

TUGAS AKHIR - TM184835

**STUDI NUMERIK PENGARUH MODEL REAKSI KIMIA
PADA GASIFIKASI TIGA TINGKAT TERHADAP
PERFORMANSI GASIFIKASI *REFUSED DERIVED FUEL*
(RDF)**

Fiqhi Athifiyah Sobhri
NRP. 02111640000135

Dosen Pembimbing
Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT

Program Studi Teknik Mesin
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2022



TUGAS AKHIR -TM184835

**STUDI NUMERIK PENGARUH MODEL REAKSI KIMIA
PADA GASIFIKASI TIGA TINGKAT TERHADAP
PERFORMANSI GASIFIKASI *REFUSED DERIVED FUEL*
(RDF)**

FIQHI ATHIFIYAH SOBHRI

NRP 02111640000135

Dosen Pembimbing

Dr. Bambang Sudarmanta, ST.,MT.

NIP 197301161997021001

Program Studi Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



FINAL PROJECT -TM184835

**NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF CHEMICAL
REACTION ON MULTI STAGE GASIFICATION ON
PERFORMANCE OF REFUSED DERIVED FUEL (RDF)
GASIFICATION**

FIQHI ATHIFIYAH SOBHRI

NRP 02111640000135

Advisor

Dr. Bambang Sudarmanta, ST.,MT.

NIP 197301161997021001

Study Program of Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI NUMERIK PENGARUH MODEL REAKSI KIMIA PADA GASIFIKASI TIGA TINGKAT TERHADAP PERFORMANSI GASIFIKASI *REFUSE DERIVED FUEL* (RDF)

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **Fiqhi Athifiyah Sobhri**

NRP. 02111640000135

Disetujui oleh Tim Penguji Proposal Tugas Akhir :

1. Bambang Sudarmanta, ST.,MT.

2. Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc

3. Ary Bachtiar K.P, ST. MT. PhD.

4. Dr. Is Bunyamin Suryo, ST.MSc



Pembimbing

Penguji

Penguji

Penguji

SURABAYA

Juli, 2022

APPROVAL SHEET

NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF CHEMICAL REACTION ON MULTI STAGE GASIFICATION ON PERFORMANCE OF REFUSED DERIVED FUEL (RDF) GASIFICATION

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree Bachelor at
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **Fihi Athifiyah Sobhri**

NRP. 02111640000135

Disetujui oleh Tim Penguji Proposal Tugas Akhir :

1. Dr. Bambang Sudarmanta, ST.,MT.

2. Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc.

3. Ary Bachtiar K.P, ST. MT. PhD.

4. Dr. Is Bunyamin Suryo, ST.MSc



SURABAYA

Juli, 2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Fiqhi Athifiyah Sobhri/02111640000135
Departemen : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing / NIP : Dr. Bambang Sudarmanta, ST.,MT./ 197301161997021001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “STUDI NUMERIK PENGARUH MODEL REAKSI KIMIA PADA GASIFIKASI TIGA TINGKAT TERHADAP PERFORMANSI GASIFIKASI *REFUSE DERIVED FUEL* (RDF)” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 1 Agustus 2022

Mengetahui

Dosen Pembimbing



(Dr. Bambang Sudarmanta, ST.,MT.)
NIP. 197301161997021001

Mahasiswa,

(Fiqhi Athifiyah Sobhri)
NRP.02111640000135

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Nama of student / NRP : Fiqhi Athifiyah Sobhri/02111640000135
Department : Mechanical Engineering
Advisor / NIP : Dr. Bambang Sudarmanta, ST.,MT./ 197301161997021001

hereby declare that the Final Project with the title of “NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF CHEMICAL REACTION ON MULTI STAGE GASIFICATION ON PERFORMANCE OF REFUSED DERIVED FUEL (RDF) GASIFICATION” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 1 Agustus 2022

Acknowledge

Advisor



(Dr. Bambang Sudarmanta, ST.,MT.)
NIP. 197301161997021001

Student,

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'F. Sobhri', written over a horizontal line.

(Fiqhi Athifiyah Sobhri)
NRP.02111640000135

STUDI NUMERIK PENGARUH MODEL REAKSI KIMIA PADA GASIFIKASI TIGA TINGKAT TERHADAP PERFORMANSI GASIFIKASI *REFUSE DERIVED FUEL* (RDF)

Nama Mahasiswa : Fiqhi Athiffiyah Sobhri
NRP : 02111640000135
Jurusan : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Bambang Sudarmanta, ST.,MT.

ABSTRAK

Refuse derived fuel (RDF) merupakan sampah yang tidak dapat diolah kembali, maka pemanfaatan RDF yaitu dikonversi menjadi bahan bakar pengganti energi fosil dengan teknologi gasifikasi. Gasifikasi adalah proses perubahan bahan bakar padat secara termokimia menjadi gas (*syngas*) yang *flammable*. *Syngas* yang dihasilkan oleh proses gasifikasi dapat digunakan secara langsung dengan cara dibakar, dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk motor pembakaran dalam, ataupun digunakan sebagai bahan baku untuk proses kimia lebih lanjut. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh masukan udara tiga tingkat dengan *setting* temperatur menggunakan sistem kontrol terhadap kondisi operasi proses gasifikasi yang dinyatakan dalam distribusi temperatur sepanjang gasifier, dan peningkatan performansi gasifikasi yang dinyatakan dalam komposisi *combustible syngas* serta dapat memodelkan reaksi-reaksi pada gasifikasi dan memvalidasi hasilnya dengan hasil eksperimen.

Penelitian ini dilakukan dengan metode numerik menggunakan *software* Ansys 19. Terdapat tiga tahap dalam melakukan simulasi numerik yaitu: *preprocessing*, *processing*, dan *postprocessing*. *Boundary condition* yang digunakan adalah *air inlet* pirolisis, oksidasi dan reduksi dengan 9 variasi udara masukan serta *biomass inlet*. Pada tahap *preprocessing* akan dilakukan pembuatan geometri, pembuatan *meshing*, dan penentuan domain pemodelan. Pada tahap *processing* akan dilakukan beberapa pengaturan yaitu: *Models*, *materials*, *boundary conditions*, *operating conditions*, *control and monitoring conditions*, serta *initialize conditions*. Model yang digunakan pada penelitian ini adalah model radiasi P1, viskositas standard k-epsilon, species transport, dan reaksi kimia *finite rate* dan *finite rate/eddy dissipation*. Pada tahap *postprocessing* diperoleh hasil simulasi berupa data kualitatif kontur atau vektor dan data kuantitatif berupa grafik maupun Tabel data.

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah distribusi temperatur reaksi *finite rate/eddy dissipation* adalah zona *drying* temperaturnya menunjukkan interval sebesar 207°C-267°C, zona pirolisis menunjukkan interval temperaturnya sebesar 551°C-664°C, zona reduksi menunjukkan temperatur yang dihasilkan intervalnya sebesar 412°C-497°C. Persentase volumetrik CO tertinggi sebesar 21,6% dan terendah variasi AR 3:6:1 sebesar 17,2%. Persentase volumetrik H₂ tertinggi sebesar 11,1% dan terendah sebesar 8,64%. Persentase volumetrik CH₄ tertinggi adalah sebesar 6,84% dan terendah sebesar 5,03%. LHV tertinggi sebesar 6538,3 kJ/kg dan terendah sebesar 5663,98 kJ/kg. CGE tertinggi sebesar 83,06% dan terendah sebesar 64,18%.

Kata kunci : *refuse derived fuel*, gasifikasi, reaksi kimia, *syngas*

NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF CHEMICAL REACTION ON MULTI STAGE GASIFICATION ON PERFORMANCE OF REFUSED DERIVED FUEL (RDF) GASIFICATION

Name : Fiqhi Athiffiyah Sobhri
NRP : 02111640000135
Department : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Supervisor : Dr. Bambang Sudarmanta, ST.,MT.

ABSTRACT

Refuse derived fuel (RDF) is waste that cannot be reprocessed, so the use of RDF is converted into a substitute fuel for fossil energy with gasification technology. Gasification is the process of thermochemically changing solid fuels into flammable gases (syngas). Syngas produced by the gasification process can be used directly by burning, can be used as fuel for internal combustion engines, or used as raw material for further chemical processes. The purpose of this study was to determine the effect of three-level air intake with temperatur setting using a control system on the operating conditions of the gasification process which is expressed in the temperatur distribution along the gasifier, and the increase in gasification performance expressed in the composition of combustible syngas and can model the reactions in gasification and validate results with experimental results.

This research was conducted using numerical methods using Ansys 19 software. There are three stages in performing numerical simulations, namely: preprocessing, processing, and postprocessing. At the preprocessing stage, the geometry, meshing, and the determination of the modeling domain will be carried out. In the processing stage, several settings will be made, namely: Models, materials, *boundary conditions*, operating conditions, control and monitoring conditions, and initialize conditions. The model used in this study is model radiation P1, viscous standard k-epsilon, species transport, and a chemical reaction model of finite rate and finite rate/eddy dissipation. Boundary conditions used are air inlet pyrolysis, oxidation and reduction with 9 variations of intake air and biomass inlet. At the postprocessing stage, simulation results are obtained in the form of qualitative contour or vector data and quantitative data in the form of graphs and data tables.

The results obtained from this study are the temperatur distribution of the finite rate/eddy dissipation reaction, the drying zone temperatur shows an interval of 207°C-267°C, the pyrolysis zone shows a temperatur interval of 551°C-664°C, the reduction zone shows the resulting temperatur. the interval is 412°C-497°C. The highest volumetric percentage of CO is 21.6% and the lowest is AR 3:6:1 variation of 17.2%. The highest volumetric percentage of H₂ was 11.1% and the lowest was 8.64%. The highest volumetric percentage of CH₄ was 6.84% and the lowest was 5.03%. The highest LHV was 6538.3 kJ/kg and the lowest was 5663.98 kJ/kg. The highest CGE was 83.06% and the lowest was 64.18%.

Keyword: refuse derived fuel, gasification, chemical reaction, syngas

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan laporan Tugas Akhir dengan berjudul:

STUDI NUMERIK PENGARUH MODEL REAKSI KIMIA PADA GASIFIKASI TIGA TINGKAT TERHADAP PERFORMANSI GASIFIKASI *REFUSE DERIVED FUEL* (RDF)

Tugas Akhir ini merupakan salah satu persyaratan yang harus dipenuhi oleh setiap mahasiswa Program Studi S1 Departemen Teknik Mesin ITS Surabaya, sesuai dengan kurikulum yang telah ditetapkan. Selain itu Tugas Akhir ini.

Dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini terdapat banyak pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan kepada penulis, hingga akhirnya Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan Tugas Akhir ini, diantaranya:

1. Kedua orang tua penulis, Bapak Hugeng Dwi Purnomo dan Ibu Sadyaswati Dyah Siwiastuti, kakak penulis, Ikhe Athifiyah Syah Putra, serta adik penulis, Khefina Athifiyah Safia Putri dan Ghea Athifiyah Salove yang telah memberikan doa, semangat, cinta, dan waktunya yang sangat berperan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT selaku Dosen Pembimbing yang telah mengarahkan dan membimbing penulis serta memberikan ilmu pengetahuan sehingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
3. Dosen tim penguji yang telah memberikan kritik dan saran dalam penyempurnaan dan pengembangan Tugas Akhir ini.
4. Seluruh dosen dan staf pengajar Departemen Teknik Mesin FTIRS-ITS, yang telah memberikan ilmunya dan membantu semua selama perkuliahan di Teknik Mesin ITS.
5. Pak Sigit selaku mahasiswa S-3 yang selalu memberikan arahan dan saran dalam proses pengerjaan tugas akhir ini.
6. Sahabat penulis, Raka dan Keegan yang selalu memberikan semangat kepada penulis. Semoga Allah SWT memberi kelancara dan kesuksesan dalam dunia kerja
7. Penghuni kos Kurnia yaitu: Auli, Bagus, Adde, Along, Seepar yang selalu memberikan motivasi dalam proses pengerjaan tugas akhir ini.
8. Teman – teman Angkatan M59 yang telah memberikan berbagai cerita bagi penulis selama menuntut ilmu di Teknik Mesin ITS.

Penulis menyadari dalam penulisan Tugas Akhir ini masih jauh dari kata sempurna, baik dalam teknik penulisannya, pemilihan katanya, serta analisisnya. Oleh karena itu, kami mengharap kritik dan saran membangun sebagai masukan untuk penulis dan kesempurnaan Tugas Akhir ini. Semoga dengan penulisan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang memerlukan.

Surabaya, 14 Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
APPROVAL SHEET.....	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
STATEMENT OF ORIGINALITY.....	iv
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
BAB II.....	3
TINJAUAN PUSTAKA.....	3
2.1 Teori Pendukung.....	3
2.1.1 Refuse Derived Fuel (RDF).....	3
2.1.2 <i>Multi-stage Gasifier Downdraft</i>	4
2.1.3 Sistem <i>Gasifier Control Unit</i> (GCU).....	5
2.1.4 Parameter Performansi Proses Gasifikasi.....	6
2.2 Computational Fluid Dynamics (CFD).....	8
2.2.1 Preprocessing.....	8
2.2.2 Processing.....	8
2.2.2 Postprocessing.....	9
2.3 Penelitian Terdahulu.....	9
2.3.1 Penelitian yang dilakukan Depi Rustam, 2019 : Studi Eksperimental Dan Numerik Pengaruh Temperatur Udara <i>Inlet</i> Proses Gasifikasi Pelet MSW Terhadap Performansi Multi-Stage Downdraft Gasifier.....	9
2.3.2 Penelitian yang dilakukan Kunkajit, 2015 : Pengaruh Sampah Plastik dalam RDF pada Gasifikasi Tipe <i>Downdraft</i>	12

2.3.3 Penelitian yang dilakukan Harsono, 2021 : Studi Eksperimental Pengaruh Masukan Udara Tiga Tingkat Dengan Variasi Temperatur Menggunakan Sistem Kontrol Temperatur Terhadap Perfarmansi Gasifikasi <i>Refuse Derived Fuel</i> (RDF).....	17
2.3.4 Penelitian yang dilakukan Dhesa Hidaytulloh, 2018 : Studi Numerik Pengaruh Variasi Suhu Udara <i>Inlet</i> Zona Oksidasi Pada Proses Gasifikasi Pelet <i>Municipal Solid Waste</i> Terhadap Karakteristik Reaktor Tipe <i>Downdraft</i>	20
BAB III.....	23
METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1 Tahapan Penelitian	23
3.2 Diagram Alir Penelitian.....	24
3.3 Tahapan Pemodelan dan Simulasi.....	25
3.4.1 Pre-processing.....	25
3.4.2 Processing	26
3.4.3 Post-processing	29
3.4.4 Validasi Data.....	29
3.4 Rancangan Penelitian	29
BAB IV	31
HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Analisis Distribusi Temperatur Sepanjang Gasifier	31
4.1.1 Distribusi Temperatur dengan Model Reaksi <i>Finite rate</i>	31
4.1.2 Distribusi Temperatur dengan Model Reaksi <i>Finite rate/Eddy dissipation</i>	33
4.2 Analisis Komposisi <i>Syngas</i>	34
4.2.2 Analisis Komposisi <i>Syngas</i> dengan Model Reaksi <i>Finite Rate/Eddy Dissipation</i>	37
4.3 Analisis Komposisi Tiga Zona Gasifier.....	38
4.3.1 Analisis Distribusi Persentase Volumetrik CO	38
4.3.2 Analisis Distribusi Persentase Volumetrik H ₂	43
4.3.3 Analisis Distribusi Persentase Volumetrik CH ₄	47
4.4 Lower Heating Value (LHV) <i>Syngas</i>	51
4.5 Cold Gas Efficiency (CGE).....	54
BAB V.....	57
KESIMPULAN DAN SARAN	57
5.1 Kesimpulan.....	57
5.2 Saran	58
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN	61
JADWAL KEGIATAN.....	63

BIODATA PENULIS 64

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Tahapan reaksi pada multi-stage gasifier downdraft	4
Gambar 2. 2 Proses Logika Gasifier Control Unit.....	6
Gambar 2. 3 Diagram Alir Logika Pengendalian Temperatur Gasifikasi Pada GCU	6
Gambar 2. 4 Distribusi temperatur sepanjang <i>gasifier</i>	10
Gambar 2. 5 Kontur distribusi temperatur gasifier.....	11
Gambar 2. 6 Kontur temperatur pada tampilan isometrik (a) Tudara =80 °C, (b) Tudara =210 °C.....	12
Gambar 2. 7 Temperatur sebagai fungsi waktu operasi RDF sampah plastik terpakai dan tidak terpakai	13
Gambar 2. 8 Komposisi gas dengan nilai $m_{(Air)}/m_{(RDF)}$ berbeda menggunakan udara sebagai agen gasifikasi	14
Gambar 2. 9 Kandungan tar dengan nilai $m_{(Air)}/m_{(RDF)}$ berbeda menggunakan udara sebagai agen gasifikasi	14
Gambar 2. 10 Komposisi gas dengan nilai $m_{(Air)}/m_{(RDF)}$ berbeda menggunakan oksigen sebagai agen gasifikasi	15
Gambar 2. 11 Komposisi gas dengan nilai $m_{(Air)}/m_{(RDF)}$ berbeda menggunakan campuran oksigen denga uap air sebagai agen gasifikasi	15
Gambar 2. 12 Distribusi temperatur	16
Gambar 2. 13 Komposisi <i>syngas</i> terhadap variasi AR.....	16
Gambar 2. 14 LHV <i>syngas</i> terhadap variasi AR.....	17
Gambar 2. 15 Kandungan tar terhadap variasi AR	17
Gambar 2. 16 Distribusi setting temperatur 600°C	18
Gambar 2. 17 Distribusi setting temperatur 700°C	18
Gambar 2. 18 Distribusi setting temperatur 800°C	19
Gambar 2. 19 Distribusi setting temperatur 900°C	19
Gambar 2. 20 Distribusi setting temperatur 1000°C	20
Gambar 2. 21 Grafik Distribusi Rata-Rata Suhu pada Lima Variasi Suhu Udara <i>Inlet</i> (a) 80°C, (b) 110 °C, (c) 150 °C, (d) 180 °C, (e) 200 °C	21
Gambar 2. 22 Perbandingan Komposisi <i>Flammable Syngas</i> antara Metode Numerik dengan Eksperimen.....	22
Gambar 2. 27 Tahapan reaksi pada multi-stage gasifier downdraft	27
Gambar 4. 3 Distribusi temperatur hasil eksperimen.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 3. 1 a) Geometri dan b) Struktur <i>mesh</i> Ya	24
Gambar 3. 2 Domain Pemodelan.....	26
Gambar 3. 3 Pengamatan pada bagian penampang reaktor yang dilakukan pada koordinat x, y, dan z	26
Gambar 4. 1 Distribusi temperatur hasil eksperimen.....	31
Gambar 4. 2 Distribusi temperatur dengan model reaksi <i>finite rate</i>	32
Gambar 4. 3 Distribusi temperatur dengan model reaksi <i>finite rate/eddy dissipation</i>	33
Gambar 4. 4 Komposisi <i>syngas</i> hasil eksperimen	35
Gambar 4. 5 Grafik kandungan CO pada tiga zona hasil eksperimen	38
Gambar 4. 6 Distribusi CO pada tiga zona model reaksi <i>finite rate</i>	39
Gambar 4. 7 Distribusi CO pada tiga zona model reaksi <i>finite rate/eddy dissipation</i>	41
Gambar 4. 8 Kandungan H ₂ pada tiga zona hasil eksperimen.....	43

Gambar 4. 9 Distribusi H ₂ pada tiga zona model reaksi <i>finite rate</i>	44
Gambar 4. 10 Distribusi H ₂ pada tiga zona model reaksi <i>finite rate/eddy dissipation</i>	46
Gambar 4. 11 Distribusi CH ₄ pada tiga zona model reaksi <i>finite rate</i>	48
Gambar 4. 12 Distribusi CH ₄ pada tiga zona model reaksi <i>finite rate/eddy dissipation</i>	50
Gambar 4. 13 Grafik <i>lower heating value</i> hasil eksperimen	52
Gambar 4. 14 Grafik <i>lower heating value</i> (a) model reaksi <i>finite rate</i> (b) model reaksi <i>finite rate/eddy dissipation</i>	54
Gambar 4. 15 Grafik <i>cold gas efficiency</i> hasil eksperimen	55
Gambar 4. 16 Grafik <i>cold gas efficiency</i> (a) model reaksi <i>finite rate</i> (b) model reaksi <i>finite rate/eddy dissipation</i>	56
Gambar 4. 17 Distribusi temperatur hasil eksperimen	Error! Bookmark not defined.

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Karakteristik RDF Menggunakan <i>Analisis Proximate</i> (Laboratorium Energi dan Lingkungan ITS, 2020).....	3
Tabel 2. 2 Karakteristik RDF Menggunakan <i>Analisis Ultimate</i> (Kunkajit, 2015)	4
Tabel 2. 3 Acuan ukuran <i>skewness</i>	8
Tabel 2. 4 Komposisi <i>syngas</i> RDF sampah plastik terpakai dan tidak terpakai	12
Tabel 3. 1 <i>Models</i> yang digunakan dalam simulasi.....	26
Tabel 3. 2 <i>Ultimate analysis</i> dan <i>proximate analysis</i> RDF dalam perangkat lunak	27
Tabel 3. 3 Propertis material RDF	27
Tabel 3. 4 <i>Boundary condition</i> untuk temperatur 1000°C	28
Tabel 3. 5 Parameter <i>input</i> dan output penelitian	29
Tabel 4. 1 Error distribusi temperatur model reaksi <i>finite rate</i>	33
Tabel 4. 2 Error distribusi temperatur model reaksi <i>finite rate/eddy dissipation</i>	34
Tabel 4. 3 Perbandingan komposisi <i>combustible gas</i> model reaksi <i>finite rate</i>	36
Tabel 4. 4 Perbandingan komposisi <i>combustible gas</i> model reaksi <i>finite rate/eddy dissipation</i>	37
Tabel 4. 5 Perbedaan Kandungan CO Zona Pirolisis.....	40
Tabel 4. 6 Perbedaan Kandungan CO Zona Oksidasi.....	40
Tabel 4. 7 Perbedaan Kandungan CO Zona Reduksi	40
Tabel 4. 8 Perbedaan Kandungan CO Zona Pirolisis	42
Tabel 4. 9 Perbedaan Kandungan CO Zona Oksidasi	42
Tabel 4. 10 Perbedaan Kandungan CO Zona Reduksi	42
Tabel 4. 11 Perbedaan Kandungan H ₂ Zona Pirolisis	44
Tabel 4. 12 Perbedaan Kandungan H ₂ Zona Oksidasi	45
Tabel 4. 13 Perbedaan Kandungan H ₂ Zona Reduksi	45
Tabel 4. 14 Perbedaan Kandungan H ₂ Zona Pirolisis	47
Tabel 4. 15 Perbedaan Kandungan H ₂ Zona Oksidasi	47
Tabel 4. 16 Perbedaan Kandungan H ₂ Zona Reduksi	47
Tabel 4. 17 Perbedaan Kandungan CH ₄ Zona Pirolisis.....	49
Tabel 4. 18 Perbedaan Kandungan CH ₄ Zona Oksidasi.....	49
Tabel 4. 19 Perbedaan Kandungan CH ₄ Zona Reduksi	49
Tabel 4. 20 Perbedaan Kandungan CH ₄ Zona Pirolisis	50
Tabel 4. 21 Perbedaan Kandungan CH ₄ Zona Oksidasi	51
Tabel 4. 22 Perbedaan Kandungan CH ₄ Zona Reduksi	51
Tabel 4. 23 Nilai kalor gas mudah terbakar	51
Tabel 4. 24 LHV model reaksi <i>finite rate</i>	53
Tabel 4. 25 LHV model reaksi <i>finite rate/eddy dissipation</i>	53

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jumlah penduduk Indonesia pada tahun 2021 mencapai 272 juta jiwa pada dengan pertumbuhan rata-rata 1,25% per-tahun (Direktorat Jenderal Kependudukan dan Pencatatan Sipil). Di sisi lain, cadangan sumber energi utama Indonesia yaitu bahan bakar fosil semakin menipis. Oleh karena itu, perlu adanya solusi guna mengembangkan sumber energi alternatif terbarukan salah satunya adalah sampah.

Jumlah sampah di Indonesia pada tahun 2020 mencapai 34.584.584,16 ton/tahun dengan pengelolaan hanya 56,47% atau 19.529.653.84 ton/tahun (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Direktorat Jenderal Pengelolaan Sampah, Limbah, B3 Direktorat Pengelolaan Sampah). Teknologi diperlukan untuk memanfaatkan sampah menjadi energi alternatif. Sampah yang memungkinkan untuk dikonversi menjadi energi adalah sampah padat yang dihasilkan masyarakat perkotaan atau lebih dikenal dengan sebutan *Municipal Solid Waste* (MSW). *Refuse derived fuel* (RDF) merupakan sampah yang tidak dapat diolah kembali (Hutabarat, 2018), maka pemanfaatan RDF yaitu dikonversi menjadi bahan bakar pengganti energi fosil dengan teknologi gasifikasi. RDF diubah bentuknya menjadi briket. Tujuan pembriketan dilakukan untuk menyeragamkan ukuran, mengurangi kelembaban dan meningkatkan densitas bahan (Reed & Das, 1988).

Salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk mengkonversi sampah menjadi energi alternatif tanpa menghasilkan emisi adalah gasifikasi (Arena, 2012). Gasifikasi merupakan salah satu metode yang efisien dan bersih guna memanfaatkan sumber daya dengan kepadatan energi rendah serta tinggi kandungan *volatile* (Zhou, 2009). Gasifikasi adalah proses perubahan bahan bakar padat secara termokimia menjadi gas (*syngas*) yang *flammable*. Gasifikasi mempunyai beberapa langkah umum dalam prosesnya, yaitu proses pengeringan, proses pirolisis, proses reduksi, dan proses pembakaran sebagian (*partial combustion*) (Basu, 2013). Selain itu pada gasifikasi juga menggunakan media gasifikasi berupa udara, oksigen ataupun uap air. Gas yang dihasilkan oleh proses gasifikasi biasa disebut sebagai *syngas* (*synthetic gas*) (Molino, A., 2015). *Syngas* yang dihasilkan oleh proses gasifikasi dapat digunakan secara langsung dengan cara dibakar, dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk motor pembakaran dalam, ataupun digunakan sebagai bahan baku untuk proses kimia lebih lanjut. Tipe gasifier yang digunakan adalah multi-stage downdraft, dengan menambahkan sistem kontrol temperatur pada sistem gasifikasi sehingga nantinya diharapkan dapat meningkatkan performansi gasifikasi sehingga diperoleh hasil yang paling optimal.

Beberapa upaya dilakukan untuk meningkatkan performansi gasifikasi yang dinyatakan dengan komposisi LHV *syngas*, *combustible syngas*, *cold gas efficiency*, dan kandungan tar dalam *syngas*. Memodifikasi *gasifier downdraft* satu tingkat (*single-stage*) menjadi *gasifier multi-stage* yang disini tiga tingkat (*three-stage*), adalah salah satu upaya meningkatkan performansi gasifikasi. Perbedaan antara *single-stage* dan *three-stage* terdapat dalam posisi masuk udara. Pada gasifikasi *single-stage* udara hanya masuk ke zona oksidasi, sedangkan pada gasifikasi *three-stage* udara masuk ke zona pirolisis, oksidasi, dan reduksi. Gasifikasi *multi-stage* memiliki kelebihan dapat mereduksi tar hingga 28 mg/Nm³ (Bhattacharya, 2001).

Hidayatulloh, D (2018) melakukan studi numerik pengaruh temperatur masukan udara zona oksidasi terhadap karakteristik *downdraft gasifier*. Pada penelitian tersebut diGambarkan kontur distribusi temperatur dan komposisi *flammable syngas* sepanjang reaktor. Sehingga, pembentukan gas-gas pada proses gasifikasi dapat diketahui secara detail.

Rustam, D (2019) melakukan studi eksperimental dan numerik pengaruh temperatur udara masukan proses gasifikasi pelet msw terhadap performansi *multi-stage downdraft*

gasifier. Pada penelitian tersebut didapatkan perbandingan analisis distribusi temperatur dan komposisi *combustible gas* antara hasil eksperimen dan numerik. Sehingga, analisis yang didapat dapat diketahui secara detail.

Berdasarkan uraian-uraian tersebut, pada penelitian dilakukan dengan metode numerik untuk mengetahui secara spesifik distribusi temperatur sepanjang *gasifier* dan komposisi produk reaksi tahapan gasifikasi (*three-stage*). Sehingga pengaruh peningkatan temperatur sepanjang *gasifier* terhadap udara *inlet three-stage gasifier* terhadap performansi gasifikasi dapat dianalisis secara komprehensif.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan diteliti adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui bagaimana memodelkan secara numerik proses gasifikasi biomassa RDF pada reaktor tipe *downdraft* dengan masukan udara bertingkat (*three-stage*) yang selanjutnya dapat digunakan untuk mengetahui bagaimana analisa dari proses gasifikasi dengan memvariasikan perbandingan udara masuk pada setiap tingkat dan model reaksi yang ditunjukkan dengan distribusi temperatur, komposisi *flammable syngas* (H₂, CO, dan CH₄) dan performansi.
2. Pelaksanaan penelitian dilakukan dengan pemodelan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan *software* ANSYS Fluent 19 dan data penelitian divalidasi dengan metode eksperimen pada penelitian sebelumnya.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bahan baku yang digunakan adalah *Refuse Derived Fuel* (RDF) berbentuk briket dengan ukuran diameter 30 mm dan panjang 30 mm. Komposisi RDF yang digunakan adalah 60% bahan organik dan 40% bahan anorganik.
2. Disimulasikan pada *software* ANSYS Fluent 19.
3. Temperatur udara yang masuk ke zona pirolisis, oksidasi dan reduksi dianggap seragam.
4. AR (*Air Ratio*) yang digunakan pada zona pirolisis, oksidasi dan reduksi adalah (0;10;0, 1;6;3, 2;6;2, 3;6;1, 2;5;3, 3;5;2, 1;8;1, 2;7;1, dan 1;7;2)
5. Geometri yang dimodelkan hanya pada bagian dalam reaktor.
6. Pada penelitian gasifikasi, material input secara otomatis didefinisikan dalam bentuk partikel batu bara karena pada database FLUENT tidak terdapat material RDF.

