen menjadi nitrogen oksida (NO_x) yang menghasilkan polusi sisa pembakaran.

Reaksi pembakaran bahan bakar



2.6.1. Klasifikasi pembakaran berdasarkan campuran bahan bakar

a. *Non-premixed*

Pembakaran *non-premixed* adalah pembakaran dengan kondisi tanpa adanya pencampuran udara dan bahan bakar terlebih dahulu. Udara dan bahan bakar bercampur secara langsung diruang bakar.

b. *Premixed*

Pembakaran *premixed* adalah pembakaran dengan kondisi bahan bakar dan udara bercampur terlebih dahulu sebelum memasuki ruang bakar. Pembakaran ini terdapat alat tambahan berupa *mixer* atau pencampur udara dan bahan bakar.

Pembakaran dapat berlangsung secara sempurna atau tidak sempurna. Pembakaran sempurna terjadi ketika reaktan secara keseluruhan terbakar dengan oksidator dan menghasilkan energi panas, karbondioksida dan uap air. Pembakaran sempurna tidak mungkin terjadi dalam kehidupan nyata. Pembakaran tidak sempurna disebabkan oleh jumlah oksigen tidak mencukupi dalam proses pembakaran bahan bakar sehingga dihasilkan zat sisa pembakaran berupa karbon monoksida dan jelaga yang merupakan zat yang berbahaya bagi kesehatan manusia. Zat sisa berupa karbon monoksida harus dihindari. Kecepatan pembakaran dari bahan bakar berkisar 20-200 cm/s dengan rata-rata bahan bakar hidrokarbon 40 cm/s (Glassman & Yetter, 2008).

2.6.2. Rasio udara dan bahan bakar (AFR)

Parameter yang sering digunakan untuk memberikan kuantifikasi jumlah bahan bakar dan udara di dalam proses pembakaran tertentu adalah rasio udara-bahan bakar dan kebalikannya rasio bahan bakar-udara. Rasio udara dan bahan bakar singkatnya adalah rasio jumlah udara di dalam sebuah reaksi terhadap jumlah bahan bakar. Rasio ini dapat dituliskan dengan basis molar (mol udara dibagi dengan mol bahan bakar) atau dengan basis massa (massa udara dibagi dengan massa bahan bakar), yang ditunjukkan pada Persamaan 2.2.

$$AFR = \frac{m_a}{m_f} \quad (2.2)$$

dengan,

AFR = Air Fuel Ratio ($g_{\text{udara}}/g_{\text{bahanbakar}}$)

m_a = massa udara (g_{udara})

m_f = massa bahan bakar ($g_{\text{bahanbakar}}$)

2.6.3. *Equivalence ratio*

Equivalence ratio merupakan nilai perbandingan antara rasio campuran bahan bakar dan udara stoikiometri terhadap rasio campuran udara dan bahan bakar aktual. Menurut nilai *Equivalence ratio*, jenis campuran udara dan bahan bakar dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis yaitu:

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

$$\Phi = \frac{AFR_s}{AFR_a} \quad (2.3)$$

dengan,

Φ = *Equivalence ratio*

AFR_s = Air Fuel Ratio stoikiometri

AFR_a = Air Fuel Ratio aktual

2.6.4. *Stability Limit*

Stability limit adalah batas dimana api dapat menyala. Api yang terbentuk dalam proses pembakaran merupakan hasil dari pelepasan dari energi panas hasil reaksi pembakaran. Api dapat terbentuk apabila terdapat bahan bakar yang bercampur dengan oksidator mendapatkan penambahan energi eksternal untuk mengawali terjadinya reaksi pembakaran. Kisaran batas *Equivalence ratio* antara bahan bakar dan udara agar terbentuk api.

- Lower Flammability limit* (LFL) merupakan *Equivalence ratio* terendah dimana campuran bahan bakar dan udara yang mudah terbakar mudah terbakar.

- b. *Upper Flammability Limit* (UFL) merupakan *Equivalence ratio* tertinggi di mana campuran bahan bakar dan udara yang mudah terbakar mudah terbakar
- c. *Limiting Oxygen Concentration* (LOC) merupakan *Equivalence ratio* minimum oksigen yang dibutuhkan untuk menghasilkan peristiwa yang mudah terbakar ketika dicampur dengan uap atau gas yang mudah terbakar dalam konsentrasi apapun.

Pembakaran dapat stabil jika terdapat campuran udara dan bahan bakar yang tepat. Perbedaan *Equivalence ratio* menyebabkan kecepatan rambat api (S_L) yang berbeda. Api dapat stabil jika kecepatan reaktan (V_u) sama dengan kecepatan rambat api (S_L). Api *flash back* dapat dihasilkan apabila kecepatan reaktan (V_u) lebih rendah dibandingkan kecepatan rambat api (S_L) (Scharler, 2018). Api flashback ini sangat dihindari karena dapat menimbulkan ledakan. Jika kecepatan rambat api lebih rendah akan menimbulkan *blow-off* atau api akan keluar atau menyentuh *outlet combustor*.

2.3 Aliran Fluida

Fluida merupakan zat alir atau material yang dapat mengalir. Aliran fluida ada dua jenis yaitu aliran fluida laminar dan aliran fluida turbulen. Aliran fluida laminar merupakan aliran fluida yang memiliki arah aliran yang sama sedangkan aliran fluida turbulen merupakan aliran fluida yang memiliki arah tidak beraturan. Tingkat turbulen dinyatakan dalam bilangan *Reynolds number*. *Reynolds number* dalam pipa dipengaruhi oleh densitas massa, kecepatan, diameter pipa, dan viskositas. Aliran fluida dipengaruhi oleh viskositas berupa kecepatan aliran di tiap titik layer yang dapat memungkinkan setiap layer memiliki kecepatan aliran yang berbeda-beda.

$$Re = \rho \frac{VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (2.4)$$

Dengan

Re = Renold number

ρ = densitas

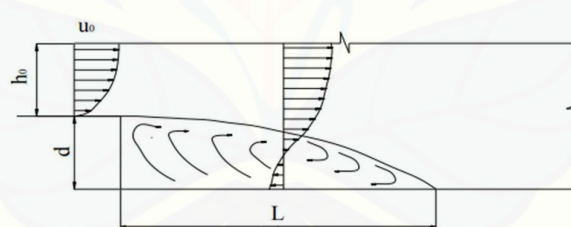
V = kecepatan aliran

L = panjang karakteristik

μ = Viskositas absolut

ν = viskositas kinematik

Aliran fluida memiliki beberapa fenomena misalnya aliran fluida *sudden expansion*. Fenomena Aliran fluida *sudden expansion* merupakan aliran fluida dengan pembesaran secara tiba-tiba. *Sudden expansion* juga dapat difungsikan sebagai *flame holder* dalam pembakaran *premixed*. Aliran fluida *sudden expansion* yang laminar sebelumnya dapat membentuk vortex atau pusaran aliran pada sudut *expansion*. Gambar 2.4 menjelaskan tentang arah aliran *sudden expansion*. Aliran yang semula satu arah jika diberi *sudden expansion* akan terjadi perubahan arah di bagian tertentu. Panjang zona *vortex* ini disebut *Reattachment Length* (L). *Reattachment length* dapat berkurang jika zona pusaran tersebut diberikan kalor sehingga zona tersebut dapat mengecil. Zona *vortex* ini dapat mendorong api menjauhi bibir *expansion* dan mencegah api *flashback* dalam pembakaran *premixed*. Akan tetapi jika area ini terlalu besar akan mempengaruhi kestabilan api.



