

TUGAS AKHIR - TM184835

OPTIMASI PERFORMA GASIFIKASI REFUSE-DERIVED FUEL PADA DOWNDRAFT GASIFIER MENGGUNAKAN MASUKAN UDARA TIGA TINGKAT

Ivan Ramadhan Arifin

NRP. 02111540000152

Dosen Pembimbing

Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2020



TUGAS AKHIR - TM184835

OPTIMASI PERFORMA GASIFIKASI *REFUSE-DERIVED FUEL* PADA DOWNDRAFT GASIFIER MENGGUNAKAN MASUKAN UDARA TIGA TINGKAT

Ivan Ramadhan Arifin NRP. 02111540000152

Dosen Pembimbing Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya 2020



FINAL PROJECT - TM184835

GASIFICATION PERFORMANCE OPTIMIZATION IN A DOWNDRAFT GASIFIER USING THREE STAGE AIR INTAKE WITH REFUSE-DERIVED FUEL

Ivan Ramadhan Arifin NRP, 02111540000152

Advisor

Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT

Department of Mechanical Engineering Faculty of Industrial and System Engineering Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya 2020

OPTIMASI PERFORMA GASIFIKASI REFUSE-DERIVED FUEL PADA DOWNDRAFT GASIFIER MENGGUNAKAN MASUKAN UDARA TIGA TINGKAT

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

Ivan Ramadhan Arifin NRP. 02111540000152

Disetujui olch:

1. Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT
NIP. 197301161997021001

2. Prof. Dr. Ir.Djatmiko Ichsani
M.Eng
NIP. 195310191979031902

3. Ary Bachtiar K.P., ST, MT
PhD.
NIP. 19710524196 762, 1001

4. Is Bunyamin Suryy, ST, MS.
NIP. 198208192012121003

(Penguji III)

SURABAYA AGUSTUS, 2020

OPTIMASI PERFORMA GASIFIKASI REFUSE-DERIVED FUEL PADA DOWNDRAFT GASIFIER MENGGUNAKAN MASUKAN UDARA TIGA TINGKAT

Nama Mahasiswa : Ivan Ramadhan Arifin

NRP : 02111540000152

Jurusan : Teknik Mesin FTIRS-ITS

Dosen Pembimbing : Dr. Bambang Sudarmanta, ST., M.T.

ABSTRAK

Konsumsi minyak bumi Indonesia melebihi produksi yang menjadikan Indonesia sebagai importir minyak bumi. Minyak bumi merupakan energi fosil yang tidak dapat diperbaharui. Oleh karena itu, penggunaan energi fosil secara terus-menerus untuk segala aspek kehidupan menyebabkan ketersediaan energi fosil semakin menipis seiring bertambahnya pemakaian energi. Upaya yang dilakukan dalam mengatasi krisis energi, yaitu mencari sumber-sumber energi alternatif terbaharukan yang murah. Biomassa merupakan salah satu potensi sumber energi alternatif vang murah. Refuse-Derived Fuel (RDF) memiliki potensi untuk dijadikan sumber biomassa. Gasifier tipe downdraft digunakan karena memiliki laju produksi tar yang paling rendah. Tujuan dari riset ini adalah untuk mengoptimasi performa gasifikasi dalam parameter komposisi, laju produksi gas, LHV, efisiensi gas dingin, dan kandungan tar dari syngas menggunakan masukan udara tiga tingkat ke dalam zona pirolisis, oksidasi, dan reduksi.

Eksperimen ini dilaksanakan dengan menambah tiga tingkat masukan udara ke zona pirolisis, oksidasi, dan reduksi. Menggunakan AFR 4.5, perbandingan laju masa udara masuk, yang dinyatakan dalam istilah AR (Air mass flow Ratio), pada zona pirolisis:oksidasi:reduksi divariasikan pada nilai 0; 10; 0, 1; 6; 3, 2; 6; 2, 3; 6; 1, 2; 5; 3, 3; 5; 2, 1; 8; 1, 2; 7; 1, and 1; 7; 2. AR yang dimasukan ke tiap zona divariasikan menggunakan valve. Temperatur di sepanjang zona diukur

menggunakan termokopel tipe K yang dipasang sepanjang tinggi reaktor. Kandungan tar diukur dengan menimbang berat tar yang terkondensasi pada timbangan. Laju produksi gas diukur langsung pada tabung pitot outlet. Komposisi syngas ditentukan melalui uji Gas Chromatography. Efisiensi gas-dingin dihitung dari data hasil eksperimen.

Hasil dari penelitian menunjukkan adanya perubahan distribusi temperatur, dimana ada kenaikan suhu pada zona pirolisis, oksidasi, dan reduksi, masing-masing 144,70°C, 180,25°C dan 105,00°C pada titik paling puncak . LHV syngas maksimum sebesar 3365,08 kj/kg tercapai pada AR 1;7;2 dengan komposisi syngas CO: 18,68% v, H₂: 9,5446% v, CH₄: 0% v, dan CO₂: 9,45% v. Laju produksi gas tertinggi sebesar 0,0033052kg/s dicapai pada variasi AR 1;8;1. Efisiensi gas-dingin tertinggi sebesar 57,19% tercapai pada variasi AR 1;7;2. Kandungan tar terkecil sebesar 80,24 mg/Nm³ dicapai pada variasi AR 1;8;1

Kata Kunci: gasifikasi, masukan udara tiga tingkat, Refuse-Derived Fuel, performa, downdraft gasifier

GASIFICATION PERFORMANCE OPTIMIZATION IN A DOWNDRAFT GASIFIER USING THREE STAGE AIR INTAKE WITH REFUSE-DERIVED FUEL

Name of Student : Ivan Ramadhan Arifin

NRP : 02111540000152

Department : Mechanical Engineering FTIRS-ITS Supervisor : Dr. Bambang Sudarmanta, ST., M.T.

ABSTRACT

Indonesia's oil consumption exceeds production which makes Indonesia an importer of petroleum. Petroleum is fossil energy that cannot be renewed. Therefore, the continuous use of fossil energy for all aspects of life causes the availability of fossil energy to decrease with increasing energy use. Efforts are made in overcoming the energy crisis, which is looking for alternative renewable energy sources that are cheap. Biomass is a potential alternative source of cheap energy. Refuse-Derived Fuel (RDF) has the potential to be used as a source of biomass. Downdraft type gasifier is used because it has the lowest tar production rate. The purpose of this research is to optimize the performance of gasification in the composition parameters, gas production rate, LHV, cold gas efficiency, and tar content of syngas using three-stage air input into the pyrolysis, oxidation, and reduction zones.

This experiment was carried out by adding three stage of air input to the pyrolysis, oxidation and reduction zones. Using AFR 4.5, the ratio of the rate of incoming air mass, expressed in terms of AR (Air mass flow Ratio), in the pyrolysis zone: oxidation: reduction is varied at the value of 0; 10; 0, 1; 6; 3, 2; 6; 2, 3; 6; 1, 2; 5; 3, 3; 5; 2, 1; 8; 1, 2; 7; 1, and 1; 7; 2. AR entered into each zone is varied using a valve. Temperature throughout the zone was measured using a K type thermocouple mounted along the reactor height. The tar content is measured by weighing the weight of the tar condensed on the scale. The gas production rate is measured

directly at the pitot outlet tube. The syngas composition was determined through the Gas Chromatography test. Cold gas efficiency is calculated from experimental results..

The results of the study showed a change in temperature distribution, where there was an increase in temperature in the pyrolysis, oxidation, and reduction zones, respectively 144.70 °C, 180.25 °C and 105.00 °C at the peak point. The maximum syngas LHV of 3365.08 kj / kg was achieved at AR 1; 7; 2 with the composition of CO syngas: 18.68% v, H2: 9.5446% v, CH4: 0% v, and CO2: 9.45% v. The highest gas production rate of 0.0033052 kg/s was achieved in variations of AR 1, 8: 1. The highest cold gas efficiency of 57.19% was achieved in AR 1, 7, 2 variations. The smallest tar content of 80.24 mg / Nm3 was achieved in variations of AR 1, 8: 1

Keywords: gasification, three-stage air input, Refuse-Derived Fuel, performance, downdraft gasifier

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat-Nya sehingga penyusunan tugas akhir yang berjudul : "OPTIMASI PERFORMA GASIFIKASI REFUSE-DERIVED FUEL PADA DOWNDRAFT GASIFIER MENGGUNAKAN MASUKAN UDARA TIGA TINGKAT" ini dapat disusun dengan baik dan lancar.

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

Banyak pihak yang telah membantu penulis dapatkan mulai dari awal hingga sampai selesainya tugas akhir ini, oleh karena itu penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

- 1. Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT sebagai Dosen Pembimbing yang telah mengarahkan dan membimbing penulis serta memberikan ilmu pengetahuan sehingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
- 2. Bapak dan Ibu penulis, Arif Safaat dan Indarti, dan anggota keluarga, yang telah memberikan doa, semangat, cinta, dan waktunya yang sangat berperan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
- 3. Dosen tim penguji yang telah memberikan kritik dan saran dalam penyempurnaan dan pengembangan Tugas Akhir ini.
- 4. Seluruh dosen dan staf pengajar Jurusan Teknik Mesin FTIRS-ITS, yang telah memberikan ilmunya dan membantu semua selama perkuliahan di Teknik Mesin ITS.
- 5. Seluruh keluarga laboratorium Pembakaran & Sistem Energi yang telah menyediakan tempat dan telah

memberikan bantuan dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.

Semoga segala kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang terbaik dari Tuhan Yang Maha Esa.

Karena keterbatasan waktu dan kemampuan penulis, sebagai manusia biasa kami menyadari dalam penulisan ini masih terdapat beberapa kesalahan dan kekurangan. Oleh karena itu, kami mengharap kritik dan saran membangun sebagai masukan untuk penulis dan kesempurnaan Tugas Akhir ini. Semoga dengan penulisan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang memerlukan.

Surabaya, 11 Agustus 2020

Penulis

Daftar Isi

ABSTRA	C	v
ABSTRAC	T	vii
KATA PE	NGANTAR	ix
Daftar G	ambar	xv
Daftar Ta	abel	xvii
ВАВ І		1
PENDAH	ULUAN	1
1.1	Latar Belakang	1
1.2	Perumusan Masalah	4
1.3	Batasan Masalah	5
1.4	Tujuan Penelitian	5
1.5	Manfaat Penelitian	5
BAB II		7
TINJAUA	N PUSTAKA	7
2.1	Biomassa	7
2.1.1.	Karakteristik Refuse Derived Fuel	9
2.1.2.	Dioksin	10
2.2	Konversi Biomassa	11
2.2.1	Gasifikasi	12
2.2.1.1	l Pirolisis	14

2.2.1.2	Oksidasi	14
2.2.1.3	Reduksi	15
2.3	Tipe Reaktor Gasifikasi	16
2.3.1	Reaktor Gasifikasi Downdraft	17
2.3.2	Reaktor Gasifikasi Updraft	18
2.4	Produk Gasifikasi Biomassa	18
2.4.1	Syngas	19
2.4.2	Tar	19
2.5	Gasifier Masukan Udara Multi-stage	21
2.5.1.	Pirolisis Oksidatif	22
2.5.2	Oksidasi Heterogen	23
2.6	Stoikiometri Gasifikasi	25
2.7	Parameter Performansi Gasifikasi	25
2.7.1	Komposisi <i>Syngas</i>	26
2.7.2	Tingkat Produksi Syngas	26
2.7.3	LHV Syngas	26
2.7.4	Syngas Cold-Gas Efficiency	26
2.7.5	Kandungan Tar	27
2.8	Penelitian Terdahulu	27
2.8.1	Gasifikasi Refuse Derived Fuel	27
2.8.2	Gasifier Dua Tingkat	29
2.8.3	Gasifier Tiga Tingkat	32

BAB III	METODE PENELITIAN	37
3.1	Flowchart Penelitian	37
3.1.1	Studi Literatur	38
3.1.2	Karakteristik Biomassa	38
3.1.3	Analisa Data	38
3.1.4	Kesimpulan dan Saran	39
3.2	Alat dan Bahan uji	39
3.2.1	Skema Konfigurasi Alat	39
3.2.2	Alat Ukur	40
3.2.3	Bahan Uji	43
3.3	Metode Pengambilan Data	45
3.3.1	Prosedur Operasional	45
3.3.2	Kondisi Operasional	47
3.3.3	Parameter Pengukuran	49
BAB IV	ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	51
4.1	Distribusi Temperatur	51
4.2	Komposisi Syngas	54
4.3	Nilai Kalor Bawah	58
4.4	Efisiensi Gas Dingin	62
4.5	Laju Produksi Gas	64
4.6	Kandungan Tar	66
DADM		60

KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	.69
5.2	Saran	.70
DAFTAR	PUSTAKA	.71
LAMPIRA	AN	.74

Daftar Gambar

Gambar 2. 1 Analisa ultimate dan proximate (Suyitno, 2007) 8
Gambar 2. 2 Perbandingan Udara-Bahan Bakar (Suyitno, 2007) 11
Gambar 2. 3 Reaksi Kimia Gasifikasi (Molino, et al. 2015) 13
Gambar 2. 4 Pengaruh proses suhu pada karakteristik syngas
(Molino, et al, 2015)16
Gambar 2. 5 Gasifikasi Tipe Downdraft (Satake, 2006) 17
Gambar 2. 6 Gasifikasi Tipe Updraft (Satake, 2006) 18
Gambar 2. 7 Diagram Pembentukan Tar (Milne, et al, 1998) 20
Gambar 2. 8 Grafik Pengaruh Temperatur Terhadap Jenis Tar
(Basu, 2012)
Gambar 2. 9 Produk Pirolisis Oksidatif (Zhao, et al, 2014) 23
Gambar 2. 10 (a) Carbon conversion and gas production rate. (b)
CO and CO ₂ mass yield (H. Shi, et al, 2016)24
Gambar 2. 11 Komposisi Biomassa RDF (Haydary, 2016) 27
Gambar 2. 12 Konversi, Suhu Reaktor, dan HHV Pada
m(Air)/m(RDF) Berbeda Dengan Udara Sebagai Gasifying Agent
(Haydary, 2016)28
Gambar 2. 13 Kandungan Tar Pada <i>Syngas</i> Pada m(Air)/m(RDF)
Berbeda Dengan Udara Sebagai <i>Gasifying Agent</i> (Haydary, 2016)
28
Gambar 2. 14 Skema Diagram Sistem Eksperimental
(Sudarmanta, 2018)29
Gambar 2. 15 Komposisi CO, CH4, H2, dan CO2 dan LHV sebagai
fungsi ER untuk AR=90% (Sudarmanta, 2018)30
Gambar 2. 16 Komposisi CO, CH4, H2, dan CO2 dan LHV sebagai
fungsi AR untuk ER=0,4 (Sudarmanta, 2018)30
Gambar 2. 17 Pengaruh AR dan ER terhadap kandungan tar
(Sudarmanta, 2018)

