



TUGAS AKHIR - TM141585

**STUDI NUMERIK PENGARUH VARIASI SUHU
UDARA *INLET* ZONA OKSIDASI PADA PROSES
GASIFIKASI PELET *MUNICIPAL SOLID WASTE*
TERHADAP KARAKTERISTIK REAKTOR TIPE
*DOWNDRAFT***

DHESA HIDAYATULLOH
NRP 0211134000009

Pembimbing:
Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT.

Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TM141585

**THE NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF
AIR TEMPERATURE INLET OXIDATION ZONE
ON THE GASIFICATION PROCESS OF
MUNICIPAL SOLID WASTE PELLETS AGAINST
THE CHARACTERISTICS OF DOWNDRAFT TYPE
REACTOR**

DHESA HIDAYATULLOH
NRP 0211134000009

Advisor :
Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT.

Department of Mechanical Engineering
Faculty Of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya 2018

**STUDI NUMERIK PENGARUH VARIASI SUHU
UDARA *INLET* ZONA OKSIDASI PADA PROSES
GASIFIKASI PELET *MUNICIPAL SOLID WASTE*
TERHADAP KARAKTERISTIK REAKTOR TIPE
*DOWNDRAFT***

TUGAS AKHIR

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

Oleh :

DHESA HIDAYATULLOH

NRP. 02111340000009

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT
NIP. 197301161997021001  (Pembimbing)
2. Dr. Ir. Atok Setiawan, M.Eng.Sc
NIP. 196604021989031002  (Penguji I)
3. Giri Nugroho, ST., M.Sc
NIP. 197910292012121002  (Penguji II)

SURABAYA

JULI, 2018

**STUDI NUMERIK PENGARUH VARIASI SUHU
UDARA INLET ZONA OKSIDASI PADA PROSES
GASIFIKASI PELET MUNICIPAL SOLID WASTE
TERHADAP KARAKTERISTIK REAKTOR TIPE
DOWNDRAFT**

Nama Mahasiswa : *Dhesa Hidayatulloh*
NRP : *02111340000009*
Jurusan : *Teknik Mesin FTI-ITS*
Dosen Pembimbing : *Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT.*

Abstrak

Peningkatan konsumsi energi yang selalu terjadi di akhir-akhir ini, dapat menimbulkan krisis energi yang serius. Bahan bakar fosil merupakan bahan bakar yang paling sering digunakan dan termasuk sumber energi yang tidak terbarukan. Disisi lain, penumpukan sampah di Indonesia juga semakin tinggi. Oleh karenanya dilakukan pengembangan dalam teknologi pengelolaan sampah menjadi energi terbarukan. Sampah padat yang dihasilkan masyarakat perkotaan dapat diperoleh dari tempat pembuangan akhir (TPA) atau dapat disebut Municipal Solid Waste (MSW). Gasifikasi dapat menjadi teknologi yang efisien untuk mengekstrak energi dari biomassa pelet MSW menjadi energi dalam bentuk syngas. Salah satu parameter yang sangat berpengaruh untuk meningkatkan kualitas syngas adalah suhu, sehingga perkembangan desain dan pengoperasian reaktor tipe downdraft dilakukan dengan cara memanaskan udara inlet zona oksidasi melalui pemanas eksternal. Penelitian yang dilakukan secara ekperimental membutuhkan waktu serta biaya yang tidak sedikit, sehingga perlu dikembangkan penelitian dengan studi numerik mengenai pengaruh pemanasan udara inlet zona oksidasi terhadap distribusi suhu pada reaktor tipe downdraft.

Pemodelan dilakukan dengan perangkat lunak Computational Fluid Dynamics (CFD) untuk mensimulasikan proses gasifikasi pada reaktor dengan variasi suhu udara inlet zona oksidasi. Berdasarkan penelitian secara ekperimental, pemanasan udara inlet zona oksidasi dengan pemanas eksternal pada penelitian ini dilakukan dengan 5 variasi suhu, yaitu 80 °C, 110 °C, 150 °C, 180 °C, dan 200 °C. Pembuatan geometri, meshing, dan penentuan domain pemodelan dilakukan dengan perangkat lunak Gambit. Sedangkan simulasi numerik dilakukan dengan perangkat lunak Ansys Fluent 16, pemodelan yang digunakan adalah model standard k-epsilon, Radiation P1, model spesies transport dengan turbulence yang dipakai adalah finite-rate/eddy-dissipation, dan Discrete Phase Model (DPM).

Hasil dari penelitian gasifikasi ini adalah didapatkan peningkatan suhu tertinggi pada penambahan suhu udara 200 °C sebesar 1004 °C pada zona oksidasi. Komposisi syngas CO, H₂, dan CH₄ pada penambahan suhu 80-200 °C meningkat dari 21,64%, 9,24%, dan 2,86% menjadi 22,65%, 10,49%, dan 3,10%. Kemudian meningkatkan LHV syngas dari 4.757,20 kJ/m³ menjadi 5.106,02 kJ/m³. Cold gas efficiency meningkat dari 72,17 % menjadi 79,51 %.

Kata kunci : Gasifikasi, Computational Fluid Dynamics (CFD), reaktor tipe downdraft, Municipal Solid Waste (MSW)

**THE NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF AIR
TEMPERATURE INLET OXIDATION ZONE ON THE
GASIFICATION PROCESS OF MUNICIPAL SOLID
WASTE PELLETS AGAINST THE
CHARACTERISTICS OF DOWNDRAFT TYPE
REACTOR**

Name of student : Dhesa Hidayatulloh
NRP : 02111340000009
Departement : Teknik Mesin FTI-ITS
Supervisor : Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT.

Abstract

The increasing of energy consumption in recent years can lead to energy crisis. Fossil fuels are the most commonly energy used, while fossil fuels include a non-renewable energy source. On the other hand, the accumulation of waste in Indonesia is also higher. Therefore, we need research and development of waste management technology into renewable energy. Solid waste generated by communities obtained from landfills (TPA) or can be called Municipal Solid Waste (MSW). Gasification could be an efficient technology to extract energy from MSW pellet biomass into energy in the form of syngas. One of the most influential parameters to improve syngas quality is temperature, so that development of design and operation downdraft reactor is done by heating the inlet air of oxidation zone through an external heater. However, the experimental research takes time and costly. Therefore, it is necessary to conduct numerical research to determine influence of inlet heating in oxidation zone to the temperature distribution in reactor.

The simulation model is done by using Computational Fluid Dynamics (CFD) software to simulate gasification process on reactor with variation of air temperature inlet in oxidation zone by external heating. This research conducted with 5 temperature

variations, 80 °C, 110 °C, 150 °C, 180 °C, dan 200 °C. Geometry, meshing, and modeling domains are created with Gambit software. While numerical simulations are carried out with Ansys Fluent 16 software, the model used is the *k-epsilon* standard model, P1 radiation, transport species model with turbulence used is finite-rate / eddy-dissipation, and Discrete Phase Model (DPM).

Results of this gasification research, the highest increasing temperature were obtained at the addition of air temperature of 200 °C at 1004 °C in oxidation zone. The composition of syngas CO, H₂, dan CH₄ at temperature increases of 80-200 °C increased from 21.64%, 9.24%, and 2.86% to 22.65%, 10.49%, and 3.10%. Then increasing the LHV syngas from 4,757.20 kJ/m³ to 5,106.02 kJ/m³. Cold gas efficiency increased from 72.17% to 79.51%.

Keywords: Gasification, Computational Fluid Dynamics (CFD), Downdraft Reactor, Municipal Solid Waste (MSW)

KATA PENGANTAR

Bismillah, puji serta syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kepada Allah SWT karena berkat rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “**Studi Numerik Pengaruh Suhu Udara Inlet Zona Oksidasi pada Proses Gasifikasi Pelet *Municipal Solid Waste* Terhadap Karakteristik Reaktor Tipe *Downdraft***” Penulis juga berterimakasih kepada seluruh pihak yang telah membantu proses penyelesaian karya tulis ini. Oleh karena itu, ucapan terimakasih penulis sampaikan khusus kepada :

1. Kedua orang tua, serta keluarga atas doa dan motivasinya selama pengerjaan karya tulis ini.
2. Bapak Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T. sebagai pembimbing.
3. Bapak Dr. Ir. Atok Setiawan, M.Eng.S.c dan Bapak Giri Nugroho, ST., M.Sc. sebagai penguji sidang akhir.
4. Bapak Arif Rahman Saleh, S.T, M.T. dan Saudara Depi Rustam Ependi, S.T. atas saran-saran dan masukannya dalam pengerjaan karya tulis ini.
5. Sahabat kontrakan MD atas dukungannya dalam pengerjaan karya tulis ini.
6. Rekan-rekan SDMIPTEK dan KOS QURAN atas dukungannya dalam pengerjaan karya tulis ini.
7. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Semoga karya tulis ini dapat bermanfaat khususnya bagi penulis dan bagi penelitian selanjutnya.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah.....	4
1.3. Batasan Masalah.....	4
1.4. Tujuan Penelitian.....	5
1.5. Manfaat penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Gasifikasi.....	7
2.1.1. Zona Pengeringan (<i>drying zone</i>)	8
2.1.2. Zona pirolisis (<i>pyrolysis zone</i>)	8
2.1.3. Zona pembakaran parsial (<i>partial combustion zone</i>).....	9
2.1.4. Zona reduksi (<i>reduction zone</i>).....	9
2.2. Tipe Reaktor Gasifikasi.....	14
2.3. Biomassa	15
2.4. Karakteristik <i>Municipal Solid Waste</i> (MSW).....	16
2.5. <i>Computational Fluid Dynamics</i> (CFD).....	18
2.5.1. <i>Preprocessing</i>	18
2.5.2. <i>Processing</i>	18
2.5.3. <i>Postprocessing</i>	19
2.6. Penelitian Terdahulu.....	19
BAB III METODE PENELITIAN	23
3.1. Pendahuluan	23
3.2. Tahapan Penelitian	23
3.3. Diagram Alir Penelitian.....	24
3.4. Tahap pemodelan dan simulasi	26
3.4.1. <i>Pre-processing</i>	26
3.4.2. <i>Processing</i>	28

3.4.3.	<i>Post-processing</i>	32
3.5.	Rancang Penelitian	33
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1.	Analisis Distribusi Suhu Sepanjang Reaktor	36
4.2.	Analisis Komposisi <i>Flammable Syngas</i>	44
4.2.1.	Analisis Distribusi Volumetrik CO	47
4.2.2.	Analisis Distribusi Volumetrik H ₂	51
4.2.3.	Analisis Distribusi Volumetrik CH ₄	56
4.3.	Analisis <i>Lower Heating Value</i> (LHV) <i>Syngas</i>	60
4.4.	Analisis <i>Cold Gas Efficiency</i> Proses Gasifikasi	62
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	67
5.1.	Kesimpulan	67
5.2.	Saran	68
DAFTAR PUSTAKA		69
LAMPIRAN		71
BIODATA PENULIS		77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Proses Gasifikasi Secara Umum.....	8
Gambar 2.2 Konversi Biomassa Akibat Nilai ER dan AFR Yang Berbeda	12
Gambar 2.3 Efek Perubahan ER terhadap (a) Suhu (b) <i>Mole Friction</i> (c) Energi (d) <i>Low Heating Value</i>	12
Gambar 2.4 Profil Suhu dan Zona pada Reaktor Gasifikasi <i>Downdraft</i> (Basu,2013)	13
Gambar 2.5 Beberapa Tipe <i>Gasifier</i> : (A) <i>Updraft</i> (B) <i>Downdraft</i>	14
Gambar 2.6 Model Reaktor oleh Burhan Cahyo M (2011)....	19
Gambar 2.7 Distribusi Suhu (K) Reaktor Gasifikasi dengan Variasi AFR (a) 1.251 (b) 1.17 (c) 1.11	20
Gambar 2.8 Model Reaktor Dزياد Dzulfansyah (2014).....	21
Gambar 2.9 Suhu Reaktor dengan Sudut <i>Throat</i> 90°	22
Gambar 3.1 Diagram Alir.....	25
Gambar 3.2 Desain Reaktor	26
Gambar 3.3 <i>Meshing</i> pada Reaktor Tipe <i>downdraft</i>	27
Gambar 3.4 Domain Pemodelan	28
Gambar 3.5 Pengamatan pada bagian penampang reaktor yang dilakukan pada koordinat x, y dan z.....	32
Gambar 4.1 Grafik Distribusi Rata-Rata Suhu pada Lima Variasi Suhu Inlet.....	37
Gambar 4.2 Batas-batas zona <i>downdraft</i> pada reaktor dan posisi termokopel	39
Gambar 4.3 Grafik Distribusi Rata-Rata Suhu Sepanjang Reaktor dengan Penambahan Variasi Suhu Udara.....	40
Gambar 4.4 Perbandingan Grafik Distribusi Rata-Rata Suhu Sepanjang Reaktor pada Uji Numerik dengan Uji Eksperimen.....	41
Gambar 4.5 Kontur Distribusi Suhu Pada Variasi Suhu Udara Inlet 200 °C	43

Gambar 4.6 Kontur dan Grafik Suhu terhadap Koordinat X pada Zona Oksidasi Parsial	43
Gambar 4.7 Grafik Distribusi Rata-Rata persentase volumetrik CO Sepanjang Reaktor Dengan Variasi Suhu Udara <i>Inlet</i>	47
Gambar 4.8 Kontur Distribusi persentase volumetrik CO pada Variasi Suhu Udara Inlet 200 °C.....	49
Gambar 4.9 Grafik Laju Reaksi R5 dan R7.....	50
Gambar 4.10 Grafik Distribusi Rata-Rata persentase volumetrik H ₂ Dengan Variasi Suhu Udara <i>Inlet</i>	52
Gambar 4.11 Kontur distribusi rata-rata persentase volumetrik H ₂ pada variasi suhu udara inlet 200 °C, (a) Koordinat Z (b) Koordinat X (c) Koordinat Y.....	54
Gambar 4.12 Grafik Laju Reaksi R6 dan R8.....	55
Gambar 4.13 Grafik Distribusi Rata-Rata persentase volumetrik CH ₄ Sepanjang Reaktor dengan Variasi Suhu Udara <i>Inlet</i>	56
Gambar 4.14 Grafik Laju Reaksi R9	58
Gambar 4.15 Kontur Distribusi persentase volumetrik CH ₄ pada Variasi Suhu Udara Inlet 200 °C, (a) Koordinat Z (b) Koordinat X (c) Koordinat Y.....	59
Gambar 4.16 Grafik Penambahan Suhu Udara Inlet Vs LHV Syngas	61
Gambar 4.17 Grafik Penambahan Suhu Udara Inlet Vs <i>Cold Gas Efficiency</i>	64

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>Properties</i> Biomassa Pelet MSW	17
Tabel 3.1 <i>Models</i> yang Digunakan dalam Simulasi pada reaktor tipe <i>downdraft</i>	28
Tabel 3.2 <i>Ultimate Analysis</i> dan <i>Proximate Analysis</i> MSW dalam Perangkat Lunak Fluent.....	29
Tabel 3.3 Propertis Material MSW	30
Tabel 3.4 Pengaturan <i>Boundary Condition</i> yang Digunakan Dalam Pemodelan	31
Tabel 3.5 Parameter <i>Input</i> Penelitian	33
Tabel 3.6 Parameter <i>Output</i> Simulasi	33
Tabel 4.1 Komposisi Syngas dari Metode Numerik	45
Tabel 4.2 Perbandingan Komposisi Syngas antara Metode Numerik dengan Eksperimen	45
Tabel 4.3 LHV Syngas pada Setiap Variasi Suhu Udara	61
Tabel 4.4 Nilai <i>Cold Gas Efficiency</i>	64

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Peningkatan konsumsi energi selalu terjadi setiap tahun pada periode 2000–2014. Rata–rata pertumbuhan tahunan selama periode 2000-2014 adalah 3,99% pada tahun 2014. Data ini didapatkan dari Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia (HEESI) tahun 2015 yang diterbitkan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM). Minyak bumi sebagai salah satu energi fosil yang tidak terbarukan, paling banyak digunakan sebagai bahan bakar di Indonesia. Sedangkan produksi minyak di Indonesia sejak tahun 2010-2014 mengalami penurunan sekitar 4,41% (Hutagalung, 2015). Bila hal ini tidak diperhatikan, akan menimbulkan krisis energi yang serius, sehingga dibutuhkan usaha untuk menutupi krisis energi tersebut dengan mengembangkan energi baru terbarukan sebagai energi alternatif.

Pengelolaan sampah dengan teknologi, mempunyai potensi yang besar untuk menjadi energi terbarukan. Hal itu dikarenakan jumlah peningkatan timbunan sampah di Indonesia sendiri diketahui telah mencapai 175.000 ton/hari atau setara 64 juta ton/tahun (Tuti, 2015). Teknologi yang memungkinkan untuk mengubah sampah menjadi energi terbarukan adalah dengan menggunakan proses termokimia, (Indarto, 2016). *Municipal Solid Waste* (MSW) adalah sampah padat yang dihasilkan masyarakat perkotaan, diperoleh dari tempat pembuangan akhir (TPA). Metode terbaru mengenai proses pengolahan MSW salah satunya dengan mengubahnya menjadi bentuk pelet. Pengubahan bentuk menjadi pelet memiliki kelebihan yaitu, dapat menurunkan kadar air (*moisture content*) dimana kadar air pada pelet MSW lebih homogen dibandingkan dengan tidak diubah menjadi pellet (Nyakuma, 2016). MSW dalam bentuk pelet dapat diolah menjadi suatu energi yang lebih bermanfaat menggunakan teknologi gasifikasi dalam bentuk gas dengan nilai kalor tinggi.