Gambar 2.4 Aliran *Sudden Expansion*

2.4 Material Combustor

Pemilihan material *combustor* dapat mempengaruhi proses pembakaran skala *meso* karena setiap material memiliki *properties* yang berbeda-beda. *Properties* material terdiri dari masa jenis, kapasitas termal, konduktivitas termal dan emisivitas. Massa jenis merupakan perbandingan massa terhadap volume material. Jika massa jenis lebih tinggi maka diperlukan energi yang lebih besar untuk meningkatkan temperature material. Kasus pembakaran *micro* konduktivitas dapat mempengaruhi besar temperature dinding luar dan mempengaruhi *heat loss* yang terjadi pada permukaan menuju lingkungan.

2.4.1. Kapasitas termal

Kapasitas termal adalah energi yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur. Nilai kapasitas termal bergantung pada jenis material. Semakin tinggi nilai kapasitas termal (C) maka dibutuhkan energi yang lebih besar untuk menaikkan temperature satu kelvin dengan massa yang sama.

$$Q = m C \Delta T \quad (2.5)$$

dengan,

Q = energi yang diperlukan (Joule)

C = kapasitas panas (J/Kg K)

m = massa (kg)

ΔT = beda temperatur (K)

2.4.2. Konduksi

Konduksi merupakan perpindahan panas dari daerah temperatur tinggi ke daerah temperatur rendah tanpa disertai perpindahan partikel, terjadi pada benda padat. Konduksi sangat dipengaruhi oleh konduktivitas termal (k). Dalam persamaan 4.6 *konduktivitas termal* merupakan sebuah konstanta dari material yang konstan.

$$Q = kA\left(\frac{\Delta T}{L}\right) \quad (2.6)$$

Dengan,

Q = perpindahan panas (W)

k = konduktivitas termal (W/m K⁻¹)

A = luasan penampang (m²)

ΔT = beda temperature (K)

L = jarak (m)

2.4.3. Konveksi

Konveksi adalah sebuah perpindahan panas dari dinding padatan menuju fluida yang mengalir sebagai pengangkut energi. Laju perpindahan panas sangat dipengaruhi oleh kecepatan aliran dan turbulensi (Bejan A., 1996). Persamaan 2.7 untuk mencari hubungan antara q'' laju transfer panas (*heat flux*) terhadap beda

- d. Oksidator udara.
- e. *Ekuivalent ratio* 1.
- f. Kecepatan *inlet* 0,32 m/s pada *combustor* 1,6 m/s.
- g. Temperatur reaktan 300 K
- h. *Patch* temperatur 1500 K.
- i. Temperatur lingkungan 300 K
- j. Koefisien perpindahan panas konveksi kelilingkungan 20 W/m²K.

3.4. Alat Penelitian

Dalam penelitian kali ini digunakan alat pendukung penelitian sebagai berikut. Personal Copunter

Prosesor	: AMD A8-6410 APU-R5 (4 core) 2.0Ghz
RAM	: DDR3 8GB
HDD	: 250 GB
OS	: Windows 10 v 1809 64-bit
Software	: Ansys19 R1 <i>Academic Version</i>

3.5. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dilakukan beberapa tahapan sebagai berikut

- a. Studi literatur
Studi literatur dilakukan dari beberapa buku dan jurnal ilmiah dan penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan pembakaran skala micro dan pembakaran.
- b. Simulasi pembakaran menggunakan ansys fluent pemodelan *spesies transport*.
 - 1) Geometetri
Gemoetri ditentukan dengan besar diameter input 3,3 mm, diameter output 4,7 mm, panjang inlet adalah 20 mm, panjang ruang bakar adalah 10 mm dan tebal *combustor* 1,15 mm, untuk lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 3.1. pembuatan geometri pada simulasi menggunakan geometri 2 dimensi. menggunakan smiulasi metode *Steady state* dari persamaan dasar (kontinuitas, momentum, energi, dan

spesies) diselesaikan dengan metode volume hingga menggunakan metode *under relaxation*, untuk mencapai penggabungan kecepatan tekanan, algoritma SIMPLE.

2) Persamaan yang digunakan

Persamaan persamaan yang digunakan dalam simulasi ini akan diuraikan pada persamaan 3.1 sampai dengan 3.11.

a) Perasmaan *Conservation of mass*.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3.1)$$

Dengan :

ρ = Masa jenis

\vec{v} = Kecepatan

b) Perasmaan *Conservation of momentum*.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \overline{\rho \vec{g}} + \vec{F} \quad (3.2)$$

dengan :

p = Tekanan statistik

$\bar{\tau}$ = Stress tensor

$\overline{\rho \vec{g}}$ = Gaya gravitasi

\vec{F} = Gaya eksternal

c) Stress tensor

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3.3)$$

dengan :

μ = Viscositas

I = Unit tensor

d) Persamaan Energi

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j h + F_{hj}) = u_j \frac{\delta p}{\delta x_j} + \tau_{ij} \frac{\delta u_i}{\delta x_j} \quad (3.4)$$

dengan :

h = *Enthalpy* komposisi gas

F_{hj} = Aliran energi dari arah x_j

τ_{ij} = Stress tensor

u_j = Komponen kecepatan aliran

ρ = Masa jenis.

e) Persamaan perpindahan Energi pada dinding ke lingkungan.

$$q'' = h(T_\infty - T_s) + \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (3.5)$$

dengan :

q'' = heat flux

H = koefisien konveksi

ε = *Emissivitas*

σ = Konstanta Stefan – Boltzmann

f) Persamaan gas ideal

$$p = \rho R_0 T \sum \frac{m_i}{M_i} \quad (3.6)$$

dengan :

R_0 = *Universal Gas Constant*;

M_i = masa molar dari spesies i.

g) Persamaan *species transport*

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i \quad (3.7)$$

dengan :

Y_i = Faksi massa spesies i.

R_i = Tingkat produksi total dari species i melalui reaksi kimia.

\vec{J}_i = Aliran *diffusion species* i.

μ_t = *viskositas turbulent*

D_t = *turbulent diffusivity*

$D_{i,m}$ = koefisien difusi massa dari *spesies* i

$D_{T,i}$ = *Koefficient* difusi termal.

h) Difusi masa aliran laminer

$$\vec{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}\right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (3.8)$$

dengan :

Sc_t = Schmidt number $\left(\frac{\mu_t}{D_t}\right)$

3) Pembuatan mesh

Pembuatan mesh (meshing) adalah proses pembagian geometri menjadi bagian yang lebih kecil. Mesh terbagi dalam beberapa elemen dan beberapa node. Kuantitas mesh dapat diketahui dari jumlah elemen dan jumlah node semain banyak dapat dikatakan mesh semakin baik. Disilain Jumlah elemen yang banyak mengakibatkan waktu komputasi yang lama. Tetapi jumlah yang elemen yang sedikit mengakibatkan akurasi rendah. Mesh perlu untuk mendapatkan jumlah mesh yang ideal dalam mesh. Pemabagian elemen sekitar 0.05 mm untuk mendapatkan nilai yang bagus.

4) Menentukan batas kondisi

Batas kondisi diasumsikan reaktan bercampur sempurna sebelum memasuki *combustor*. Kecepatan masuk *inlet* reaktan sebesar 0,32 m/s dan dan *ekivalent ratio* 1. Farksi massa *species* dapat diketahui di lampiran 3.1. Pada dindingnng beasar koefisien perpindahan panas konveksi ditetapkan 20 W/(m²K) sesuai dengan kecepatan konvensi secara natural ke lingkungan dan emisifitas didapat dari setiap jeneis material.