Gambar 2. 18 Pengaruh AR terhadap cold-gas efficiency untuk	ER
tertentu (Sudarmanta, 2018)	31
Gambar 2. 19 Skema Sederhana Udara Masukan Tiga Tingkat	
pada downdraft gasification (Saleh, 2020)	32
Gambar 2. 20 Skema Eksperimental Gasifikasi (Saleh, 2020)	33
Gambar 2. 21 Pengaturan Variasi AR (Saleh, 2020)	33
Gambar 2. 22 Efek AR Terhadap Konsentrasi Flammable Gas	
(Saleh, 2020)	34
Gambar 2. 23 Efek AR Terhadap LHV Syngas (Saleh, 2020)	34
Gambar 2. 24 Efek AR Terhadap cold-gas efficiency dan carbon	
conversion rate (Saleh, 2020)	35
Gambar 2. 25 Pengaruh AR Terhadap Konsentrasi tar (Saleh,	
2020)	35
Gambar 3. 1 Skema Instalasi Instrumen Gasifikasi	
Gambar 3. 2 Termokopel tipe k	
Gambar 3. 3 Pitot Static Tube	
Gambar 3. 4 Manometer Digital	42
Gambar 3. 5 Instrumen Gas Chromatography	
Gambar 3. 6 Briket RDF	45
Gambar 3. 7 Tar Sampling set	47
Gambar 4. 1 Distribsusi Temperatur Sepanjang Reaktor	52
Gambar 4. 2 Komposisi <i>Syngas</i> Terhadap Distribusi Temperatur	r
	56
Gambar 4. 3 Grafik LHV Syngas	62
Gambar 4. 4 Grafik Efisiensi Gas Dingin	64
Gambar 4. 5 Grafik Laju Alir Massa Gas VS Padat	65
Gambar 4, 6 Grafik Kandungan Tar	67

Daftar Tabel

Tabel 2. 1 Karakteristik Refuse Derived Fuel, analisa	ultimate dan
Proximity (Dianda, 2018)	10
Tabel 3. 1 Ultimate dan Proximate Analysis RDF (Dia	anda, 2018)
	44
Tabel 3. 2 Kondisi Operasional	
Tabel 3. 3 Parameter Pengukuran	49
Tabel 4. 1 Distribusi Temperatur	51
Tabel 4. 2 Komposisi syngas (Laboratorium Kimia Mat	terial dan
Energi)	55
Tabel 4. 3 LHV gas flammable	59
Tabel 4. 4 LHV syngas	61
Tabel 4. 5 Efisiensi gas dingin	63
Tabel 4. 6 Laju Produksi Gas dan Padat	
Tabel 4. 7 Kesetimbangan Massa	66
Tabel 4. 8 Kandungan Tar	67

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan Negara penghasil minyak, gas, dan batu bara yang besar di dunia. Namun, menurut Badan Pegkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), saat ini konsumsi minyak bumi Indonesia melebihi produksi yang menjadikan Indonesia sebagai importir minyak bumi. Minyak bumi merupakan energi fosil yang tidak dapat diperbaharui. Oleh karena itu, penggunaan energi fosil secara terus-menerus untuk segala aspek kehidupan menyebabkan ketersediaan energi fosil semakin menipis seiring bertambahnya pemakaian energi. 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.

Upaya yang dilakukan dalam mengatasi krisis energi, yaitu mencari sumber-sumber energi alternatif terbaharukan yang murah. Biomassa merupakan salah satu potensi sumber energi alternatif yang murah. Saat ini pemakaian biomassa masih sangat sedikit sekali. Indonesia memiliki potensi energi biomassa sebesar 32.654 MW yang saat ini hanya dimanfaatakan sebesar 1.671,0 MW atau sekitar 5,1% (RUEN, 2017). Hal ini sangat disayangkan karena di sisi lain produksi minyak bumi terus menurun disaat kebutuhan energi semakin meningkat. Diperkirakan pada tahun 2027 persediaan minyak bumi di Indonesia akan habis jika tidak ditemukan cadangan baru. Pemerintah Indonesia menargetkan untuk menggunakan energi baru terbarukan paling sedikit 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050.

Disamping permasalahan energi fosil yang semakin menipis, terdapat pula masalah yang sering muncul dalam kehidupan, yaitu sampah. Sampah merupakan masalah yang sangat penting yang perlu membutuhkan perhatian. *Refuse Derived Fuel*

(RDF) adalah sampah yang mudah terbakar terpisahkan dari bagian yang sulit terbakar melalui proses pencacahan, pengayakan dan klasifikasi udara. RDF dihasilkan dari pemisahan fraksi yang mudah terbakar (combustible fraction) dan fraksi sampah yang sulit dibakar (non combustible fraction) dari sampah secara mekanik (Hutabarat, 2018). RDF sendiri didapatkan dari Municipal Solid Waste (MSW) atau sampah padatan perkotaan yang merupakan jenis sampah umum yang mencakup sampah rumah tangga, sampah badan komersil, sampah di area-area umum. Seiring bertambahnya jumlah penduduk dan meningkatnya aktivitas, maka semakin tinggi jumlah sampah yang dihasilkan. Menurut data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK, 2017), dalam satu hari, rata-rata masyarakat Indonesia menghasilkan hingga 130.000 ton sampah, sehingga diperlukan pengelolaan sampah yang maksimal. Refuse Derived Fuel (RDF) memiliki potensi untuk dijadikan sumber biomassa. Biomassa ini yang akan menjadi sumber bahan baku energi alternatif karena dapat ditingkatkan nilai guna materialnya yang seharusnya menjadi limbah atau produk samping, dan dapat membantu kebersihan lingkungan dari sampah padat. Nilai kandungan energinya dan jumlah biomassa RDF yang sangat melimpah cocok untuk dijadikan sumber energi alternatif dengan cara gasifikasi. Gasifikasi biomassa dapat menjadi teknologi yang efisien untuk mengekstrak energi dari biomassa RDF. Gasifikasi merupakan solusi yang tepat bila digunakan pada proses pengolahan RDF menjadi energi. Alasan utamanya adalah karena gasifikasi dapat mengkonversikan MSW ataupun bahan bakar bernilai rendah, menjadi bahan kimia bernilai tinggi, (Basu, 2013).

Gasifikasi biomassa adalah konversi termal biomassa padat melalui oksidasi parsial menggunakan media seperti udara, uap, atau murni oksigen, untuk menghasilkan *combustible gas* yang dapat digunakan yang disebut *Syngas*, dan produk padat, disebut char (Molino, 2015). Sebagian besar *combustible gas* tersusun atas gas karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), dan

sedikit metana (CH₄). Gas ini dapat digunakan secara langsung untuk pembakaran, misalnya untuk keperluan rumah tangga ataupun juga dapat digunakan sebagai bahan bakar motor bakar yang dapat digunakan untuk pembangkit listrik ataupun keperluan lainnya. Secara umum, gasifikasi melibatkan 4 tahapan proses berupa drying, pyrolisis, oksidasi parsial dan reduksi. Drying merupakan proses penguapan kandungan air didalam biomassa melalui pemberian panas pada interval suhu 100~300°C. Drying dilanjutkan dengan dekomposisi termal volatile matter berupa gas dan menyisakan arang karbon, dimana proses ini biasa disebut sebagai pirolisis. Selanjutnya sisa arang karbon akan mengalami proses oksidasi parsial, dimana proses ini merupakan proses eksoterm yang melepas panas pada interval suhu diatas 900°C. Panas yang dilepas dari oksidasi parsial ini digunakan untuk mengatasi kebutuhan panas dari reaksi reduksi endotermis dan untuk memecah hidrokarbon yang telah terbentuk selama proses pirolisis. Proses reduksi gas CO₂ dan H₂O ini terjadi pada interval suhu 400~900°C. Reduksi gas CO₂ melalui reaksi kesetimbangan Boudouard equilibrium reaction dan reduksi gas H₂O melalui reaksi kesetimbangan water-gas reaction, dimana reaksi-reaksi tersebut secara dominan dipengaruhi oleh suhu dan tekanan (Sudarmanta, 2010). Contoh penelitian syngas hasil biomassa dari serbuk kayu yang dilakukan oleh Kahardiyansyah (2015) menunjukkan bahwa gas hasil gasifikasi mengandung unsur $CH_4=1.81$ % weight, $H_2=5.34$ % weight, $O_2=12.79$ % weight, $N_2=$ 49,26 % weight, CO₂=11,23 % weight, CO=19,57 % weight. Lower heating value (LHV) serbuk kayu sebesar 9262,96 KJ/kg.

Model reaktor gasifikasi dengan desain paling sederhana adalah *downdraft*. Pada reaktor model *downdraft*, biomassa dan udara mengalir menuju ke dasar reaktor. Reaktor *downdraft* memiliki beberapa kelebihan, yaitu konversi karbon tinggi, jumlah tar rendah, kontruksinya sederhana, dan teknologinya andal (Susastriawan, Saptoadi, & Purnomo, 2017). Pada umumnya, udara sebagai *gasifying agent* hanya dimasukan ke zona oksidasi parsial. Akan tetapi, berdasarkan beberapa penelitian terkini,

penambahan masukan udara pada zona pirolsis dan reduksi dapat meningkatkan unjuk kerja proses gasifikasi (Kallis, Pellegrini Susini, & Oakey, 2013). Metode ini telah umum digunakan dan saat ini yang dikembangkan lebih lanjut. Metode ini menggunakan beberapa saluran udara pada zona reaktor yang berbeda. Eksperimen sebelumnya di ITS menunjukkan bahwa menggunakan saluran udara multi stage menghasilkan hasil yang lebih baik dalam hal komposisi syngas dan Rendah Nilai Pemanasan (LHV).

Ximenes (2018), pernah melakukan penelitian tentang pengaruh *input* rasio udara pirolisis, oksidasi, dan reduksi terhadap performa gasifikasi dengan bahan baku briket *municipal solid waste* (MSW). Variasi rasio udara (AR) yang masuk ke dalam reaktor terdapat enam variasi, yaitu 0:10:0, 1:8:1, 2:7:1, 1:6:3, 2:6:2, 3:6:1 dengan ER konstan sebesar 0,4. Hasil dari penelitian tersebut menunjukan bahwa variasi AR 1:8:1 merupakan variasi optimum. Pada variasi optimum, komposisi combustible gas CO, H₂, dan CH₄ bernilai masing-masing 19,08 %vol, 10,89 %vol, dan 1,54 %vol. Kemudian, cold gas efficiency dan kandungan tar bernilai masing-masing 70% dan 57,9 mg/Nm³. Semua hasil dari penelitian tersebut menunjukan bahwa udara masukan bertingkat (*multi-stage*) dapat meningkatkan unjuk kerja proses gasifikasi.

Penelitian ini akan dilakukan dengan reaktor *gasifier downdraft* dan menggunakan pemasukan udara tiga tingkat dengan menggunakan biomassa RDF sebagai bahan baku. Ketiga tingkat tersebut terdapat pada zona pirolisis, oksidasi, dan reduksi. Hal ini diharapkan mampu meningkatkan unjuk kerja atau performansi proses gasifikasi yang ditunjukan dengan komposisi combustible syngas (CO, H₂, dan CH₄), *cold gas efficiency* dan kadar tar dalam *syngas*.

1.2 Perumusan Masalah

Dalam penelitian ini, permasalahan dirumuskan sebagai berikut:

- Bagaimana pengaruh pemasukan udara pada zona pirolisis, oksidasi, dan reduksi terhadap distribusi temperatur sepanjang reaktor.
- 2. Bagaimana pengaruh pemasukan udara pada zona pirolisis, oksidasi, dan reduksi terhadap performansi proses gasifikasi yang dapat diukur dengan komposisi, LHV, cold gas efficiency, dan kandungan tar pada syngas yang dihasilkan.

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini menggunakan batasan masalah sebagai berikut:

- Penelitian dilakukan secara eksperimental dengan skala laboratorium menggunakan reaktor tipe downdraft gasifier yang terdapat pada Departemen Teknik Mesin ITS Surabaya.
- 2. Bahan baku yang digunakan Refuse Derived Fuel (RDF).
- 3. Panas yang hilang dari reaktor ke atmosfir diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1. Mengetahui pengaruh pemasukan udara pada zona pirolisis, oksidasi, dan reduksi terhadap distribusi temperatur sepanjang reaktor.
- Mengetahui pengaruh pemasukan udara pada zona pirolisis, oksidasi, dan reduksi terhadap performansi proses gasifikasi yang dapat diukur dengan komposisi, LHV, cold gas efficiency, dan kandungan tar pada syngas yang dihasilkan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat memberikan informasi dan wacana baru tentang efektifitas penggunaan pemasukan udara tiga tingkat

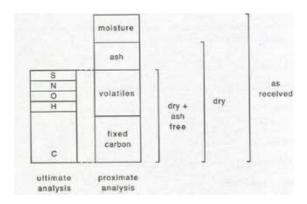
- (*multi stage*) pada proses gasifikasi, khususnya gasifikasi pada *Refuse Derived Fuel (RDF)*.
- 2. Dapat digunakan sebagai acuan untuk penelitian lebih lanjut yang terkait dengan peningkatan unjuk kerja proses gasifikasi.
- 3. Dapat digunakan sebagai acuan pengembangan reaktor gasifikasi yang menggunakan *Refuse Derived Fuel (RDF)* sebagai bahan baku biomassa.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biomassa

Biomassa merupakan bahan organik yang dihasilkan oleh hewan dan tumbuhan baik berupa produk maupun buangan dan dimanfaatkan energinya dalam jumlah yang besar. Beberapa contoh biomassa seperti tanaman, pepohonan, rumput, ubi, limbah pertanian, limbah hutan, tinja dan kotoran ternak. Biomassa dihasilkan dari interaksi antara beberapa faktor lingkungan, seperti udara, air, tanah, atau sinar matahari, dan bahan organik yang berasal dari organisme hidup. Pada umumnya biomassa yang dipilih menjadi bahan bakar adalah biomassa yang memiliki nilai ekonomis rendah atau merupakan limbah setelah diambil produk primernya kemudian dimanfaatkan energinya. Untuk dapat menentukan kandungan pada biomassa, dilakukan beberapa analisa, yaitu *proximate analysis*, *ultimate analysis*, dan *heating value analysis*.

Kandungan pada biomassa memengaruhi gasifikasi, dan dari kandungan inilah struktur biomassa tersusun. Untuk mengetahui karakter dan komposisi dari biomassa digunakan metode pemeriksaan secara analitis (proximate analyze) dan pemeriksaan secara kimia (ultimate analyze). Analisa proximate mengidentifikasi kandungan air (moisture content), volatile matter (ketika dipanaskan sampai 950 °C), fixed carbon, dan abu yang dimiliki oleh biomassa. Moisture menunjukkan jumlah kadar air yang terdapat pada biomassa. Moisture ini sangat berpengaruh terhadap performansi gasifikasi bahan baku biomassa karena seharusnya energi digunakan untuk konversi biomassa secara termal, bukan untuk menguapkan kadar air biomassa. Volatile matter adalah jumlah uap air yang dapat dikondensasikan dan tidak dapat dikondensasikan yang dilepaskan ketika bahan bakar dipanaskan. Volatile matter menunjukan kerentanan bahan bakar ketika dinyalakan. Abu merupakan kandungan anorganik yang menjadi sisa pembakaran setelah bahan baku terbakar habis. Abu pada umumnya mengandung silika, aluminum, besi, kalsium, magnesium, titanium, sodium, dan potassium. Abu sendiri dapat berasal dari bahan baku biomassa, maupun lingkungan, seperti kotoran yang masuk ketika memasukan bahan baku ke dalam reaktor. Fixed carbon adalah jumlah karbon yang tersisa pada arang biomassa setelah penguapan. Fixed carbon juga memegang peranan penting karena menentukan jumlah karbon yang menjadi gas. Selanjutnya untuk ultimate analysis terkonversi adalah analisa mengenai komposisi kimia bahan bakar biomassa. Pada umumnya yang dianalisa persentase berat dari karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S). Keempat komposisi tersebut ditambah dengan moisture dan abu akan menghasilkan 100% dari berat bahan bakar. Gambar 2.1 menunjukkan komponen yang terkandung dalam biomassa dalam analisa secara ultimate dan proximate.



