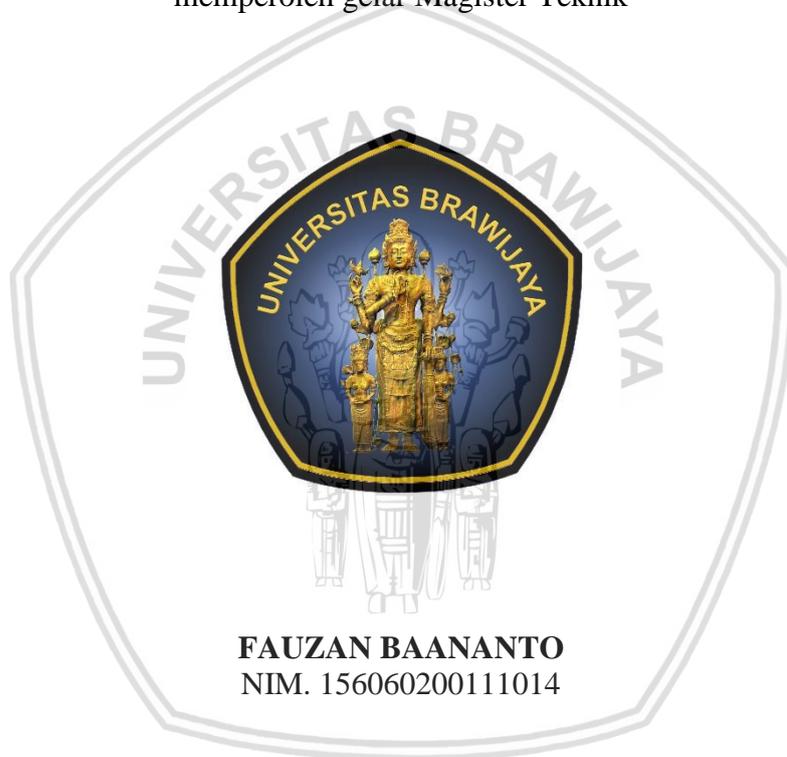


**STUDI NUMERIK PEMBAKARAN BUTANA (C₄H₁₀) DALAM MESO
SCALE COMBUSTOR DENGAN PERFORATED PLATE**

TESIS

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK MESIN
MINAT KONVERSI ENERGI**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Magister Teknik



**FAUZAN BAANANTO
NIM. 156060200111014**

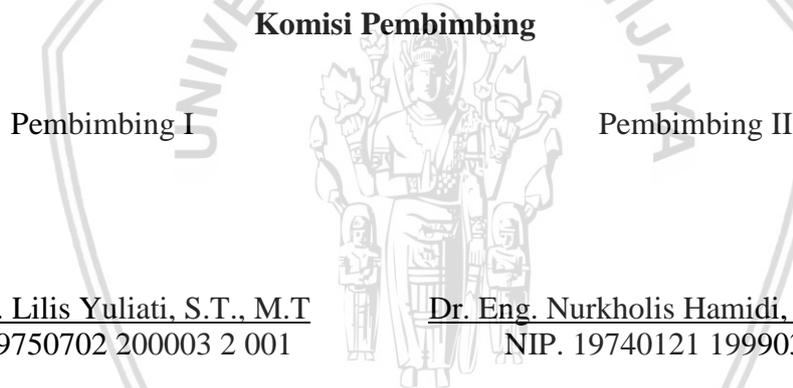
**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2018**

TESIS

**STUDI NUMERIK PEMBAKARAN BUTANA (C₄H₁₀) DALAM MESO
SCALE COMBUSTOR DENGAN PERFORATED PLATE**

FAUZAN BAANANTO
NIM. 156060200111014

telah dipertahankan di depan penguji
pada tanggal 8 Januari 2018
dinyatakan telah memenuhi syarat
untuk memperoleh gelar Magister Teknik



Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II

Dr. Eng. Lilis Yuliati, S.T., M.T
NIP. 19750702 200003 2 001

Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, S.T., M.Eng.
NIP. 19740121 199903 1 001

Malang, 8 Januari 2018

Universitas Brawijaya
Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin
Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin

Dr. Eng. Lilis Yuliati, S.T., M.T
NIP. 19750702 200003 2 001



JUDUL TESIS:

STUDI NUMERIK PEMBAKARAN BUTANA (C_4H_{10}) PADA *MESO-SCALE*
COMBUSTOR DENGAN *PERFORATED PLATE*

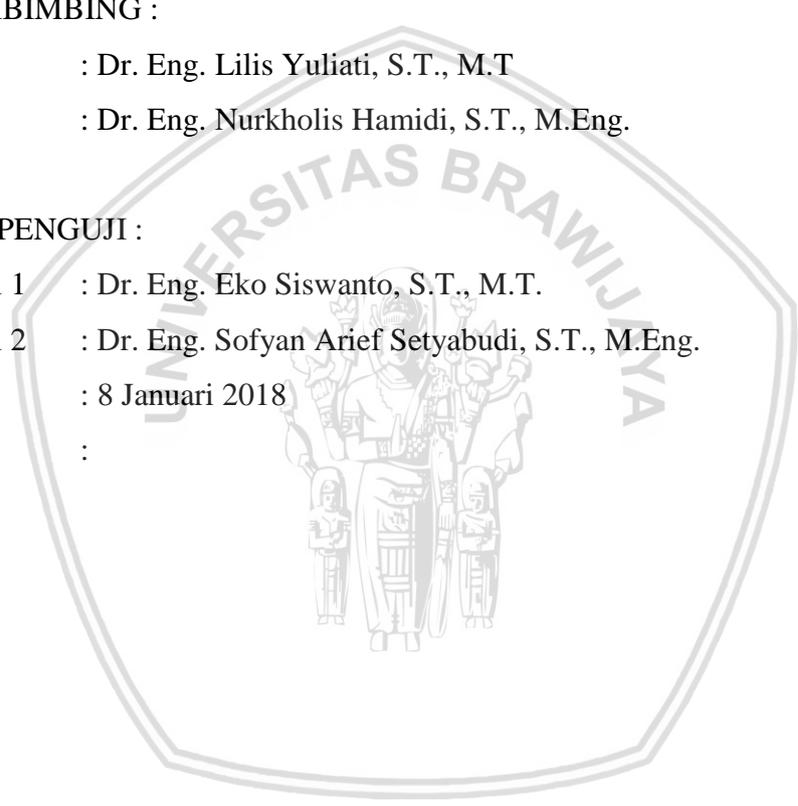
Nama Mahasiswa : Fauzan Baananto
NIM : 156060200111014
Program Studi : Teknik Mesin
Minat : Konversi Energi

KOMISI PEMBIMBING :

Ketua : Dr. Eng. Lilis Yuliati, S.T., M.T
Anggota : Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, S.T., M.Eng.

TIM DOSEN PENGUJI :

Dosen Penguji 1 : Dr. Eng. Eko Siswanto, S.T., M.T.
Dosen Penguji 2 : Dr. Eng. Sofyan Arief Setyabudi, S.T., M.Eng.
Tanggal Ujian : 8 Januari 2018
SK Penguji :





*Karya Ilmiah ini untuk kedua orang tua saya
Nursubyakto (Alm.) dan Asih Widajati (Alm.)
yang telah mendidik saya untuk selalu menimba ilmu setinggi mungkin*



RIWAYAT HIDUP

Fauzan Baananto, Malang 4 Januari 1992 anak kedua dari empat bersaudara dari ayah Nursubyakto (Alm.) dan ibu Asih Widajati (Alm.). Menuntut ilmu mulai dari SD sampai S2 di Kota Malang. Lulus dari program S1 tahun 2014 teknik mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Pengalaman bekerja sebagai *engineering* di perusahaan kontraktor swasta. Melanjutkan pendidikan program S2 pada tahun 2015 untuk minat Konversi Energi.

Malang, Januari 2018

Penulis



Ucapan Terimakasih

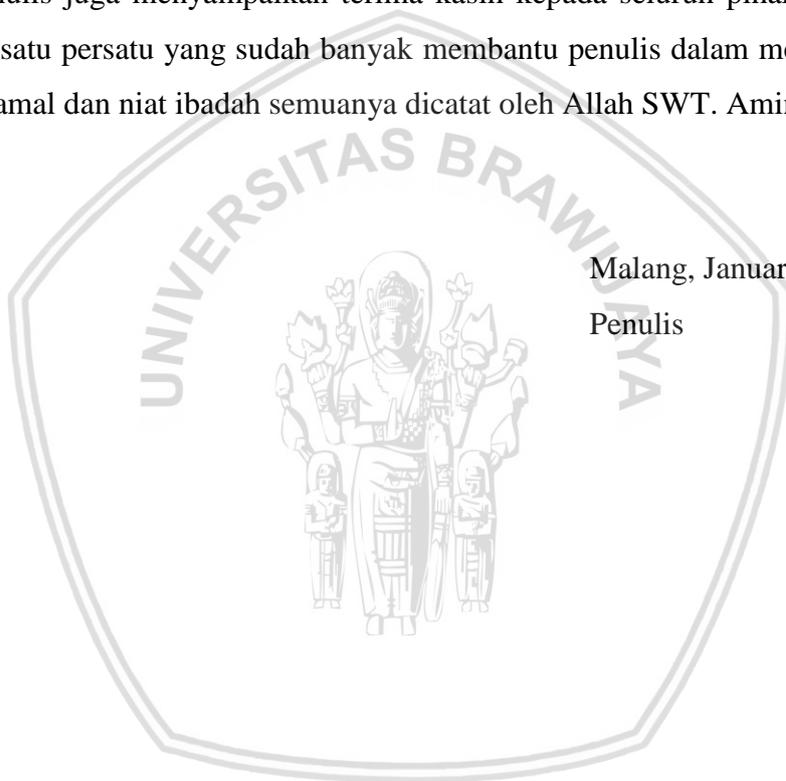
Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada kedua dosen pembimbing, Ibu Lilis Yuliati dan Pak Nurkholis Hamidi yang tidak henti-hentinya dalam membimbing penulis mulai awal hingga akhir dalam menyusun tesis ini.

Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada keluarga penulis yang terus menerus memberikan semangat dalam menyelesaikan tesis ini serta teman-teman program magister teknik mesin universitas brawijaya yang selalu memberikan motivasi dalam menyelesaikan tesis ini.

Tak lupa penulis juga menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang sudah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan tesis ini, semoga amal dan niat ibadah semuanya dicatat oleh Allah SWT. Amin.

Malang, Januari 2018

Penulis



PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS

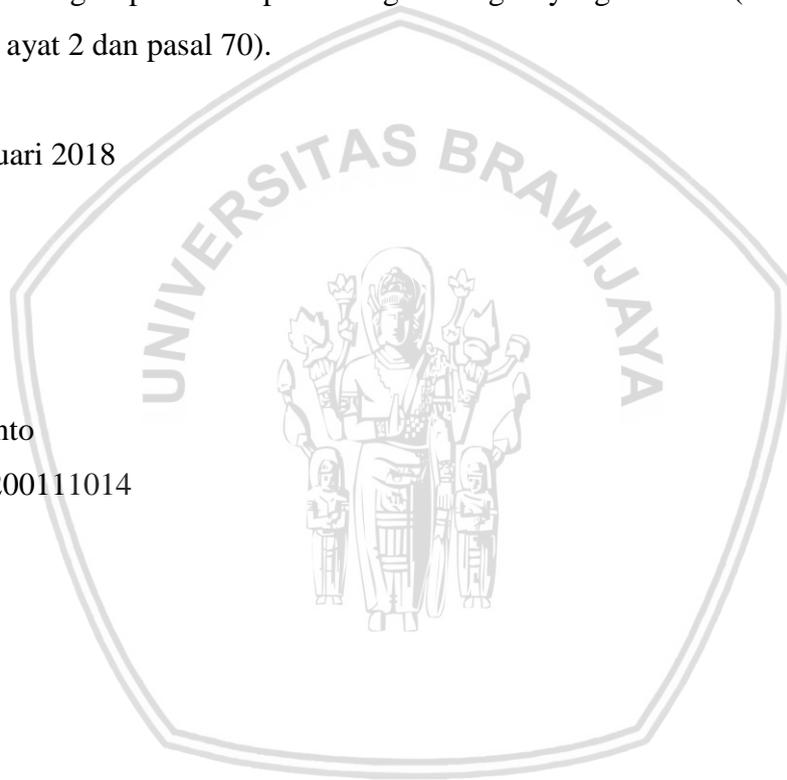
Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Tesis ini adalah asli dari pemikiran saya, tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka. Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Tesis dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 8 Januari 2018

Mahasiswa,

Fauzan Baananto

NIM. 156060200111014





RINGKASAN

Fauzan Baananto, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2018, *Studi Numerik Pembakaran Butana (C₄H₁₀) pada Meso-scale Combustor dengan Perforated Plate*, Dosen Pembimbing: Lilis Yulianti dan Nurkholis Hamidi.

Perkembangan teknologi berskala mikro dalam dua dekade ini secara signifikan telah berkembang pesat untuk meminimalisir kebutuhan dan multifungsi dari komunikasi, pengambilan gambar, analisis kimia dan peralatan biomedik. Hal tersebut mendorong untuk pengembangan *micropower generation* yang berukuran kecil, ringan dan mempunyai densitas energi yang tinggi. Densitas energi yang tinggi pada *micropower generation* dapat diperoleh dari pembakaran yang stabil pada *micro-* atau *meso-scale combustor*. Kestabilan api pada *micro-combustor* menjadi masalah yang nyata karena keterbatasan waktu yang tidak memadai dan tingginya panas yang hilang terkait dengan peningkatan rasio luas permukaan terhadap rasio volume, yang mana menyebabkan *thermal quenching*, selain itu tidak mungkin menyalakan api pada skala milimeter. Hal itu tergantung pada geometri, komposisi, laju alir dan campuran bahan bakar methana/udara yang akan mengakibatkan api padam dengan dimensi kritis kurang dari 2 mm.

Penelitian yang telah dilakukan secara eksperimental, perlu dikembangkan lagi secara numerik dengan menggunakan *tools CFD*. *Computational fluid dynamics* (CFD) merupakan metode berdasarkan simulasi numerik yang dilakukan untuk mempelajari pembakaran, terutama masalah pembakaran *premixed* stokiometri campuran butana (C₄H₁₀) – udara pada ruang bakar berskala mikro. Reaksi kimia yang terperinci pada pembakaran campuran butana (C₄H₁₀) – udara sudah termasuk dalam simulasi CFD, sehingga dari hasil simulasi CFD tersebut, hal mendasar yang perlu ditingkatkan dalam mengembangkan peralatan pembakaran dengan skala mikro maupun *mesoscale* adalah masalah teknik proses pendinginan (*radical quenching*) dengan perbandingan volume dan luas permukaan dari peralatan yang berskala. Hasil dari simulasi CFD juga dapat menjadi dugaan sementara untuk penelitian eksperimental ketika merubah model dari meso-scale combustor tersebut.

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah semakin tinggi kecepatan reaktan maka akan semakin tinggi temperatur yang dihasilkan. Akan tetapi, pada kondisi equivalen rasio yang semakin tinggi dengan kecepatan reaktan yang semakin tinggi bisa mengakibatkan api dalam kondisi *blowoff* (api dimana padam) sehingga dapat ditarik sebuah kesimpulan bahwa masing-masing kecepatan reaktan mempunyai batas maksimum temperatur yang dapat dicapai, dan setelah itu temperatur yang dihasilkan akan semakin turun.

Kata kunci: Meso-scale combustor, kestabilan api, temperatur nyala api, CFD

SUMMARY

Fauzan Baananto, *Departement of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Brawijaya University, Januari 2018, Numerical Study of Butana (C₄H₁₀) Combustion in Meso-scale Combustor with Perforated Plate, Academic Supervisor: Lilis Yuliati and Nurkholis Hamidi.*

The development of micro-scale technology in two decades has significantly increase to minimize multifunction of communication, image capture, chemical analysis and biomedical equipment. Push toward to development of micropower generation in small scale, lightweight and has a high energy density. High energy densities in micropower generation can be obtained from stable combustion in micro- or meso-scale combustor. The flame stability in the micro-combustor becomes a real problem because of inadequate time constraints and high heat loss associated with increasing the ratio of surface area to volume ratio, which causes thermal quenching, otherwise it is impossible to ignition on a millimeter scale. It depends on the geometry, composition, flow rate and methane/air fuel mixture which will result in a fire extinguished with a critical dimension less than 2 mm.

Experimental research need to be developed again numerically by using tools CFD. Computational fluid dynamics (CFD) is a method based on numerical simulations performed to study combustion, especially the issue of premixed butane (C₄H₁₀)-air mixture in the micro-combustion chamber. Detailed chemical reactions in the combustion of the butane mixture (C₄H₁₀) - air are included in the CFD simulation, so that from the CFD simulation results, the fundamental thing that needs to be improved in developing the micro-scale and mesoscale combustion equipment is the problem of the radical quenching technique with the ratio of the volume and surface area of the scaled apparatus. The results of the CFD simulation can also be a temporary estimate for experimental research when changing the model of the meso-scale combustor.

The conclusion from this research is the higher velocity of the reactant, the higher the temperature produced. However, in equivalent conditions higher ratios with higher reactant velocities may result in a flame under blowoff conditions (fires which are extinguished) so the conclusion is reactant velocity has a temperature maximum, and decreasingly temperature.

Keywords: Meso-scale combustor, flame stability, flame temperatur, CFD

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya dan Sholawat serta salam semoga selalu diberikan kepada Nabi Muhammad SAW, sehingga penulis mampu menyelesaikan tesis ini dengan baik. Tesis dengan judul “**Studi Numerik Pembakaran Butana (C_4H_{10}) pada *Meso-scale Combustor* dengan *Perforated Plate***” ini dikerjakan demi memenuhi salah satu syarat guna memperoleh gelar Magister Teknik di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini bukanlah tujuan akhir dari belajar karena belajar adalah sesuatu yang tidak terbatas.

Terselesaikannya tesis ini tentu tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Semoga ALLAH SWT membalas kebaikan dan ketulusan semua pihak yang telah membantu menyelesaikan tesis ini dengan melimpahkan rahmat dan karunia-Nya.

Semoga tesis yang telah saya susun ini dapat memberikan manfaat dan kebaikan bagi semua pihak yang membaca dan memahami tesis ini dan dapat bernilai ibadah di hadapan ALLAH SWT. Amin.

Malang, Januari 2018

Penulis



DAFTAR ISI

RINGKASAN	i
SUMMARY	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR SIMBOL	x
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Manfaat Penelitian	4
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Penelitian Sebelumnya	5
2.2. <i>Micro Power Generators</i>	8
2.3. <i>Micro/Meso Scale Combustion</i>	9
2.4. Peranan <i>Flame Holder</i> pada <i>Micro/Meso Scale Combustion</i>	10
2.5. Komputasi Dinamika Fluida	11
2.5.1 <i>Pre-processor</i>	12
2.5.2 <i>Grid Generation</i>	13
2.5.3 Persamaan Atur Laminar- <i>Steady State</i>	13
2.5.3.1 Persamaan Massa	14
2.5.3.2 Persamaan Kontinuitas	14
2.5.3.3 Persamaan Momentum	14
2.5.3.4 Persamaan Transport untuk Spesies (k)	14
2.5.3.5 Persamaan Energi	14
2.5.3.6 Perhitungan dengan <i>Finite Rate Chemistry</i>	15
2.5.3.7 Kondisi Batas dan Kondisi Awal	15
2.5.4 <i>Solver</i>	15
2.5.5 <i>Post-processor</i>	16
2.6. Pembakaran <i>Premixed</i>	16



2.6.1. Stokimetri	17
2.6.2. Rasio Ekuivalen.....	18
BAB III. KERANGKA KONSEP PENELITIAN	19
3.1. Kerangka Fikir	19
3.2. Hipotesis	21
3.3. Definisi Operasional dan Pengukuran Peubah.....	21
3.3.1 Definisi Operasional.....	21
3.3.2 Pengukuran Peubah	21
3.3.3 Diagram Alir Penelitian.....	22
BAB IV. METODE PENELITIAN.....	23
4.1. Waktu dan Tempat Penelitian.....	23
4.2. Prosedur Penelitian	23
4.3. <i>Step 1: Pre-processor</i> (mendefinisikan domain)	25
4.4. <i>Step 1: Pre-processor</i> (<i>grid generation</i> atau <i>meshing</i>).....	32
4.5. <i>Step 2: Solver</i> (mendefinisikan persamaan atur)	33
4.6. <i>Step 2: Solver</i> (diskritisasi persamaan).....	40
4.7. <i>Step 3: Postprocessor</i> (Plot hasil simulasi)	45
BAB V. HASIL DAN PEMBAHASAN	47
5.1. Data Kestabilan Api.....	47
5.2. Data Visualisasi, Temperatur Api dan Gas Hasil Pembakaran	51
5.3. Validasi Penelitian	61
BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN	63
6.1. Kesimpulan	63
6.2. Saran	63

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR TABEL

No	Judul	Halaman
Tabel 2.1.	Definisi dari <i>micro-scale</i> dan <i>meso-scale combustion</i>	10
Tabel 3.1.	Variabel Penelitian	21
Tabel 4.1.	Tahapan melakukan penelitian dengan metode numerik	23
Tabel 4.2.	Material properties n-Butana-Udara.....	39
Tabel 4.3.	Pengaturan kondisi batas pada saluran masuk campuran bahan bakar dan udara	40
Tabel 4.4.	Pengaturan kondisi batas pada saluran keluar	40
Tabel 4.5.	Pengaturan kondisi batas pada dinding <i>combustor</i>	40
Tabel 5.1.	Data kestabilan api <i>meso-scale combustor</i> dengan <i>flame holder</i> tipe 1	47
Tabel 5.2.	Data kestabilan api <i>meso-scale combustor</i> dengan <i>flame holder</i> tipe 2.....	47
Tabel 5.3.	Data perbandingan eksperimental dan numerik pada kestabilan api <i>meso-scale combustor</i> dengan <i>flame holder</i> tipe 1	50
Tabel 5.4.	Data perbandingan eksperimental dan numerik pada kestabilan api <i>meso-scale combustor</i> dengan <i>flame holder</i> tipe 2	50
Tabel 5.5.	Data temperatur nyala api <i>meso-scale combustor</i> pada <i>flame holder perforated plate</i> tipe 1	55
Tabel 5.6.	Data temperatur gas hasil pembakaran <i>meso-scale combustor</i> pada <i>flame holder perforated plate</i> tipe 1	55
Tabel 5.7.	Data temperatur nyala api <i>meso-scale combustor</i> pada <i>flame holder perforated plate</i> tipe 2	56
Tabel 5.8.	Data temperatur gas hasil pembakaran <i>meso-scale combustor</i> pada <i>flame holder perforated plate</i> tipe 2	56
Tabel 5.9.	Tabel validasi temperatur gas hasil pembakaran pada <i>flame holder</i> tipe 1	62
Tabel 5.10.	Data validasi perbandingan eksperimental dan numerik pada kestabilan api <i>meso-scale combustor</i> dengan <i>flame holder</i> tipe 2.....	62