1.4 Tujuan

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh masukan udara tiga tingkat dengan *setting* temperatur menggunakan sistem control dan model reaksi terhadap kondisi operasi proses gasifikasi yang dinyatakan dalam distribusi temperatur sepanjang *gasifier*, komposisi *combustible syngas* dan performansi.
2. Memvalidasi penelitian yang dilakukan dengan pemodelan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan *software* ANSYS Fluent 19 dengan hasil eksperimen.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui karakteristik gasifikasi pada reaktor tipe *three-stage downdraft gasifier*.
2. Dapat digunakan sebagai acuan untuk penelitian lebih lanjut yang terkait dengan peningkatan unjuk kerja proses gasifikasi tipe *three-stage downdraft gasifier*.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teori Pendukung

2.1.1 Refuse Derived Fuel (RDF)

Refuse derived fuel (RDF) merupakan sampah yang tidak dapat diolah kembali (Hutabarat, 2018). RDF yang didapatkan dari sampah kota dilakukan pemisahan, yaitu dari bahan anorganik dan komponen *biodegradable*. Sehingga didapatkan komponen dasarnya yang terdiri dari kertas, foil, plastik keras, dan tekstil. Pengujian untuk menentukan *proximate, elemental compositions, dan higher heating value* (HHV) terhadap komponen dasar tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa cara, diantaranya: (a) *Thermogravimetric analysis* (TGA), (b) *Elemental analysis*, (c) *bomb calorimetry* (Haydary, 2016). Di bawah ini merupakan hasil *analysis proximate* RDF sampah kota.

Tabel 2. 1 Karakteristik RDF Menggunakan Analisis Proximate (Laboratorium Energi dan Lingkungan ITS, 2020)

No	Nama Contoh	Jenis Uji	Hasil	Satuan	Metode Pengujian
1.	<i>Refuse Derived Fuel</i>	<i>Moisture in sample</i>	3,25	%, adb	ASTM D 317/ D 3173 M-17a
		<i>Volatile matter</i>	54,23	%, adb	ISO 562-2010
		<i>Ash Content</i>	27,42	%, adb	ASTM D 3174-12(2018)
		<i>Fixed Carbon</i>	15,10	%, adb	ASTM D 3172-13
		Nilai Kalor	5.293	kal/gr, adb	Bomb Kalorimeter

Dari data di atas menunjukkan bahwa, kandungan *volatile matter* memiliki hasil yang paling tinggi dari jenis uji yang lainnya. *Volatile matter* memiliki hubungan dengan tar yang terdapat pada *syngas* dari proses gasifikasi, dimana semakin tinggi nilai *volatile matter* maka semakin tinggi pula tar yang dihasilkan pada proses gasifikasi (Kankujit, 2015). *Volatile matter* memiliki bahan yang didalamnya memiliki komposisi seperti hidrogen, karbon monoksida dan metana ketika dilakukan proses termal terhadap bahan tersebut (Basu, 2013). Kandungan *moisture* yang dihasilkan dari *analysis proximate* nilainya paling rendah, dimana hal tersebut dapat disimpulkan bahwa tidak memerlukan energi yang besar pada zona *drying* untuk mengurangi air yang terdapat pada bahan RDF.

RDF memiliki komponen plastik paling banyak diperoleh daripada komponen lainnya. Maka RDF dari hasil sampah kota (MSW) dapat dibagi menjadi dua macam: (a) Sampah plastik dipakai, dan (b) Sampah plastik tidak dipakai. RDF yang digunakan sebagai pengganti bahan bakar terlebih dahulu dikonversi menjadi gas dan perlu dilakukan karakterisasi terhadap bahan RDF sampah plastik. Dari kedua bahan plastik (dipakai dan tidak dipakai) terdapat kandungan air, dimana kandungan air tersebut dapat berpengaruh terhadap hasil gas pada proses gasifikasi (Kunkajit, 2015). Di bawah ini merupakan hasil *analysis ultimate* RDF limbah plastik.

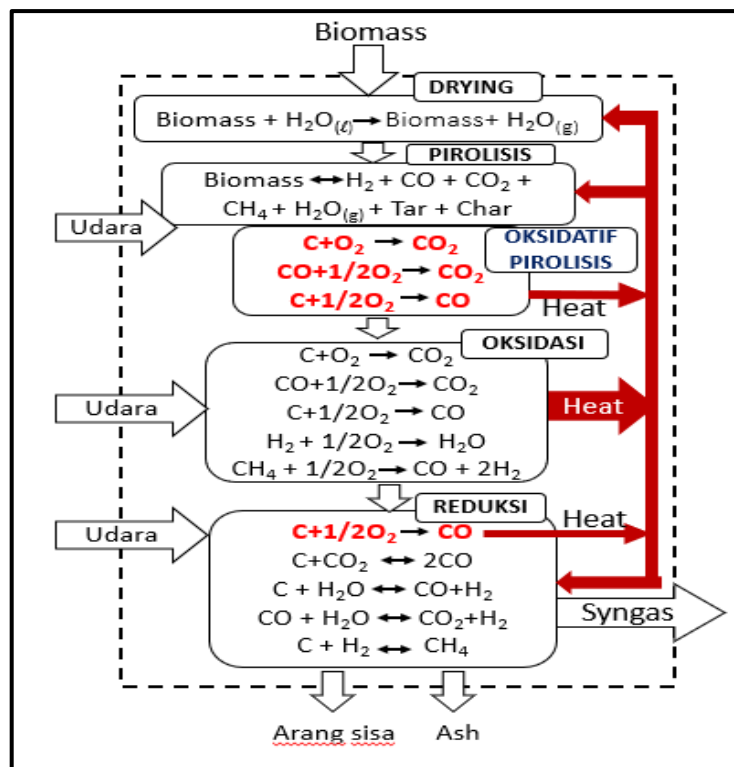
Tabel 2. 2 Karakteristik RDF Menggunakan Analisis Ultimate (Kunkajit, 2015)

Chemical properties	Unused-plastic-waste RDF	Used-plastic-waste RDF
<i>Ultimate analysis</i>		
C (% by weight)	42.86	41.88
H (% by weight)	6.42	6.50
O (% by weight)	20.49	24.59
N (% by weight)	0.77	0.78
S (% by weight)	0.06	0.06

Tabel di atas menunjukkan bahwa *ultimate analysis* didapatkan kandungan karbon (C), oksigen (O₂), dan hydrogen (H) merupakan unsur yang paling dominan. Kandungan ketiga tersebut merupakan unsur utama yang terdapat pada *syngas* dari proses gasifikasi, komposisi dari H₂, CO, dan CO₂ merupakan komposisi utama dari produk proses gasifikasi dengan menggunakan bahan RDF (Dalai, 2009).

2.1.2 Multi-stage Gasifier Downdraft

Multi-stage gasifier downdraft yaitu memasukan beberapa injeksi udara dengan melalui tiga tahap (zona pirolisis, zona oksidasi dan zona reduksi) untuk mengurangi tar dan meningkatkan efisiensi pada proses gasifikasi (Saleh dan Sudarmanta, 2018). Keunggulan *Multi-stage gasifier downdraft* dapat mencegah terjadinya temperatur tinggi pada satu titik, Karena jika terjdadipadatkan menurunkan laju kecepatan nyala api dan mengurangi laju pergerakan turunnya bahan bakar didalam *gasifier* (Saleh, 2019). Di bawah ini merupakan tahapan proses *gasifier multi-stage*.



Gambar 2. 1 Tahapan reaksi pada multi-stage gasifier downdraft

Gambar 2. 2 Perbandingan Komposisi Flammable Syngas antara Metode Numerik dengan Eksperimen
Gambar 2. 3 Tahapan reaksi pada multi-stage gasifier downdraft

Dari Gambar di atas, dapat disimpulkan bahwa setiap zona sebagai berikut: (a) Zona *drying* yaitu biomassa yang dimasukkan ke dalam *gasifier* mengandung uap air dikeringkan dan diuapkan sehingga menghasilkan biomassa dan uap air. (b) Zona pirolisis yaitu biomassa kering diolah menjadi reaksi devolatisasi dan menghasilkan produk padat (*char* dan tar), gas terkondensasi dan gas tidak terkondensasi (CO, CO₂, H₂, H₂O dan CH₄). (c) Zona Oksidasi yaitu hasil prosuk dari pirolisis direaksikan dengan udara, sehingga terjadi oksidasi parsial antara oksigen dengan *char*, H₂ dan CH₄. Dengan proses oksidasi parsial dapat menjadikan tar retak dan memecah menjadi gas yang lebih ringan. (d) Zona reduksi yaitu reaksi antara gas dan reaksi padat-gas, dimana pada zona ini merupakan penentuan komposisi gas yang mudah terbakar (CO, H₂, dan CH₄) serta LHV (Saleh, 2019).

Reaksi pirolisis oksidatif memiliki sifat eksotermik, dimana sifat tersebut didapatkan dengan cara memasukkan udara ke zona pirolisis. Sehingga zona pirolisis mendapatkan panas tambahan, serta memberikan keuntungan untuk mengurai tar dan menghasilkan tar yang nilainya rendah. Dalam mengoptimalkan dan memaksimalkan reaksi pirolisis, maka dibutuhkan masukan udara yang tepat agar dapat meningkatkan produksi *syngas* dengan komposisi kandungan CO yang lebih banyak, dimana CO merupakan produk dari oksidasi parsial di dalam pirolisis oksidatif. Maka dengan memasukan udara tiga tahap dapat memulai pirolisis oksidatif eksotermik dan reaksi *heterogeneous oxidation* yang menyebabkan panas di dalam zona pirolisis dan zona reduksi, sehingga panas tambahan yang diperoleh juga dapat menguntungkan dalam kinerja proses gasifikasi (Arifin, 2020).

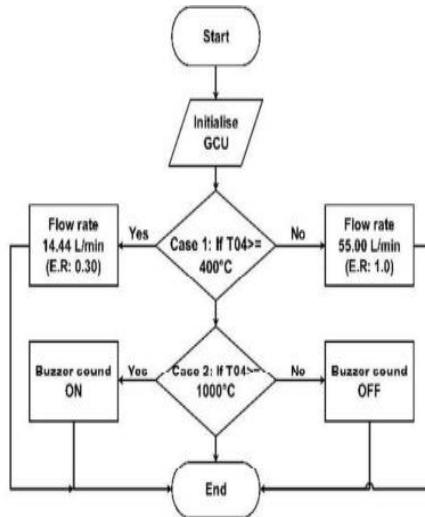
Reaksi pada zona reduksi menjadi keadaan oksidatif. Udara yang dimasukan cenderung bereaksi dengan karbon dibandingkan dengan gas, karena sebagian besar gas mudah terbakar telah digunakan pada reaksi pembakaran zona sebelumnya. Hal ini menyebabkan peningkatan dari produksi gas dan laju konversi karbon, karena lebih banyak *char* yang bereaksi dengan oksigen dan membentuk gas (H. Shi, et al, 2016).

2.1.3 Sistem Gasifier Control Unit (GCU)

Gasifier control unit (GCU) merupakan sistem instrumentasi yang kuat dan memungkinkan untuk pemantauan waktu nyata, dapat digunakan untuk optimalisasi pada proses gasifikasi. Biasanya sistem instrumentasi dan kontrol dikembangkan untuk mengukur parameter gasifikasi seperti: temperatur, tekanan, aliran massa dan komposisi gas yang terjadi selama proses gasifikasi bekerja (Kamble, 2018). Sistem kontrol yang sering digunakan di dalam proses gasifikasi biasanya sistem kontrol Mikrokontroler Arduino, karena di dalamnya memiliki fleksibilitas dan integritasi sistem yang sederhana. Ada beberapa contoh penerapan sistem kontrol dengan menggunakan Mikrokontroler Arduino terhadap proses gasifikasi yang dapat dilakukan antara lain:

2.1.3.1 Gasifikasi Dengan Mengontrol Laju Aliran Udara Dan *Equivalence Ratio* (ER)

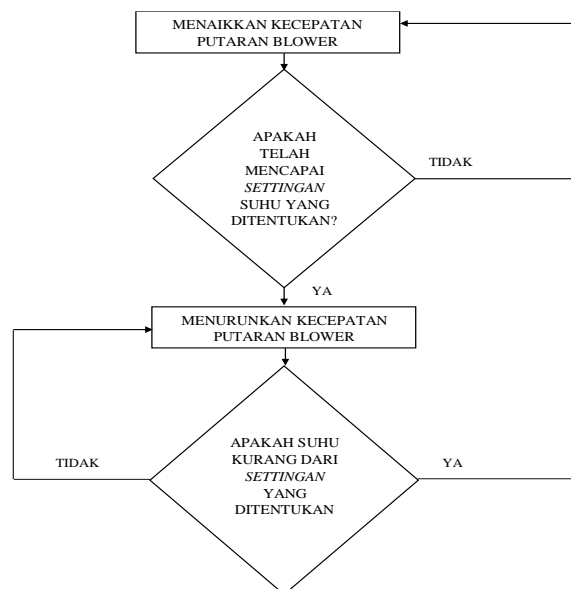
Gasifikasi dilakukan dengan menggunakan sistem kontrol yang memperoleh input data dari pengukuran temperatur zona reduksi di dalam *reactor*, kemudian output atau proses yang dikontrol pada proses gasifikasi tersebut yaitu laju aliran udara masuk dan *equivalence ratio* (ER). Dimana jika temperatur sudah mencapai batas yang ditentukan, maka laju aliran udara masuk dan nilai ER akan berubah pada proses gasifikasi (Kamble, 2018). Di bawah ini merupakan contoh proses logika awal untuk penerapan *gasifier control unit*.



Gambar 2. 4 Proses Logika Gasifier Control Unit

2.1.3.2 Gasifikasi Dengan Mengontrol Kecepatan Putaran Blower

Gasifikasi dilakukan dengan menggunakan sistem kontrol yang memperoleh input data pengukuran temperatur zona oksidasi di dalam *reactor*, kemudian output atau proses yang dikontrol pada proses gasifikasi tersebut yaitu kecepatan blower. Dimana ketika temperatur zona oksidasi akan tercapai seperti yang ditentukan maka kecepatan blower semakin pelan, namun jika temperatur zona oksidasi belum mencapai seperti yang ditentukan maka kecepatan blower berputar pada putaran yang paling tinggi (Simanjourang, 2020 dan Damanik, 2020). Di bawah ini merupakan contoh proses logika penerapan gasifier control unit.



Gambar 2. 5 Diagram Alir Logika Pengendalian Temperatur Gasifikasi Pada GCU

2.1.4 Parameter Performansi Proses Gasifikasi

2.1.4.1 Komposisi Gas

Komposisi gas biasanya diambil dari produk utama di dalam proses gasifikasi yaitu *syngas*, unsur yang terdapat di dalam *syngas* pada umumnya terdiri dari CO, CO₂, H₂, CH₄.

Hidrokarbon berat dan N₂. Kandungan gas yang terdapat pada *syngas* tersebut terbagi menjadi gas yang dapat terbakar dan gas yang tidak dapat terbakar, untuk komposisi gas yang dapat terbakar yaitu: CO, H₂ dan CH₄ dan komposisi gas yang tidak dapat terbakar yaitu: CO₂ dan N₂. Pengujian *analysis proximate* dan *analysis ultimate* dilakukan tujuannya untuk mengetahui komposisi gas yang terdapat pada *syngas*, dari pengujian tersebut dapat diketahui besarnya komposisi gas yang dapat terbakar dan merupakan indikator yang paling penting dalam menentukan performansi gasifikasi. Dimana semakin tinggi nilai komposisi gas yang dapat terbakar, maka dapat disimpulkan bahwa performansi baik pada proses gasifikasi.

2.1.4.2 Cold Gas Efficiency

Cold Gas Efficiency yaitu jumlah energi masuk selama energi potensial keluar. Maka didapatkan jumlah energi dalam massa gas yang dihasilkan, dibandingkan dengan energi total dalam massa biomassa berbentuk padat yang belum diproses. Persamaan *cold gas efficiency* dapat dinyatakan seperti di bawah ini.

$$\eta_{cg} = \frac{V_g * LHV_g}{M_f * LHV_f} \times 100\% \quad (2.1)$$

Dimana V_g adalah laju volumetrik *syngas* (Nm³/h), M_f adalah laju lair massa biomassa (kg/h), LHV_g adalah *lower heating value syngas* (kJ/Nm³), LHV_f adalah *lower heating value* biomassa (kJ/kg).

2.1.4.3 Low Heating Value (LHV) Syngas

Low heating value (LHV) adalah nilai kalor yang didapatkan dari *syngas* pada proses gasifikasi. Dimana *syngas* dapat dihitung dengan menjumlahkan konsentrasi gas yang dapat dibakar (CO, H₂ dan CH₄) dan panas pembakarannya. Persamaan yang dapat digunakan adalah sebagai berikut:

$$LHV_{Syngas} = \sum_{i=1}^n (Y_i \cdot LHV_i) \quad (2.2)$$

Dimana Y_i merupakan persentase volumetrik gas dapat terbakar (CO, H₂, dan CH₄) dan LHV_i merupakan nilai kalornya.

2.1.4.4 Tingkat Produksi Syngas

Tingkat produksi *syngas* dapat diukur secara langsung yaitu pada saluran buang yang terdapat pada *gasifier*. Maka persamaan yang dapat digunakan adalah sebagai berikut:

$$\dot{m}_{Syngas} = \rho_{gas} \times \frac{Volume_{syngas}}{Flow_{time}} \quad (2.3)$$

2.1.4.5 Kandungan Tar

Tar merupakan campuran kompleks pada hidrokarbon terkondensasi, dimana kandungan komposisinya tergantung pada bahan baku biomassa yang digunakan. Tar memiliki bentuk tebal, hitam, sangat kental, dan bersifat mudah mengembun pada temperatur rendah sehingga bisa menyebabkan gangguan pada sistem. Senyawa tar memiliki 3 jenis kelompok. Kelompok pertama tidak diketahui, karena memiliki berat molekul sangat tinggi dan tidak dapat dideteksi dengan gas kromatografi. Senyawa tar kelompok kedua termasuk oksigen senyawa terkondensasi yang sangat larut dalam air. Kandungan tar yang terdapat pada *syngas* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Tar\ content = \frac{m_{tar}}{V_{syngas}} \quad (2.4)$$

Dimana m_{tar} merupakan massa tar dalam satuan g dan V_{syngas} merupakan volume dari *syngas* dalam bentuk satuan m^3 .

2.2 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Secara definisi, *computational fluid dynamics* (CFD) adalah ilmu yang mempelajari cara prediksi aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia, dan fenomena lainnya dengan menyelesaikan persamaan matematika. CFD sebenarnya mengganti persamaan - persamaan diferensial parsial dari kontinuitas, momentum, dan energi dengan persamaan - persamaan aljabar (Tuakia 2008). Pada umumnya terdapat tiga tahapan yang harus dilakukan dalam simulasi CFD, yaitu:

2.2.1 Preprocessing

Preprocessing merupakan langkah pertama dalam membangun dan menganalisis sebuah model CFD. Teknisnya adalah membuat model dalam paket CAD (*Computer Aided Design*), membuat *mesh* yang sesuai, kemudian menerapkan kondisi batas dan sifat-sifat fluidanya. *Meshing* adalah proses pemecahan domain menjadi volume yang lebih kecil. Hal ini dilakukan untuk memudahkan diskritisasi domain aliran dan menerapkan persamaan pengendali pada domain aliran. Simulasi didapatkan secara akurat jika pemilihan *meshing* pada sebuah geometri dibuat mengikuti prediksi perubahan pola aliran yang terjadi. Ukuran *meshing* akan mempengaruhi nilai *skewness*, semakin kecil ukuran mesh pada suatu obyek, maka nilai *skewness* yang didapat akan semakin baik dan hasil yang akan didapatkan akan semakin teliti. Dalam proses *meshing* terdapat klasifikasi mesh yang terbagi kedalam tiga jenis, yaitu:

a. Structured mesh

Structured mesh adalah *meshing* terstruktur, dapat dikenali dari konektivitas mesh yang teratur dan rapi. Adapun mesh yang biasa menggunakan structured mesh adalah *Quadrilateral* di 2D dan *Hexahedra* di 3D.

b. Unstructured mesh

Unstructured mesh merupakan mesh yang konektivitas meshnya tidak beraturan. Mesh ini biasanya menggunakan *triangle* pada 2D dan *tetrahedra* pada 3D

c. Hybrid mesh

Struktur mesh yang ketiga adalah *Hybrid mesh* yang merupakan kombinasi dari *Unstructured mesh* dan *Structured mesh*.

Tabel 2. 3 Acuan ukuran *skewness*

0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.95	0.95-0.98	0.98-1.00
<i>Excellent</i>	<i>Very good</i>	<i>Good</i>	<i>AccepTabel</i>	<i>Bad</i>	<i>InaccepTabel</i>

2.2.2 Processing

Processing merupakan proses kedua dari CFD, didalam tahap ini akan dilakukan penentuan kondisi batas (*boundary condition*) dan pemilihan metode inisiasi. Dalam penentuan kondisi batas akan dimasukkan nilai dari parameter-parameter yang dibutuhkan, adapun parameter yang termasuk kondisi batas adalah:

a. Velocity *inlet*

Digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran dan besaran skalar lainnya pada sisi masuk aliran. Kondisi batas ini hanya digunakan untuk aliran inkompresibel.

b. Mass flow *inlet*

Pada kondisi batas ini harus dimasukkan data laju aliran massa atau fluks massa, temperatur fluida (apabila mengaktifkan persamaan energi), tekanan gauge pada sisi masuk, arah aliran, dan besaran turbulensi.

c. Pressure *inlet*

Pada Pressure *inlet* akan dimasukkan data tekanan total (absolute), tekanan gauge, temperatur, arah aliran, dan besaran turbulen.

d. Pressure outlet

Pada Kondisi batas ini dipakai pada sisi keluar fluida dan data tekanan pada sisi keluar diketahui atau minimal dapat diperkirakan mendekati sebenarnya. Pada kondisi batas ini harus dimasukkan nilai tekanan statik, temperatur aliran balik (backflow), dan besaran turbulen aliran balik.

e. Dinding (wall)

Kondisi batas ini digunakan sebagai dinding untuk aliran fluida dalam saluran atau dapat disebut juga sebagai dinding saluran. Kondisi batas ini digunakan juga sebagai pembatas antara daerah fluida (cair dan gas) dan padatan.

f. Symmetry dan axis

Kondisi batas simetri digunakan apabila model geometri kasus yang bersangkutan dan pola aliran pada model tersebut simetri. Kondisi batas ini juga dapat digunakan untuk memodelkan dinding tanpa gesekan pada aliran viskos. Sedangkan kondisi batas axis digunakan sebagai garis tengah (centerline) untuk kasus 2D axisymmetry.

2.2.2 Postprocessing

Postprocessing adalah langkah terakhir dalam analisis CFD. Pada tahap ini diperoleh hasil simulasi berupa data kualitatif kontur atau vektor dan data kuantitatif berupa grafik maupun Tabel data. Pada penelitian ini, analisa dilakukan pada distribusi temperatur dan komposisi *flammable* gas disajikan dalam bentuk kontur dan grafik. Pengamatan akan dilakukan terhadap masing-masing variasi. Data kualitatif berupa kontur diambil pada penampang vertikal (*z-center* reaktor dan *x-center* reaktor) dan penampang horizontal pada setiap bagian reaktor *y* (*drying zone, pyrolysis zone, partial combustion zone, reduction zone*). *Post processing* semakin berkembang dengan majunya *engineering workstation* yang mempunyai kemampuan grafik dan visualisasi cukup besar. Alat yang dapat disediakan FLUENT untuk melakukan visualisasi adalah :

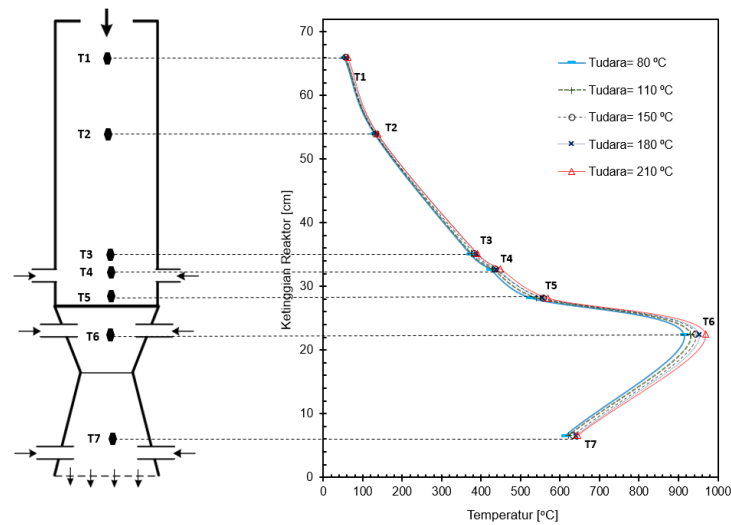
- Domain *geometry* dan *display*
- Plot vektor
- Plot kontur
- Plot 2D *surfaces*

2.3 Penelitian Terdahulu

2.3.1 Penelitian yang dilakukan Depi Rustam, 2019 : Studi Eksperimental Dan Numerik Pengaruh Temperatur Udara *Inlet* Proses Gasifikasi Pelet MSW Terhadap Performansi Multi-Stage Downdraft Gasifier

Hasil eksperimen yang dibahas pada penelitian ini adalah kondisi operasi dan parameter performansi proses gasifikasi. Kondisi operasi proses gasifikasi adalah distribusi temperatur

sepanjang *gasifier*. Parameter performansi ditunjukkan dengan komposisi *combustible gas* (CO, H₂, dan CH₄), LHV *syngas*, *cold gas efficiency*, dan kandungan tar dalam *syngas*. Distribusi temperatur sepanjang *gasifier* disajikan pada Gambar 2.4. Temperatur *gasifier* mengalami peningkatan ketika temperatur udara (*gasifying agent*) dipanaskan. Kenaikan temperatur tertinggi terjadi pada titik termokopel T6 yang terletak pada zona oksidasi. Kenaikan temperatur pada T6 pada saat temperatur udara dinaikan hingga 210 °C, adalah sebesar 55 °C. Disamping itu, kenaikan temperatur *gasifier* juga terjadi pada titik termokopel T3, T4, T5, dan T7. Ketika temperatur udara dipanaskan hingga 210 °C, kenaikan temperatur pada titik termokopel T3, T4, T5, dan T7 adalah sebesar 19, 26, 45, dan 49 °C secara berurutan. Sedangkan pada titik termokopel T1 dan T2 kenaikan temperatur *gasifier* akibat pemanasan udara tidak signifikan. Hal tersebut disebabkan titik termokopel T1 dan T2 terletak jauh dari sumber panas (zona oksidasi) dan juga tidak ada udara masuk pada zona ini.



Gambar 2. 6 Distribusi temperatur sepanjang *gasifier*

Gambar 2.4 juga menunjukkan bahwa perkiraan seluruh titik termokopel diletakan sudah sesuai. Hal itu ditunjukkan dengan interval temperatur yang terukur berada pada interval temperatur masing-masing zona sesuai dengan penelitian Molino, 2015. Akan tetapi, dari hasil eksperimen ini tidak dapat memberikan pernyataan tentang interval ketinggian reaktor untuk setiap zona. Hal tersebut akan dijelaskan dengan hasil simulasi numerik.

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah didapatkan temperatur oksidasi tertinggi sebesar 969 °C pada temperatur udara 210 °C. Komposisi syn-gas (CO, H₂, dan CH₄) pada peningkatan temperatur 80-210 °C meningkat dari 21,4%, 9,99%, dan 1,775% menjadi 22,79%, 10,28%, dan 1,78%. Kemudian meningkatkan LHV laju produksi *syngas* masing-masing sebesar 0,2 MJ/m³ dan 5,92 L/min. *Cold gas efficiency* meningkat sebesar 4,75 % (dari 69,43 % menjadi 74,19 %), dan efisiensi sistem meningkat sebesar 3,05%. Kadar tar terendah sebesar 34,39 mg/Nm³.

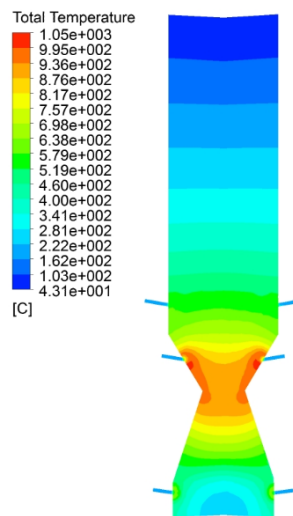
Simulasi numerik dilakukan untuk mengetahui distribusi temperatur dan komposisi *combustible gas* secara detail, yang tidak terukur pada proses eksperimen. Simulasi numerik pada penelitian menggunakan perangkat lunak *ANSYS Fluent*. Terdapat dua jenis hasil simulasi numerik pada penelitian ini, yaitu hasil kualitatif berupa kontur dan hasil kuantitatif berupa grafik/kurva.

Salah satu parameter output dari proses gasifikasi adalah distribusi temperatur sepanjang reaktor (zona *drying*, zona pirolisis, zona oksidasi parsial, dan zona reduksi). Distribusi temperatur sepanjang reaktor ditampilkan untuk mengetahui pengaruh temperatur

pemanasan udara yang divariasikan dalam lima variasi yaitu 80°C, 110 °C, 150 °C, 180 °C, dan 210 °C . Pada hasil eksperimen, distribusi temperatur hanya ditampilkan pada titik pengukuran termokopel dan distribusinya hanya distribusi pada ketinggian reaktor (pada sumbu Y). Sedangkan pada hasil numerik, distribusi temperatur dapat ditampilkan pada koordinat X, Y, dan Z secara kualitatif dan kuantitatif. Hasil dari simulasi numerik ditampilkan pada Gambar 2.5 dan Gambar 2.6.