Gasifikasi biomassa dapat menjadi teknologi yang efisien untuk mengekstrak energi dari biomassa pelet MSW dan telah mendapatkan banyak perhatian dalam pasar energi karena potensinya dalam pengurangan emisi. Gasifikasi biomassa adalah proses konversi biomassa dalam bentuk padat ke dalam bentuk gas, mampu bakar melalui proses termal. Sebagian besar *flammable gas* tersusun atas gas karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), dan sedikit metana (CH₄). Gas mampu bakar ini dapat digunakan secara langsung untuk pembakaran, misalnya untuk keperluan rumah tangga atau pengeringan, ataupun juga dapat digunakan sebagai bahan bakar motor bakar yang dapat digunakan untuk pembangkit listrik ataupun keperluan lainnya. Tipe reaktor yang cocok diaplikasikan pada motor bakar internal adalah tipe downdraft (Gaos 2008).

Penelitian secara eksperimen pada proses gasifikasi menggunakan reaktor tipe *downdraft* ini sudah pernah dilakukan oleh Depi Rustam, Aji Triyanto, Rizki Wase dan Irfan Maulana pada tahun 2017 dengan bahan baku biomassa MSW. Penelitian dilakukan oleh Depi Rustam (2017) dengan karakterisasi gasifikasi yang menunjukkan pengaruh pemanasan udara inlet zona oksidasi dengan pemanas eksternal terhadap distribusi suhu pada reaktor, khususnya zona oksidasi. Penelitian tersebut menunjukkan dengan adanya pemanasan udara dari suhu 80°C sampai 200°C mampu meningkatkan suhu zona oksidasi dari 818°C menjadi 942°C. Peningkatan suhu ini mampu mengurangi kadar tar dan meningkatkan kualitas syngas, yaitu meningkatkan LHV syngas dari 4227,99 kJ/m³ menjadi 4609,99 kJ/m³.

Pada umumnya terdapat beberapa aspek yang menjadi kendala dalam penelitian gasifikasi secara eksperimental. Yang pertama adalah aspek waktu, dimana untuk melaksanakan proses penelitian gasifikasi dibutuhkan waktu yang tidak sedikit. Selain itu, dengan banyaknya variasi dan kapasitas reaktor yang semakin besar dengan banyaknya variasi dan kapasitas reaktor yang semakin besar, akan membuat penelitian gasifikasi semakin lama dilakukan. Yang kedua adalah aspek biaya, dimana dibutuhkan

biaya yang tidak sedikit untuk melaksanakan dan mengembangkan penelitian gasifikasi tersebut. Material biomassa harus diperoleh dari sumbernya dan juga jumlah biomassa yang digunakan pada saat proses penelitian harus berdasarkan kapasitas reaktor. Semakin besar kapasitas reaktor akan semakin besar pula biaya yang harus dikeluarkan. Selain itu untuk pengembangan reaktor itu sendiri membutuhkan biaya yang cukup besar, sesuai dengan masalah yang terjadi pada reaktor.

Kendala yang terjadi pada saat penelitian gasifikasi secara eksperimen dapat dijumpai melalui pengembangan dengan penelitian gasifikasi secara numerik. Telah dilakukan penelitian gasifikasi secara numerik sebelumnya. Telah dilakukan oleh beberapa peneliti, yaitu Burhan Cahyo M (2012), yang juga telah meneliti tentang simulasi gasifikasi sekam padi pada reaktor tipe *downdraft*. Penelitian tersebut hanya mengamati bidang 2 dimensi saja pada reaktor dan memvariasikan AFR yang dapat memaksimalkan efisiensi proses gasifikasi. Selanjutnya adalah perancangan reaktor gasifikasi sekam padi pada reaktor tipe *downdraft*, dikembangkan oleh Dziyad Dzulfansyah (2014) dengan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) gasifikasi tipe *downdraft* dengan biomassa sekam padi. Penelitian tersebut mengamati dalam 3 dimensi dengan variasi sudut *throat* dan udara *inlet*. Berdasarkan hasil penelitian Depi Rustam (2017) diketahui bahwa penambahan pemanas udara eksternal sangat diperlukan untuk dapat mencapai suhu optimum yang diinginkan.

Maka dari itu, pada penelitian ini akan dilakukan permodelan serta simulasi dengan variasi penambahan pemanas udara eksternal sebelum udara masuk ke dalam pemanas internal yang akan disuplai ke dalam zona oksidasi reaktor tipe *downdraft* dengan bahan baku pelet MSW. Pada penelitian ini, proses gasifikasi yang terjadi di dalam reaktor akan dimodelkan secara numerik menggunakan *standard k-epsilon*, *Radiation P1*, model spesies *transport* dengan *turbulence* yang dipakai adalah *finite-rate/eddy-dissipation*, dan *Discrete Phase Model* (DPM). Adapun data dari penelitian secara eksperimen nantinya akan digunakan

sebagai validasi dari hasil penelitian gasifikasi dengan menggunakan model numerik.

1.2. Perumusan Masalah

Pada tugas akhir ini akan dilakukan penelitian untuk mengetahui bagaimana memodelkan secara numerik dalam 3 dimensi proses gasifikasi biomassa MSW pada reaktor tipe *downdraft* yang berada di Laboratorium Teknik Pembakaran Dan Sistem Energi Teknik Mesin ITS. Permodelan numerik ini selanjutnya dapat digunakan untuk mengetahui bagaimana analisa dari proses gasifikasi dengan memvariasikan suhu udara *inlet* yang ditunjukkan dengan distribusi suhu dan komposisi *flammable syngas* (H_2 , CO, dan CH_4). Pelaksanaan penelitian dilakukan dengan pemodelan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan *software* ANSYS Fluent 16 dan data penelitian divalidasi dengan metode eksperimen pada penelitian sebelumnya.

1.3. Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah dan asumsi pada penelitian ini yaitu:

1. Disimulasikan dengan model *single phase* pada *software* ANSYS Fluent 16.
2. Geometri yang dimodelkan hanya pada bagian dalam reaktor.
3. Produk Ash dan tar tidak keluar dari batas sistem reaktor, sehingga hanya syngas yang dijadikan outlet.
4. Pada penelitian gasifikasi, material input secara otomatis didefinisikan dalam bentuk partikel batu bara karena pada database FLUENT tidak terdapat material MSW.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan model numerik yang tepat pada reaktor gasifikasi.
2. Mendapatkan karakteristik gasifikasi secara numerik yang ditunjukkan oleh distribusi suhu sepanjang reaktor gasifikasi dan komposisi *flammable syngas* (H_2 , CO, dan CH_4).

1.5. Manfaat penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui karakteristik gasifikasi pada reaktor tipe downdraft yang ada di laboratorium teknik pembakaran dan system energi teknik mesin ITS dari hasil simulasi.
2. Dapat digunakan sebagai acuan untuk penelitian lebih lanjut yang terkait dengan peningkatan unjuk kerja proses gasifikasi.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

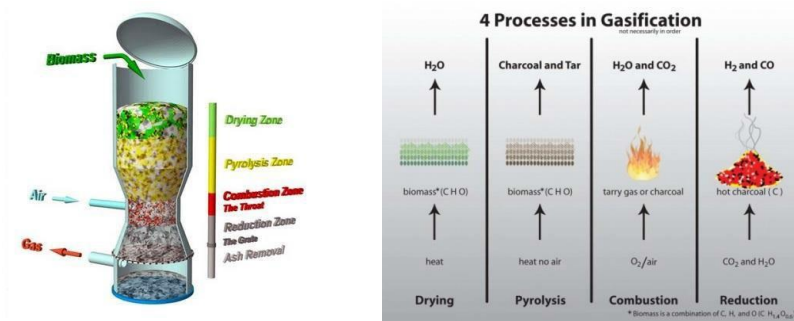
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Gasifikasi

Gasifikasi ialah proses pengkonversian material yang mengandung bahan karbon menjadi *flammable gas*, dengan jumlah oksigen yang terkontrol pada temperatur tinggi saat pembakaran material sehingga terjadi pembakaran tidak sempurna.. Material organik yang dibakar akan menghasilkan gas misalnya karbon dioksida (CO_2), karbon monoksida (CO), metana (CH_4), hidrogen (H_2), dan sebagainya. Selain itu dihasilkan juga produk sampingan berupa tar dan uap air. Gasifikasi merupakan metode efisien untuk mengkonversi energi yang berasal dari material organik (Basu, 2010). Gas yang dihasilkan dari reaktor gasifikasi disebut sebagai *producer gas*. Setelah melewati proses selanjutnya, gas tersebut dapat dimanfaatkan langsung dengan dibakar untuk memanaskan *steam boiler* yang berfungsi untuk memutar turbin atau untuk menjalankan motor bakar, baik yang menggunakan sistem pengapian busi seperti generator diesel maupun sistem pengapian yang menggunakan kompresi. Gas yang keluar dari reaktor gasifikasi dan telah melalui proses selanjutnya agar diperoleh hasil gas yang lebih bersih disebut sebagai *synthetic gas*.

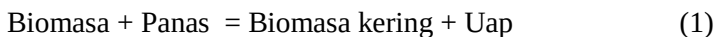
Gasifier adalah reaktor tempat berlangsungnya proses gasifikasi, di dalam reaktor tersebut terjadi empat proses yang berbeda berlangsung dalam sebuah gasifier sebagaimana terlihat pada Gambar 2.1. Masing-masing diasumsikan menempati area yang berbeda dimana secara fundamental berlangsung reaksi termal dan kimia yang berbeda pula (Sinya, 2008).



Gambar 2.1 Proses Gasifikasi Secara Umum

2.1.1. Zona Pengeringan (*drying zone*)

Proses yang terjadi pada zona pengeringan ialah proses pengeringan dari bahan bakar (batubara atau biomassa). Adapun prosesnya yaitu kandungan air yang ada dalam biomassa diekstrak dalam bentuk uap tanpa adanya dekomposisi kimia dari biomassa. Berbagai percobaan pada berbagai reaktor dalam berbagai kondisi menunjukkan bahwa rata-rata kondensat yang terbentuk ialah sekitar 6-10% dari berat kayu sebagai bahan bakar. Pengeringan dapat dianggap lengkap ketika suhu biomassa mencapai 150°C (Timo, 2011).



2.1.2. Zona pirolisis (*pyrolysis zone*)

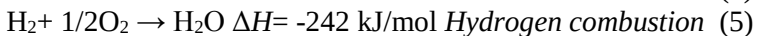
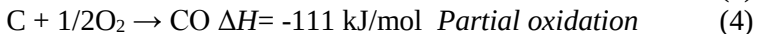
Setelah pengeringan dilakukan, bahan bakar akan turun dan menerima panas sebesar 250-500°C dalam kondisi tanpa udara. Pirolisis dimulai dari dekomposisi hemiselulosa pada 200-250°C, dekomposisi selulosa sampai 350°C, dan pirolisis berakhir pada 500°C. Selanjutnya pengarangan berlangsung pada 500- 700°C, yang terjadi pada batas zona pirolisis dan oksidasi. Produk dari proses ini terbagi menjadi produk cair (Tar), produk gas (H_2 , CO , CO_2 , H_2O , CH_4), dan arang. Produk-produk gas tersebut akan bereaksi kembali pada zona selanjutnya, yaitu zona reduksi yang

akan menghasilkan *syngas* (produk gasifikasi). Reaksi kimia pirolisis dapat dituliskan sebagai berikut (Basu, 2010).

Biomasa kering + panas = arang + tar + gas (H_2 , CO, CO_2 , H_2O , CH_4). (2)

2.1.3. Zona pembakaran parsial (*partial combustion zone*)

Arang yang terbentuk dari ujung zona pirolisis masuk ke oksidasi, selanjutnya dibakar pada suhu operasi yang cukup tinggi 700- 1400°C. Ketika reaktor mencapai suhu tersebut, akan menghancurkan substansi tar sehingga kandungan menjadi lebih rendah. Distribusi oksigen yang merata akan menyempurnakan proses oksidasi sehingga dihasilkan suhu maksimal dalam keseluruhan proses gasifikasi. Sekitar 20% arang beserta volatil teroksidasi dengan memanfaatkan oksigen yang terbatas dan sisa 80% arang turun kebawah menuju bagian reduksi yang hampir semuanya akan dipakai, menyisakan abu yang jatuh ke tempat pembuangan (Basu, 2010).

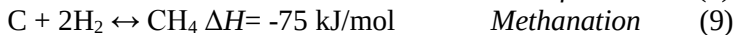
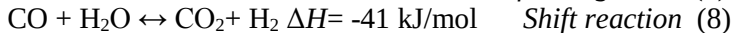
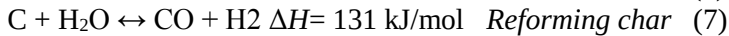
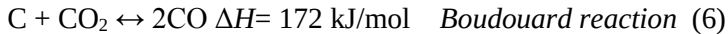


Produk utama yang berupa energi panas yang sangat diperlukan untuk seluruh proses, sedangkan produk pembakaran merupakan campuran gas CO, CO_2 dan air. Dalam campuran ini nitrogen dapat hadir jika oksidasi biomassa dilakukan dengan udara, sebaliknya nitrogen praktis tidak ada jika hanya menggunakan oksigen.

2.1.4. Zona reduksi (*reduction zone*)

Produk Proses ini bersifat mengambil panas yang berlangsung pada suhu 400- 800 °C. Pada proses ini terjadi beberapa reaksi kimia yang merupakan proses penting terbentuknya beberapa senyawa yang berguna untuk

menghasilkan *flammable gas* seperti H₂, CO, CH₄ atau yang dikenal dengan *producer gas*. Berikut reaksi kimia di zona reduksi (Murtadzi, 2009):



Pada proses gasifikasi terdapat 4 faktor yang sangat mempengaruhi efisiensi serta kandungan syngas yang didapat, diantaranya sebagai berikut :

1. Properti Biomassa

Sesuai dengan penelitian Rajvanshi (2006), sifat-sifat yang dimiliki biomassa baik secara fisik maupun kimia mampu mempengaruhi baik dari segi energi yang dihasilkan maupun heat loss-nya pada proses gasifikasi. Sifat tersebut antara lain :

a. Kandungan energi

Semakin tinggi kandungan energi yang dimiliki biomassa maka syngas hasil gasifikasi tersebut akan semakin tinggi karena energi yang dapat dikonversi juga semakin tinggi.

b. Moisture

Bahan baku yang digunakan untuk proses gasifikasi umumnya diharapkan ber-*moisture* rendah. Kandungan *moisture* tinggi menyebabkan *heat loss* yang berlebihan. Dan juga menyebabkan beban pendinginan semakin tinggi karena *pressure drop* meningkat. Idealnya kandungan *moisture* yang sesuai untuk bahan baku gasifikasi kurang dari 20 %.

c. Tar

Tar merupakan salah satu kandungan yang paling merugikan dan harus dihindari karena sifatnya yang korosif. Pada reaktor gasifikasi, terbentuknya tar terjadi pada suhu pirolisis.

d. Ash dan Slagging

Ash adalah kandungan mineral yang terdapat pada bahan baku berupa oksida setelah proses pembakaran. Sedangkan slag adalah kumpulan ash yang lebih tebal. Pengaruh adanya ash dan slag pada reaktor gasifikasi adalah mengurangi respon pereaksian bahan baku pada titik tertentu sehingga menimbulkan penyumbatan di reaktor gasifikasi. Semakin tinggi kandungan ash yang dimiliki, maka partikel pengotor dari syngas juga semakin banyak sehingga dibutuhkan pembersihan gas yang lebih baik lagi.

2. *Gasifying Agent*

Jenis *gasifying agent* yang digunakan dalam gasifikasi umumnya adalah udara, yaitu kombinasi antara oksigen dan uap. Penggunaan jenis *gasifying agent* mempengaruhi kandungan gas yang dimiliki oleh syngas. Penggunaan udara bebas menghasilkan senyawa nitrogen di dalam syngas, berlawanan dengan penggunaan oksigen atau uap yang memiliki kandungan nitrogen yang relatif sedikit. Sehingga penggunaan *gasifying agent* berupa oksigen atau uap memiliki nilai kalor syngas yang lebih baik jika dibandingkan *gasifying agent* berupa udara.