DAFTAR GAMBAR

No	Judul	Halaman
Gambar 1.1.	Perbandingan dari densitas energi baterai <i>lithium</i> dengan bahan bakar hidrokarbon dan beberapa jenis mesin yang lain.	1
Gambar 2.1.	Distribusi temperatur pada <i>swirling burner</i> dan <i>heat circulation burner</i>	5
Gambar 2.2.	Diagram kestabilan api <i>meso-scale combustor</i> dengan menggunakan <i>wiremesh flame holder</i>	7
Gambar 2.3.	(a) Diagram skema prinsip dasar <i>micro power generation</i> (b) Diagram alir energi pada sistem <i>microcombustor-thermoelectric power generation</i>	9
Gambar 3.1.	Bagan kerangka konsep penelitian.....	19
Gambar 3.2.	Diagram alir penelitian.....	22
Gambar 4.1.	<i>Meso-scale combustor</i> dengan <i>perforated plate flame holder</i>	24
Gambar 4.2.	Tampilan awal Ansys Workbench 14.5	24
Gambar 4.3.	<i>Graphic user interface</i> ANSYS Workbench 14.5	25
Gambar 4.4.	Komponen-komponen <i>fluid flow (fluent)</i>	25
Gambar 4.5.	Variasi <i>flame holder</i>	26
Gambar 4.6.	Langkah awal pendefinisian geometri	26
Gambar 4.7.	<i>Sketch wall unburned zone (sketch 1)</i>	27
Gambar 4.8.	<i>Wall unburned zone</i>	27
Gambar 4.9.	<i>Sketch flame holder</i>	28
Gambar 4.10.	<i>Flame holder</i>	28
Gambar 4.11.	<i>Pattern</i> lubang <i>flame holder</i>	29
Gambar 4.12.	<i>New plane</i> pada permukaan <i>flame holder</i>	29
Gambar 4.13.	<i>Sketch burned zone</i>	30
Gambar 4.14.	<i>Meso-scale combustor</i>	30
Gambar 4.15.	<i>Fill fluid meso-scale combustor</i>	31
Gambar 4.16.	Tampilan komponen <i>mesh</i> pada <i>fluid flow (fluent)</i>	31
Gambar 4.17.	Hasil <i>meshing</i>	32
Gambar 4.18.	<i>Update</i> hasil <i>meshing</i>	33
Gambar 4.19.	Potongan geometri <i>flame holder</i> tipe 1 (a) domain (b) <i>meshing</i>	33
Gambar 4.20.	<i>Fluent launcher</i>	34
Gambar 4.21.	Tampilan awal <i>setup</i> ANSYS Fluent 14.5	34
Gambar 4.22.	<i>Pressure-based Segregated Algorithm</i>	35



Gambar 4.23.	Pengaturan <i>models</i>	36
Gambar 4.24.	Jendela mengaktifkan persamaan energi	36
Gambar 4.25.	Jendela pengaturan model viskositas	37
Gambar 4.26.	Jendela pengaturan model spesies	37
Gambar 4.27.	Jendela pengaturan material properties	39
Gambar 4.28.	Jendela pengaturan kondisi batas	40
Gambar 4.29.	Jendela pengaturan <i>solution method</i>	41
Gambar 4.30.	Algoritma SIMPLE	42
Gambar 4.31.	Jendela solustion initialization	43
Gambar 4.32.	Jendela pengaturan iterasi	43
Gambar 4.33.	Jendela pengaturan konvergensi	44
Gambar 4.34.	Grafik iterasi perhitungan	44
Gambar 4.35.	Jendela plot hasil	45
Gambar 4.36.	Contoh data plot <i>contour</i>	45
Gambar 5.1.	Hasil simulasi keadaan <i>blowoff</i>	48
Gambar 5.2.	Hasil simulasi keadaan stabil	48
Gambar 5.3.	Batas kestabilan api stokiometri pada <i>flame holder</i> tipe 1	50
Gambar 5.4.	Batas kestabilan api stokiometri pada <i>flame holder</i> tipe 2	50
Gambar 5.5.	Distribusi temperatur pada <i>meso-scale combustor</i> dengan <i>flame holder perforated plate</i> tipe 1 pada variasi kecepatan reaktan pada rasio ekuivalen yang sama	52
Gambar 5.6.	Distribusi temperatur pada <i>meso-scale combustor</i> dengan <i>flame holder perforated plate</i> tipe 1 pada variasi rasio ekuivalen pada kecepatan reaktan yang sama	53
Gambar 5.7.	Distribusi temperatur pada <i>meso-scale combustor</i> dengan <i>flame holder perforated plate</i> tipe 2 pada variasi kecepatan reaktan pada rasio ekuivalen yang sama	54
Gambar 5.8.	Distribusi temperatur pada <i>meso-scale combustor</i> dengan <i>flame holder perforated plate</i> tipe 2 pada variasi rasio ekuivalen pada kecepatan reaktan yang sama	54
Gambar 5.9.	Grafik perbandingan temperatur nyala api eksperimen dan numerik <i>meso-scale combustor</i> pada ekuivalen rasio 1.3 dengan variasi kecepatan reaktan	57

Gambar 5.10. Grafik perbandingan temperatur nyala api eksperimen dan numerik *meso-scale combustor* pada kecepatan reaktan 30 cm/s dengan variasi equivalen rasio..... 58

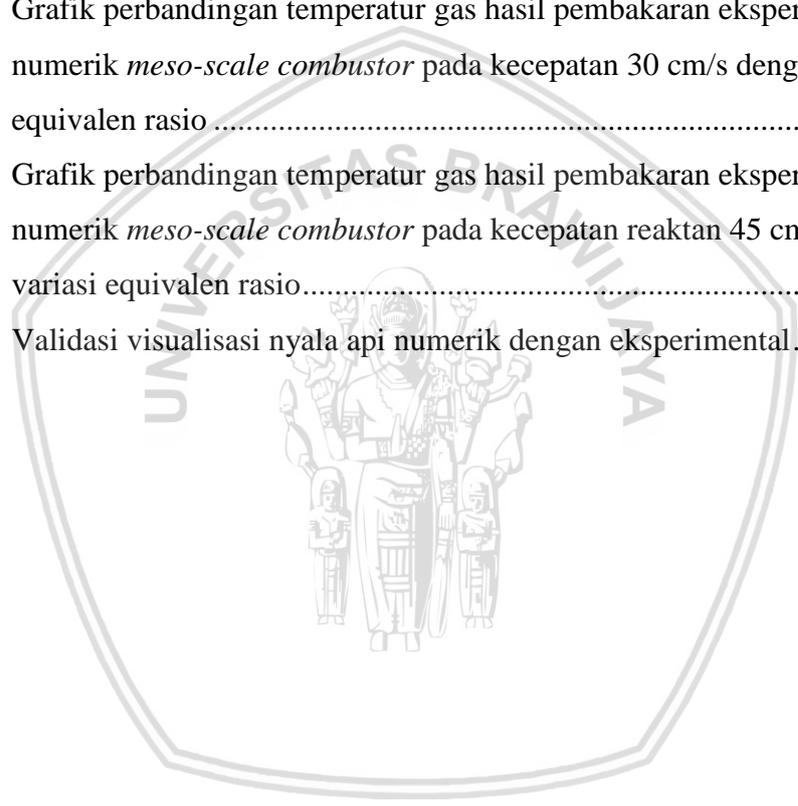
Gambar 5.11. Grafik perbandingan temperatur nyala api eksperimen dan numerik *meso-scale combustor* pada kecepatan reaktan 45 cm/s dengan variasi equivalen rasio..... 58

Gambar 5.12. Grafik perbandingan temperatur gas hasil pembakaran eksperimen dan numerik *meso-scale combustor* pada equivalen rasio 1.3 dengan variasi kecepatan reaktan..... 59

Gambar 5.13. Grafik perbandingan temperatur gas hasil pembakaran eksperimen dan numerik *meso-scale combustor* pada kecepatan 30 cm/s dengan variasi equivalen rasio 60

Gambar 5.14. Grafik perbandingan temperatur gas hasil pembakaran eksperimen dan numerik *meso-scale combustor* pada kecepatan reaktan 45 cm/s dengan variasi equivalen rasio..... 60

Gambar 5.15. Validasi visualisasi nyala api numerik dengan eksperimental..... 62



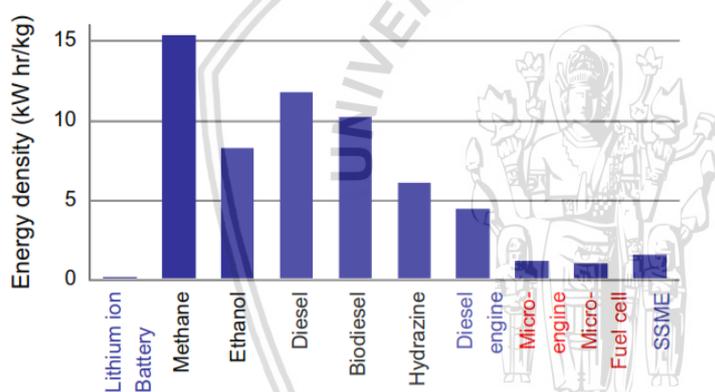
DAFTAR SIMBOL

Besaran dasar	Satuan dan Singkatannya	Simbol
Air Fuel Ratio	-	AFR
Berat molekuler	Massa atom atau sma	MW
Bilangan Nusselt	-	N_u
bilangan Zeldovich	-	β
Densitas	kg/m ³	P
Diameter pipa	Meter atau m	D_o
Energi dalam	Joule atau J	U
Entalpi	Joule atau J	H
Entalpi pembentukan	kJ/kmol	h_f
Entalpi spesifik	J/kg (spesies) atau J/kmol (molar)	h_k
Fraksi Massa	Tak berdimensi	Y
Fraksi Mol	Tak berdimensi	X
Heat Spesifik	J/kg °C	C
Jumlah mol	Tak berdimensi	N
Koefisien stoikiometri	-	V'
Konsentrasi spesies	-	C_k
Konstanta gas universal	Tak berdimensi	R_u
Konstanta laju reaksi	-	k_f
Massa	Kilogram atau kg	M
Rasio Equivalen	-	ϕ
Reaction rate	kmol/m ³ .s	RR
Tegangan viscous	Pascal atau Pa	τ
Temperatur	Celcius atau °C	T
Tekanan	Pascal atau Pa	P
Total <i>reaction rate</i>	mol/l.s	\dot{q}_k
Volume	Meter kubik atau m ³	V

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dua dekade terakhir ini, teknologi berskala mikro secara signifikan telah berkembang pesat untuk meminimalisir kebutuhan dan multifungsi dari komunikasi, pengambilan gambar, analisis kimia dan peralatan biomedik. Peralatan yang dibutuhkan memerlukan spesifikasi mudah dibawa, mempunyai umur pemakaian yang lama, dan dayanya dapat diisi ulang dengan mudah dari beberapa miliwatt hingga ratusan watt. Sampai saat ini kebutuhan tersebut terpenuhi dengan penggunaan energi yang dihasilkan dari baterai *lithium*. Akan tetapi, penggunaan baterai *lithium* mempunyai beberapa kelemahan antara lain, densitas energi yang rendah, waktu pemakaian yang pendek, pengisian daya yang lama, serta material baterai yang mencemari lingkungan saat sudah tidak dipakai. Seperti pada gambar 1.1 yang menunjukkan perbandingan densitas energi antara baterai *lithium*, bahan bakar hidrokarbon dan beberapa jenis mesin yang lain.



Gambar 1.1. Perbandingan dari densitas energi baterai lithium dengan bahan bakar hidrokarbon dan beberapa jenis mesin yang lain.

Sumber: (Pello, 2002)

Dari gambar grafik diatas dapat diketahui bahwa dengan menggunakan bahan bakar hidrokarbon, bahkan dengan 10% efisiensi konversi energi, densitas energi dari pembangkit energi dengan skala mikro (*micro power generation*) enam kali lebih besar daripada baterai *lithium* (Ju & Maruta, 2011; Kaoru Maruta, 2011). Bahkan (Chigier & Gemci, 2003) meneliti pembakaran dengan skala mikro (*micro combustion*) diperoleh densitas energi sampai dengan 10 kWh/kg. Mesin berukuran mikro mempunyai densitas energi yang tinggi dengan semakin kecilnya peralatan listrik, berat dari ruang bakar secara signifikan menurun pada tekanan yang tinggi. Semakin cepatnya perkembangan peralatan yang mudah dibawa seperti telepon genggam, laptop, dan pengisi daya, pangsa pasar

repository.ub.ac.id

menginginkan adanya generator listrik berukuran kecil (*micro power generation*) yang semakin meningkat (Ju & Maruta, 2011).

Komponen dasar *micro power generation* yang dibutuhkan terdiri dari dua komponen utama antara lain, ruang bakar berskala mikro (*meso-scale combustor*) dimana terjadi perubahan energi kimia bahan bakar menjadi energi termal dalam proses pembakaran dan peralatan pengkonversi energi panas menjadi energi listrik (Epstein & Senturia, 1997). Untuk mendapatkan densitas energi yang tinggi dari *micro power generation* dibutuhkan pembakaran pada *meso-scale combustor* yang stabil dan peralatan konversi energi yang efisien. Pada penelitian ini akan dikhususkan pembahasannya untuk memperoleh kestabilan api pada *meso-scale combustor*. Masalah yang muncul adalah pada *meso-scale combustor* terdapat kekurangan yang terletak pada proses pembakarannya, dimana terjadi ketidakstabilan nyala api pada proses pembakarannya karena ruang bakar dengan ukuran yang kecil. Sehingga perbandingan dari kerugian kalor (*heat loss*) yang keluar ke sistem sekitar dengan energi yang dibangkitkan (*heat generation*) akan meningkat. Dimensi dengan ukuran yang relatif kecil juga mengakibatkan pembakaran tidak sempurna, sehingga meningkatkan emisi CO (karbon monoksida) pada gas hasil pembakaran (Katsuyoshi et al., 2009).

Pembakaran dengan bahan bakar gas dan cair pada *micro combustion* menjadi salah satu penelitian yang banyak dilakukan. Namun, sangat sulit untuk menjaga kestabilan api dalam *micro-combustor*, karena keterbatasan waktu yang tidak memadai dan tingginya panas yang hilang terkait dengan peningkatan rasio luas permukaan terhadap rasio volume, yang mana menyebabkan *thermal quenching* (Mikami et al., 2013). Selain itu tidak mungkin menyalakan api pada skala milimeter. Tergantung pada geometri, komposisi, laju alir, campuran bahan bakar methana/udara akan padam dengan dimensi kritikal kurang dari 2 mm (Norton & Vlachos, 2003).

Keberhasilan dalam mestabilkan api pada *meso-scale combustor* dari bahan bakar gas pada pipa pembakaran *quartz glass* dengan penambahan *wire mesh* didalamnya, tanpa katalis ataupun panas dari luar telah dilakukan oleh (Mikami et al., 2013). Kestabilan api dapat terjadi karena peranan penting dari *wire mesh* sebagai *flame holder*. Selanjutnya penelitian tentang kecepatan perambatan api dari bahan bakar gas pada *meso-scale combustor* dengan *wire mesh* menunjukkan bahwa kecepatan perambatan api pada disekitar daerah *wire mesh* meningkat. Hal itu disebabkan karena tingginya temperatur di daerah *wire mesh*. Fenomena tersebut mengindikasikan peranan yang lain dari *wire mesh* untuk memperbesar *heat recirculation* dari api pada reaktan yang belum terbakar oleh

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

konduksi panas melalui dinding *combustor* (Yulianti, 2014). Kemungkinan terjadinya pembakaran pada skala mikro sudah terbukti dari hasil eksperimental. Pemahaman mendasar tentang mekanisme pembakaran skala mikro pada ruang bakar, dimana sangat penting dalam mendesain dan mengoptimasi dari daya yang dihasilkan peralatan *micro electro mechanical system* MEMS dimana masih belum dipahami dengan baik untuk saat ini (Hua et al., 2005).

Kemudian (Raimondeau et al., 2002) mendemonstrasikan pembakaran metana (CH_4) pada dua dimensi pada *micro combustor* berbentuk tabung dengan menggunakan CFD, dimana model tersebut menggunakan detail dari *multi-component transport* dan reaksi gas kimia. Setelah itu (Munir & Mikami, 2015) mengembangkan penelitian yang dilakukan oleh Mikami dengan metode CFD secara numerik. Hal yang dikembangkan dari penelitian Mikami adalah *flame holder* dari *wire mesh* diganti menggunakan *concentric rings*. Namun jika dilakukan secara metode eksperimental, penelitian tersebut sulit dilakukan karena *concentric rings* yang menggantung pada saluran.

Selanjutnya penelitian dari Munir tersebut dikembangkan oleh Basranto dengan perubahan dari *flame holder concentric rings* menjadi *flame holder perforated plate*. Dengan 2 tipe *perforated plate* yang digunakan, menunjukkan bahwa penggunaan *flame holder perforated plate* pada tipe ke-2 pada pembakaran dalam *meso-scale combustor* pada kecepatan reaktan yang tinggi memiliki pembakaran dengan nyala api yang stabil pada kecepatan reaktan yang tinggi. Selain itu, daerah *flame stability limit* yang lebih luas, temperatur nyala api yang lebih tinggi serta visualisasi api yang seragam ditunjukkan pada hasil penelitian tersebut (Basranto et al., 2013).

Dari penelitian yang telah dilakukan secara eksperimental oleh Basranto, perlu dikembangkan lagi secara numerik. Karena CFD merupakan metode berdasarkan simulasi numerik yang dilakukan untuk mempelajari pembakaran, terutama masalah pembakaran *premixed* stokiometri campuran butana (C_4H_{10}) – udara pada ruang bakar berskala mikro. Reaksi kimia yang terperinci pada pembakaran campuran butana (C_4H_{10}) – udara sudah termasuk dalam simulasi CFD. Sehingga dari simulasi CFD tersebut, hal mendasar yang perlu ditingkatkan dalam mengembangkan peralatan pembakaran dengan skala mikro maupun *mesoscale* adalah masalah teknik proses pendinginan (*radical quenching*) dengan perbandingan volume dan luas permukaan dari peralatan yang berskala. Selain itu, operasi katalis pada temperatur rendah, interaksi diantara fase gas, dan reaksi pada permukaan, dapat meningkatkan ketertarikan pada efek reaksi kimia yang terjadi pada dinding.

1.2. Rumusan Masalah

Bagaimana pengaruh variasi bentuk *flame holder* (*circular hole* dan *narrow slit hole perforated plate*) terhadap karakteristik pembakaran dalam *meso-scale combustor* dengan bahan bakar butana (C_4H_{10}) secara numerik? Karakteristik pembakaran yang diamati adalah temperatur api, letak nyala api dan temperatur gas hasil pembakaran.

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh variasi bentuk *flame holder* (*circular hole* dan *narrow slit hole perforated plate*) terhadap karakteristik pembakaran dalam *meso-scale combustor* dengan bahan bakar butana (C_4H_{10}) secara numerik.

1.4. Manfaat Penelitian

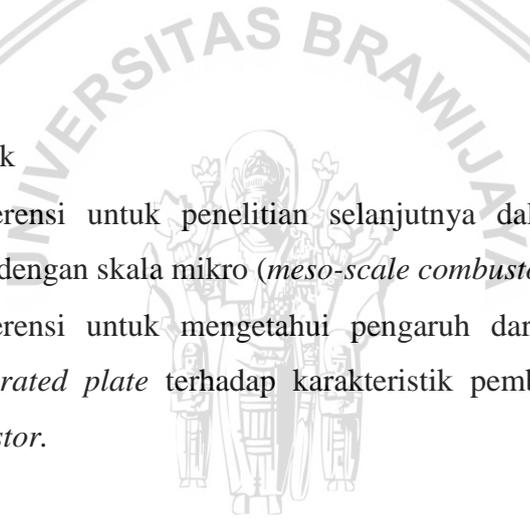
1. Bidang Akademik

- Sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya dalam mengembangkan pembakaran dengan skala mikro (*meso-scale combustor*).
- Sebagai referensi untuk mengetahui pengaruh dari penambahan *flame holder perforated plate* terhadap karakteristik pembakaran dalam *meso-scale combustor*.

2. Bidang Industri

- Sebagai referensi dalam mendesain generator berukuran mikro, dimana generator tersebut menjadi peralatan dalam mengurangi penggunaan baterai *lithium*.

Dalam pengembangan pembakaran berskala mikro, optimasi dari desain ruang bakar dapat menjadi salah satu manfaat yang dapat diambil dalam produksinya.

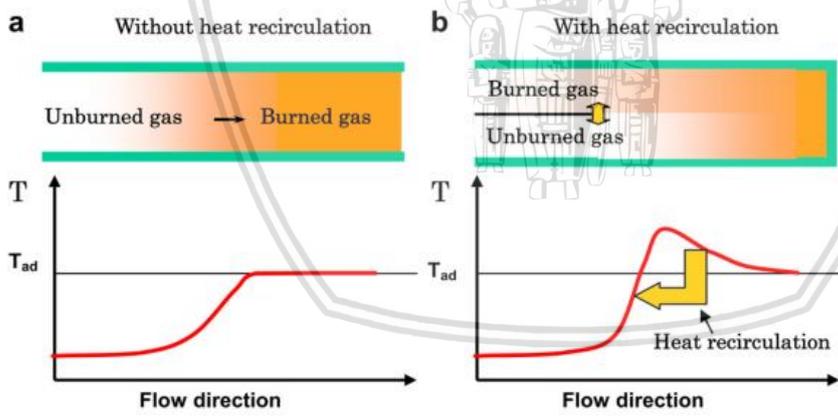


BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Sebelumnya

Untuk meningkatkan efisiensi panas dan kestabilan pembakaran pada *microcombustors*, berbagai usaha sudah dilakukan dalam mengoptimalkan panas yang dihasilkan dengan menggunakan beberapa metode, antara lain menggunakan katalis, *external heating*, *heat recirculation*, *facing step*, dan *flame holder*. Semua metode tersebut digunakan untuk memperoleh kestabilan api pada *microcombustor*.

Konsep pada “*excess enthalpy*” sudah diadopsi secara luas pada desain *microcombustors*. Pekerjaan paling awal pada *excess enthalpy* dibawa oleh (Jones et al., 1978; Wenberg, 1975) dan (Takeno & Sato, 1979). Idenya dengan menggunakan burner tipe *Swiss-roll* untuk memanfaatkan kembali energi panas (*heat recirculation*) dari gas pembakaran untuk digunakan kembali pada campuran gas yang tidak terbakar. Hasilnya, jika dibandingkan dengan pembakaran menggunakan *heat recirculation*, meskipun adiabatik temperatur api tidak berubah, maksimal temperatur api pada zona reaksi secara signifikan meningkat daripada adiabatik temperatur api maksimal dari pembakaran tanpa *heat recirculation*, menghasilkan yang disebut “*excess enthalpy*” atau pembakaran *superadiabatic*, yang digambarkan seperti gambar 2.1.