Gambar 2. 1 Analisa ultimate dan proximate (Suyitno, 2007)

Nilai kalor atau *heating value* merupakan nilai yang menyatakan jumlah energi panas (kalor) yang dilepaskan bahan bakar saat terjadinya oksidasi unsur-unsur kimia yang ada pada bahan bakar tersebut. Nilai kalor berhubungan langsung dengan

kadar C dan H yang dikandung oleh bahan bakar padat. Semakin besar kadar keduanya, semakin besar pula nilai kalor yang dikandung. Secara umum bahan bakar biomassa memiki *heating value* yang lebih rendah dari bahan bakar fosil karena densitasnya yang rendah. Ditinjau dari nilai kalor bahan bakar dibedakan atas:

- Nilai Kalor Atas atau high heating value (HHV) adalah nilai kalor yang diperoleh dari pembakaran 1 kg bahan bakar dengan memperhitungkan panas kondensasi uap (air yang dihasilkan dari pembakaran berada dalam wujud cair).
- Nilai Kalor Bawah atau low heating value (LHV) adalah nilai kalor yang diperoleh dari pembakaran 1 kg bahan bakar dengan memperhitungkan panas kondensasi uap (air yang dihasilkan dari pembakaran berada dalam wujud gas atau uap).

2.1.1. Karakteristik Refuse Derived Fuel

Refuse Derived Fuel (RDF) adalah sampah yang mudah terbakar dan terpisahkan dari bagian yang sulit terbakar melalui proses pencacahan, pengayakan dan klasifikasi udara. RDF pemisahan dihasilkan dari fraksi yang mudah terbakar (combustible fraction) dan fraksi sampah yang sulit dibakar (non combustible fraction) dari sampah secara mekanik (Hutabarat, 2018). RDF adalah produk dari MSW (Municipal Solid Waste) yang merupakan sampah padat yang terdiri dari barang-barang sehari- hari yang dibuang oleh masyarakat perkotaan. Komposisi utama MSW adalah bahan organik (sisa – sisa makanan, daun – daun kering, kertas) dan anorganik (sampah plastik yang sebagian besar berupa plastic *polypropylene*) (Indarto, 2015). Jumlah MSW dipengaruhi oleh proses urbanisasi (Shweta dan Somnath 2015). Berikut pengujian properties biomassa RDF:

Tabel 2. 1 Karakteristik Refuse Derived Fuel, analisa ultimate dan Proximity (Dianda, 2018)

Fuel	Proxima	Proximate Analysis (%wt) Ultimate Analysis (% v						wt)		Calorific
type		Volatile content		Ash content	C	Н	N	O	S	value (MJ/kg)
RDF ²⁾	6.4	8.82	75.58	9.2	49.75	9.04	10.77	28.55	1.89	24.96

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

Dari karakteristik RDF pada tabel 2.1, dapat dilihat kandungan C yang cukup besar. Hal tersebut menandakan bahwa RDF mampu menghasilkan nilai kalor gas yang cukup potensial untuk dimanfaatkan. Kandungan moisture RDF yang relatif rendah juga menunjukkan bahwa tidak membutuhkan banyak energi 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 H₂ dan CO yang flammable dari reaksi endoterm, sehingga hal itu cukup merugikan. Nilai kalor yang dimiliki RDF cukup tinggi membuat proses gasifikasi mampu tercapai dengan mudah.

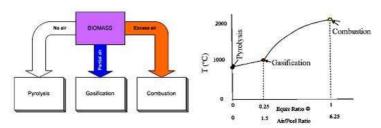
2.1.2. Dioksin

Dioksin dihasilkan selama proses pembakaran limbah terutama plastik dan bahan lainnya yang mengandung klor dan atau

senyawa organoklor. Dioksin dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia, seperti penyebab kanker. Akan sangat baik bila dilakukan pengendalian pada proses pembakaran limbah, antara lain dengan lama pembakaran dan suhu pembakaran yang berada dikisaran 800°C-6000°C, karena jika bersuhu rendah 300°C-800°C dapat menghasilkan dioksin. (Sumingkrat, 2009)

2.2 Konversi Biomassa

Biomassa perlu diolah terlebih dahulu sebelum digunakan menjadi bahan bakar. Walaupun demikian, sebenarnya biomassa langsung digunakan, tetapi terdapat beberapa masalah, seperti bentuknya yang terlalu besar bisa menyebabkan kesulitan dalam proses pengangkutan, penanganan, dan penyimpanan. Maka dari itu perlunya ada pengonversian biomassa, baik secara termokimia maupun biokimia. Konversi secara biokimia menggunakan bakteri dan enzim. Bakteri dan enzim tersebut akan menguraikan molekul dari biomassa menjadi lebih kecil, seperti menjadi fluida. Proses biokimia tidak memerlukan energi yang banyak, tetapi proses ini berlangsung cukup lambat. Namun, pada termokimia mengonversi biomassa dengan suhu tertentu yang akan menyebabkan reaksi sehingga biomassa menjadi pada gas.



Gambar 2. 2 Perbandingan Udara-Bahan Bakar (Suyitno, 2007)

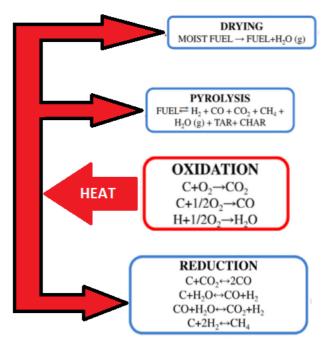
Gambar 2.2 diatas menunjukkan dalam pengolahan biomassa terdapat tiga jenis, yaitu gasifikasi, pembakaran, dan pirolisis. Faktor pembeda antara ketiganya adalah perbandingan antara udara dan bahan bakar yang digunakan pada prosesnya. Pirolisis merupakan proses penguraian biomassa yang dilakukan tanpa adanya oksigen atau udara didalam prosesnya. Pada proses pirolisis terjadi pada temperatur pemanasan (300-700 °C). Pirolisis disebut juga proses devolitisasi, ketika moisture dari biomassa sudah dikeluarkan maka temperatur yang terus meningkat akan membuat volatil keluar dari pori-pori biomassa yang menyebabkan oksigen tidak mampu melakukan penetrasi ke bagian dalam biomassa.

2.2.1 Gasifikasi

Gasifikasi adalah salah satu proses konversi secara termokimia. Secara bahasa, gasifikasi berarti pembuatan gas. Secara definisi yang sebenarnya, gasifikasi adalah proses konversi energi dari bahan bakar yang mengandung karbon (padat ataupun cair) menjadi gas yang disebut syngas dimana gas tersebut memiliki nilai bakar dengan cara oksidasi parsial pada temperatur tinggi. Gas yang dihasilkan dari proses gasifikasi kemudian dapat digunakan sebagai sumber energi, seperti digunakan sebagai bahan bakar pada motor bakar. Hasil gasifikasi yang dijadikan sebagai bahan bakar adalah komponen yang mudah terbakar (flammable component) yang terdiri dari campuran karbon monoksida (CO), hydrogen (H₂) dan metana (CH₄) yang disebut syngas dan produk samping (non-flammable component) anorganik seperti NH₃, HCN, H₂S, abu, serta pengotor organik yaitu tar. Komposisi gas ini sangat bergantung pada komposisi unsur dalam biomassa, bentuk dan partikel biomassa, serta kondisi-kondisi proses gasifikasi. Jika dibandingkan dengan proses pirolisi atau pembakatan, proses konversi secara gasifikasi dipilih karena syngas yang dihasilkan lebih mudah diatur dalam pembakarannya, emisi yang dihasilkan lebih ramah lingkungan, serta gas yang dihasilkan (CO, CH₄, H₂) bisa digunakan sebagai penggerak awal pembakaran. Pada pembakaran langsung efisiensi yang dihasilkan lebih kecil karena lebih banyak rugi-rugi panas yang terjadi, dan emisi yang dihasilkan berupa NO_X .

Reaksi pada proses gasifikasi adalah melibatkan beberapa reaksi kimia. Reaksi utama dari gasifikasi adalah endotermik dan energi yang diperlukan untuk terjadinya proses tersebut, umumnya, didapat dari proses oksidasi yang merupakan reaksi eksotermik, dimana Gasifier dipanaskan secara internal melalui pembakaran parsial. Langkah-langkah utama dari proses gasifikasi adalah:

- (1) Drying (tahap endotermik).
- (2) Pirolisis (tahap endotermik).
- (3) Oksidasi (tahap eksotermis).
- (4) Reduksi (tahap endotermik).



Gambar 2. 3 Reaksi Kimia Gasifikasi (Molino, et al. 2015)

Pengeringan terdiri atas penguapan uap air yang terkandung dalam bahan baku secara endotermik. *Moisture* pada biomassa merupakan hambatan dalam pengonversian energi biomassa karena jumlah energi yang dibutuhkan pada proses ini. Jumlah energi yang dibutuhkan pada proses ini, berbanding lurus dengan kadar kelembabannya. Umumnya biomaassa mengandung *moisture content* 30-60% dan setiap kilogramnya membutuhkan energi 2260 kJ yang digunakan untuk menguapkan kadar air. Pengeringan dapat dianggap lengkap ketika suhu biomassa 150 °C dicapai. Pada proses ini dekomposisi termal tidak terjadi. Reaksi yang terjadi pada pengeringan adalah:

Biomassa +
$$H_2O(1) \rightarrow Biomassa + H_2O(g)$$

2.2.1.1 Pirolisis

Pada proses pirolisis, dekomposisi termal terjadi tanpa adanya udara dan berlangsung pada suhu 200-900 °C. Pirolisis merupakan proses termokimia yang menghasilkan produk berupa gas, cair, dan padat. Produk gas yang dihasilkan adalah H₂, CO, CO₂, CH₄, dan H₂O_(g), gas-gas tersebut akan bereaksi kembali pada zona selanjutnya yang akan menghasilkan *syngas*. Produk cair yang dihasilkan berupa tar, air, dan hidrokarbon. Nilai kandungan tar ini yang ingin diturunkan nilainya. Produk padat yang dihasilkan adalah *char* (arang), yang akan bereaksi secara eksotermik pada zona oksidasi. Reaksi yang terjadi pada proses pirolisis adalah:

Biomassa + Panas→ Gas *Primary/secondary* + Cair (tar, air, hidrokarbon, etc.) + Padat (*Char*)

2.2.1.2 Oksidasi

Oksidasi adalah proses pembakaran eksotermik yang menghasilkan energi utama untuk proses lainnya yang bersifat endotermik. Oksidasi dilakukan secara parsial dengan jumlah oksigen yang lebih rendah dibandingkan dengan oksigen dalam reaksi stoikiometri. Kandungan oksigen berlebihan akan meningkatkan temperatur pada reaktor dan akan menurunkan kualitas produk gas (*syngas*) dikarenakan kandungan CO₂ yang meningkat. Reaksi yang terjadi pada oksidasi gasifikasi adalah:

$$C + O2 \rightarrow CO2 \Delta H = -394 \ KJ/mol$$
 (Char combustion)

$$C + \frac{1}{2} O2 \rightarrow CO \Delta H = -111 \ KJ/mol$$

(Char-Oxygen/partial oxidation)

H2+
$$\frac{1}{2}$$
 O2 \rightarrow H2O $\Delta H = -242$ KJ/mol (Hydrogen oxidation)

2.2.1.3 Reduksi

Langkah reduksi melibatkan semua produk dari proses sebelumnya, yaitu pirolisis dan oksidasi. Campuran gas dan arang bereaksi satu sama lain sehingga pembentukan produk akhir berupa *syngas*. Proses ini bersifat endotermik yang mendapat energi dari proses oksidasi. Pada proses ini terjadi beberapa reaksi kimia yang merupakan proses penting terbentuknya beberapa senyawa yang berguna untuk menghasilkan flammable gas seperti H₂, CO, CH₄. Reaksi yang terjadi pada proses reduksi adalah:

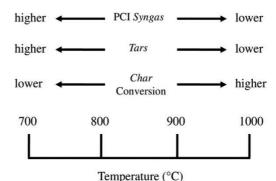
$$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO \Delta H = 172 kJ/mol \ Boulouard \ reaction$$
 $C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 \Delta H = 131 kJ/mol \ Reforming \ of \ the$

$$char$$
 $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 \Delta H = -41 kJ/mol \ Water \ gas \ shift$

$$reaction$$
 $C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4 \Delta H = -75 kJ/mol \ Methanation$

Komposisi *syngas* yang diproduksi ditentukan oleh reaksi di atas dan oleh temperatur pada proses reduksi. Tinggi atau rendahnya temperatur dapat menentukan komposisi yang dominan pada *syngas*. Suhu tertentu cenderung menghasilkan produk reaksi

yang akan mendominasi dalam komposisi produk syngas, yang berarti suhu tertentu akan menyebabkan reaksi tertentu terjadi lebih banyak dibandingkan dengan reaksi yang lain. Secara teori duhu yang tinggi akan menyebabkan reaksi endotermik menjadi dominan, sedangkan suhu yang rendah membuat reaksi eksotermal menjadi lebih dominan. Suhu yang tinggi menghasilkan *syngas* yang lebih banyak dan menekan produksi tar, tetapi abu yang diproduksi semakin meningkat dan dapat mengurangi nilai kalor dari *syngas*. Gambar 2.4 di bawah menunjukkan pengaruh temperatur pada reaksi zona reduksi:



Gambar 2. 4 Pengaruh proses suhu pada karakteristik syngas (Molino, et al, 2015)

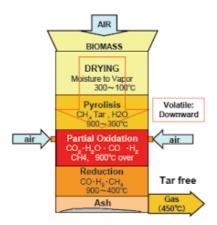
2.3 Tipe Reaktor Gasifikasi

Berdasarkan arah aliran udara dan bahan baku, reaktor gasifikasi dapat dibedakan menjadi dua, yaitu gasifikasi aliran searah (downdraft gasification) dan gasifikasi aliran berlawanan (updraft gasification). Pada gasifikasi downdraft, arah aliran udara dan bahan baku sama-sama ke bawah. Pada gasifikasi updraft, arah aliran bahan baku ke bawah sedangkan udara ke atas. Pada

penelitian ini, reaktor yang digunakan adalah tipe *downdraft*. Berikut adalah karakteristik dari sistem gasifikasi *downdraft*:

2.3.1 Reaktor Gasifikasi Downdraft

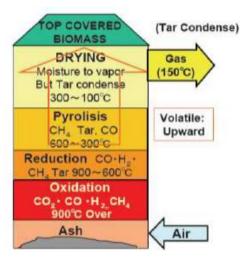
Reaktor gasifikasi tipe *downdraft* memiliki karakteristik dimana udara dan bahan baku bergerak searah menuju ke bawah. Reaktor tipe ini memiliki kandungan tar yang lebih rendah jika dibandingkan reaktor tipe *updraft*. Hal ini disebabkan karena tar dari hasil pirolisis terbawa bersama gas yang menuju ke daerah oksidasi parsial dimana proses pembakaran dengan temperatur tinggi terjadi. Pembakaran tersebut membuat tar yang dihasilkan akan terurai. Karena rendahnya kandungan tar, gasifikasi tipe *downdraft* banyak diaplikasikan untuk motor pembakaran dalam.