3. *Equivalen Ratio*

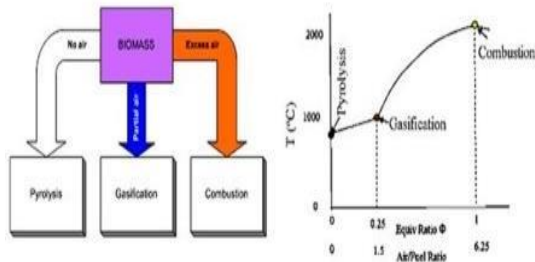
Equivalen Ratio (ER) adalah parameter yang sangat penting pada pengoperasian reaktor gasifikasi. Bahkan perbedaan ER pada suatu pengoperasian akan menimbulkan proses konversi biomassa yang berbeda pula (lihat Gambar 2.2). ER merupakan perbandingan antara *air-fuel ratio* (AFR) aktual pada pengoperasian reaktor gasifikasi dengan *air-fuel ratio* (AFR) stoikiometris.

$$ER = \text{AFR stoikiometris} / \text{AFR aktual} \quad (10)$$

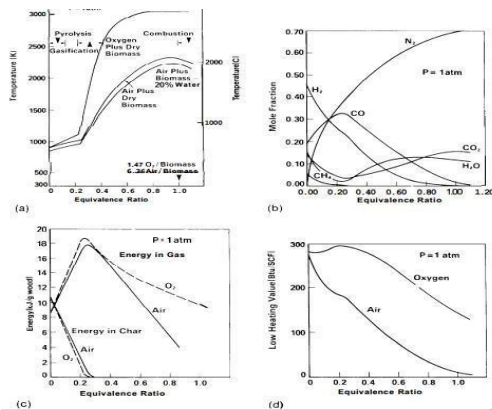
AFR merupakan perbandingan antara jumlah udara dengan jumlah bahan bakar pada proses pembakaran. AFR stoikiometris adalah jumlah perbandingan massa udara dan massa bahan bakar yang menghasilkan pembakaran sempurna.

$$AFR = \text{Massa udara} / \text{Massa bahan bakar} \quad (11)$$

Kondisi stoikiometris teoritis biomassa diperoleh dengan mengetahui terlebih dahulu kandungan unsur kimia dari biomassa, kemudian dilakukan perhitungan persamaan reaksi yaitu reaksi oksidasi.



Gambar 2.2 Konversi Biomassa Akibat Nilai ER dan AFR Yang Berbeda

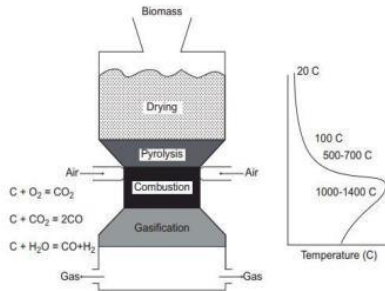


Gambar 2.3 Efek Perubahan ER terhadap (a) Suhu (b) Mole Friction (c) Energi (d) Low Heating Value

4. Suhu

Proses gasifikasi dalam reaktor berhubungan dengan suhu untuk masing-masing proses gasifikasi yang terjadi, sehingga dalam satu reaktor gasifikasi terdapat profil sebaran suhu yang dapat mempresentasikan masing-masing zona dari proses gasifikasi. Suhu reaktor gasifikasi menentukan tingkat keberadaan abu,

komposisi *syngas*, dan kandungan tar, yang mempengaruhi karakteristik dari reaktor gasifikasi tersebut.



Gambar 2.4 Profil Suhu dan Zona pada Reaktor Gasifikasi *Downdraft* (Basu,2013)

Suhu merupakan salah satu parameter yang mampu meningkatkan kualitas *syngas* dari proses gasifikasi, sehingga penelitian ini mensimulasikan penggunaan *preheated air* pada proses gasifikasi. Peningkatan kualitas *syngas* yang dihasilkan terjadi saat dilakukan pemanasan udara masukan zona oksidasi, sehingga entalpi udara akan meningkat dan menyebabkan perubahan entalpi (Δh) pada reaksi di zona oksidasi menjadi besar. Selain itu pemanasan udara juga menjadikan udara lebih reaktif, sehingga menjadikan panas pada zona oksidasi dan panas yang dialirkan ke zona lainnya menjadi lebih besar serta menjadikan suhu zona-zona tersebut meningkat. Secara teoritis perhitungan perubahan entalpi akibat kenaikan suhu adalah sebagai berikut.

Contoh salah satu reaksi di zona oksidasi



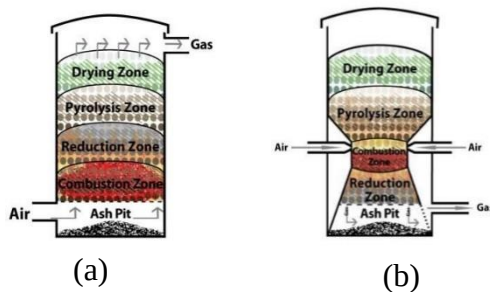
$$\Delta H = H_{produk} - H_{reaktan} \quad (12)$$

$$\text{dan} \quad H \sim (T, p)$$

Dikarenakan O_2 sebagai reaktan yang terkandung dalam udara suhunya meningkat, maka entalpi reaktan akan semakin meningkat, sehingga ΔH akan semakin besar. Oleh karena itu, suhu zona oksidasi akan meningkat yang berpengaruh pada suhu seluruh zona gasifikasi (*drying*, pirolisis, dan reduksi).

2.2. Tipe Reaktor Gasifikasi

Sejarah gasifikasi mengungkapkan beberapa rancangan *gasifier* yang diklasifikasikan oleh arah aliran gas melalui reaktor (arah naik dan turun) dimana jenis reaktor antara lain sebagai berikut :



Gambar 2.5 Beberapa Tipe *Gasifier*: (A) *Updraft* (B) *Downdraft*

a. *Gasifier* Tipe *Updraft*

Pada tipe ini umpan dimasukan pada bagian atas reaktor dan bergerak kebawah melewati zona pengeringan, pirolisis, reduksi, dan oksidasi. Udara masuk pada bagian bawah dan gas keluar pada bagian atas. Keunggulan tipe ini yaitu tingkat pembakaran arangnya yang tinggi, pertukaran panas internal sehingga suhu gas keluarnya rendah, dan efisiensi gasifikasi yang tinggi. bahan baku yang diumpankan dapat berada pada kondisi kadar air yang cukup tinggi (50% wb). Kekurangan dari *gasifier updraft* adalah *producer gas* yang keluar dari reaktor berada pada kondisi suhu

rendah ($<500^{\circ}\text{C}$) dan membawa tar yang terkon-densasi serta minyak yang berasal dari proses pirolisis (Basu, 2010). *Gasifier* ini sesuai untuk pemanfaatan panas langsung.

b. *Gasifier Tipe Downdraft*

Gasifier downdraft dirancang untuk mengurangi tar yang terkondensasi serta minyak yang diproduksi dari *counterflow gasifier (updraft)*. Dalam Mekanismenya, aliran biomassa dan udara gasifikasi bergerak ke bawah dalam arah yang sama menuju *bed* bahan bakar. Ketika bahan bakar di dalam reaktor bergerak ke bawah, uap akan terpirolisis dan *char* langsung masuk ke bagian pengecilan pada bagian bawah reaktor. Pada saat itu udara akan diinjeksikan ke bagian tersebut melalui di dinding reaktor. Kondisi suhu yang tinggi pada bagian pengecilan akan membakar tar dan minyak pada *producer gas*. *Producer gas* akan keluar dari bagian bawah reaktor dengan dihisap melalui anulus pada dinding reaktor. Dikarenakan rendahnya kandungan tar dan minyak, *gasifier* tipe *downdraft* banyak diaplikasikan untuk mesin pembakaran *internal* (Basu, 2010).

2.3. Biomassa

Secara umum biomassa merupakan bahan yang dapat diperoleh dari tanaman baik secara langsung maupun tidak langsung dan dimanfaatkan sebagai energi atau bahan dalam jumlah yang besar. Biomassa disebut juga sebaga “*fitomassa*” dan seringkali diterjemahkan sebagai *bioresource* atau sumber daya yang diperoleh dari hayati (Sinya, 2008). Basis sumber daya meliputi ratusan dan ribuan spesies tanaman, daratan dan lautan, berbagai sumber pertanian, perhutanan, dan limbah residu dan proses industri, limbah dan kotoran hewan. Tanaman energi yang membuat perkebunan energi skala besar akan menjadi salah satu biomassa yang menjanjikan, walaupun belum dikomersialkan pada saat ini.

Menurut Kamus Bahasa Inggris Oxford, istilah “biomassa” pertama kali muncul di literatur pada tahun 1934. Di dalam *Journal of Marine Biology Association*, ilmuwan Rusia bernama Bogorov

menggunakan biomassa sebagai tatanama. Ia mengukur bobot plankton laut (*Calanus finmarchicus*) setelah dikeringkan dan dikumpulkan untuk menyelidiki perubahan pertumbuhan musiman plankton. Plankton yang telah kering ini dinamakan sebagai biomassa.

Biomassa secara spesifik merujuk pada limbah pertanian seperti jerami, sekam padi, limbah perhutanan seperti serbuk gergaji, MSW, tinja, kotoran hewan, sampah dapur, lumpur kubangan, dan sebagainya.

2.4. Karakteristik *Municipal Solid Waste* (MSW)

Bahan biomassa yang digunakan pada penelitian ini adalah Pelet MSW yang memiliki komposisi 60 % sampah organik (sampah kompos, serbuk kayu, dan sedikit kanji untuk merekatkan) dan 40% anorganik (sampah plastik *Polypropylene*) (Indarto, 2015). Pelet yang digunakan memiliki ukuran diameter 6 mm dan rata-rata panjang 15 mm (Rollinson, 2017). Bahan organik dalam briket MSW ini adalah : sampah dapur (sayur mayur dan sisa makanan), bermacam jenis kertas, dan potongan tumbuh-tumbuhan (kayu, ranting, dan dedaunan). Bahan anorganik dalam briket MSW ini sebagian besar adalah plastik, terutama plastik yang tidak terambil oleh pemulung seperti contohnya : tas kresek, plastik bungkus, dan *styrofoam*. Sebelum dipeletkan, seluruh bahan telah melalui proses pencacahan hingga ukuran tertentu. Seluruh proses pemeletan akan dilakukan di laboratorium jurusan Teknik Mesin ITS. Sebelum digunakan dalam eksperimen, Pelet MSW tersebut akan diukur kandungan airnya, dan nilai kalornya di Laboratorium Pusat Studi Energi dan Rekayasa LPPM ITS. Berikut pengujian *properties* biomassa pelet MSW :

Tabel 2.1 *Properties* Biomassa Pelet MSW

Jenis Uji	Parameter		Satuan	Hasil
Uji <i>Ultimate</i>	Komponen	C	% wt	39,83
		H	% wt	6,7
		O	% wt	38,11
		N	% wt	0,35
		S	% wt	0,14
Uji <i>Proximate</i>	Moisture In Sampel		% wt	9,82
	Ash Content		% wt	14,71
	Volatile Matter		% wt	65,78
	Fixed Carbon		% wt	9,69
	HHV		kJ/kg	13843

Dari Tabel 2.1 di atas dapat diamati persentase kandungan unsur-unsur yang terdapat pada biomassa secara fisik maupun kimiawi. Kandungan karbon dan oksigen menunjukkan jumlah yang cukup dominan, dimana unsur-unsur ini menjadi komponen utama dalam reaksi pembentukan *syngas*.

Kandungan C yang cukup tinggi mampu menghasilkan nilai kalor gas yang cukup potensial untuk dimanfaatkan. Nilai kalor pellet MSW secara umum bernilai 13-20 MJ/kg. Kandungan *moisture* pellet MSW yang relatif rendah tidak membutuhkan energi yang terlalu besar untuk menghilangkannya. Kandungan kadar air yang dikandung akan dikeluarkan dari biomassa dengan pemanasan. Bila kandungan *moisture* terlalu tinggi, maka dibutuhkan energi aktivasi pengeringan yang tinggi. Kandungan *moisture* yang teruapkan mampu memperbesar produksi H₂ (*flammable component*), namun untuk menjaga proses produksi tersebut dibutuhkan energi yang cukup besar dari proses eksoterm, dimana dalam proses eksoterm menghasilkan CO₂ yang bersifat tidak bisa terbakar. Energi hasil proses eksoterm yang terambil pada produksi H₂ dari *moisture*, justru mengurangi energi yang

diperlukan pada proses produksi H_2 dan CO yang *flammable* dari reaksi endoterm, sehingga hal itu cukup merugikan. Nilai kalor yang dimiliki MSW cukup tinggi membuat proses gasifikasi mampu tercapai dengan mudah.

2.5. 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) [16]. Pada umumnya terdapat tiga tahapan yang harus dilakukan dalam simulasi CFD menurut Tuakia (2008), yaitu:

2.5.1. 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.

2.5.2. Processing

Processing (program inti pencari solusi) CFD menghitung kondisi-kondisi yang diterapkan pada saat *preprocessing*. Beberapa pengaturan yang akan dilakukan diantaranya adalah *models*, *materials*, *boundary conditions*, *operating conditions*, *control and monitoring conditions*, serta *initialize conditions*.

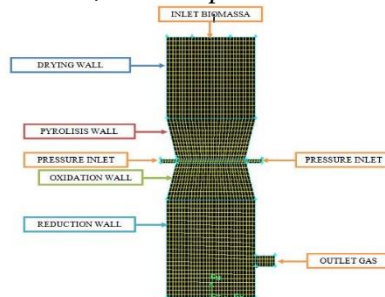
2.5.3. *Postprocessing*

Postprocessing adalah langkah terakhir dalam analisis CFD. Hal yang dilakukan pada langkah ini adalah mengorganisasi dan menginterpretasi data hasil simulasi CFD yang dapat disajikan dalam bentuk gambar, kurva, dan animasi. *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 *geomatry* dan *display*
- Plot vektor
- Plot kontur
- Plot 2D *surfaces*

2.6. **Penelitian Terdahulu**

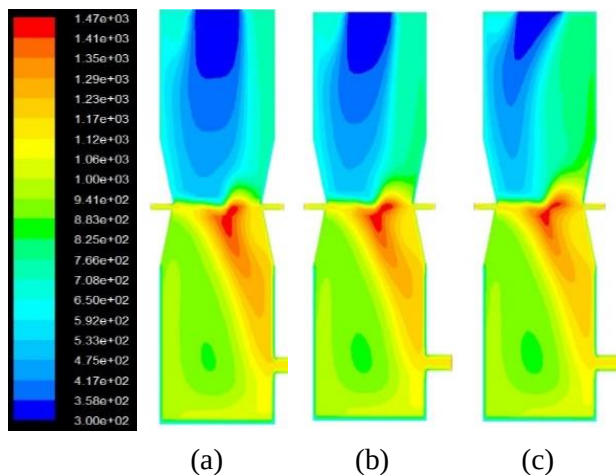
Burhan Cahyo M (2012) menggunakan sekam padi sebagai biomassa, melakukan penelitian terhadap reaktor gasifikasi *downdraft* secara simulasi 2-Dimensional dengan software FLUENT melalui variasi perbandingan antara *air-fuel ratio* (AFR). Model yang digunakan adalah *species transport*, *viscous k-epsilon* dengan tipe *realizable*, *discrete phase*.



Gambar 2.6 Model Reaktor oleh Burhan Cahyo M (2011)

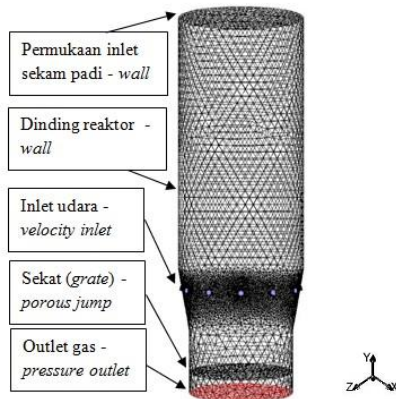
Hasil penelitian tersebut adalah data suhu proses gasifikasi dengan metode numerik lebih tinggi dibandingkan dengan data eksperimen pada zona setiap proses gasifikasi. Pada zona *oksidation*, suhu dari data numerik pada AFR 1.25, AFR 1.17 dan

AFR 1.11 sebesar 1400 K sedangkan data eksperimen pada AFR 1.25, AFR 1.17 dan AFR 1.11 sebesar 800 K. Distribusi suhu pada reaktor berupa kontur terlihat pada gambar 2.7. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa dengan model yang digunakan distribusi suhu masih kurang merata.



Gambar 2.7 Distribusi Suhu (K) Reaktor Gasifikasi dengan Variasi AFR (a) 1.251 (b) 1.17 (c) 1.11

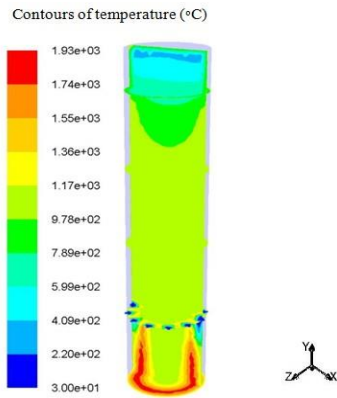
Dziyad Dzulfansyah (2014) melakukan serangkaian penelitian tentang perancangan reaktor gasifikasi *downdraft* sekam padi menggunakan analisis CFD dengan variasi bentuk reaktor dan sudut nozel udara terhadap kinerja reaktor. Model yang digunakan adalah *viscous k-epsilon* dengan tipe *standart*, *radiation P1*, *spesies transport*, *discrete phase*.



Gambar 2.8 Model Reaktor Dziyad Dzulfansyah (2014)

Hasil dari penelitian tersebut adalah desain reaktor terbaik dari beberapa skenario yang disimulasikan yaitu reaktor dengan sudut *throat* 90° dan sudut nozel 10° . Sudut *throat* yang lebih kecil cenderung menghasilkan suhu di dalam reaktor dan persentase gas H_2 yang lebih tinggi, tetapi menghasilkan persentase gas CO dan CH_4 yang lebih rendah.