5) Menentukan batas *convergen*

Batas *convergen* ditentukan untuk mencapai keakuratan. batas *convergen* diberikan pada masing masing 10⁻⁶ dan 10⁻³ untuk dan *velocity*.

6) Pemberian *patch* temperatur

Patch adalah kondisi awal dimulainya simulasi. *Patch* temperatur diberikan 1500K sebagai energi aktivasi dari pembakaran.

7) Post Prossessing

Penampilan data dalam bentuk gambar Agar mudah dianalisa. Gambar berupa kontur dan grafik (x-y).

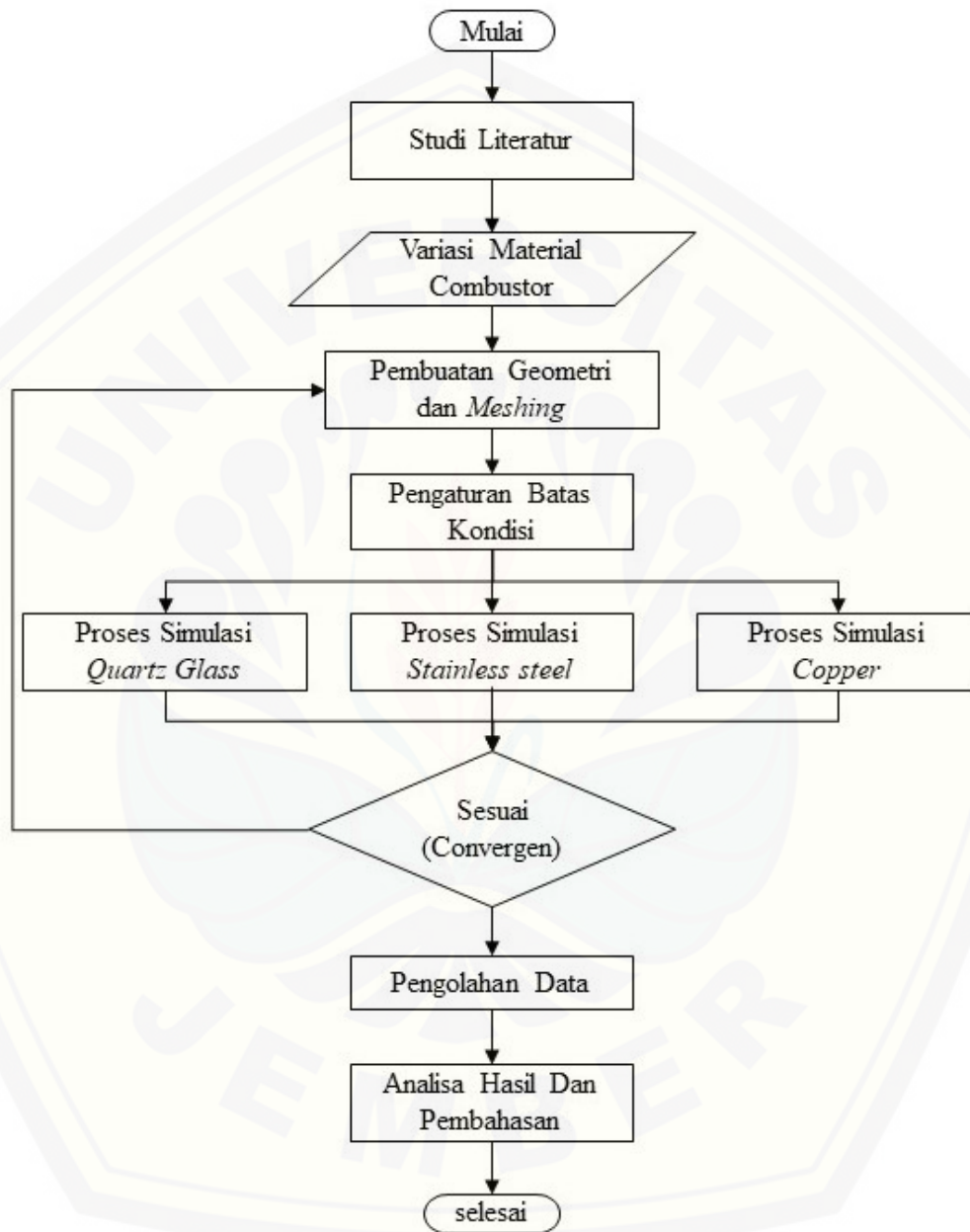
c. Pembahasan dan Analisa Data

Data yang diperoleh dari simulasi pembakarn ini adalah dalam bentuk kontur dan grafik. Dan akan dibahas dan dianalalisa.

d. Kesimpulan

Penarikan kesmpulan diperoleh berdasarkan hasil simulasi dan pembahasan dengan mengkorelasi dengan tujuan penelitian sehingga dapat menjadi reffresi penelitian.

3.6. Diagram Alir

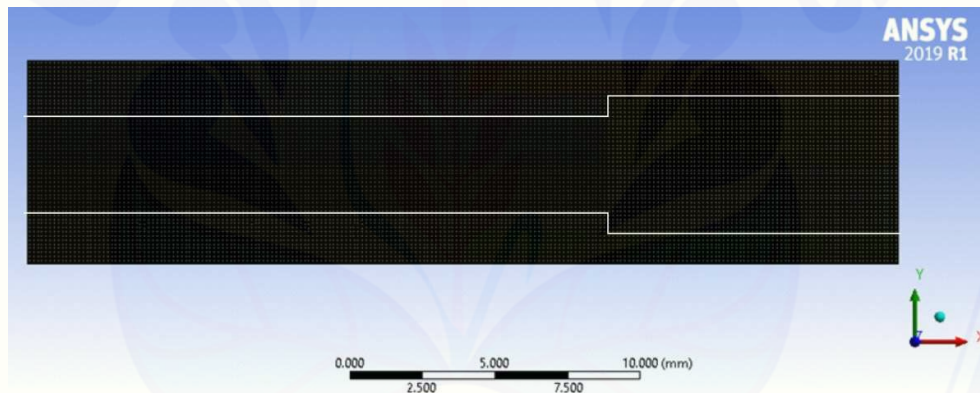


Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil simulasi *meso combustion*