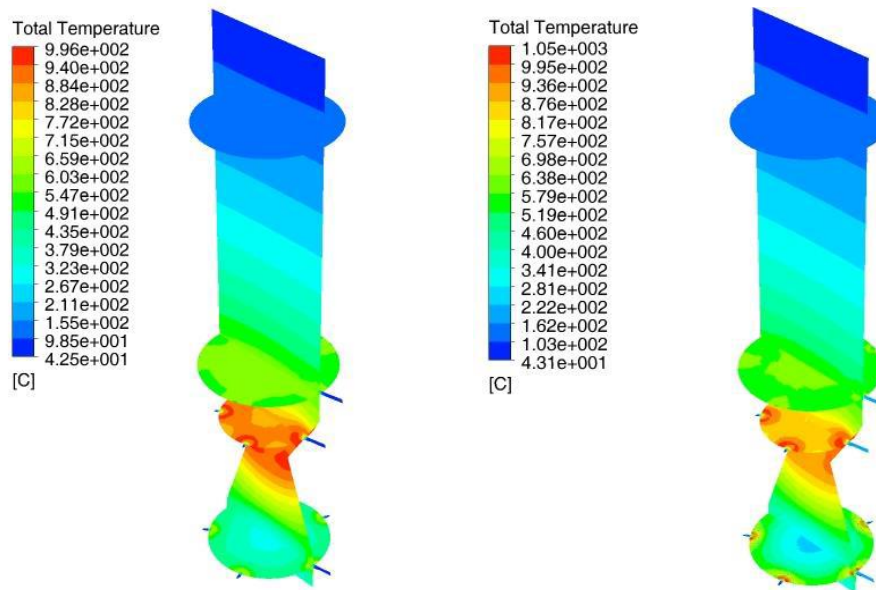
Gambar 2.5 menunjukkan sedikit peningkatan temperatur di zona *drying* seiring dengan bertambahnya temperatur *inlet* dari 80-210°C. Selanjutnya peningkatan temperatur pada variasi temperatur udara dari 80-200 °C sebesar 41°C. Seiring dengan semakin besar jarak dari zona oksidasi parsial dikarenakan penambahan variasi temperatur udara, menyebabkan perpindahan panas dari zona oksidasi parsial ke zona pirolisis lebih besar sehingga peningkatan semakin besar. Peningkatan temperatur zona oksidasi parsial pada T6 dengan variasi temperatur udara dari 80-200 °C sebesar 98 °C, peningkatan temperatur zona oksidasi parsial ini lebih signifikan dibandingkan dengan zona pirolisis. Zona reduksi, temperaturnya meningkat sebesar 39°C pada T7 berdasarkan penambahan temperatur udara *inlet* zona oksidasi parsial yang ditingkatkan dari 80 °C sampai 210 °C.

Gambar 2.5 juga merupakan validasi dari hasil numerik yang dilakukan, yaitu dengan membandingkannya dengan hasil eksperimen. Hasil simulasi numerik yang ditampilkan pada Gambar 2.5 merupakan nilai temperatur pada garis sejajar sumbu Y pada titik termokopel diletakan. Perbedaan kecil ditemukan pada metode numerik yang disebabkan model numerik dianggap *steady* dan tidak menggunakan *multiphase* sehingga hasil yang didapatkan lebih ideal. Dan juga pada metode eksperimen, dimungkinkan terjadinya *losses* sehingga terjadi perbedaan dengan metode numerik.



Gambar 2. 7 Kontur distribusi temperatur gasifier

Kemudian pada Gambar 2.6 (a) dan (b) diperlihatkan tampilan isometrik kontur temperatur. Secara kualitatif dapat dilihat temperatur tertinggi berada di dekat masukan udara. Hal tersebut dikarenakan daerah di dekat suplai udara merupakan daerah terjadinya reaksi-reaksi oksidasi yang bersifat eksotermik. Disamping itu, perbandingan kontur pada saat udara dipanaskan dari 80-210 °C menjadikan distribusi temperatur meningkat pada daerah didekat suplai udara. Sehingga berdampak pada peningkatan distribusi temperatur seluruh gasifier.



Gambar 2. 8 Kontur temperatur pada tampilan isometrik (a) Tudara =80 °C, (b) Tudara =210 °C.

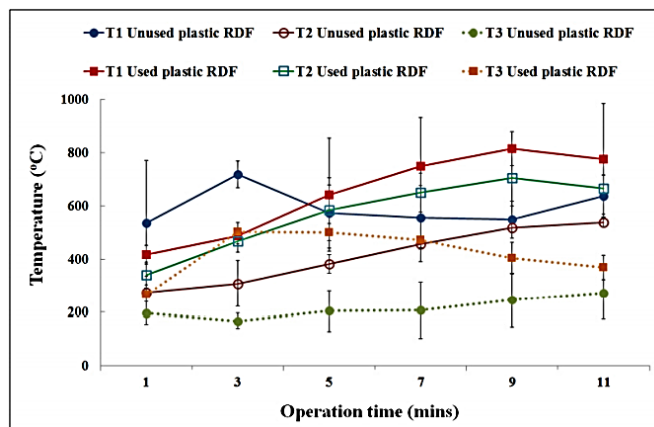
2.3.2 Penelitian yang dilakukan Kunkajit, 2015 : Pengaruh Sampah Plastik dalam RDF pada Gasifikasi Tipe *Downdraft*

Kunkajit (2015) melakukan eksperimen dengan membandingkan 2 bahan baku yaitu RDF sampah plastik terpakai dan RDF sampah plastik tidak terpakai, dimana kedua bahan tersebut dibuat briket berbentuk silinder dengan diameter 50 mm dan tinggi 60-70 mm. Komposisi *syngas* RDF sampah plastik terpakai dan tidak terpakai dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 4 Komposisi *syngas* RDF sampah plastik terpakai dan tidak terpakai

Gas composition (%Vol)	Unused-plastic-waste RDF	Used-plastic-waste RDF
CO ₂	9.23±2.38	7.63±2.52
O ₂	5.67±2.24	6.89±4.39
H ₂ S	0.16±0.04	0.21±0.09
CO	6.75±1.45	4.32±2.49
HC	0.46±0.18	0.21±0.12

Selama proses gasifikasi menggunakan ER 0.38 dan kecepatan udara 3.25 m/s, menggunakan *gasifier downdraft* dengan ukuran tinggi maksimum 80 cm dan diameter 12 cm. Tiga termokopel yang dipasang pada reaktor yaitu T1 di zona pembakaran, T2 Reduksi dan T3 pipa dekat dinding keluarannya. Pengukuran temperatur serta pengambilan sampel *syngas* dilakukan pada interval 2 menit dan setiap percobaan dilakukan selama 15 sampai 20 menit. Tujuan penelitian ini yaitu untuk mengetahui komposisi *syngas* dari RDF sampah plastik terpakai dan tidak terpakai.

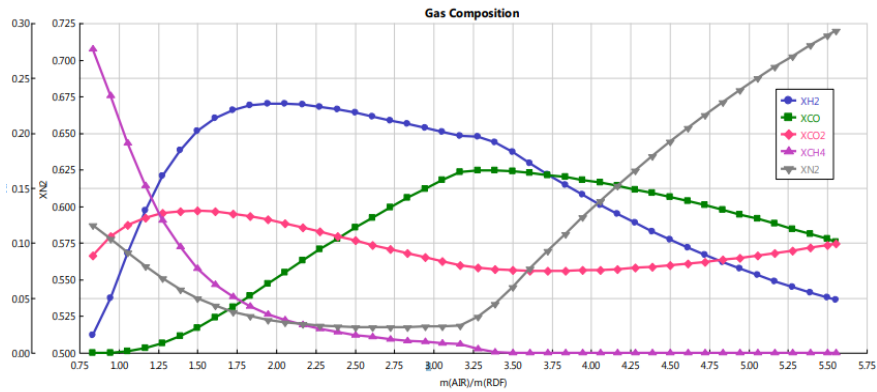


Gambar 2. 9 Temperatur sebagai fungsi waktu operasi RDF sampah plastik terpakai dan tidak terpakai

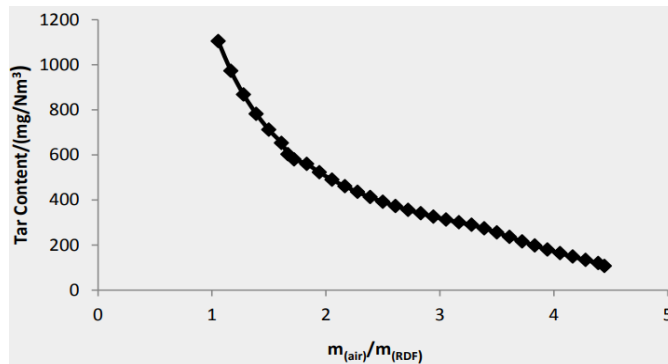
Gambar 2.7 menunjukkan temperatur pada proses gasifikasi dengan menggunakan RDF sampah plastik terpakai lebih maksimal dibandingkan dengan temperatur RDF sampah plastik tidak terpakai, dimana waktu operasi 9 menit merupakan puncak temperatur tertinggi dari termokopel T1 RDF sampah plastik terpakai sekitar 800°C dan dimana waktu operasi 3 menit merupakan puncak temperatur tertinggi termokopel T1 RDF sampah plastik tidak terpakai sekitar 700°C. Selain itu T2 dan T3 RDF sampah plastik terpakai juga terus mengalami peningkatan sampai pada waktu operasi 9 menit, sedangkan T2 dan T3 RDF sampah plastik tidak terpakai tidak mengalami kenaikan yang signifikan dan bahkan mengalami penurunan sering dengan bertambahnya waktu operasi. Tabel 2.3 diatas menunjukkan hasil komposisi gas yang dihasilkan selama proses gasifikasi, dapat disimpulkan bahwa RDF sampah plastik terpakai dan tidak terpakai dapat menghasilkan sifat dan jumlah *syngas* yang sama. Namun untuk nilai kalor *syngas* yang dihasilkan RDF sampah plastik terpakai sebesar 781 kJ/Nm³ lebih tinggi dibandingkan dengan *syngas* yang dihasilkan oleh RDF sampah plasti tidak terpakai sebesar 500 kJ/Nm³.

Haydary (2016) melakukan penelitian menggunakan bahan RDF dengan menggunakan *gasifying agent* udara, oksigen dan campuran oksigen dengan uap air. Proses gasifikasi dilakukan dengan memvariasikan laju aliran massa *agent* (udara, oksigen dan campran udara dengan uap air) dengan bahan bakar (RDF). Model kesetimbangan digabungkan dengan beberapa korelasi empiris yang berdasarkan percobaan laboratorium untuk mengetahui kinerja dari proses gasifikasi, dimana model diselesaikan dengan *Microsoft Exel* dan di implementasikan dengan menggunakan *Aspen Plus*. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui performansi gasifikasi menggunakan beberapa *agent* dengan menerapkan laju aliran massa *agent* dengan bahan bakar.

Gasifikasi menggunakan masukan udara dapat ditunjukkan pada Gambar 2.8 komposisi gas dengan kandungan H₂ menunjukkan paling maksimum dengan menggunakan $m_{(Air)}/m_{(RDF)} = 2.00$ dan kandungan CO $m_{(Air)}/m_{(RDF)} = 3.25$, sedangkan kandungan CH₄ mulai hampir habis ketika menggunakan $m_{(Air)}/m_{(RDF)} = 3.25$. dimana proses konversi 100% RDF dengan udara dicapai dengan menggunakan $m_{(air)}/m_{(RDF)} = 3.20$. Namun nilai kalor gas yang diperoleh hanya sebesar 4.4 MJ/Nm³ dan gas yang dihasilkan mengandung 19 mol.% H₂; 16.5 mol.% CO; 7.6 mol.% CO₂. Gambar 2.13 merupakan hasil kandungan tar yang dihasilkan oleh gas, tar terus mengalami penurunan dengan meningkatnya perbandingan massa udara dengan RDF, dimana $m_{(Air)}/m_{(RDF)} = 3.20$ kandungan tar adalah 280 mg/Nm³.

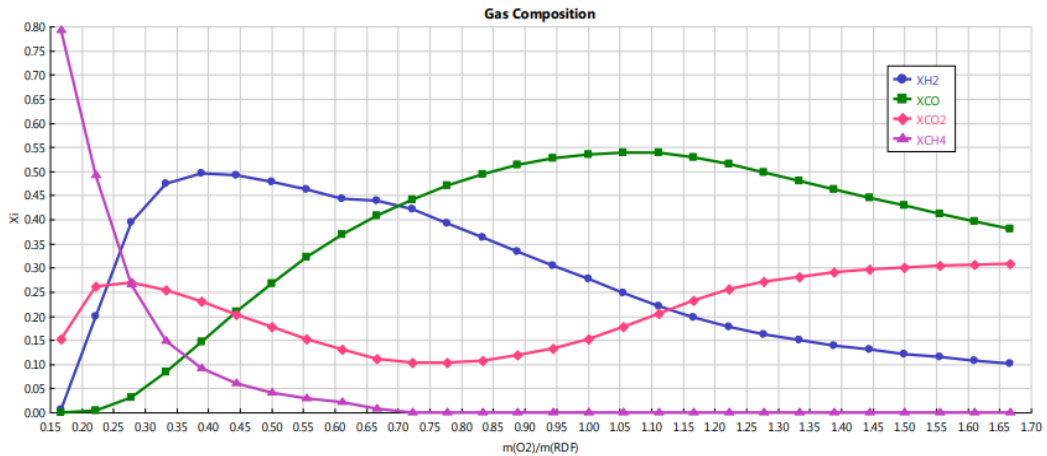


Gambar 2. 10 Komposisi gas dengan nilai $m_{(Air)}/m_{(RDF)}$ berbeda menggunakan udara sebagai agen gasifikasi

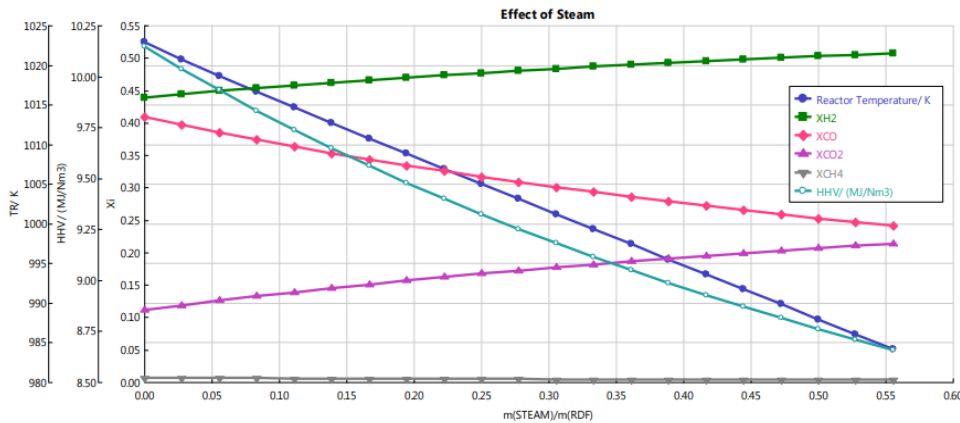


Gambar 2. 11 Kandungan tar dengan nilai $m_{(Air)}/m_{(RDF)}$ berbeda menggunakan udara sebagai agen gasifikasi

Proses gasifikasi dengan menggunakan oksigen ditunjukkan pada Gambar 2.10 dimana kandungan H_2 paling maksimum dengan menggunakan $m_{(O_2)}/m_{(RDF)} = 0.38$ sebesar 50 mol.%, dan kandungan CO paling maksimum dengan menggunakan $m_{(O_2)}/m_{(RDF)} = 1.05$ sebesar 55 mol.%, sedangkan kandungan CH_4 hampir habis ketika mulai mendekati $m_{(O_2)}/m_{(RDF)} = 3.67$. Sedangkan proses gasifikasi dengan menggunakan campuran oksigen dengan uap air ditunjukkan dengan Gambar 2.15 diketahui dengan meningkatnya perbandingan massa uap terhadap RDF dari 0 menjadi 0.55, kandungan H_2 meningkat dari 44 mol.% menjadi 51 mol.% dan kandungan CO_2 meningkat dari 10 mol.% sampai 22 mol.%. Akan tetapi untuk kandungan CO menurun dari 41 mol.% menjadi 23 mol.%.



Gambar 2. 12 Komposisi gas dengan nilai $m_{(Air)}/m_{(RDF)}$ berbeda menggunakan oksigen sebagai agen gasifikasi

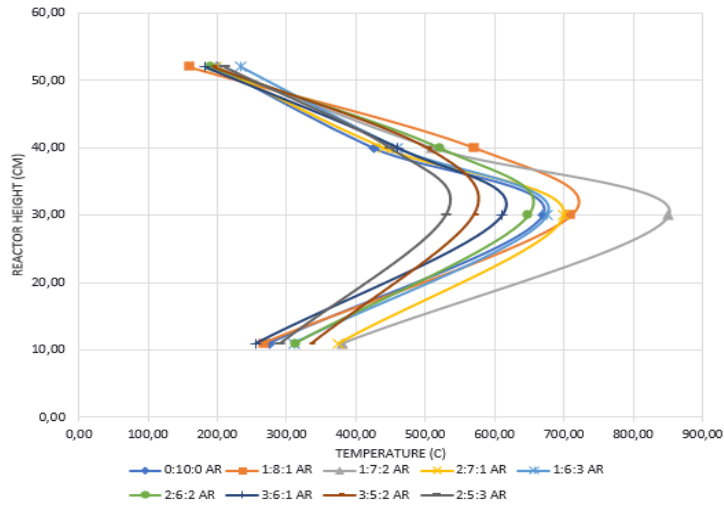


Gambar 2. 13 Komposisi gas dengan nilai $m_{(Air)}/m_{(RDF)}$ berbeda menggunakan campuran oksigen dengan uap air sebagai agen gasifikasi

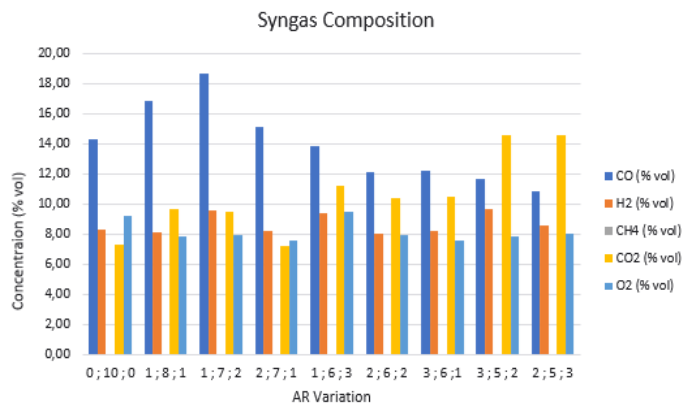
Arifin (2020) melakukan eksperimen menggunakan bahan baku RDF yang diperoleh dari sampah kota serta RDF di rubah bentuknya menjadi briket, proses gasifikasi *gasifier downdraft* dengan pemasukan udara tiga tingkat yaitu zona pirolisis oksidasi dan reduksi. Variasi *air ratio* (AR) yang digunakan selama proses gasifikasi yaitu 0:10:0, 1:8:1, 2:7:1, 1:7:2, 1:6:3, 2:6:2, 3:6:1, 2:5:3, dan 3:5:2 selain itu AFR yang digunakan selama proses gasifikasi yaitu 4.5. Tujuan penelitian yang dilakukan yaitu untuk mengoptimasi performa gasifikasi serta mengetahui kandungan tar yang dihasilkan dengan menggunakan masukan udara tiga tingkat (zona pirolisis, oksidasi dan reduksi).

Hasil proses gasifikasi yang dilakukan menunjukkan distribusi temperatur ditunjukkan oleh Gambar 2.16 sepanjang reaktor yaitu: zona pengeringan 52 cm, pirolisis 40 cm, oksidasi 30 cm dan reduksi 11 cm. Dimana zona pengeringan memiliki interval temperatur antara 160°C sampai 234.75°C dan temperatur tertinggi diperoleh dengan menggunakan variasi 1:6:3. Zona pirolisis memiliki temperatur interval antara 425°C sampai 270°C dan temperatur tertinggi diperoleh dengan menggunakan variasi 1:8:1. Zona oksidasi memiliki temperatur tertinggi dibandingkan dengan zona yang lainnya, dimana interval temperatur antara 530°C sampai 850.25°C dan temperatur tertinggi diperoleh dengan menggunakan variasi 1:7:2. Zona reduksi memiliki temperatur interval antara 254°C sampai 380°C dan temperatur tertinggi diperoleh dengan menggunakan variasi 1:7:2. Komposisi gas yang dihasilkan ditunjukkan

pada Gambar 2.17, dimana kandungan CO meningkat seiring dengan menggunakan perbandingan AR pada zona oksidasi yang lebih tinggi dan kandungan CO tertinggi diperoleh dengan menggunakan variasi 1:7:2 sebesar 18.50 vol.% sedangkan komposisi CO₂ meningkat dengan mengurangi nilai perbandingan AR pada zona oksidasi dan kandungan CO₂ tertinggi dengan menggunakan variasi 3:5:2 dan 2:5:3 sebesar 14.50 vol.%. sedangkan kandungan H₂ tidak mengalami perubahan yang signifikan dengan menerapkan variasi yang digunakan.

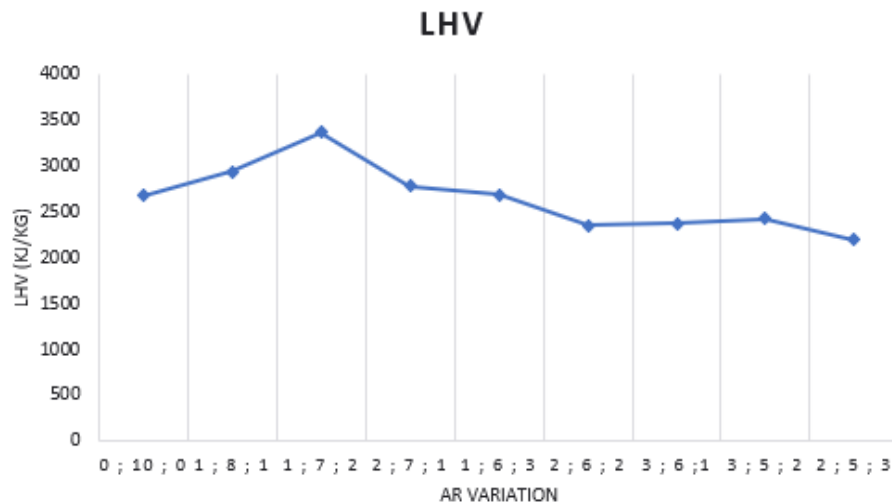


Gambar 2. 14 Distribusi temperatur

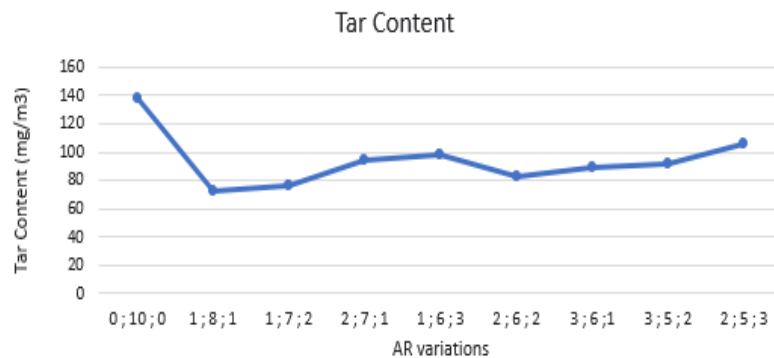


Gambar 2. 15 Komposisi syngas terhadap variasi AR

Lower heating value (LHV) dipengaruhi oleh komposisi syngas yang dihasilkan, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.20 dimana LHV mulai terjadi peningkatan dengan menggunakan variasi AR 0:10:0 dan titik puncaknya tercapai pada variasi AR 1:7:2 sebesar 3365.08 KJ/kg, kemudian LHV terus mengalami penurunan sampai variasi terakhir dan LHV terendah pada variasi AR 2:5:3 sebesar 2187.73 KJ/kg. Kandungan tar tertinggi diperoleh dengan menggunakan variasi AR 0:10:0 sebesar 154.01 mg/Nm³, sedangkan kandungan tar terendah diperoleh dengan menggunakan variasi AR 1:8:1 sebesar 80.24 mg/Nm³ seperti ditunjukkan pada Gambar 2.19. Jadi semakin rendah kandungan tar yang diperoleh, maka semakin optimal menggunakan variasi yang digunakan.



Gambar 2. 16 LHV syngas terhadap variasi AR



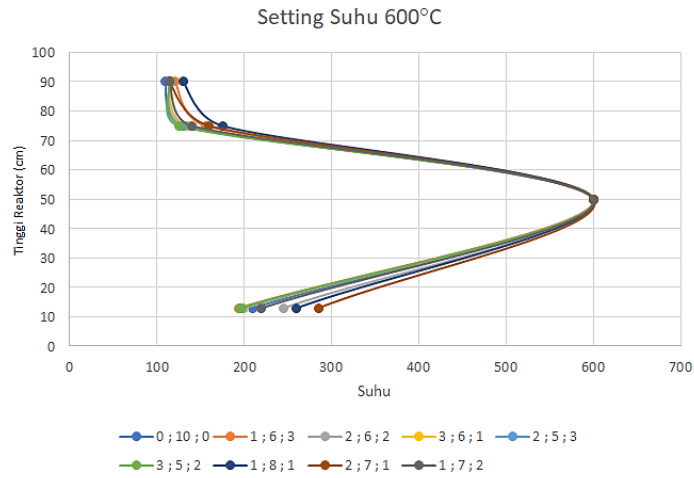
Gambar 2. 17 Kandungan tar terhadap variasi AR

2.3.3 Penelitian yang dilakukan Harsono, 2021 : Studi Eksperimental Pengaruh Masukan Udara Tiga Tingkat Dengan Variasi Temperatur Menggunakan Sistem Kontrol Temperatur Terhadap Performansi Gasifikasi *Refuse Derived Fuel* (RDF)

Eksperimen menggunakan bahan baku RDF yang diperoleh dari sampah kota serta RDF di rubah bentuknya menjadi briket. Proses gasifikasi yang dilakukan dengan mengontrol temperatur pada zona oksidasi, sehingga dapat merubah kecepatan putaran *intake blower* yang digunakan selama proses gasifikasi. Distribusi temperatur yang dihasilkan juga mengikuti sesuai setting temperatur yang digunakan, dimana setting temperatur yang dilakukan pada zona oksidasi yaitu (600°C, 700°C, 800°C, 900°C, 1000°C). Selain itu penggunaan 9 variasi *air ratio* (0:10:0, 1:8:1, 2:7:1, 1:7:2, 1:6:3, 2:6:2, 3:6:1, 2:5:3, dan 3:5:2) juga dilakukan selama proses gasifikasi.

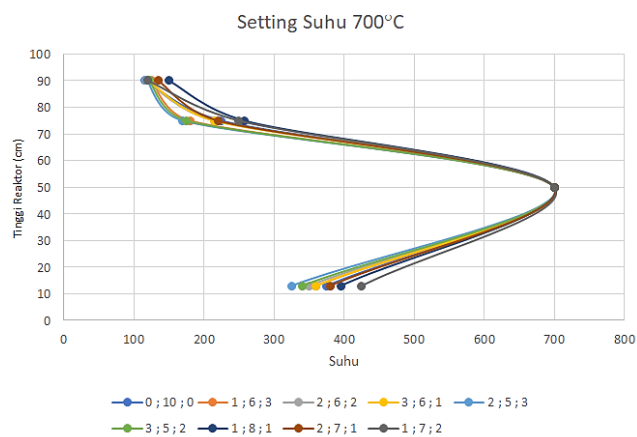
Distribusi temperatur dengan menggunakan setting temperatur 600°C dengan menggunakan 9 variasi AR. Zona *drying* temperaturnya menunjukkan interval 110°C-130°C, temperatur *drying* paling rendah dengan menggunakan variasi AR 0:10:0 dan tertinggi variasi AR 1:8:1. Zona *drying* merupakan zona yang temperaturnya paling rendah, karena zona *drying* merupakan zona proses pengurangan kadar air pada biomassa dan letaknya paling jauh dengan zona oksidasi. Zona pirolisis menunjukkan interval temperaturnya 125°C-175°C, temperatur tertinggi dengan menggunakan variasi AR 1:8:1 dan paling rendah menggunakan AR 3:5:2. Zona oksidasi temperatur yang dihasilkan menunjukkan bahwa 600°C untuk semua variasi AR yang digunakan, hal tersebut terjadi akibat penggunaan setting temperatur yang digunakan. Zona reduksi menunjukkan temperatur yang dihasilkan intervalnya 194°C-285°C,

temperatur tertinggi dengan menggunakan variasi AR 2:7:1 dan paling rendah menggunakan variasi AR 1:6:3, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2. 18 Distribusi setting temperatur 600°C

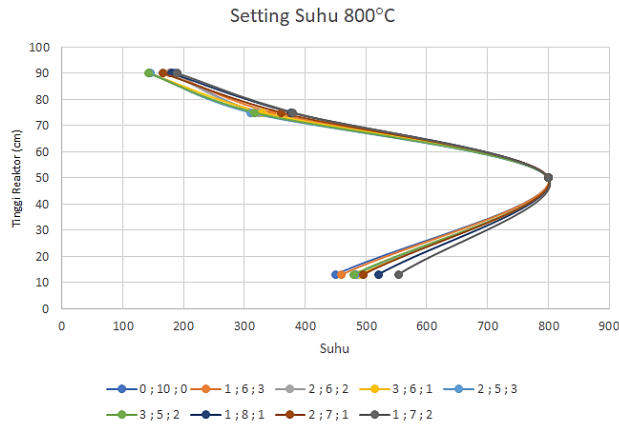
Distribusi temperatur dengan menggunakan setting temperatur 700°C dengan menggunakan 9 variasi AR ditunjukkan pada Gambar 4.2. Zona *drying* temperaturnya menunjukkan interval sebesar 117°C-130°C, temperatur tertinggi menggunakan variasi AR 1:8:1 dan paling rendah dengan menggunakan AR 0:10:0. Zona pirolisis menunjukkan interval temperaturnya sebesar 170°C-253°C, temperatur tertinggi dengan menggunakan variasi AR 1:8:1 dan paling rendah menggunakan AR 2:5:3. Zona oksidasi temperatur yang dihasilkan menunjukkan bahwa 700°C untuk semua variasi AR yang digunakan, hal tersebut terjadi akibat penggunaan setting temperatur yang digunakan. Zona reduksi menunjukkan temperatur yang dihasilkan intervalnya sebesar 352°C-359°C, temperatur tertinggi dengan menggunakan variasi AR 1:8:1 dan paling rendah menggunakan variasi AR 2:5:3, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.18.



Gambar 2. 19 Distribusi setting temperatur 700°C

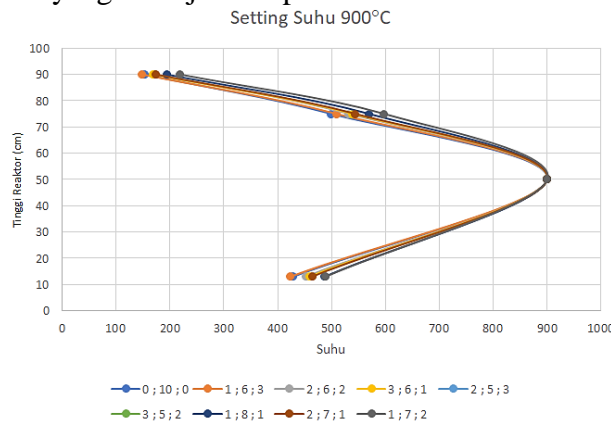
Distribusi temperatur dengan menggunakan setting temperatur 800°C dengan menggunakan 9 variasi AR ditunjukkan pada Gambar 4.3. Zona *drying* temperaturnya menunjukkan interval sebesar 142°C-190°C, temperatur tertinggi menggunakan variasi AR 1:7:2 dan paling rendah dengan menggunakan AR 3:5:2. Zona pirolisis menunjukkan interval

temperaturnya sebesar 310°C-380°C, temperatur tertinggi dengan menggunakan variasi AR 1:7:2 dan paling rendah menggunakan AR 2:5:3. Zona oksidasi temperatur yang dihasilkan menunjukkan bahwa 800°C untuk semua variasi AR yang digunakan, hal tersebut terjadi akibat penggunaan setting temperatur yang digunakan. Zona reduksi menunjukkan temperatur yang dihasilkan intervalnya sebesar 450°C-553°C, temperatur tertinggi dengan menggunakan variasi AR 1:7:2 dan paling rendah menggunakan variasi AR 0:10:0, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.19.