Persentase persentase volumetrik gas mampu bakar keluaran reaktor hasil simulasi adalah CO 14.49%, H_2 9.65%, dan CH_4 2.39%. Perbandingan dengan data pengujian eksperimen menghasilkan nilai 0.78%, dimana persentase persentase volumetrik gas CO dan CH_4 hasil pengujian berturut-turut adalah 15.58% dan 2.43%. Simulasi yang dilakukan mampu memprediksi komposisi gas dengan cukup akurat, tetapi tidak berhasil memprediksi suhu secara akurat pada sebagian zona reaktor (zona pengeringan dan pirolisis).



Gambar 2.9 Suhu Reaktor dengan Sudut *Throat* 90°

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Pendahuluan

Bab ini membahas mengenai metode penelitian yang digunakan mulai dari pembuatan model geometri, *meshing*, dan penentuan domain pemodelan dari reaktor tipe *downdraft* dengan digunakan perangkat lunak Gambit. Pemodelan pembakaran digunakan perangkat lunak *Ansys Fluent 16* hingga didapatkan hasil kualitatif maupun kuantitatif, kemudian digunakan sebagai dasar analisa proses gasifikasi pada reaktor tipe *downdraft*.

3.2. Tahapan Penelitian

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

1. Identifikasi Masalah

Permasalahan yang terjadi adalah bagaimana mencapai suhu 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 16*, dan pemodelan yang telah digunakan pada penelitian-penelitian terdahulu. Studi literatur diperoleh dari jurnal, *e-book*, tugas akhir, *handbook* dan media internet.

3. Pengumpulan Data

Pengumpulan data operasi antara lain dimensi yang digunakan sebagai dasar pembuatan geometri, data operasi seperti suhu, 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 dan Simulasi

Tahapan ini diawali dengan *pre-processing* pembuatan geometri, *meshing* dan penentuan domain simulasi dengan perangkat lunak *Workbench Ansys*. Pada tahap *processing* dan

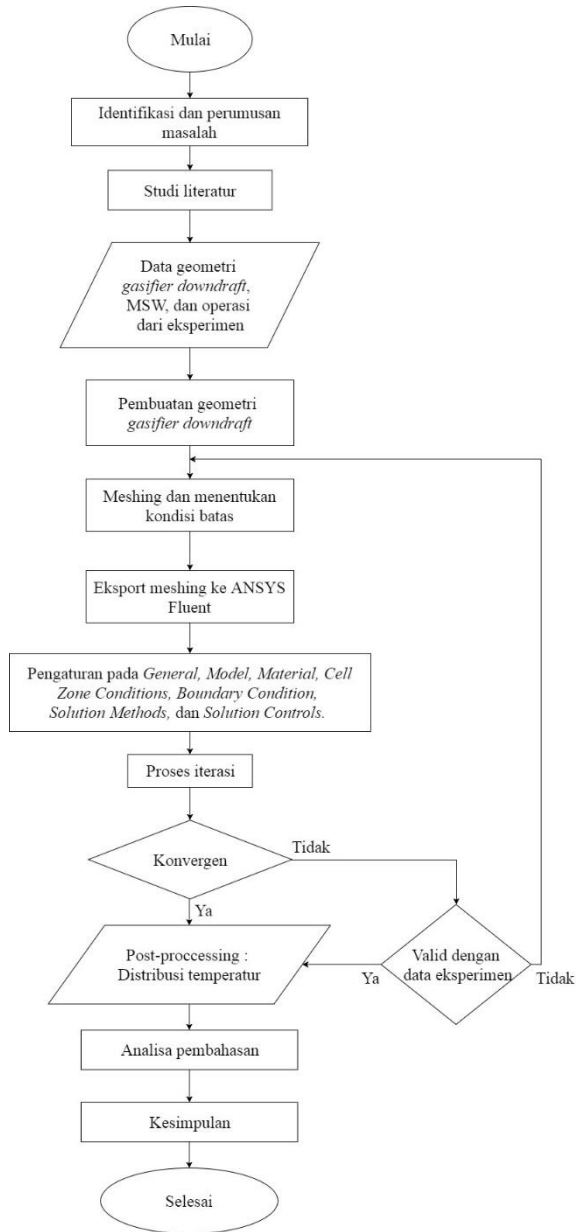
post-processing, dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Ansys Fluent 16.

5. Analisa dan Kesimpulan

Pada akhir simulasi ditampilkan hasil secara kuantitatif dan kualitatif seperti distribusi suhu dan distribusi gas saat proses gasifikasi. Hasil simulasi tersebut digunakan untuk menganalisa pengaruh variasi pengaruh penambahan suhu udara masuk terhadap peningkatan proses gasifikasi pada reaktor tipe *downdraft*.

3.3. Diagram Alir Penelitian

Berdasarkan uraian tahapan penelitian yang telah dijelaskan pada sub-bab sebelumnya, diagram alir penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir

3.4. Tahap pemodelan dan simulasi

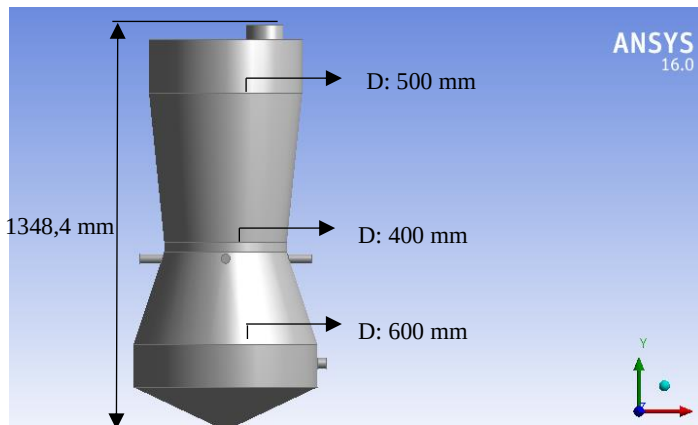
Tahap pemodelan dan simulasi pada penelitian ini menggunakan perangkat lunak CFD komersial. Tahap utama dalam pemodelan dan simulasi yang dilakukan adalah *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*.

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

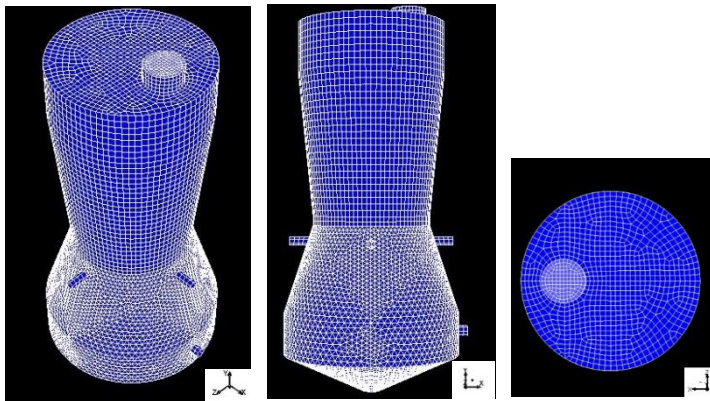
Penelitian ini meninjau pada bagian dalam reaktor, sehingga pembuatan geometri dengan perangkat lunak Workbench Ansys juga dibuat hanya pada bagian dalam reaktor. Geometri reaktor ditunjukkan pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Desain Reaktor

3.4.1.2. **Meshing**

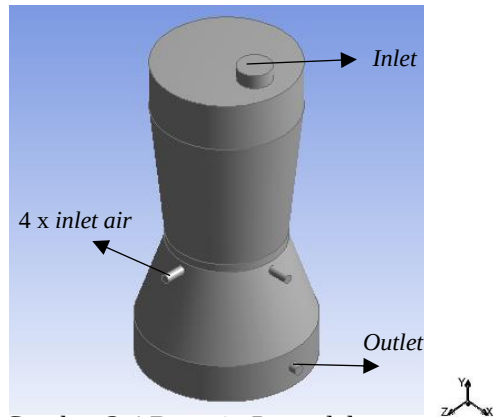
Meshing pada simulasi ini memiliki jumlah node sebanyak 60.221 dan jumlah elemen sebanyak 172.007 . Kualitas *Maximum Ortho Skew* pada *meshing* sebesar 0,79 dimana nilai ini masih berada didalam batas maksimum *Ortho Skew* yaitu 0,9. Hasil *meshing* pada simulasi reaktor tipe *downdraft* ini dapat dilihat pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 *Meshing* pada Reaktor Tipe *downdraft*

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 3.4



Gambar 3.4 Domain Pemodelan

3.4.2. **Processing**

Processing yaitu melakukan pengaturan pada perangkat lunak Ansys Fluent 16. 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 pada reaktor tipe *downdraft*

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

Model radiasi P1 digunakan pada penelitian ini karena cukup stabil dalam memprediksi suhu dan komposisi gas (Lu dan Wang 2012). Model reaksi *finite rate/Eddy dissipation* digunakan karena lebih riil dibandingkan dengan model Eddy dissipation (Silaen dan Wang 2009). 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 MSW yang digunakan pada penelitian terdahulu. Namun, dikarenakan pada perangkat fluent jumlah persentase dari uji *ultimate* diharuskan sama dengan 100% maka dalam fluent harus disama ratakan hasilnya sesuai perbandingan seperti yang ditampilkan pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 *Ultimate Analysis* dan *Proximate Analysis* MSW dalam Perangkat Lunak Fluent

Jenis Uji	Parameter	Satuan	Hasil
Uji Ultimate	Komponen	C	% wt
		H	% wt
		O	% wt
		N	% wt
		S	% wt
Uji Proximate	Moisture In Sampel		% wt
	Ash Content		% wt
	Volatile Matter		% wt
	Fixed Carbon		% wt
	HHV		kJ/kg

3.4.2.2. *Materials*

Propertis material MSW yang digunakan dalam simulasi dengan perangkat lunak Ansys dapat dilihat pada tabel 3.3.,

Tabel 3.3 Propertis Material MSW

<i>Propertis</i>	<i>Nilai</i>	<i>Keterangan</i>
<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> (%)	65,78	Didapat dari penelitian eksperimen
<i>Binary Diffusivity</i> (m ² /s)	4x10 ⁻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>

Tabel 3.4 Reaksi yang Terlibat dalam Proses Gasifikasi

Reaksi		ΔH (kJ/kmol)	A	E (J/kmol)	Sumber
$C(s) + 0.5O_2(g) \rightarrow CO(g)$	R1	-110,5	0,052	$6,1 \times 10^7$	Chen <i>et al.</i> (2000)
$C(s) + CO_2(g) \rightarrow 2CO(g)$	R2	+172	0,00732	$1,125 \times 10^8$	Chen <i>et al.</i> (2000)
$C(s) + H_2O(g) \rightarrow CO(g) + H_2(g)$	R3	+131,4	0,00782	$1,15 \times 10^8$	Chen <i>et al.</i> (2000)
$C(s) + 2H_2(g) \rightarrow CH_4(g)$	R4	-75	0.12	1.7×10^7	Lu dan Wang (2010)
$CO(g) + 0.5 O_2(g) \rightarrow CO_2(g)$	R5	-283,1	$2,2 \times 10^{12}$	$1,67 \times 10^8$	Westbrook dan Dryer (1981)
$H_2(g) + 0.5 O_2(g) \rightarrow H_2O(g)$	R6	-242	$6,8 \times 10^{12}$	$1,68 \times 10^8$	Jones dan Lindstedt (1988)
$CH_4(g) + 0.5 O_2(g) \rightarrow CO(g) + 2H_2(g)$	R7	-36	1×10^{15}	1×10^8	Basu (2012)
$CO(g) + H_2O(g) \rightarrow CO_2(g) + H_2(g)$	R8	-41	$2,75 \times 10^1$ ₀	$6,1 \times 10^7$	Jones dan Lindstedt (1988)
$2CO(g) + 2H_2(g) \rightarrow CH_4(g) + CO_2(g)$	R9	-247	1×10^{10}	1×10^8	Basu (2012)

3.4.2.3. *Boundary Condition*

Input nilai yang digunakan untuk *boundary condition* pada simulasi numerik reaktor tipe *downdraft* ini dapat dilihat pada tabel 3.4.

Tabel 3.4 Pengaturan Boundary Condition yang Digunakan Dalam Pemodelan

Nama <i>Boundary Condition</i>	Tipe	keterangan
<i>Inlet air</i>	<i>Mass flow inlet</i>	$\dot{m}$: 0,003032 kg/s T : 80,110,150,180,200)°C
<i>Inlet Biomass</i>	<i>Mass flow inlet</i>	0,00309 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 16* 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*

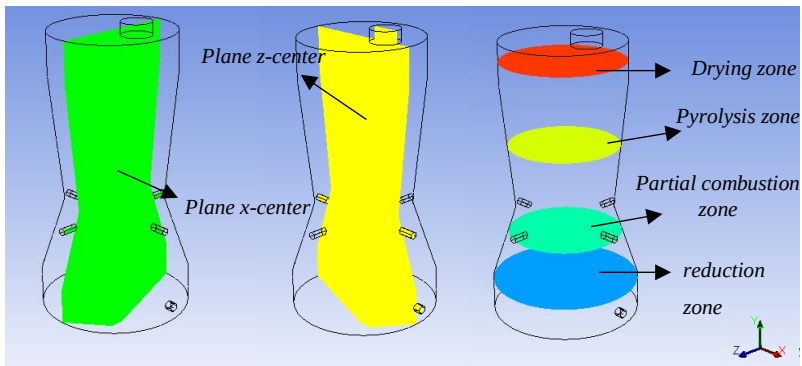
Initialize conditions merupakan nilai awal untuk tiap parameter sebelum proses iterasi sehingga memudahkan simulasi dalam mencapai konvergen. *Initialize* yang digunakan dalam simulasi ini adalah *standard initialize*, untuk mendapatkan nilai parameter awal berdasarkan *boundary conditions* dari *inlet*

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 suhu 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 3.5 Pengamatan pada Bagian Penampang Reaktor Yang Dilakudat pada Koordinat X, Y dan Z

3.5. Rancangan Penelitian

Parameter input pada simulasi numerik untuk menganalisa distribusi suhu setiap bagian proses gasifikasi di reaktor tipe *downdraft* akibat pengaruh variasi suhu udara *inlet* dapat dilihat pada tabel 3.5. Parameter output yang diharapkan dari simulasi dapat dilihat pada tabel 3.6.

Tabel 3.5 Parameter *Input* Penelitian

Parameter	<i>Input</i>	Nilai
Udara <i>inlet</i>	Suhu	(80,110,150,180,200)°C
	<i>Mass flow rate</i>	0,003032 kg/s
Biomassa MSW	<i>Mass flow rate</i>	0,00309 kg/s

Tabel 3.6 Parameter *Output* Simulasi

Output	Keterangan
Temperatur	Plane-x center reaktor
	Plane-z center reaktor
	Plane-y (drying zone, pyrolysis zone, partial combustion zone, reduction zone)
Persentase Volumetrik Gas (H ₂ ,CO,CH ₄)	Plane-x center reaktor
	Plane-z center reaktor
	Plane-y (drying zone, pyrolysis zone, partial combustion zone, reduction zone)
<i>LHV Syngas dan Cold Gas Efficiency</i>	Outlet syngas

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

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.

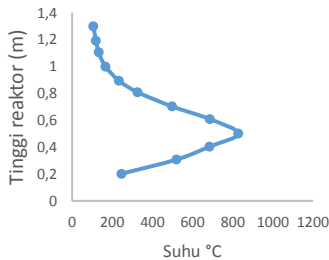
Pada simulasi gasifikasi dengan reaktor tipe *downdraft* ini digunakan model *species transport* dengan *discrete phase model*. Model *species transport* digunakan karena sesuai untuk jenis pembakaran yang sangat bergantung kepada reaksi kimia stoikiometri. melalui permodelan ini, biomassa akan mengalami 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.

Peningkatan suhu di zona oksidasi parsial, akan mempengaruhi laju reaksi pada reaktor. Beberapa reaksi kimia pada proses reduksi, merupakan proses penting terbentuknya beberapa senyawa yang berguna untuk menghasilkan *flammable gas* seperti H_2 , CO , CH_4 atau dikenal dengan *producer gas*.

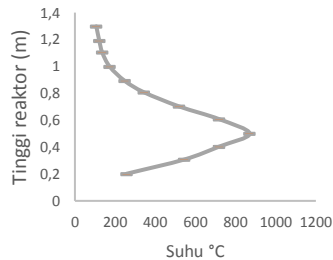
Pengamatan dilakukan terhadap karakteristik aliran fluida yang meliputi distribusi suhu dan distribusi fraksi mol dalam proses gasifikasi *downdraft* secara tiga dimensi..

4.1. Analisis Distribusi Suhu Sepanjang Reaktor

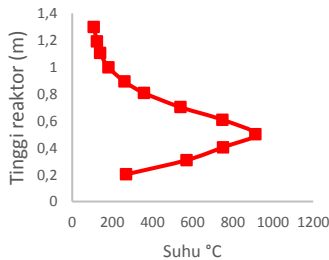
Salah satu parameter output dari proses gasifikasi adalah distribusi suhu sepanjang reaktor (zona *drying*, zona pirolisis, zona oksidasi parsial, dan zona reduksi). Distribusi suhu sepanjang reaktor ditampilkan untuk mengetahui pengaruh suhu pemanasan udara yang divariasikan dalam lima variasi yaitu 80 °C, 110 °C, 150 °C, 180 °C, dan 200 °C . Nilai suhu setiap zona diambil menggunakan menu *Report-Surface integral-Area weighted average* pada posisi termokopel yang sesuai dengan metode eksperimen. Menu *Area weighted average* digunakan untuk mengambil nilai rata-rata suhu pada penampang koordinat Y. Untuk menentukan batas-batas antar zona pada proses gasifikasi, grafik pada Gambar 4.1 di dapat dengan 12 titik posisi awal yang diambil yaitu pada tinggi reaktor : 0,2 m, 0,3 m, 0,4 m, 0,5 m, 0, 6 m, 0,7 m, 0,8 m, 0,9 m, 1 m, 1,1 m, 1,2 m, dan 1,3 m.