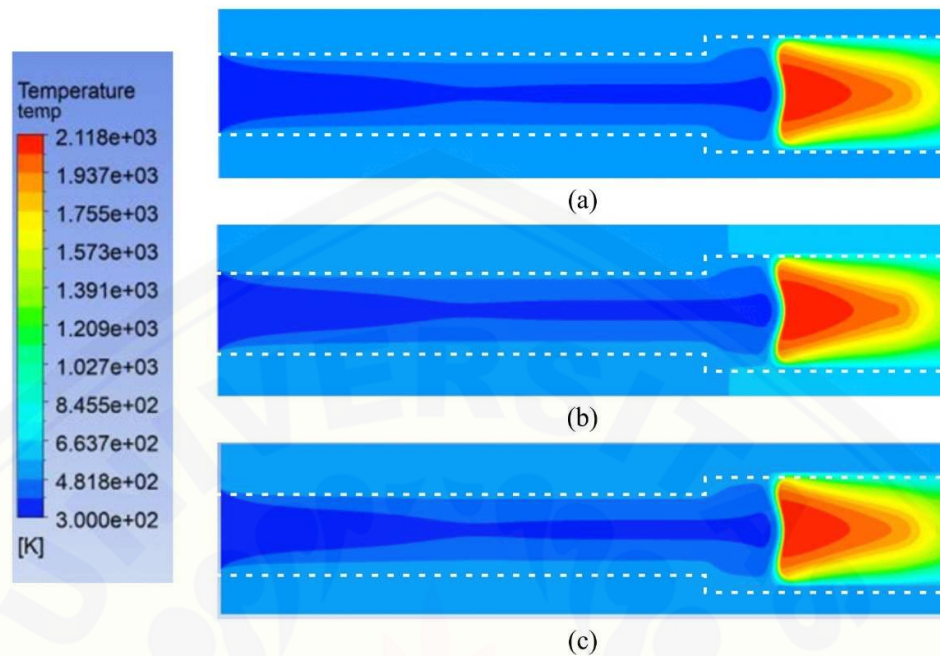
Software CFD fluent digunakan untuk mensimulasi pembakaran *premixed* dengan bahan bakar butana dan oksidator udara. Tahap pertama dari simulasi adalah pembuatan geometri dan meshing. Geometri *combustor* dibuat sesuai dengan desain yang ditentukan. Pembuatan mesh dilakukan dengan mesh rata dengan ukuran $x = 0,05$ mm dan $y = 0,05$ mm yang menghasilkan 84.000 *elements* 84.741 *nodes* mesh ditunjukkan pada Gambar 4.1. Pembuatan mesh penting untuk mendapatkan tingkat kesesuaian yang tinggi.



Gambar 4.1 *Meshing*

4.2. Distribusi Temperatur

Hasil simulasi didapatkan kontur temperatur, grafik *axial* temperatur, dan grafik temperatur dinding *combustor*. Distribusi temperatur dapat dibagi menjadi daerah reaksi dan daerah *inlet*. Gambar 4.2, menunjukkan sebaran temperatur daerah yang berwarna merah memiliki temperatur tertinggi sedangkan daerah dengan temperatur terendah ditandai dengan warna biru. Hasil simulasi menunjukkan daerah sebaran yang hampir sama dikarenakan geometri, kecepatan masuk reaktan dan *equivalent ratio* konstan. Perbedaan distribusi temperatur ketiga *combustor* dapat diketahui pada Gambar 4.3, Gambar 4.4 dan Gambar 4.5.



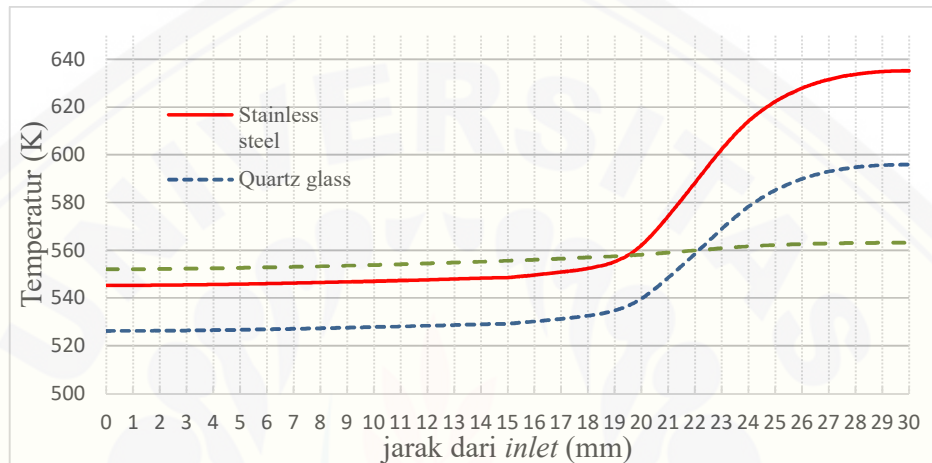
(a) Quartz glass; (b) Stainless steel; (c) Copper

Gambar 4.2 Kontur Temperatur

Distribusi temperatur dinding luar *combustor* memiliki temperatur yang berbeda di setiap *combustor*. Distribusi temperatur naik mendekati *outlet* dan daerah dekat *inlet* memiliki temperatur yang rendah dipengaruhi oleh temperatur *inlet* reaktan konstan. *Combustor Copper* memiliki grafik temperatur dinding luar yang cenderung rata, dikarenakan konduktifitas termal tinggi. Kenaikan temperatur yang signifikan pada *combustor stainless steel* dan *combustor quartz glass* dipengaruhi oleh konduktifitas termal yang rendah.

Combustor stainless steel memiliki temperatur dinding puncak (T_{wp}) dinding tertinggi dibanding material *combustor* lainnya yaitu sebesar 635,18 K. *Combustor quartz glass* memiliki temperatur dinding puncak (T_{wp}) 595,98 K. *Combustor stainless steel* dan *combustor quartz glass* memiliki temperatur dinding puncak (T_{wp}) yang lebih tinggi dibandingkan *combustor Copper* akibat konduktivitas termal yang rendah sehingga energi sulit untuk dialirkan menuju daerah *inlet*. Pengaruh *emisivitas* pada *combustor quartz glass* menyebabkan temperatur lebih rendah

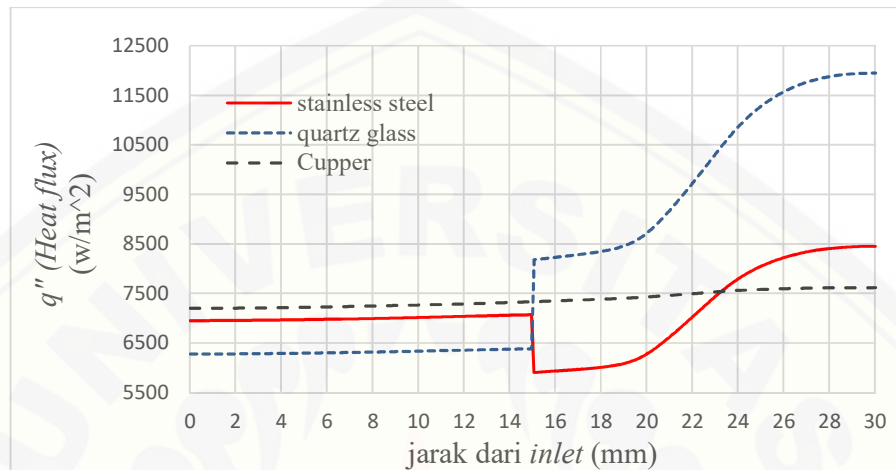
dibandingkan *combustor stainless steel*. *Combustor Copper* memiliki temperatur dinding puncak (T_{wp}) paling rendah sebesar 563,21 K dipengaruhi konduktifitas termal yang tinggi sehingga panas dapat terdistribusi lebih merata. Dapat dibandingkan di daerah *inlet* (jarak 0–20mm dari *inlet*) *combustor Copper* memiliki temperatur dinding yang lebih tinggi banding *combustor* lainnya.