Gambar 2.1. Distribusi temperatur *swirling burner* dan *heat circulation burner*

Sumber: (Ju & Maruta, 2011)

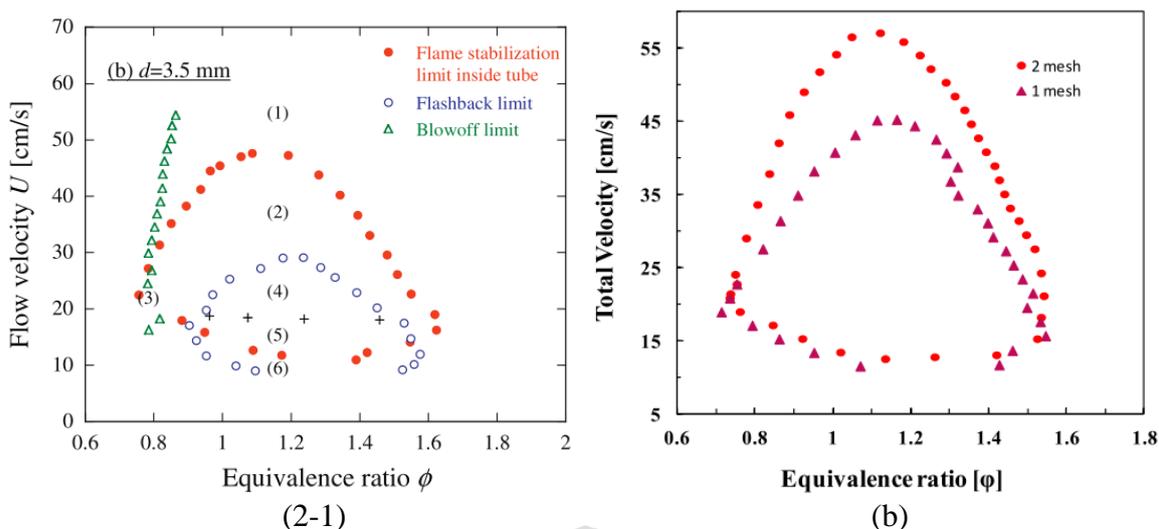
Dengan peningkatan maksimal temperatur api, dilakukan untuk mengurangi pemadaman api dari kerugian panas dan dapat menyala lebih luas daripada batas nyala api (*flame stability limit*). Berdasarkan dari konsep tersebut, variasi perbedaan jenis pada *Swiss-roll microcombustors* sudah didesain. Hasil eksperimental menunjukkan bahwa pembakaran yang stabil dapat diperoleh dengan komposisi campuran dengan batas standar api menyala. Untuk selanjutnya kerugian panas (*heat losses*) dan kerugian pembakaran

secara radikal yang diinduksi, *meso* dan *micro-scale* reaktor katalis sedang dikembangkan. Namun, desain *micro-combustor* yang berhasil dengan menggunakan konversi energi yang efisien, dibutuhkan pengetahuan yang mendalam mengenai kerugian panas, kerugian radial, *excess enthalpy*, temperatur dinding, campuran bahan bakar dan udara, penguapan bahan bakar cair, daerah aliran, keseimbangan transport pada penyalaan, kecepatan pembakaran, dan kestabilan api.

Pembakaran dengan bahan bakar gas dan cair pada *micro combustion* menjadi salah satu penelitian yang banyak dilakukan. Namun, sangat sulit untuk menjaga kestabilan api dalam *micro-combustor*, karena keterbatasan waktu yang tidak memadai dan tingginya panas yang hilang terkait dengan peningkatan rasio luas permukaan terhadap rasio volume, yang mana menyebabkan *thermal quenching* (Mikami et al., 2013). Selain itu tidak mungkin menyalakan api pada skala milimeter, tergantung pada geometri, komposisi, laju alir, campuran bahan bakar metana/udara akan padam dengan dimensi kritikal kurang dari 2 mm (Norton & Vlachos, 2003).

Sejak (C. M. Miesse et al., 2004) meneliti tentang *submillimeter scale combustion* dimana terdapat tiga kunci untuk menjaga *micro combustion* dalam keadaan stabil, antara lain 1) dinding dari *microburner* harus terbuat dari material yang tidak memadamkan api, 2) peralatan yang dibutuhkan harus terisolasi cukup baik, 3) bentuk aliran pada *burner* perlu diperhatikan pada temperatur cukup rendah sehingga tidak padam di daerah dinding sebelum api mengisi seluruh ruang pembakaran. Selain itu, keberhasilan dalam menstabilkan api dari bahan bakar gas C_3H_8 secara *premixed* pada pipa pembakaran *quartz glass* dengan penambahan *wire mesh* didalamnya, tanpa katalis ataupun panas dari luar telah dilakukan oleh (Mikami et al., 2013). Pada gambar 2.2a. menunjukkan bahwa kestabilan api dapat terjadi karena peranan penting dari *wire mesh* sebagai *flame holder*.

Selanjutnya penelitian tentang kecepatan perambatan api dari bahan bakar gas pada *meso-scale combustor* dengan *wire mesh* menunjukkan bahwa kecepatan perambatan api pada disekitar daerah *wire mesh* meningkat. Hal itu disebabkan karena tingginya temperatur di daerah *wire mesh*. Fenomena tersebut mengindikasikan peranan yang lain dari *wire mesh* untuk memperbesar *heat recirculation* dari api pada reaktan yang belum terbakar oleh konduksi panas melalui dinding *combustor* (Yuliati, 2014). Hasil penelitian tersebut ditunjukkan pada gambar 2.2b.



Gambar 2.2. Diagram kestabilan api *meso-scale combustor* dengan menggunakan *wiremesh flame holder*

Sumber: (Mikami et al., 2013) dan (Yuliati, 2014)

Kemungkinan terjadinya pembakaran pada skala mikro sudah terbukti dari hasil eksperimental. Pemahaman mendasar tentang mekanisme pembakaran skala mikro pada ruang bakar, dimana sangat penting dalam mendesain dan mengoptimasi dari daya yang dihasilkan peralatan *micro electro mechanical system* MEMS masih belum dipahami dengan baik untuk saat ini. Dikarenakan sulit melakukan pengukuran dengan baik pada karakteristik pembakaran di peralatan dengan skala mikro. Hal tersebut dapat dilakukan dengan pendekatan secara simulasi numerik yang dapat menghemat biaya untuk mempelajari mekanisme pembakaran dengan skala mikro (Hua et al., 2005).

Pada awal tahun 2000, *Computational Fluid Dynamics* (CFD) telah digunakan secara numerik untuk meneliti perambatan api pada *micro-burners*. Mendemonstrasikan pembakaran metana (CH_4) (Raimondeau et al., 2002) pada dua dimensi pada *micro combustor* berbentuk tabung, dimana model tersebut menggunakan detail dari *multi-component transport* dan reaksi gas kimia. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa efek dari pemanasan awal (*preheating*) pada reaktan dan isolasi mempengaruhi perambatan api pada saluran mikro. Selanjutnya *heat losses* awal yang terjadi dan pemadaman dari dinding menjadi parameter utama untuk menentukan perambatan api pada *micro burners*.

Kemudian (Munir & Mikami, 2015) mengembangkan penelitian yang dilakukan oleh Mikami dengan metode CFD secara numerik. Dengan menggunakan bahan bakar propana yang terdiri dari lima spesies, pembakaran secara numerik dilakukan dengan bantuan software CFD yaitu ANSYS Fluent 6.3. Hal yang dikembangkan dari penelitian

Mikami adalah *flame holder* dari *wire mesh* dimana diganti menggunakan *concentric rings*. Dari hasil penelitian yang dilakukan, diperoleh bahwa kecepatan inlet dan ekuivalen rasio mempunyai dampak yang signifikan terhadap kestabilan api, dimana dapat merubah distribusi temperatur pada dinding. Meskipun konduktivitas termal pada dinding mempunyai efek yang kecil terhadap temperatur api, temperatur dinding dalam dan luar permukaan dinding mempunyai peran yang sangat besar (Munir & Mikami, 2015). Namun jika dilakukan secara metode eksperimental, penelitian tersebut sulit dilakukan karena *concentric rings* yang menggantung pada saluran.

Selanjutnya penelitian dari Munir tersebut dikembangkan oleh Basranto dengan perubahan dari *flame holder concentric rings* menjadi *flame holder perforated plate*. Dengan 2 tipe *perforated plate* (*circular hole* dan *narrow slit hole perforated plate*) yang digunakan, menunjukkan bahwa penggunaan *flame holder perforated plate* pada tipe ke-2 pada pembakaran dalam *meso-scale combustor* pada kecepatan reaktan yang tinggi memiliki pembakaran dengan nyala api yang stabil pada kecepatan reaktan yang tinggi. Selain itu, daerah *flame stability limit* yang lebih luas, temperatur nyala api yang lebih tinggi serta visualisasi api yang seragam ditunjukkan pada hasil penelitian tersebut (Basranto et al., 2013).

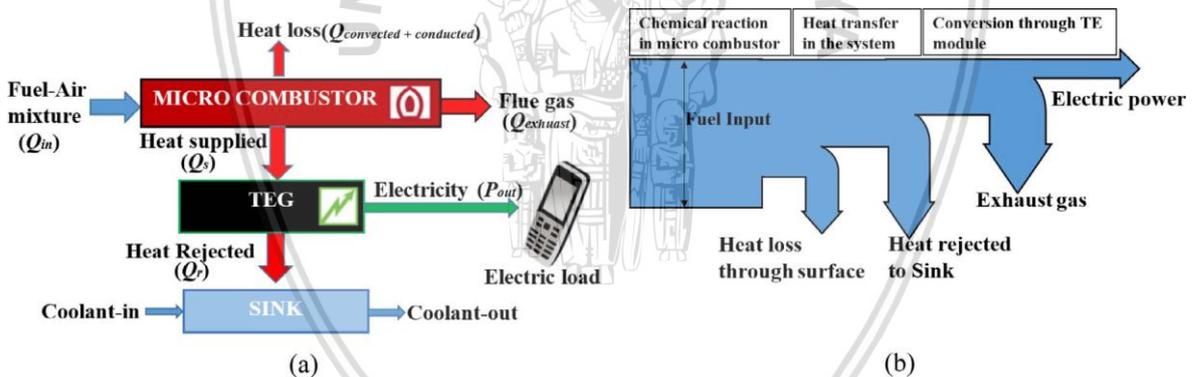
Dari penelitian yang telah dilakukan secara ekperimental oleh Basranto, perlu dikembangkan lagi secara numerik. Karena CFD merupakan metode berdasarkan simulasi numerik yang dilakukan untuk mempelajari pembakaran, terutama masalah pembakaran *premixed* stokiometri campuran butana (C_4H_{10}) – udara pada ruang bakar berskala mikro. Reaksi kimia yang terperinci pada pembakaran campuran butana (C_4H_{10}) – udara sudah termasuk dalam simulasi CFD. Sehingga dari simulasi CFD tersebut, hal mendasar yang perlu ditingkatkan dalam mengembangkan peralatan pembakaran dengan skala mikro maupun *mesoscale* adalah masalah teknik proses pendinginan (*radical quenching*) dengan perbandingan volume dan luas permukaan dari peralatan yang berskala. Selain itu, operasi katalis pada temperatur rendah, interaksi diantara fase gas, dan reaksi pada permukaan, dapat meningkatkan ketertarikan pada efek reaksi kimia yang terjadi pada dinding.

2.2. Micro Power Generators

Komponen dasar *micro power generation* yang dibutuhkan terdiri dari dua komponen utama antara lain, ruang bakar berskala mikro (*meso-scale combustor*) dimana terjadi perubahan energi kimia bahan bakar menjadi energi termal dalam proses pembakaran dan peralatan pengkonversi energi panas menjadi energi listrik (Epstein &

Senturia, 1997). Untuk mendapatkan densitas energi yang tinggi dari *micro power generation* dibutuhkan pembakaran pada *meso-scale combustor* yang stabil dan peralatan konversi energi yang efisien.

Pada gambar 2.3a. ditunjukkan prinsip dasar dari *micro power generation* untuk berbagai jenis peralatan elektrik generator yang memanfaatkan proses pembakaran. Pada dasarnya sistem tersebut terdiri dari tiga bagian, antara lain sumber energi panas atau *micro-combustor*, peralatan mentransfer panas (*heat sink*) dan termoelektrik generator (*thermoelectric generators*). Sumber energi panas dan *heat sink* menghasilkan perubahan temperatur, kemudian ditransferkan ke termoelektrik generator dan mengalirkan energi panas ke sistem. Termoelektrik generator mengkonversi energi panas dari *micro-combustor* menjadi energi listrik. Pada gambar 2.3b. juga menunjukkan diagram aliran energi untuk sebuah sistem. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa energi panas yang dihasilkan dalam jumlah kecil yang dihasilkan dari konversi energi listrik karena *heat losses* dan beberapa kerugian dari peralatan teknologi termoelektrik. Sehingga penelitian yang dapat dilakukan selanjutnya adalah memfokuskan pada meminimalisir *heat losses* yang terjadi dan meningkatkan efisiensi pada sistem termoelektrik generator.



Gambar 2.3. (a) Diagram skema prinsip dasar *micro power generation* (b) Diagram aliran energi pada sistem *microcombustor-thermoelectric power generation*

Sumber: (Aravind et al., 2018)

2.3. Micro/Meso Scale Combustion

Dalam sepuluh tahun terakhir, jenis *micro-thrusters*, *micro engines*, *micro-reactors* telah dikembangkan. Karena pemilihan referensi skala panjang tidak terdefinisi dengan baik, membuat definisi dari “*micro-scale combustion*” menjadi ambigu dan terkadang membingungkan dengan definisi dari “*meso-scale combustion*”. Secara umum pada pemahaman sebelumnya bahwa terdapat tiga skala panjang berbeda yang digunakan dalam mendefinisikan “*micro-scale combustion*”. Perbedaan tersebut dapat dilihat pada tabel 2.1. Jika panjang *combustor* dibawah 1 mm disebut pembakaran mikro. Sebaliknya, jika

panjang *combustor* lebih dari 1 mm tetapi tidak lebih dari 1 cm disebut *meso-scale combustion*. Definisi ini sudah digunakan pada beberapa penelitian dalam mengembangkan mesin berukuran mikro. Definisi kedua digunakan dengan referensi panjang jarak terhadap api. Pada definisi ini, pembakaran disebut *microscale combustion* jika geometri *combustor* lebih kecil daripada *quenching diameter*, dan sebaliknya. *Quenching diameter* adalah fungsi dari komposisi campuran dan properties dinding (temperatur dan reaksi permukaan). Pendefinisian yang terakhir adalah menggunakan panjang skala relatif dari seluruh peralatan terhadap peralatan dengan skala besar untuk tujuan yang sama.

Tabel 2.1. Definisi dari *micro-scale* dan *meso-scale combustion*

Definisi berdasarkan	Combustion Regime	Panjang skala	Contoh	Aplikasi
Panjang	Skala meso	1 sampai 10 mm	<i>Rotary engine (UCB)</i>	<i>MEMS</i>
Api <i>quenching diameter</i>	Skala mikro	1 sampai 1000 μm	Reaktor mikro (<i>UIUC</i>)	<i>Thruster</i>
	Skala meso	\sim <i>Quenching diameter</i> (seimbang)	Ruang bakar <i>Swiss-roll (USC)</i>	<i>Power generation</i>
Skala peralatan	Skala mikro	<i>Quenching diameter</i> \sim <i>Mean-free path</i> (tidak seimbang)	<i>Fuel Cells</i> reaktor nano-partikel	<i>Energy conversion</i>
	Skala mikro	Lebih kecil dari mesin konvensional	<i>Micro-thrusters (PSU) Micro gas turbin (MIT)</i>	<i>Micro-satellites</i> <i>Micro-air planes</i>

Sumber: (Ju & Maruta, 2011)

2.4. Peranan *Flame Holder* pada *Micro/Meso Scale Combustion*

Untuk meningkatkan pembakaran pada *micro-* dan *meso-scale* tanpa katalis, pemanfaatan *excess enthalpy* pembakaran dengan *heat recirculation* dari gas hasil pembakaran yang dikonduksikan. Penelitian tentang *Swiss-roll combustor* merupakan penelitian yang menggunakan konsep tersebut. Konsep itu juga diaplikasikan pada penelitian ini, dimana penambahan *flame holder* berfungsi sebagai *heat recirculation* dari dinding. Jika konsep yang digunakan dalam *Swiss-roll combustor* yaitu memanfaatkan panas yang dihasilkan dari gas hasil pembakaran, hal serupa juga dilakukan dalam penelitian ini. Perbedaannya terdapat pada bentuk geometri dalam memanfaatkan panas tersebut. Jika menggunakan *flame holder*, panas yang dihasilkan dari gas hasil pembakaran terjadi perpindahan panas secara konveksi ke dinding. Setelah itu, panas dari dinding

dikonduksikan ke dinding saluran pipa *unburned zone*. Sehingga terjadi pemanasan awal terhadap reaktan secara konveksi (*preheating*). Namun panas akibat perpindahan panas konveksi ke reaktan tidak menyalakan api reaktan. Hal itu menjadi kunci utama dalam memperoleh kestabilan api dengan penambahan *flame holder*. Sehingga dapat disimpulkan bahwa *flame holder* berfungsi sebagai media resirkulasi (*heat recirculation*) dari api ke reaktan. Selain itu, fungsi lain dari *flame holder* adalah menjadi tempat menempelnya api.

2.5. Komputasi Dinamika Fluida

Komputasi dinamika fluida atau sering dikenal dengan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) adalah sebuah sistem untuk menyelesaikan kasus aliran fluida, perpindahan panas dan reaksi kimia menggunakan simulasi berbasis komputer. Teknik yang digunakan sangat akurat dan tepat diaplikasikan pada skala industri dan non-industri. Pada tahun 1960 industri penerbangan mengintegrasikan teknik CFD dengan desain untuk kebutuhan R&D dan manufaktur dari pesawat dan mesin jet. Belakangan ini metode CFD sudah diaplikasikan untuk mendesain mesin pembakaran dalam, ruang bakar dari turbin gas maupun tungku. Selanjutnya, manufaktur kendaraan bermotor secara rutin memprediksi gaya angkat, aliran udara kap mesin dan lingkungan di sekitar mobil menggunakan CFD. CFD semakin menjadi komponen yang penting dalam mendesain produk industri dan kebutuhan proses.

Tujuan utama dalam pengembangan dengan menggunakan CFD adalah untuk memberikan pemahaman lebih dalam terhadap penelitian ekperimental, sebagai contoh arah vektor aliran di dalam pipa. Berikut beberapa keuntungan dari CFD dibandingkan dengan eksperimental untuk desain sistem fluida, antara lain:

- Mereduksi waktu dan biaya untuk sebuah desain baru
- Kemampuan untuk mempelajari sistem dimana kontrol dari eksperimental sangat sulit atau tidak mungkin untuk dilakukan (contoh: pada sistem yang besar)
- Kemampuan untuk mempelajari kondisi yang berbahaya pada kondisi batas normal (contoh: keselamatan pembelajaran dan skenario kecelakaan)
- Praktis, tidak terbatas hasil dari detail yang ditampilkan

Variabel biaya yang dimaksud pada eksperimental, seperti fasilitas yang digunakan atau biaya ahli perjamnya, atau jumlah data proporsional yang diuji. Perbedaannya, bahasa pemrograman CFD dapat menghasilkan volume ekstrim yang besar untuk hasil yang sebenarnya tanpa biaya tambahan, dan hal itu sangat murah untuk parameter pembelajaran, dan contoh untuk mengoptimalkan kinerja peralatan.

Bahasa dari struktur CFD meliputi algoritma numerik yang dapat menyelesaikan permasalahan aliran fluida, perpindahan panas, pembakaran dan lain-lain. Diberikan kemudahan dalam penggunaannya dalam menyelesaikan persamaan secara akurat, semua paket CFD komersial yang dijual termasuk cara penggunaan yang canggih dalam memasukkan parameter permasalahan dan pengujian hasil. Terdapat tiga elemen utama dalam pemrograman CFD untuk menyelesaikan suatu masalah, yaitu: (1) *Pre-processor* (2) *Solver* dan (3) *Post-processor*. Secara singkat akan dijelaskan pada subbab berikut.

2.5.1 *Pre-processor*

Pre-processing terdiri dari mendefinisikan masalah yang akan diselesaikan ke program CFD dengan cara pengguna mengoperasikan secara mudah dan selanjutnya mentransformasikan masalah yang akan dimasukkan ke dalam bentuk penyelesaian pemrograman. Aktivitas pengguna pada tahap *pre-processing* meliputi:

- Pendefinisian geometri dari masalah yang akan diselesaikan: domain komputasi
- *Grid generation* – membagi domain menjadi domain-domain yang lebih kecil yaitu *grid* atau *mesh* yang terdiri dari elemen-elemen kecil (*cells* atau *element*)
- Memilih persamaan atur untuk memodelkan fenomenan fisika dan kima terhadap masalah yang terjadi
- Mendefinisikan properti dari fluida
- Spesifikasi kondisi batas yang sesuai pada *cells* yang bersinggungan dengan kondisi batas sistem dan atau kondisi awal

Solusi pada masalah aliran (kecepatan, tekanan, temperatur, dll) didefinisikan pada *nodes* di setiap *cells*. Akurasi dari penyelesaian CFD diatur dengan jumlah *cells* hasil dari *grid generation*. Secara umum, dengan jumlah *cells* yang besar akan mendapatkan ketepatan penyelesaian yang baik. Kedua ketepatan penyelesaian dan biaya dalam hal penggunaan *hardware* komputer dan waktu kalkulasi tergantung pada kehalusan dari *grid* tersebut. Dalam proses pengoptimalan, *meshes* sering tidak seragam, kehalusan pada area dimana titik variasi terbesar terjadi dan kekasaran daerah dengan perubahan yang relatif sedikit. Usaha yang sedang dilakukan untuk mengembangkan bahasa pemrograman CFD adalah dengan kemampuan *meshing* yang adaptif (secara mandiri). Akhirnya beberapa program akan secara otomatis menghaluskan *grid* pada daerah variasi yang besar. Diatas 50% waktu yang dihabiskan dalam menggunakan CFD adalah dikhususkan pada

pendefinisian domain geometri dan *grid generation*. Untuk memaksimalkan produktivitas penggunaan CFD pada semua bidang, bahasa yang digunakan sekarang adalah fasilitas dalam mengimpor data dari *mesh generators* yang lain seperti PATRAN dan I-DEAS. Pembaruan *pre-processor* selalu memberikan akses data seperti data *material properties* untuk fluida yang sering digunakan dan fasilitas dalam memilih persamaan atur, model proses kimia (seperti model turbulen, model perpindahan panas, perpindahan panas radiasi, model pembakaran) disamping persamaan aliran yang utama.

2.5.2 Grid Generation

Grid generation merupakan tahapan yang terpenting dalam memodelkan numerik dengan menggunakan *finite difference*, *finite volume*, dan *finite elements* dalam menyelesaikan suatu masalah. Caranya yaitu dengan membagi domain/geometri ke dalam *cells* kecil (dalam bentuk segitiga, poligon 2D, *tetrahedron* atau *quadrilateral*) yang didefinisikan dengan *cells*. Kumpulan dari *cells* tersebut menjadi satu kesatuan yang disebut *mesh* atau *grid* karena gabungan dari *cells* tersebut membentuk seperti jala.