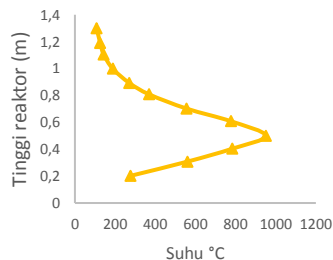
(a)



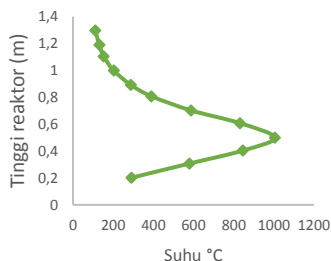
(b)



(c)



(d)



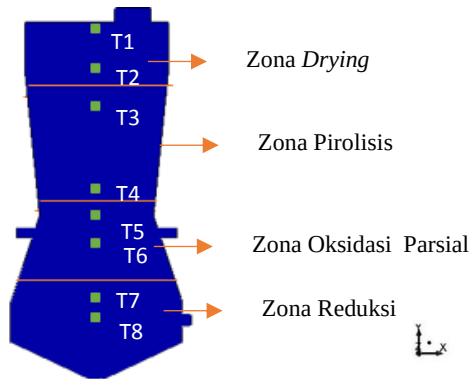
(e)

Gambar 4.1 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

Berdasarkan Gambar 4.1 (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.

Menurut (Basu, 2010) batas zona pirolisis akan terjadi pada kisaran suhu 150-700 °C. Dapat dilihat bahwa gambar 4.1 (a)-(e), secara berturut-turut menunjukkan nilai suhu 700 °C pada ketinggian; 0,61 cm, 61,5 cm, 62 cm, 63 cm, 65 cm. Nilai-nilai tersebut menunjukkan bahwa, pada kisaran 60 – 65 cm merupakan batas dari zona pirolisis, dimana menghasilkan produk berupa hidrogen, karbon monoksida, karbon dioksida, hidrokarbon, dan *char* (Basu, 2010).

Pada ketinggian 50 cm dengan variasi suhu udara; 80°C, 110 °C, 150 °C, 180 °C, 200 °C, menghasilkan suhu pada dasar reaktor secara berturut-turut bernilai; 830 °C 870 °C, 910 °C, 950 °C, 1004 °C. Nilai-nilai tersebut menunjukkan suhu maksimum pada zona oksidasi parsial. Menurut (Basu,2010) zona oksidasi akan terjadi pada kisaran suhu 700-1500 °C, sehingga suhu oksidasi parsial pada penelitian ini sesuai karena masih berada pada *range* tersebut. Pada zona oksidasi parsial terjadi reaksi-reaksi eksotermik (*char combustion, partial oxidation, hydrogen combustion*) yang mengasilkan produk karbon dioksida (CO₂), karbon monoksida (CO), dan uap air (H₂O). Menurut Satake (2006), zona reduksi beroperasi pada kisaran suhu 400-700°C. Dengan begitu dapat diketahui batas antara zona oksidasi parsial dan zona reduksi untuk variasi suhu udara; 80°C, 110 °C, 150 °C, 180 °C, 200 °C, secara berturut-turut pada kisaran ketinggian; 41 cm, 39,5 cm, 39 cm, 38 cm, 37 cm. Zona reduksi ditunjukan pada ketinggian 30 cm dengan variasi suhu udara; 80°C, 110 °C, 150 °C, 180 °C, 200 °C, menghasilkan suhu secara berturut-turut bernilai; 520°C, 530 °C, 545 °C, 560 °C, 580 °C. Dengan demikian besar zona maksimum proses gasifikasi pada reaktor telah diketahui, yaitu pada variasi suhu udara 200°C antara lain; zona *drying* pada ketinggian antara 110-130 cm, zona pirolisis pada ketinggian antara 65-110 cm, zona oksidasi pada ketinggian antara 37-65 cm, dan zona reduksi pada ketinggian antara 20-37 cm.

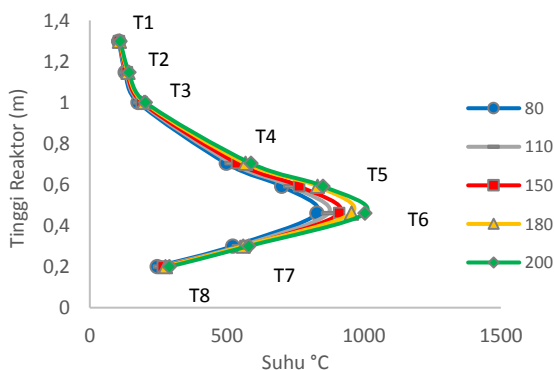


Gambar 4.2 Batas-batas zona pada reaktor *downdraft* dengan variasi suhu udara 200 °C dan posisi termokopel T1-T8

Batas-batas antar zona pada proses gasifikasi berdasarkan metode numerik ini dapat mengevaluasi serta memberikan rekomendasi dari metode eksperimen untuk menentukan posisi termokopel dengan reaktor yang sama. Penempatan termokopel pada metode eksperimen antara lain : T1= 1,30 m; T2= 1,14 m; T3=1 m; T4= 0,7 m; T5= 0,6 m; T6= 0,5 m; T7= 0,3 m; T8= 0,2 m. Pada gambar 4.2 menunjukan bahwa penempatan termokopel pada zona *drying* untuk T1 sesuai karena untuk mengukur suhu pada ujung reaktor. Rekomendasi untuk posisi T2 untuk penelitian eksperimen selanjutnya dipindahkan pada ketinggian 1,2 m, dimana posisi tersebut dapat menjadi representatif suhu pada zona *drying*. Pada zona pirolisis T3 dan T4 dapat direkomendasikan untuk mengubah posisi termokopel pada ketinggian 0,875 m, dimana pada posisi tersebut dapat mewakili suhu zona pirolisis. T5 dan T6 dapat direkomendasikan penempatan termokopel pada ketinggian 0,51 m sebagai representatif suhu di zona oksidasi. T7 pada ketinggian 0,3 m sudah dapat dijadikan representatif suhu di zona reduksi. Sedangkan T8 diketahui sebagai representative suhu pada zona *outlet syngas*.

Berikut gambar 4.3 ditunjukan grafik perbandingan suhu sepanjang reaktor dengan nilai rata-rata suhu setiap penampang

koordinat Y dengan posisi termokopel sesuai pada metode eksperimen (T1-T8). Terlihat bahwa peningkatan yang paling signifikan pada grafik terjadi pada ketinggian yang terpasang di zona oksidasi parsial sebesar 174 °C (dari variasi suhu udara 80-200 °C). Hal tersebut terjadi karena udara yang dipanaskan disuplai tepat di zona oksidasi, sehingga reaksi-reaksi yang terjadi menghasilkan panas yang besar.

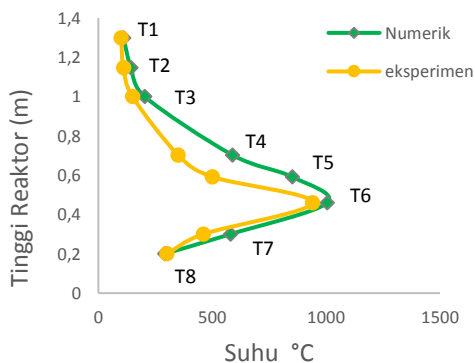


Gambar 4.3 Grafik Distribusi Rata-Rata Suhu Sepanjang Reaktor dengan Penambahan Variasi Suhu Udara

Gambar 4.3 menunjukkan sedikit peningkatan suhu di zona *drying* seiring dengan bertambahnya suhu inlet zona oksidasi yaitu sebesar 10°C pada T2 dengan variasi suhu udara dari 80-200 °C. Selanjutnya peningkatan suhu zona pirolisis terlihat pada T4 dengan variasi suhu udara dari 80-200 °C sebesar 80°C. Seiring dengan semakin besar jarak dari zona oksidasi parsial dikarenakan penambahan variasi suhu udara, menyebabkan perpindahan panas dari zona oksidasi parsial ke zona pirolisis lebih besar sehingga peningkatan semakin besar. Peningkatan suhu zona oksidasi parsial pada T6 dengan variasi suhu udara dari 80-200 °C sebesar 174 °C, peningkatan suhu zona oksidasi parsial ini lebih signifikan dibandingkan dengan zona pirolisis. Zona reduksi, suhunya meningkat sebesar 60°C pada T7 berdasarkan penambahan suhu

udara inlet zona oksidasi parsial yang ditingkatkan dari 80 °C sampai 200 °C.

Selanjutnya dilakukan validasi dengan membandingkan antara metode numerik dengan metode eksperimen, yang diambil dari salah satu variasi suhu udara inlet yaitu 200 °C. Berdasarkan Gambar 4.4, pola distribusi suhu antara kedua metode ini hampir sama. Perbedaan kecil ditemukan pada metode numerik, dimana model *steady* dengan asumsi tidak menggunakan *multiphase* sehingga hasil yang di dapat lebih ideal. Indikasi pada metode eksperimen, bahwa dimungkinkan terjadinya losses sehingga terjadi perbedaan dengan metode numerik.

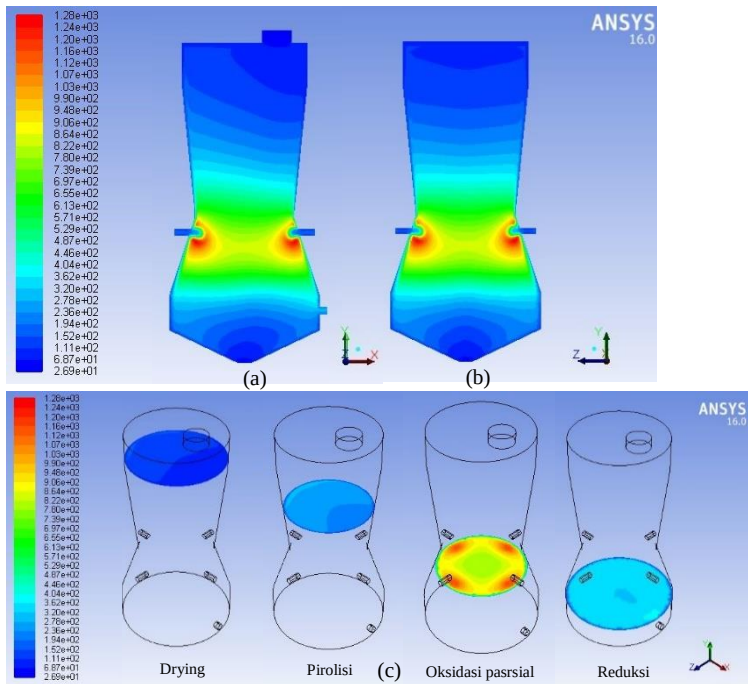


Gambar 4.4 Perbandingan Grafik Distribusi Rata-Rata Suhu Sepanjang Reaktor pada Uji Numerik dengan Uji Eksperimen

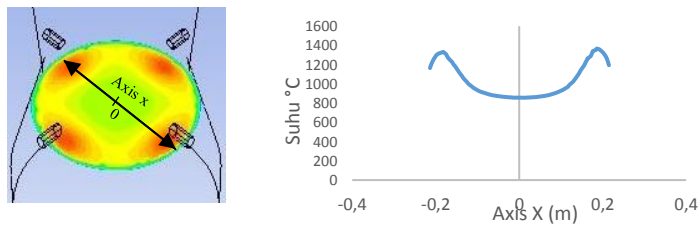
Hasil distribusi rata-rata suhu sepanjang reaktor berupa kontur dari setiap variasi penambahan panas udara hampir sama, sehingga hanya akan ditampilkan salah satu kontur. Distribusi suhu sepanjang reaktor berupa kontur dapat dilihat pada Gambar 4.5, adalah hasil dari simulasi penambahan variasi suhu udara pada 200 °C. Fenomena distribusi suhu pada gambar tersebut terjadi saat proses gasifikasi sudah cukup merata, dilihat dari kontur setiap penampang koordinat X dan Z, serta ditinjau dari setiap zona yang dapat dilihat pada penampang koordinat Y. Hasil pada zona *drying*

dan pirolisis menunjukkan, bahwa distribusi suhu kurang simetris terjadi pada penampang koordinat Z sebagaimana Gambar 4.5 (a). Indikasi yang mengakibatkan ketidaksimetrisan ini adalah faktor desain reaktor. Pada zona *drying*, geometri input biomassa berada pada posisi yang tidak simetris pada bidang tengah z dan memiliki diameter yang berbeda dengan diameter dinding reaktor, sehingga distribusi suhu tidak merata ke seluruh dinding reaktor. Jika desain reaktor diganti dengan membuat posisi input biomassa berada ditengah reaktor diindikasikan menghasilkan perbedaan suhu akan sangat kecil.

Pada penampang koordinat Y sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.5 (c), distribusi suhu berupa kontur dapat terlihat lebih jelas pada setiap zona. Kontur distribusi suhu pada zona *drying* terletak pada T2, zona pirolisis pada T4, zona oksidasi parsial pada T6 dan zona reduksi pada T7. Suhu terdistribusi cukup merata pada zona *drying* dan pirolisis, namun saat diinput biomassa pada posisi samping membuat distribusi suhu kurang simetris. Zona oksidasi pada kontur penampang koordinat Y terlihat kurang merata, sebagaimana di plot dan ditunjukkan secara grafik pada Gambar 4.6. Grafik pada T7 axis X menunjukkan area yang berada didekat nozel lebih tinggi suhunya daripada area tengah pada zona oksidasi parsial. Hal ini diindikasikan akibat densitas dari pelet yang melalui *throat* pada zona oksidasi parsial masih cukup rapat, sehingga udara yang masuk pada reaktor terhambat oleh pelet. Oleh karena itu, untuk saran penelitian selanjutnya penempatan lubang nozel berada jauh dibawah *throat*. Sehingga pelet yang melewati *throat* memiliki celah untuk udara masuk hingga tengah reaktor.



Gambar 4.5 Kontur Distribusi Suhu Pada Variasi Suhu Udara Inlet 200 °C
(a) Koordinat Z (B) Koordinat X (C) Koordinat Z



Gambar 4.6 Kontur dan Grafik Suhu terhadap Koordinat X pada Zona Oksidasi Parsial

Pada penelitian secara eksperimen, ketika suhu udara inlet dipanaskan mencapai 200 °C, suhu zona oksidasi parsial mencapai 924 °C, zona oksidasi parsial yang dicapai adalah 1004 °C. Faktor terjadinya perbedaan suhu zona oksidasi 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%. Sehingga dalam *fluent* harus disamaratakan hasilnya sesuai perbandingan seperti yang ditampilkan pada tabel 3.2. Faktor lainnya, yaitu proses gasifikasi yang terjadi secara metode numerik dalam kondisi ideal, sedangkan kekurangan pada proses gasifikasi secara eksperimen dapat terjadi karena pengaruh dari dinding reaktor yang dimungkinkan terjadi kebocoran sehingga menyebabkan losses.

4.2. Analisis Komposisi *Flammable Syngas*

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. Hasil komposisi *syngas* dari penelitian secara numerik disajikan pada Tabel 4.1, sedangkan Tabel 4.2 merupakan perbandingan nilai persentase volumetrik setiap senyawa *flammable syngas* pada setiap variasi suhu inlet udara zona oksidasi dengan metode numerik dan eksperimen.

Tabel 4.1 Komposisi Syngas dari Metode Numerik

Suhu udara (°C)	CO (% vol)	H ₂ (% vol)	CH ₄ (% vol)	CO ₂ (% vol)	N ₂ (% vol)	O ₂ (% vol)
80	21,64	9,24	2,86	2,62	61,60	2,04
110	21,80	9,45	2,90	2,30	61,60	1,94
150	22,12	9,87	2,98	1,87	61,59	1,58
180	22,43	10,28	3,05	1,52	61,58	1,14
200	22,65	10,50	3,10	1,34	61,58	0,83

Berdasarkan pada hasil Tabel 4.1 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 °C hingga 200 °C. 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 °C hingga 200 °C. 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.

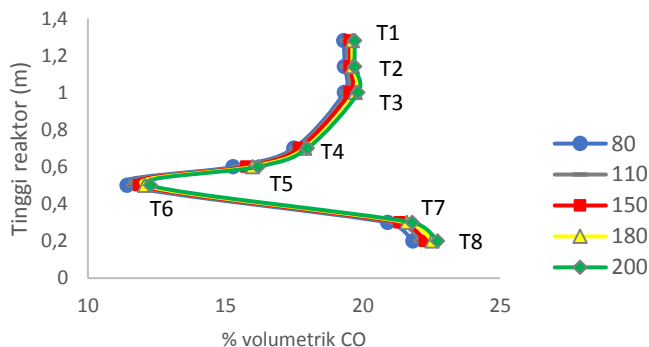
Tabel 4.2 Perbandingan Komposisi *Flammable Syngas* antara Metode Numerik dengan Eksperimen

Suhu udara (°C)	Metode numerik			Metode eksperimen			Δ CO (%)	Δ H ₂ (%)	Δ CH ₄ (%)
	CO (% vol)	H ₂ (% vol)	CH ₄ (% vol)	CO (% vol)	H ₂ (% vol)	CH ₄ (% vol)			
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

Jika dibandingkan dengan penelitian secara eksperimen, hasil komposisi syngas yang di dapatkan cukup berbeda. Dapat dilihat dari selisih nilai persentase volumetrik dari *flammable gas* antara metode numerik dengan eksperimen, secara keseluruhan menghasilkan nilai yang lebih besar. Diindikasikan metode numerik menggunakan proses gasifikasi terjadi 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%. Sehingga dalam *fluent* harus disamaratakan hasilnya sesuai perbandingan seperti yang ditampilkan pada tabel 3.2.