Gambar 4. 3 Grafik korelasi jarak dari *inlet* terhadap temperatur pada dinding luar

Temperatur dinding (T_w) luar berkaitan dengan *heat flux* (q''). *Heat flux* (q'') dipengaruhi oleh koefisien konveksi dan *emisitivitas* material. Gambar 4.4 menunjukkan besar *heat flux* (q'') ke lingkungan dalam satuan (W/m^2). *Combustor Copper* memiliki kenaikan *Heat flux* (q'') daerah *inlet* yang tidak signifikan disebabkan material yang sama yaitu *Copper*. *Heat flux* (q'') *combustor stainless steel* dan *quartz glass* mengalami perubahan mendadak pada jarak $x = 15$ yang merupakan terjadi sambungan dari material yang berbeda karena nilai *emisitivitas* yang berbeda. Kenaikan signifikan *heat flux* (q'') juga terjadi pada *combustor stainless steel* dan *quartz glass* yang disebabkan Temperatur dinding (T_w) yang naik signifikan pada *combustor* tersebut. *Combustor quartz glass* memiliki keunggulan dengan nilai *heat flux* (q'') puncak tertinggi yaitu sebesar $11.953,7 W/m^2$ dibandingkan *Combustor stainless steel* memiliki *heat flux* (q'') puncak sebesar $8452,12 W/m^2$. *Combustor quartz glass* memiliki memiliki *heat flux* (q'') lebih tinggi akibat *emisivitas* yang lebih tinggi dibandingkan *combustor stainless steel*. *Combustor Copper* memiliki *heat flux*

(q'') puncak sebesar 7619,84 W/m^2 merupakan *heat flux* (q'') terendah dibandingkan *combustor* lainnya tetapi memiliki keunggulan dengan *heat flux* (q'') yang lebih merata.

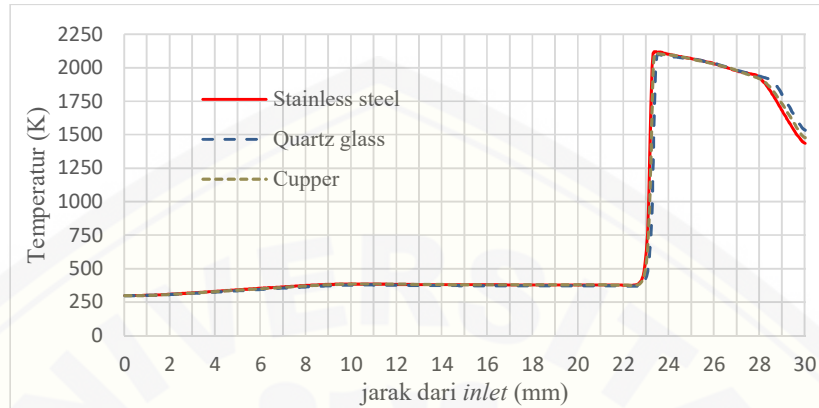


Gambar 4. 4 Grafik korelasi jarak dari *inlet* dengan *heat flux*

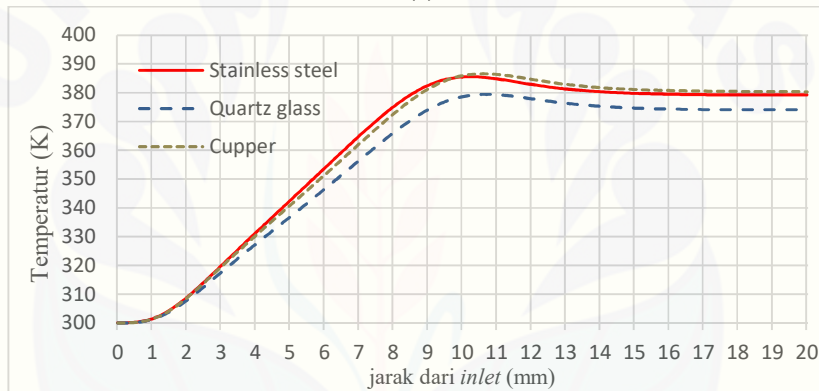
Temperatur dinding (T_w) mempengaruhi resirkulasi panas pada daerah *inlet* mengakibatkan efek *preheating*. resirkulasi panas mempengaruhi temperatur *axial* (T_x) pada *inlet*. *Combustor Copper* memiliki efek *preheating* yang lebih baik dibandingkan *combustor* lainnya yang diakibatkan *konduktivitas* termal yang tinggi. Pada Gambar 4.5 (b) *combustor Copper* memiliki temperatur *axial* (T_x) pada daerah *inlet* diikuti *combustor stainless steel* dan *combustor quartz glass* adalah yang terendah.

Combustor stainless steel memiliki temperatur *axial* puncak (T_{xp}) tertinggi yaitu sebesar 2118,45 K karena pada daerah reaksi *Combustor stainless steel* bersifat menahan panas. *Combustor Copper* memiliki temperatur *axial* puncak (T_{xp}) sebesar 2107,69 K disebabkan temperatur raktan telah mengalami *preheating* di daerah *inlet* yang mengakibatkan temperatur masuk ke ruang bakar lebih tinggi. *Combustor Quartz glass* memiliki T_{xp} sebesar 2101,51 K merupakan temperatur terendah dari *combustor* lainnya. Kenaikan temperatur tidak signifikan di daerah *inlet* karena belum terjadi reaksi pembakaran. Kenaikan signifikan terjadi di jarak 23 mm dari *inlet* pada

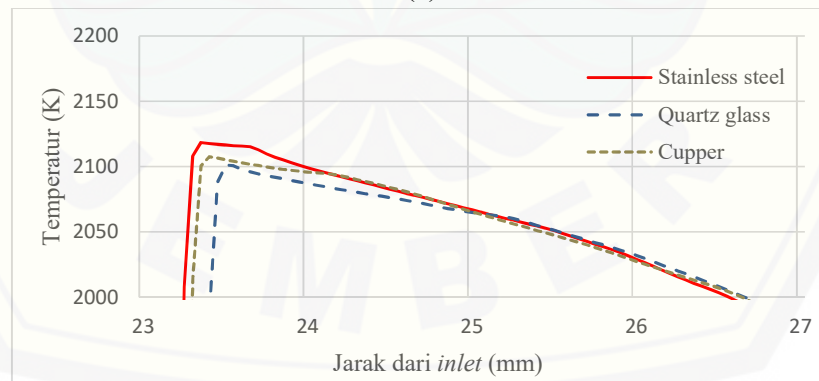
titik tersebut disebut zona reaksi pembakaran. Temperatur *axial* (T_x) menurun mendekati outlet karena jauh dari titik reaksi.



(a)



(b)