Terdapat beberapa masalah konseptual yang harus diselesaikan dalam memilih *grid generation* untuk masalah tertentu, antara lain:

- Domain terbuka maupun tertutup
- Topologi domain
- *Single* atau *multiple block*
- *Structured* atau *unstructured*
- 2D atau 3D

2.5.3 Persamaan Atur Laminar-Steady State

2.5.3.1 Persamaan Massa

Persamaan konservasi massa dituliskan dengan keseimbangan massa yang terjadi pada elemen fluida, dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \partial x \partial z \partial y) = \frac{\partial \rho}{\partial t}(\partial x \partial z \partial y) \quad \text{-----} \quad (2-1)$$

2.5.3.2 Persamaan Kontinuitas

Persamaan kontinuitas yang digunakan adalah

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad \text{-----} \quad (2-2)$$

Aliran pembakaran yang mengandung densitas merupakan variabel, dimana tergantung terhadap tekanan, temperatur dan konsentrasi spesies.



2.5.3.3 Persamaan Momentum

Persamaan momentum sebagai berikut

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + F_i \quad (2-3)$$

Dimana τ_{ij} adalah tegangan *viscous* dan F_i adalah *body force* (gravitasi):

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (2-4)$$

2.5.3.4 Persamaan Transport untuk Spesies (k)

Persamaan *transport equations* sebagai berikut,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i Y_k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \right) + \dot{\omega}_k \quad (2-5)$$

2.5.3.5 Persamaan Energi

Energi kimia yang dilepaskan merupakan energi panas selama proses pembakaran dan hasil entalpi yang diperoleh dengan menyelesaikan persamaan spesies transportnya, sehingga persamaan energi dapat dituliskan:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu}{\sigma_h} \frac{\partial h}{\partial x_i} + \mu \left(\frac{1}{S_{Ck}} - \frac{1}{\sigma_h} \right) \sum_{k=1}^N h_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial p}{\partial t} + S_{rad} \quad (2-6)$$

Pada persamaan (2-6) bentuk dasar dari persamaan transport untuk entalpi S_{rad} adalah kerugian radiasi.

2.5.3.6 Perhitungan dengan *Finite Rate Chemistry*

Finite rate dan proses reaksi kimia digunakan dalam perhitungan pembakaran untuk menyelesaikan perhitungan mekanisme secara terperinci dan menyelesaikan banyak persamaan *species transport* dengan bentuk:

$$\frac{\partial}{\partial x} (r \rho u Y_k) + \frac{\partial}{\partial x} (r \rho v Y_k) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(r \rho D_k \frac{\partial Y_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho D_k \frac{\partial Y_k}{\partial r} \right) + r \dot{\omega}_k \right] \quad (2-7)$$

2.5.3.7 Kondisi Batas dan Kondisi Awal

Semua masalah CFD didefinisikan dengan bentuk dari kondisi batas dan awal. Hal terpenting yang harus diketahui dan benar adalah peran dari algoritma numerik. Pada masalah *transient* nilai untuk semua variabel kondisi awal aliran perlu lebih spesifik pada semua titik solusi di setiap aliran domain. Implementasi dari persamaan diskritisasi dari *finite volume method*, kondisi batas yang digunakan adalah: *Inlet*, *Outlet* dan *Wall*.

2.5.4 Solver

Terdapat tiga macam jenis teknik simulasi numerik: *finite difference*, *finite element*, dan *finite volume*. Pada penelitian kali ini, kita akan memfokuskan menggunakan *finite volume method* atau sering disebut metode volume hingga. Program CFD yang akan digunakan adalah ANSYS FLUENT 14.5. Ringkasan algoritma numerik terdiri dari beberapa langkah:

- Mengintegrasikan persamaan atur dari aliran fluida menjadi *finite control volumes* pada domain
- Diskritisasi, yaitu mengkonversi hasil persamaan integral menjadi sistem persamaan aljabar
- Penyelesaian persamaan aljabar menggunakan metode iterasi

Langkah pertama yaitu mengintegrasikan kontrol volume untuk membedakan metode volume hingga (*finite volume method*) dari semua teknik CFD. Konservasi dari variabel umum aliran ϕ (*phi*) seperti kecepatan atau entalpi dalam *finite volume control* dapat dinyatakan sebagai keseimbangan antara berbagai jenis proses untuk menambah atau mengurangnya. Secara lebih jelas dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\left| \begin{array}{l} \text{Laju perubahan} \\ \text{dari } \phi \text{ di volume} \\ \text{atur sepanjang} \\ \text{waktu} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{l} \text{Fluks netto dari } \phi \\ \text{ke dalam volume} \\ \text{atur karena} \\ \text{konveksi} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{l} \text{Fluks netto dari} \\ \phi \text{ ke dalam} \\ \text{volume atur} \\ \text{karena difusi} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{l} \text{Laju} \\ \text{pembentukan } \phi \\ \text{di dalam volume} \\ \text{atur} \end{array} \right|$$

Bahasa pemrograman CFD terdiri dari teknik diskritisasi untuk menyelesaikan masalah fenomena transport, konveksi (transport karena aliran fluida), difusi (transport karena variasi dari ϕ dari titik ke titik), *source* (terjadinya dan hilangnya ϕ) dan laju perubahan terhadap waktu.

Masalah utama dari teknik CFD adalah persamaan yang tidak linear sehingga pendekatan solusi yang digunakan dengan menggunakan iterasi sangat dibutuhkan. Solusi prosedur yang sering digunakan adalah dengan TDMA (*tri-diagonal matrix algorithm*) penyelesaian garis demi garis dari persamaan aljabar dan SIMPLE algoritma untuk memastikan hubungan mana yang benar diantara tekanan dan kecepatan. Bahasa pemrograman yang komersil mungkin diberikan kepada pengguna dalam menyeleksi selanjutnya, lebih baru, teknik iterasi seperti Gauss-Seidel dengan *multigrid accelerators* dan metode gradient konjugasi.

2.5.5 Post-processor

Bagian ini merupakan kemampuan grafis yang dibutuhkan untuk menampilkan hasil termasuk kemampuan visual yang lain seperti animasi. Karena untuk meningkatkan

popularitas dari teknik *workstation*, banyak yang menggunakan kemampuan grafis yang luar biasa, paket CFD yang sekarang dapat digunakan antara lain:

- Geometri domain dan penampilan *grid*
- Plot vektor
- Garis dan bayangan dari *plot contour*
- 2D dan 3D plot permukaan
- Partikel *tracking*
- Manipulasi tampilan (translasi, rotasi, skala, dll)

2.6. Pembakaran *Premixed*

Api *premixed* adalah perambatan gelombang inti eksotermik dalam sebelum campuran. Kecepatan perambatan api *premixed* relatif untuk campuran yang tidak terbakar mempunyai arti sebagai fungsi oksidasi bahan bakar kimia, sifat transportasi, temperatur api adiabatik, dan kerugian massa dan panas. Antara *radical loss* atau *heat loss* pada lingkungan akan memperlambat kecepatan api atau bahkan memadamkan api, yang terpenting adalah batas perambatan api. Di sisi lain, jika energi eksternal ditambahkan pada api, temperatur api maksimum dan kecepatan perambatan api akan meningkat. Kemudian, api dengan kelebihan entalpi akan membuat api mempunyai temperatur yang tinggi.

Untuk pembakaran mikro, pengaruh dari *heat* dan *radical losses* pada perambatan api *premixed* akan menjadi lebih cepat karena jumlah panas yang dilepaskan (*heat release*) pada skala kecil relatif kecil. Selanjutnya, pembakaran *micro-scale* memungkinkan bahwa *heat loss* dari api ke struktur bisa kembali ke api dengan tingkatan yang lebih tinggi karena inersia panas yang diturunkan dan difusifitas panas yang tinggi dari struktur. Panas yang kembali atau *heat recirculation* akan sangat berubah pada rezim pembakaran dan batas perambatan dari api konvensional dengan skala besar. Salah satu hal yang penting pada pembakaran *micro-scale* adalah bagaimana mengerti struktur *coupling* panas api akan semakin luas pada batas api menyala dan menyebabkan terjadinya pembakaran *micro-scale*.

2.6.1. Stokiometri

Analisa proses pembakaran sederhana dimana bahan bakar diasumsikan terbakar sempurna untuk membentuk suatu produk (pembakaran sempurna). Umumnya, reaksi pembakaran melibatkan proses oksidasi dari bahan bakar hidrokarbon (karbon (C) dan hidrogen (H)). Pembakaran dapat disebut sebagai pembakaran sempurna jika semua atom C pada bahan bakar berubah menjadi CO₂ (karbondioksida) dan semua atom H pada bahan

bakar menjadi H₂O (air). Unsur yang mudah terbakar seperti sulfur (S), juga direaksikan dengan O₂. Persamaan kimia dalam proses pembakaran sempurna dapat dituliskan dengan keseimbangan reaksi kimia. Hal ini dapat dilakukan dengan cara menghitung jumlah oksidasi yang dibutuhkan bahan bakar dalam proses pembakaran sempurna, biasanya disebut kebutuhan oksidasi stokiometri. Biasanya oksidasi berupa udara, kemudian kebutuhan udara yang tepat untuk pembakaran sempurna disebut sebagai kebutuhan udara stokiometri untuk pembakaran sempurna. Kita dapat menghitung perbandingan kebutuhan bahan bakar dan udara untuk pembakaran sempurna, yang mana disebut AFR (*Air Fuel Ratio Stokiometri*). Komposisi udara yang digunakan adalah volume 78,9% N₂ dan 20,9% O₂. Jumlah setiap mol O₂ pada udara adalah 79/21(=3.76) mole N₂ dari perbandingan massa 23,3% O₂ dan 76,7% N₂. Nilai berat molekuler untuk udara adalah 29 kg/kmol, 1 kmol O₂ mengandung 100/21 kmol udara (4.76 kmol udara).

Pembakaran sempurna untuk C₄H₁₀ sebagai contoh dapat dituliskan sebagai berikut:



Perbandingan stokiometri udara/bahan bakar (AFR) untuk massa adalah

$$(A/F)_{st} = \frac{m_{udara}}{m_{bahan\ bakar}} \quad \text{-----} \quad (2-9)$$

$$(A/F)_{st} = \frac{(MW)_{udara} \times \text{jumlah kmol } O_2 \times \text{jumlah kmol udara per kmol } O_2}{(MW)_{CH_4} \times \text{jumlah kmol } CH_4}$$

$$(A/F)_{st} = \frac{29 \times 6,5 \times 4.76}{58 \times 1} = 15,47 \frac{kg\ udara}{kg\ bahan\ bakar}$$

2.6.2. Rasio Ekuivalen

Pembakaran dengan sedikit udara daripada kebutuhan udara stokiometri yang dibutuhkan disebut bahan bakar yang berlebih, dan pembakaran dengan kelebihan udara dari kebutuhan udara yang dibutuhkan disebut pembakaran miskin. Rasio ekuivalen digunakan dalam perhitungan pembakaran dalam mendefinisikan kekuatan dari campuran dengan ketepatan campuran stokiometri. Dengan bahan bakar yang dapat kita hitung AFR stokiometri sebagai yang dijelaskan di atas, disebut nilai dari AFR stokiometri. Pada keadaan campuran aktual disebut $(A/F)_{actual}$. Rasio ekuivalen menunjukkan kekuatan campuran yang tepat pada AFR stokiometri. Hal itu dirumuskan sebagai berikut:

$$\phi = \frac{(Air/Fuel)_{st}}{(Air/Fuel)_{actual}} = \frac{(Fuel/Air)_{actual}}{(Fuel/Air)_{st}} \quad \text{-----} \quad (2-10)$$

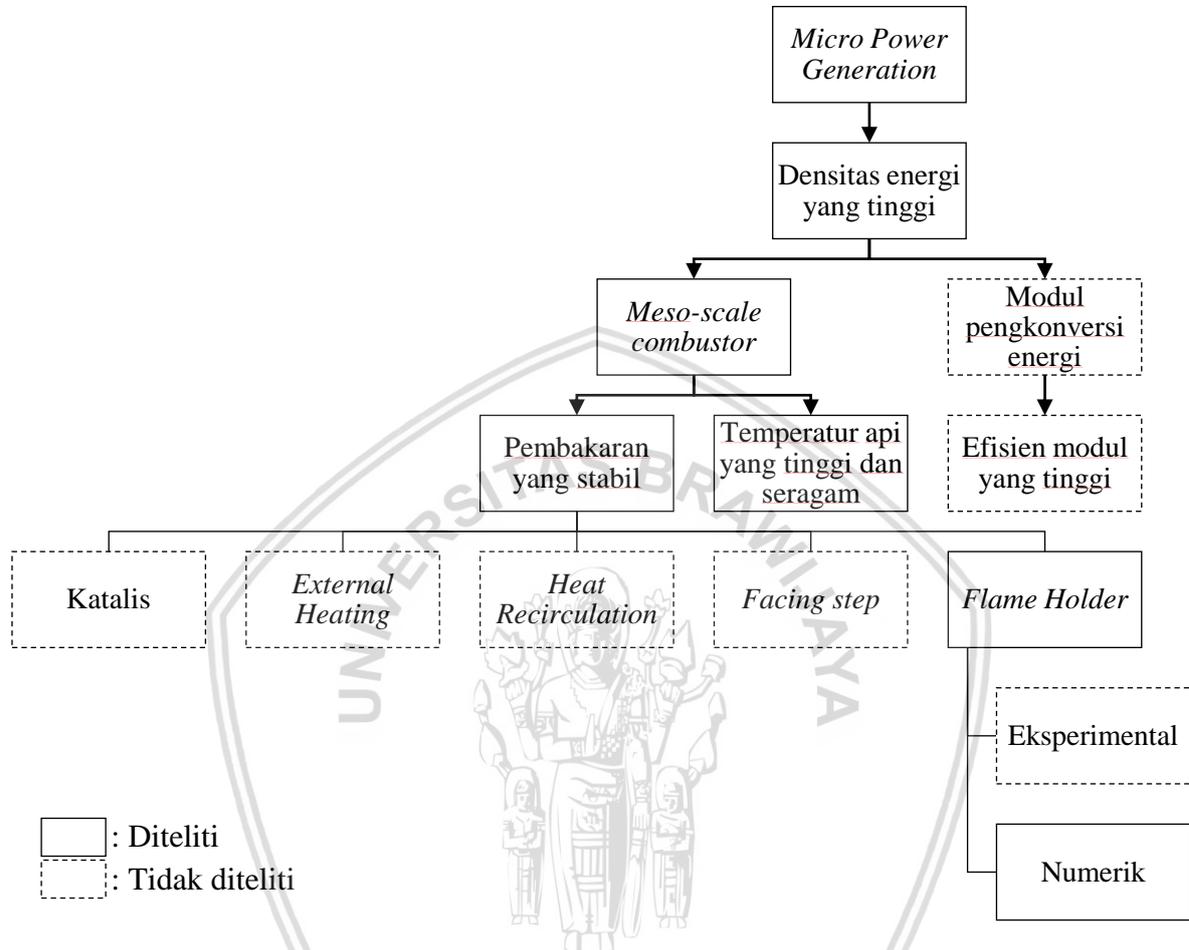
Jika rasio ekuivalen dari campuran udara/bahan bakar sama dengan satu, maka campuran tersebut adalah stokiometri. Jika nilai kurang dari 1, $\phi < 1$, menunjukkan campuran miskin dan jika $\phi > 1$, menunjukkan campuran kaya.



BAB III. KERANGKA KONSEP PENELITIAN

3.1. Kerangka Fikir

Kerangka fikir dari penelitian ini dapat dilihat dari bagan dibawah ini:



Gambar 3.1. Bagan kerangka konsep penelitian

Penggunaan baterai *lithium* akhir-akhir ini semakin meningkat seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi yang *portable*. Baterai *lithium* mempunyai beberapa kelemahan antara lain, densitas energi yang rendah, waktu pemakaian yang pendek, pengisian daya yang lama, serta material baterai yang dapat mencemari lingkungan jika sudah tidak dipakai. Salah satu solusi untuk menangani masalah tersebut adalah mengganti penggunaan baterai *lithium* dengan *micropower generation*.

Micropower generation merupakan peralatan pembangkit daya dengan skala mikro yang dapat menghasilkan energi dengan densitas yang tinggi. Peralatan tersebut terdiri dari dua komponen utama antara lain, *meso-scale combustor* dan modul pengkonversi energi panas menjadi energi listrik. *Meso-scale combustor* merupakan ruang bakar dengan yang



miliki ukuran yang relatif kecil, dimana energi kimia bahan bakar akan diubah menjadi energi panas dari proses pembakaran.

Masalah yang terjadi untuk memperoleh densitas energi yang tinggi pada *micropower generation* salah satunya adalah mendapatkan kestabilan api pada *meso-scale combustor* dengan debit bahan bakar yang tinggi. Pada debit bahan bakar yang tinggi, kestabilan api sulit dilakukan karena waktu tinggal reaktan agar terjadi pembakaran sangat cepat dan *heat losses* akibat dinding ruang bakar cukup besar sehingga menyebabkan api tidak stabil dan padam. Api yang tidak stabil dan padam pada *meso-scale combustor* dapat diatasi dengan memanfaatkan kembali panas dari proses pembakaran (*heat recirculation*) dengan penambahan *flame holder*.

Keberhasilan dalam menstabilkan api pada *meso-scale combustor* dari bahan bakar gas pada pipa pembakaran *quartz glass* dengan penambahan *wire mesh* didalamnya, tanpa katalis ataupun panas dari luar telah dilakukan oleh (Mikami et al., 2013). Kestabilan api dapat terjadi karena peranan penting dari *wire mesh* sebagai *flame holder*.

Heat recirculation dapat diperoleh dengan menambahkan *flame holder* pada *combustor* yang dipasang sebelum zona reaksi. Penggunaan *flame holder* mengakibatkan kestabilan api dapat terjadi disekitar *flame holder* dan dapat berfungsi sebagai *heat recirculation* panas. Perpindahan panas secara konveksi terjadi dari api ke dinding *combustor*, setelah itu panas dari dinding *combustor* mengalami perpindahan panas secara konduksi dari dinding *combustor* ke dinding reaktan *combustor*, sehingga reaktan akan mengalami pemanasan awal (*preheating*) dari perpindahan panas secara konveksi dari panas dinding ke fluida reaktan sehingga kecepatan pembakaran akan meningkat seiring dengan meningkatnya kestabilan api pada proses pembakaran yang terjadi pada *meso-scale combustor*.

Metode yang digunakan adalah metode numerik yang bertujuan untuk mengetahui lebih lanjut *heat recirculation* yang terjadi pada *flame holder*, yaitu dengan menggunakan bantuan *software* komputer ANSYS Fluent 14.5 yang berbasis *finite volume method*. Tahapan yang dilakukan dalam pemodelan dengan metode numerik antara lain, *preprocessor*, *solver* dan *postprocessor*, dimana pada tahap *preprocessor* beberapa persamaan atur (persamaan 2-1 sampai 2-10) dalam pemodelan diinputkan dengan variabel bebas yang divariasikan adalah variasi bentuk *flame holder* (*circular hole* dan *narrow slit hole perforated plate*, gambar bentuk variasi dapat dilihat pada BAB IV Metode Penelitian). Variasi bentuk *flame holder* yang digunakan untuk mengoptimalkan *heat recirculation* mempunyai perbandingan antara luas permukaan terhadap volume ruang

bakar yang relatif sama. Hasil penelitian dengan metode numerik akan dibandingkan dengan metode ekperimental yang telah dilakukan oleh (Basranto et al., 2013).

3.2. Hipotesis

Dari kerangka fikir di atas, dapat disusun hipotesis yaitu dengan melakukan simulasi numerik pada *meso-scale combustor* hasil yang diperoleh adalah kestabilan api yang luas, temperatur api yang tinggi dan posisi api mendekati *flame holder* pada debit bahan bakar yang tinggi pada *meso-scale combustor* dengan *flame holder* tipe 2. Kestabilan api yang luas disebabkan karena pengaruh dari penambahan *flame holder* pada *meso-scale combustor* dan perbandingan antara luas permukaan terhadap volume ruang bakar lebih tinggi jika dibandingkan dengan *flame holder* tipe 1, sehingga mempunyai kecenderungan yang sama dengan hasil penelitian secara eksperimental. Kecenderungan yang sama tersebut ditunjukkan dengan perbandingan hasil berupa kestabilan api, temperatur api, dan temperatur gas hasil pembakaran.

3.3. Definisi Operasional dan Pengukuran Peubah

3.3.1 Definisi Operasional

Flame holder pada variabel yang digunakan pada penelitian ini memegang peranan penting dalam kestabilan api yang terjadi (Mikami et al., 2013). *Flame holder* tersebut berfungsi untuk membantu menstabilkan api dalam *meso-scale combustor*.