Gambar 2. 20 Distribusi setting temperatur 800°C

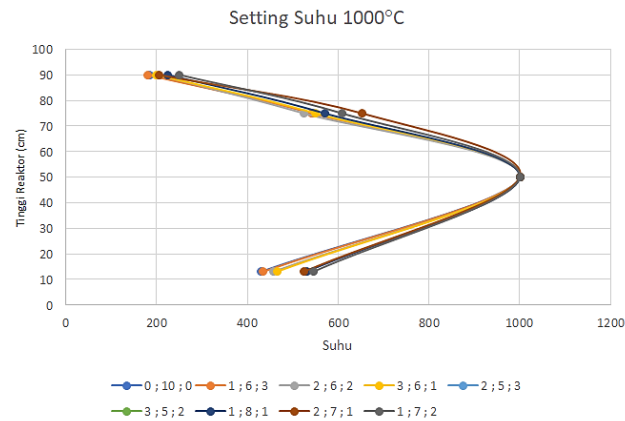
Distribusi temperatur dengan menggunakan setting temperatur 900°C dengan menggunakan 9 variasi AR ditunjukkan pada Gambar 4.4. Zona *drying* temperaturnya menunjukkan interval sebesar 150°C-220°C, temperatur tertinggi menggunakan variasi AR 1:7:2 dan paling rendah dengan menggunakan AR 1:6:3. Zona pirolisis menunjukkan interval temperaturnya sebesar 500°C-598°C, temperatur tertinggi dengan menggunakan variasi AR 1:7:2 dan paling rendah menggunakan AR 0:10:0. Zona oksidasi temperatur yang dihasilkan menunjukkan bahwa 900°C, hal tersebut terjadi akibat penggunaan setting temperatur yang digunakan, namun terdapat variasi AR 2:5:3 dan 3:5:2 yang temperaturnya tidak tercapai. Zona reduksi menunjukkan temperatur yang dihasilkan intervalnya sebesar 425°C-490°C, temperatur tertinggi dengan menggunakan variasi AR 1:7:2 dan paling rendah menggunakan variasi AR 1:6:3, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.19.



Gambar 2. 21 Distribusi setting temperatur 900°C

Distribusi temperatur dengan menggunakan setting temperatur 1000°C dengan menggunakan 9 variasi AR ditunjukkan pada Gambar 4.5. Zona *drying* temperaturnya

menunjukkan interval sebesar 180°C-250°C, temperatur tertinggi menggunakan variasi AR 1:7:2 dan paling rendah dengan menggunakan AR 1:6:3. Zona pirolisis menunjukkan interval temperaturnya sebesar 524°C-652°C, temperatur tertinggi dengan menggunakan variasi AR 2:7:1 dan paling rendah menggunakan AR 2:6:2. Zona oksidasi temperatur yang dihasilkan menunjukkan bahwa 1000°C, hal tersebut terjadi akibat penggunaan setting temperatur yang digunakan, namun terdapat variasi AR 2:5:3 dan 3:5:2 yang temperaturnya tidak tercapai. Zona reduksi menunjukkan temperatur yang dihasilkan intervalnya sebesar 430°C-545°C, temperatur tertinggi dengan menggunakan variasi AR 1:7:2 dan paling rendah menggunakan variasi AR 0:10:0, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.20.



Gambar 2. 22 Distribusi setting temperatur 1000°C

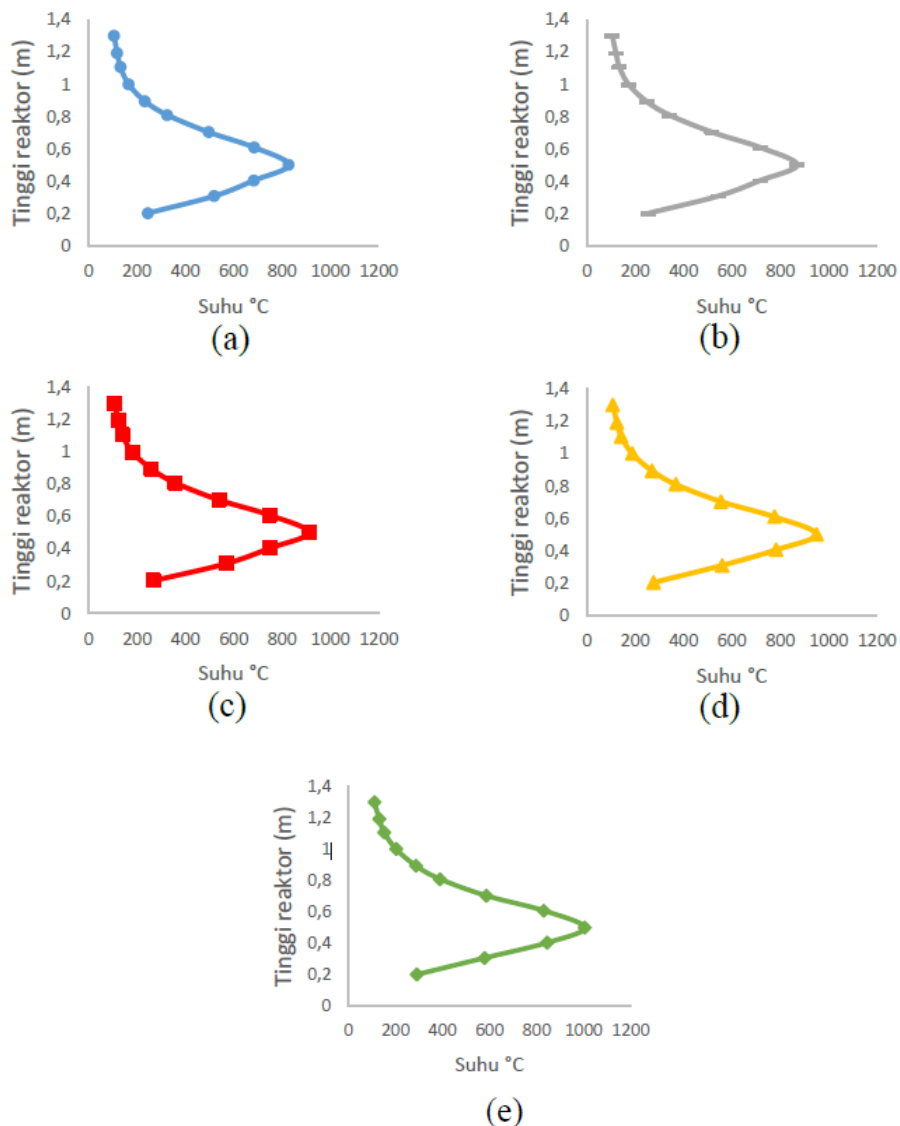
2.3.4 Penelitian yang dilakukan Dhesa Hidaytulloh, 2018 : Studi Numerik Pengaruh Variasi Suhu Udara *Inlet* Zona Oksidasi Pada Proses Gasifikasi Pelet *Municipal Solid Waste* Terhadap Karakteristik Reaktor Tipe *Downdraft*

Karakteristik proses gasifikasi pada suatu penelitian, salah satunya didapatkan melalui variasi suhu udara pada *inlet* zona oksidasi. Dilakukan lima variasi suhu udara *inlet* dengan metode numerik pada penelitian ini, yaitu: 80 °C, 110 °C, 150 °C, 180 °C, dan 200 °C. Penelitian gasifikasi ini menggunakan sistem kontinyu sebagai *input* bahan bakar biomassa dalam bentuk *coal* dikarenakan pada *Software FLUENT* sebagai perangkat utama penelitian ini tidak dapat mengidentifikasi rumus kimia dari partikel MSW, sehingga menggunakan sistem kontinyu sebagai *input* bahan bakar biomassa dalam bentuk *coal*. Melalui data uji *proximate* dan *ultimate*, diatur komposisi tiap unsur (C, H, O, N, S) serta kandungan *moisture*, *ash*, *fix carbon*, *volatile*, sehingga partikel *coal* sebagai input data pengujian secara eksperimen dapat di asumsikan sebagai partikel MSW.

Pada simulasi gasifikasi dengan reaktor tipe *downdraft* ini digunakan model *species transport* dengan *discrete phase model*. Model *species transport* digunakan karena sesuai untuk jenis pembakaran yang sangat bergantung kepada reaksi kimia stoikiometri. melalui permodelan ini, biomassa akan mengalami proses devolatilisasi sehingga terurai menjadi beberapa senyawa gas, yang nantinya akan bereaksi menghasilkan *flammable gas*. Udara yang masuk dikondisikan panas, sehingga lebih reaktif dan bereaksi lebih cepat, menghasilkan peningkatan suhu pada reaktor.

Salah satu parameter output dari proses gasifikasi adalah distribusi suhu sepanjang reaktor (zona *drying*, zona pirolisis, zona oksidasi parsial, dan zona reduksi). Distribusi suhu sepanjang reaktor ditampilkan untuk mengetahui pengaruh suhu pemanasan udara yang divariasikan dalam lima variasi yaitu 80°C, 110 °C, 150 °C, 180 °C, dan 200 °C .

Berdasarkan Gambar 2.21 (a)-(e), dapat diketahui bahwa suhu di dalam reaktor untuk masing – masing skenario cenderung memiliki pola yang seragam. Gambar 4.1 (a) menunjukkan distribusi suhu pada variasi suhu udara *inlet* 80°C. Pada ketinggian 101 cm dari dasar reaktor, suhu terukur sebesar 150°C, menunjukkan bahwa ketinggian tersebut berada pada batas antara zona drying dengan zona pirolisis (Timo, 2011). Penambahan suhu udara pada 110 °C, 150 °C, 180 °C, dan 200 °C, mengakibatkan pergeseran batas zona *drying* pada ketinggian ±110 cm berada suhu 150 °C. Sehingga batas antara zona *drying* dan zona pirolisis dengan penambahan suhu udara *inlet* 80°C -200°C yaitu pada ketinggian 104 cm hingga 110 cm. Pada zona *drying* kadar air dalam bahan bakar dievaporasi menjadi uap (steam). Semakin mendekati suhu 150 °C, maka proses *drying* akan semakin baik.



Gambar 2. 23 Grafik Distribusi Rata-Rata Suhu pada Lima Variasi Suhu Udara *Inlet* (a) 80°C, (b) 110 °C, (c) 150 °C, (d) 180 °C, (e) 200 °C

Parameter output dari proses gasifikasi selain distribusi suhu sepanjang *gasifier* adalah komposisi *flammable syngas* yang dihasilkan. *flammable syngas* terdiri dari CO, H₂, dan CH₄ karena memiliki nilai kalor. Sedangkan CO₂, N₂, dan O₂ merupakan *non flammable syngas*, karena tidak memiliki nilai kalor. Data persentase gas hasil simulasi direpresentasikan

berdasarkan satuan atas % mol. Berdasarkan asumsi bahwa seluruh gas dalam kondisi gas ideal, maka % mol gas dapat juga dinyatakan sebagai persentase volumetrik untuk menghitung nilai kalor gas. Nilai persentase volumetrik diambil menggunakan menu *Report-Surface integral-Area weighted average* pada posisi lubang outlet *syngas*. Menu *Area Weighted Average* digunakan untuk mengambil nilai rata-rata persentase volumetrik *syngas* reaktor.

Berdasarkan Gambar 2.22 Komposisi *flammable syngas* yang dihasilkan dengan metode numerik rata-rata mengalami kenaikan. Pada senyawa CO didapatkan kenaikan sebanyak 1,01% dari suhu udara *inlet* 80 oC hingga 200 oC. Begitu pula senyawa H₂ dan CH₄ didapatkan kenaikan sebanyak 1,26% dan 0,24%. Hal ini membuktikan jika suhu udara *inlet* dinaikan, akan meningkatkan kualitas *syngas* dengan naiknya komposisi *flammable syngas* yaitu CO, H₂, dan CH₄. Komposisi *non-flammable syngas* terbesar yaitu N₂, dikarenakan *gasifying agent* yang digunakan adalah udara bebas yang mengandung senyawa O₂ dan N₂. Nilai pada senyawa CO₂ dan O₂ cenderung kecil dan mengalami penurunan dari suhu udara *inlet* 80 oC hingga 200 oC. Dapat diindikasikan bahwa kecilnya nilai senyawa CO₂ tereduksi dengan *Boudouard reaction* dan reaksi *reversible R8* di zona reduksi dan semakin cepat reaksinya seiring ditambahkan suhu udara *inlet*. Senyawa O₂ terlihat kecil, menunjukkan bahwa proses gasifikasi bekerja dengan optimal. Penurunan komposisi O₂ pada *syngas* sebagai pengaruh bertambahnya suhu udara *inlet* zona oksidasi menunjukkan bahwa kenaikan temperatur udara menjadikan O₂ lebih reaktif.

Suhu udara (°C)	Metode numerik			Metode eksperimen					
	CO (% vol)	H ₂ (% vol)	CH ₄ (% vol)	CO (% vol)	H ₂ (% vol)	CH ₄ (% vol)	Δ CO (%)	Δ H ₂ (%)	Δ CH ₄ (%)
80	21,64	9,24	2,86	20,03	7,79	2,39	1,61	1,45	0,47
110	21,80	9,45	2,90	20,11	7,86	2,39	1,69	1,59	0,51
150	22,12	9,87	2,98	20,78	7,98	2,41	1,34	1,89	0,57
80	22,43	10,28	3,05	21,38	8,49	2,42	1,05	1,79	0,63
200	22,65	10,50	3,10	21,99	8,87	2,44	0,66	1,63	0,66

Gambar 2. 24 Perbandingan Komposisi *Flammable Syngas* antara Metode Numerik dengan Eksperimen

Jika dibandingkan dengan Gambar 4. 1 Distribusi temperatur dengan model reaksi *finite rate* dan Gambar 2. 25 Perbandingan Komposisi *flammable gas* volumetrik dari *Flammable Syngas* antara Metode Numerik dengan Eksperimen, nilai yang lebih ideal karena menggunakan model *steady* dengan asumsi tidak menggunakan *multiphase*. Selain itu juga, dikarenakan nilai adalah input pada uji *ultimate MSW* yang digunakan pada penelitian secara eksperimen tidak sesuai dengan ketentuan pada *fluent* yang diharuskan jumlah dari presentase hasil uji adalah 100%.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian simulasi numerik pada reaktor tipe *downdraft*, sebagai akibat pengaruh dari penambahan temperatur udara masuk adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi Masalah

Permasalahan yang terjadi adalah bagaimana mencapai temperatur yang sesuai dengan hasil eksperimen pada reaktor tipe *downdraft*.

2. Studi Literatur

Membantu memahami dan menganalisa permasalahan yang ada melalui studi literatur yang berkaitan dengan proses gasifikasi, pengoperasian perangkat lunak Ansys Fluent 19.

3. Pengumpulan Data

Pengumpulan data operasi antara lain dimensi yang digunakan sebagai dasar pembuatan geometri, data operasi seperti temperatur, tekanan, dan *mass flow rate* dari biomassa dan udara pembakaran yang diperlukan sebagai parameter input pada simulasi, dan data-data lain yang diperlukan untuk acuan validasi.

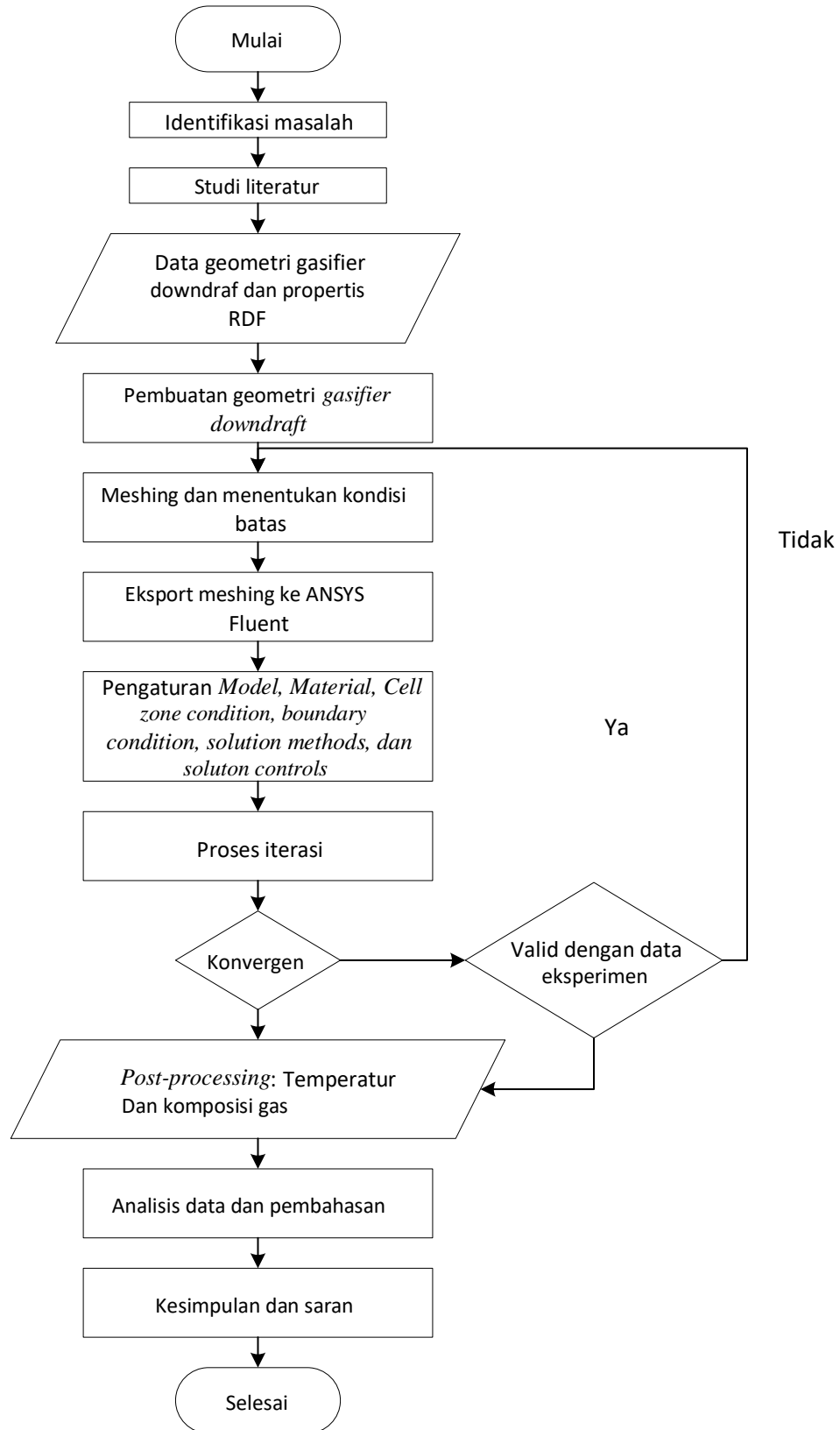
4. Pemodelan Simulasi

Tahapan ini diawali dengan *pre-processing* menggunakan perangkat lunak Workbench Ansys. Pada tahap *processing* dan *post-processing*, dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Ansys Fluent 19.

5. Analisa dan Kesimpulan

Pada akhir simulasi ditampilkan hasil secara kuantitatif dan kualitatif seperti distribusi temperatur dan distribusi gas saat proses gasifikasi.

3.2 Diagram Alir Penelitian



3.3 Tahapan Pemodelan dan Simulasi

3.4.1 Pre-processing

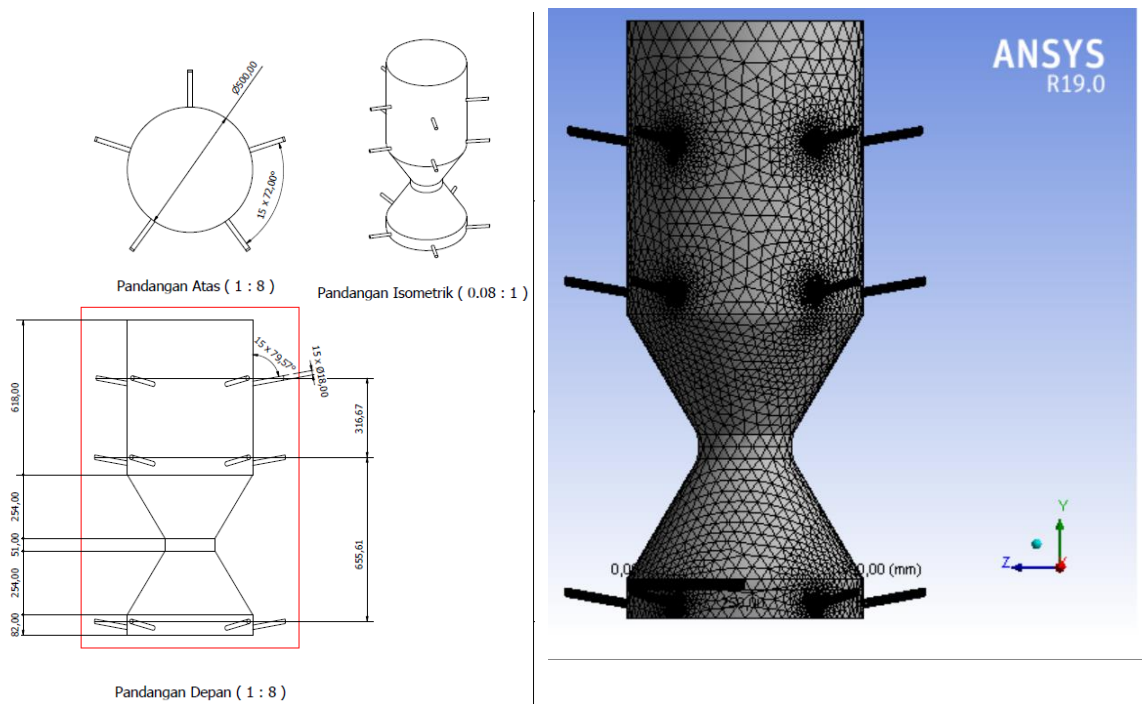
Tahapan ini meliputi beberapa sub-tahapan yaitu pembuatan geometri, pembuatan *meshing*, dan penentuan domain pemodelan.

3.4.1.1 Pembuatan Geometri

Penelitian ini meninjau pada bagian dalam reaktor, sehingga pembuatan geometri dengan perangkat lunak Workbench Ansys juga dibuat hanya pada bagian dalam reaktor. Geometri reaktor ditunjukkan pada Gambar 3.1a.

3.4.1.2 Meshing

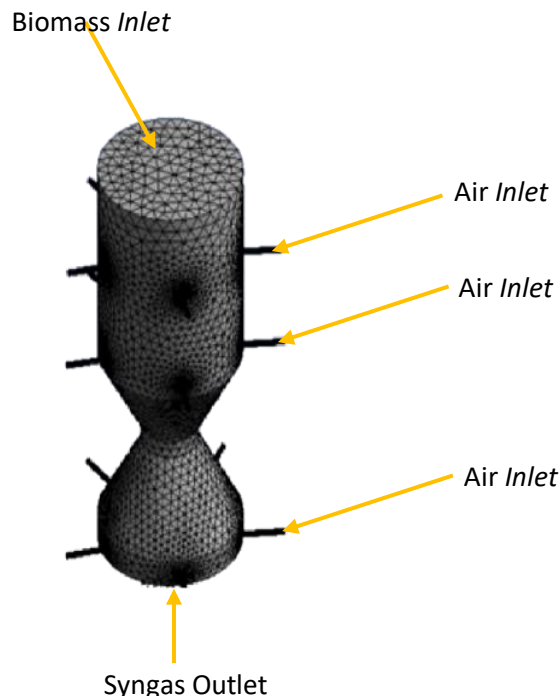
Meshing pada simulasi ini memiliki jumlah node sebanyak 60.221 dan jumlah elemen sebanyak 172.007. Kualitas *Maximum Ortho Skew* pada *meshing* sebesar 0,79 dimana nilai ini masih berada didalam batas maksimum *Ortho Skew* yaitu 0,9 Hasil *meshing* pada simulasi reaktor tipe *downdraft* ini dapat dilihat pada Gambar 3.1b.



Gambar 3. 1 a) Geometri dan b) Struktur *mesh*

3.4.1.3 Pemilihan Domain Pemodelan

Domain pemodelan yang digunakan antara lain *boundary condition* tipe *mass-flow inlet* untuk *inlet air* yang berjumlah 4 buah, *inlet biomass* yang berjumlah 1 buah. Sedangkan untuk *syngas outlet*, menggunakan *boundary condition* tipe *pressure-outlet* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2Domain Pemodelan

3.4.2 Processing

Processing yaitu melakukan pengaturan pada perangkat lunak Ansys Fluent 19. Beberapa pengaturan yang akan dilakukan diantaranya adalah *Models, materials, boundary conditions, operating conditions, control and monitoring conditions*, serta *initialize conditions*. Berikut di bawah ini merupakan penjelasan mengenai pengaturan dalam *processing* :

3.4.2.1 Models

Secara umum model numerik yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Models yang digunakan dalam simulasi

<i>Models</i>	Keterangan
<i>Energy</i>	<i>On</i>
<i>Viscous</i>	<i>Standard k-epsilon</i>
<i>Radiation</i>	P1
<i>Heat Exchanger</i>	<i>Off</i>
<i>Species</i>	<i>Species transport</i>
<i>Discrete</i>	<i>On</i>

Model radiasi P1 digunakan pada penelitian ini karena cukup stabil dalam memprediksi temperatur dan komposisi gas (Lu dan Wang 2012). Model reaksi yang akan digunakan adalah *finite rate* dan gabungan *finite rate* dan *Eddy dissipation*. Finite Rate menghitung persamaan kimia dengan persamaan Arrhenius dan tidak memperhitungkan efek dari turbulensi, model ini sesuai untuk pola aliran laminar. *Eddy dissipation* adalah pola pembakaran yang terkait dengan interaksi antara turbulensi dengan proses pembakaran berdasarkan sistem yang dikembangkan oleh Magnussen dan Hjertager. Pembakaran akan otomatis terjadi jika aliran sudah turbulen dan pencampuran sudah sempurna. Laju reaksi

pada model *finite rate/Eddy dissipation* didasarkan pada nilai terkecil dari model *finite rate* dan model *Eddy dissipation*. Model turbulensi *viscous* yang digunakan adalah model k-epsilon, karena memberikan hasil yang cukup konsisten (Silaen dan Wang 2010). Model spesies yang digunakan adalah spesies transport karena cocok digunakan untuk jenis pembakaran yang benar-benar bergantung kepada reaksi kimia stoikiometri. Jenis ini cocok untuk pembakaran gas.

Nilai input pada *ultimate* dan *proximate analysis* disesuaikan dengan RDF yang digunakan pada penelitian terdahulu. Namun, dikarenakan pada perangkat fluent jumlah persentase dari uji *ultimate* diharuskan sama dengan 100% maka dalam fluent harus disamakan hasilnya sesuai perbandingan seperti yang ditampilkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Ultimate analysis dan proximate analysis RDF dalam perangkat lunak

Jenis Uji	Parameter	Hasil	Satuan
Uji Ultimate	C	0.548837	% wt
	H	0.078422	% wt
	O	0.36282	% wt
	N	0.009321	% wt
	S	0,0006	% wt
Uji Proximate	Moisture In Sampel	0.037101	% wt
	Ash Content	0.148301	% wt
	Volatile Matter	0.773263	% wt
	Fixed Carbon	0.041335	% wt
	Nilai Kalor	22501	kJ/kg

3.4.2.2 Materials

Propertis material RDF yang digunakan dalam simulasi dengan perangkat lunak Ansys dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3. 3 Propertis material RDF

Properties	Nilai	Keterangan
<i>Density</i> (kg/m ³)	317,4	Didapat dari penelitian eksperimen
<i>Cp</i> (J/kg.K)	1800	Didapat dari data jurnal
<i>Volatile component fraction</i> (%)	54,23	Didapat dari penelitian eksperimen
<i>Binary diffusivity</i> (m ² /s)	4 x 10 ⁻⁵	<i>Fluent database</i>
<i>Combustible Fraction</i> (%)	10,74	<i>Fluent database</i>
<i>Devolatilization model</i>	-	<i>Two competing rates</i>
<i>Combustion model</i>	-	<i>Multiple surface reactions</i>

3.4.2.3 Boundary condition

Input nilai yang digunakan untuk *boundary condition* pada simulasi numerik reaktor tipe *downdraft* ini dapat dilihat pada Tabel 3.5.

Tabel 3. 4 Boundary condition untuk temperatur 1000°C

Nama <i>Boundary condition</i>	Tipe	Keterangan
<i>Air inlet 1 (pirolisis)</i>	<i>Mass flow inlet</i>	m_i : (0 ; 0,00068 ; 0,00136 ; 0,00068 ; 0,00068 ; 0,00136 ; 0,00204 ; 0,00136 ; 0,00204) kg/s
<i>Air inlet 2 (oksidasi)</i>	<i>Mass flow inlet</i>	m_i : (0,0068 ; 0,00544 ; 0,00476 ; 0,00476 ; 0,00408 ; 0,00408 ; 0,00408 ; 0,0034 ; 0,0034) kg/s
<i>Air inlet 3 (reduksi)</i>	<i>Mass flow inlet</i>	m_i : (0 ; 0,00068 ; 0,00068 ; 0,000136 ; 0,00204 ; 0,00136 ; 0,00068 ; 0,00204 ; 0,00136) kg/s
<i>Inlet Biomass</i>	<i>Mass flow inlet</i>	0,0022 kg/s
<i>Outlet syngas</i>	<i>Pressure-outlet</i>	
<i>Reaktor</i>	<i>Wall</i>	Material : <i>Steel</i>

3.4.2.4 Operating Conditions

Operating condition merupakan perkiraan tekanan daerah operasi reaktor. Dalam simulasi ini, terdapat pengaruh gaya gravitasi arah sumbu Y negatif sebesar 9,81 m/s².