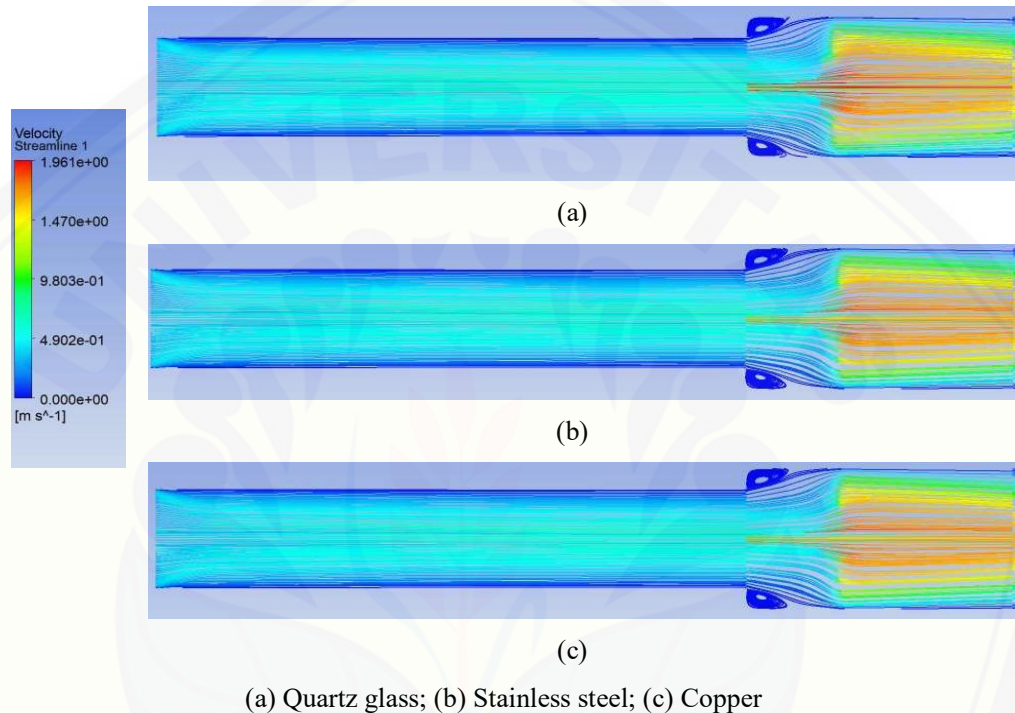
(c)

(a) Jarak dari inlet (0-30mm); (b) Jarak dari inlet (0-20mm); (c) Jarak dari inlet (23-27mm)

Gambar 4.5 Grafik korelasi jarak dari inlet terhadap temperatur *axial*,

4.3. Fenomena aliran

Fenomena aliran dari hasil simulasi didapatkan *patchline* aliran dan grafik kecepatan axial. Gambar 4.6 menunjukkan bagaimana karakter aliran fluida terjadi peningkatan kecepatan terjadi setelah zona reaksi, dikarenakan kenaikan temperatur di zona reaksi. Terjadi pusaran kecil terjadi di bagian sudut *faceing step*.



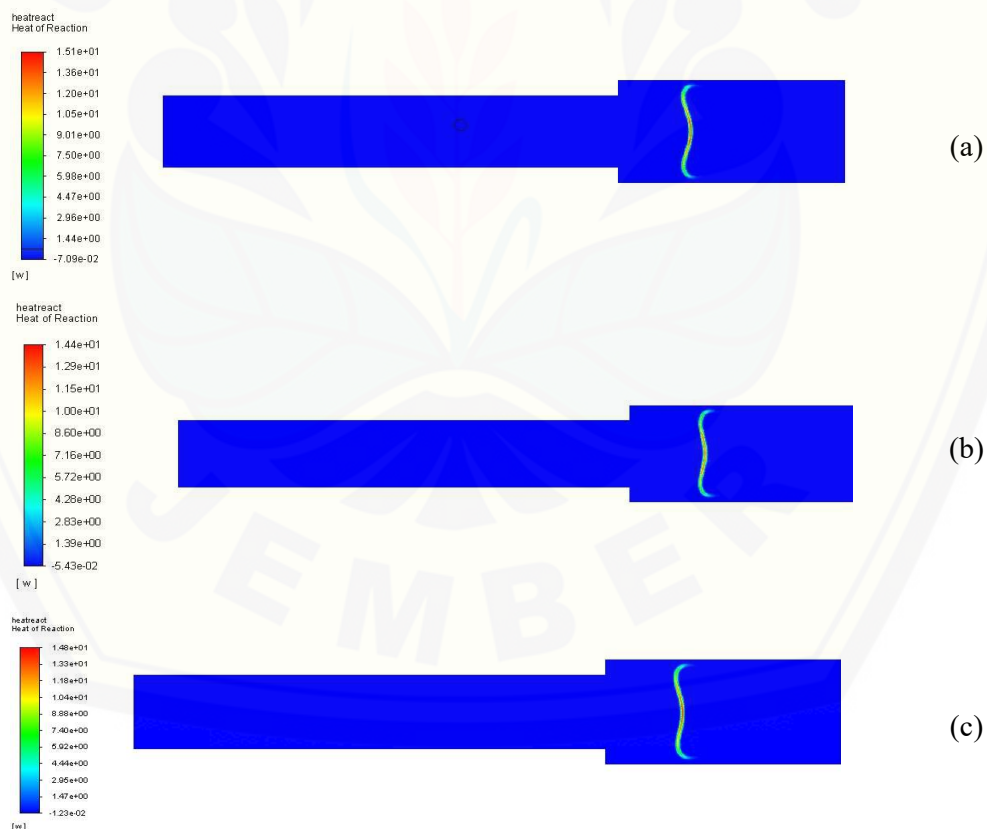
Gambar 4.6 Patch line velocity

Kecepatan aliran dipengaruhi oleh temperatur fluida meskipun kecepatan *inlet*-nya tetap. Kecepatan akan sebanding dengan temperatur. Kecepatan puncak (v_p) *combustor stainless steel* ialah 1,960 m/s. Kecepatan Puncak (v_p) *combustor stainless steel* merupakan kecepatan tertinggi dari pada combustor lainnya karena memiliki nilai temperatur *axial* (T_x) tertinggi. *Combustor quartz glass* memiliki kecepatan puncak (v_p) sebesar 1,911 m/s merupakan kecepatan puncak (v_p) terendah dengan temperatur *axial* puncak (T_{xp}) terendah. sedangkan *combustor Copper* memiliki kecepatan puncak (v_p) sebesar 1.928 m/s. Temperatur dapat mempengaruhi densitas reaktan. Semakin tinggi temperatur densitas semakin menurun dan semakin rendah

temperatur densitas semakin naik. Sedangkan densitas akan mempengaruhi kecepatan aliran. Semakin rendah densitas mengakibatkan kecepatan meningkat dan semakin tinggi densitas mengakibatkan kecepatan lebih rendah.

4.4. Heat reaction

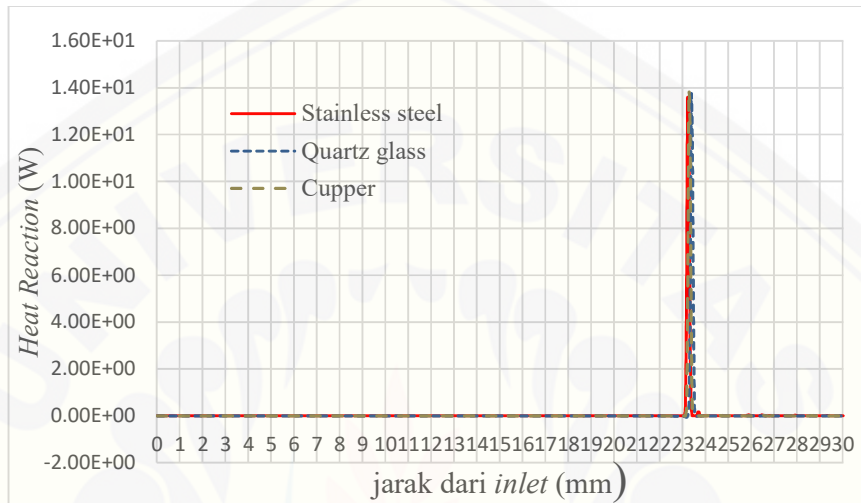
Heat reaction adalah reaksi yang mengakibatkan timbulnya panas. Hasil simulasi menunjukkan kontur *heat reaction* yang dapat dikatakan bentuk api. Gambar 4.7 menunjukkan kontur *heat reaction*. Warna merah menunjukkan nilai tertinggi sedang warna biru menunjukkan nilai terendah. Nilai terendah yang diwakili warna biru merupakan zona dimana api belum atau tidak terbentuk, sedang warna hijau hingga merah dapat dikatakan zona reaksi api. Nilai *heat reaction* bernilai positif merupakan zona penambahan panas akibat reaksi.