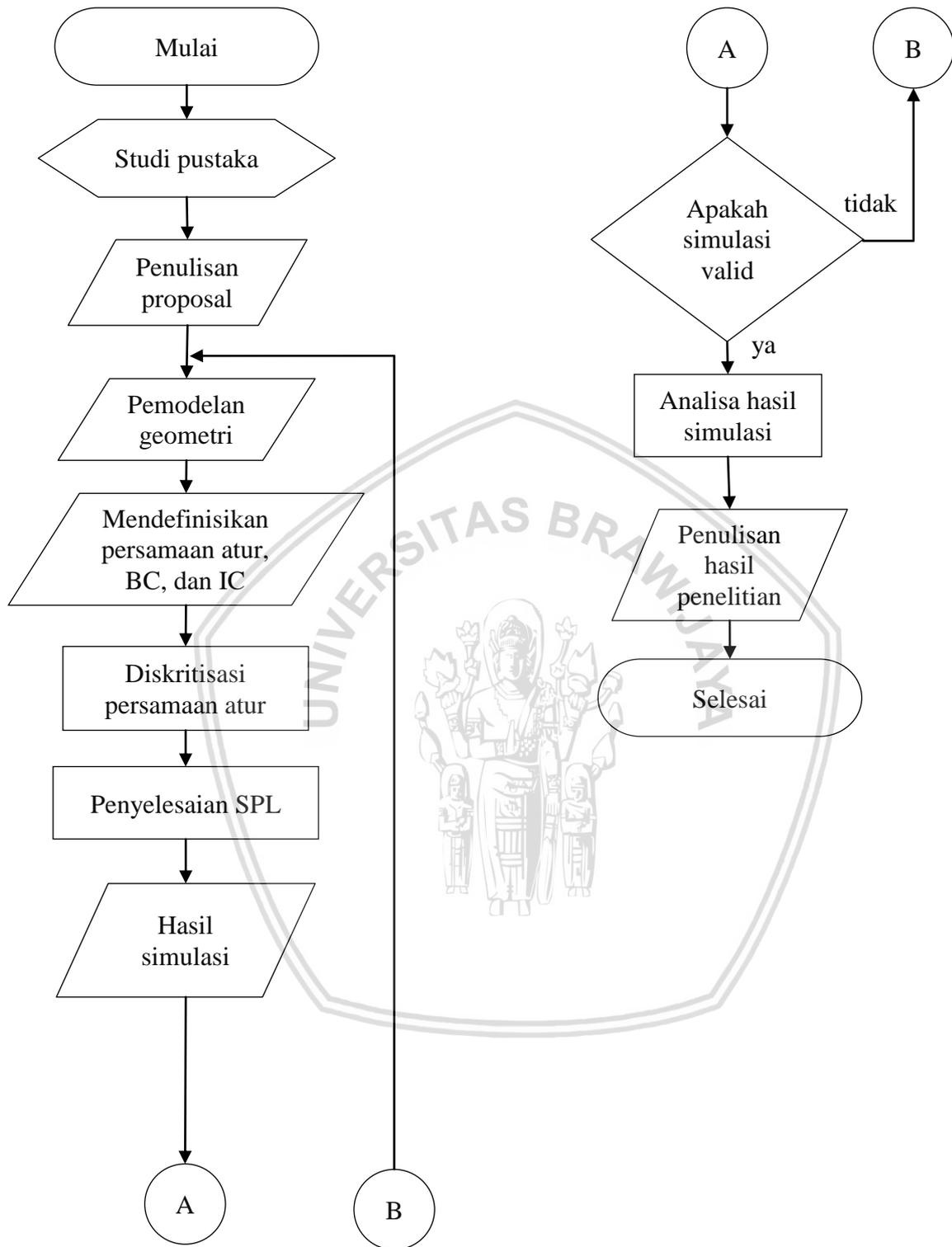
3.3.2 Pengukuran Peubah

Dalam penelitian ini terdapat tiga pengukuran peubah yang digunakan, antara lain:

Tabel 3.1. Variabel Penelitian

Variabel Bebas	Variabel Terikat	Variabel Kontrol
<i>Flame holder perforated plate type I</i>	<i>Flame stability limit</i>	Material <i>meso-scale combustor</i> dari <i>quartz glass tube</i>
<i>Flame holder perforated plate type II</i>	Visualisasi nyala api	Diameter <i>combustor</i> 3.5 mm
	Temperatur nyala api	Tebal dinding 0.7 mm
	Temperatur gas hasil pembakaran	

3.3.3 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.2. Diagram alir penelitian

BAB IV. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu dengan menggunakan metode numerik dengan bantuan perangkat lunak komputer ANSYS Fluent 14.5 yang berbasis *finite volume method*, kemudian yang nantinya metode numerik tersebut akan dibandingkan dengan penelitian dengan metode eksperimental yang sebelumnya sudah dilakukan.

4.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dengan metode numerik ini dilakukan di Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem (*Design and Engineering System*) Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya pada bulan Januari 2017 sampai Desember 2017.

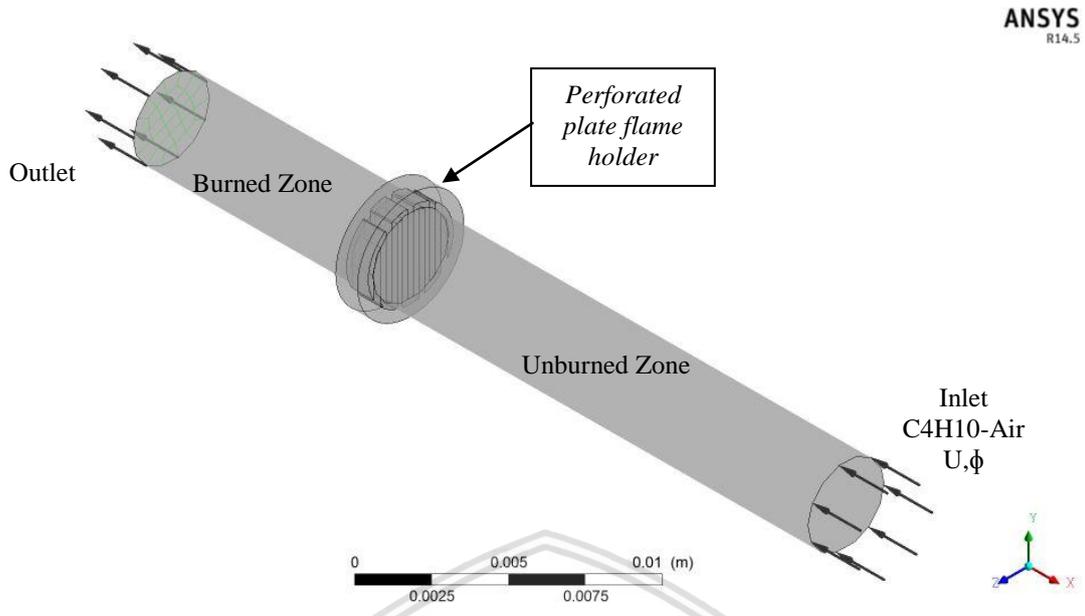
4.2. Prosedur Penelitian

Tahapan dalam melakukan penelitian dengan metode numerik dijelaskan pada tabel 4.1 dibawah ini.

Tabel 4.1. Tahapan melakukan penelitian dengan metode numerik

PRE-PROCESSOR	
Domain/geometri	
Meshing	
Persamaan Atur	
Menentukan <i>Boundary Condition</i> dan <i>Initial Condition</i>	
SOLVER	
Diskritisasi Persamaan Atur	
Penyelesaian Sistem Persamaan Linier	
POST-PROCESSOR	
Plot	

Sebelum melakukan penelitian, kita harus memahami masalah yang terjadi yang kemudian akan diselesaikan dengan pendekatan metode numerik dengan bantuan *software* komputer ANSYS Fluent 14.5. Pada BAB I PENDAHULUAN telah dijelaskan rumusan masalah yang terjadi adalah bagaimana pengaruh dari penambahan *flame holder* berbentuk *perforated plate* pada pembakaran *premixed* stokiometri campuran butana (C_4H_{10}) – udara terhadap karakteristik pembakaran dengan metode simulasi numerik.



Gambar 4.1. Meso-scale combustor dengan perforated plate flame holder

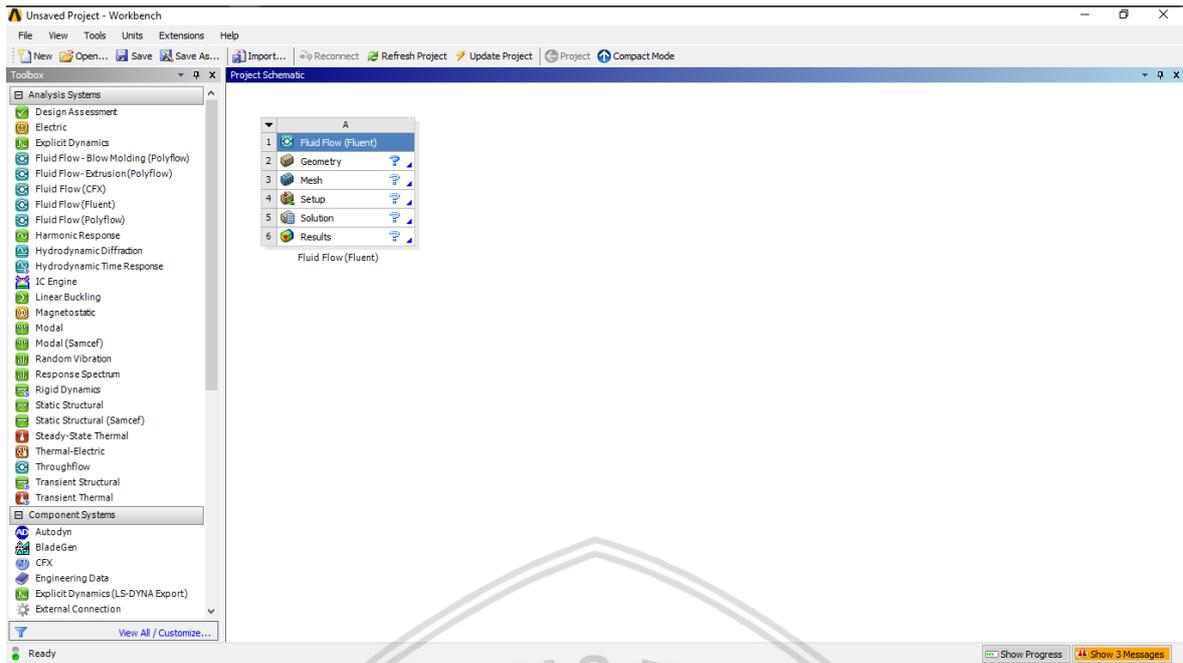
Pada tabel 4.1 dijelaskan langkah-langkah secara global ketika melakukan simulasi numerik secara bertahap. Langkah-langkah tersebut kemudian akan digunakan pada ANSYS Fluent 14.5 yang ditunjukkan dibawah ini yang dilakukan pada variasi bentuk *flame holder perforated plate* tipe 1.

Sebelum menggunakan ANSYS Fluent 14.5, *install* terlebih dahulu program ANSYS 14.5 secara global. Setelah proses instalasi selesai, maka jalankan program ANSYS Workbench 14.5 melalui Start Program → Ansys 14.5 → Workbench 14.5. Maka akan muncul tampilan gambar di bawah.



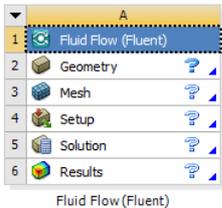
Gambar 4.2. Tampilan awal Ansys Workbench 14.5

Setelah itu akan keluar jendela *graphic user interface* (GUI) yang ditunjukkan pada gambar 4.2. Kemudian pilih *Fluid Flow (Fluent)* pada kotak *toolbox* dengan cara klik 2x.



Gambar 4.3. Graphic user interface ANSYS Workbench 14.5

Tahap selanjutnya yang dilakukan adalah mengikuti tahapan sesuai dengan tabel 4.1 di atas. Pada kotak *project schematic fluid flow (fluent)* dapat dilihat bahwa terdapat beberapa komponen sistem dalam melakukan simulasi menggunakan *fluid flow (fluent)*. Komponen-komponen tersebut sesuai dengan tahapan yang akan dilakukan jika menggunakan metode numerik.

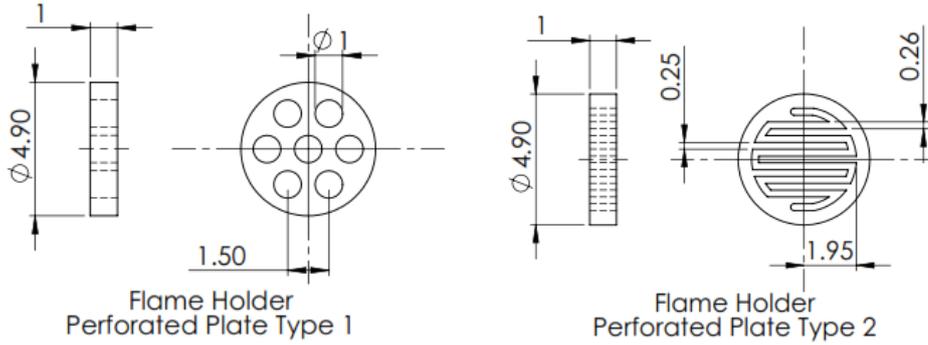


Gambar 4.4. Komponen-komponen *fluid flow (fluent)*

4.3. Step 1: Pre-processor (mendefinisikan domain)

Masuk ke tahap awal dalam simulasi numerik adalah mendefinisikan domain/geometri dari masalah yang terjadi. Pembakaran *premixed* stokiometri dengan campuran bahan bakar butana dan udara dialirkan pada sebuah pipa kaca (*quartz glass*) dengan diameter dalam 3,5 mm dengan tebal 0,7 mm dengan variasi *flame holder* yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini.

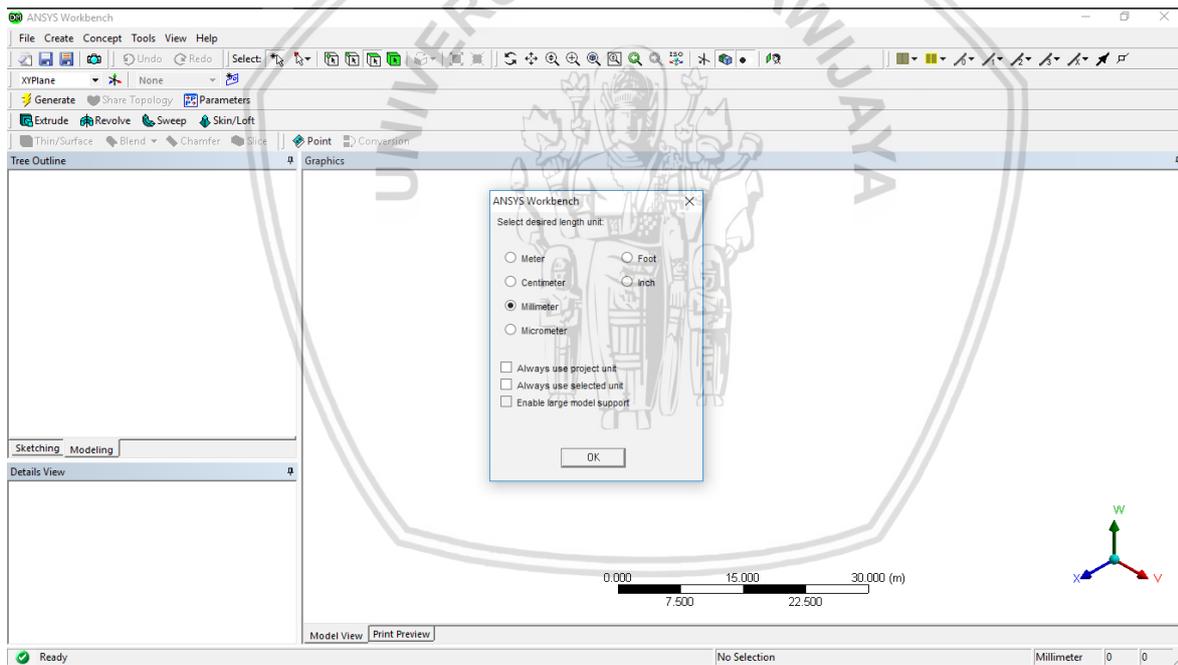




Gambar 4.5. Variasi flame holder

Langkah awal untuk memulai mendefinisikan geometri yaitu dengan cara klik 2x pada *geometry* yang terdapat pada *project schematic fluid flow (fluent)* atau dapat dilihat pada gambar di bawah ini.

1. Geometri → Milimeter → OK

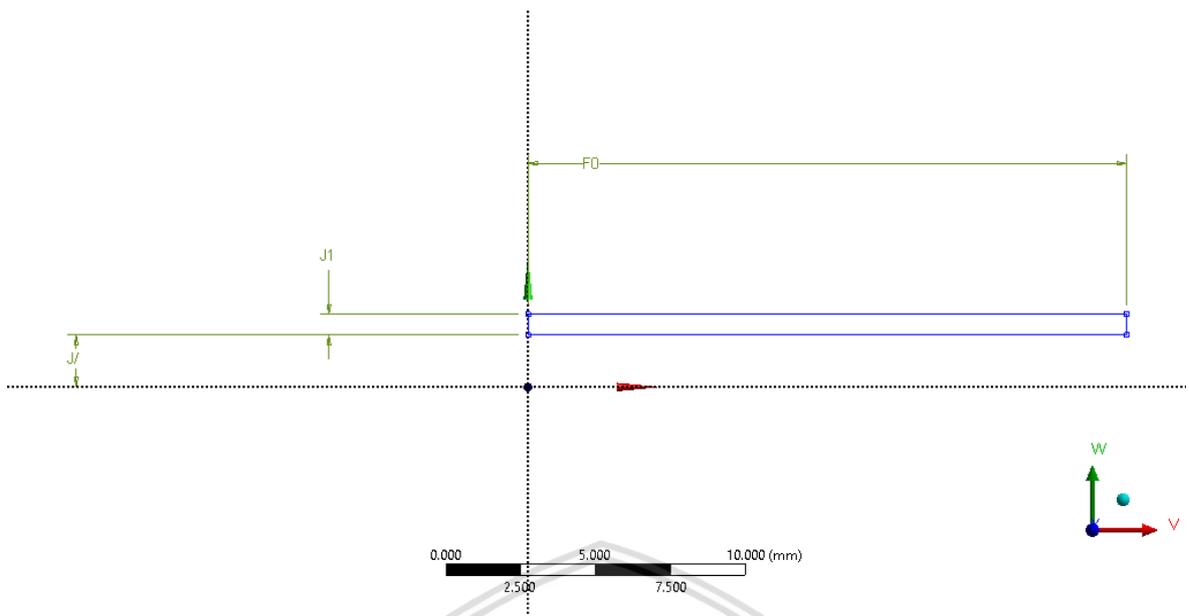


Gambar 4.6. Langkah awal pendefinisian geometri

2. *Tree outline* → *XYplane* → *New sketch...*

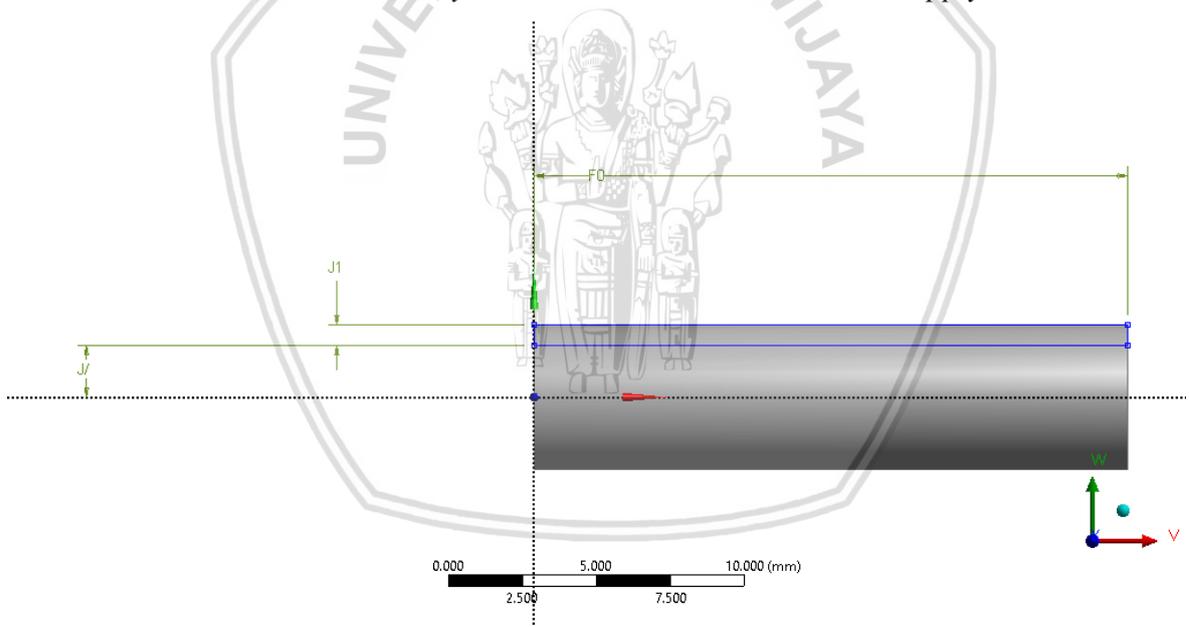
Gambarlah sesuai dengan *sketch* di bawah ini, dengan dimensi J1, J/, dan F0 secara berturut-turut adalah 0,7; 1,75; dan 20 mm.





Gambar 4.7. Sketch wall unburned zone (sketch 1)

3. Create → Revolve → Geometry → Sketch wall unburned zone → Apply → Generate...

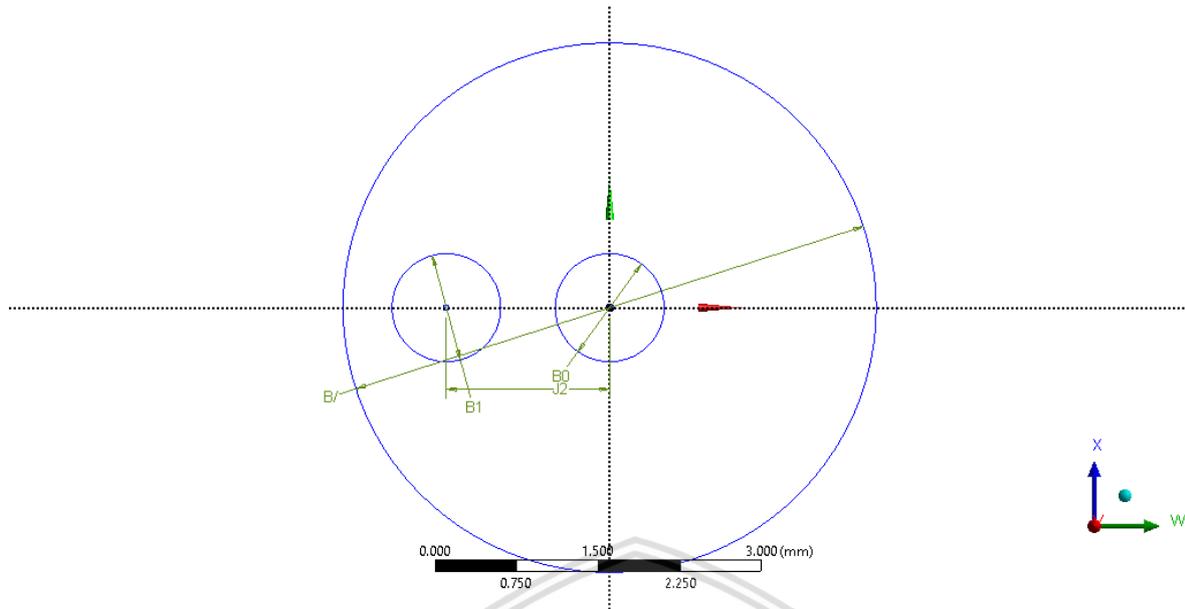


Gambar 4.8. Wall unburned zone

4. Tree outline → YZplane → New sketch...

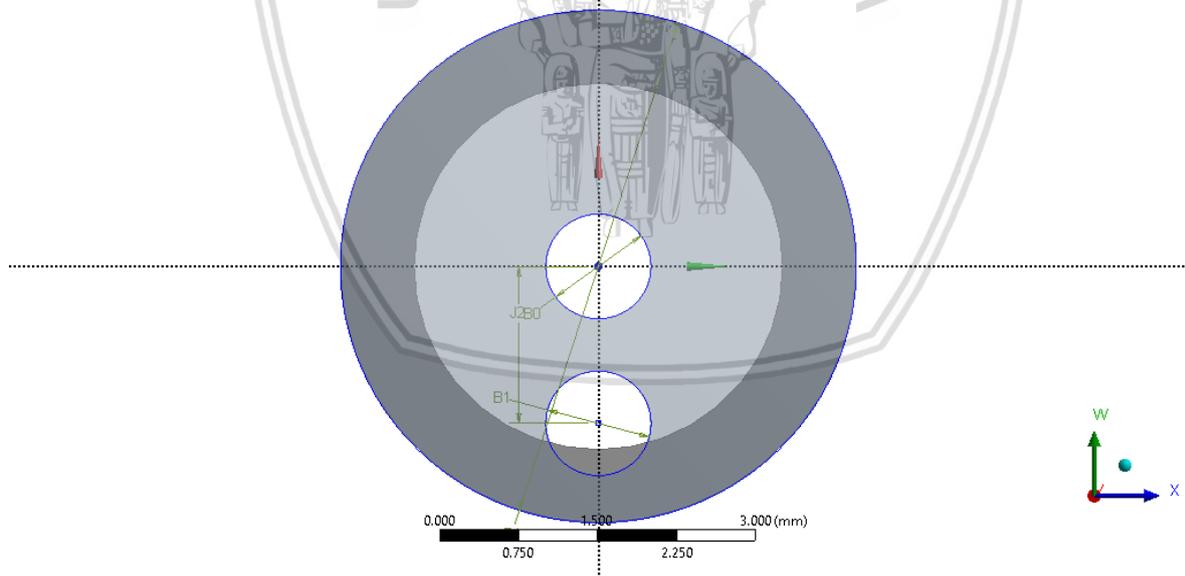
Gambarlah sesuai sketch di bawah ini, dengan dimensi pada sketch flame holder B/, B1, J2, dan B0 adalah 4,9; 1,5; 1; dan 1 mm.