4.2.1. Analisis Distribusi Volumetrik CO

Pada Tabel 4.2 dapat dilihat nilai komposisi *syngas* untuk setiap variasi suhu udara inlet zona oksidasi. Komposisi CO dari hasil penelitian setiap variasi penambahan suhu udara secara numerik terlihat meningkat, namun tidak terlalu signifikan dibandingkan dengan penelitian secara eksperimen. Pengaruh suhu pemanasan udara yang divariasikan terhadap persentase volumetrik CO sepanjang reaktor dapat diketahui melalui gambar 4.7, dimana ditampilkan grafik rata-rata persentase volumetrik CO untuk 5 variasi penambahan suhu udara inlet. Nilai persentase volumetrik CO setiap zona diambil menggunakan menu *Report-Surface integral-Area weighted average* pada posisi termokopel yang sesuai dengan metode eksperimen. Menu *Area weighted average* digunakan untuk mengambil nilai rata-rata persentase volumetrik CO pada permukaan koordinat Y di ketinggian setiap termokopel.



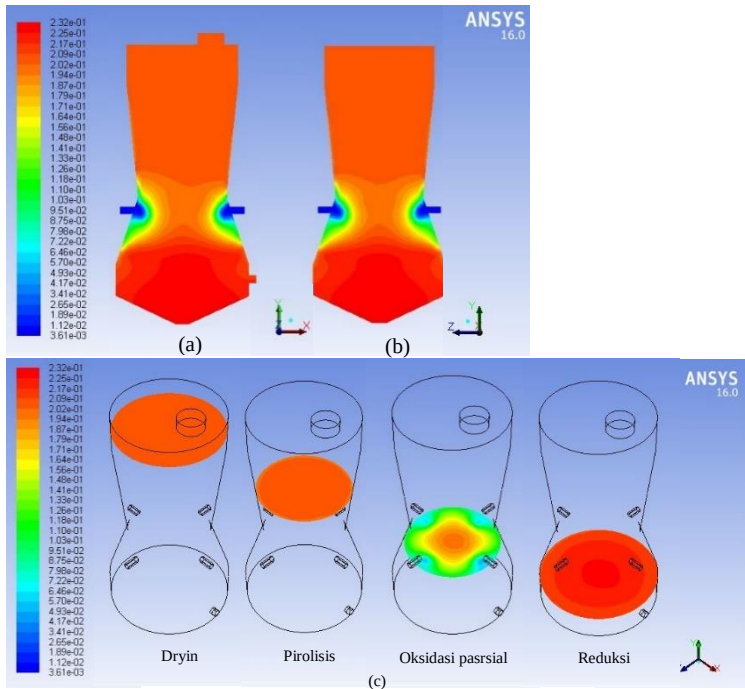
Gambar 4.7 Grafik Distribusi Rata-Rata persentase volumetrik CO Sepanjang Reaktor Dengan Variasi Suhu Udara *Inlet*

Jika ditinjau dari grafik distribusi rata-rata persentase volumetrik CO yang ditunjukkan gambar 4.7, senyawa CO pada zona *drying* tidak signifikan. Hal ini dikarenakan permodelan yang dipakai reaksi-reaksi pada tabel 3.4 pada penelitian ini, tidak terjadi

pada zona *drying*. Menurut Nikolopoulos (2011) untuk mengetahui proses *drying* harus di modelkan dengan model *multiphase* dan menggunakan UDF(*user define function*) pada fluent. Namun, penelitian ini tidak menggunakan model *multiphase* dan UDF, sehingga proses *drying* pada reaktor tidak dapat terlihat.

Zona pirolisis cukup sesuai karena terjadi proses devolatilisasi diman mengurai pelet MSW yang sudah kering menjadi beberapa produk gas, salah satunya adalah gas CO. Pada Gambar 4.7 nilai persentase volumetrik CO di zona pirolisis (T3 dan T4) kurang dari 20% dimana pada kisaran zona tersebut produk CO yang dihasilkan sebesar 10-20 %mol, (Basu, 2012). Kemudian pada zona oksidasi parsial (T5 dan T6) dengan peningkatan suhu udara dari 80-200 °C menyebabkan nilai persentase volumetrik CO menurun. Jika ditinjau lebih detail dari gambar 4.7 variasi suhu udara 200°C selisih nilai persentase volumetrik CO antara T5 dan T6 yaitu 3,92% lebih besar daripada variasi suhu udara 80°C yaitu 3,85%. Hal ini menunjukkan bahwa pada proses oksidasi parsial lebih reaktif dengan penambahan suhu udara yang lebih tinggi, sehingga reaksi pada zona tersebut akan lebih cepat. Peningkatan nilai persentase volumetrik CO yang signifikan dari T6 ke T7 menunjukkan bahwa pada zona reduksi banyak memproduksi CO. Sedangkan pada T8, nilai persentase volumetrik CO juga meningkat namun tidak terlalu signifikan.

Distribusi persentase volumetrik CO sepanjang reaktor berupa kontur disajikan pada gambar 4.8 adalah hasil dari simulasi penambahan variasi suhu udara pada suhu 200 °C. Pada kontur tersebut distribusi sudah cukup merata, hal ini dapat dilihat pada gambar kontur pada setiap penampang koordinat X dan Z, serta ditinjau dari setiap zona yang dapat dilihat pada penampang koordinat Y. Secara teori gas CO pada zona *drying* belum terbentuk, namun pada penelitian ini gas CO sudah mulai terlihat pada zona *drying*. Terdapat indikasi bahwa besar gas CO pada zona pirolisis terangkat kembali ke zona *drying*, sehingga besar CO pada zona pirolisis dan *drying* mendekati sama besarnya.



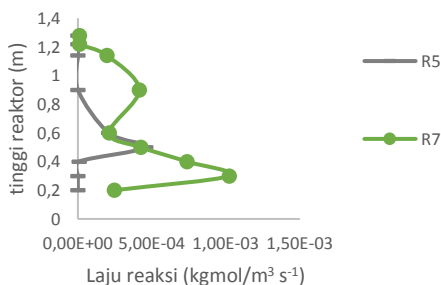
Gambar 4.8 Kontur Distribusi persentase volumetrik CO pada Variasi Suhu Udara Inlet 200 °C, (a) Koordinat Z (b) Koordinat X (c) Koordinat Y

Proses devolatilisasi yang terdapat pada zona pirolisis, sebaran CO terlihat merata. Dapat dilihat pada batas antara zona pirolisis dan zona oksidasi parsial gas CO mulai berkurang karena mengalami transisi reaksi-reaksi pada zona oksidasi. Kemudian pada zona oksidasi terlihat nilai persentase volumetrik CO rendah karena CO bereaksi dengan oksigen (R5) untuk menghasilkan CO₂ ($\text{CO(g)} + 0.5\text{O}_2\text{(g)} \rightarrow \text{CO}_2\text{(g)}$). Disamping itu pada zona ini CO juga dapat dihasilkan melalui pembakaran parsial (R1), sehingga produk dari pembakaran parsial ini akan dilanjutkan dengan reaksi pada zona reduksi. Reaksi pembakaran parsial ($\text{C(s)} + 0.5\text{O}_2\text{(g)} \rightarrow \text{CO(g)}$) yang menghasilkan produk CO ini merupakan reaksi yang

lambat (Basu, 2012). Pada penampang koordinat Y pada zona oksidasi parsial menunjukkan terjadinya reaksi oksidasi (R5) di dekat lubang nozel, sehingga senyawa CO menurun. Selain itu zona oksidasi parsial pada penampang koordinat Y juga menunjukan proses reaksi yang kurang merata. Jika arah sudut nozel diubah atau dengan memperbanyak jumlah lubang nozel kemungkinan proses reaksi yang terjadi lebih merata.

Kemudian pada zona reduksi dapat ditunjukkan dari kontur dan grafik terlihat gas CO terbentuk cukup banyak. Terdapat 3 reaksi yang menghasilkan CO, yaitu (1) reaksi *boudouard* (R1) yaitu mengubah char yang bereaksi dengan CO_2 menjadi CO, (2) reaksi *water-gas* (R3) yaitu mengubah char yang bereaksi dengan H_2O menjadi CO dan H_2 , (3) reaksi *steam reforming* (R7) yang mengubah CH_4 menjadi CO dan H_2 karena bereaksi dengan O_2 .

Pada reaksi *boudouard* dan *water-gas* mempunyai laju reaksi yang lambat dan dikarenakan pada penelitian ini tidak menggunakan UDF (*user define function*) maka laju reaksi yang berhubungan dengan *char* tidak dapat disajikan pada Gambar 4.9. Dapat dilihat bahwa reaksi R5 terjadi di zona oksidasi parsial dan laju reaksi terbesar pada ketinggian 0.5 m. Reaksi R7 terlihat pada zona pirolisis dan oksidasi parsial, namun laju reaksi terbesar pada ketinggian 0.3 m yaitu pada zona reduksi.

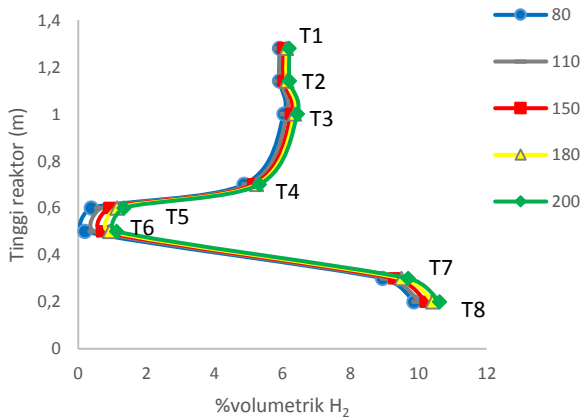


Gambar 4.9 Grafik Laju Reaksi R5 dan R7

Pada penelitian secara eksperimen, ketika suhu udara inlet dipanaskan sampai suhu 200°C, jumlah presentase volumetric CO pada *outlet* gasifier mencapai 21,99%. Sedangkan pada penelitian ini jumlah presentase volumetric CO pada *outlet* gasifier yang dicapai adalah 22,65%. Perbedaan jumlah presentase volumetrik CO antara kedua metode ini sebesar 1,27%. Faktor terjadinya perbedaan presentase volumetrik CO antara kedua metode ini 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%. Sehingga dalam *fluent* harus disamaratakan hasilnya sesuai perbandingan seperti yang ditampilkan pada tabel 3.2.

4.2.2. Analisis Distribusi Volumetrik H₂

Nilai komposisi *syngas* secara numerik untuk setiap variasi penambahan suhu udara inlet zona oksidasi yang disajikan pada tabel 4.2, menunjukkan peningkatan yang signifikan terhadap komposisi gas H₂. Pada suhu udara 80-110 °C persentase volumetrik *flammable syngas* H₂ meningkat sebesar 0,2%. Sedangkan pada suhu udara 150-200 °C persentase volumetrik H₂ meningkat sebesar 0,6%. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin meningkatnya suhu udara inlet pada zona oksidasi, persentase volumetrik H₂ juga semakin besar. Grafik distribusi rata-rata persentase volumetrik H₂ disajikan pada gambar 4.8. Nilai persentase volumetrik gas H₂ setiap zona diambil menggunakan menu *Report-Surface integral-Area weighted average* pada posisi termokopel yang sesuai dengan metode eksperimen. Menu *Area weighted average* digunakan untuk mengambil nilai rata-rata persentase volumetrik H₂ pada permukaan koordinat Y di ketinggian setiap termokopel.

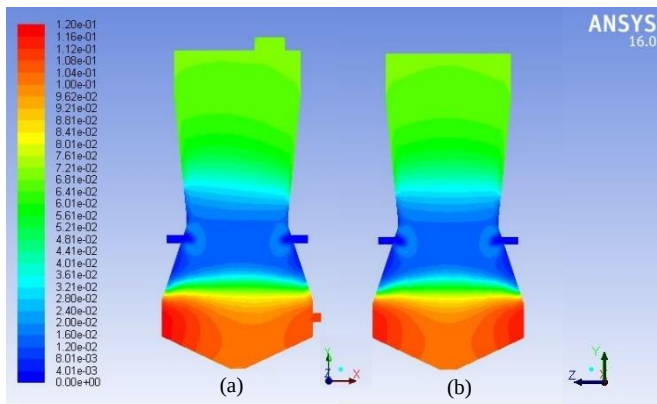


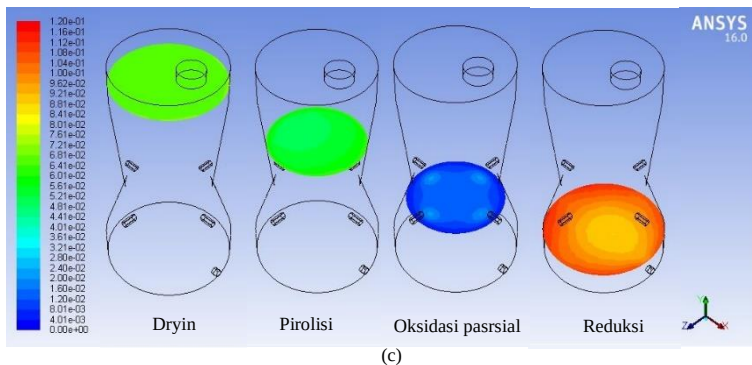
Gambar 4.10 Grafik Distribusi Rata-Rata persentase volumetrik H₂ Dengan Variasi Suhu Udara Inlet

Jika ditinjau dari grafik distribusi rata-rata persentase volumetrik H₂, pada zona *drying* gas H₂ tidak signifikan. Hal ini dikarenakan reaksi- reaksi permodelan yang dipakai pada tabel 3.4 tidak terjadi pada zona *drying*. Menurut Nikolopoulos (2011) untuk mengetahui proses *drying* harus di modelkan dengan model *multiphase* dan menggunakan UDF(*user define function*) pada fluent. Namun, penelitian ini tidak menggunakan model *multiphase* dan UDF, sehingga proses *drying* pada reaktor tidak dapat terlihat. Pada zona pirolisis terjadi proses devolatilisasi yang mengurai pelet MSW yang sudah kering menjadi beberapa produk gas, salah satunya adalah H₂. Hal ini sesuai, dikarenakan hingga suhu 600°C gas H₂ akan mengalami terjadi kenaikan akibat *shift reaction*, dan akan mengalami penurunan ketika diatas suhu 600°C (Basu, 2012). Kemudian pada zona oksidasi parsial (T5 dan T6) dengan peningkatan suhu udara dari 80 hingga 200 °C menyebabkan nilai persentase volumetrik H₂ menurun. Jika ditinjau lebih detail dari gambar 4.10 variasi suhu udara 200°C selisih nilai persentase volumetrik H₂ antara T5 dan T6 yaitu 0,21% lebih besar daripada variasi suhu udara 80°C yaitu 0,18%.

Hal ini menunjukkan bahwa pada proses pembakaran H_2 lebih reaktif dengan penambahan suhu udara yang lebih tinggi, sehingga reaksi pada zona tersebut akan lebih cepat. Peningkatan nilai persentase volumetrik H_2 yang signifikan dari T6 ke T7 menunjukkan bahwa zona reduksi banyak memproduksi H_2 . Sedangkan pada T8 nilai persentase volumetrik H_2 juga meningkat namun tidak terlalu signifikan.

Distribusi persentase volumetrik H_2 sepanjang reaktor berupa kontur disajikan pada gambar 4.11 adalah hasil dari simulasi penambahan variasi suhu udara pada suhu 200 °C. Pada kontur tersebut distribusi sudah cukup merata, hal ini dapat dilihat pada gambar kontur pada setiap penampang koordinat X dan Z, serta ditinjau dari setiap zona yang dapat dilihat pada penampang koordinat Y. Secara teori gas H_2 pada zona drying belum terbentuk, namun pada penelitian ini gas H_2 sudah mulai terlihat pada zona drying. Terdapat indikasi bahwa besar gas H_2 pada zona pirolisis terangkat kembali ke zona *drying*, sehingga besar H_2 pada zona pirolisis dan *drying* mendekati sama besarnya. Pada proses devolatilisasi yang terdapat pada zona pirolisis terlihat sebaran H_2 terlihat merata dan dapat dilihat pada perbatasan zona ini dan zona oksidasi parsial terlihat H_2 mulai berkurang karena mengalami transisi bereaksinya reaksi-reaksi pada zona oksidasi.