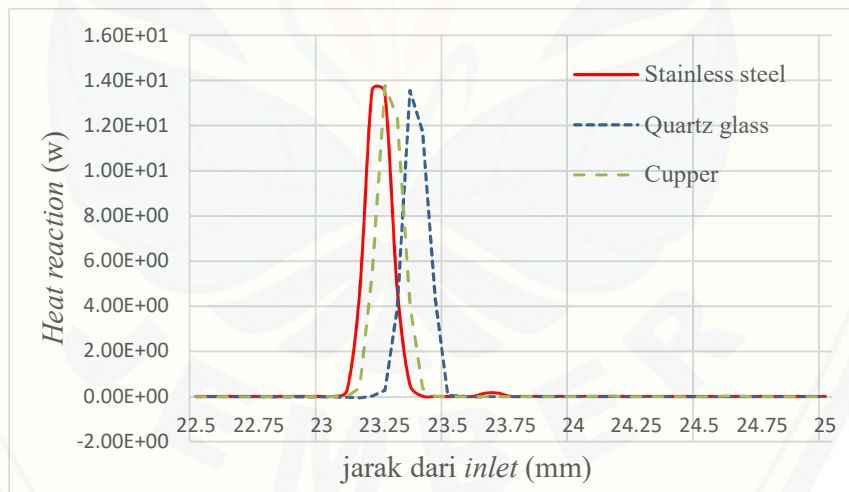
(a) Quartz glass; (b) Stainless steel; (c) Copper

Gambar 4.7 Kontur *heat reaction*

Nilai *heat reaction* juga dapat diamati melalui grafik *axial heat reaction*. Letak api dan posisi kenaikan ditunjukkan pada Gambar 4.8. posisi kenaikan *heat reaction* pada 23 mm hingga 23,5 mm dari *inlet*.



(a)



(b)

(a) jarak dari *inlet* (0-30 mm); (b) jarak dari *inlet* (22,5 mm-25 mm)

Gambar 4.8 grafik korelasi jarak dari *inlet* terhadap *heat reaction*

Heat reaction tertinggi terjadi di *combustor stainless steel* sebesar 13,58 W pada jarak 23,5mm dari *inlet*, untuk *combustor quartz glass* memiliki nilai sebesar 13,56 W pada jarak 23,35mm dari *inlet* dan untuk *combustor Copper* memiliki nilai tertinggi sebesar 13,78 W pada jarak 23,25mm dari *inlet* yang merupakan nilai tertinggi dibanding *combustor* lainnya.

Perbedaan sangat terlihat pada posisi nyala api. Posisi *heat reaction* dipengaruhi oleh temperatur reaktan sebelum terjadi reaksi. *Combustor Copper* dan *stainless steel* memiliki temperatur *axial* (T_x) daerah *inlet* lebih tinggi mengakibatkan *heat reaction* lebih mendekati *inlet*. *Heat reaction* pada *stainless steel* lebih mendekati *inlet* dibandingkan *combustor Copper* meskipun memiliki temperatur *axial* (T_x) *inlet* lebih rendah tetapi temperatur *axial* (T_x) pada ruang bakar lebih tinggi. *Combustor quartz glass* memiliki temperatur *axial* (T_x) *inlet* paling rendah dan jarak *heat reaction* terjauh dari *inlet*. *Heat reaction* berilai hampir sama akibat nilai kalor dari reaktan tidak berubah.

BAB 5. PENUTUP

5.1. Kesimpulan

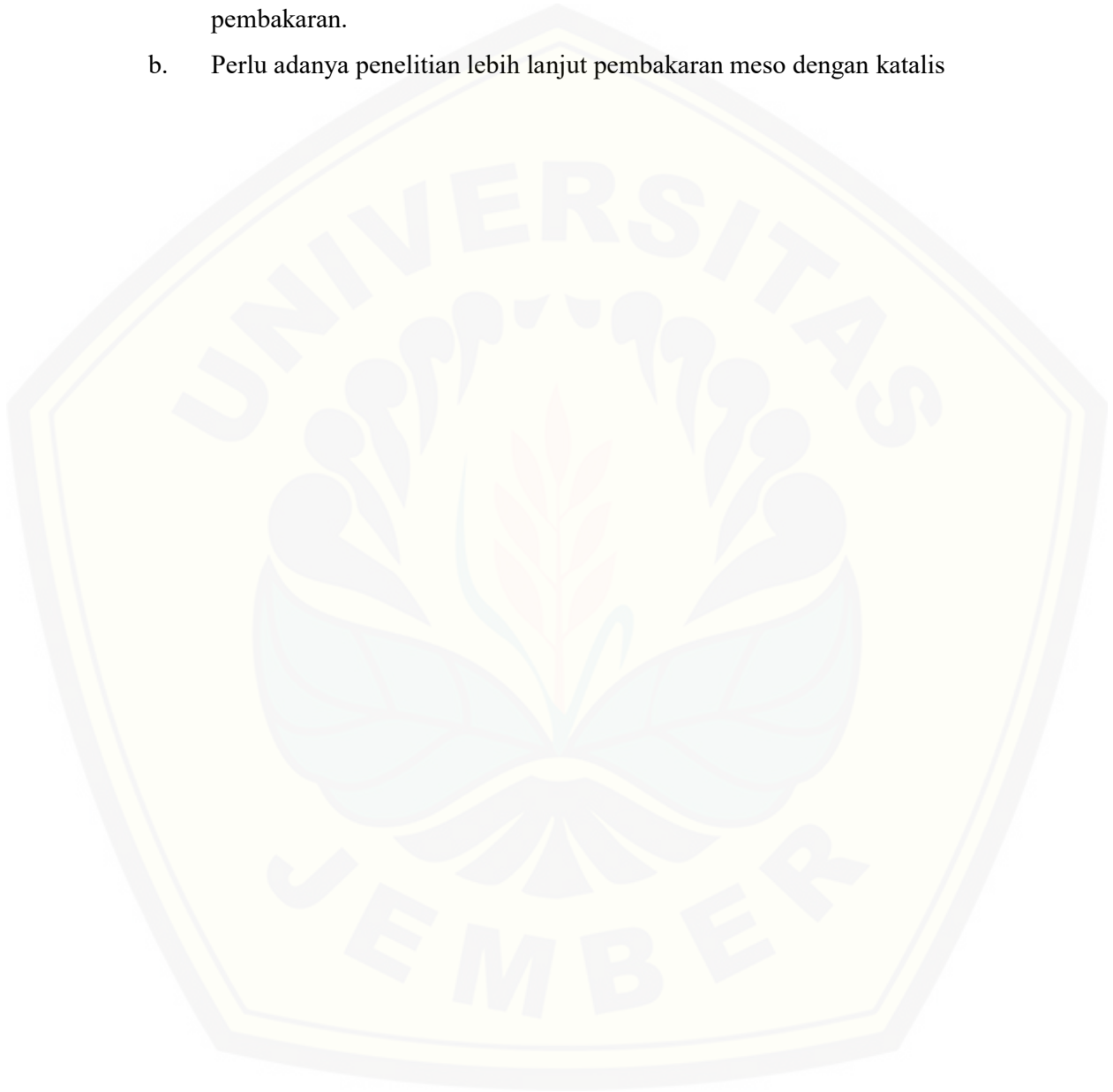
Kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. *Combustor Copper* memiliki distribusi Temperatur dinding (T_w) lebih merata akibat konduktivitas termal yang tinggi. *Combustor quartz glass* dan *Combustor stainless steel* mengalami kenaikan temperatur dinding (T_w) signifikan akibat konduktivitas rendah. *Combustor stainless* memiliki Temperatur dinding (T_w) lebih tinggi akibat emisivitas yang rendah dibandingkan *combustor quart glass*. *Combustor copper* memiliki resirkulasi panas yang baik dan memiliki temperatur *axial inlet* (T_x) lebih tinggi disbanding combustor lainnya.
- b. Kecepatan aliran dipengaruhi oleh temperatur. Temperatur berbeda akibat termal propertis material yang berbeda. Kecepatan puncak (v_p) dari *combustor stainless steel* adalah 1,960 m/s akibat Temperatur *axial* (T_x) yang tinggi. *Combustor Copper* memiliki kecepatan puncak (v_p) sebesar 1.928 m/s. Kecepatan puncak (v_p) terendah terjadi pada *combustor quartz glass* sebesar 1,911 m/s akibat temperatur *axial* (T_x) yang paling terendah.
- c. Posisi *heat reaction* dipengaruhi oleh temperatur reaktan sebelum terjadi reaksi. *Combustor Copper* dan *stainless steel* memiliki temperature *axial* (T_x) daerah *inlet* lebih tinggi mengakibatkan *heat reaction* lebih mendekati step. *Heat reaction* pada *combustor stainless steel* lebih mendekati *inlet* dibanding *combustor Copper* meskipun memiliki temperature *axial* (T_x) *inlet* lebih rendah tetapi temperature *axial* (T_x) pada ruang bakar lebih tinggi. *Combustor quartz glass* memiliki temperature *axial* (T_x) *inlet* paling rendah dan jarak *heat reaction* terjauh dari *inlet*. *Heat reaction* bernilai hampir sama akibat nilai kalor dari reaktan tidak berubah.