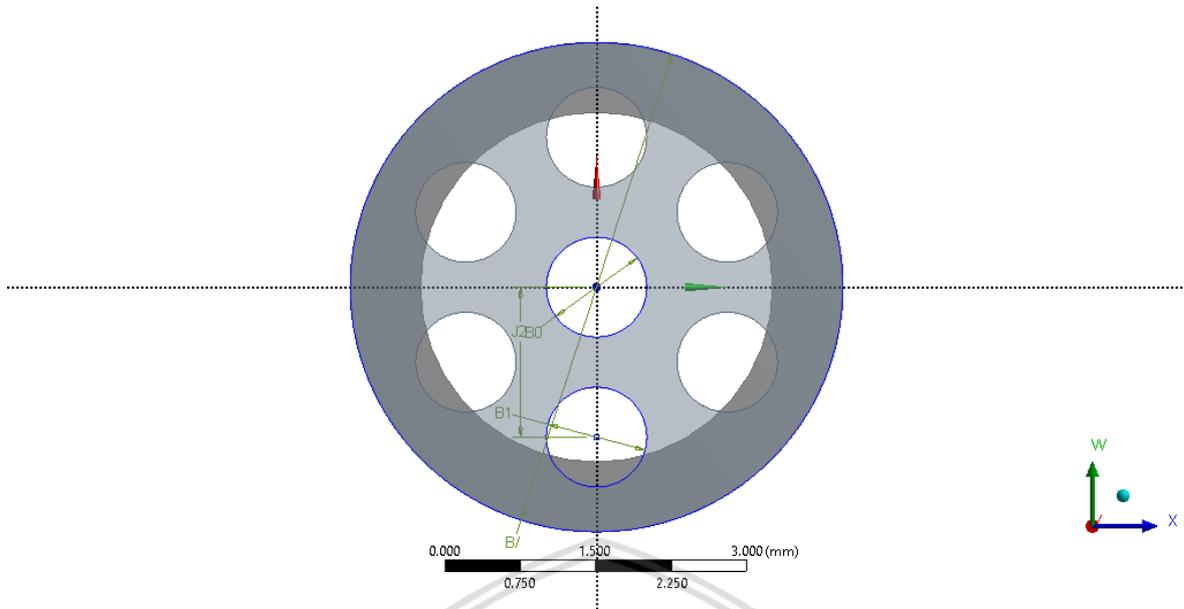
Gambar 4.9. Sketch flame holder

5. Create → Extrude → Geometry → Sketch flame holder → Apply...
 Operation → Add frozen...
 FD1, Depth (>0) → 1 mm → Generate...



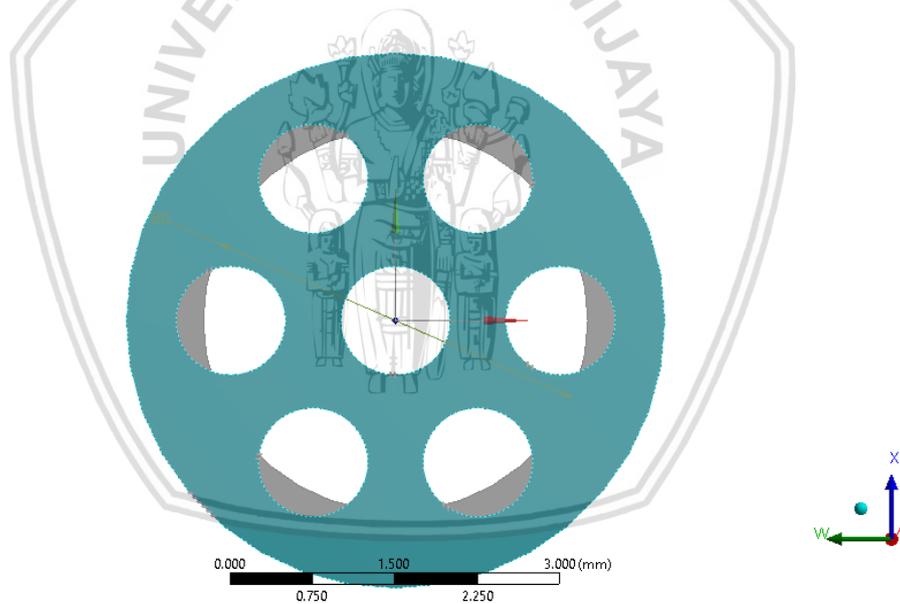
Gambar 4.10. Flame holder

6. Create → Pattern → Pattern type → Circular → Apply...
 Geometry → Sketch flame holder yang bawah → Apply...
 Axis → Plane normal → FD3, Copies (>0) → 5 ...



Gambar 4.11. Pattern lubang flame holder

7. Create → Plane → Base face → face flame holder → Generate...



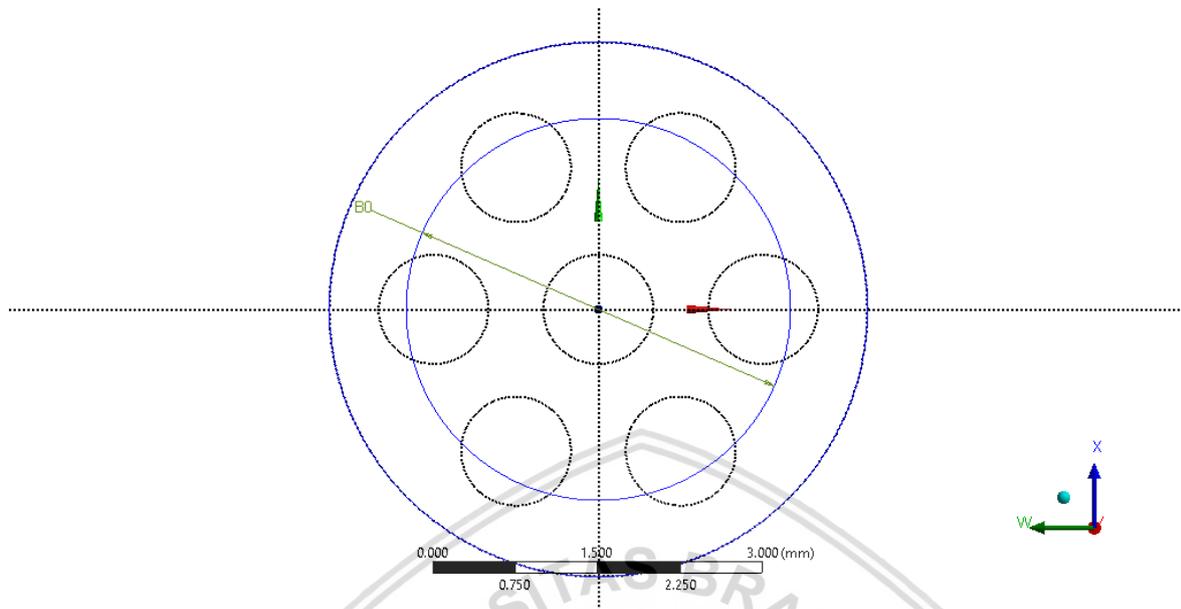
Gambar 4.12. New plane pada permukaan flame holder

Warna hijau pada gambar di atas, menunjukkan pemilihan *face* yang dipilih dalam membuat *plane* baru pada permukaan *flame holder*.



8. *Tree outline* → *Plane flame holder* → *New sketch...*

Dimensi B0 adalah 3,5 mm.

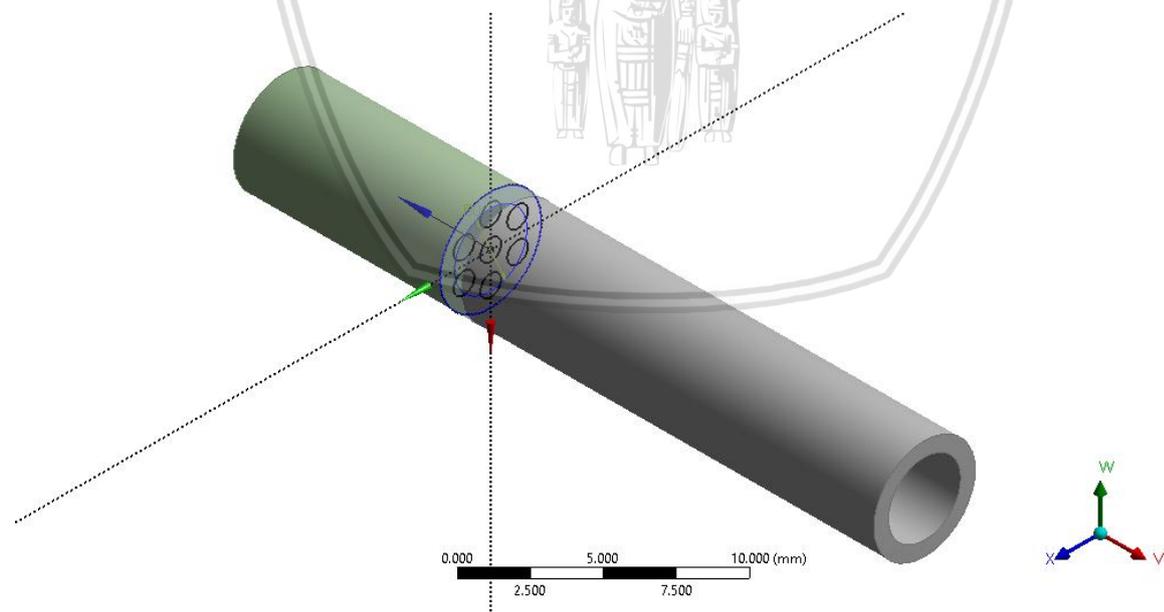


Gambar 4.13. *Sketch burned zone*

9. *Create* → *Extrude* → *Geometry* → *Sketch burned zone* → *Apply* → *Generate...*

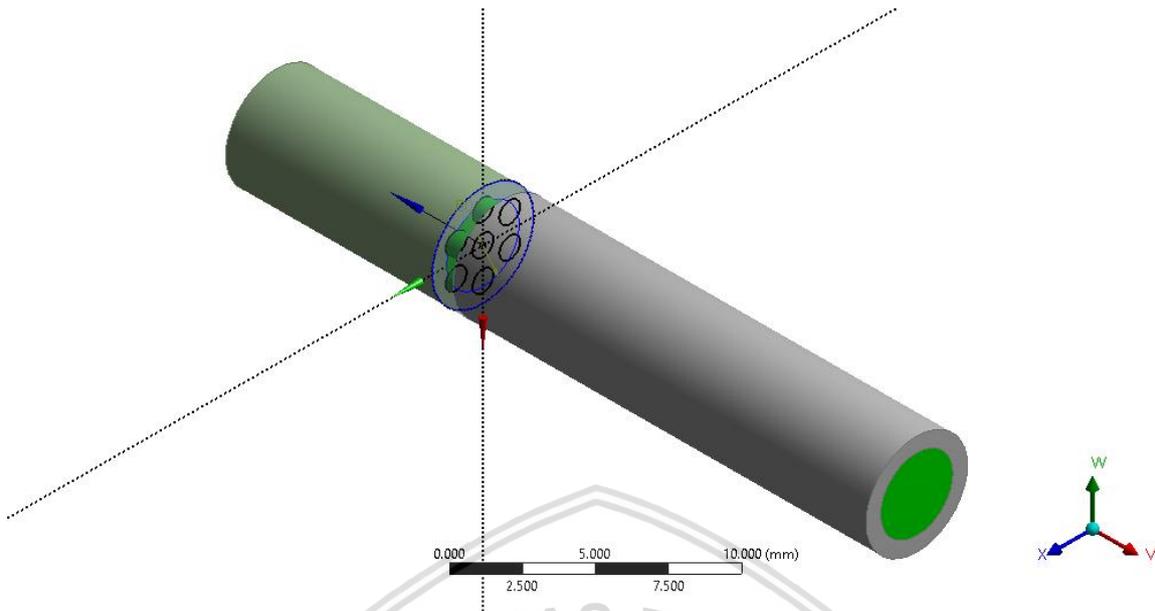
Operation → *Add material...*

FD1, Depth (>0) → *10 mm* → *Generate...*



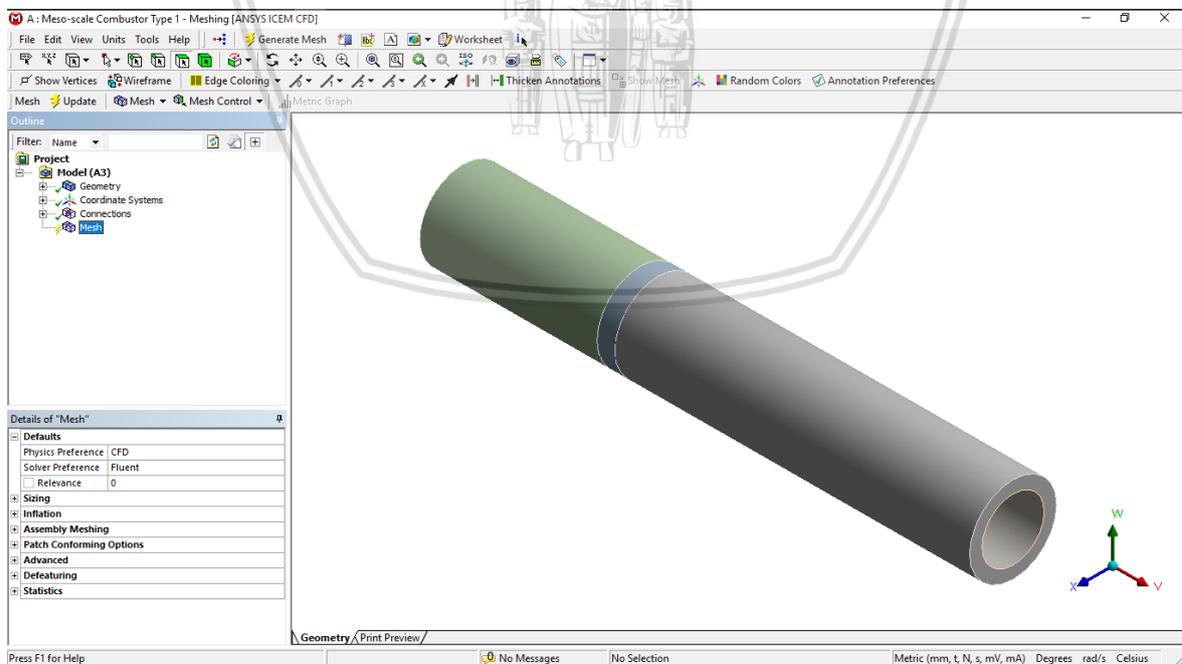
Gambar 4.14. *Meso-scale combustor*

10. Tools → Fill → By cavity → 9 faces → Generate...



Gambar 4.15. Fill fluid meso-scale combustor

Pendefinisian domain/geometri sudah dilakukan, selanjutnya yaitu tahap *meshing*. Tahap ini merupakan tahap dimana domain/geometri yang sudah digambar dibagi menjadi elemen-elemen kecil. Pada kotak komponen *fluid flow (fluent)* bisa diklik 2x pada komponen *meshing* sehingga muncul gambar di bawah.



Gambar 4.16. Tampilan komponen *mesh* pada *fluid flow (fluent)*

Waktu kalkulasi tergantung pada kehalusan dari *grid* tersebut. Proses pengoptimalan *grid*, *meshes* sering tidak seragam, kehalusan pada area dimana titik variasi terbesar terjadi dan kekasaran daerah dengan perubahan yang relatif sedikit. Oleh karena itu, digunakan beberapa pengaturan sebagai berikut:

4.4. Step 1: Pre-processor (*grid generation* atau *meshing*)

11. Mesh → Physics preference → CFD...

Solver Preference → Fluent

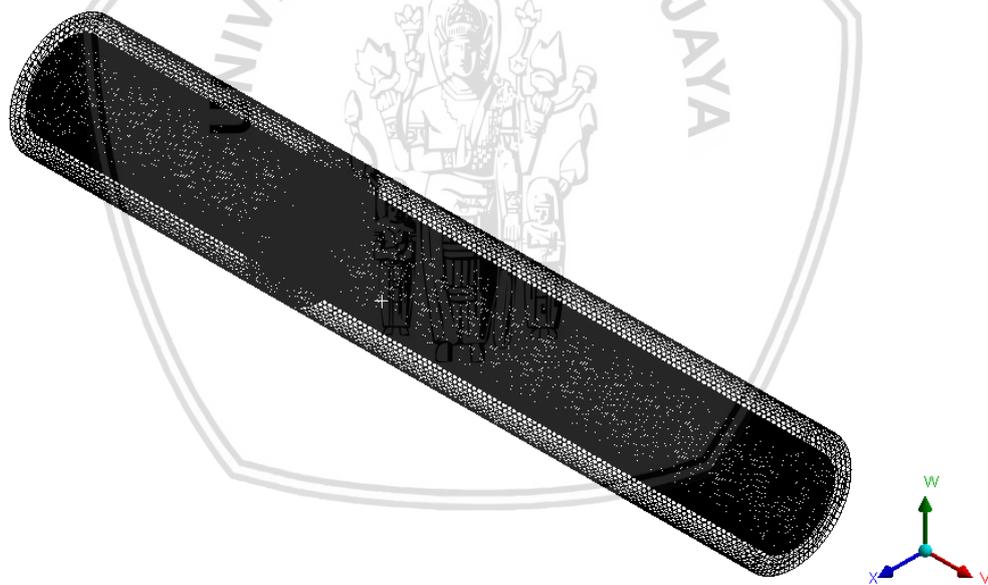
Relevance → Coarse

Smoothing → Low

Span Angle → Coarse

Mesh → klik kanan insert → Sizing → Select fill fluid meso-scale combustor → Apply...

Body sizing → 0,1 mm → Generate Mesh...



Gambar 4.17. Hasil *meshing*

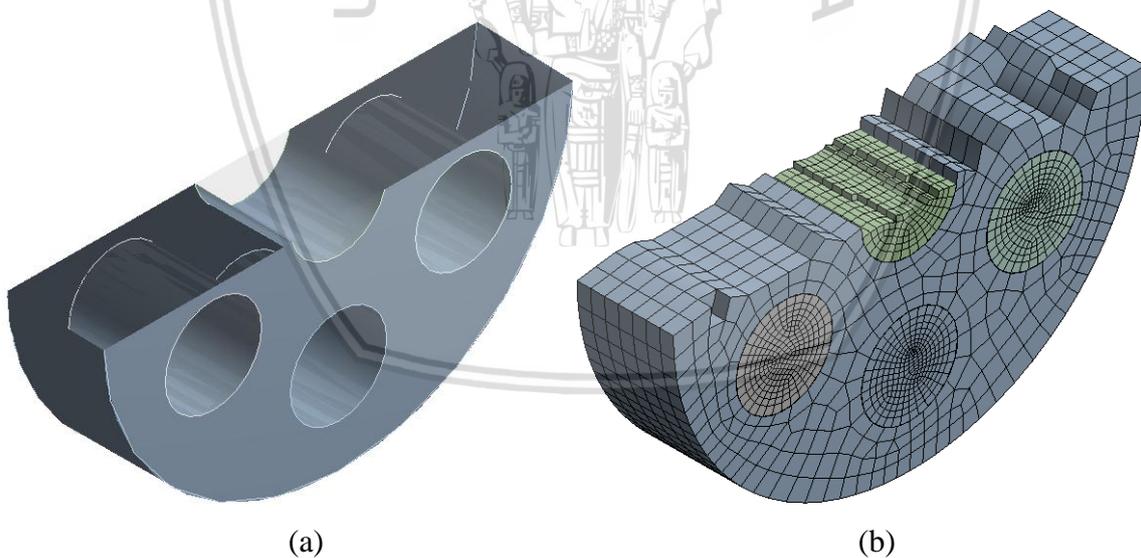
Hasil *meshing* tersebut menghasilkan 634442 *nodes* dan 600462 *cells*. *License* dari ANSYS Fluent yang dimiliki oleh Teknik Mesin UB untuk kehalusan *meshing* maksimal sebesar 512000 *nodes*. Oleh karena itu, domain tersebut perlu dikurangi namun tidak mengurangi fungsi dari penyelesaiannya. Domain pada *burned* dan *unburned zone* dapat

repository.ub.ac.id

dihilangkan dengan pemilihan *tools* → *suppressed body*, sehingga *meshing* yang dihasilkan adalah 413075 *cells* dan 399475 *nodes*.