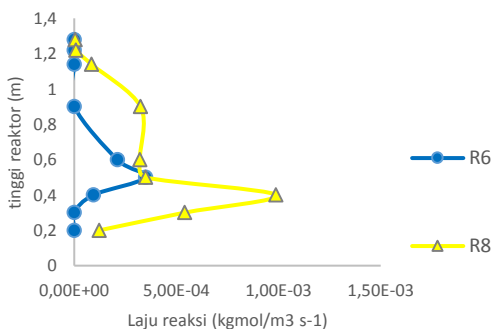


Gambar 4.11 Kontur Distribusi Rata-Rata Persentase Volumetrik H_2 Pada Variasi Suhu Udara Inlet $200^\circ C$, (a) Koordinat Z (b) Koordinat X (c) Koordinat Y

Kemudian pada zona oksidasi persentase volumetrik H_2 mulai menurun karena H_2 bereaksi dengan oksigen (R6) untuk menghasilkan H_2O . H_2 juga mengalami penurunan hingga batas zona reduksi, dikarenakan bereaksi dengan CO (R9) sehingga terbentuk CH_4 dan CO_2 . Penambahan suhu udara inlet $200^\circ C$ mengakibatkan persentase volumetrik H_2 pada zona ini lebih kecil dibanding pada variasi penambahan suhu udara inlet $80^\circ C$. Pada bidang y pada zona oksidasi parsial menunjukkan terjadinya reaksi oksidasi pada H_2 yang menghasilkan H_2O di dekat lubang nozel. Selain itu pada bidang XZ pada zona oksidasi parsial juga menunjukkan proses reaksi yang kurang merata. Jika arah sudut nozel diubah atau dengan memperbanyak jumlah lubang nozel, kemungkinan proses reaksi yang terjadi lebih merata. Lalu pada zona reduksi dapat dilihat dari kontur dan grafik sudah mulai membentuk gas H_2 . Zona reduksi merupakan zona yang banyak memproduksi H_2 karena terdapat dua reaksi yang menghasilkan H_2 . Yang pertama adalah *shift reaction* (R8) yaitu mengubah CO yang bereaksi dengan H_2O menjadi H_2 dan CO_2 . Reaksi yang kedua adalah *water-gas* (R3) yaitu mengubah char yang bereaksi

dengan H_2O menjadi CO dan H_2 . Reaksi yang ketiga yaitu *metane gasification* (R7) yang mengubah CH_4 menjadi CO dan H_2 karena bereaksi dengan O_2 .

Pada reaksi *water-gas* laju reaksi yang lambat, dikarenakan pada penelitian ini tidak menggunakan UDF (*user define function*) maka laju reaksi yang berhubungan dengan *char* tidak dapat disajikan pada Gambar 4.12. Dapat dilihat bahwa reaksi R6 terjadi di zona oksidasi parsial dan laju reaksi terbesar pada ketinggian 0.5 m. Reaksi R8 terlihat pada zona pirolisis dan oksidasi parsial, namun laju reaksi terbesar pada ketinggian 0.4 m yaitu pada awal zona reduksi.



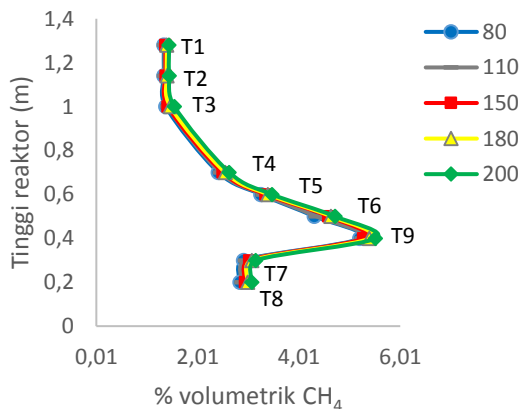
Gambar 4.12 Grafik Laju Reaksi R6 dan R8

Pada penelitian secara eksperimen, ketika suhu udara inlet dipanaskan sampai suhu $200^{\circ}C$, jumlah presentase volumetrik H_2 yang didapat mencapai 8.87%. Sedangkan pada penelitian ini jumlah presentase volumetrik H_2 pada *outlet* gasifier yang dicapai adalah 10,49%. Perbedaan jumlah presentase volumetrik H_2 antara kedua metode ini sebesar 1,67%. Faktor terjadinya perbedaan presentase volumetrik H_2 antara kedua metode ini 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%. Sehingga dalam *fluent* harus disamaratakan hasilnya sesuai perbandingan seperti yang ditampilkan pada tabel 3.2.

4.2.3. Analisis Distribusi Volumetrik CH₄

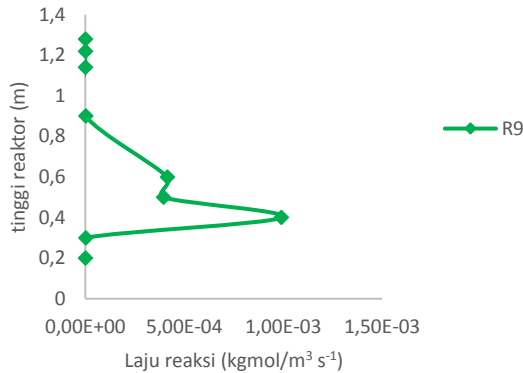
Pada Tabel 4.2 dapat dilihat nilai komposisi syngas untuk setiap variasi suhu udara inlet zona oksidasi. Komposisi CH₄ dari hasil penelitian setiap variasi penambahan suhu udara secara numerik terlihat meningkat, namun tidak terlalu signifikan dibandingkan komposisi *flammable gas* yang lain. Pengaruh suhu pemanasan udara yang divariasikan terhadap persentase volumetrik CH₄ sepanjang reaktor dapat diketahui melalui gambar 4.13, dimana ditampilkan grafik rata-rata persentase volumetrik CH₄ untuk 5 variasi penambahan suhu udara inlet. Nilai persentase volumetrik CH₄ setiap zona diambil menggunakan menu *Report-Surface integral-Area weighted average* pada posisi termokopel yang sesuai dengan metode eksperimen. Menu *Area weighted average* digunakan untuk mengambil nilai rata-rata persentase volumetrik CH₄ pada penampang koordinat Y di setiap ketinggian termokopel.



Gambar 4.13 Grafik Distribusi Rata-Rata persentase volumetrik CH₄ Sepanjang Reaktor dengan Variasi Suhu Udara *Inlet*

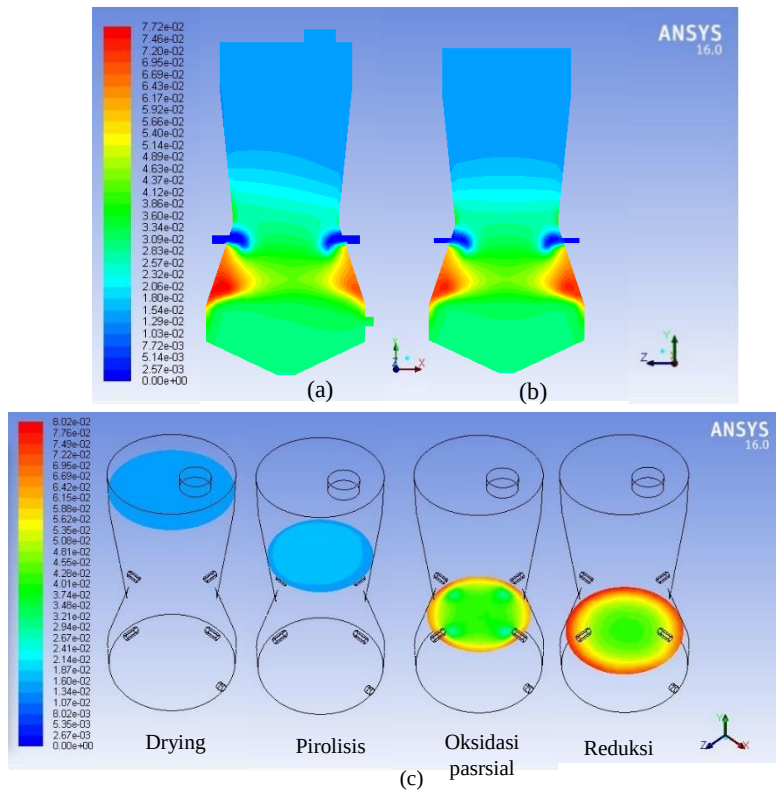
Penambahan titik T9 pada ketinggian 0,4 m untuk mengetahui lebih detail distribusi rata-rata persentase volumetrik CH₄. Jika ditinjau dari distribusi rata-rata persentase volumetrik CH₄ yang ditunjukkan gambar 4.12 , pada zona *drying* gas CH₄ tidak signifikan. Hal ini dikarenakan pada penelitian ini dengan permodelan yang dipakai reaksi-reaksi pada tabel 3.4 tidak terjadi pada zona *drying*. Menurut Nikolopoulos(2011) untuk mengetahui proses *drying* harus di modelkan dengan model *multiphase* dan menggunakan UDF pada fluent. Namun, pada penelitian ini tidak menggunakan model *multiphase* dan UDF, sehingga proses *drying* pada reaktor tidak dapat terlihat. Pada zona pirolisis terlihat mulai terjadi kenaikan CH₄. Hal ini dikarenakan pada zona pirolisis terjadi proses devolatilisasi yang mengurai pelet MSW yang sudah kering menjadi beberapa produk gas, salah satunya adalah CH₄. Senyawa CH₄ juga terjadi peningkatan hingga pada batas antara zona oksidasi parsial dan reduksi (T9). Hal ini dikarenakan pada batas antara zona ini CH₄ diproduksi dari *methanation reaction* (R9). Yaitu bereaksinya CO dan H₂ yang menghasilkan CH₄ dan CO₂.

Produk senyawa CH₄ dari *methanation reaction* (R9) cukup banyak, namun pada akhir zona–reduksi mengalami penurunan karena reaksi *metane gasification* (R7) yang mengubah CH₄ menjadi CO dan H₂ karena bereaksi dengan O₂. Selain itu persentase volumetrik CH₄ mengalami kenaikan dikarenakan reaksi (R4) $C(s) + 2H_2(g) \rightarrow CH_4(g)$ yang mempunyai laju reaksi lambat (Basu, 2010). Pada penelitian ini tidak menggunakan UDF (*user define function*) sehingga laju reaksi yang berhubungan dengan char tidak dapat disajikan pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Grafik Laju Reaksi R9

Distribusi persentase volumetrik CH_4 sepanjang reaktor berupa kontur disajikan pada gambar 4.15 adalah hasil dari simulasi penambahan variasi suhu udara pada suhu 200°C . Pada kontur tersebut distribusi sudah cukup merata, hal ini dapat dilihat pada gambar kontur pada setiap penampang koordinat X dan Z, serta ditinjau dari setiap zona yang dapat dilihat pada penampang koordinat Y. Secara teori pada zona *drying* gas CH_4 belum terbentuk, namun pada penelitian ini gas CH_4 sudah mulai terlihat pada zona *drying*. Terdapat indikasi bahwa besar gas CH_4 pada zona pirolisis terangkat kembali ke zona *drying*, sehingga besar CH_4 pada zona pirolisis dan *drying* mendekati sama besarnya. Pada proses devolatilisasi yang terdapat pada zona pirolisis terlihat sebaran CH_4 terlihat merata dan dapat dilihat pada perbatasan zona ini dan zona oksidasi parsial terlihat CH_4 mulai bertambah karena mengalami transisi bereaksinya reaksi-reaksi pada zona oksidasi parsial. Pada penampang koordinat Y zona oksidasi parsial menunjukkan mulai terjadinya *methanation reaction* yang menghasilkan CH_4 di dekat sekeliling reaktor dan terus meningkat hingga batas antara zona ini dan zona reduksi (T9).



Gambar 4.15 Kontur Distribusi persentase volumetrik CH_4 pada Variasi Suhu Udara Inlet 200°C , (a) Koordinat Z (b) Koordinat X (c) Koordinat Y

Pada penelitian secara eksperimen, ketika suhu udara inlet dipanaskan sampai suhu 200°C , jumlah persentase volumetrik CH_4 pada *outlet* gasifier mencapai 2.44%. Sedangkan pada penelitian ini jumlah persentase volumetrik CH_4 pada *outlet* gasifier sebesar 3.1 %. Perbedaan jumlah persentase volumetrik CH_4 antara kedua metode ini sebesar 0,57%. Faktor terjadinya perbedaan persentase volumetrik CH_4 antara kedua metode ini 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%. Sehingga dalam fluent harus disamaratakan hasilnya sesuai perbandingan seperti yang ditampilkan pada tabel 3.2.

4.3. Analisis Lower Heating Value (LHV) Syngas

Komposisi pada syngas (CO , H_2 , dan CH_4) sangat mempengaruhi nilai kalor bawah (LHV). LHV *flammable syngas* dari penelitian Waldheim (2001) untuk senyawa H_2 sebesar 10.783 kJ/m³, CO sebesar 12.633 kJ/m³, dan LHV pada CH_4 sebesar 35.883 kJ/m³. Persentase volumetrik komposisi syngas yang didapat dari penelitian ini dan LHV *flammable syngas* dilakukan perhitungan *Low heating value* (LHV) pada synthetic gas melalui persamaan sebagai berikut:

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

Keterangan :

Y_i = persentase volumetrik (CO , CH_4 , H_2)

LHV_i = Nilai kalor bawah dari gas terbakar (CO , CH_4 , H_2)

Berikut contoh perhitungan LHV syngas pada variasi suhu udara 200 °C:

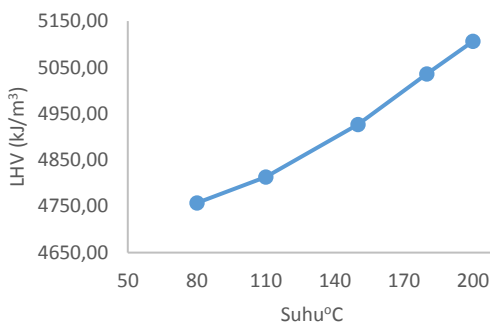
- Y_i untuk gas CO = 22,65% = 0,2265
- Y_i untuk gas H_2 = 10,49% = 0,1049
- Y_i untuk gas CH_4 = 3,10% = 0,0310

$$LHV_{\text{Syngas}} = \sum_{i=1}^n (0,2265 \cdot 12633) + (0,1049 \cdot 10783) + (0,0310 \cdot 35883)$$

$$LHV_{\text{Syngas}} = 5106.02 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

Tabel 4.3 LHV Syngas pada Setiap Variasi Suhu Udara

Suhu udara (°C)	LHV Syngas (kJ/m ³)
80	4757.20
110	4813.51
150	4926.42
180	5035.97
200	5106.02



Gambar 4.16 Grafik Penambahan Suhu Udara Inlet Vs LHV Syngas

Tabel 4.3 dan Gambar 4.16 menunjukkan LHV *syngas* pada variasi suhu udara 80 -200 °C meningkat dari 4757.20 kJ/m³ menjadi 5106.02 kJ/m³ secara signifikan (sebesar 348,82 kJ/m³) dan cenderung linear. Hal ini menunjukkan bahwa suhu reaktor mempengaruhi nilai komposisi *syngas* dan berdampak pada peningkatan LHV *syngas*. Pada persentase volumetrik komposisi *syngas*, variasi suhu udara tidak terlihat berpengaruh tinggi, karena hanya mengalami peningkatan yang kecil. Akan tetapi, setelah ditinjau dari nilai LHV *syngas* yang dihasilkan, pengaruh peningkatan suhu udara terlihat lebih signifikan.

Berbeda dengan penelitian yang dilakukan secara eksperimen, penambahan pemanas udara inlet zona oksidasi mampu meningkatkan LHV *syngas* dari 4227.9 kJ/m³ pada suhu 80 °C menjadi 4609 kJ/m³ pada suhu 200 °C. Perbedaan LHV *syngas* yang dihasilkan dari eksperimen dengan penelitian secara numerik ini dikarenakan beberapa faktor diantaranya yang pertama adalah Faktor yang pertama 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%. Sehingga dalam fluent harus disama ratakan hasilnya sesuai perbandingan seperti yang ditampilkan pada tabel 3.2

4.4. Analisis Cold Gas Efficiency Proses Gasifikasi

Parameter output selanjutnya adalah *cold gas efficiency* dari proses gasifikasi melalui persamaan berikut:

$$\text{Cold gas efficiency} = \frac{\dot{m}_{\text{syngas}} \cdot LHV_{\text{syngas}}}{\dot{m}_{\text{biomassa}} \cdot LHV_{\text{biomassa}}}$$

Keterangan:

$\dot{m}_{\text{syngas}}$ = Laju alir massa syngas (kg/s)

$\dot{m}_{\text{biomassa}}$ = Laju alir massa biomassa (kg/s)

LHV_{syngas} = Lower heating value syngas (kJ/kg)

LHV_{biomassa} = Lower heating value biomassa (kJ/kg)

LHV *syngas* (pada sub bab 4.4) masih dalam satuan kJ/m³. Sehingga, diperlukan nilai massa jenis (*density*) *syngas* sebagai pembagi LHV yang masih per satuan volume. Perhitungan massa jenis *syngas* melalui persamaan berikut:

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

Keterangan:

ρ_{syngas} = massa jenis syngas (kg/m³)

Y_i = persentase volumetrik dalam syngas (tabel 4.2)

$\rho_i \text{ syngas}$ = massa jenis senyawa (kg/m^3)

Berikut contoh perhitungan pada suhu udara 200 °C, massa jenis masing-masing senyawa diperoleh dari *Tabel A.4 Thermophysical properties of gases at atmospheric pressure*.