5.2. Saran

Saran dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai pemanfaatan energi pada pembakaran.
- b. Perlu adanya penelitian lebih lanjut pembakaran meso dengan katalis



DAFTAR PUSTAKA

- Baananto, F., L Yuliati. Dan N. Hamidi. 2018. Studi Numerik Pembakaran Butana (C₄H₁₀) Dalam Meso Scale Combustor Dengan Perforated Plateae. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 9(2): 69-74.
- Bejan, Ardian. Dkk., 1996. *Thermal Desing and Optimization*. Hoboken: Johon wiley & Sons, inc. Terjemahan oleh Harahap, Filino. 2012. *Desain dan Optimalisasi Termal*. Bandung: ITB.
- Bergman, T. L. dan A. S. Lavine. 2017. *Fundamentals Of Heat Mass And Transfer*. 8th ed. . Hoboken: Johon wiley & Sons, inc.
- Chigier, N. dan T. Gemci. 2003. A review of micro propulsion technology. *Aerospace Sciences Meeting And Exhibit*, 41: 3-11.
- Chou, S. dkk., 2011. Development of micro power generators – A review. *Applied Energy* 88:1–16.
- Duttaroy, Rahul., Satyanarayanan R. Chakravarthy, dan Ashis Kumar Sen. 2017. Experimental Investigation of Flame Propagation and Stabilization in a Meso-Combustor with Sudden Expansion. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 90: 299–309.
- Glassman, I. dan R. A. Yetter. 2008. *Combustion*. 4th ed. United States of America: Elsevier.
- Kaisare, Niket S. dkk., 2008. Stability and performance of catalytic microreactors: Simulations of propane catalytic combustion on Pt. *Chemical Engineering Science* 63: 1098 – 1116.
- Kurdyumov, V. N. dkk. 2009. Dynamics of premixed flames in a narrow channel with a step-wise wall temperature. *Combustion and Flame* 159: 2190–2200.
- Munir, F. A. dan Mikami, M., 2015. A numerical study of propane-air combustion in meso-scale tube combustors with concentric rings. *Journal of Thermal Science and Technology* 10(1): 1-12.
- Mustafaa, K. F., S. Abdullahb, M. Z. Abdullaha dan K. Sopianb. 2017. A review of combustion-driven thermoelectric (TE) and thermophotovoltaic (TPV) power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 71: 572-584.

- Raimondeau, dkk, 2002. Modeling Of High-Temperature Microburners. *Proceedings of the Combustion Institute* 29: 901–907.
- Tu, J., G. Yeoh, dan C. Liu. 2018. Computational Fluid Dynamic A partical Approach. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier.
- Wan, J. dan A. Fan. 2015. Effect of solid material on the blow-off limit of CH₄/air flames in a micro combustor with a plate flame holder and preheating channels. *Energy Conversion and Management* 101: 552-560.
- Zhou, J. dkk., 2009. Combustion of hydrogen–air in catalytic micro-combustors made of different material. *international journal of hydrogen energy* 34: 3535-3545.

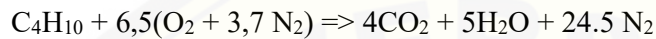
LAMPIRAN

Lampiran 3.1 Perhitungan Faksi massa

Menghitung faksi massa campuran

Diketahui

Persamaan stokiometri butane



Mr :

$$\text{C}_4\text{H}_{10} = 58 \text{ g/mol}$$

$$\text{O}_2 = 32 \text{ g/mol}$$

$$\text{N}_2 = 28 \text{ g/mol}$$

Menghitung massa udara dan bahan bakar untuk 1 mol bahan bakar

$$\text{M}_{\text{massa O}_2} = 32 * 6,5 = 208 \text{ gr}$$

$$\text{Massa N}_2 = 28 * 24,05 = 673,4 \text{ gr}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa udara} &= \text{massa O}_2 + \text{massa N}_2 \\ &= 208 + 673,4 = 881,4 \text{ gr} \end{aligned}$$

$$\text{Massa bahan bakar} = 58 * 1 = 58 \text{ gr}$$

dikarena Equivalent ratio (Φ) = 1

maka

$$\Phi = \frac{AFR_s}{AFR_a}$$

$$AFR_s = AFR_a$$

Menghitung Fraksi massa stokiometri

Faksi massa bahan bakar (C_4H_{10})

$$x_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = \frac{x_{\text{C}_4\text{H}_{10}}}{x_{\text{C}_4\text{H}_{10}} + x_{\text{O}_2} + x_{\text{N}_2}}$$

$$x_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = \frac{58}{58 + 208 + 673,4}$$

$$x_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 0,0617$$

Faksi massa O₂

$$x_{O_2} = \frac{x_{O_2}}{x_{C_4H_{10}} + x_{O_2} + x_{N_2}}$$

$$x_{O_2} = \frac{208}{58 + 208 + 673,4}$$

$$x_{O_2} = 0,2214$$

Fraksi massa N₂

$$x_{N_2} = \frac{x_{N_2}}{x_{C_4H_{10}} + x_{O_2} + x_{N_2}}$$

$$x_{N_2} = \frac{673,4}{58 + 208 + 673,4}$$

$$x_{N_2} = 0,7168$$