Gambar 4.18. Update hasil *meshing*

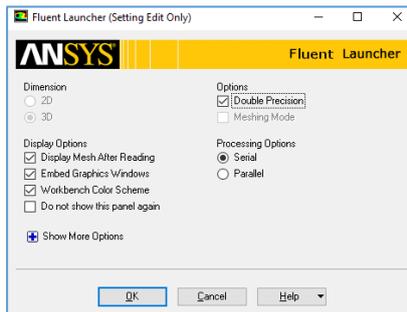


Gambar 4.19. Potongan geometri *flame holder* tipe 1 (a) domain (b) *meshing*

4.5. Step 2: Solver (mendefinisikan persamaan atur)

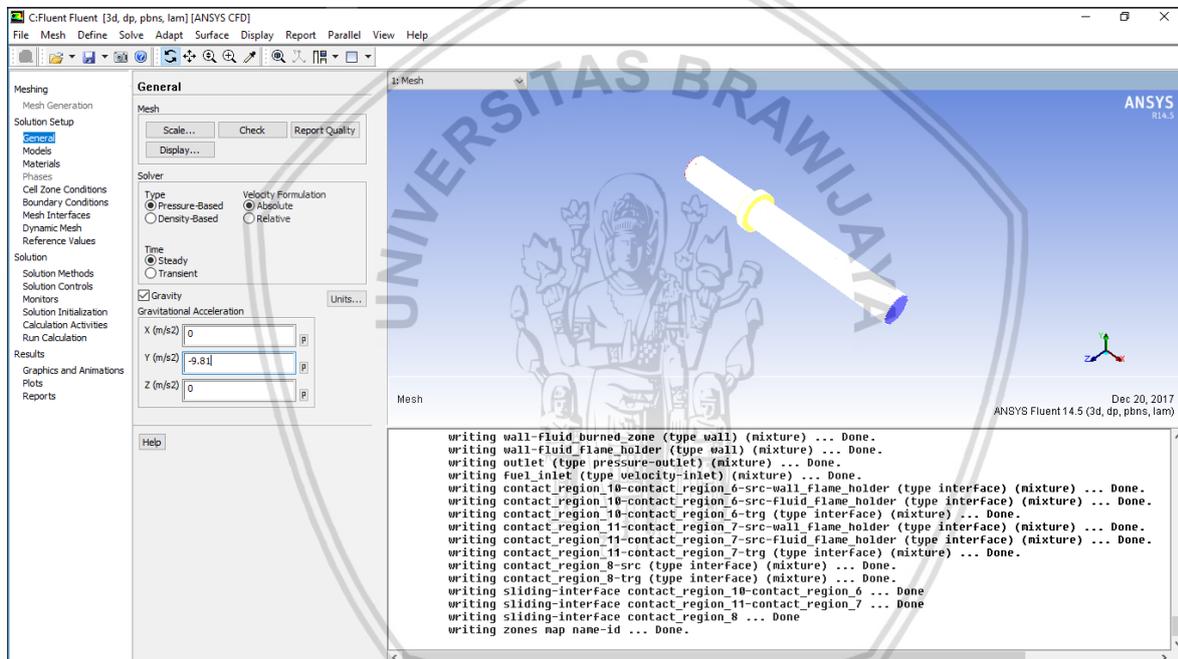
Tahap *meshing* sudah dilakukan, setelah itu tahap selanjutnya adalah mengatur persamaan atur yang digunakan. Persamaan atur yang digunakan dapat diatur pada

komponen *setup* pada kotak komponen *fluid flow (fluent)* dengan cara di klik 2x sehingga muncul kotak dialog berikut ini.



Gambar 4.20. Fluent launcher

12. Option → Double precision → OK



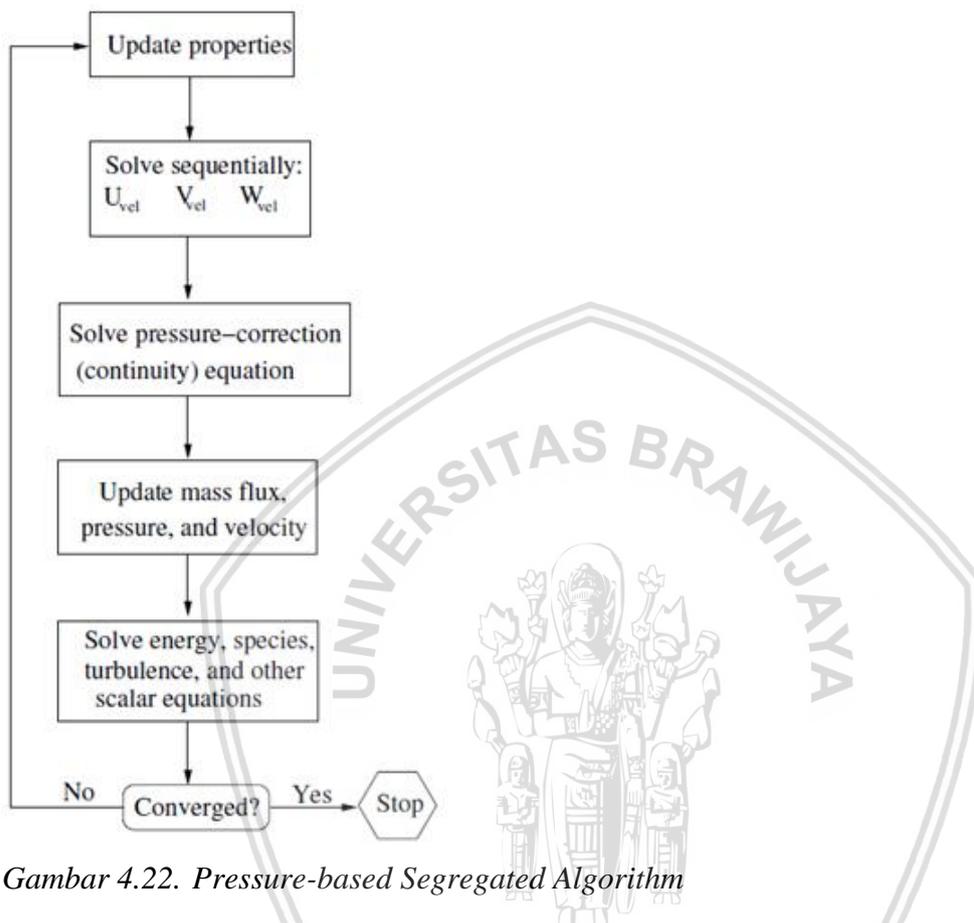
Gambar 4.21. Tampilan awal *setup* ANSYS Fluent 14.5

Pada jendela tersebut, langkah pertama yang dilakukan adalah mengatur penyelesaian (*solver*) yang akan kita gunakan. *Solver* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *pressure-based*, *steady* dan *absolute*. Pemilihan persamaan atur tidak lepas dari teori yang digunakan yaitu,

$$\left| \begin{array}{l} \text{Laju perubahan} \\ \text{dari } \phi \text{ di volume} \\ \text{atur sepanjang} \\ \text{waktu} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{l} \text{Fluks netto dari } \phi \\ \text{ke dalam volume} \\ \text{atur karena} \\ \text{konveksi} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{l} \text{Fluks netto dari} \\ \phi \text{ ke dalam} \\ \text{volume atur} \\ \text{karena difusi} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{l} \text{Laju} \\ \text{pembentukan } \phi \\ \text{di dalam volume} \\ \text{atur} \end{array} \right|$$

Pressure-based yang dimaksudkan adalah menentukan gradien persamaan tekanan yang diperoleh dari turunan persamaan kontinuitas dan momentum.

Algoritma *pressure-based segregated* (persamaan umum diselesaikan secara berurutan) ditunjukkan pada bagan dibawah ini.



Gambar 4.22. *Pressure-based Segregated Algorithm*

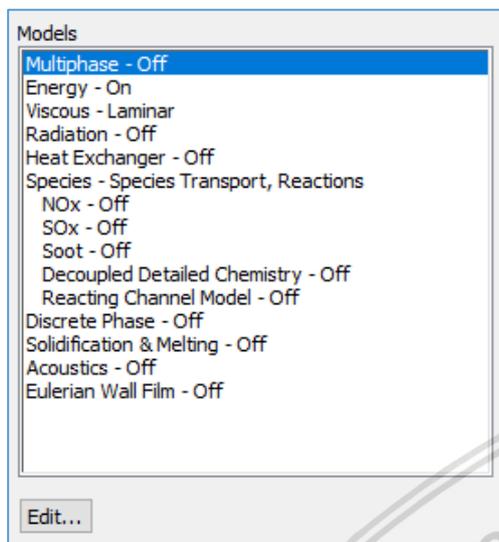
Selanjutnya adalah pengaturan *velocity formulation*, yaitu dengan menggunakan *absolute*. *Absolute velocity formulation* dapat diaplikasikan dimana aliran fluida pada domain/geometri utama tidak bergerak. Pengaruh terhadap penyelesaiannya adalah pada persamaan momentum.

Setelah itu pengaturan *time solver* yang digunakan. Pada penelitian ini *steady flow* digunakan dalam proses penyelesaiannya, artinya bahwa simulasi dianggap tidak dipengaruhi oleh waktu. Sehingga beberapa persamaan yang mengandung variabel waktu di dalamnya dianggap sama dengan nol.

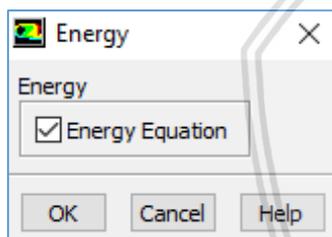
Tahap berikutnya adalah pengaturan *models*. Dalam pengaturan ini yang dibutuhkan adalah kesesuaian masalah yang akan kita selesaikan dengan persamaan-persamaan yang kita butuhkan untuk menyelesaikan masalah tersebut. Di dalam penelitian ini yaitu

permasalahan pembakaran, *models* yang akan digunakan antara lain, persamaan energi, persamaan viskositas, dan persamaan spesies.

13. *Models* → *Energy* → *Enable...*



Gambar 4.23. Pengaturan *models*

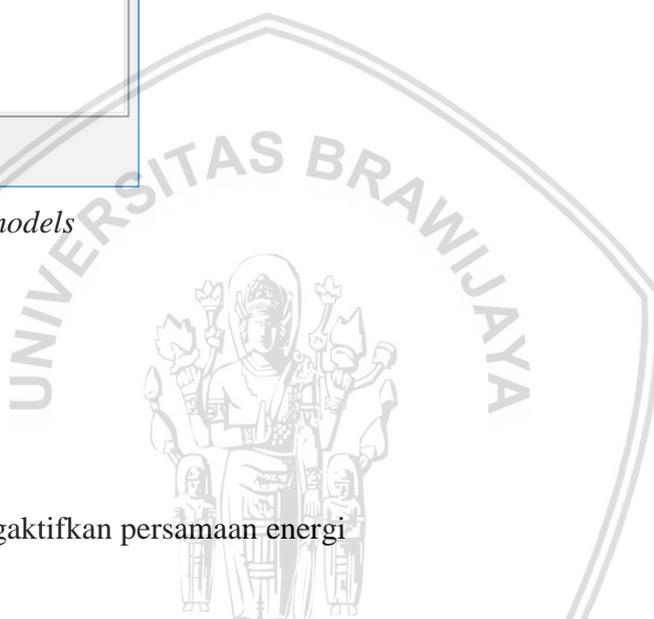


Gambar 4.24. Jendela mengaktifkan persamaan energi

Pada gambar 4.23. merupakan jendela dalam pengaturan *models*. Gambar tersebut dapat diketahui terdapat beberapa pemilihan dalam menentukan pengaturan *models*. Penggunaan tersebut sesuai dengan kebutuhan kita dalam mensimulasikan masalah yang akan kita selesaikan. Langkah pertama adalah penggunaan persamaan energi sesuai yang ditunjukkan pada gambar 4.24. Jika kita mencentang jendela *energy equation*, maka kita mengaktifkan persamaan energi. Berikut adalah persamaan energi yang digunakan:

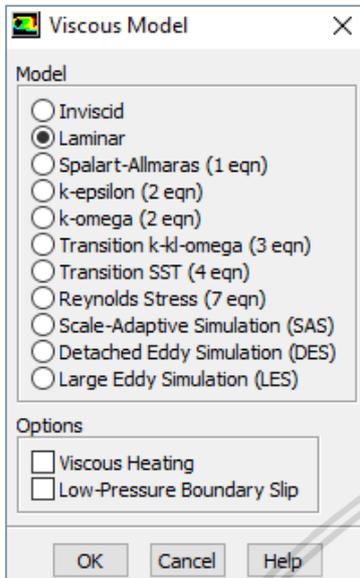
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu}{\sigma_h} \frac{\partial h}{\partial x_i} + \mu \left(\frac{1}{S_{ck}} - \frac{1}{\sigma_h} \right) \sum_{k=1}^N h_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial p}{\partial t} + S_{rad}$$

Kemudian adalah pengaturan persamaan viskositas. Pengaturan ini dimaksudkan untuk mengatur parameter untuk aliran *inviscid/incompressible* (tidak mengalami gesekan), laminar dan turbulen. Aliran laminar dapat terjadi jika aliran tersebut mempunyai kecepatan yang cenderung lambat atau fluida yang kental. Jika dilakukan perhitungan secara teoritis, aliran yang dialami pada penelitian ini adalah aliran laminar.



Maka pada jendela pengaturan viskositas dapat kita aktifkan laminar (yang ditunjukkan pada gambar 4.25.).

14. *Models* → *Viscous* → *Laminar...*

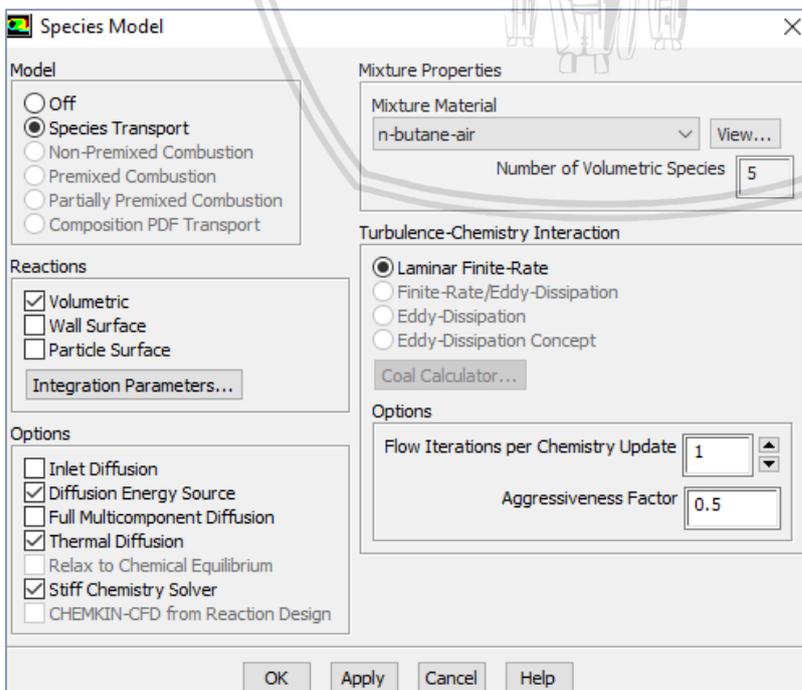


Gambar 4.25. Jendela pengaturan model viskositas

15. *Models* → *Species* → *Species transport...*

16. *Volumetric* → *Enable...*

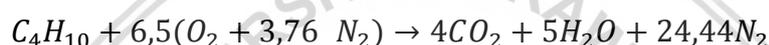
17. *Options* → *Diffusion energy source, thermal diffusion, stiff chemistry solver* → *enable...*



Gambar 4.26. Jendela pengaturan model spesies

Pada gambar 4.26. ditampilkan jendela pengaturan model spesies. Pada jendela tersebut jika kita menggunakan aliran laminar, maka model yang aktif hanya *species transport*. Maka yang kita gunakan adalah *species transport*. Model spesies tersebut membantu kita dalam menentukan parameter yang berhubungan dengan perhitungan pada *species transport* dan pembakaran. Hal ini dapat membantu kita dalam menyelesaikan pembakaran pada penelitian ini.

Kemudian pada pilihan berikutnya adalah menentukan model reaksi yang akan kita gunakan. Dalam menentukan reaksi, ada beberapa hal yang harus dipersiapkan dalam mentransportkan spesies atau pembakaran. Yang paling utama adalah mekanisme reaksi kimia yang digunakan, dimana reaksi kimia tersebut menentukan transpor spesies apa saja yang dapat dilakukan. Dalam penelitian kali ini, mekanisme reaksi kimia yang digunakan adalah sebagai berikut:

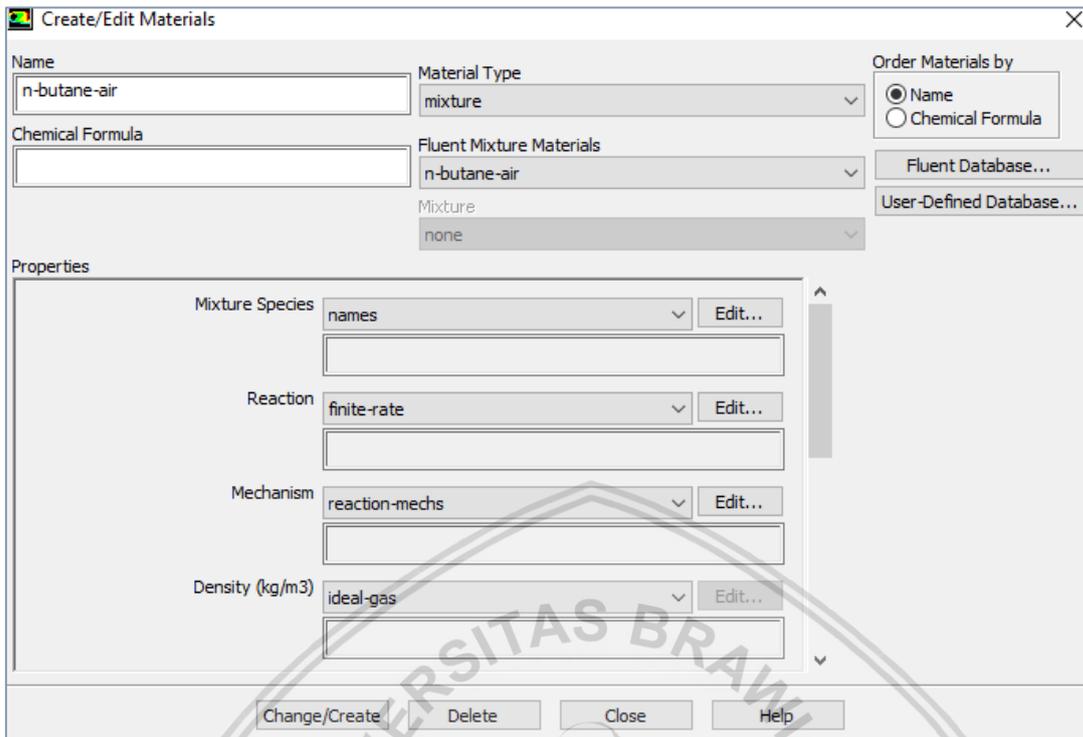


Persamaan kimia di atas merupakan persamaan stokiometri pada pembakaran butana. Reaksi kimia tersebut terdiri dari 5 spesies, yaitu C_4H_{10} , O_2 , CO_2 , H_2O dan N_2 . Dari persamaan tersebut AFRstokiometri adalah 15,42. Sehingga dalam pemilihan reaksi pada software ANSYS Fluent 14.5 adalah mengaktifkan *volumetric reactions*. Ketika kita memilih untuk menyelesaikan persamaan konservasi untuk spesies kimia, ANSYS Fluent memprediksi fraksi massa disetiap spesiesnya, Y_k , melalui penyelesaian persamaan difusi konveksi untuk spesies k . Persamaan konservasi yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i Y_k) = -\nabla \vec{J}_i \frac{\partial}{\partial x_i} + \left(\rho D_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \right) + \dot{\omega}_k$$

dimana $\left(\rho D_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \right)$ adalah rata-rata produk dari spesies k dari reaksi kimia dan $\dot{\omega}_k$ adalah hasil dari penambahan dari sumber fase yang tersebar. Pada persamaan konservasi di atas, J_i adalah *diffusion flux* dari spesies k , dimana dapat muncul karena gradien dari konsentrasi dan temperatur. *Diffusion flux* dianggap bernilai nol, karena pada jendela pengaturan model spesies tidak mengaktifkan *inlet diffusion*. Pada pengaturan model spesies yang digunakan adalah *diffusion energy source*, *thermal diffusion* dan *stiff chemistry solver*. Artinya jika kita menggunakan *diffusion energy source*, maka efek dari transport entalpi karena difusi spesies pada energi. Kemudian menggunakan *thermal diffusion* yaitu mengaktifkan model difusi termal. Koefisien difusi termal dapat didefinisikan konstan.

18. Material → n-butane-air ...



Gambar 4.27. Jendela pengaturan material properties

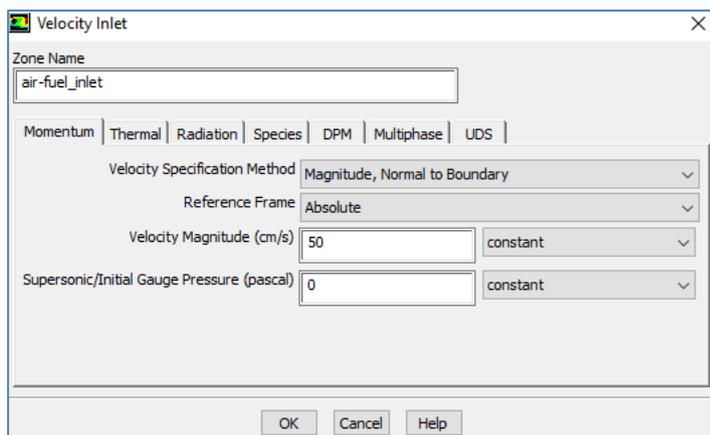
19. Mixture species → edit...

Tabel 4.2. Material properties n-Butana-Udara

<i>Mixture species</i>	<i>names → edit</i>	<i>5 species</i> <i>C₄H₁₀, O₂, CO₂, H₂O dan N₂</i>
<i>Reaction</i>	<i>Finite rate → edit</i>	Reaksi kimia stokiometri dengan nilai Arrhenius
<i>Mechanism</i>	<i>Reaction-mechs → edit</i>	<i>Reactions-1</i>
<i>Density</i>	<i>Ideal gas</i>	
<i>Cp</i>	<i>Mixing-law</i>	

Selanjutnya adalah pedefinisian kondisi batas pada domain sesuai dengan masalah. Pada domain/geometri yang ditunjukkan gambar 4.28. disebutkan bahwa terdapat saluran masuk bahan bakar, saluran keluar dan dinding pipa *combustor*. Sehingga pengaturan kondisi batas yang diinputkan adalah sebagai berikut:

20. Boundary condition → Air-fuel inlet...



Gambar 4.28. Jendela pengaturan kondisi batas

Tabel 4.3. Pengaturan kondisi batas pada saluran masuk campuran bahan bakar dan udara

<i>Momentum</i>	<i>Velocity magnitude</i>	Sesuai dengan kecepatan yang divariasikan
	<i>Initial gauge pressure</i>	0 Pa
<i>Thermal</i>	<i>Temperature</i>	650 K
<i>Species</i>	<i>Species Mass fractions</i>	Sesuai dengan fraksi massa yang divariasikan

Tabel 4.4. Pengaturan kondisi batas pada saluran keluar

<i>Momentum</i>	<i>Initial gauge pressure</i>	0 Pa
<i>Thermal</i>	<i>Temperature</i>	650 K

Tabel 4.5. Pengaturan kondisi batas pada dinding combustor

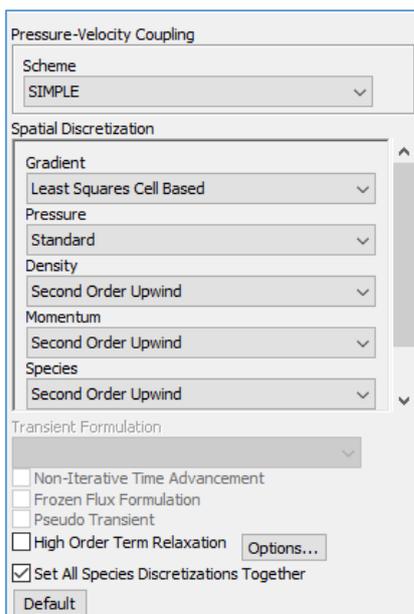
<i>Thermal</i>	<i>Thermal conditions</i>	<i>Mixed</i>
	<i>Material name</i>	<i>Quartz glass</i>
	<i>Heat transfer coefficient</i>	1,6
	<i>Wall thickness</i>	0,0007

Ketebalan dinding dimodelkan sebagai fase *solid* dimana persamaan energi diselesaikan.