Gambar 2. 5 Gasifikasi Tipe Downdraft (Satake, 2006)

2.3.2 Reaktor Gasifikasi *Updraft*

Reaktor gasifikasi tipe updraft memiliki karakteristik dimana bahan baku dimasukan dari atas dan udara dimasukan dari bawah reaktor. Dengan adanya penambahan ke dalam reaktor, bahan baku mengalami serangkaian proses. Bahan baku mengalami proses drying, pirolisis, oksidasi parsial, reduksi. Gas hasil produksi reaktor tipe ini memiliki kandungan minyak dan tar dalam jumlah yang banyak. Gas yang dihasilkan memiliki suhu yang rendah (80° C -300° C). Secara umum abu yang berada di bawah reaktor terbakar sempurna, hanya menyisakan arang tidak terbakar dalam jumlah yang sedikit. Karena banyaknya kandungan tar yang dihasilkan, syngas dari proses reaktor tipe updraft tidak bisa langsung dimasukan ke dalam motor pembakaran dalam.



Gambar 2. 6 Gasifikasi Tipe Updraft (Satake, 2006)

2.4 Produk Gasifikasi Biomassa

Produk gasifikasi biomassa dapat dibedakan dalam tiga macam, yaitu gas, padat, cair. Produk gasifikasi dalam bentuk gas

adalah *syngas*, yang merupakan hasil utama dari proses gasifikasi. Produk gasifikasi dalam bentuk padat adalah abu, yang merupakan residu atau hasil sampingan dari setiap bahan bakar padat. Produk gasifikasi dalam bentuk cair adalah tar, yang kandungannya ingin dikurangi dalam proses gasifikasi karena bersifat sebagai pengotor *engine* yang digunakan untuk pembakaran menggunakan *syngas*.

2.4.1 Syngas

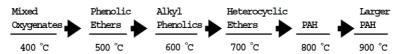
Syngas atau gas mampu bakar merupakan produk utama dari gasifikasi biomassa yang memiliki campuran karbon monoksida serta hidrogen. Syngas yang berarti gas sintetik merupakan pengganti gas alam yang dalam hal ini terbuat dari gas metana. Nilai kalor bahan bakar dan nilai kalor syngas ditentukan oleh komposisi yang terkandung dalam satuan unit massa bahan bakar dan satuan unit volume syngas.

2.4.2 Tar

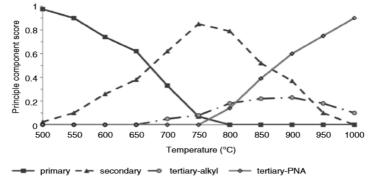
Tar adalah produk gasifikasi pada proses pirolisis yang merupakan campuran kompleks pada hidrokarbon terkondensasi. Komposisi tar ditentukan oleh bahan baku biomassa, teknologi gasifikasi yang digunakan, dan parameter operasi yang dilakukan. Tar yang terkondensasi berwarna gelap dan memiliki kekentalan yang tinggi. Tar yang terbentuk akan menempel pada komponen dan menghambat jalur gas sehingga dapat menurunkan performa *syngas* atau bahkan merusak komponen reaktor.

Tar merupakan produk dari proses pirolisis yang berlangsung dari suhu 200 °C hingga selesai pada suhu 500 °C. Komponen pada biomassa, seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin terurai menjadi tar primer. Pirolisis lignin menimbulkan senyawa aromatik, sebagian bi-atau tri-fungsional fenol tersubstitusi (kresol, xylenol, dll). Proses oksidasi parsial menyebabkan peningkatan suhu di atas 500 °C, karena adanya oksidan (oksigen, udara atau uap), hal ini berpotensi menyebabkan transformasi tar primer, kemudian mulai di atur ulang (via dehidrasi, dekarboksilasi, dan reaksi dekarbonilasi) sehingga

membentuk lebih banyak gas dan serangkaian molekul yang dikenal sebagai tar sekunder. Peningkatan lebih lanjut pada suhu, lebih dari 800 °C, dapat menyebabkan pembentukan tar tersier. Senyawa didalam tar tersier tidak ada dalam gasifikasi biomassa dan tar tersier merupakan hasil dari dekomposisi dan rekombinasi tar sekunder dengan lingkungan pada *syngas*.



Gambar 2. 7 Diagram Pembentukan Tar (Milne, et al, 1998)



Gambar 2. 8 Grafik Pengaruh Temperatur Terhadap Jenis Tar (Basu, 2012)

Produksi tar pada gasifikasi biomassa dapat dikurangi jumlahnya. Beberapa metode dapat dilakukan untuk mereduksi tar. Metode pertama adalah metode primer, yaitu mereduksi tar yang dilakukan dalam reaktor gasifikasi dengan mengurangi tar saat pembentukannya. Kemudian metode kedua adalah metode sekunder, yaitu mengurangi tar setelah gas diproduksi di luar reaktor gasifikasi dengan cara pembersihan gas. Secara umum, metode pertama lebih dipilih karena lebih efektif serta praktis karena tidak menggunakan komponen tambahan pada gasifikasi.

2.5 Gasifier Masukan Udara *Multi-stage*

Gasifikasi dengan masukan udara tunggal (single stage) telah banyak digunakan untuk mengonyersi biomassa menjadi syngas sebagai bahan bakar alternatif. Namun, gasifier dengan model ini memiliki kekurangan, dimana jumlah tar yang dihasilkan $(\sim 2g/Nm^3$ konfigurasi untuk besar (Bhattacharya, et al, 2001). Hal tersebut menyebabkan syngas yang dihasilkan kurang cocok digunakan untuk beberapa aplikasi, contohnya untuk motor pembakaran dalam. Maka dari itu pengembangan untuk mereduksi jumlah tar banyak dilakukan. Metode primer lebih banyak digunakan karena lebih praktis dan lebih efektif dibandingkan metode sekunder. Salah satu metode primer yang dapat dilakukan, yaitu dengan menambahkan masukan udara ke zona lain selain oksidasi atau yang biasa disebut *multi stage*. Penlitian sebelumnya membuktikan bahwa pemasukan udara tambahan pada zona selain oksidasi menghasilkan suhu operasional yang lebih tinggi sehingga menyebabkan penguraian tar secara termal semakin baik. Penggunaan multi stage ini biasanya menggunakan dua tingkat atau tiga tingkat.

Penelitian pada tahun 2018 oleh Arif Rahman Saleh, di ITS, menunjukkan bahwa *multi stage* dengan penambahan udara pada tahap pirolisis dari *Air ratio* 0% hingga 90% dapat mengurangi kandungan tar pada *syngas*. Biomassa yang digunakan pada penelitian tersebut adalah *municipal solid waste*. Dengan distribusi temperatur sepanjang reaktor yang lebih baik membuat penguraian tar secara termal menjadi lebih efektif. Hasil kandungan tar paling rendah didapat pada *Air ratio* 90% dengan rasio ekivalen 0,5. Pada penelitian lain oleh Ximenes pada tahun 2018 dengan biomassa MSW, menggunakan reaktor gasifikasi tipe *downdraft* dengan masukan udara tiga tingkat. Penelitian tersebut menunjukkan dengan menambahkan masukan udara pada zona pirolisis dan zona reduksi hingga jumlah tertentu dapat mengoptimalkan proses gasifikasi. Hasil eksperimen menunjukkan pada rasio masukan udara 1:8:1, pada pirolisis:oksidasi:reduksi,

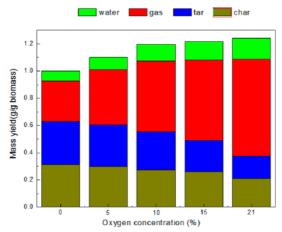
menunjukkan peningkatan pada LHV dan *cold-gas efficiency* jika dibandingkan dengan masukan udara tunggal pada zona oksidasi (0:10:0), dengan nilai 3563 kJ/kg menjadi 4034 kJ/kg untuk LHV dan 60,53% menjadi 70% untuk *cold-gas efficiency*. Kandungan tar dalam *syngas* juga berkurang dari nilai 146,98 mg/Nm³ menjadi 57,29 mg/Nm³.

Dari pernyataan di atas, dapat dihipotesakan bahwa penambahan masukan udara dalam jumlah tertentu pada zona pirolisis dan reduksi, performansi gasifikasi mengalami peningkatan dan kandungan tar mengalami penurunan yang disebabkan oleh meningkatnya temperatur. Hal tersebut menyebabkan dekomposisi termal.

2.5.1. Pirolisis Oksidatif

Pirolisis secara umum terjadi tanpa adanya oksigen. Namun, walau dalam gasifikasi satu tingkat, pada zona tertentu, biomassa mengalami proses pirolisis dengan kandungan oksigen tertentu, hal ini dinamakan pirolisis oksidatif. Reaksi ini merupakan reaksi eksotermal menghasilkan panas, yang secara teori dapat membantu meningkatkan temperatur pirolisis. Pada *multi-stage*, penambahan masukan udara pada zona pirolisis dilakukan untuk memicu reaksi pirolisis oksidatif tersebut.

Dalam sebuah penelitian yang dilakukan oleh Zhao, *et al*, 2014, tentang pirolisis oksidatif dengan menambahkan sejumlah oksigen konsentrasi ke dalam zona pirolisis, hasil gas dan air meningkat, sementara hasil arang dan kandungan tar berkurang karena konsentrasi oksigen meningkat seperti yang dijelaskan pada gambar.

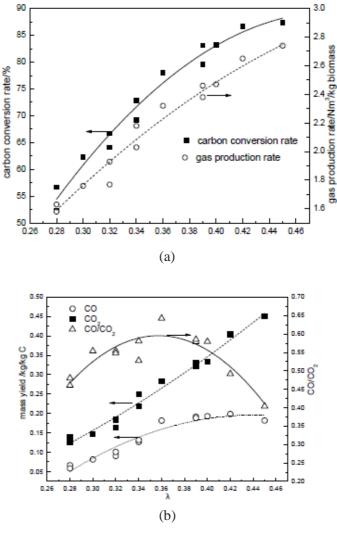


Gambar 2. 9 Produk Pirolisis Oksidatif (Zhao, et al, 2014)

Dari penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa pirolisis oksidatif meningkatkan produksi gas yang dihasilkan dan mengurangi produksi tar.

2.5.2 Oksidasi Heterogen

Saat ini, gasifikasi dengan masukan udara tiga tingkat mulai banyak dikembangkan. Proses ini juga memasukan udara ke zona reduksi, selain zona pirolisis dan oksidasi. H. Shi, *et al*, 2016, melakukan penelitian *gasifier* tiga tingkat, yang menunjukkan reaksi pada zona reduksi menjadi keadaan oksidatif. Udara yang dimasukan cenderung bereaksi dengan karbon dibandingkan dengan gas, karena sebagian besar gas mudah terbakar telah digunakan pada reaksi pembakaran zona sebelumnya. Hal ini menyebabkan peningkatan dari produksi gas dan laju konversi karbon, karena lebih banyak *char* yang bereaksi dengan oksigen, membentuk gas.



 $\begin{array}{c} Gambar\ 2.\ 10\ (a)\ Carbon\ conversion\ and\ gas\\ production\ rate.\ (b)\ CO\ and\ CO_2\ mass\ yield\ (H.\ Shi,\ \emph{et\ al},\\ 2016) \end{array}$

2.6 Stoikiometri Gasifikasi

Pada proses gasifikasi, masukan udara ke dalam *gasifier* berhubungan erat dengan proses autotermal, yang melibatkan oksidasi, reaksi yang menyediakan energi untuk reaksi lainnya. Reaksi utama dari gasifikasi juga melibatkan udara yang berlebih pada proses oksidasi. Hal tersebut menyebabkan reaksi gasifikasi dipengaruhi langsung oleh stoikiometri dari reaksi oksidasi.

Pada kondisi stoikiometrik, jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi biomassa dipengaruhi oleh kandungan biomass itu sendiri. Biomassa yang berbeda memiliki komposisi yang berbeda, sehingga memengaruhi keseimbangan oksidasi. Maka dari itu, untuk mengetahui nilai stoikiometri dari biomassa, perlu dilakukan *proximate* dan *ultimate analysis*. Kemudian jumlah udara stoikiometri yang dibutuhkan dapat diketahui dari persamaan berikut (Basu, 2010)

$$M_{da} = [0.1153 C + 0.3434 (H - O/8) + 0.0434 S] \text{ kg/kg dry fuel}$$

Dengan mengasumsikan kandungan 23.16% oksigen, 76.8% nitrogen, dan 0.04% inert gases berdasarkan berat.

Namun, pada gasifikasi nilai stoikiometri oksidasi tidak dibutuhkan, karena produk utamanya adalah karbon dioksida. Secara umum proses pada gasifikasi merupakan oksidasi parsial untuk menyediakan energi. Pada oksidasi parsial *Air Fuel Ratio* (AFR) actual lebih rendah nilainya dibandingkan AFR stoikiometri, atau *Equivalent ratio* <1

$$AFR = rac{\dot{m}~air}{\dot{m}~fuel} \ \lambda = rac{\mathrm{AFR}}{\mathrm{AFR}_{\mathrm{stoich}}}$$

2.7 Parameter Performansi Gasifikasi

Parameter performansi merupakan faktor yang diperlukan untuk menentukan kelayakan dari suatu sistem serta menemukan

keunggulan dan kelemahannya. Performa dari proses gasifikasi dapat diukur dengan beberapa parameter, kualitas dan kuantitas *syngas* yang dihasilkan.

2.7.1 Komposisi Syngas

Komposisi gas dinyatakan dengan kandungan gas yang mudah terbakar dalam satuan %volume dari *syngas*. Parameter ini termasuk kandungan dari CO, CO₂, H₂, dan CH₄ dalam gas yang diukur melalui *ultimate* dan *proximate analysis* dari gas.

2.7.2 Tingkat Produksi Syngas

Parameter ini dapat diukur secara langsung pada saluran buangan dari *gasifier*. Parameter ini dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$m_{syngas} = \rho_{gas} x \frac{Volume_{syngas}}{flow time}$$

2.7.3 LHV Syngas

LHV dari syngas dapat dihitung dengan menjumlahkan konsentrasi gas yang mudah terbakar (CO, H₂, dan CH₄) dan panas pembakarannya, yang dapat dihitung dari persamaan berikut:

$$LHV = \sum_{i=1}^{n} (Yi . LHVi)$$

2.7.4 Syngas Cold-Gas Efficiency

Cold-gas efficiency dapat didefinisikan sebagai jumlah energi dalam massa gas yang dihasilkan, dibandingkan dengan energi total dalam massa padatan biomassa yang belum diproses. Persamaan dari cold-gas efficiency sebagai berikut:

$$\eta_{cg} = \frac{Q_g M_g}{LHV_f M_f}$$

Dimana LHV_f merupakan nilai kalor bawah dari bahan bakar biomassa padat dalam MJ/kg, M_f merupakan massa bahan bakar biomassa padat, Q_g merupakan nilai kalor bawah dari produk syngas dalam MJ/kg, dan M_g merupakan syngas yang dihasilkan dalam kg.