3.4.2.5 Solution Methods dan Solution Controls

Solusi pada studi numerik dengan menggunakan perangkat lunak Ansys Fluent 19 yaitu *pressure-velocity coupling spatial discretization* menggunakan metode SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations), gradient menggunakan *first order upwind*, untuk *pressure* menggunakan standard, momentum menggunakan *First Order Upwind*, *Turbulent Kinetic Energy* menggunakan *First Order Upwind*, untuk *turbulent dissipation rate* menggunakan *first order upwind* dan untuk *lignite vol*, O₂, CO₂, H₂O, H₂, serta CO menggunakan *first order upwind*.

3.4.2.6 Initialize Conditions

Initialize conditions merupakan nilai awal untuk tiap parameter sebelum proses iterasi sehingga memudahkan simulasi dalam mencapai konvergen. *Initialize* yang digunakan dalam simulasi ini adalah *standard initialize*, untuk mendapatkan nilai parameter awal berdasarkan *boundary conditions* dari *inlet*.

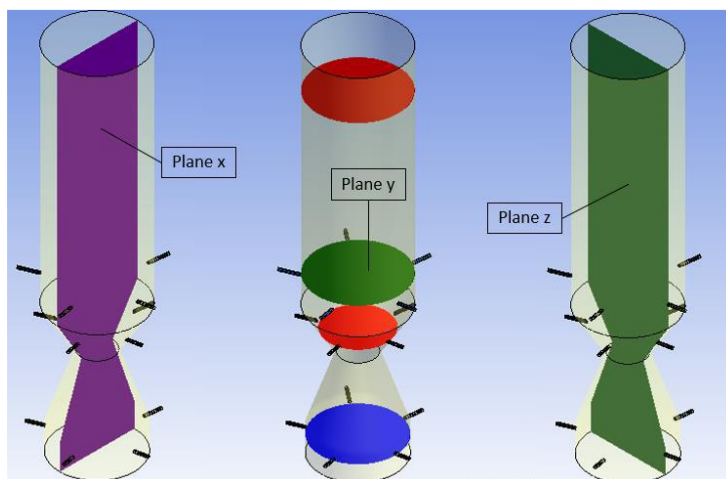
3.4.2.7 Monitoring Residual

Monitoring residual adalah tahap penyelesaian masalah berupa proses iterasi hingga mencapai harga konvergen yang diinginkan. Harga konvergen ditetapkan sebesar 10⁻³, artinya

proses iterasi dinyatakan telah konvergen setelah residualnya mencapai nilai di bawah 10^{-3} . Jika nilai konvergen tetap tidak tercapai, maka untuk proses validasi dapat dilakukan pengambilan data pada iterasi tertentu dimana memiliki nilai parameter yang hampir sama dengan data operasi aktual (Dziyad, 2014).

3.4.3 Post-processing

Post-processing merupakan tahap terakhir dalam simulasi ini. Pada tahap ini diperoleh hasil simulasi berupa data kualitatif kontur atau vektor dan data kuantitatif berupa grafik maupun Tabel data. Pada penelitian ini, analisa dilakukan pada distribusi temperatur dan komposisi *flammable* gas disajikan dalam bentuk kontur dan grafik. Pengamatan akan dilakukan terhadap masing-masing variasi. Data kualitatif berupa kontur diambil pada penampang vertikal (*z-center* reaktor dan *x-center* reaktor) dan penampang horizontal pada setiap bagian reaktor *y* (*drying zone, pyrolysis zone, partial combustion zone, reduction zone*) seperti pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 3 Pengamatan pada bagian penampang reaktor yang dilakukan pada koordinat x, y, dan z

3.4.4 Validasi Data

Validasi data hasil simulasi numerik mengacu pada hasil eksperimen. Temperatur gasifikasi pada titik termokopel diletakkan menjadi acuan untuk temperatur hasil simulasi. Komposisi *syngas* yang keluar dari zona reduksi menjadi acuan komposisi gas hasil simulasi.

3.4 Rancangan Penelitian

Parameter input dan output pada simulasi numerik untuk menganalisa distribusi temperatur setiap bagian proses gasifikasi di reaktor tipe *downdraft* dapat dilihat pada Tabel 3.5.

Tabel 3. 5 Parameter *input* dan output penelitian

Parameter Input			Parameter Output	
Variabel Konstan	Variabel Kontrol		Output	Keterangan
	Air Ratio	Model reaksi kimia		
1. Dimensi Reaktor	1) 0:10:0		Distribusi Temperatur	Plane-y center reactor
	2) 1:8:1			

2. Temperatur Udara Sekitar 3. Karakteristik RDF	3) 2:7:1	1. <i>Finite rate</i> 2. Gabungan <i>Finite rate</i> dan Eddiy Dissipation		
	4) 1:7:2			
	5) 1:6:3		Persentase volumetrik gas (CO, H ₂ , CH ₄)	
	6) 2:6:2			
	7) 3:6:1			
	8) 2:5:3			
9) 3:5:2	Performansi gasifier	LHV dan cold gas effieciency		

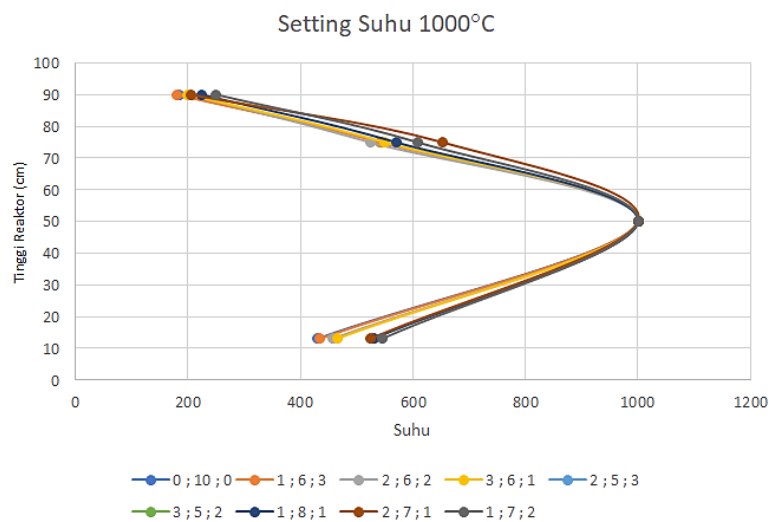
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil yang dibahas pada penelitian ini yaitu kondisi operasi dan performansi proses gasifikasi, selain itu juga melihat kandungan gas yang terdapat pada tiga zona (pirolisis, oksidasi dan reduksi). Kondisi operasi proses gasifikasi yaitu distribusi temperatur sepanjang reaktor *gasifier downdraft*. Parameter performansi gasifikasi yaitu ditunjukkan dengan komposisi gas terbakar (CO, H₂, dan CH₄), LHV *syngas*, dan *cold gas efficiency*.

4.1 Analisis Distribusi Temperatur Sepanjang Gasifier

Salah satu parameter output dari proses gasifikasi adalah distribusi temperatur sepanjang reaktor (zona *drying*, zona pirolisis, zona oksidasi, dan zona reduksi). Pada hasil eksperimen, distribusi temperatur hanya ditampilkan pada titik pengukuran termokopel dan distribusinya hanya distribusi pada ketinggian reaktor (pada sumbu Y). Sedangkan simulasi numerik dilakukan untuk mengetahui distribusi temperatur dan komposisi *combustible gas* secara detail, yang tidak terukur pada proses eksperimen.

Hasil eksperimen distribusi temperatur dengan menggunakan setting temperatur 1000°C dengan menggunakan 9 variasi AR ditunjukkan pada Gambar 4.1. Zona *drying* temperaturnya menunjukkan interval sebesar 180°C-250°C, urutan temperatur dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 1:7:2, AR 1:8:1, AR 2:7:1, AR 2:6:2, AR 3:6:1, AR 0:10:0, AR 1:6:3. Zona pirolisis menunjukkan interval temperaturnya sebesar 524°C-652°C, urutan temperatur dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 2:7:1, AR 1:7:2, AR 1:8:1, AR 3:6:1, AR 0:10:0, AR 1:6:3, AR 2:6:2. Zona reduksi menunjukkan temperatur yang dihasilkan intervalnya sebesar 400°C-490°C, urutan temperatur dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 1:7:2, AR 1:8:1, AR 2:7:1, AR 3:6:1, AR 2:6:2, AR 1:6:3, AR 0:10:0. Adapun untuk variasi AR 2:5:3 dan AR 3:5:2 temperatur pada zona oksidasi tidak mencapai 1000°C sehingga tidak dapat divalidasi dengan metode numerik.

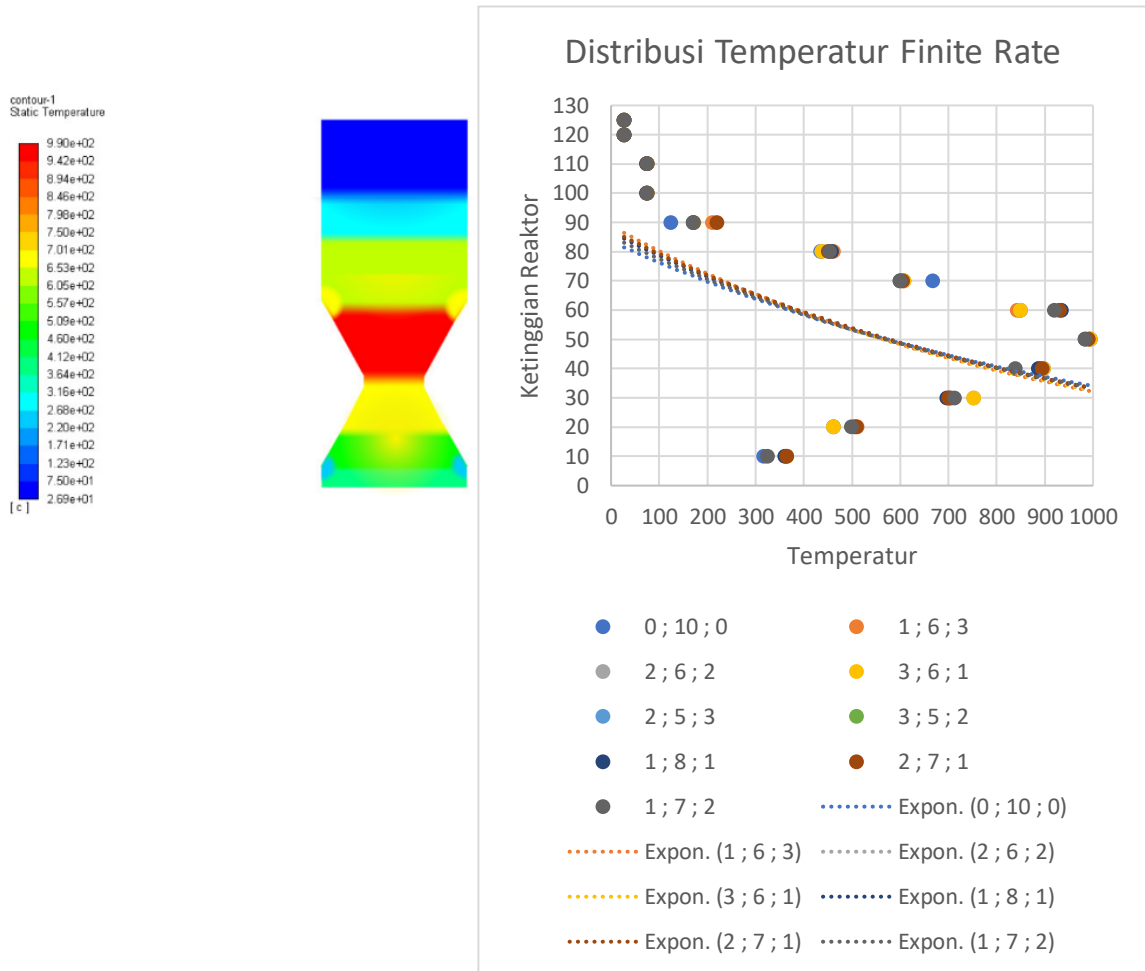


Gambar 4. 2 Distribusi temperatur hasil eksperimen

4.1.1 Distribusi Temperatur dengan Model Reaksi *Finite rate*.

Hasil numerik distribusi temperatur ditunjukkan pada Gambar 4.2. Zona *drying* temperaturnya menunjukkan interval sebesar 124°C-220°C, urutan temperatur dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 2:7:1, AR 1:6:3, AR 3:6:1, AR 2:6:2, AR 1:7:2,

AR 1:8:1, AR 1:2:4. Zona pirolisis menunjukkan interval temperaturnya sebesar 600°C-667°C, urutan temperatur dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 0:10:0, AR 1:6:3, AR 2:6:2, AR 3:6:1, AR 2:7:1, AR 1:7:2, AR 1:8:1. Zona reduksi menunjukkan temperatur yang dihasilkan intervalnya sebesar 317°C-365°C, urutan temperatur dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 1:6:3, AR 2:6:2, AR 3:6:1, AR 2:7:1, AR 1:8:1, AR 1:7:2, AR 0:10:0.



Gambar 4. 3 Distribusi temperatur dengan model reaksi *finite rate*

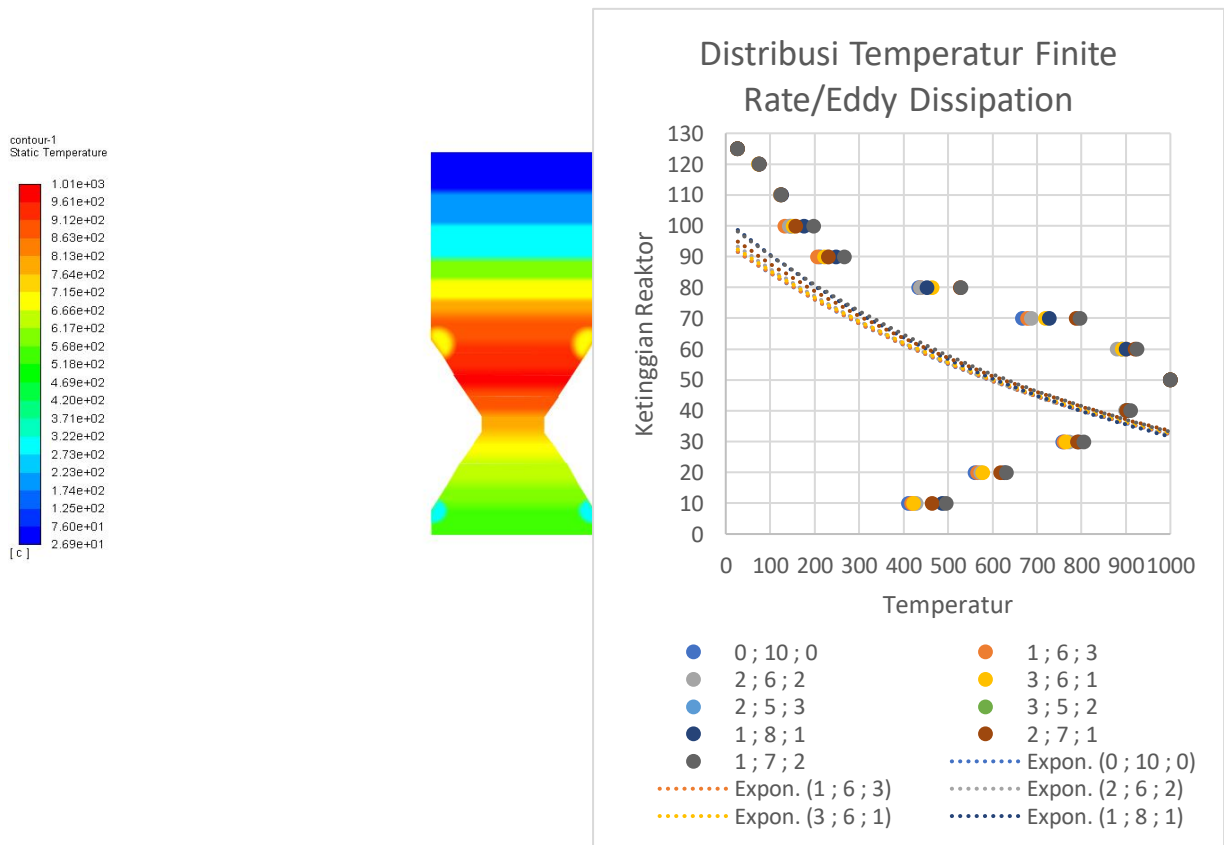
Berdasarkan uraian diatas dapat dilihat bahwa trendline pada metode numerik kurang sesuai dengan metode eksperimen pada semua zona. Perbedaan trendline dikarenakan model reaksi *finite rate* tidak memperhitungkan efek dari turbulensi. Model ini sesuai untuk pola aliran laminar sedangkan pada proses gasifikasi ini jenis alirannya adalah turbulen. Terdapat nilai perbedaan antara metode eksperimen dan numerik dapat dilihat pada Tabel 4.1. Perbedaan disebabkan model numerik dianggap *steady* dan tidak menggunakan *multiphase*, simplifikasi desain agar memudahkan dalam melakukan simulasi sehingga hasil yang didapatkan lebih ideal dan bahan bakar RDF pada metode numerik diasumsikan sebagai partikel sedangkan pada metode eksperimen tidak berbentuk partikel. Dan juga pada metode eksperimen, dimungkinkan terjadinya *losses* sehingga terjadi perbedaan dengan metode numerik.

Tabel 4. 1 Error distribusi temperatur model reaksi finite rate

Variasi	Error (%)			
	H=10 cm	H=50 cm	H=75 cm	H=90 cm
AR 0:10:0	20,75	0,6	4,22	34,74
AR 1:6:3	10,97	0,6	6,6	13,51
AR 2:6:2	13,09	0,6	8,3	16,09
AR 3:6:1	10,98	0,6	12,03	11,79
AR 2:5:3	-	-	-	-
AR 3:5:2	-	-	-	-
AR 1:8:1	24,79	1,7	15,49	22,72
AR 2:7:1	20,86	1	21,83	10
AR 1:7:2	33,67	1,7	23,66	26,08
Rata-rata	19,3	0,97	13,11	16,97

4.1.2 Distribusi Temperatur dengan Model Reaksi *Finite rate/Eddy dissipation*.

Hasil numerik distribusi temperatur ditunjukkan pada Gambar 4.3. Zona *drying* temperturnya menunjukkan interval sebesar 207°C-267°C, urutan temperatur dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 1:7:2, AR 1:8:1, AR 2:7:1, AR 2:6:2, AR 3:6:1, AR 0:10:0, AR 1:6:3. Zona pirolisis menunjukkan interval temperturnya sebesar 551°C-664°C, urutan temperatur dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 2:7:1, AR 1:7:2, AR 1:8:1, AR 3:6:1, AR 0:10:0, AR 1:6:3, AR 2:6:2. Zona reduksi menunjukkan temperatur yang dihasilkan intervalnya sebesar 412°C-497°C, urutan temperatur dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 1:7:2, AR 1:8:1, AR 2:7:1, AR 3:6:1, AR 2:6:2, AR 1:6:3, AR 0:10:0.



Gambar 4. 6 Distribusi temperatur dengan model reaksi *finite rate/eddy dissipation*

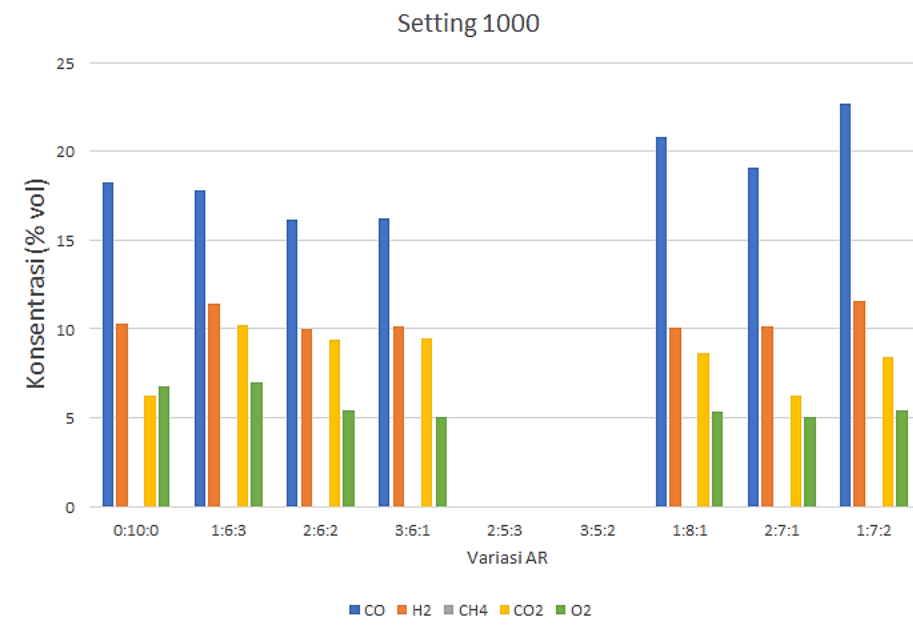
Berdasarkan uraian diatas dapat dilihat bahwa trendline antara metode numerik pada semua zona (drying, pirolisis, oksidasi, reduksi) sudah sesuai dengan metode eksperimen. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan model reaksi kimia *finite rate/eddy dissipation* sudah tepat. Namun terdapat nilai perbedaan antara metode eksperimen dan numerik dapat dilihat pada Tabel 4.2. Perbedaan disebabkan model numerik dianggap *steady* dan tidak menggunakan *multiphase*, simplifikasi desain agar memudahkan dalam melakukan simulasi sehingga hasil yang didapatkan lebih ideal dan bahan bakar RDF pada metode numerik diasumsikan sebagai partikel sedangkan pada metode eksperimen tidak berbentuk partikel. Dan juga pada metode eksperimen, dimungkinkan terjadinya *losses* sehingga terjadi perbedaan dengan metode numerik.

Tabel 4. 2 Error distribusi temperatur model reaksi finite rate/eddy dissipation

Variasi	Error (%)			
	H=10 cm	H=50 cm	H=75 cm	H=90 cm
AR 0:10:0	3	0	1,29	15,13
AR 1:6:3	2,2	0	3,14	15
AR 2:6:2	2,14	0	7,44	13,79
AR 3:6:1	3,17	0	7.63	11
AR 2:5:3	-	-	-	-
AR 3:5:2	-	-	-	-
AR 1:8:1	1,45	0	3,68	10,22
AR 2:7:1	1,09	0	1,07	12,68
AR 1:7:2	1,43	0	9,21	6,8
Rata-rata	2,07	0	4,78	12,09

4.2 Analisis Komposisi Syngas

Komposisi *syngas* diperoleh dari gas yang keluar pada ujung pipa *exhaust* sistem gasifikasi. Tujuan pengambilan sampel gas tersebut untuk mengetahui kandungan gas yang diproduksi selama proses gasifikasi, gas yang diperoleh yaitu gas mudah terbakar (CO, H₂ dan CH₄) dan gas tidak mudah terbakar (O₂ dan CO₂). *Syngas* yang didapatkan disimpan di dalam kantong gas dan gas tersebut diuji dengan menggunakan Gas *Chromatography* yang merupakan alat untuk mengetahui seberapa besar kandungan gas yang terdapat di dalam *syngas*. Komposisi *syngas* untuk masing – masing AR berdasarkan hasil eksperimen dapat dilihat pada Gambar 4.4.

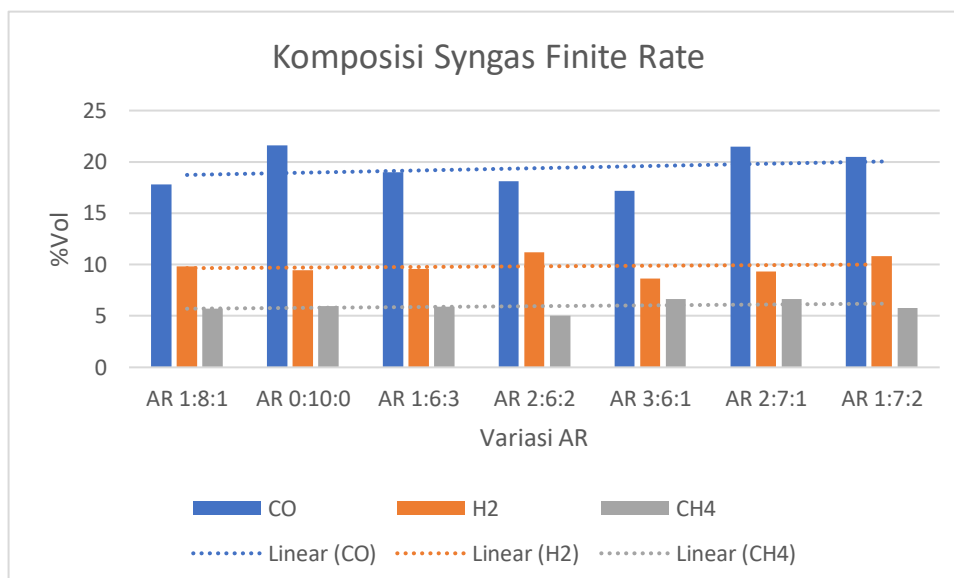


Gambar 4. 7 Komposisi syngas hasil eksperimen

Urutan nilai CO dari yang tertinggi sampai terendah adalah AR 1:7:2, AR 1:8:1, AR 2:7:1, AR 0:10:0, AR 1:6:3, AR 3:6:1, AR 2:6:2. Urutan nilai H₂ dari yang tertinggi sampai terendah adalah AR 1:7:2, AR 1:6:3, AR 0:10:0, AR 2:7:1, AR 3:6:1, AR 1:8:1, AR 2:6:2. Kandungan CH₄ sangat kecil untuk semua variasi AR sehingga gas CH₄ tidak terbaca saat pengujian *gas chromatography*.

4.2.1 Analisis Komposisi Syngas dengan Model Reaksi *Finite rate*.

Komposisi *syngas* untuk masing – masing AR dapat dilihat pada gambar 4.4. Urutan nilai CO dari yang tertinggi sampai terendah adalah AR 0:10:0, AR 2:7:1, AR 1:7:2, AR 1:6:3, AR 2:6:2, AR 1:8:1, AR 3:6:1. Urutan nilai H₂ dari yang tertinggi sampai terendah adalah AR 2:6:2, AR 1:7:2, AR 1:8:1, AR 1:6:3, AR 0:10:0, AR 2:7:1, AR 3:6:1. Urutan nilai CH₄ dari yang tertinggi sampai terendah adalah AR 3:6:1, AR 2:7:1, AR 0:10:0, AR 1:6:3, AR 1:7:2, AR 1:8:1, AR 2:6:2.



Gambar 4.5 Grafik komposisi syngas model reaksi finite rate

Berdasarkan uraian diatas dapat dilihat bahwa trendline pada metode numerik kurang sesuai dengan metode eksperimen untuk semua komposisi *syngas*. Perbedaan trendline dikarenakan model reaksi *finite rate* tidak memperhitungkan efek dari turbulensi. Model ini sesuai untuk pola aliran laminar sedangkan pada proses gasifikasi ini jenis alirannya adalah turbulen. Terdapat nilai perbedaan antara metode eksperimen dan numerik dapat dilihat pada Tabel 4.3.

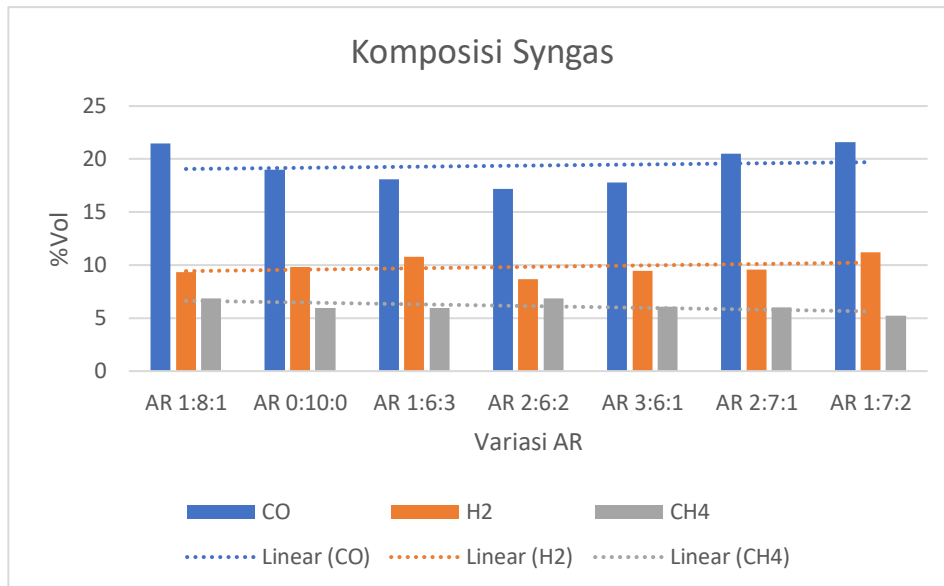
Tabel 4. 3 Perbandingan komposisi combustile gas model reaksi *finite rate*.

Variasi	Eksperimen			Numerik			% Error		
	%CO	%H ₂	%CH ₄	%CO	%H ₂	%CH ₄	%CO	%H ₂	%CH ₄
AR 1:8:1	20,85	10,06	0	17,8	9,84	5,71	14,63	2,19	-
AR 0:10:0	18,25	10,28	0	21,6	9,47	5,97	18,36	7,88	-
AR 1:6:3	17,8	11,38	0	19	9,56	5,91	6,74	15,99	-
AR 2:6:2	16,13	9,98	0	18,1	11,1	5,03	12,21	12,22	-
AR 3:6:1	16,23	10,15	0	17,2	8,64	6,64	5,98	14,88	-
AR 2:7:1	19,12	10,16	0	21,5	9,32	6,64	12,45	8,27	-
AR 1:7:2	22,67	11,54	0	20,5	10,8	5,78	9,57	6,41	-
Rata-rata							11,41	9,69	-

Nilai error terbesar untuk kandungan gas CO menggunakan variasi AR 0:10:0 dengan nilai error 18,36% dan error terkecil menggunakan variasi AR 3:6:1 dengan nilai error 5,98%. Nilai error terbesar untuk kandungan gas H₂ menggunakan variasi AR 1:6:3 dengan nilai error 15,99% dan error terkecil menggunakan variasi AR 1:8:1 dengan nilai error 2,19%. Untuk kandungan gas CH₄ tidak dapat dibandingkan karena kandungan gas CH₄ pada hasil eksperimen bernilai nol. Perbedaan disebabkan model numerik dianggap *steady* dan tidak menggunakan *multiphase*, simplifikasi desain agar memudahkan dalam melakukan simulasi sehingga hasil yang didapatkan lebih ideal dan bahan bakar RDF pada metode numerik diasumsikan sebagai partikel sedangkan pada metode eksperimen tidak berbentuk partikel. Dan juga pada metode eksperimen, dimungkinkan terjadinya *losses* sehingga terjadi perbedaan dengan metode numerik.