4.6. Step 2: Solver (diskritisasi persamaan)

Pada *solution method* ANSYS Fluent 14.5 terdapat beberapa pengaturan dalam menentukan parameter penyelesaian apa saja yang digunakan. Di tahap *pre-processor* telah dijelaskan parameter yang digunakan, yaitu *pressure-based solver*. Sehingga pada tahap *solver* ini juga mengatur skema *pressure-velocity coupling*.

21. *Solution methods* → *Pressure-velocity coupling* → *SIMPLE*



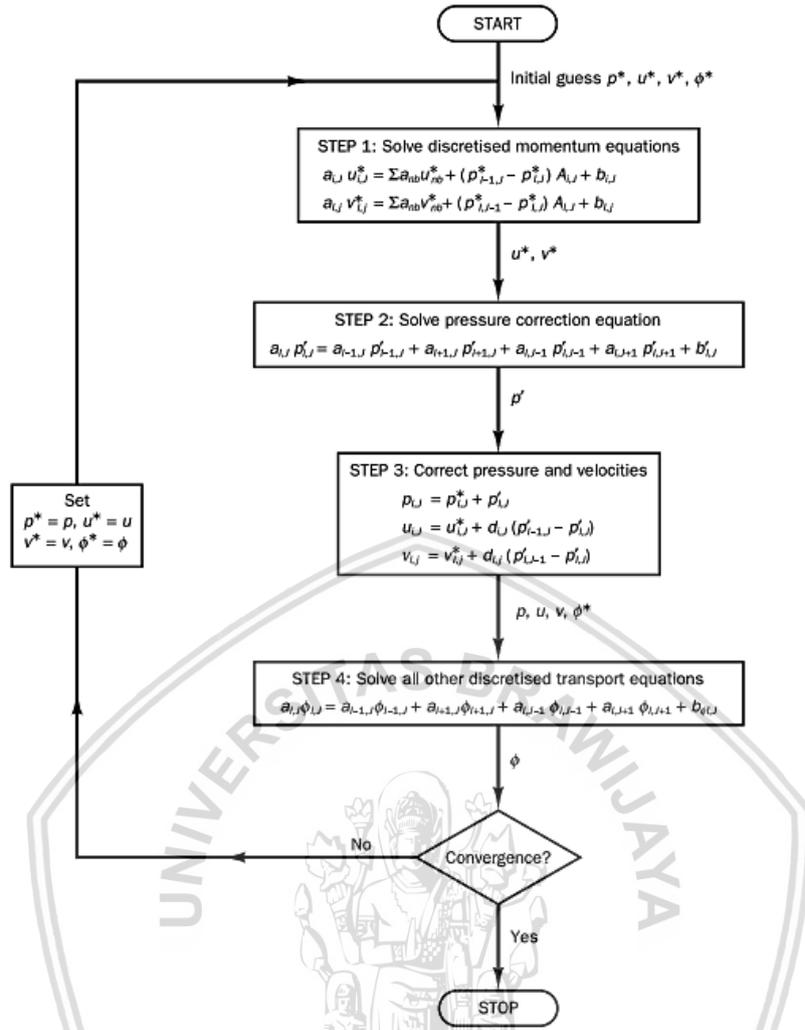
Gambar 4.29. Jendela pengaturan *solution method*

Proses pertama yang dilakukan adalah diskritisasi persamaan. Hal ini dilakukan karena ANSYS Fluent 14.5 menggunakan teknik dasar *control volume* untuk mengkonversi persamaan umum menjadi persamaan aljabar yang dapat diselesaikan secara numerik.

Diskritisasi yang digunakan adalah SIMPLE, dimana algoritma yang digunakan dapat dilihat pada gambar 4.30. Prinsip dasar dari penggunaan metode SIMPLE adalah dengan menduga nilai dari tekanan yang akan diinputkan ke dalam diskritisasi persamaan umum hingga mencapai konvergensi. Tahap pendugaan tersebut dilakukan secara bertahap.

Proses diskritisasi selanjutnya yaitu pendiskritisasi gradien, yaitu dengan gradien $\nabla\phi$ digunakan untuk mendiskritisasi suku konveksi dan difusi pada persamaan konservasi aliran. Kemudian diskritisasi tekanan, jadi pada persamaan umum terdapat gradien tekanan. Pendiskritisasian tersebut sesuai dengan teori yang sudah dijelaskan. Pada simulasi penelitian ini, metode pendiskritisasian tekanan digunakan Standard.

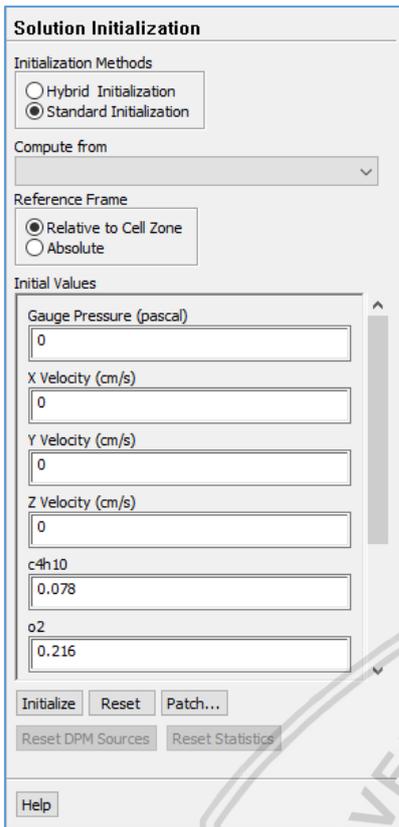
Setelah itu pendiskritisasian persamaan-persamaan densitas, momentum, spesies, dan energi. Semua suku-suku yang ada dalam persamaan atur yang kita pilih harus terdiskritisasi semua agar proses perhitungan dapat dilakukan.



Gambar 4.30. Algoritma SIMPLE

Setelah semua suku-suku pada persamaan umum sudah didiskritisasi, maka proses pendiskritisasian sudah selesai. Tahap selanjutnya adalah mengatur kriteria konvergensi pada simulasi numerik. Nilai kriteria konvergensi untuk energi sebesar 1e-06 dan 1e-03 untuk persamaan-persamaan umum yang lain.

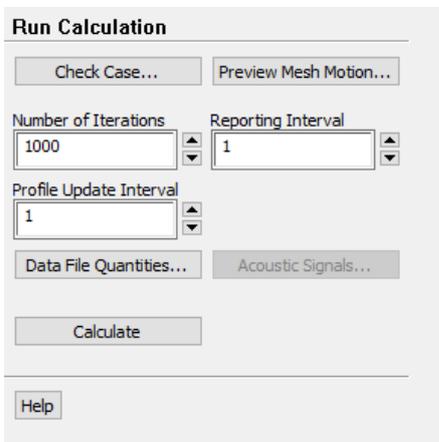
- 22. Initialization methods → Standard Inizialization
- 23. Initial value → Menentukan kondisi awal (Initial condition) → klik initialize...
- 24. Patch → 1000 → Fluid burned zone...



Gambar 4.31. Jendela solution initialization

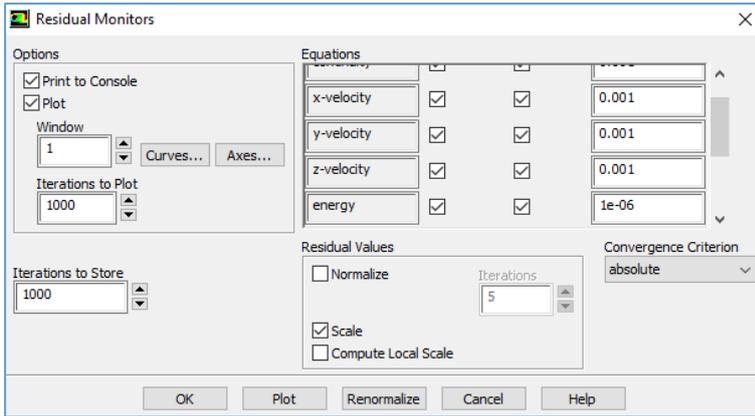
Pada tahap *solving* terdapat satu proses yang menjadi bagian terpenting dalam proses simulasi pembakaran, yaitu proses pemberian *patch temperature* atau memberikan energi panas dari luar. *Patch temperature* yang diberikan sebesar 1000°C (Munir & Mikami, 2015). Hal ini bertujuan agar reaksi kimia yang terjadi pada *combustor* dapat menghasilkan pembakaran dan produk dari reaksi kimia tersebut.

25. Run calculation → 1000 number of iteration.

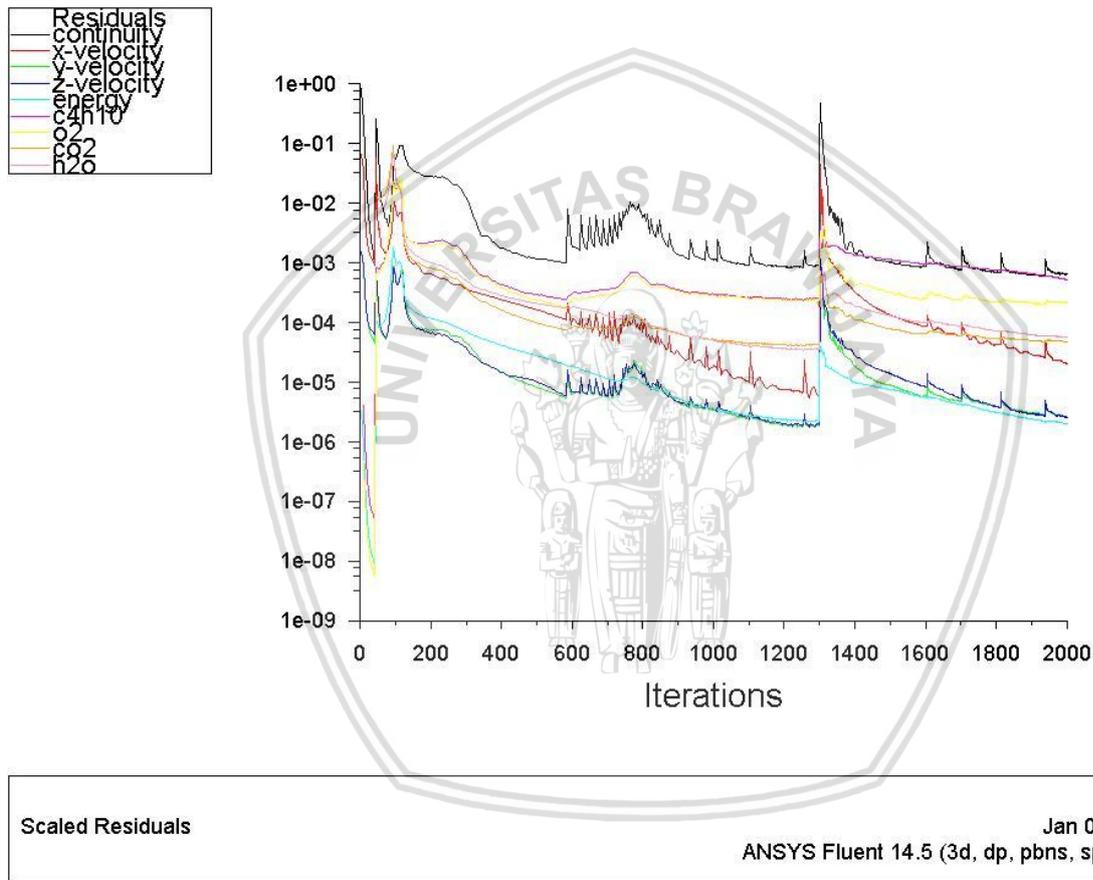


Gambar 4.32. Jendela pengaturan iterasi





Gambar 4.33. Jendela pengaturan konvergensi



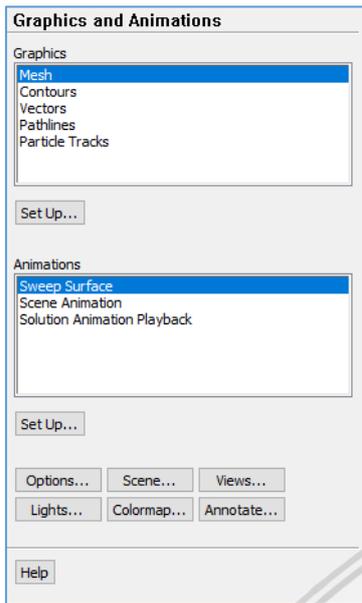
Scaled Residuals Jan 04, 2018
ANSYS Fluent 14.5 (3d, dp, pbns, spe, lam)

Gambar 4.34. Grafik iterasi perhitungan

Dari metode penelitian yang dilakukan, variasi geometri dari *flame holder* dapat dilakukan pada tahap pendefinisian geometri/domain serta kecepatan yang dapat diinputkan pada pendefinisian kondisi batas. Setelah tahap tersebut dilakukan, dalam memperoleh *flame stability* maka kecepatan reaktan harus dirubah kemudian dilakukan proses perhitungan kembali. Pengambilan data untuk temperatur api dan gas hasil pembakaran dapat diambil dengan melakukan prosedur *probe* pada *plane* yang diinginkan.

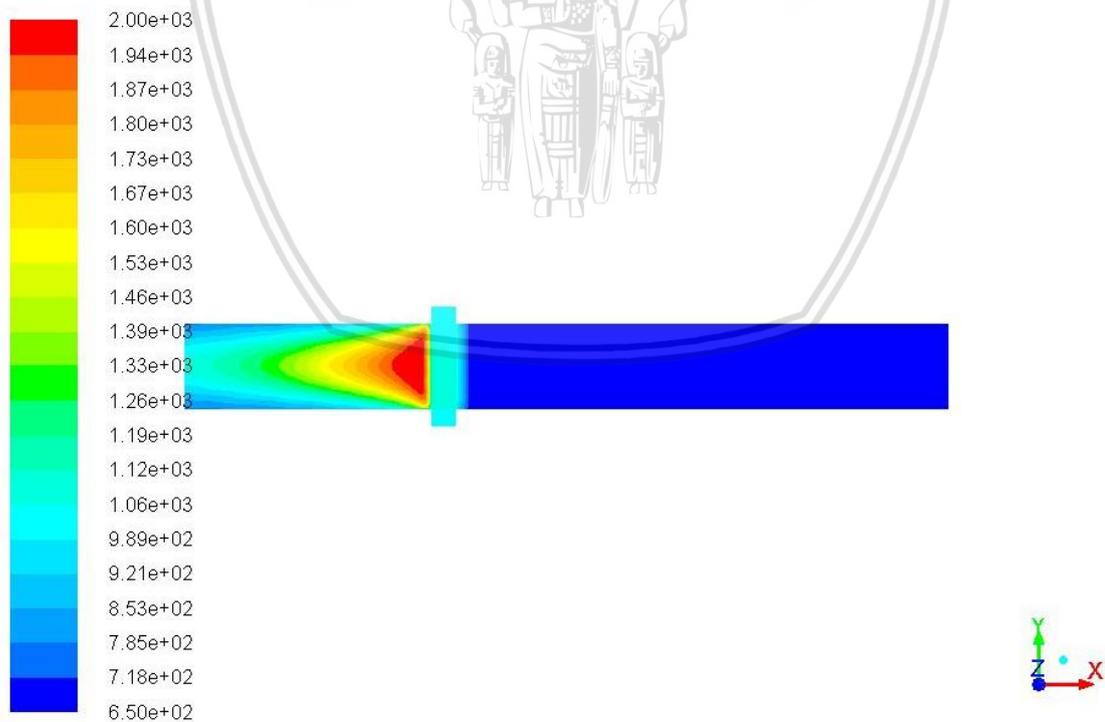
4.7. Step 3: Postprocessor (Plot hasil simulasi)

Result → Graphic and Animations → Contour → Temperature → Static temperature



Gambar 4.35. Jendela plot hasil

Rencana data yang diperoleh adalah *flame stability*, temperatur nyala api dan temperatur gas hasil pembakaran. Data yang diperoleh akan diolah dalam bentuk grafik.



Contours of Static Temperature (k)

Jan 04, 2018
ANSYS Fluent 14.5 (3d, dp, pbns, spe, lam)

Gambar 4.36. Contoh data plot *contour*

BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian tentang “Studi Numerik Pembakaran Butana (C_4H_{10}) dalam *Meso-scale Combustor* dengan *Perforated Plate*” adalah pendekatan secara numerik dengan penelitian eksperimental yang telah dilakukan. Dari data-data yang telah ditampilkan dan dibahas pada BAB V, data-data tersebut merupakan penunjang data eksperimental dalam memahami pembakaran dalam *meso-scale combustor*. Hal itu dapat digunakan sebagai pemahaman dalam memahami *heat recirculation*, dimana hal tersebut sangat mempengaruhi pembakaran dalam *meso-scale combustion*. Sebagai kesimpulan bahwa semakin tinggi kecepatan reaktan maka akan semakin tinggi temperatur yang dihasilkan. Akan tetapi, pada kondisi equivalen rasio yang semakin tinggi dengan kecepatan reaktan yang semakin tinggi bisa mengakibatkan api dalam kondisi *blowout* (api dimana padam) dimana ditunjukkan pada gambar grafik variasi equivalen rasio pada kecepatan reaktan konstan sehingga dapat ditarik sebuah kesimpulan bahwa masing-masing kecepatan reaktan mempunyai batas maksimum temperatur yang dapat dicapai, dan setelah itu temperatur yang dihasilkan akan semakin turun.

Visualisasi bentuk api yang diperoleh menunjukkan bahwa *flame holder* tipe 2 mempunyai nyala api yang luas jika dibandingkan dengan *flame holder* tipe 1.

Temperatur nyala api yang diperoleh menunjukkan bahwa *flame holder* tipe 2 mempunyai nilai temperatur yang tinggi dibandingkan dengan *flame holder* tipe 1.

Temperatur gas hasil pembakaran menunjukkan bahwa *flame holder* tipe 2 mempunyai nilai temperatur yang rendah jika dibandingkan dengan *flame holder* tipe 1.

Error yang dihasilkan dari data-data yang telah ditampilkan menunjukkan bahwa *error* pada *flame holder* tipe 1 lebih rendah dibandingkan *flame holder* tipe 2.

6.2. Saran

Saran yang dapat diberikan dari penulis kepada pembaca (akademisi ataupun instansi industri) adalah sebagai berikut:

- Penelitian ini adalah pendekatan secara numerik terhadap penelitian eksperimental, oleh sebab itu perlu dilakukan optimasi dari studi numerik ini yang selanjutnya dapat dilakukan penelitian ekperimental dari hasil optimasi yang didapat.
- Parameter dalam melakukan *meshing* lebih diperhalus.

- Parameter-parameter yang menentukan kondisi pembakaran dapat diinputkan pada sistem, sehingga hasil yang diperoleh mempunyai nilai *error* yang rendah.
- Pembuatan *micropower generation* mempunyai nilai jual yang tinggi dalam teknologi untuk masa depan, oleh karena itu hal utama yang harus dipahami oleh instansi industri adalah densitas yang dihasilkan oleh *micropower generation* yang dipengaruhi oleh kestabilan api *meso-scale combustor* dan modul pengkonversi energi.



DAFTAR PUSTAKA

- Aravind, B., Raghuram, G. K. S., Kishore, V. R., & Kumar, S. (2018). Compact design of planar stepped micro combustor for portable thermoelectric power generation. *Energy Conversion and Management*, 156(September 2017), 224–234. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.021>
- Basranto, M. E., Yuliati, L., & Purnami. (2013). Karakteristik Pembakaran dalam Meso-scale Combustion menggunakan Bahan Bakar Butana.
- Chigier, N., & Gemci, T. (2003). A Review of Micro Propulsion Technology. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 670, 1–11.
- Epstein, A. H., & Senturia, S. D. (1997). Microengineering: Macro Power from Micro Machinery. *Science*, 276(5316), 1211. <https://doi.org/10.1126/science.276.5316.1211>
- Hoffmann, K. a, & Chiang, S. T. (2000). Computational Fluid Dynamics Vol.I - Hoffmann.pdf. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1594.2010.01087.x>
- Hua, J., Wu, M., & Kumar, K. (2005). Numerical simulation of the combustion of hydrogen-air mixture in micro-scaled chambers. Part I: Fundamental study. *Chemical Engineering Science*, 60(13), 3497–3506. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.01.041>
- Jones, A. R., Lloyd, S. A., & Weinberg, F. J. (1978). Combustion in heat exchangers. *Proc. R.Soc. London*, 360 A(1700), 97–115. <https://doi.org/10.1098/rspa.1978.0059>
- Ju, Y., & Maruta, K. (2011). Microscale combustion: Technology development and fundamental research. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(6), 669–715. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2011.03.001>
- Katsuyoshi, T., Soichiro, K., Taku, M., & Toshiyuki, S. (2009). Development of the “ Micro Combustor .” *IHI Engineering Review*, 42(2), 97–102.
- Maruta, K. (2011). Micro and mesoscale combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*, 33(1), 125–150. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2010.09.005>
- Miese, C. M., Masel, R. I., Jensen, C. D., Shannon, M. A., & Short, M. (2004). Submillimeter-scale combustion. *AIChE Journal*, 50(12), 3206–3214. <https://doi.org/10.1002/aic.10271>
- Mikami, M., Maeda, Y., Matsui, K., Seo, T., & Yuliati, L. (2013). Combustion of gaseous and liquid fuels in meso-scale tubes with wire mesh. *Proceedings of the Combustion Institute*, 34(2), 3387–3394. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2012.05.064>

- Munir, F. A., & 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), JTST0008-JTST0008. <https://doi.org/10.1299/jtst.2015jtst0008>
- Norton, D. G., & Vlachos, D. G. (2003). Combustion characteristics and flame stability at the microscale: A CFD study of premixed methane/air mixtures. *Chemical Engineering Science*, 58(21), 4871–4882. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2002.12.005>
- Pello, A. C. F. (2002). Micropower Generation using Combustion: Issues and Approaches. *Proceedings of the Combustion Institute*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1002503>
- Raimondeau, S., Norton, D., Vlachos, D. G., & Masel, R. I. (2002). Modeling of high-temperature microburners. *Proceedings of the Combustion Institute*, 29(1), 901–907. [https://doi.org/10.1016/S1540-7489\(02\)80114-6](https://doi.org/10.1016/S1540-7489(02)80114-6)
- Takeno, T., & Sato, K. (1979). An Excess Enthalpy Flame Theory. *Combustion Science and Technology*, 20(1–2), 73–84. <https://doi.org/10.1080/00102207908946898>
- Versteeg, L. J., & Malasekera, W. (1995). *An introduction to computational fluid dynamics*.
- Wenberg, F. J. (1975). The First Half-Million Years of Combustion Research and Today's Burning Problems. *Symposium (International) on Combustion*, 1, 1–17.
- Yuliati, L. (2014). Flame Stability of Gaseous Fuel Combustion inside Meso-Scale Combustor with Double Wire Mesh. *Applied Mechanics and Materials*, 664, 231–235. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.664.231>