2.7.5 Kandungan Tar

Kandungan tar pada *syngas* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$Tar\ content = rac{m_{tar}}{Vsyngas}$$

Dimana massa tar dalam g dan volume syngas dalam m³

2.8 Penelitian Terdahulu

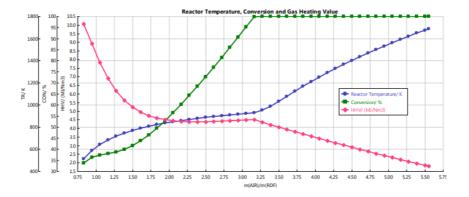
2.8.1 Gasifikasi Refuse Derived Fuel

Juma Haydary, 2016, melakukan penelitian mengenai pengaruh rasio laju alir massa udara dengan bahan bakar dan pengaruh *gasifying agent* terhadap performa gasifikasi menggunakan biomassa RDF dengan komposisi sebagai berikut:

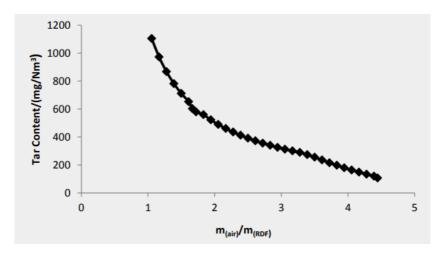
Component	Material	w _i [kg/kg]
Paper	White paper, recycled paper	0.6317
Foil	LDPE, HDPE	0.1578
Plastics	Rigid plastics, polystyrene, polyurethane	0.1910
Textile	Polyamide, polyester, cotton , wool	0.0194

Gambar 2. 11 Komposisi Biomassa RDF (Haydary, 2016)

Hasil yang didapatkan dari penelitian tersebut dengan menggunakan udara sebagai *gasifying agent* dengan variasi AFR adalah sebagai berikut:



Gambar 2. 12 Konversi, Suhu Reaktor, dan HHV Pada m(Air)/m(RDF) Berbeda Dengan Udara Sebagai *Gasifying* Agent (Haydary, 2016)

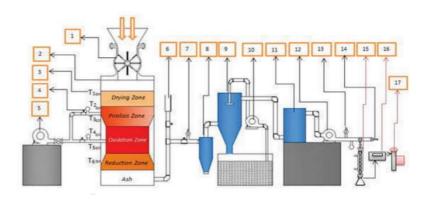


Gambar 2. 13 Kandungan Tar Pada *Syngas* Pada m(Air)/m(RDF) Berbeda Dengan Udara Sebagai *Gasifying* Agent (Haydary, 2016)

HHV tertinggi terdapat pada AFR 0,78, namun memiliki nilai kandungan Tar yang tinggi serta temperature reaktor yang rendah

2.8.2 Gasifier Dua Tingkat

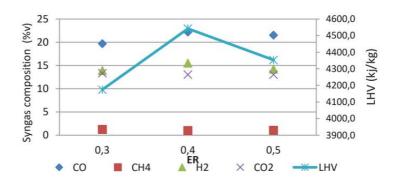
Sudarmanta (2018), et al, melakukan penelitian mengenai pengaruh masukan udara dua tingkat terhadap performansi *gasifier downdraft*. Biomassa yang digunakan adalah *oil palm fronds* (OPF). Variasi yang digunakan pada penelitian ini adalah *equivalent ratio* (ER) dan *air ratio* (AR) pada masing-masing pirolisis:oksidasi.



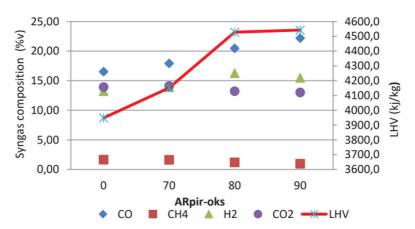
Gambar 2. 14 Skema Diagram Sistem Eksperimental (Sudarmanta, 2018)

1. Hopper; 2. Downdraft; 3. Thermocouple; 4. Rotameter; 5. Blower; 6. Flare Point; 7.Gas Sampling; 8. Cyclone; 9. Water Scrubber; 10. Water Pump; 11. Dry Filter; 12. Induced draft fan; 13. Flare Point; 14. Syngas flow; 15. Tar Condenser; 16. Gas Flow Meter; 17. Vacuum Pump

Berikut merupakan hasil penelitian yang didapatkan:



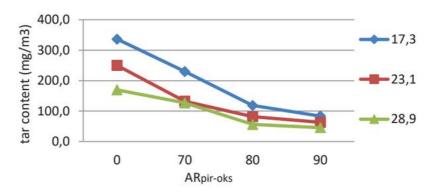
Gambar 2. 15 Komposisi CO, CH4, H2, dan CO2 dan LHV sebagai fungsi ER untuk AR=90% (Sudarmanta, 2018)



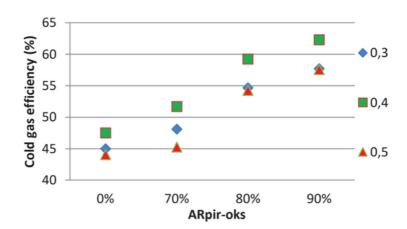
Gambar 2. 16 Komposisi CO, CH4, H2, dan CO2 dan LHV sebagai fungsi AR untuk ER=0,4 (Sudarmanta, 2018)

Gambar 2.15 dan gambar 2.16 menunjukkan bahwa ER= 0,4 dan AR= 90% menunjukkan LHV yang paling tinggi. AR=90%

juga memiliki produksi tar yang paling rendah serta memiliki *cold-gas efficiency* yang paling tinggi.



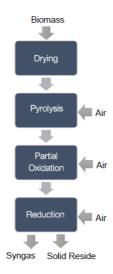
Gambar 2. 17 Pengaruh AR dan ER terhadap kandungan tar (Sudarmanta, 2018)



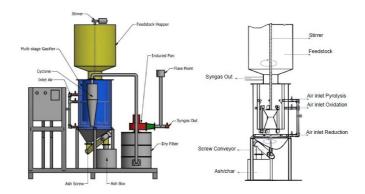
Gambar 2. 18 Pengaruh AR terhadap cold-gas efficiency untuk ER tertentu (Sudarmanta, 2018)

2.8.3 Gasifier Tiga Tingkat

Saleh, et al, 2020, melakukan penelitian mengenai pengaruh memasukan tiga tingkat terhadap produksi tar pada *syngas*. Reaktor yang digunakan adalah tipe *downdraft gasifier* dan biomassa yang digunakan adalah MSW. Variasi yang digunakan adalah *air ratio* (AR) pada zona pirolisis:oksidasi:reduksi dengan *equivalent ratio* (ER) 0,4.



Gambar 2. 19 Skema Sederhana Udara Masukan Tiga Tingkat pada downdraft gasification (Saleh, 2020)

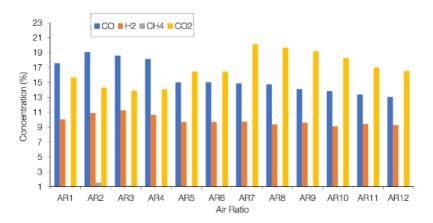


Gambar 2. 20 Skema Eksperimental Gasifikasi (Saleh, 2020)

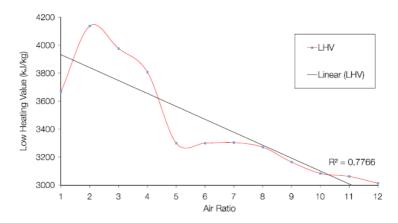
Variasi AR yang digunakan sejumlah 12 variasi dengan ER konstan 0,4 dimana total laju alir udara sejumlah 21,12 kg/h. Variasi AR pirolisis:oksidasi:reduksi masing-masing adalah sebagai berikut:

ER	AR	Run	Flow rate (kg/h)						
			Pyrolysis	Oxidation	Reduction	Total			
0,4	AR1(0:100)	1	0	21.12	0	21.12			
	AR2(10:80:10)	2	2.11	16.90	2.11				
	AR3(20:70:10)	3	4.22	14.78	2.11				
	AR4(10:70:20)	4	2.11	12.67	6.34				
	AR5(10:60:30)	5	2.11	12.67	6.34				
	AR6(20:60:20)	6	4.22	12.67	4.22				
	AR7(30:60:10)	7	6.34	12.67	2.11				
	AR8(20:50:30)	8	4.22	10.56	6.34				
	AR9(30:50:20)	9	6.34	10.56	4.22				
	AR10(20:40:40)	10	4.22	8.45	8.45				
	AR11(30:40:30)	11	6.34	8.45	6.34				
	AR12(40:40:20)	12	8.45	8.45	4.22				

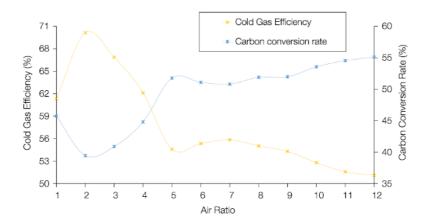
Gambar 2. 21 Pengaturan Variasi AR (Saleh, 2020)



Gambar 2. 22 Efek AR Terhadap Konsentrasi Flammable Gas (Saleh, 2020)

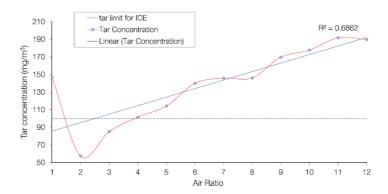


Gambar 2. 23 Efek AR Terhadap LHV Syngas (Saleh, 2020)



Gambar 2. 24 Efek AR Terhadap cold-gas efficiency dan carbon conversion rate (Saleh, 2020)

Dari gambar 2.22, 2.23, 2.24 menunjukkan bahwa AR2 (10:80:10) menghasilkan *syngas* paling optimal dengan konsentrasi CO, *cold-gas efficiency*, LHV yang tinggi. Variasi AR2 juga memiliki kandungan tar yang paling rendah dibandingkan variasi lainnya.

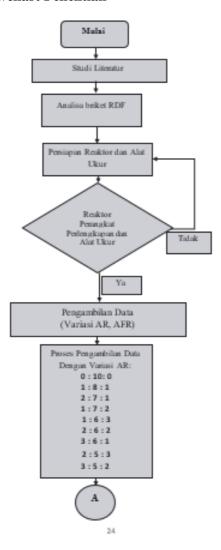


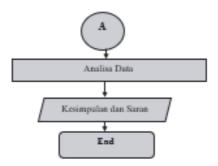
Gambar 2. 25 Pengaruh AR Terhadap Konsentrasi tar (Saleh, 2020)

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Flowchart Penelitian





Berdasarkan *flowchart* di atas, penelitian akan dilakukan dengan eksperimen dalam laboratorium.

3.1.1 Studi Literatur

Penelitian dimulai dengan studi literatur yang terkait dengan penelitian. Literatur yang dipelajari termasuk jurnal, thesis, buku yang terkait dengan teori gasifikasi, teori dan eksperimen masukan tiga tingkat dan dua tingkat, teori dan eksperimen reaktor gasifikasi *downdraft*, metode primer reduksi tar, teori dan eksperimen gasifikasi dengan biomassa MSW dan RDF.

3.1.2 Karakteristik Biomassa

Biomassa yang digunakan pada penelitian ini adalah *Refuse Derived Fuel* (RDF) atau sampah padatan perkotaaan. RDF melalui proses pembriketan untuk meningkatkan densitas dan menurunkan kelembabannya.

3.1.3 Analisa Data

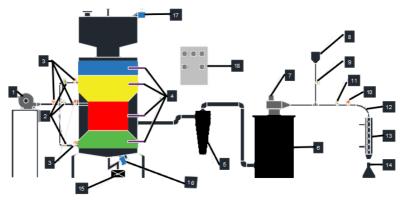
Analisa data dilakukan untuk memastikan tidak adanya data yang eror dan data yang kurang lengkap dari penelitian. Data yang dianalisa adalah distribusi temperatur, LHV *syngas*, komposisi *syngas*, laju produksi *syngas*, dan kandungan tar.

3.1.4 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan bertujuan menjelaskan hasil dari penelitian, hubungannya dengan tujuan penelitian, membuktikan benar atau tidaknya hipotesis. Saran bertujuan untuk memberikan nasihat dan kritik yang membangun mengenai kekurangan dan masalah yang terdapat saat penelitian

3.2 Alat dan Bahan uji

3.2.1 Skema Konfigurasi Alat



Gambar 3. 1 Skema Instalasi Instrumen Gasifikasi

Deskripsi:

- 1. Force draft fan
- 2. Inlet valves
- 3. Pitot tubes
- 4. Thermocouples
- 5. Cyclone
- 6. Dry filter
- 7. Induced draft Fan
- 8. Flare stack
- 9. Stack valve
- 10. Pitot tube

- 11. Syngas valve
- 12. Sample tube
- 13. Tar sampling set
- 14. Tar container
- 15. Ash box
- 16. Ash sweeper motor
- 17. Hopper motor
- 18.Control Panel

3.2.2 Alat Ukur

1. Termokopel

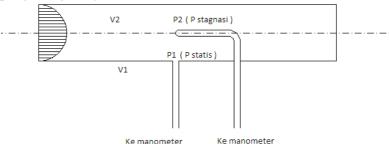
Pengukuran suhu menggunakan 4K-type thermocouples yang dipasang dalam reaktor pada lokasi tertentu terdapat pada gambar untuk mengetahui suhu pada reaksi gasifikasi.



Gambar 3. 2 Termokopel tipe k

2. Alat Ukur Laju alir massa

Alat ukur laju alir massa media gasifikasi dan syngas yang digunakan memakai pitot-static tube untuk menghasilkan perbedaan tekanan (δp) yang akan digunakan sebagai masukan pada perangkat data akuisisi yang telah terisi program untuk penghitungan laju alir massa.



Gambar 3. 3 Pitot Static Tube

Pitot tube with static wall pressure tap dihubungkan dengan manometer untuk mengetahui besarnya perbedaan ketinggian cairan pada manometer yang nantinya digunakan persamaan Bernoulli sebagai berikut:

$$\frac{P_0}{\rho} + \frac{{V_0}^2}{2} + gz_0 = \frac{P_1}{\rho} + \frac{{V_1}^2}{2} + gz_1$$

Dimana:

P0= Tekanan stagnasi (pada titik 0) (inHg)

P1= Tekanan statis (pada titik 1) (inHg)

ρ= Massa jenis fluida yang mengalir (kg/m3)

V1= Kecepatan di titik 1 (m/s)

V0= Kecepatan di titik 0, kecepatan pada titik stagnasi = 0 m/s

Dengan mengasumsikan $\Delta z = 0$ maka persamaan menjadi :

• Kecepatan aliran maksimum (Vmax)

$$V1 = \sqrt{\frac{2(Po - Pi)}{\rho air}}$$

Dimana:

Po-Pi = Pengukuran Manometer (inHg)

 ρ_{air} = Densitas udara (1.1731 kg/m³ at 28 °C)

• Menghitung Reynold number pada vmax (Re_{vmax})

$$Re_{vmax} = \frac{\rho_{air}.V_{max}.D}{\mu}$$

Dimana:

D = Diameter pipa (m)

 μ = Viskositas udara pada 28 °C (185.6 x 10⁻⁷ kg/(m.s))

• Menghitung nilai n (variation of power law exponent)

 $n = -1.7 + 1.8 \log Re_{vmax}$

• Menghitung kecepatan alir rata-rata (\overline{V})

$$\frac{\bar{V}}{V_{max}} = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)}$$

• Menghitung laju alir udara

$$\dot{m}_{air} = \rho_{air}.\bar{V}.A_{pipe}$$

Tabung pitot diletakan pada dua tempat. Yang pertama pada pipa masukan untuk mengukur masukan massa alir udara. Yang kedua, pada keluaran *syngas* untuk mengukur massa *syngas* yang dihasilkan.



Gambar 3. 4 Manometer Digital

3. Gas Chromatography

Gas *chromatography* digunakan untuk mengukur persentase volumetrik komposisi *syngas* seperti CO, CO₂, H₂, and CH₄.



Gambar 3. 5 Instrumen Gas Chromatography

Pengukuran dilakukan di Laboratorium Kimia Material dan Energi (Lab KME, Kimia, ITS).

3.2.3 Bahan Uji

Bahan uji biomassa yang digunakan pada penelitian ini adalah briket RDF. Biomassa melalui proses pemisahan mekanis dengan MSW. Proses ini melibatkan mengayak, menyaring dan pemisahan secara manual. Logam, inert, dan organik dihilangkan, sedangkan fraksi ringan dengan nilai kalor tinggi (plastik, tekstil, dan kertas) tetap ada. Produksi RDF dimulai dengan memisahkan limbah yang tidak mudah terbakar seperti logam dan kaca dari bahan yang mudah terbakar. Material yang lebih besar harus dipecah menjadi potongan-potongan kecil. Idealnya, selama tahap pemisahan, bahan berbahaya akan dihilangkan sepenuhnya. Banyak pabrik RDF memisahkan beberapa bahan organik dan menjualnya sebagai kompos. Biomassa RDF kemudian dibriket agar memiliki densitas yang lebih tinggi dan kelembaban lebih rendah. Sebelum digunakan, biomassa dianalisa dulu secara ultimate analysis dan proximate analysis untuk perhitungan lebih lanjut pada penelitian, seperti perhitungan equivalent ratio, coldgas efficiency, dan lain-lain. Berikut merupakan hasil ultimate dan proximate analysis dari RDF:

Tabel 3. 1 Ultimate dan Proximate Analysis RDF (Dianda, 2018)

Jenis Uji	Paramete	r	Satuan	Hasil
		С	% wt	49,75
	Komponen	Н	% wt	9,04
Uji <i>Ultimate</i>		0	% wt	28,55
		N	% wt	10,77
		S	% wt	1,89
	Moisture I	n		
	Sampel		% wt	6,4
	Ash Conte	nt	% wt	9,2
Uji	Volatile			
Proximate	Matter		% wt	8,82
	Fixed Carb	on	% wt	75,58
	HHV		MJ/kg	24,96



Gambar 3. 6 Briket RDF

3.3 Metode Pengambilan Data

3.3.1 Prosedur Operasional

- a. Memeriksa instrumen operasional gasifikasi secara menyeluruh, dari gasifier hingga komponen pendukungnya seperti motor penyapu abu, data logging termokopel, blower masukan dan keluaran. Pastikan tidak ada yang bermasalah.
- b. Menghubungkan *data logger* temperatur dengan komputer dan memeriksa malfungsi pada pengukuran temperatur melalui *data logger*.
- c. Memeriksa kebocoran sepanjang pipa dan sambungan pipa menggunakan blower dan air sabun.
- d. Membuka tutup reaktor dan mengisi reaktor dengan bahan bakar biomassa dan arang hingga setinggi lubang pengapian.
- e. Menutup tutup reaktor.
- f. Menyalakan *blower* keluaran dan membakar bahan bakar melalui lubang pengapian reaktor gasifikasi. Memastikan bahan bakar telah terbakar dengan melihat bara api melalui lubang pengapian.

- g. Menyalakan blower masukan dan mengatur udara yang masuk sesuai kebutuhan menggunakan masukan pada zona oksidasi.
- h. Mengamati suhu temperature pada zona oksidasi, saat temperature mencapai 500°C, mengisi kembali reaktor dengan biomassa sesuai kebutuhan.
- i. Mengamati *syngas* dan temperature pada zona oksidasi. Menguji *syngas* pada *flare stack*. Saat *syngas* sudah dapat terbakar dan temperatur zona oksidasi stabil, mulai mengambil sampel gas untuk pengambilan data.
- j. Sampel gas diambil setiap 5 menit untuk setiap variasi Air Ratio. Sampel gas hanya dapat diambil setelah syngas dapat terbakar dan suhu zona oksidasi stabil. Sampel gas diambil setelah proses kondensasi tar untuk mengurangi kandungan tar pada sampel gas. Kemudian menganalisa sampel gas dengan gas chromatography di laboratorium Material dan Energi Kimia, ITS.

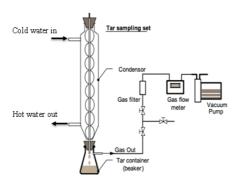
Volume *syngas* diukur dengan menghitung laju alir *syngas* menggunakan kecepatan alir dikalikan dengan luas penampang dari pipa yang digunakan untuk menghitung laju alir dalam waktu tertentu, yang pada penelitian ini dilakukan 5 menit.

Massa tar didapatkan melalui proses kondensasi tar menggunakan *condensing set*. Alat ini berfungsi sebagai penukar panas antara cairan pendingin dengan temperature 5-15 °C dengan *syngas* yang akan diturunkan temperaturnya. Temperature yang turun akan mengondensasi kandungan tar yang terdapat pada *syngas*, sehingga *syngas* terpisah dengan tar. Tar cair akan mengalir ke kontainer untuk diukur massanya setelah kadar airnya hilang, yaitu dengan sekitar satu jam pemanasan dalam *drying oven*. (Gafur, 2018)

Kandungan tar dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$Tar\ content = \frac{m_{tar}}{V_{syngas}}$$

Dimana m_{tar} adalah massa tar dan V_{syngas} adalah volume syngas yang diukur dalam waktu tertentu.



Gambar 3. 7 Tar Sampling set

3.3.2 Kondisi Operasional

Variasi masukan udara yang diujikan pada penelitian ini terdapat sembilan variasi yang diuji dengan AFR 4,5. Nilai tersebut dipilih karena mengacu dari penelitian oleh Haydary (2016), dimana pada AFR 4,5 suhu reaktor dapat mencapai 1400K, konversi yang mencapai 100%, serta kandungan tar dibawah ambang batas motor pembakaran dalam (100mg/m³)

Rasio masukan udara divariasikan menggunkan katup yang terpasang pada pipa. Jumlah udara pada setiap pipa diukur dengan menggunakan manometer, yang digunakan sebagai acuan untuk variasi data. Variasi yang digunakan adalah *air ratio* (AR) yang menunjukkan rasio antara bukaan katup pada zona pirolis, oksidasi, dan reduksi. Dalam penelitian ini digunakan sembilan variasi AR, yaitu dengan variasi masing-masing pirolisis:oksidasi:reduksi sebagai berikut, 0:10:0, 1:8:1,2:7:1,1:7:2,1:6:3,2:6:2,3:6:1,2:5:3, dan 3:5:2.

Sebagai contoh, 1:6:3 menunjukkan 10% massa total udara masuk pada zona pirolisis, 60% pada zona oksidasi, 30% pada zona reduksi, dan seterusnya.

Tabel 3. 2 Kondisi Operasional

		Input Mass							
AR	AFR	RDF Feed stock Mass Flow	Air Intake Mass Flow (kg/h)						
		(kg/h)	Pyroly sis	Oxidation	Reduction	Total			
0;10;0		2,988	0	13,6368	0	13,636			
1;8;1			1,3636	10,90944	1,36368	13,636			
2;7;1			1,3636	9,54576	2,72736	13,636			
1;7;2			2,7273	9,54576	1,36368	13,636			
1;6;3	4,5		1,3636	8,18208	4,09104	13,636			
2;6;2			2,7273	8,18208	2,72736	13,636			
3;6;1			4,0910	8,18208	1,36368	13,636			
2;5;3			4,0910	6,8184	2,72736	13,636			
3;5;2			2,7273	6,8184	4,09104	13,636			

3.3.3 Parameter Pengukuran

Tabel 3. 3 Parameter Pengukuran

Parameter Input		Output Parameters					
Konstan Variasi		Diukur	Dihitung				
• Dimensi Reaktor (h=0,6 m dan D=0,359 m)	Rasio udara masukan pirolysis, oksidasi, dan reduksi, diukur dalam	 Durasi konsumsi biomassa total (s) Pair pirolisis (inHg) 	 m biomassa(k g/s) m air (kg/s) 				
T atmosfir Biomassa (jenis, ukuran, jumlah)	9 variasi data: a. 0:10:0 b. 1:8:1 c. 1:7:2 d. 2:7:1 e. 1:6:3 f. 2:6:2 g. 3:6:1 h. 2:5:3 i. 3:5:2	 Pair oksidasi (inHg) Pair reduksi (inHg) Pgas output (inHg) T pengeringan (°C) T pirolisis (°C) T oksidasi (°C) T reduksi (°C) mtar (mg) Komposisi syngas (CO,H2, 	 m syngas (kg/s) LHV syngas Cold gas efficiency (%) Kandungan tar (mg/Nm3) 				

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

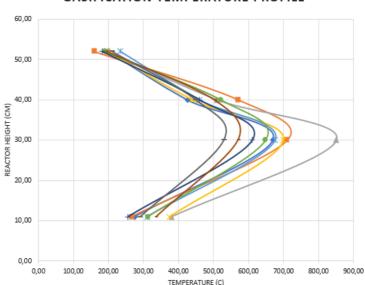
Performansi dari proses gasifikasi dalam menghasilkan *syngas* dapat diukur dari beberapa parameter, seperti komposisi *syngas*, laju alir produksi *syngas*, LHV, *cold-gas efficiency*, dan kandungan tar yang dihasilkan.

4.1 Distribusi Temperatur

Distribusi temperatur merupakan salah satu indikator yang dapat menunjukkan proses yang terjadi sepanjang reaktor gasifikasi (*drying, pyrolisis, oxidation*, dan *reduction*). Distribusi temperatur dapat menujukkan efek dari pengaruh rasio masukan udara tiga tingkat pada zona pirolisis, oksidasi, dan reduksi terhadap proses gasifikasi dengan 9 variasi dengan rasio: 0; 10; 0, 1; 8; 1, 2; 7; 1, 1; 7; 2, 1; 6; 3, 2; 6; 2, 3; 6; 1, 2; 5; 3, dan 3; 5; 2.

Tabel 4. 1 Distribusi Temperatur

Zone	Thermocouple	Height Temperature (C)									
	Thermocouple	(cm)	0;10;0	1;8;1	1;7;2	2;7;1	1;6;3	2;6;2	3;6;1	3;5;2	2;5;3
Drying	T1	52,00	200,00	160,00	198,75	199,25	234,75	190,00	182,75	194,25	210,50
Pyrolisis	T2	40,00	425,50	570,20	510,00	440,00	460,00	520,25	460,00	503,00	450,00
Oxidation	n T3	30,00	670,00	710,00	850,25	699,50	675,75	648,00	610,00	570,00	530,00
Reduction	n T4	11,00	275,00	265,50	380,00	375,00	310,00	312,50	255,00	335,50	290,50



GASIFICATION TEMPERATURE PROFILE

Gambar 4. 1 Distribsusi Temperatur Sepanjang Reaktor

- 0:10:0 AR - 1:8:1 AR - 1:7:2 AR - 2:7:1 AR - 1:6:3 AR - 2:6:2 AR - 3:6:1 AR - 3:5:2 AR - 2:5:3 AR

Tabel 4.1 menunjukan bahwa termokopel 1 (T1) berada pada zona pengeringan yang menunjukkan interval suhu 160-234,75°C, dengan suhu tertinggi dicapai pada variasi 1:6:3. Pada zona pengeringan, terjadi penghilangan kadar air dari biomassa, sesuai dengan nama zona itu sendiri. Zona pengeringan memiliki temperatur paling rendah, karena letaknya yang paling jauh dari zona oksidasi yang merupakan reaksi utama penghasil panas untuk proses penguapan pada zona pengeringan.

Termokopel 2 (T2) berada pada zona pirolisis yang menunjukkan interval suhu 425-570,20°C, dengan suhu tertinggi dicapai pada variasi 1:8:1. Pemberian udara pada zona pirolisis menyebabkan reaksi pirolisis dapat mencapai keadaan eksotermal

yang disebut *oxidative pyrolisis* sehingga menghasilkan panas lebih tinggi pada zona pirolisis. Panas yang dihasilkan dapat mengurai tar, sehingga tar yang dihasilkan berkurang. Untuk mendapatkan reaksi pirolisis yang optimal, membutuhkan masukan udara yang tepat. Pemasukan udara yang optimal pada zona pirolisis dapat meningkatkan produksi syngas dengan menghasilkan lebih banyak CO, yang merupakan produk dari oksidasi parsial dalam *oxidative pyrolisis*. Jika terlalu banyak udara yang dimasukan pada zona pirolisis, maka reaksi *oxidative pyrolisis* akan berlebihan yang akan menghilangkan reaksi pirolisis sesungguhnya dan menghasilkan produk H₂O, CO₂, dan lain-lain serta mengurangi jumlah produk yang dimanfaatkan dari pirolisis.

Termokopel 3 (T3) berada pada zona oksidasi dan menunjukkan termperatur yang paling tinggi dibandingkan zona lainnya dengan interval suhu 530-850,25°C, dengan suhu tertinggi dicapai pada variasi 1:7:2. Suhu yang tinggi pada zona oksidasi disebabkan zona oksidasi merupakan zona reaksi eksotermal yang memberikan panas pada zona endotermal lainnya. Reaksi eksotermal tersebut membutuhkan O₂ agar dapat terjadi, maka laju dari reaksi ini sangat ditentukan oleh jumlah udara yang dimasukan.

Termokopel 4 (T4) berada pada zona reduksi yang menunjukkan interval suhu 255-380°C, dengan suhu tertinggi dicapai pada variasi 1:7:2. Zona reduksi merupakan zona utama dari pembentukkan *syngas* yang dihasilkan. Reaksi yang terjadi pada zona reduksi adalah sebagai berikut:

$$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$$
 $\Delta H = 172kJ/mol$

(Boudouard Reaction)

$$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 \qquad \Delta H = 131 \text{kJ/mol}$$

(Water Gas Reaction)

$$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 \quad \Delta H = -41 \text{ kJ/mol}$$

$$(Shift Reaction)$$
 $C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4 \qquad \Delta H = -75 \text{ kJ/mol}$

$$(Methanation)$$

Temperatur pada zona reduksi dipengaruhi oleh masukan udara. Dengan perubahan variasi rasio masukan udara, maka suhu pada zona reduksi juga mengalami perubahan, hal tersebut disebabkan oleh reaksi heterogeneous oxidation yang terjadi pada zona reduksi antara udara dan char padat. Reaksi yang terjadi hampir sama dengan reaksi oxidative pyrolisis yang merupakan reaksi eksotermal. Reaksi ini menghasilkan panas pada zona reduksi, sehingga suhu pada zona reduksi mengalami kenaikan. Namun reaksti tersebut sangat ditentukan oleh jumlah reaktan pada zona reduksi, yaitu char dan oksigen. Oksigen didapat dari tambahan udara yang dimasukan pada zona reduksi, sedangkan char hanya bisa didapatkan dari sisa reaksi pada zona sebelum zona reduksi

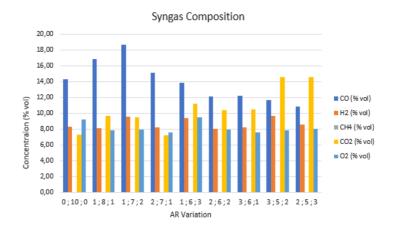
4.2 Komposisi Syngas

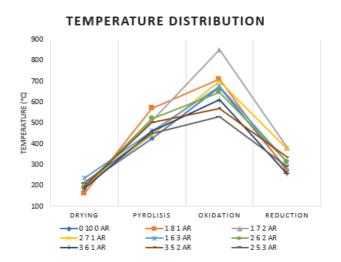
yang juga menggunakan char.

Parameter penting performansi *syngas* lainnya, dan menjadi salah satu fokus dari penelitian ini adalah komposisi dari *syngas* yang dihasilkan. Secara umum, *syngas* mengandung komponen *flammable* dan *non-flammable*. Komponen *flammable* terdiri dari CO, H₂, dan CH₄, sedangkan komponen *non-flammable* terdiri dari CO₂, N₂, dan O₂. Kedua komponen tersebut dipisahkan oleh nilai kalor, dimana komponen *flammable* memiliki nilai kalor, sedangkan pada komponen *non-flammable* tidak memiliki nilai kalor. Tabel 4.2 dan gambar 4.2 menunjukan persentase volumetrik dari komponen kimiawi dari *syngas* pada masing-masing variasi rasio masukan udara.

AR	СО	H2	CH4	CO2	N2	O2
AK	(% vol)	(% vol)	(%vol)	(% vol)	(% vol)	(% vol)
0;10;0	14,25	8,282	0	7,25706	60,98	9,23
1;8;1	16,85	8,07	0	9,62	57,62	7,84
1;7;2	18,68	9,5446	0	9,45	54,40	7,93
2;7;1	15,12	8,1607	0	7,23	61,94	7,54
1;6;3	13,81	9,3899	0	11,19	56,11	9,50
2;6;2	12,14	7,984	0	10,40	61,55	7,93
3;6;1	12,23	8,1537	0	10,48	61,61	7,53
3;5;2	11,63	9,6436	0	14,55	56,33	7,85
2;5;3	10,80	8,5828	0	14,55	58,01	8,05

Tabel 4. 2 Komposisi *syngas* (Laboratorium Kimia Material dan Energi)





Gambar 4. 2 Komposisi *Syngas* Terhadap Distribusi Temperatur

Pada gambar 4.2 menunjukkan komposisi *syngas* serta temperatur pada setiap zona (pengeringan, pirolisis, oksidasi, reduksi) pada masing-masing variasi rasio masukan udara. Dapat

dilihat dari komposisi pada gambar 4.2, variasi 1:7:2 memiliki komposisi flammable yang paling besar dengan komposisi 18,68% CO, 9,5546% H₂, 0% CH₄, 9,45% CO₂, 54,4% N₂, dan 7,93% O₂. Variasi 1:7:2 memiliki komposisi CO yang paling besar dan memiliki H₂ yang cukup tinggi. Namun pada semua variasi komposisi CH₄ sangat kecil sehingga tidak terbaca pada alat gas chromatography. Hal tersebut sesuai dengan penelitian yang pernah dilakukan Juma Haydary (2016), dimana menggunakan AFR lebih dari 3,5 nilai CH₄ akan mendekati nol. komposisi *flammable* menunjukkan Penambahan penambahan udara pada zona reduksi dan zona pirolisis menyebabkan reaksi oksidasi parsial yang meningkatkan laju konversi biomassa. Namun setelah variasi 1:6:3, komposisi flammable mulai mengalami penurunan. Pada keaadaan oksidatif, oksigen cenderung bereaksi dengan char sehingga menyebabkan oksidasi parsial yang menghasilkan CO yang dapat meningkatkan nilai kalor dari syngas karena CO merupakan komponen flammable.

Pada zona pirolisis, umumnya dekomposisi termal dilakukan tanpa adanya udara. Dengan penambahan udara pada zona pirolisis maka akan terjadi oksidasi parsial yang mengahsilkan panas dan menghasilkan produk berupa gas CO. Panas yang dihasilkan menyebabkan kenaikan temperatur yang membantu dekomposisi termal serta meningkatkan laju konversi char, meningkatkan produksi gas dan mengurangi produksi char. Peningkatan suhu juga dapat mengurai tar, sehingga kandungan tar yang dihasilkan menjadi lebih sedikit dan kualitas *syngas* menjadi lebih baik.

Pada zona reduksi, terjadi pembentukan komponen flammable yang lain, yaitu H₂ dan CH₄. Pada keadaan oksidatif, terjadi reaksi oksidasi parsial yang menghasilkan panas sehingga meningkatkan temperatur zona reduksi. Temperatur yang tinggi dapat mengurangi produksi tar dan dapat membantu reaksi endotermal pada zona reduksi, seperti reaksi *Boudouard* dan

Water-Gas reactions (Molino, 2015), sehingga pada zona reduksi dengan suhu yang tinggi dapat meningkatkan kadar CO dan H₂, namun untuk beberapa variasi seperti pada variasi 2:6:2 dan 1:6:3 yang memiliki suhu reduksi yang hampir sama, memiliki komposisi *flammable* yang berbeda. Hal tersebut menandakan bahwa komposisi *flammable* ditentukan oleh faktor lain, seperti temperatur pada zona lain, serta faktor eksternal lainnya.

Pada tabel 4.2, dapat dilihat tren CO₂ mengalami peningkatan dan CO mengalami penurunan, sehingga dapat diasumsikan variasi setelah variasi 1:7:2 mengalami pembakaran yang lebih sempurna. Hal tersebut menunjukkan jumlah udara yang dimasukan ke dalam zona pirolisis dan zona oksidasi hanya dapat meningkatkan kualitas *syngas* hingga keadaan tertentu, sehingga udara yang berlebih akan menyebabkan pembakaran sempurna yang menghasilkan CO₂, dan mengurangi kualitas *syngas* karena nilai kalor yang turun karena CO₂ tidak memiliki nilai kalor.

Komposisi N_2 cenderung konsisten memiliki persentase volumetrik di atas 50% pada setiap variasi. Hal ini terjadi karena N_2 memiliki persentase yang tinggi pada udara di atmosfir, sekitar 75%, selain itu N_2 merupakan gas yang tidak dapat bereaksi dengan komponen kimiawi lainnya, sehingga persentase volumetriknya cenderung konstan.

Kandungan CH₄ pada semua variasi sangat rendah dikarenakan AFR yang tinggi menyebabkan suhu yang tinggi dan suhu yang tinggi membuat reaksi endotermal lebih dominan di zona reduksi, sedangkan reaksi pembentukan CH₄(methanation)

4.3 Nilai Kalor Bawah

Nilai Kalor Bawah atau *lower heating value* (LHV) pada *syngas* dipengaruhi oleh komposisi *flammable* pada gas yang dihasilkan. Setiap komposisi (CO, H₂, CH₄) memiliki LHV masing-masing dengan nilai pada tabel 4.3

Flammable gas LHV						
CO H ₂ CH ₄						
(kJ/m^3)	(kJ/m ³)	(kJ/m^3)				
12633	10783	35883				

Tabel 4. 3 LHV gas flammable

Dari nilai LHV pada tabel 4.3 dan komposisi *syngas* yang dihasilkan pada tabel 4.2, maka LHV *syngas* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

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

Keterangan:

Yi = konsentrasi gas yang terbakar (CO, CH4, H2) *LHVi* = Nilai Kalor bawah (LHV) gas terbakar (CO, CH4, H2)

Berikut adalah contoh perhitungan LHV dengan menggunakan data dari variasi 0 ; 10; 0

- Yi untuk CO = 14,25% = 0,1425
- Yi untuk $H_2 = 8,282\% = 0,08282$
- Yi untuk $CH_4 = 0\% = 0.0$

Sehingga menghasilkan:

LHV Syngas =
$$\sum_{i=1}^{n} (0.1425.12633) + (0.08282.10783) + (0.35883)$$

LHV Syngas = 2644,6698 $\frac{kJ}{m^3}$

Satuan LHV dari tabel 4.3 dan hasil perhitungan di atas adalah kJ/m³ sedangkan untuk perhitungan selanjutnya dibutuhkan LHV dengan satuan kJ/kg, sehingga hasil perhitungan di atas perlu dibagi dengan densitas dari masing-masing *syngas* yang dihasilkan.

Syngas merupakan campuran dari beberapa komponen gas yang memiliki properti berbeda, termasuk densitas. Densitas dari syngas dapat dihitung dari persamaan berikut:

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

Keterangan:

- ρ_{syngas} = syngas density (kg/m³)
- Y_i = Konsentrasi senyawa gas dalam *syngas* (CO,

CH4, CH2, CO2, O2, N2)

• $\rho_{i\,syngas}$ = Nilai massa jenis senyawa gas dalam *syngas* (kg/m³)

Berikut adalah contoh perhitungan densitas dengan menggunakan data dari variasi 0; 10; 0. Densitas dari masingmasing gas didapat dari tabel A4 tentang *thermophysical* properties of gases at atmospheric pressure pada suhu 54°C.

14,25 % CO	dengan $\rho = 1,0303$	kg/m ³
8,28 % H ₂	dengan $\rho = 0.07411$	kg/m ³
0 % CH ₄	dengan $\rho = 0.5227$	kg/m ³
7,25 % CO ₂	dengan $\rho = 1,625$	kg/m ³
60,98 % N ₂	dengan $\rho = 1,0305$	kg/m ³
9,23% O ₂	dengan $\rho = 1,1779$	kg/m ³

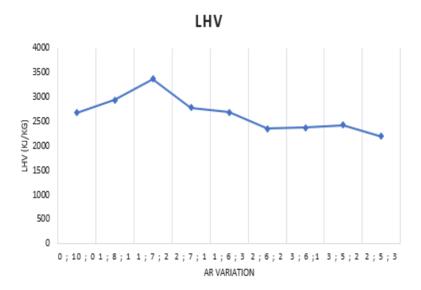
$$\rho_{syngas} = \sum_{i=1}^{n} (0.1425.1.0303) + (0.0828.0.07411) + (0.0.5227) + (0.0725.1.625) + (0.6098.1.0305) + (0.0923.1.1779)$$

$$\rho_{gas} = 1.008014 \frac{kg}{m^3}$$

Hasil dari perhitungan LHV *syngas* dapat dilihat pada tabel 4.4 dan gambar 4.3

Tabel 4. 4 LHV syngas

	1 4 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	· 25118412
AR	Syngas density	LHV Syngas (kj/kg)
0;10;0	1,008014719	2671,971934
1;8;1	1,022063901	2933,79119
1;7;2	1,007044216	3365,087576
2;7;1	1,00652708	2772,01319
1;6;3	1,027605884	2682,692613
2;6;2	1,021218661	2344,756733
3;6;1	1,025883073	2362,905728
3;5;2	1,036332223	2421,019216
2;5;3	1,046778198	2187,736221



Gambar 4. 3 Grafik LHV Syngas

Pada tabel 4.4 dan gambar 4.3, LHV mengalami peningkatan dari variasi 0:10:0 dan mencapai puncak LHV paling tinggi pada variasi 1:7:2 dengan LHV 3365,08 kJ/kg, lalu mengalami penurunan hingga variasi terendah pada variasi 2:5:3 dengan LHV 2187,73 kJ/kg. Hasil tersebut sesuai dengan temperatur pada masing-masing AR, sehingga menunjukkan bahwa temperatur memengaruhi kualitas *syngas* yang dihasilkan secara signifikan.

4.4 Efisiensi Gas Dingin

Efisiensi gas dingin adalah perhitungan efisiensi gasifikasi dengan membandingkan energi *input* dan energi *output*. Berikut adalah persamaan dari efisiensi gas dingin:

Cold gas efficiency =
$$\frac{\dot{m}_{syngas}.LHV_{syngas}}{\dot{m}_{biomass}.LHV_{biomass}}$$

Berikut adalah contoh perhitungan efisiensi gas dingin dengan menggunakan data dari variasi 0; 10; 0. Dengan laju alir biomassa 0,00083kg/s, laju alir *syngas* 0,003106kg/s, LHV *syngas* 2671,97 kj/kg, dan LHV biomassa 22976,624 kJ/kg. Maka perhitungan efisiensi gas dingin sebagai berikut:

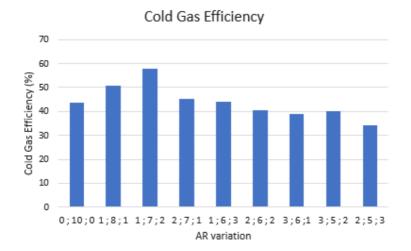
Cold gas efficiency =
$$\frac{0,003106 \frac{kg}{s}.2671,97 \frac{kj}{kg}}{0,00083 \frac{kg}{s}.22976,624 \frac{kJ}{kg}} \times 100\%$$

Cold gas efficiency =
$$43,073 \%$$

Perhitungan efisiensi gas dingin dari variasi lainnya terdapat pada tabel 4.5 dan gambar 4.4.

Tabel 4. 5 Efisiensi gas dingin

AR			RDF mass flow (kg/s)	syngas mass flow (kg/s)			
0;10;0	1,008014719	2671,971934	0,0008300000	0,003105964	22976,624	0,43518	43,517504
1;8;1	1,022063901	2933,79119	0,0008300000	0,003305356	22976,624	0,50849	50,849076
1;7;2	1,007044216	3365,087576	0,0008300000	0,003281098	22976,624	0,57896	57,896354
2;7;1	1,00652708	2772,01319	0,0008300000	0,003103764	22976,624	0,45115	45,114871
1;6;3	1,027605884	2682,692613	0,0008300000	0,00313759	22976,624	0,44137	44,136995
2;6;2	1,021218661	2344,756733	0,0008300000	0,003303799	22976,624	0,40621	40,620677
3;6;1	1,025883073	2362,905728	0,0008300000	0,003134931	22976,624	0,38843	38,842761
3;5;2	1,036332223	2421,019216	0,0008300000	0,0031534	22976,624	0,40033	40,03252
2;5;3	1,046778198	2187,736221	0,0008300000	0,002982288	22976,624	0,34212	34,212144



Gambar 4. 4 Grafik Efisiensi Gas Dingin

Tabel 4.5 dan gambar 4.4 menunjukkan bahwa penambahan udara pada zona pirolisis dan reduksi dapat meningkatkan efisiensi gas dingin yang semula 43,517% pada variasi 0; 10; 0 hingga efisiensi tertinggi 57,896% pada variasi 1;7; 2. Namun setelah variasi 1;7; 2 efisiensi gas dingin mengalami penurunan karena udara berlebih pada zona pirolisis dan zona reduksi menyebabkan terjadinya pembakaran sempurna yang dapat menurunkan komposisi flammable dari syngas.

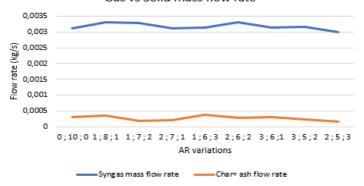
4.5 Laju Produksi Gas

Laju produksi *syngas* merupakan salah satu faktor performansi dari proses gasifikasi yang menjadi fokus dari penelitian ini. Laju alir massa dari *syngas* dihitung dengan mengukur beda tekanan pada pipa *syngas*, berikut merupakan hasil perhitungan laju produksi dari gas serta char dan abu:

Tabel 4. 6 Laju Produksi Gas dan Padat

AR.	Syngas delta P (in hg)	Syngas density (kg/m3)	Syngas mass flow (kg/s)	Char+ash mass flow (kg/s)
0;10;0	0,009	1,008	0,003105964	0,00030
1;8;1	0,01	1,022	0,003305356	0,00035
1;7;2	0,01	1,007	0,003281098	0,00020
2;7;1	0,009	1,007	0,003103764	0,00021
1;6;3	0,009	1,028	0,00313759	0,00038
2;6;2	0,01	1,021	0,003303799	0,00029
3;6;1	0,009	1,026	0,003134931	0,00032
3;5;2	0,009	1,036	0,0031534	0,00023
2;5;3	0,008	1,047	0,002982288	0,00015

Gas vs Solid mass flow rate



Gambar 4. 5 Grafik Laju Alir Massa Gas VS Padat

Jika terjadi perubahan pada laju alir gas, maka akan terjadi perubahan dengan laju alir padat pada output gasifikasi. Hal tersebut terjadi karena adanya kesetimbangan massa. Persamaan dari kesetimbangan massa pada proses gasifikasi adalah sebagai berikut:

$$\begin{split} \dot{m}_{in} &= \dot{m}_{out} \\ \dot{m}_{biomass} + \dot{m}_{intake~air} &= \dot{m}_{char} + \dot{m}_{ash} + \dot{m}_{gas} \end{split}$$

Input mass Output mass Char+ash AR RDF mass Air mass flow (kg/s) Syngas mass Kesetimbangan mass flow flow (kg/s) flow (kg/s) Massa (%) (kg/s) Pirolisis Oksidasi Reduksi Total 0;10;0 0 0.00380 0 0.0038 0.00311 0,00030 0.74 1:8:1 0.00038 0.00304 0.00038 0.0038 0,00331 0.79 1;7;2 0,00328 0,00020 0.75 0,00038 0,00266 0,00076 0,0038 0,00076 0,00038 0,0038 0,00310 0,00021 0,71 0,00266 0,00083 0,00038 0,00228 0,00114 0,0038 0,00314 0,00038 0,76 2;6;2 0.00076 0.00330 0.00029 0.78 0.00228 0.00076 0.0038 3;6;1 0.00114 0.00228 0.00038 0.0038 0,00313 0.00032 0,75 3;5;2 0,00114 0,00190 0,00076 0,0038 0,00315 0.00023 0,73 0.00076 0.00190 0.00114 0,0038 0,00298 0,00015 0,68

Tabel 4. 7 Kesetimbangan Massa

Pada tabel 4.7 kesetimbangan massa tidak terjadi, dimana laju alir massa masuk ($\dot{m}udara + \dot{m}biomassa$) \neq laju alir massa keluar ($\dot{m}syngas + \dot{m}ash$ & char). Laju alir massa keluar yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan laju alir massa masuk. Hal tersebut dapat terjadi karena adanya losses yang terjadi pada sistem gasifikasi, dimana terdapat kebocoran pada reaktor pada sambungan perpipaan, tutup feeding biomassa, sambungan pada induced fan.

4.6 Kandungan Tar

Kandungan Tar (*tar content*) menunjukkan jumlah tar dalam volume *syngas* tertentu, dimana persamaan kandungan tar adalah:

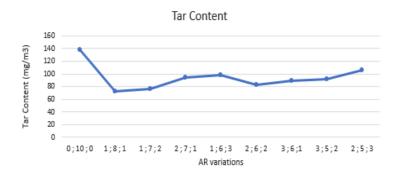
$$Tar\ content = \frac{m_{tar}}{syngas\ volume\ in\ t}$$

Dimana m_{tar} adalah massa tar yang dihasilkan dalam satuan mg dan volume *syngas* dalam satuan Nm³ (normal cubic meter). Volume *syngas* diukur dalam waktu 5 menit, sebagaimana massa

tar yang terkondensasi. Hasil perhitungan kandungan tar pada masing-masing variasi dapat dilihat pada tabel 4.8 dan gambar 4.6.

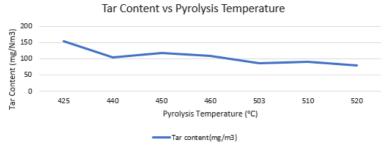
Tabel 4. 8 Kandungan Tar

Tabel 4. o Kanuungan Tai									
AR.	Tar mass (mg)	Syngas mass flow (kg/s)	Syngas Volume per 5 minutes (Nm3)	Tar content(mg/ Nm3)					
0;10;0	128	0,003105964	0,831	154,01					
1;8;1	70	0,003305356	0,872	80,24					
1;7;2	75	0,003281098	0,879	85,34					
2;7;1	87	0,003103764	0,832	104,60					
1;6;3	90	0,00313759	0,824	109,28					
2;6;2	80	0,003303799	0,873	91,68					
3;6;1	82	0,003134931	0,824	99,48					
3;5;2	84	0,0031534	0,821	102,34					
2;5;3	90	0,002982288	0,768	117,11					



Gambar 4. 6 Grafik Kandungan Tar

Pembentukan tar sangat ditentukan oleh temperatur proses gasifikasi, terutama pada zona pirolisis. Semakin tinggi temperatur reaksi, maka penguraian tar akan semakin aktif. Tar primer mulai terurai pada suhu 500°C, tar sekunder pada suhu 600°C, tar tersier pada suhu 800°C. Kandungan tar pada gambar 4.6 jika dikaitkan dengan distribusi temperatur pada gambar 4.1, maka dapat dihasilkan gambar 4.7, dimana variasi 0; 10; 0 dengan temperatur pirolisis paling rendah 425,50 °C memiliki kandungan tar paling tinggi sebesar 154,01mg/Nm³, dan variasi 1;8; 1 dengan temperatur pirolisis paling tinggi 570,20°C memiliki kandungan tar paling rendah sebesar 80,24mg/Nm³.



Gambar 4. 7 Grafik Kandungan Tar vs Temperatur Pirolisis

Tar yang dikondensasi dengan kondensor merupakan tar yang berhasil melewati $dry\ filter$. Jika dilihat dari beberapa variasi kandungan tar yang terdapat pada penelitian ini, variasi 0; 10; 0, 2; 5; 3, 2; 7; 1, 1; 6; 3, dan 3; 5; 2 yang tidak dapat digunakan karena pada motor pembakaran dalam batas maksimal tarnya adalah 100mg/Nm^3

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian gasifikasi biomassa Refuse-Derived Fuel (RDF) menggunakan masukan udara tiga tingkat, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- 1. Penggunaan masukan udara tiga tingkat pada gasifikasi dapat menyebabkan reaksi *oxidative pyrolysis* dan *heterogeneous oxidation* yang diindikasikan dengan naiknya temperatur pada zona pirolisis dan zona reduksi masing-masing 144,7°C dan 105°C pada suhu paling tinggi jika dibandingkan dengan masukan udara satu tingkat.
- **2.** Penggunaan masukan udara tiga tingkat dapat meningkatkan performansi dari gasifikasi yang ditunjukan oleh parameter:
 - Komposisi flammable meningkat dibandingkan dengan masukan udara satu tingkat dengan nilai: CO meningkat dari 14,25% menjadi 18,68% pada variasi 1; 7; 2, H₂ meningkat dari 8,282% menjadi 9,6436% pada variasi 3; 5; 2, CH₄ memiliki komposisi yang rendah pada gasifikasi RDF dengan AFR 4,5 seperti penelitian Haydary (2016)
 - Laju alir massa syngas meningkat dibandingkan dengan masukan udara satu tingkat dengan nilai: 0,003105kg/s pada variasi 0; 10; 0 menjadi 0,003305kg/s pada variasi 1; 8; 1.
 - Nilai Kalor Bawah (LHV) dari syngas meningkat dibandingkan masukan udara satu tingkat dengan nilai 2671,97 kJ/kg pada variasi 0; 10; 0 menjadi 3365,087 kJ/kg pada variasi 1; 7; 2.
 - Efisiensi gas dingin meningkat dibandingkan masukan udara satu tingkat dengan nilai: 43,51% pada variasi 0; 10; 0 menjadi 57,89% pada variasi 1; 7; 2.
 - Kandungan tar yang dihasilkan menurun dibandingkan masukan udara satu tingkat dengan nilai: 154,01 mg/Nm³

pada variasi 0; 10; 0 menjadi 80,24 mg/Nm³ pada variasi 1; 8; 1.

3. Nilai variasi rasio masukan udara terbaik adalah 1; 7; 2. Setelah melihat data dari variasi 1; 7; 2 memiliki efisiensi gas dingin terbaik pada nilai 57,89% serta LHV paling tinggi pada nilai 3365,087 kJ/kg. Kandungan tar pada variasi 1; 7; 2 yang bernilai 85,34 mg/Nm³ dapat diaplikasikan langsung ke dalam motor pembakaran dalam dengan batas kandungan tar maksimal 100 mg/Nm³.

5.2 Saran

Adapun saran dari penelitian ini adalah:

- 1. Proses pembriketan bahan baku biomassa refuse-derived fuel memliki standar yang jelas sehingga data yang diambil lebih akurat dan jumlah sampel yang dianalisa lebih banyak karena komposisi briket tidak homogen.
- **2.** Dibutuhkan penelitian lebih lanjut mengenai sistem pengaduk dalam reaktor, dimana pengadukan dapat memengaruhi temperatur reaktor.
- 3. Dilakukan penelitian dengan gasifying agent O_2 murni untuk menurunkan kadar N_2 .

DAFTAR PUSTAKA

- Adrieq, A., & Sudarmanta, B. (2016). "Studi Eksperimental Pengaruh Air Fuel Ratio Proses Gasifikasi Briket Municipa Solid Waste Terhadap Unjuk Kerja Gasifier Tipe Downdraft". *JURNAL TEKNIK ITS*, 1(1).
- Basu, P. (2013). **Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory.** Academic press
- Bhattacharya, S. C., & Pham, H. L. (2001). "A study on a multistage hybrid gasifier-engine system". *Biomass and Bioenergy*, 21(6), 445-460.
- Bui, T., Loof, R., & Bhattacharya, S. C. (1994). "Multi-stage reactor for thermal gasification of wood". *Energy*, 19(4), 397-404.
- Dianda, P., & Munawar, E. (2018, March)." Production and characterization refuse derived fuel (RDF) from high organic and moisture contents of municipal solid waste (MSW)". In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 334, No. 1, p. 012035). IOP Publishing.
- Haydary, J. (2016). Gasification of refuse-derived fuel (RDF).
- Hutabarat, I. N., Priyambada, I. B., Samudro, G., Lokahita, B., Syafrudin, S., Wardhana, I. W., & Hadiwidodo, M. (2018).
 "Potensi Material Sampah Combustible pada Zona Pasif TPA Jatibarang Semarang sebagai Bahan Baku RDF (Refuse Derived Fuel)". *Jurnal Teknik Mesin Mercu Buana*, 7(1), 24-28.

- Shi, H., Si, W., & Li, X. (2016). "The concept, design and performance of a novel rotary kiln type air-staged biomass gasifier". *Energies*, 9(2), 67.
- Molino, A., Chianese, S., & Musmarra, D. (2015). "Biomass gasification technology: The state of the art overview". *Journal of Energy Chemistry*, 25(1), 10-25
- Milne, T. A., Evans, R. J., & Abatzaglou, N. (1998). "Biomass gasifier"Tars": their nature, formation, and conversion" (No. NREL/TP-570-25357; ON: DE00003726). National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO (US).
- Saleh, A. R., Sudarmanta, B., Fansuri, H., & Muraza, O. (2020). "Syngas production from municipal solid waste with a reduced tar yield by three-stages of air inlet to a downdraft gasifier". *Fuel*, 263, 116509.
- Satake.(2006). Biomass Gasification and Solution for Agro Waste. Japan.
- Sudarmanta, B., Gafur, A., Saleh, A. R., Dwiyantoro, B. A., & Sampurno. (2018, July). "The effect of two stage gasifying agent on biomass downdraft gasification to the gasifier performance". **In** *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1983, No. 1, p. 020037). AIP Publishing LLC.
- Sudarmanta, B. (2010). "Variasi Rasio Gasifying Agent–Biomassa Terhadap Karakterisasi Gasifikasi Tongkol Jagung Pada Reaktor Downdraft". *Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, *Surabaya*.
- Sumingkrat, S. (2009). "Terbentuknya Dioksin Akibat Reaksi Kimia Pada Proses Pembakaran Dan Dampaknya Bagi Manusia". *Jurnal Kimia dan Kemasan*, 7-14.

- Suyitno, T. (2007). "Teknologi Gasifikasi Biomasa untuk Penyediaan Listrik dan Panas Skala Kecil Menengah". *Dalam Kumpulan Potret Hasil Karya IPTEK. UNS Press. Surakarta.*
- Ximenes, Abel, (2018), "Studi Eksperimental Pengaruh Masukan Udara Pada Zona Pirolisis, Oksidasi Dan Reduksi Terhadap Performansi Gasifikasi Tiga Tingkat Menggunakan Downdraft Gasifier Dengan Bahan Bakar MSW (Municipal Solid Waste)", **ISST**, 2018, Paper 61
- Zhao, S., Luo, Y., Su, Y., Zhang, Y., & Long, Y. (2014). "Experimental investigation of the oxidative pyrolysis mechanism of pinewood on a fixed-bed reactor". *Energy & Fuels*, 28(8), 5049-5056.

LAMPIRAN

1. Tabel perhitungan massa udara

AR	Air mass flow (kg/s)								
	Pirolisis	Oksidasi	Reduksi	Total					
0;10;0	0	0,003802726	0	0,0038					
1;8;1	0,000380273	0,003042181	0,000380273	0,0038					
1;7;2	0,000380273	0,002661908	0,000760545	0,0038					
2;7;1	0,000760545	0,002661908	0,000380273	0,0038					
1;6;3	0,000380273	0,002281636	0,001140818	0,0038					
2;6;2	0,000760545	0,002281636	0,000760545	0,0038					
3;6;1	0,001140818	0,002281636	0,000380273	0,0038					
3;5;2	0,001140818	0,001901363	0,000760545	0,0038					
2;5;3	0,000760545	0,001901363	0,001140818	0,0038					

2. Tabel perhitungan massa syngas

AR	Gas Press. Diff. (inHg)	V Max (m/s)	Gas Density (kg/m³)	Gas Viscosity (kg/m.s)	Pipe's Dia. (m)	Reynold	n	Mean Velocity (m/s)	Massflowrate (kg/s)
0;10;0	0,009	7,776269	1,008015	0,000018	0,0254	11061,13	5,578839	6,051863	0,003105964
1;8;1	0,01	8,140376	1,022064	0,000018	0,0254	11740,42	5,625431	6,347537	0,003305356
1;7;2	0,01	8,200857	1,007044	0,000018	0,0254	11653,84	5,619644	6,393167	0,003281098
2;7;1	0,009	7,782014	1,006527	0,000018	0,0254	11052,96	5,578262	6,056186	0,003103764
1;6;3	0,009	7,701786	1,027606	0,000018	0,0254	11168,1	5,586363	5,995788	0,00313759
2;6;2	0,01	8,143744	1,021219	0,000018	0,0254	11735,57	5,625107	6,350079	0,003303799
3;6;1	0,009	7,70825	1,025883	0,000018	0,0254	11158,73	5,585707	6,000655	0,003134931
3;5;2	0,009	7,669291	1,036332	0,000018	0,0254	11215,42	5,589668	5,971317	0,0031534
2;5;3	0,008	7,194509	1,046778	0,000018	0,0254	10627,16	5,547551	5,591719	0,002982288

3. Visualisasi nyala api syngas pada $flare\ stack$ reaktor







Penulis dilahirkan di Jakarta pada tanggal 20 Januari 1997 dan merupakan anak kedua dari tiga bersaudara.

Penulis menempuh Pendidikan dasar di SD Ar-Rahaman motik, Setiabudi, Jakarta, kemudian melanjutkan studi di SMPN 115 Jakarta, yang seterusnya dilanjutkan pada pendidikan lanjut di SMAN 28 Jakarta. Pada tahun 2015, penulis diterima di program S-1 Teknik

Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember melalui jalur SBMPTN.

Selama perkuliahan di ITS, penulis pernah mengikuti kegiatan organisasi Mesin ITS autosport selama 1 bulan. Selama aktif di mesin ITS autosport, penulis menjabat sebagai anggota.