4.2.2 Analisis Komposisi Syngas dengan Model Reaksi *Finite Rate/Eddy Dissipation*.

Komposisi *syngas* untuk masing – masing AR dapat dilihat pada gambar 4.5. Urutan nilai CO dari yang tertinggi sampai terendah adalah AR 1:7:2, AR 1:8:1, AR 2:7:1, AR 0:10:0, AR 1:6:3, AR 3:6:1, AR 2:6:2. Urutan nilai H₂ dari yang tertinggi sampai terendah adalah AR 1:7:2, AR 1:6:3, AR 0:10:0, AR 2:7:1, AR 3:6:1, AR 1:8:1, AR 2:6:2. Urutan nilai CH₄ dari yang tertinggi sampai terendah adalah AR 2:6:2, AR 1:8:1, AR 3:6:1, AR 2:7:1, AR 0:10:0, AR 1:6:3, AR 1:7:2.



Gambar 4.5 Grafik komposisi syngas model reaksi finite rate/eddy dissipation

Berdasarkan uraian diatas dapat dilihat bahwa trendline antara metode numerik pada semua zona (drying, pirolisis, oksidasi, reduksi) sudah sesuai dengan metode eksperimen. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan model reaksi kimia *finite rate/eddy dissipation* sudah tepat. Namun terdapat nilai perbedaan antara metode eksperimen dan numerik dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Perbandingan komposisi combustile gas model reaksi *finite rate/eddy dissipation*.

Variasi	Eksperimen			Numerik			%Error		
	%CO	%H ₂	%CH ₄	%CO	%H ₂	%CH ₄	%CO	%H ₂	%CH ₄
AR 1:8:1	20,85	10,06	0	21,5	9,32	6,84	3,12	7,36	-
AR 0:10:0	18,25	10,28	0	19	9,84	5,98	4,11	4,29	-
AR 1:6:3	17,8	11,38	0	18,1	10,8	5,98	1,69	5,1	-
AR 2:6:2	16,13	9,98	0	17,2	8,64	6,84	6,63	13,4	-
AR 3:6:1	16,23	10,15	0	17,8	9,47	6,07	9,67	6,7	-
AR 2:7:1	19,12	10,16	0	20,5	9,56	6,01	7,22	5,91	-
AR 1:7:2	22,67	11,54	0	21,6	11,2	5,23	4,72	2,95	-
Rata-rata							5,31	6,53	-

Nilai error terbesar untuk kandungan gas CO menggunakan variasi AR 3:6:1 dengan nilai error 9,67% dan error terkecil menggunakan variasi AR 1:6:3 dengan nilai error 1,69%. Nilai error terbesar untuk kandungan gas H₂ menggunakan variasi AR 2:6:2 dengan nilai error 13,4% dan error terkecil menggunakan variasi AR 1:7:2 dengan nilai error 2,95%. Untuk

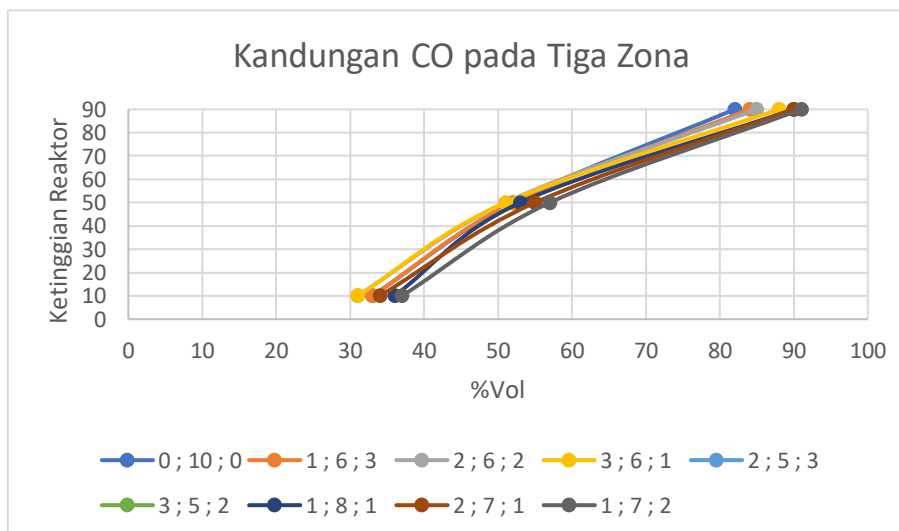
kandungan gas CH₄ tidak dapat dibandingkan karena kandungan gas CH₄ pada hasil eksperimen bernilai nol. Perbedaan disebabkan model numerik dianggap *steady* dan tidak menggunakan *multiphase*, simplifikasi desain agar memudahkan dalam melakukan simulasi sehingga hasil yang didapatkan lebih ideal dan bahan bakar RDF pada metode numerik diasumsikan sebagai partikel sedangkan pada metode eksperimen tidak berbentuk partikel. Dan juga pada metode eksperimen, dimungkinkan terjadinya *losses* sehingga terjadi perbedaan dengan metode numerik.

4.3 Analisis Komposisi Tiga Zona Gasifier

Parameter output dari proses gasifikasi selain distribusi temperatur sepanjang *gasifier* adalah komposisi *combustible gas* yang dihasilkan. *combustible gas* terdiri dari CO, H₂, dan CH₄. Data persentase gas hasil simulasi direpresentasikan berdasarkan satuan % mol. Berdasarkan asumsi bahwa seluruh gas dalam kondisi gas ideal, maka % mol gas dapat juga dinyatakan sebagai persentase volumetrik (%vol) untuk menghitung nilai kalor gas. Nilai persentase volumetrik diambil menggunakan menu *Report-Surface integral-Area weighted average*. Menu *Area Weighted Average* digunakan untuk mengambil nilai rata-rata persentase volumetrik *syngas* reaktor.

4.3.1 Analisis Distribusi Persentase Volumetrik CO

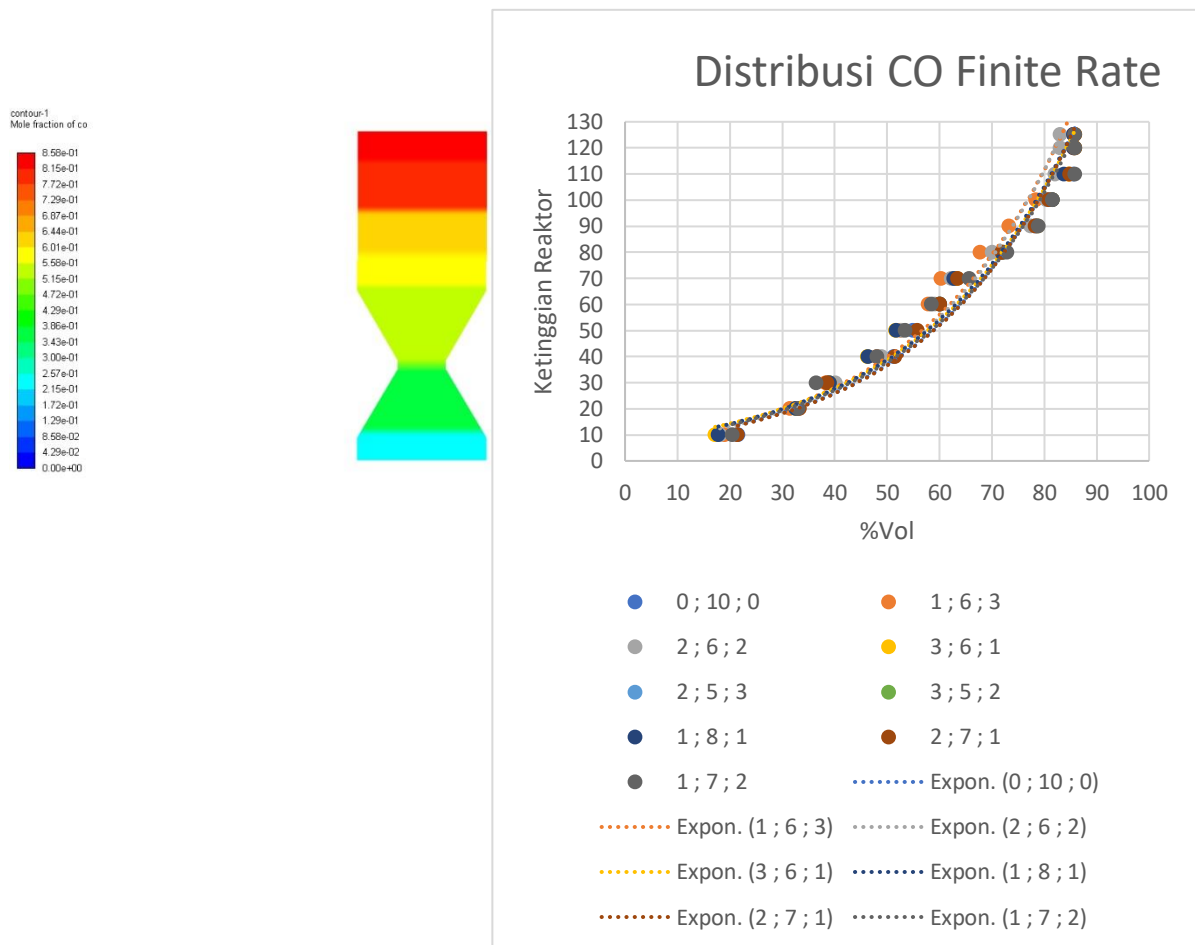
Hasil eksperimen distribusi persentase volumetrik CO dengan menggunakan setting temperatur 1000°C dan 9 variasi AR ditunjukkan pada Gambar 4.5. Zona pirolisis menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 82%-91%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 1:7:2, AR 2:7:1, AR 1:8:1, AR 3:6:1, AR 2:6:2, AR 1:6:3, AR 0:10:0. Zona oksidasi menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 51%-57%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 1:7:2, AR 2:7:1, AR 1:8:1, AR 0:10:0, AR 1:6:3, AR 2:6:2, AR 3:6:1. Zona reduksi menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 31%-37%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 1:7:2, AR 1:8:1, AR 2:7:1, AR 1:6:3, AR 0:10:0, AR 3:6:1, AR 2:6:2.



Gambar 4. 8 Grafik kandungan CO pada tiga zona hasil eksperimen

4.3.1.1 Analisis Distribusi Persentase Volumetrik CO dengan Model Reaksi *Finite Rate*.

Hasil numerik distribusi persentase volumetrik CO dengan menggunakan setting temperatur 1000°C dan 9 variasi AR ditunjukkan pada Gambar 4.6. Zona pirolisis menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 73,3%-78,9%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 2:7:1, AR 2:6:2, AR 3:6:1, AR 1:8:1, AR 1:7:2, AR 1:6:3, AR 0:10:0. Zona oksidasi menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 51,6%-55,8%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 1:8:1, AR 1:7:2, AR 2:7:1, AR 1:6:3, AR 0:10:0, AR 3:6:1, AR 2:6:2. Zona reduksi menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 17,2%-21,6%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 1:7:2, AR 1:8:1, AR 2:7:1, AR 0:10:0, AR 1:6:3, AR 3:6:1, AR 2:6:2.



Gambar 4. 9 Distribusi CO pada tiga zona model reaksi *finite rate*

Nilai persentase volumetrik CO tinggi pada zona drying dikarenakan tingginya kandungan karbon dan oksigen pada bahan bakar RDF. Nilai persentase volumetrik CO menurun seiring turunnya ketinggian reactor diakibatkan pada zona oksidasi reaksi yang terjadi adalah eksotermik terutama reaksi R3 : $\text{CO(g)} + 0.5\text{O}_2\text{(g)} \rightarrow \text{CO}_2\text{(g)}$ yang mengakibatkan oksigen pada udara lebih reaktif dengan CO untuk membentuk CO₂. Pada zona reduksi terjadi reaksi R6 : $\text{CO(g)} + \text{H}_2\text{O(g)} \rightarrow \text{CO}_2\text{(g)} + \text{H}_2\text{(g)}$ sehingga nilai persentase volumetrik CO menurun.

Berdasarkan uraian diatas dapat dilihat bahwa trendline pada metode numerik kurang sesuai dengan metode eksperimen pada semua zona. Perbedaan trendline dikarenakan model

reaksi *finite rate* tidak memperhitungkan efek dari turbulensi. Model ini sesuai untuk pola aliran laminar sedangkan pada proses gasifikasi ini jenis alirannya adalah turbulen. Terdapat nilai perbedaan antara metode eksperimen dan numerik dapat dilihat pada Tabel 4.5-4.7.

Tabel 4. 5 Perbedaan Kandungan CO Zona Pirolisis

Variasi	Eksperimen	Numerik	Δ CO	% Error
AR 1:8:1	90	78,6	-11,4	12,67
AR 0:10:0	82	78,3	-3,7	4,51
AR 1:6:3	84	73,3	-10,7	12,74
AR 2:6:2	85	77,4	-7,6	8,94
AR 3:6:1	88	78,7	-9,3	10,57
AR 2:7:1	90	78,3	-11,7	13,00
AR 1:7:2	91	78,9	-12,1	13,30
Rata-rata				10,82

Tabel 4. 6 Perbedaan Kandungan CO Zona Oksidasi

Variasi	Eksperimen	Numerik	Δ CO	% Error
AR 1:8:1	53	51,7	-1,3	2,45
AR 0:10:0	52	54,9	2,9	5,58
AR 1:6:3	52	52,6	0,6	1,15
AR 2:6:2	51	52,8	1,8	3,53
AR 3:6:1	51	51,6	0,6	1,18
AR 2:7:1	55	55,8	0,8	1,45
AR 1:7:2	57	53,4	-3,6	6,32
Rata-rata				3,09

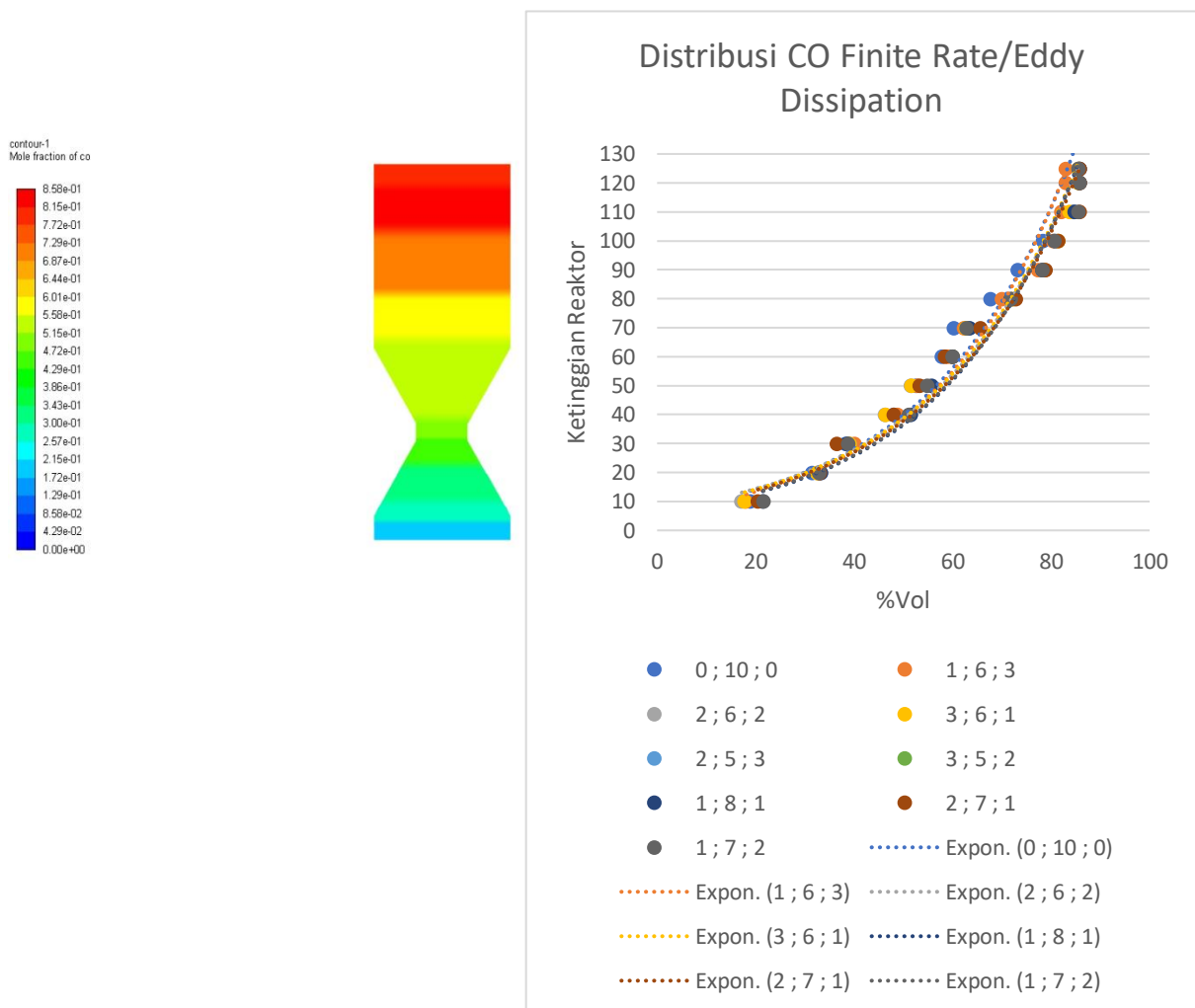
Tabel 4. 7 Perbedaan Kandungan CO Zona Reduksi

Variasi	Eksperimen	Numerik	Δ CO	% Error
AR 1:8:1	36	17,8	-18,2	50,56
AR 0:10:0	33	21,6	-11,4	34,55
AR 1:6:3	33	19	-14	42,42
AR 2:6:2	31	18,1	-12,9	41,61
AR 3:6:1	31	17,2	-13,8	44,52
AR 2:7:1	34	21,5	-12,5	36,76
AR 1:7:2	37	20,5	-16,5	44,59
Rata-rata				42,12

Pada zona pirolisis nilai error terbesar menggunakan variasi AR 1:7:2 dengan nilai error -13,3% dan error terkecil menggunakan variasi AR 0:10:0 dengan nilai error 4,51%. Pada zona oksidasi nilai error terbesar menggunakan variasi AR 1:7:2 dengan nilai error -6,32% dan error terkecil menggunakan variasi AR 1:6:3 dengan nilai error 1,15%. Pada zona reduksi nilai error terbesar menggunakan variasi AR 1:8:1 dengan nilai error 50,57% dan error terkecil menggunakan variasi AR 0:10:0 dengan nilai error 34,55%. Perbedaan disebabkan model numerik dianggap *steady* dan tidak menggunakan *multiphase*, simplifikasi desain agar memudahkan dalam melakukan simulasi sehingga hasil yang didapatkan lebih ideal dan bahan bakar RDF pada metode numerik diasumsikan sebagai partikel sedangkan pada metode eksperimen tidak berbentuk partikel. Dan juga pada metode eksperimen, dimungkinkan terjadinya *losses* sehingga terjadi perbedaan dengan metode numerik.

4.3.1.2 Analisis Distribusi Persentase Volumetrik CO dengan Model Reaksi *Finite Rate/Eddy Dissipation*.

Hasil eksperimen distribusi persentase volumetrik CO dengan menggunakan setting temperatur 1000°C dan 9 variasi AR ditunjukkan pada Gambar 4.7. Zona pirolisis menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 82%-91%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 1:7:2, AR 2:7:1, AR 1:8:1, AR 3:6:1, AR 2:6:2, AR 1:6:3, AR 0:10:0. Zona oksidasi menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 51%-57%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 1:7:2, AR 2:7:1, AR 1:8:1, AR 0:10:0, AR 1:6:3, AR 2:6:2, AR 3:6:1. Zona reduksi menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 31%-37%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 1:7:2, AR 1:8:1, AR 2:7:1, AR 1:6:3, AR 0:10:0, AR 3:6:1, AR 2:6:2.



Gambar 4. 10 Distribusi CO pada tiga zona model reaksi *finite rate/eddy dissipation*

Nilai persentase volumetrik CO tinggi pada zona drying dikarenakan tingginya kandungan karbon dan oksigen pada bahan bakar RDF. Nilai persentase volumetrik CO menurun seiring turunnya ketinggian reactor diakibatkan pada zona oksidasi reaksi yang terjadi adalah eksotermik terutama reaksi R3 : $\text{CO(g)} + 0.5\text{O}_2\text{(g)} \rightarrow \text{CO}_2\text{(g)}$ yang mengakibatkan oksigen pada udara lebih reaktif dengan CO untuk membentuk CO_2 . Pada

zona reduksi terjadi reaksi R6 : $\text{CO(g)} + \text{H}_2\text{O (g)} \rightarrow \text{CO}_2\text{(g)} + \text{H}_2\text{(g)}$ sehingga nilai persentase volumetrik CO menurun.

Berdasarkan urutan nilai dari semua variasi untuk tiga zona dapat dikatakan bahwa trendline hasil numerik sesuai dengan eksperimen. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan model reaksi kimia *finite rate/eddy dissipation* sudah tepat. Namun terdapat perbedaan nilai antara metode eksperimen dan numerik yang dapat dilihat pada Tabel 4.8-4.10.

Tabel 4. 8 Perbedaan Kandungan CO Zona Pirolisis

Variasi	Eksperimen	Numerik	Δ CO	% Error
AR 1:8:1	90	72,23	-17,77	19,74
AR 0:10:0	82	68,13	-13,87	16,91
AR 1:6:3	84	71,13	-12,87	15,32
AR 2:6:2	85	72,3	-12,7	14,94
AR 3:6:1	88	72,16	-15,84	18
AR 2:7:1	90	73,5	-16,5	18,33
AR 1:7:2	91	72,03	-18,97	20
Rata-rata				17,61

Tabel 4. 9 Perbedaan Kandungan CO Zona Oksidasi

Variasi	Eksperimen	Numerik	Δ CO	% Error
AR 1:8:1	53	57,95	4,95	9,34
AR 0:10:0	52	55,25	3,25	6,25
AR 1:6:3	52	55,95	3,95	7,59
AR 2:6:2	51	55,85	4,85	9,5
AR 3:6:1	51	55,9	4,9	9,6
AR 2:7:1	55	55,95	0,95	1,72
AR 1:7:2	57	57,5	0,5	0,87
Rata-rata				6,41

Tabel 4. 10 Perbedaan Kandungan CO Zona Reduksi

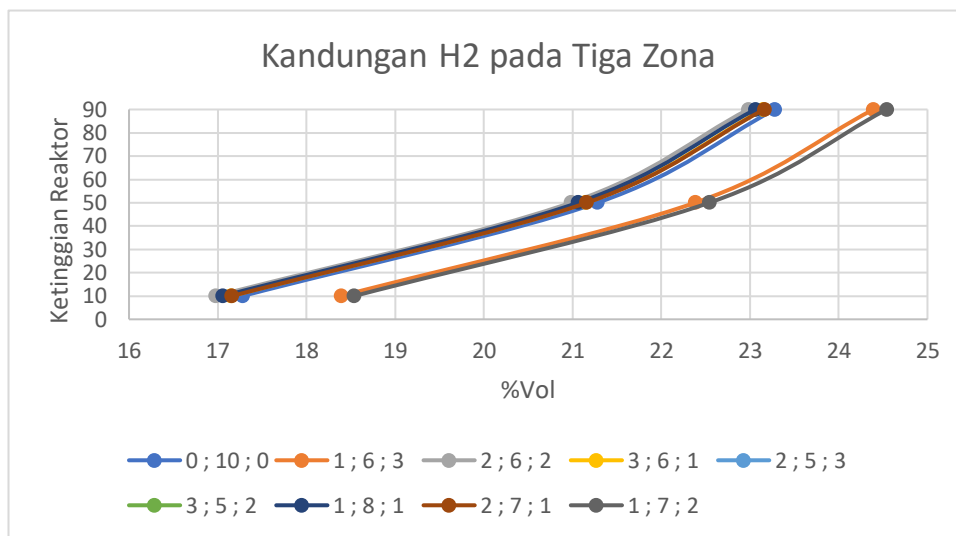
Variasi	Eksperimen	Numerik	Δ CO	% Error
AR 1:8:1	36	41,13	5,13	14,25
AR 0:10:0	33	39,3	6,3	19,09
AR 1:6:3	33	40,63	7,63	23,12
AR 2:6:2	31	39,33	8,33	26,87
AR 3:6:1	31	39,36	8,36	26,97
AR 2:7:1	34	39,23	5,23	15,38
AR 1:7:2	37	41	4	10,81
Rata-rata				19,5

Pada zona pirolisis nilai error terbesar menggunakan variasi AR 1:7:2 dengan nilai error 20% dan error terkecil menggunakan variasi AR 2:6:2 dengan nilai error 14,94%. Pada zona oksidasi nilai error terbesar menggunakan variasi AR 3:6:1 dengan nilai error 9,6% dan error terkecil menggunakan variasi AR 1:7:2 dengan nilai error 0,87%. Pada zona reduksi nilai error terbesar menggunakan variasi AR 3:6:1 dengan nilai error 26,97% dan error terkecil menggunakan variasi AR 1:7:2 dengan nilai error 10,81%. Perbedaan disebabkan model numerik dianggap *steady* dan tidak menggunakan *multiphase*, simplifikasi desain agar memudahkan dalam melakukan simulasi sehingga hasil yang didapatkan lebih ideal dan

bahan bakar RDF pada metode numerik diasumsikan sebagai partikel sedangkan pada metode eksperimen tidak berbentuk partikel. Dan juga pada metode eksperimen, dimungkinkan terjadinya *losses* sehingga terjadi perbedaan dengan metode numerik.

4.3.2 Analisis Distribusi Persentase Volumetrik H₂

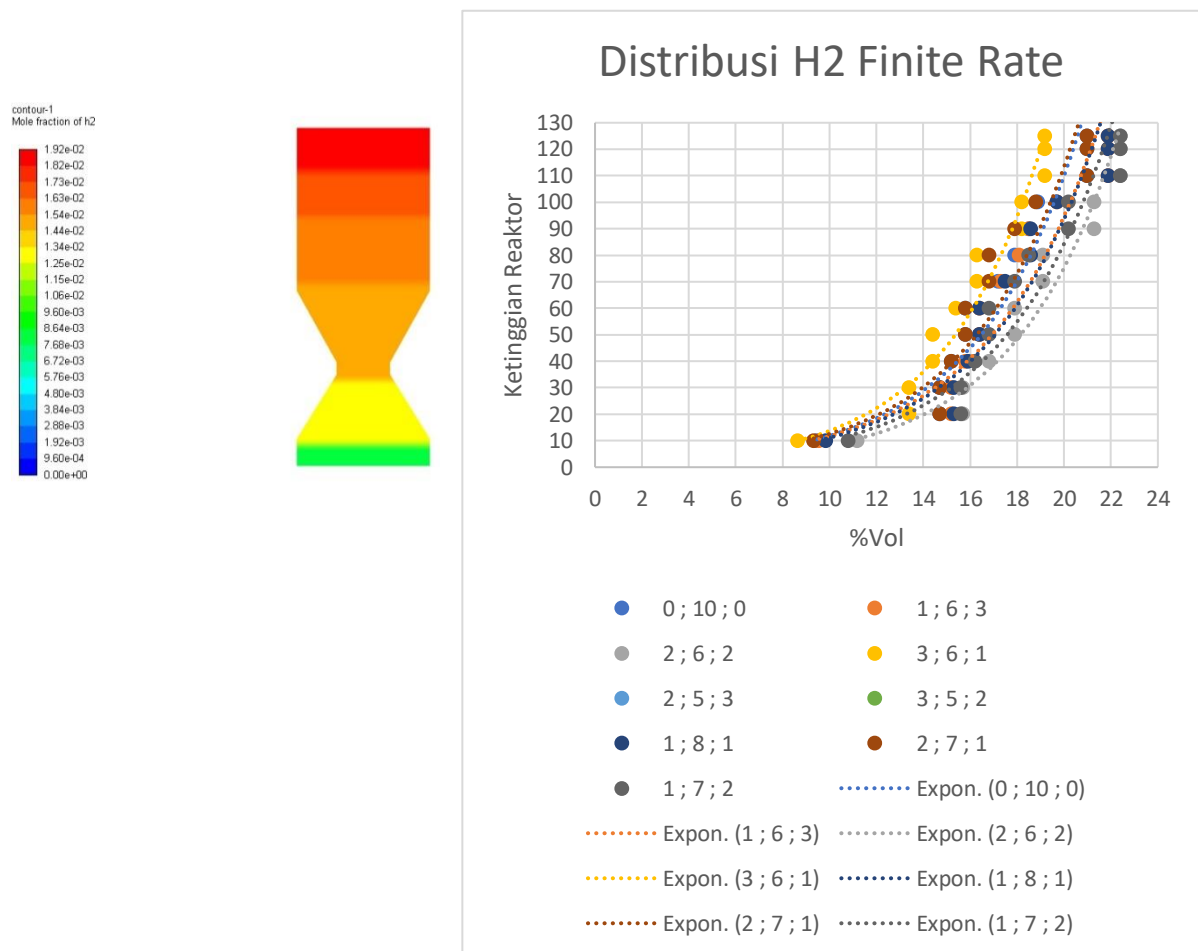
Hasil eksperimen distribusi persentase volumetrik H₂ dengan menggunakan setting temperatur 1000°C dan 9 variasi AR ditunjukkan pada Gambar 4.8. Zona pirolisis menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 24,98%-26,54%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 1:7:2, AR 1:6:3, AR 0:10:0, AR 2:7:1, AR 3:6:1, AR 1:8:1, AR 2:6:2. Zona oksidasi menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 22,98%-24,54%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 1:7:2, AR 1:6:3, AR 0:10:0, AR 2:7:1, AR 3:6:1, AR 1:8:1, AR 2:6:2. Zona reduksi menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 20,98%-22,54%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 1:7:2, AR 1:6:3, AR 0:10:0, AR 2:7:1, AR 3:6:1, AR 1:8:1, AR 2:6:2.



Gambar 4. 11 Kandungan H₂ pada tiga zona hasil eksperimen

4.3.2.1 Analisis Distribusi Persentase Volumetrik H₂ dengan Model Reaksi *Finite Rate*.

Hasil numerik distribusi persentase volumetrik H₂ dengan menggunakan setting temperatur 1000°C dan 9 variasi AR ditunjukkan pada Gambar 4.9. Zona pirolisis menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 18,2%-21,3%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 2:6:2, AR 1:7:2, AR 1:8:1, AR 0:10:0, AR 1:6:3, AR 3:6:1, AR 2:7:1. Zona oksidasi menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 14,4%-17,9%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 2:6:2, AR 1:7:2, AR 1:6:3, AR 1:8:1, AR 0:10:0, AR 2:7:1, AR 3:6:1. Zona reduksi menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 9,32%-11,2%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 1:7:2, AR 1:8:1, AR 2:7:1, AR 1:6:3, AR 0:10:0, AR 3:6:1, AR 2:6:2.



Gambar 4. 12 Distribusi H2 pada tiga zona model reaksi finite rate

Nilai persentase volumetrik H₂ menurun seiring ketinggian reactor diakibatkan pada zona oksidasi reaksi yang terjadi adalah eksotermik terutama reaksi R8 : $\text{CO(g)} + 3\text{H}_2\text{(g)} \rightarrow \text{CH}_4\text{(g)} + \text{H}_2\text{O(g)}$ yang mengakibatkan karbon monoksida lebih reaktif dengan H₂ untuk membentuk CH₄ dan uap air. Pada zona reduksi terjadi R11 : $\text{C(s)} + 2\text{H}_2\text{(g)} \rightarrow \text{CH}_4\text{(g)}$ sehingga nilai persentase volumetrik H₂ menurun.

Berdasarkan urutan nilai dari semua variasi untuk tiga zona dapat dikatakan bahwa trendline hasil numerik tidak sesuai dengan eksperimen. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan model reaksi kimia *finite rate* belum tepat. Terdapat perbedaan nilai antara metode eksperimen dan numerik yang dapat dilihat pada Tabel 4.11-4.13.

Tabel 4. 11 Perbedaan Kandungan H₂ Zona Pirolisis

Variasi	Eksperimen	Numerik	ΔH_2	% Error
AR 1:8:1	23,06	18,6	-4,46	19,34
AR 0:10:0	23,28	18,5	-4,78	20,53

AR 1:6:3	24,39	18,5	-5,89	24,15
AR 2:6:2	22,98	21,3	-1,68	7,31
AR 3:6:1	23,15	18,2	-4,95	21,38
AR 2:7:1	23,16	17,9	-5,26	22,71
AR 1:7:2	24,54	20,2	-4,34	17,69
Rata-rata				19,02

Tabel 4. 12 Perbedaan Kandungan H₂ Zona Oksidasi

Variasi	Eksperimen	Numerik	ΔH_2	% Error
AR 1:8:1	21,06	16,4	-4,66	22,13
AR 0:10:0	21,28	15,8	-5,48	25,75
AR 1:6:3	22,39	16,4	-5,99	26,75
AR 2:6:2	20,98	17,9	-3,08	14,68
AR 3:6:1	21,15	14,4	-6,75	31,91
AR 2:7:1	21,16	15,8	-5,36	25,33
AR 1:7:2	22,54	16,8	-5,74	25,47
Rata-rata				24,57

Tabel 4. 13 Perbedaan Kandungan H₂ Zona Reduksi

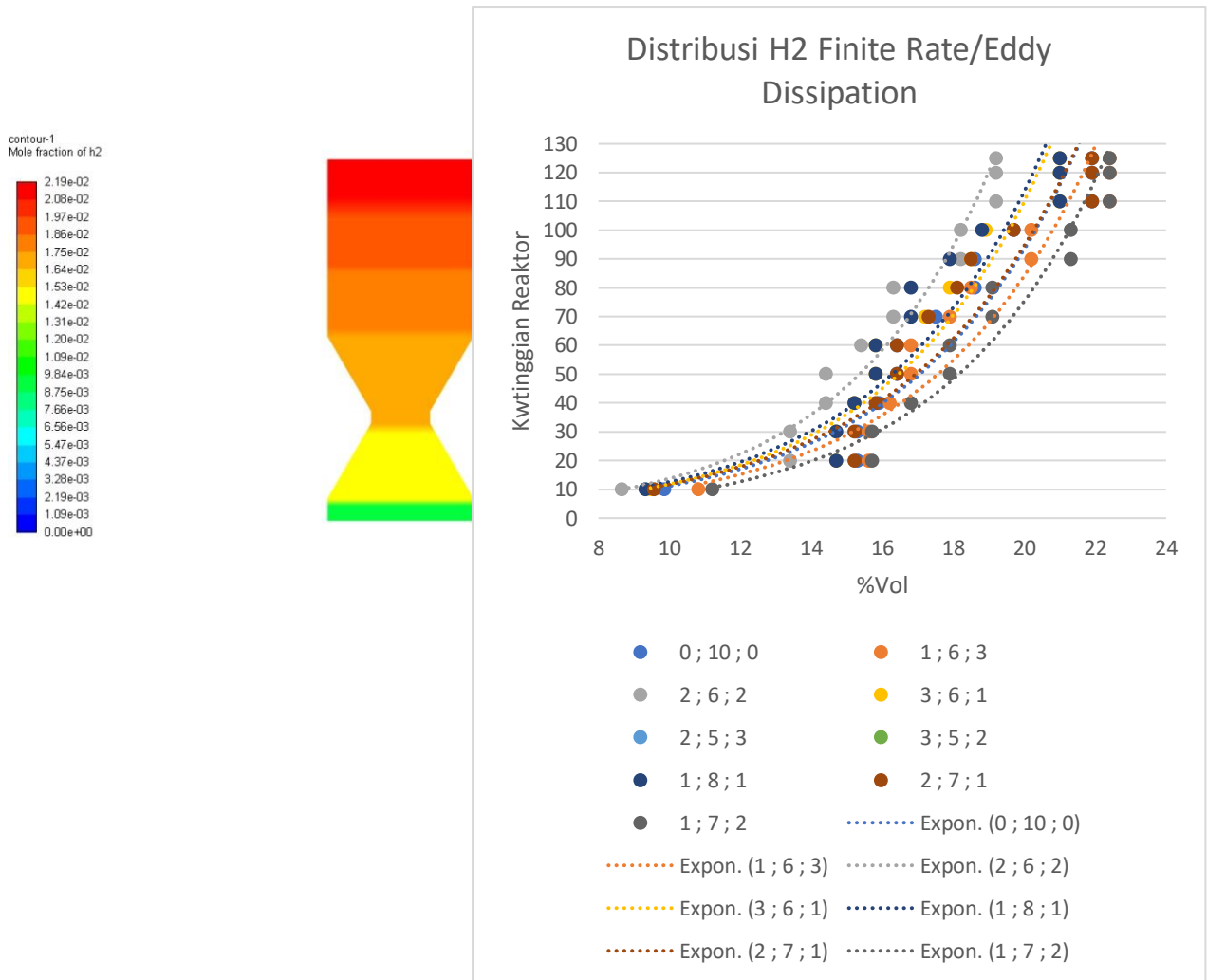
Variasi	Eksperimen	Numerik	ΔH_2	% Error
AR 1:8:1	17,06	9,84	-7,22	42,3212
AR 0:10:0	17,28	9,47	-7,81	45,1968
AR 1:6:3	18,39	9,56	-8,83	48,0152
AR 2:6:2	16,98	11,2	-5,78	34,04
AR 3:6:1	17,15	8,64	-8,51	49,621
AR 2:7:1	17,16	9,32	-7,84	45,6876
AR 1:7:2	18,54	10,8	-7,74	41,7476
Rata-rata				43,8

Pada zona pirolisis nilai error terbesar menggunakan variasi dengan nilai dan error terkecil menggunakan variasi dengan nilai. Pada zona oksidasi nilai error terbesar menggunakan variasi dengan nilai dan error terkecil menggunakan variasi dengan nilai. Pada zona reduksi nilai error terbesar menggunakan variasi dengan nilai dan error terkecil menggunakan variasi dengan nilai. Perbedaan disebabkan model numerik dianggap *steady* dan tidak menggunakan *multiphase*, simplifikasi desain agar memudahkan dalam melakukan simulasi sehingga hasil yang didapatkan lebih ideal dan bahan bakar RDF pada metode numerik diasumsikan sebagai partikel sedangkan pada metode eksperimen tidak berbentuk partikel. Dan juga pada metode eksperimen, dimungkinkan terjadinya *losses* sehingga terjadi perbedaan dengan metode numerik.

4.3.2.2 Analisis Distribusi Persentase Volumetrik H₂ dengan Model Reaksi *Finite Rate/Eddy Dissipation*.

Hasil numerik distribusi persentase volumetrik H₂ dengan menggunakan setting temperatur 1000°C dan 9 variasi AR ditunjukkan pada Gambar 4.10. Zona pirolisis menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 18,2%-21,3%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 1:7:2, AR 1:6:3, AR 0:10:0, AR 2:7:1, AR 3:6:1, AR 1:8:1, AR 2:6:2. Zona oksidasi menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 14,9%-17,9%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai

terendah adalah variasi AR 1:7:2, AR 1:6:3, AR 0:10:0, AR 2:7:1, AR 3:6:1, AR 1:8:1, AR 2:6:2. Zona reduksi menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 13,73%-16,06%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 1:7:2, AR 1:6:3, AR 0:10:0, AR 2:7:1, AR 3:6:1, AR 1:8:1, AR 2:6:2.



Gambar 4. 13 Distribusi H₂ pada tiga zona model reaksi *finite rate/eddy dissipation*

Nilai persentase volumetrik H₂ tinggi pada zona pirolisis dikarenakan reaksi yang terjadi adalah reaksi R1: $C_xH_yO_z \rightarrow C(s)+CO(g)+CO_2(g)+ CH_4(g)+H_2(g) +H_2O(g)$ lalu menurun seiring turunnya ketinggian reactor diakibatkan pada zona oksidasi reaksi yang terjadi adalah reaksi R8: $CO(g) + 3H_2(g) \rightarrow CH_4(g) + H_2O(g)$. Pada zona reduksi terjadi reaksi R11: $C(s) + 2H_2(g) \rightarrow CH_4(g)$ sehingga nilai persentase volumetrik H₂ menurun.

Berdasarkan urutan nilai dari semua variasi untuk tiga zona dapat dikatakan bahwa trendline hasil numerik sesuai dengan eksperimen. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan model reaksi kimia *finite rate/eddy dissipation* sudah tepat. Namun terdapat perbedaan nilai antara metode eksperimen dan numerik yang dapat dilihat pada Tabel 4.14-4.16.

Tabel 4. 14 Perbedaan Kandungan H₂ Zona Pirolisis

Variasi	Eksperimen	Numerik	ΔH_2	% Error
AR 1:8:1	23,06	17,16	-5,9	25,59
AR 0:10:0	23,28	18,23	-5,05	21,69
AR 1:6:3	24,39	18,86	-5,53	22,67
AR 2:6:2	22,98	16,93	-6,05	26,33
AR 3:6:1	23,15	17,86	-5,29	22,85
AR 2:7:1	23,16	17,93	-5,23	22,58
AR 1:7:2	24,54	19,83	-4,71	19,19
Rata-rata				22,99

Tabel 4. 15 Perbedaan Kandungan H₂ Zona Oksidasi

Variasi	Eksperimen	Numerik	ΔH_2	% Error
AR 1:8:1	21,06	15,8	-5,26	24,98
AR 0:10:0	21,28	16,4	-4,88	22,93
AR 1:6:3	22,39	16,8	-5,59	24,97
AR 2:6:2	20,98	14,9	-6,08	28,98
AR 3:6:1	21,15	15,8	-5,35	25,30
AR 2:7:1	21,16	16,4	-4,76	22,50
AR 1:7:2	22,54	17,9	-4,64	20,59
Rata-rata				24,32

Tabel 4. 16 Perbedaan Kandungan H₂ Zona Reduksi

Variasi	Eksperimen	Numerik	ΔH_2	% Error
AR 1:8:1	17,06	9,32	-7,74	45,37
AR 0:10:0	17,28	9,84	-7,44	43,06
AR 1:6:3	18,39	10,8	-7,59	41,27
AR 2:6:2	16,98	8,64	-8,34	49,12
AR 3:6:1	17,15	9,47	-7,68	44,78
AR 2:7:1	17,16	9,56	-7,6	44,29
AR 1:7:2	18,54	11,2	-7,34	39,59
Rata-rata				43,92

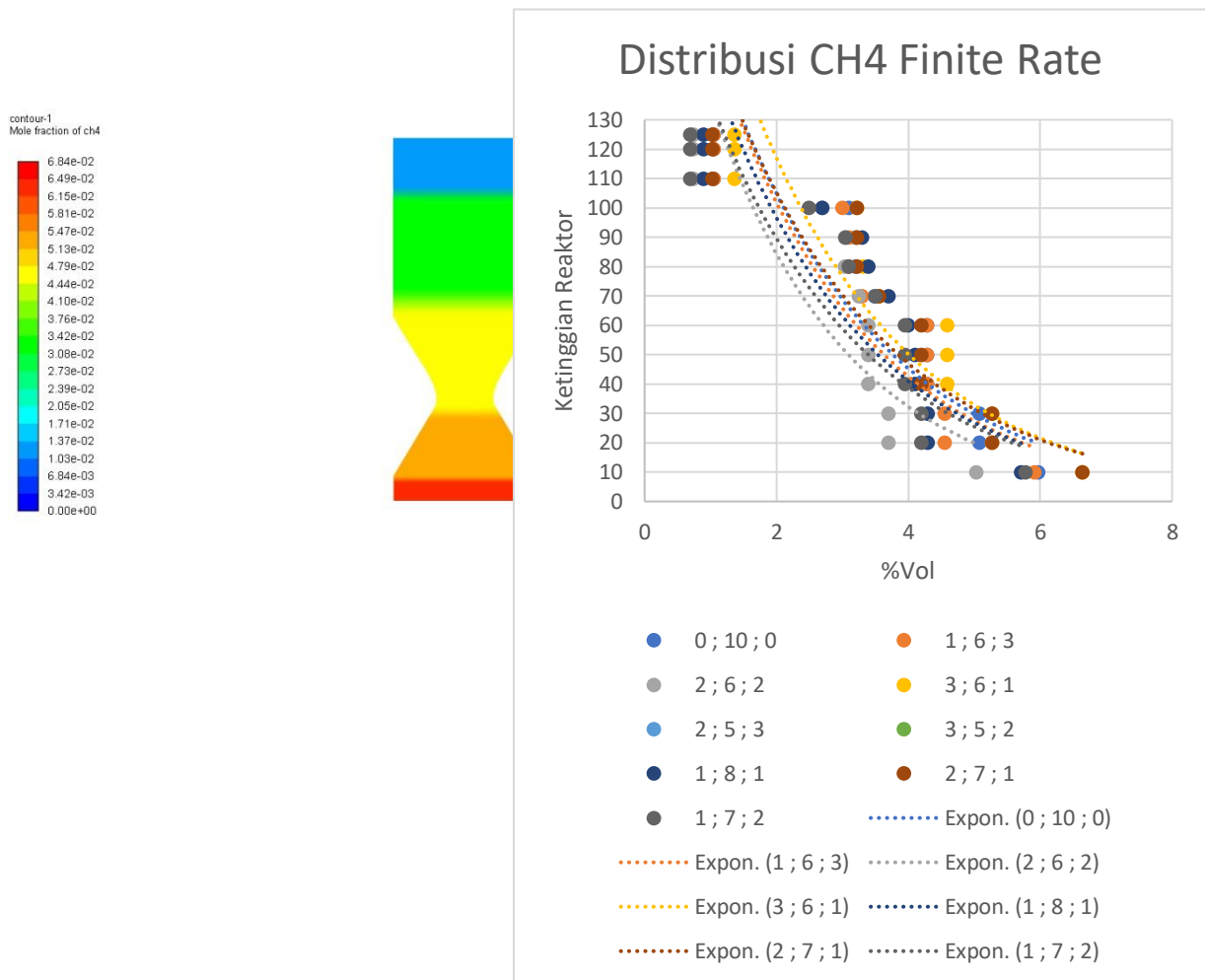
Pada zona pirolisis nilai error terbesar menggunakan variasi dengan nilai dan error terkecil menggunakan variasi dengan nilai. Pada zona oksidasi nilai error terbesar menggunakan variasi dengan nilai dan error terkecil menggunakan variasi dengan nilai. Pada zona reduksi nilai error terbesar menggunakan variasi dengan nilai dan error terkecil menggunakan variasi dengan nilai. Perbedaan disebabkan model numerik dianggap *steady* dan tidak menggunakan *multiphase*, simplifikasi desain agar memudahkan dalam melakukan simulasi sehingga hasil yang didapatkan lebih ideal dan bahan bakar RDF pada metode numerik diasumsikan sebagai partikel sedangkan pada metode eksperimen tidak berbentuk partikel. Dan juga pada metode eksperimen, dimungkinkan terjadinya *losses* sehingga terjadi perbedaan dengan metode numerik.

4.3.3 Analisis Distribusi Persentase Volumetrik CH₄

Kandungan CH₄ hasil eksperimen sangat kecil untuk semua variasi AR sehingga gas CH₄ tidak terbaca saat pengujian *gas chromatography*.

4.3.3.1 Analisis Distribusi Persentase Volumetrik CH4 dengan Model Reaksi *Finite Rate*.

Hasil numerik distribusi persentase volumetrik CH4 dengan menggunakan setting temperatur 1000°C dan 9 variasi AR ditunjukkan pada Gambar 4.11. Zona pirolisis menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 3,04%-3,3%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 1:8:1, AR 2:7:1, AR 3:6:1, AR 0:10:0, AR 1:6:3, AR 1:7:2, AR 2:6:2. Zona oksidasi menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 3,4%-4,59%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 3:6:1, AR 0:10:0, AR 1:6:3, AR 2:7:1, AR 1:8:1, AR 1:7:2, AR 2:6:2. Zona reduksi menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 5,03%-6,64%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 2:7:1, AR 3:6:1, AR 0:10:0, AR 1:6:3, AR 1:7:2, AR 1:8:1, AR 2:6:2.



Gambar 4. 14 Distribusi CH4 pada tiga zona model reaksi *finite rate*

Nilai persentase volumetrik CH4 rendah pada zona pirolisis dikarenakan reaksi yang terjadi adalah reaksi R1 : $C_xH_yO_z \rightarrow C(s)+CO(g)+CO_2(g)+ CH_4(g)+H_2(g) +H_2O(g)$ lalu meningkat seiring turunnya ketinggian reactor diakibatkan pada zona oksidasi reaksi yang terjadi adalah reaksi R8 : $CO(g) + 3H_2(g) \rightarrow CH_4(g) + H_2O(g)$. Pada zona reduksi terjadi reaksi R11 : $C(s) + 2H_2(g) \rightarrow CH_4(g)$ sehingga nilai persentase volumetrik CH4 meningkat.

Berdasarkan urutan nilai dari semua variasi untuk tiga zona dapat dikatakan bahwa trendline hasil numerik sesuai dengan eksperimen. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan

model reaksi kimia *finite rate/eddy dissipation* sudah tepat. Namun terdapat perbedaan nilai antara metode eksperimen dan numerik yang dapat dilihat pada Tabel 4.17-4.19.

Tabel 4. 17 Perbedaan Kandungan CH4 Zona Pirolisis

Variasi	Eksperimen	Numerik	Δ CH4
AR 1:8:1	0	3,3	3,3
AR 0:10:0	0	3,2	3,2
AR 1:6:3	0	3,1	3,1
AR 2:6:2	0	3,04	3,04
AR 3:6:1	0	3,22	3,22
AR 2:7:1	0	3,22	3,22
AR 1:7:2	0	3,05	3,05

Tabel 4. 18 Perbedaan Kandungan CH4 Zona Oksidasi

Variasi	Eksperimen	Numerik	Δ CH4
AR 1:8:1	0	4,1	4,1
AR 0:10:0	0	4,29	4,29
AR 1:6:3	0	4,29	4,29
AR 2:6:2	0	3,4	3,4
AR 3:6:1	0	4,59	4,59
AR 2:7:1	0	4,2	4,2
AR 1:7:2	0	3,95	3,95

Tabel 4. 19 Perbedaan Kandungan CH4 Zona Reduksi

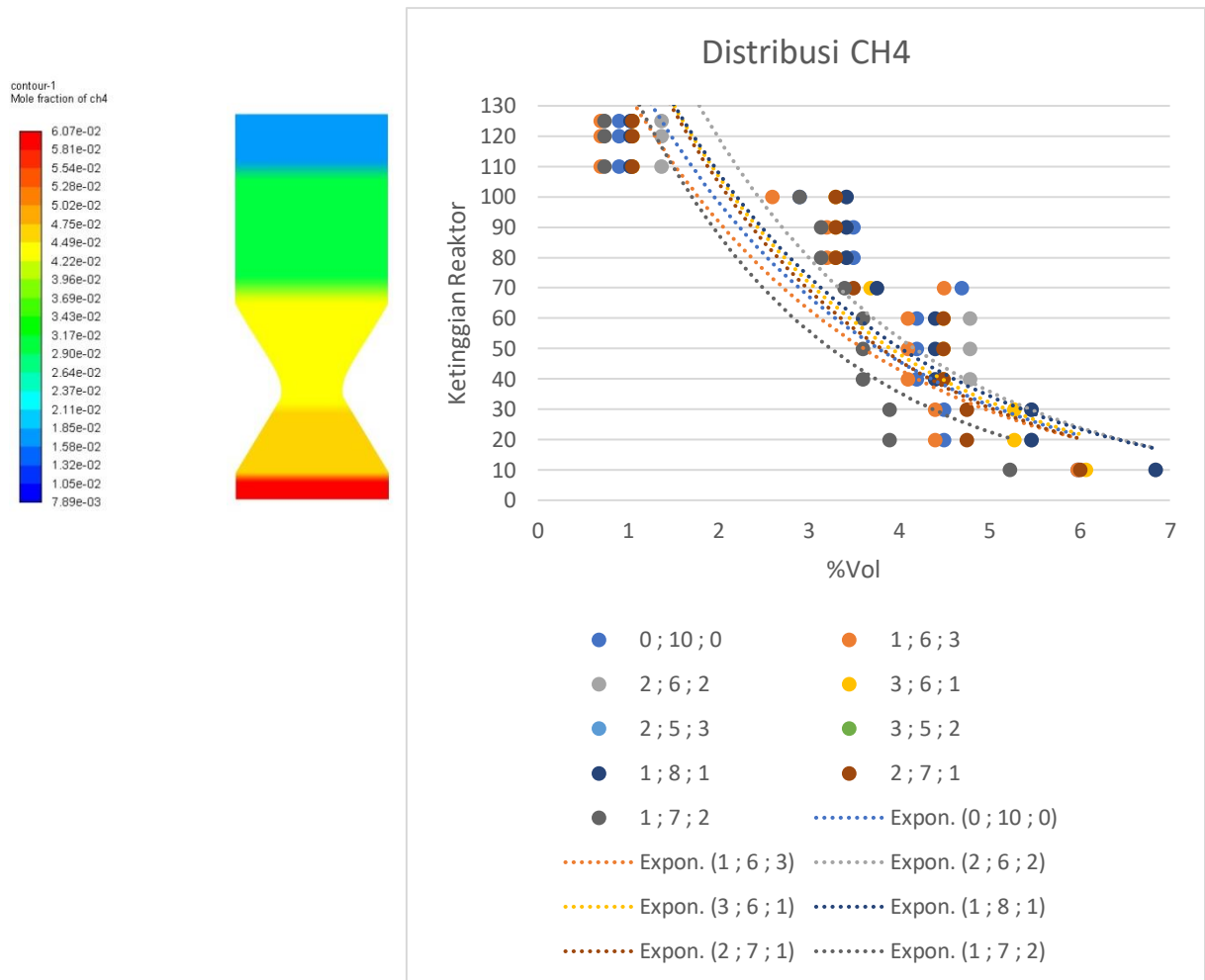
Variasi	Eksperimen	Numerik	Δ CH4
AR 1:8:1	0	5,71	5,71
AR 0:10:0	0	5,97	5,97
AR 1:6:3	0	5,91	5,91
AR 2:6:2	0	5,03	5,03
AR 3:6:1	0	6,64	6,64
AR 2:7:1	0	6,64	6,64
AR 1:7:2	0	5,78	5,78

Perbedaan disebabkan model numerik dianggap *steady* dan tidak menggunakan *multiphase*, simplifikasi desain agar memudahkan dalam melakukan simulasi sehingga hasil yang didapatkan lebih ideal dan bahan bakar RDF pada metode numerik diasumsikan sebagai partikel sedangkan pada metode eksperimen tidak berbentuk partikel. Dan juga pada metode eksperimen, dimungkinkan terjadinya *losses* sehingga terjadi perbedaan dengan metode numerik.

4.3.3.2 Analisis Distribusi Persentase Volumetrik CH4 dengan Model Reaksi *Finite Rate/Eddy Dissipation*.

Hasil numerik distribusi persentase volumetrik CH4 dengan menggunakan setting temperatur 1000°C dan 9 variasi AR ditunjukkan pada Gambar 4.12. Zona pirolisis menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 3,14%-3,5%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 0:10:0, AR 2:6:2, AR 1:8:1, AR 2:7:1, AR 3:6:1, AR 1:6:3, AR 1:7:2. Zona oksidasi menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 3,6%-4,79%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai

terendah adalah variasi AR 2:6:2, AR 2:7:1, AR 3:6:1, AR 1:8:1, AR 0:10:0, AR 1:6:3, AR 1:7:2. Zona reduksi menunjukkan interval persentase volumetrik sebesar 5,23%-6,84%, urutan persentase volumetrik dari yang tertinggi sampai terendah adalah variasi AR 1:7:2, AR 1:6:3, AR 0:10:0, AR 2:7:1, AR 3:6:1, AR 1:8:1, AR 2:6:2.



Gambar 4. 15 Distribusi CH₄ pada tiga zona model reaksi *finite rate/eddy dissipation*

Nilai persentase volumetrik CH₄ rendah pada zona pirolisis dikarenakan reaksi yang terjadi adalah reaksi R1 : $C_xH_yO_z \rightarrow C(s)+CO(g)+CO_2(g)+ CH_4(g)+H_2(g) +H_2O(g)$ lalu meningkat seiring turunnya ketinggian reactor diakibatkan pada zona oksidasi reaksi yang terjadi adalah reaksi R8 : $CO(g) + 3H_2(g) \rightarrow CH_4(g) + H_2O(g)$. Pada zona reduksi terjadi reaksi R11 : $C(s) + 2H_2(g) \rightarrow CH_4(g)$ sehingga nilai persentase volumetrik CH₄ meningkat.

Berdasarkan urutan nilai dari semua variasi untuk tiga zona dapat dikatakan bahwa trendline hasil numerik sesuai dengan eksperimen. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan model reaksi kimia *finite rate/eddy dissipation* sudah tepat. Namun terdapat perbedaan nilai antara metode eksperimen dan numerik yang dapat dilihat pada Tabel 4.20-4.22.

Tabel 4. 20 Perbedaan Kandungan CH₄ Zona Pirolisis

Variasi	Eksperimen	Numerik	ΔCH_4
AR 1:8:1	0	3,42	3,42

AR 0:10:0	0	3,5	3,5
AR 1:6:3	0	3,2	3,2
AR 2:6:2	0	3,42	3,42
AR 3:6:1	0	3,3	3,3
AR 2:7:1	0	3,3	3,3
AR 1:7:2	0	3,14	3,14

Tabel 4. 21 Perbedaan Kandungan CH₄ Zona Oksidasi

Variasi	Eksperimen	Numerik	Δ CH ₄
AR 1:8:1	0	4,4	4,4
AR 0:10:0	0	4,2	4,2
AR 1:6:3	0	4,1	4,1
AR 2:6:2	0	4,79	4,79
AR 3:6:1	0	4,49	4,49
AR 2:7:1	0	4,49	4,49
AR 1:7:2	0	3,6	3,6

Tabel 4. 22 Perbedaan Kandungan CH₄ Zona Reduksi

Variasi	Eksperimen	Numerik	Δ CH ₄
AR 1:8:1	0	6,84	6,84
AR 0:10:0	0	5,98	5,98
AR 1:6:3	0	5,98	5,98
AR 2:6:2	0	6,84	6,84
AR 3:6:1	0	6,07	6,07
AR 2:7:1	0	6,01	6,01
AR 1:7:2	0	5,23	5,23

Perbedaan disebabkan model numerik dianggap *steady* dan tidak menggunakan *multiphase*, simplifikasi desain agar memudahkan dalam melakukan simulasi sehingga hasil yang didapatkan lebih ideal dan bahan bakar RDF pada metode numerik diasumsikan sebagai partikel sedangkan pada metode eksperimen tidak berbentuk partikel. Dan juga pada metode eksperimen, dimungkinkan terjadinya *losses* sehingga terjadi perbedaan dengan metode numerik.

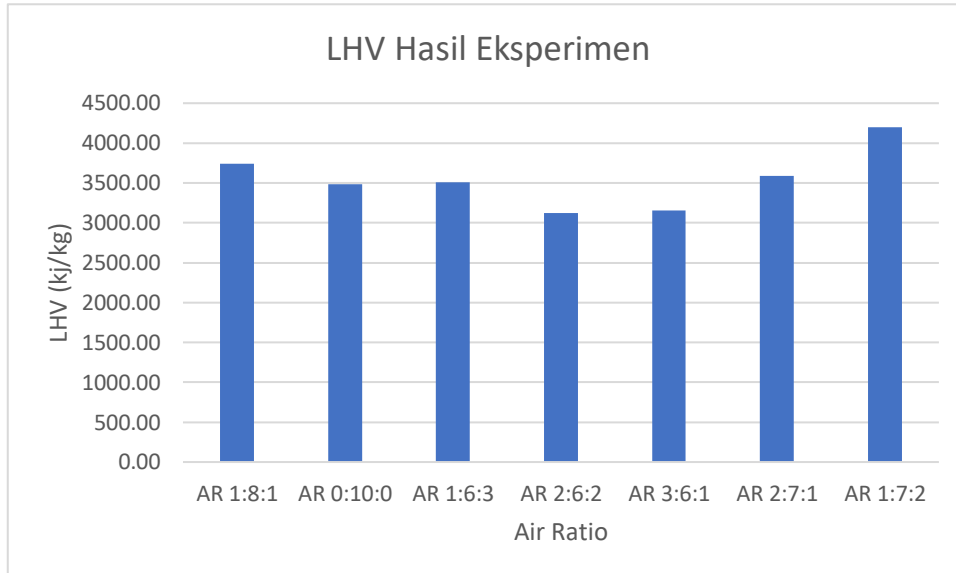
4.4 Lower Heating Value (LHV) Syngas

Lower heating value syngas merupakan nilai kalor rendah yang terdapat didalam *syngas*. LHV tersebut dapat diketahui dengan mengukur besarnya jumlah gas yang mudah terbakar seperti CO, H₂ dan CH₄ yang diperoleh selama proses gasifikasi. Oleh sebab itu besar kecilnya gas yang mudah terbakar selama proses gasifikasi dapat mempengaruhi terhadap LHV yang dihasilkan. Komposisi gas mudah terbakar (CO, H₂ dan CH₄) pada *syngas* memiliki nilai LHV masing – masing, dimana nilai tersebut lebih jelasnya ditunjukkan pada Tabel 4.23.

Tabel 4. 23 Nilai kalor gas mudah terbakar

CO (kJ/m ³)	H ₂ (kJ/m ³)	CH ₄ (kJ/m ³)
12633	10783	35883

Berdasarkan dari nilai masing – masing LHV gas mudah terbakar dan hasil komposisi *syngas* mudah terbakar yang diperoleh saat pengambilan *syngas*, maka dapat dilakukan untuk mengetahui besarnya nilai LHV *syngas*. Berikut LHV hasil eksperimen :



Gambar 4. 16 Grafik lower heating value hasil eksperimen

Untuk mengetahui LHV *syngas* dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan 2.2, di bawah ini merupakan contoh perhitungan LHV *syngas* dengan menggunakan data komposisi gas menggunakan variasi AR 1:7:2 dan model reaksi *finite rate/eddy dissipation* hasilnya sebagai berikut:

- Y_i untuk gas CO = 21,5% = 0,216
- Y_i untuk gas H₂ = 9,32% = 0,112
- Y_i untuk gas CH₄ = 6,84% = 0,0523

Maka nilai LHV *syngas* diperoleh sebagai berikut:

$$LHV_{Syngas} = \sum_{i=1}^n (Y_i \cdot LHV_i)$$

$$LHV_{Syngas} = \sum_{i=1}^n (0,215 \cdot 12633) + (0,0932 \cdot 10783) + (0,0684 \cdot 35833)$$

$$LHV_{Syngas} = 6172 \frac{kJ}{m^3}$$

Hasil dari LHV *syngas* satuannya masih dalam bentuk kJ/m³, maka perlu mengkonversi satuan tersebut menjadi kJ/kg. Sehingga perlu dibagi densitas dari masing – masing *syngas* yang dihasilkan, densitas dapat dihitung menggunakan persamaan di bawah ini.

$$\rho_{syngas} = \sum_{i=1}^n (Y_i \cdot \rho_{syngas})$$

Sebagai contoh perhitungan densitas menggunakan data variasi AR 1:8:1 dan model reaksi *finite rate/eddy dissipation* dimana densitas masing – masing gas diperoleh dari Tabel A4 *thermophysical properties of gases at atmospheric pressure* (Incropera, 2007) dan hasilnya seperti dibawah ini.

- 21,6% CO dengan $\rho = 1,0303 \text{ kg/m}^3$
- 11,2% H₂ dengan $\rho = 0,0741 \text{ kg/m}^3$
- 5,23% CH₄ dengan $\rho = 0,5227 \text{ kg/m}^3$
- 8,81% CO₂ dengan $\rho = 1,6250 \text{ kg/m}^3$
- 47,84% N₂ dengan $\rho = 1,0305 \text{ kg/m}^3$
- 5,32% O₂ dengan $\rho = 1,1779 \text{ kg/m}^3$

$$\rho_{\text{syngas}} = \sum_{i=1}^n (0,215 \cdot 1,0303) + (0,0932 \cdot 0,0741) + (0,068 \cdot 0,5227) + (0,081 \cdot 1,625) + (0,4784 \cdot 1,0305) + (0,0532 \cdot 1,1799)$$

$$\rho_{\text{syngas}} = 0,934136 \text{ kg/m}^3$$

$$LHV_{\text{syngas}} = \frac{6172 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}}{0,934136 \text{ kg/m}^3}$$

$$LHV_{\text{syngas}} = 6538,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Jadi dari perhitungan LHV dari kedua reaksi kimia dan semua variasi AR yang digunakan dapat dilihat pada table 4.24 dan 4.25.

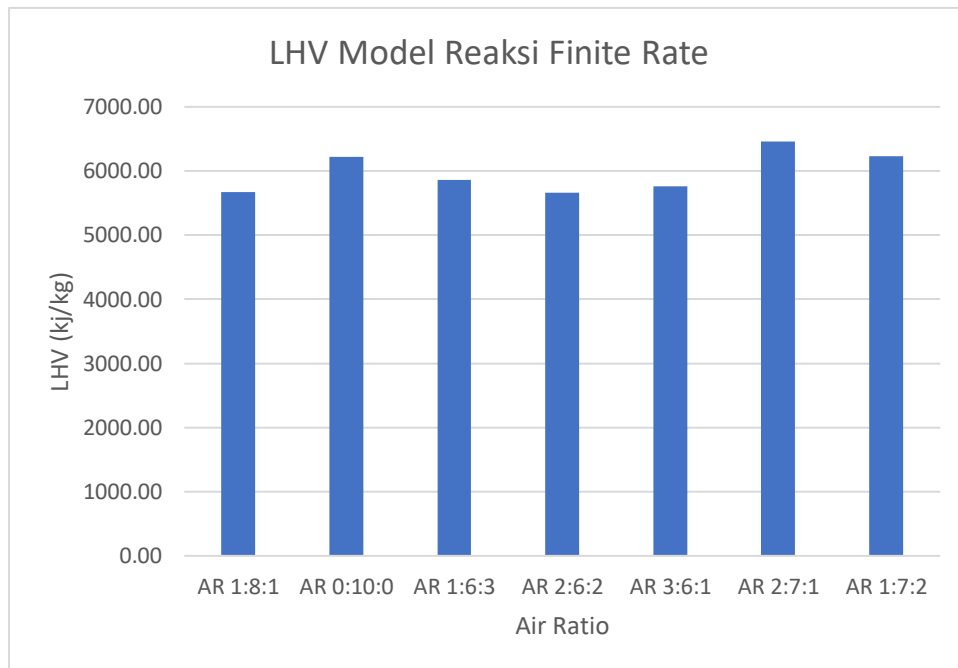
Tabel 4. 24 LHV model reaksi *finite rate*.

Variasi	%CO	LHV CO	%H ₂	LHV H ₂	%CH ₄	LHV CH ₄	LHV (kJ/kg)
AR 1:8:1	0,215	12633	0,0932	10783	0,0684	35833	6538,1
AR 0:10:0	0,19	12633	0,0984	10783	0,0598	35833	5940,52
AR 1:6:3	0,181	12633	0,108	10783	0,0598	35833	5988,01
AR 2:6:2	0,172	12633	0,0864	10783	0,0684	35833	5844,67
AR 3:6:1	0,178	12633	0,0947	10783	0,0607	35833	5752,89
AR 2:7:1	0,205	12633	0,0956	10783	0,0601	35833	6104,45
AR 1:7:2	0,216	12633	0,112	10783	0,0523	35833	6220,18

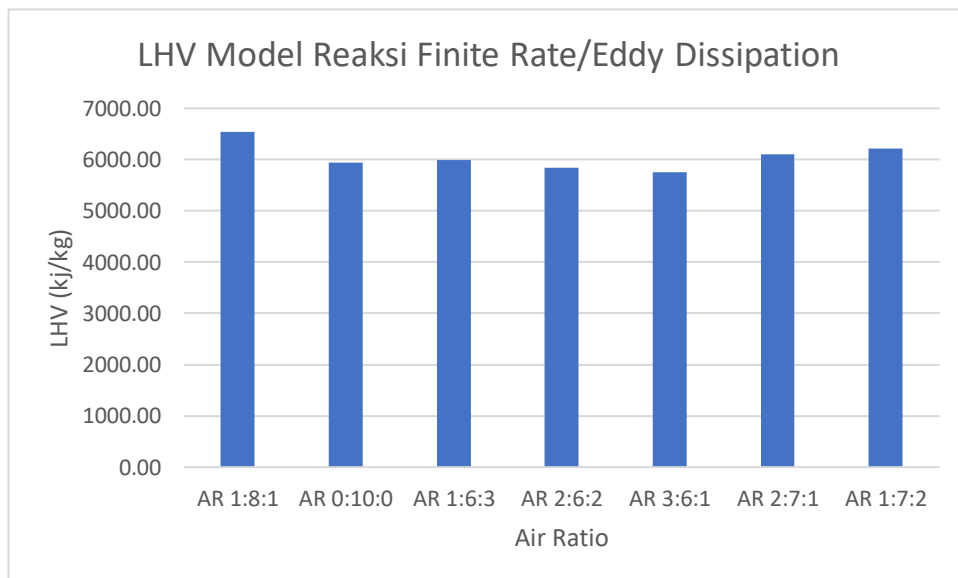
Tabel 4. 25 LHV model reaksi *finite rate/eddy dissipation*.

Variasi	%CO	LHV CO	%H ₂	LHV H ₂	%CH ₄	LHV CH ₄	LHV (kJ/kg)
AR 1:8:1	0,178	12633	0,0984	10783	0,0571	35833	5669,09
AR 0:10:0	0,216	12633	0,0947	10783	0,0597	35833	6218,98
AR 1:6:3	0,19	12633	0,0956	10783	0,0591	35833	5863,09
AR 2:6:2	0,181	12633	0,112	10783	0,0503	35833	5663,98
AR 3:6:1	0,172	12633	0,0864	10783	0,0664	35833	5763,17
AR 2:7:1	0,215	12633	0,0932	10783	0,0664	35833	6455,3
AR 1:7:2	0,205	12633	0,108	10783	0,0578	35833	6229,16

Adapun perbandingan LHV dari semua variasi AR dapat dilihat pada Gambar 4.14



(a)

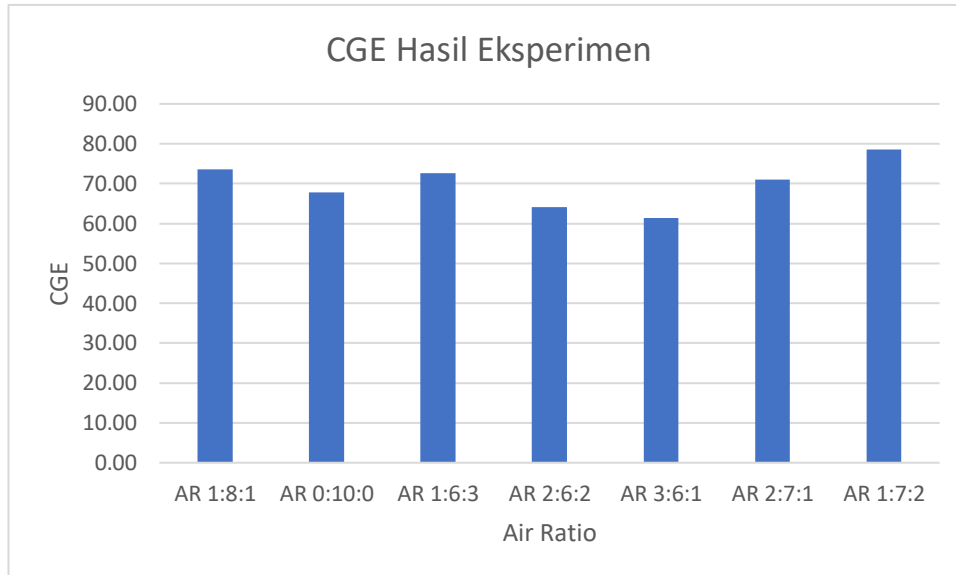


(b)

Gambar 4. 17 Grafik *lower heating value* (a) model reaksi *finite rate* (b) model reaksi *finite rate/eddy dissipation*

4.5 Cold Gas Efficiency (CGE)

Cold gas efficiency bertujuan untuk mengetahui efisiensi pada proses gasifikasi yaitu dengan menghitung perbandingan antara energi keluar (*syngas*) dengan energi masuk (biomassa). Berikut nilai cold gas efficiency hasil eksperimen.



Gambar 4. 18 Grafik *cold gas efficiency* hasil eksperimen

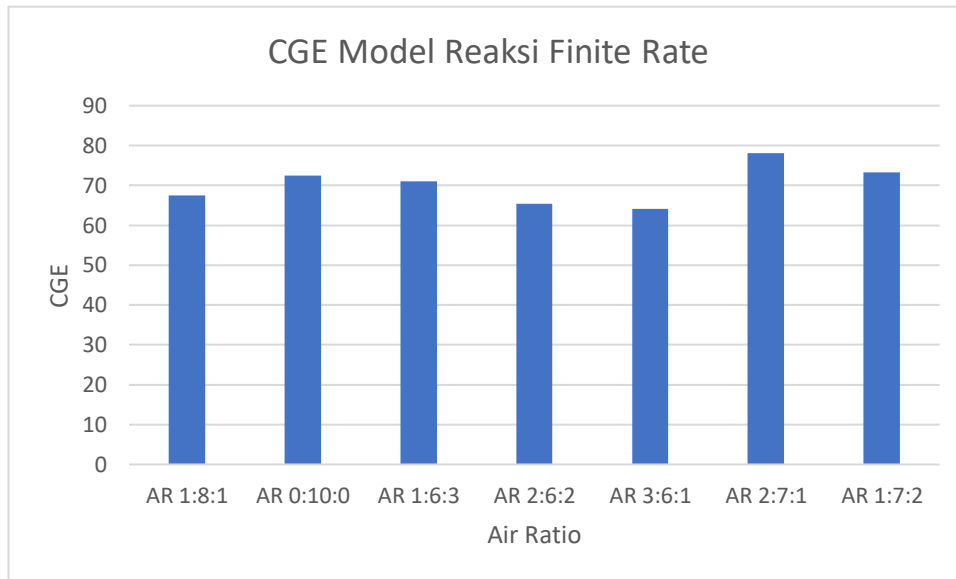
Di bawah ini merupakan contoh perhitungan efisiensi gas dingin dengan menggunakan variasi AR 1:7:2 dan model reaksi finite rate/eddy dissipation. Adapun data tersebut yaitu laju alir *syngas* sebesar 0,00298 kg/s, laju alir biomassa sebesar 0,0022 kg/s, LHV *syngas* 6538,1kj/kg, LHV biomassa 22976,624 kj/kg. Jadi perhitungan apat dilakukan seperti di bawah ini.

$$\eta_{cg} = \frac{m_{syngas} * LHV_g}{m_{biomass} * LHV_b} \times 100\%$$

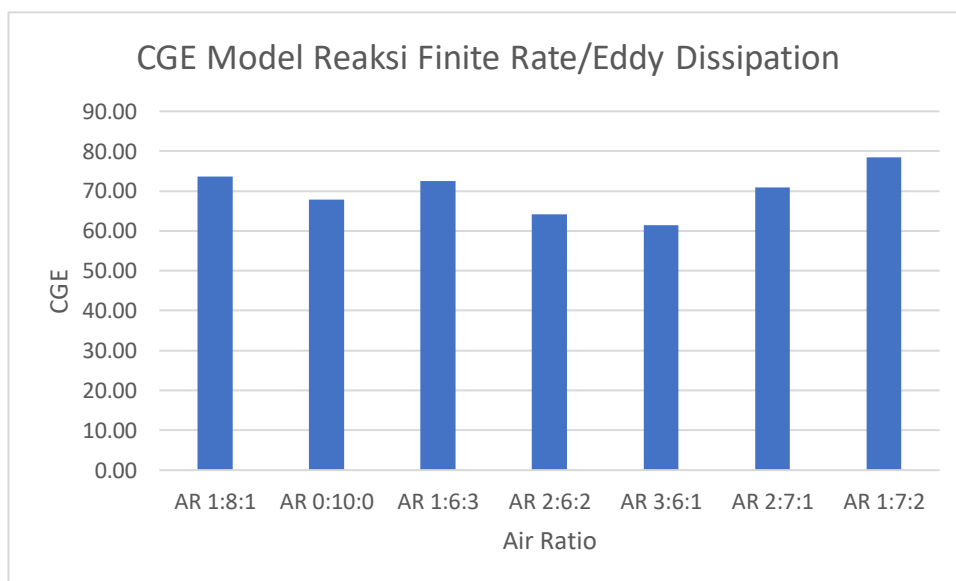
$$\eta_{cg} = \frac{0,00635 \cdot 6538,1}{0,0022 * 22976,624} \times 100\%$$

$$\eta_{cg} = 78,52\%$$

Jadi dari perhitungan CGE dari kedua reaksi kimia dan semua variasi AR yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.16.



(a)



(b)

Gambar 4. 19 Grafik *cold gas efficiency* (a) model reaksi *finite rate* (b) model reaksi *finite rate/eddy dissipation*

Peningkatan CGE dipengaruhi oleh nilai LHV *syngas* dan LHV biomassa, sehingga apabila nilai LHV *syngas* nilainya tinggi dan LHV biomassa rendah maka nilai CGE akan semakin tinggi. Sedangkan LHV *syngas* dipengaruhi oleh jumlah komposisi *syngas* mudah terbakar yang dihasilkan pada proses gasifikasi. Oleh sebab itu temperatur yang digunakan sangat penting serta dapat mempengaruhi ketika ingin memperoleh CGE yang tinggi, karena temperatur tersebut dapat mempengaruhi jumlah besar kecilnya gas mudah terbakar yang diperoleh.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian numerik dengan menggunakan *gasifier* masukan udara tiga tingkat dan model reaksi kimia menggunakan bahan bakar *refuse derived fuel* (RDF) dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Karakteristik reaktor gasifikasi yang didapatkan dengan penambahan variasi sebagai berikut :
 - Distribusi temperatur untuk model reaksi finite rate adalah zona *drying* temperaturnya menunjukkan interval sebesar 124°C-220°C, zona pirolisis menunjukkan interval temperaturnya sebesar 600°C-667°C, zona reduksi menunjukkan temperaturnya menunjukkan interval sebesar 317°C-365°C. Distribusi temperatur untuk model reaksi finite rate/eddy dissipation adalah zona *drying* temperaturnya menunjukkan interval sebesar 207°C-267°C, zona pirolisis menunjukkan interval temperaturnya sebesar 551°C-664°C, zona reduksi menunjukkan temperatur yang dihasilkan intervalnya sebesar 412°C-497°C.
 - Persentase volumetrik CO untuk model reaksi finite rate dengan kandungan tertinggi adalah variasi AR 0:10:0 sebesar 21,6% dan terendah variasi AR 3:6:1 sebesar 17,2%. Persentase volumetrik CO untuk model reaksi finite rate/eddy dissipation dengan kandungan tertinggi adalah variasi AR 1:7:2 sebesar 21,6% dan terendah variasi AR 2:6:2 sebesar 17,2%. Persentase volumetrik H₂ untuk model reaksi finite rate dengan kandungan tertinggi adalah variasi AR 2:6:2 sebesar 11,1% dan terendah variasi AR 3:6:1 sebesar 8,64%. Persentase volumetrik H₂ untuk model reaksi finite rate/eddy dissipation dengan kandungan tertinggi adalah variasi AR 1:7:2 sebesar 11,2% dan terendah variasi AR 2:6:2 sebesar 8,64%. Persentase volumetrik CH₄ untuk model reaksi finite rate dengan kandungan tertinggi adalah variasi AR 2:7:1 sebesar 6,64% dan terendah variasi AR 2:6:2 sebesar 5,03%. Persentase volumetrik CH₄ untuk model reaksi finite rate/eddy dissipation dengan kandungan tertinggi adalah variasi AR 1:8:1 sebesar 6,84% dan terendah variasi AR 1:7:2 sebesar 5,23%.
 - LHV tertinggi untuk model reaksi finite rate adalah variasi AR 2:7:1 sebesar 6455,3 kJ/kg dan terendah variasi AR 2:6:2 sebesar 5663,98 kJ/kg. LHV tertinggi untuk model reaksi finite rate/eddy dissipation adalah variasi AR 1:8:1 sebesar 6538,3 kJ/kg dan terendah variasi AR 3:6:1 sebesar 5752,89 kJ/kg. CGE tertinggi untuk model reaksi finite rate adalah variasi AR 2:7:1 sebesar 78,15% dan terendah variasi AR 3:6:1 sebesar 64,18%. CGE tertinggi untuk model reaksi finite rate/eddy dissipation adalah variasi AR 1:7:2 sebesar 83,06% dan terendah variasi AR 3:6:1 sebesar 68,63%.
2. Hasil simulasi numerik yang divalidasi dengan hasil eksperimen memiliki nilai *error* rata-rata pada temperatur *gasifier* (zona *drying*, pirolisis, oksidasi, reduksi), komposisi CO dan H₂ masing-masing sebesar 19,3%, 0,97%, 13,11%, 16,97%, 11,41%, 6,2% untuk model reaksi finite rate. Sedangkan untuk model reaksi nilai *error* rata-rata pada temperatur *gasifier* (zona *drying*, pirolisis, oksidasi, reduksi), komposisi CO dan H₂ masing-masing sebesar 2,07%, 0%, 4,78%, 12,09%, 5,31%, 6,53%. Model reaksi finite rate/eddy dissipation memiliki nilai *error* dan trendline yang lebih baik daripada model reaksi finite rate.

5.2 Saran

Beberapa hal yang perlu diteliti lebih lanjut adalah:

1. Permodelan yang digunakan *multiphase* agar hasil yang didapat lebih akurat
2. Menggunakan UDF (*user defined function*) pada reaksi-reaksi heterogen agar grafik laju reaksi dapat diketahui
3. Membandingkan model reaksi lainnya agar dapat menentukan model reaksi terbaik untuk penelitian serupa

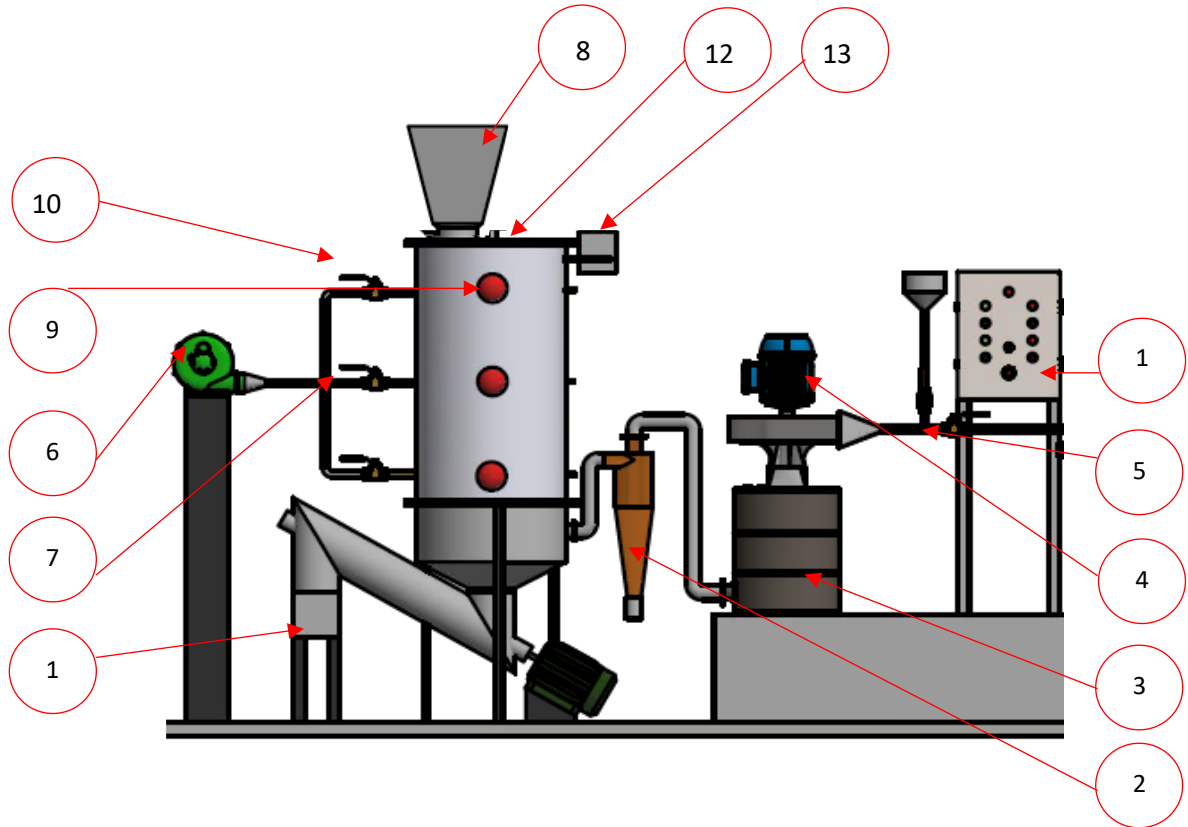
DAFTAR PUSTAKA

- Basu, P. (2013), *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Academic press, Burlington, USA.
- Hutabarat, I. N., Priyambada, I. B., Samudro, G., Lokahita, B., Syafrudin, S., Wardhana, I. W., & Hadiwidodo, M. (2018), "Potensi Material Sampah Combustible pada Zona Pasif TPA Jatibarang Semarang sebagai Bahan Baku RDF (Refuse Derived Fuel)", *Jurusan Teknik Mesin*, Vol. 07, No. 1, hal. 24-28.
- Reed, Thomas B., and Das, A. (1988). *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems, Solar Technical Information Program*, Solar Energy Research Institute, U.S. Departement of Energy.
- Ribeiro, A., C. Vilarinho, J. Araújo, and J. Carvalho. (2017), "Refuse Derived Fuel (RDF) Gasification Using Different Gasifying Agents," *Proceedings of the ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2017*, Vol. 6.
- Arena, U (2012), *Process and Technological Aspects of Municipal Solid Waste Gasification - A Review*, *Waste Management* 32 (2012) 625–639
- Molino, Antonio., Chianese, Simeone., Musmarra, Dino., 2015. "Biomass Gasification Technology: The State of The Art Overview". *Journal of Energy Chemistry*. 25 (2016) 10–25
- Zhou, J., Chen, Q., Zhao, H., Cao, X., Mei, Q., Luo, Z., Cen, K. 2009. *Biomass-Oxygen Gasification in a High Temperatur Entrained-Flow Gasifier*. *State Key Laboratory of Clean Energy Utilization*, Zhejiang University. Huang zhou, China.
- Ximenes, A., 2018. Studi Eksperimental Pengaruh Air Ratio Pirolisis, Oksidasi dan Reduksi Pada Gasifikasi *Multi-stage*. Tesis. Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya.
- Ependi, D R., 2017. "Studi Eksperimental Pengaruh Temperatur Udara Proses Gasifikasi MSW terhadap Performansi Gasifier Tipe Downdraft". Tugas akhir. Teknik Mesin ITS, Surabaya.
- Harsono, 2021. "Studi Eksperimental Pengaruh Masukan Udara Tiga Tingkat Dengan Variasi Temperatur Menggunakan Sistem Kontrol Suhu Terhadap Performansi Gasifikasi Refuse Derived Fuel (RDF)". Tugas akhir. Teknik Mesin ITS, Surabaya.
- Kungkajit, Chatchai, Gumpon Prateepchaikul, and Thaniya Kaosol. (2015), "Influence of Plastic Waste for Refuse-Derived Fuel on Downdraft Gasification," *Energy Procedia*, Vol. 79, hal. 528-535.
- Saleh, Arif Rahman, dan Bambang Sudarmanta. (2018), "Experimental Investigation on Multi-Stage Downdraft Gasification: Influence of Air Ratio and Equivalent Ratio to the Gasifier Performance," *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1983, hal. 020026.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

A. Skema Alat Penelitian



Keterangan:

- | | | |
|-----------------------|--------------------------|--------------------|
| 1) <i>ash box</i> | 6) blower | 11) panel box |
| 2) <i>cyclone</i> | 7) <i>intake inlet</i> | 12) pengaduk |
| 3) <i>dry filter</i> | 8) <i>corong feeding</i> | 13) motor pengaduk |
| 4) <i>exhaust fan</i> | 9) termokopel | |
| 5) pipa aliran syngas | 10) <i>valve inlet</i> | |

B. Perhitungan CGE

1. Model reaksi *finite rate*

Variasi	LHV syngas	ni syngas	ni biomass	LHV biomass	CGE (%)
AR 1:8:1	6538,10	0,00631	0,0022	22976,62	81,62
AR 0:10:0	5940,52	0,00599	0,0022	22976,62	70,40
AR 1:6:3	5988,01	0,00662	0,0022	22976,62	78,42
AR 2:6:2	5844,67	0,00604	0,0022	22976,62	69,84
AR 3:6:1	5752,89	0,00603	0,0022	22976,62	68,63

AR 2:7:1	6104,45	0,00612	0,0022	22976,62	73,91
AR 1:7:2	6220,18	0,00675	0,0022	22976,62	83,06

2. Model reaksi *finite rate/eddy dissipation*

Variasi	LHV syngas	ni syngas	ni biomass	LHV biomass	CGE (%)
AR 1:8:1	5669,09	0,00601	0,0022	22976,62	67,40
AR 0:10:0	6218,98	0,00589	0,0022	22976,62	72,46
AR 1:6:3	5863,09	0,00612	0,0022	22976,62	70,99
AR 2:6:2	5663,98	0,00584	0,0022	22976,62	65,44
AR 3:6:1	5763,17	0,00563	0,0022	22976,62	64,19
AR 2:7:1	6455,30	0,00612	0,0022	22976,62	78,16
AR 1:7:2	6229,16	0,00595	0,0022	22976,62	73,32

JADWAL KEGIATAN

No	Nama Kegiatan	Minggu ke-															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	Studi Pustaka	■	■	■	■	■	■										
2	Simulasi				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
3	Analisa								■	■	■	■	■	■	■	■	
4	Pengolahan data										■	■	■	■	■		
5	Pelaporan kemajuan							■	■		■	■		■		■	
6	Penyusunan laporan												■	■	■	■	

BIODATA PENULIS



Penulis merupakan anak kedua dari 4 bersaudara kelahiran Probolinggo, 21 Februari 1998. Penulis menempuh pendidikan Tingkat Dasar di SD Sukoharjo II, kemudian melanjutkan Sekolah Menengah Pertama di SMPN 1 Probolinggo, kemudian melanjutkan Sekolah Menengah Atas di Sragen Bilingual Boarding School. Pada tahun 2016 penulis diterima di program S-1 Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Sepuluh Nopember dan terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP 02111640000135. Penulis aktif dalam kepanitiaan kegiatan di lingkungan kampus ITS, seperti menjadi Koordinator Divisi Perlengkapan pada acara GO GREEN DIES NATALIS ITS yang ke-57, Panitia Acara Mechanical City 2017, Panitia KMHE 2017, dan kegiatan kepanitiaan lainnya. Sehubungan dengan hasil penelitian yang dilakukan, untuk menghubungi penulis dalam rangka pemenuhan

kritik dan saran dari pembaca, dapat dilakukan melalui email: pityathifiyah@gmail.com.