22,65 % CO	dengan	$\rho = 1,0599 \text{ kg/m}^3$
10,49 % H ₂	dengan	$\rho = 0,07409 \text{ kg/m}^3$
3,10 % CH ₄	dengan	$\rho = 0,5227 \text{ kg/m}^3$
1,34 % CO ₂	dengan	$\rho = 1,6676 \text{ kg/m}^3$
61,58 % N ₂	dengan	$\rho = 1,0339 \text{ kg/m}^3$
0,83 % O ₂	dengan	$\rho = 1,1890 \text{ kg/m}^3$

$$\rho_{\text{syngas}} = \sum_{i=1}^n (0,2265 \cdot 1,0599) + (0,1049 \cdot 0,07409) \\ + (0,0310 \cdot 0,5227) \\ + (0,0134 \cdot 1,6676) \\ + (0,6158 \cdot 1,0339) \\ + (0,0083 \cdot 1,1890) \\ \rho_{\text{gas}} = 0,9329 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

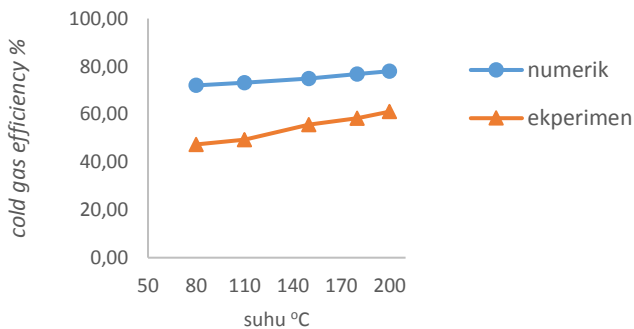
Laju alir massa biomassa pada suhu udara 200 °C adalah 0,00309 kg/s, dan laju alir massa syngas sebesar 0,005389 kg/s. Diketahui juga LHV syngas pada suhu udara 200 °C adalah 5106.02 kJ/m³ dan LHV biomassa adalah 12006 kJ/kg Maka perhitungan *cold gas efficiency*-nya adalah.

$$\text{Cold gas efficiency} = \frac{0,005389 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \frac{5106.02 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}}{0,9329 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}{0,00309 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \frac{12006 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \times 100\%$$

$$\text{Cold gas efficiency} = 79,51 \%$$

Tabel 4.4 Nilai *Cold Gas Efficiency*
pada Setiap Variasi Suhu Udara

Suhu udara (°C)	Laju alir massa biomasa (kg/s)	laju alir massa syngas (kg/s)	LHV syngas (kJ/kg)	LHV biomasa (kJ/kg)	<i>Cold Gas Efficiency</i> (%)
80	0,00309	0,0053802	4976,62	12006	72,17
110	0,00309	0,0053822	5058,18	12006	73,38
150	0,00309	0,0053852	5218,43	12006	75,75
180	0,00309	0,0053877	5375,17	12006	78,06
200	0,00309	0,0053897	5473,01	12006	79,51



Gambar 4.17 Grafik Penambahan Suhu Udara Inlet Vs *Cold Gas Efficiency*

Gambar 4.17 menunjukkan bahwa dengan pemanasan suhu udara dari 80-200 °C mampu meningkatkan *cold gas efficiency* sebesar 7,34 % dengan peningkatan yang relatif linear. Peningkatan tersebut tidak hanya dipengaruhi oleh peningkatan LHV pada *syngas*, tetapi juga dipengaruhi oleh laju alir massa biomassa (pelet MSW) dan laju alir massa *syngas*. Dapat dilihat pada Tabel 4.6, ketika suhu udara ditingkatkan, laju alir massa *syngas* meningkat namun laju alir massa biomassa cenderung

konstan. Hal tersebut mengindikasikan bahwa dengan peningkatan suhu udara dapat memaksimalkan reaksi antara biomassa dengan udara, yang ditandai dengan peningkatan laju alir massa *syngas*.

Penelitian yang dilakukan dengan metode eksperimen menunjukkan bahwa dengan peningkatan suhu udara dari 80-200 °C mampu meningkatkan *cold gas efficiency* mampu meningkatkan sebesar 14%, dari 47% menuju 61%. Perbedaan ini cukup besar dikarenakan Peningkatan tersebut tidak hanya dipengaruhi oleh peningkatan LHV pada *syngas*, tetapi juga dipengaruhi oleh laju alir massa biomassa (pelet MSW) dan laju alir massa *syngas*. Faktor yang mempengaruhi adalah selain mengukur laju alir massa *syngas* yang dilakukan menggunakan metode eksperimen, dilakukan pengukuran dari output berupa *char* dan abu. Sedangkan batasan masalah pada penelitian dengan metode numerik output yang diukur hanya *syngas*.

Penelitian lain dengan metode numerik yang dilakukan oleh KT Wu dan RY Chein (2015) memvariasikan suhu udara inlet dan *moisture content*. Pada penelitian tersebut didapatkan nilai *cold gas efficiency* meningkat dengan tren linear sebesar 2,1 % (dari 75 % pada suhu udara inlet 100 °C menjadi 77.1% pada suhu 200 °C. Hal tersebut disebabkan penelitian yang dilakukan KT Wu dan RY Chein menggunakan reaktor *downdraft* dengan dimensi yang berbeda dan biomassa yang berbeda.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang didapatkan dari penelitian yang dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Pada penelitian gasifikasi pada reaktor *downdraft* dengan menggunakan metode numerik, permodelan reaktor dengan pendekatan model *species and transport* dapat digunakan untuk mencari karakteristik dari gasifikasi biomassa.
2. Karakteristik reaktor gasifikasi yang didapatkan dengan penambahan variasi suhu udara inlet zona oksidasi parsial dari 80 °C sampai 200 °C sebagai berikut :
 - Distribusi suhu setiap zona proses gasifikasi meningkat; zona *drying* meningkat (T2) dari 130 °C sampai 140 °C, zona pirolisis meningkat (T4) dari 498 °C sampai 578 °C, zona oksidasi parsial meningkat (T6) dari 830 °C sampai 1004 °C, zona reduksi meningkat (T7) dari 520 °C sampai 580 °C.
 - Persentase volumetrik pada *flammable syngas* (CO, H₂, dan CH₄) meningkat dari 21,64%, 9,24%, dan 2,86% menjadi 22,65%, 10,49%, dan 3,10%. Kemudian meningkatkan LHV *syngas* dari 4.757,20 kJ/m³ menjadi 5.106,02 kJ/m³.
 - *Cold gas efficiency* dari 72,17 % menjadi 79,51 %.

5.2. Saran

Penelitian tentang gasifikasi masih perlu dianalisa lebih lanjut. Dari penelitian yang sudah dilakukan terdapat beberapa saran untuk proses penelitian selanjutnya sebagai berikut:

1. Permodelan yang digunakan *multiphase* agar hasil yang didapat lebih akurat
2. Menggunakan UDF (*user define function*) pada reaksi-reaksi heterogen agar grafik laju reaksi dapat diketahui
3. Penempatan *inlet* biomassa pada posisi tengah reaktor.
4. Desain nozel pada reaktor diletakan dibawah *throat* serta diberikan sudut tertentu agar pembakaran dapat menjangkau hingga tengah reaktor dan lebih merata.
5. Penempatan posisi termokopel untuk penelitian eksperimen selanjutnya sesuai dengan rekomendasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardiansyah, irfan maulana. 2017. "*Studi eksperimental pengaruh air fuel ratio proses gasifikasi pellet municipal solid waste (msw) terhadap unjuk kerja gasifier tipe downdraft sistem kontinyu*". **Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya.**
- Basu, Prabir., 2010. "*Combustion and Gasification in Fluidized Bed*". **Taylor and Francis Group.**
- Dzulfansyah, Dziyad. 2014. "Perancangan reaktor gasifikasi sekam padi tipe downdraft menggunakan analisis *computational fluid dynamics*". **Sekolah Pascasarjana IPB, Bogor.**
- Ependi, Depi Rustam. 2017. "Studi eksperimental pengaruh suhu udara inlet zona oksidasi pada proses gasifikasi pelet municipal solid waste terhadap unjuk kerja gasifier tipe downdraft". **Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya.**
- Faitli, Jozsef. 2014. "*Characerization of thermal properties of municipal solid waste landfills*". **Institute of Raw Material Preparation and Environmental Processing, Hungary.**
- Gaos, YS. 2008. "Gasifikasi biomassa untuk pembangkit listrik dan pemanfaatan gas buang sebagai pemasok panas bagi pendingin adsorpsi". **Institut Pertanian Bogor. Bogor.**
- Gao, Jinsen., dan Chang, Jian. 2008. "*Expperimental and Computational Studies on Flow Behavior of Gas-Solid Fluidized Bed with Disparetely Sized Binary Particles*". **Patricuology.**
- Hutagalung, Aldi Martino. 2015. "*Rencana Strategis 2015-2019*". **Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi.**
- Indarto. 2016. "Karakterisasi unjuk kerja mesin diesel generator set sistem dual fuel solar dan biogas dengan penambahan fan udara sebagai penyuplai udara". **Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya.**
- M, Burhan Cahyo. 2012. "Simulasi Gasifikasi Sekam Padi Pada Gasifier Downdraft Menggunakan *Software Fluent*". **Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya.**

- Mintarsih, Tuti Hendrawati. 2015. "*Penanganan Sampah Plastik*". **Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.**
- Nikolopoulos. 2011. "*CFD Simulation of Domestic Gasification Boiler*". **Centre for Research and Technology Hellas**
- Nyakuma, Bemgba., Ahmad, Arshad., Johari, Anwar., Abdullah, Tuan., Oladokun, Olagoke., Alkali, Habib., 2016. "*Gasification of Oil Palm Empty Fruit Bunches (OPEFB) Briquettes for Bio-Syngas Production*". **Departement of Chemical Engineering Universiti Teknologi Malaysia. Malaysia.**
- Primawan, Rizki Wase. 2017. "*Studi eksperimental pengaruh laju alir massa udara pada proses gasifikasi pelet municipal solid waste (msw) terhadap kandungan tar dan carbon conversion rate gasifier tipe downdraft*". **Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya.**
- Sugiyono, Agus. (2016). "*Indonesia Energy Outlook 2016*". **Badan Pengkajian Dan Penerapan Teknologi.**
- Thomas B. Reed. 1988." *Handbook of Biomass Downdraft Engine System*". **Solar Energy Research Institute.**
- Trianto, Muhammad Aji. 2017. "*Studi eksperimental pengaruh suhu proses gasifikasi pellet municipal solid waste (msw) terhadap unjuk kerja reaktor gasifikasi tipe downdraft berpengendali suhu pada zona partial combustion sistem kontinyu*". **Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya.**
- Tuakia, F. 2008. "*Dasar-Dasar CFD Menggunakan Fluent*". **Bandung (ID): Bandung Informatika.**
- Yokoyama, Shinya. 2008. "*Buku Panduan Biomassa Asia*". **Kementrian Pertanian, Kehutanan, dan Perikanan.**

LAMPIRAN

- Menentukan LHV pelet MSW

$$\text{LHV}_{\text{biomassa}} = \text{HHV}_{\text{biomassa}} - h_{fg} \left(\frac{9H}{100} + \frac{M}{100} \right)$$

$$\text{LHV}_{\text{biomassa}} = 13843 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2260 \text{ kJ/kg} \left(\frac{9(7,94)}{100} + \frac{9,82}{100} \right)$$

$$\text{LHV}_{\text{biomassa}} = 12006 \text{ kJ/kg}$$

- Massa jenis syngas

Suhu udara (°C)	Suhu syngas (K)	Massa jenis tiap-tiap gas pada suhu synthetic-gas (kg/m³)					
		ρ gas CO	ρ gas H ₂	ρ gas CH ₄	ρ gas CO ₂	ρ gas N ₂	ρ gas O ₂
80	318,15	1,0599	0,07409	0,52268	1,6676	1,0339	1,189
110	320	1,0529	0,07401	0,52268	1,6609	1,0329	1,182
150	321,43	1,0525	0,07399	0,52268	1,66	1,0301	1,179
180	325,94	1,0514	0,07387	0,52268	1,6587	1,0299	1,159
200	323,12	1,0519	0,07389	0,52268	1,6591	1,0302	1,166

- Kesetimbangan massa

Suhu udara (°C)	Massa masuk		Massa keluar
	laju alir massa pelet MSW (kg/s)	laju alir massa udara (kg/s)	laju alir massa syngas (kg/s)
80	0,00309	0,003032	0,0053802
110	0,00309	0,003032	0,0053822
150	0,00309	0,003032	0,0053852
180	0,00309	0,003032	0,0053877
200	0,00309	0,003032	0,0053897

- Kesetimbangan energi

Suhu udara (°C)	Energi masuk		Energi keluar
	Energi biomassa (kW)	Energi udara (kW)	Energi syn-gas (kW)
80	37,10	0,15	26,78
110	37,10	0,24	27,22
150	37,10	0,37	28,10
180	37,10	0,46	28,96
200	37,10	0,52	29,50

- Suhu rata-rata dari 12 penampang koordinat Y pada reaktor

posisi titik (m)	suhu rata-rata dengan variasi suhu udara(°C)				
	80 °C	110 °C	150 °C	180 °C	200 °C
0,20	245,6	257,3	267,4	276,1	290,5
0,30	364,1	380,3	395,0	408,6	433,4
0,40	684,5	718,4	751,4	783,5	845,4
0,50	828,9	870,5	911,3	950,8	1004,7
0,60	686,3	717,9	748,1	776,9	831,2
0,70	498,3	519,4	538,5	556,1	588,5
0,80	326,8	343,3	357,4	369,5	390,3
0,90	234,3	247,8	260,3	270,8	287,7
1,00	166,5	173,1	180,5	188,3	203,2
1,10	132,7	135,9	139,4	143,3	152,3
1,20	119,5	121,5	123,6	126,0	131,3
1,30	105,7	106,4	107,2	108,2	110,6

- Suhu rata-rata dari penampang koordinat Y pada T1 hingga T8

posisi titik	suhu rata-rata dengan variasi suhu udara (°C)				
	80 °C	110 °C	150 °C	180 °C	200 °C
T1	105,7	106,4	107,2	108,6	110,6
T2	130,8	132,8	135,8	139,8	140,8
T3	176,4	184,4	190,4	198,4	203,4
T4	498,3	519,4	538,5	568,5	580,5
T5	700,8	733,5	764,7	776,9	831,2
T6	830,0	870,5	910,3	950,7	1004,0
T7	520,7	530,2	545,9	560,0	580,2
T8	245,6	257,3	267,4	276,1	290,5

- Persentase volumetrik rata-rata CO dari penampang koordinat Y pada T1 hingga T8

posisi titik	persentase volumetrik rata-rata CO (%)				
	80 °C	110 °C	150 °C	180 °C	200 °C
T1	19,31	19,45	19,54	19,63	19,71
T2	19,34	19,45	19,54	19,63	19,71
T3	19,33	19,43	19,53	19,73	19,83
T4	17,49	17,59	17,69	17,89	17,99
T5	15,29	15,54	15,77	15,99	16,20
T6	11,42	11,67	11,87	12,07	12,27
T7	20,91	21,21	21,36	21,61	21,81
T8	21,83	22,13	22,28	22,53	22,73

- Persentase volumetrik rata-rata H_2 dari penampang koordinat Y pada T1 hingga T8

posisi titik	persentase volumetrik rata-rata H_2 (%)				
	80 °C	110 °C	150 °C	180 °C	200 °C
T1	5,91	5,94	6,03	6,12	6,20
T2	5,91	5,95	6,04	6,13	6,21
T3	6,05	6,14	6,26	6,36	6,44
T4	4,87	5,02	5,14	5,24	5,32
T5	0,48	0,69	0,92	1,14	1,35
T6	0,39	0,56	0,75	0,94	1,13
T7	8,95	9,10	9,30	9,50	9,70
T8	9,86	10,01	10,21	10,41	10,61

- Persentase volumetrik rata-rata CH_4 dari penampang koordinat Y pada T1 hingga T9

posisi titik	persentase volumetrik rata-rata CH_4 (%)				
	80 °C	110 °C	150 °C	180 °C	200 °C
T1	1,34	1,36	1,38	1,40	1,45
T2	1,34	1,36	1,38	1,40	1,45
T3	1,38	1,42	1,42	1,47	1,55
T4	2,42	2,46	2,51	2,56	2,64
T5	3,26	3,30	3,35	3,40	3,48
T6	4,31	4,35	4,59	4,64	4,72
T7	2,92	2,96	3,03	3,08	3,16
T8	2,85	2,89	2,95	3,00	3,08
T9	5,21	5,25	5,28	5,40	5,52

- Nilai laju reaksi pada reaksi heterogen dari penampang koordinat Y pada T1 hingga T9

Posisi titik (m)	laju reaksi ($\text{kgmol/m}^3 \text{s}^{-1}$)				
	R5	R6	R7	R8	R9
T1	4,00E-15	1,19E-09	9,16E-06	4,69E-06	2,17E-09
T2	7,96E-15	2,31E-09	9,92E-06	8,35E-06	3,23E-09
T3	3,39E-14	9,26E-09	0,000196	0,000168	7,59E-09
T4	3,55E-10	5,77E-07	0,000415	0,000649	2,20E-06
T5	0,000208	0,000211	0,000211	0,000643	0,000414
T6	0,000458	0,000349	0,000426	0,000698	0,000395
T7	2,23E-11	4,13E-08	0,001022	0,00108	1,80E-06
T8	6,36E-15	1,72E-09	0,000245	0,000245	2,04E-09
T9	7,11E-06	9,33E-05	0,000737	0,001975	0,000991

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS