



TUGAS AKHIR – TM141585

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH *AIR FUEL RATIO*
(AFR) PROSES GASIFIKASI PELLETT *MUNICIPAL SOLID*
WASTE (MSW) TERHADAP UNJUK KERJA GASIFIER
TIPE *DOWNDRAFT* SISTEM KONTINYU**

IRFAN MAULANA ARDIANSYAH
NRP. 2115105033

Dosen Pembimbing:
Dr. BAMBANG SUDARMANTA. ST., MT.

PROGRAM SARJANA
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017



FINAL PROJECT – TM141585

**EXPERIMENTAL STUDY OF EFFECT AIR FUEL RATIO
ON THE GASSIFICATION PROCESS OF PELLETS
MUNICIPAL SOLID WASTE (MSW) THROUGH OF THE
PERFORMANCE GASIFIER DOWNDRAFT TYPE WITH
CONTINUOUS SYSTEM**

IRFAN MAULANA ARDIANSYAH
NRP. 2115105033

Advisory Lecturer
Dr. BAMBANG SUDARMANTA. ST., MT.

BACHELOR PROGRAM
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2017

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH *AIR FUEL*
RATIO (AFR) PROSES GASIFIKASI PELLET
MUNICIPAL SOLID WASTE (MSW) TERHADAP
UNJUK KERJA GASIFIER TIPE *DOWNDRAFT* SISTEM
KONTINYU**

TUGAS AKHIR

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

Oleh :

IRFAN MAULANA ARDIANSYAH

NRP. 2115 105 033

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT (Pembimbing)
NIP. 197301161997021001
2. Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichsan, M.Eng (Penguji I)
NIP. 195310191979031003
3. Dr. Ir. Budi Utomo Kuku, Widodo, ME (Penguji II)
NIP. 195312191981031001
4. Ary Bachtiar K.P., ST., MT., PhD (Penguji III)
NIP. 197105241997021001

SURABAYA

JULI, 2017

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH AIR FUEL RATIO
PROSES GASIFIKASI PELLETT MUNICIPAL SOLID
WASTE (MSW) TERHADAP UNJUK KERJA GASIFIER
TIPE DOWNDRAFT SISTEM KONTINYU**

Nama Mahasiswa : Irfan Maulana Ardiansyah
NRP : 2115105033
Jurusan : Teknik Mesin FTI – ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT

Abstrak

Sampah merupakan salah satu masalah dalam masyarakat. Salah satu teknologi untuk mengubah sampah menjadi energi terbarukan dengan menggunakan proses termokimia atau Gasifikasi. Sampah dibentuk menjadi pelet karena memiliki nilai HHV tinggi dan moisture content yang rendah. Salah satu parameter operasi gasifikasi adalah pasokan udara (AFR), Dengan meningkatnya jumlah udara (O_2), konversi C dalam bahan baku meningkat sampai tingkat tertentu. Namun, jumlah kelebihan O_2 mengoksidasi bahan baku sepenuhnya dan produksi syngas menurun.

Penelitian ini bersifat eksperimental, karena diperlukan proses pengujian untuk mengetahui pengaruh laju alir massa udara terhadap komposisi LHV & Cold gas efficiency. Pengujian dilakukan dengan cara diberikan variasi laju alir massa udara (\dot{m}) yang masuk gasifier sebesar 0,0044; 0,0073; 0,0081; 0,0099 kg/s. dengan AFR 0,78 ; 1,085 ; 1,12 ; 1,3

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah didapatkan AFR optimum pada 1,08 Visualisasi flame terbaik didapatkan pada suhu reaktor 967 °C. Dengan Komposisi syn-gas sebagai berikut: $H_2 = 9,97\%$, $CO_2 = 7,92\%$, $CO = 24,79\%$, $CH_4 = 2,44\%$, dengan nilai kalor bawah sebesar 4785,6 kJ/kg. Sedangkan total efisiensi gasifikasi pada kondisi tersebut mencapai 38,92%

Kata kunci : Pellet , AFR, gasifikasi, LHV, Cold gas efficiency

EXPERIMENTAL STUDY OF EFFECT AIR FUEL RATIO ON THE GASSIFICATION PROCESS OF PELLETS MUNICIPAL SOLID WASTE (MSW) THROUGH OF THE PERFORMANCE GASIFIER DOWNDRAFT TYPE WITH CONTINUOUS SYSTEM

Name : Irfan Maulana Ardiansyah
NRP : 2115 105 033
Departement : Mechanical Engineering FTI – ITS
Advisor : Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT.

Abstract

Trash is one of the problems in society. One of the teknologi to turn waste into renewable energy with the use of Thermo-process or Gasification. Trash formed into pellet because it has the higher value of the HHV and low moisture content. One of the parameters of operation of gasification is the air supply (AFR), With the increasing amount of air (O_2), the conversion of C in raw material increases to a certain level. However, the amount of the excess of O_2 oxidize completely raw materials and the production of syngas.

This research is both experimental, because it takes the process of testing to find out the influence of the air mass flow rate (AFR) against of the gas composition, Low Heating Value (LHV) and Cold Gas efficiency . The air mass flow rate are variationed (\dot{m}) of 0.0044; 0.0 073; 0.0 081; 0.0 099 kg/s with AFR value are 0,78; 1,085; 1,12; 1,3

The results of this research was obtained the optimum of AFR is 1.08. The best visualization of flame on reactor temperature obtained 967 ° C. With the gas composition as follows: $H_2 = 9.97\%$, $CO_2 = 7.92\%$, $CO = 24.79\%$ $CH_4 = 2.44\%$, the lower heat value of 4785.6 kJ/kg. While the total efficiency of the gasification on the condition reached 38.92%

Key words : pellet, AFR, gasification, LHV, Cold gas efficiency

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji dan syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT. Karena atas rahmat dan hidayah-Nya, tugas akhir yang berjudul “ ***STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH AIR FUEL RATIO PROSES GASIFIKASI PELLET MUNICIPAL SOLID WASTE (MSW) TERHADAP UNJUK KERJA GASIFIER TIPE DOWNDRAFT SISTEM KONTINYU***” ini dapat disusun dan diselesaikan dengan baik dan lancar.

Tugas Akhir ini merupakan salah satu persyaratan yang harus dipenuhi oleh setiap mahasiswa Program Studi S1 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 dorongan dan bantuan yang penulis dapatkan selama penyusunan Tugas Akhir ini sampai terselesaikannya laporan. Untuk itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan sebesar-besarnya kepada :

1. Allah SWT dan junjungan besar Nabi Muhammad SAW yang telah memberikan ketenangan dalam jiwaku.
2. Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT sebagai Dosen Pembimbing yang telah dengan sangat sabar, tidak bosan-bosannya membantu dan memberikan ide serta ilmu hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
3. Bapak dan Ibu, adiku yang benar - benar memberikan semangat, cinta dan doa yang sangat berperan dalam menyelesaikan tugas Akhir ini.
4. Dosen tim penguji yang telah memberikan kritik dan saran dalam penyempurnaan dan pengembangan Tugas Akhir ini.

5. Seluruh dosen dan staf pengajar Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, yang telah memberikan ilmunya dan membantu semua selama menimba ilmu di bangku kuliah.
6. Pak arif, Wase, Aji, Depi, Fandi, Mas Gofur dan Seluruh keluarga laboratorium teknik pembakaran dan bahan bakar yang telah menyediakan tempat dan telah memberikan bantuan dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.

Semoga segala keikhlasan dan kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang terbaik dari Tuhan Yang Maha Esa, Amin.

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, mahasiswa Mesin pada khususnya.

Surabaya, 28 Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	5
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Teori Pendukung.....	8
2.1.1 Biomasa.....	8
2.1.2 karakteristik Biomasa.....	9
2.1.2.1 Analisa <i>Ultimate dan Proximate</i>	9
2.1.3 Densitas Biomasa	10
2.1.4 Nilai Kalor Biomasa.....	11
2.2 Pelet MSW (<i>Municipal Solid Waste</i>)	13
2.3 Gasifikasi.....	14
2.3.1 Definisi.....	14
2.3.2 Media Gasifikasi	15
2.3.3 Proses Gasifikasi	16
2.3.4 Produk Gasifikasi Biomasa	20
2.4 Komponen Gasifikasi	21
2.4.1 Reaktor	21

2.5 Faktor yang Mempengaruhi Proses Gasifikasi	24
2.5.1 <i>Properties</i> Biomasa	24
2.5.2 Udara Pembakaran	26
2.5.3 Rasio Bahan Bakar udara (AFR).....	26
2.5.4 Suhu Reaktor Gasifikasi.....	27
2.5.5 Nilai LHV (<i>Low Heating Value</i>).....	28
2.5.6 Parameter Performa.....	28
2.6 Penelitian Terdahulu	30
2.6.1 Downdraft Gasifier.....	30

BAB III METODOLOGI

3.1 Metode Penelitian	34
3.2 Bahan Uji.....	36
3.2.1 Pelet MSW	36
3.3 Alat Uji.....	37
3.4 Alat Ukur	40
3.5 Prosedur Pengujian	44
3.6 <i>Flowchart</i> Penelitian	47

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Pelet MSW	50
4.2 Data Dan Analisis Hasil Gasifikasi.....	52
4.2.1 <i>Air Fuel Ratio</i> (AFR).....	52
4.2.1.1 Aalisa perhitungan m udara (100 %).....	54
4.2.1.2 Aalisa perhitungan m bahan bakat.....	54
4.2.1.3 Aalisa perhitungan AFR (100 %).....	55
4.2.2 Analisa distribusi temperatur.....	58
4.2.2.1 AFR= 0,78 dengan <i>duty cycle</i> 85 %.....	58
4.2.2.2 AFR= 1,08 dengan <i>duty cycle</i> 90 %.....	60
4.2.2.3 AFR= 1,12 dengan <i>duty cycle</i> 95 %.....	61
4.2.2.4 AFR= 1,12 dengan <i>duty cycle</i> 100 %.....	62

4.3 Analisis komposisi kandungan <i>syngas</i>	65
4.4 Analisis ditinjau dari LHV <i>syngas</i> ...	67
4.5 Analisa laju alir massa <i>syngas</i>	70
4.6 Efisiensi Gasifikasi ...	71
4.7 Analisis Perbandingan penelitian terdahulu ...	73
4.8 Analisis kesetimbangan massa (<i>mass balance</i>) ...	76
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	79
5.2 Saran	80
DAFTAR PUSTAKA	82
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Analisa <i>Ultimate</i> dan <i>Proximate</i>	10
Gambar 2.2	Pellet MSW	14
Gambar 2.3	Tahapan dalam Proses Gasifikasi.	17
Gambar 2.4	Pengaruh Proses Suhu pada <i>Syngas</i>	20
Gambar 2.5	Reaktor <i>Fixed Bed</i> : (a) <i>Updraft</i> (b) <i>Downdraft</i> ..	23
Gambar 2.6	Reaktor <i>Downdraft</i>	23
Gambar 2.7	Pengaruh suhu pada karakteristik <i>syngas</i>	28
Gambar 2.8	Profil Grafik air-fuel ratio (AFR) vs (a) Efisiensi gasifikasi, (b) LHV, (c) Kandungan synthetic gas	31
Gambar 2.9	Skema Pengujian Biomasa.....	31
Gambar 2.10	Grafik Pengaruh tingkat suhu reaktor terhadap produksi gas	32
Gambar 3.1	Skema Instalasi proses Gasifikasi	37
Gambar 3.2	Dimensi Reaktor Gasifikasi <i>Downdraft</i>	38
Gambar 3.3	(a). <i>Blower</i> (b). <i>Induced Fan</i>	39
Gambar 3.4	(a) <i>Cyclone</i> (b) <i>Water Scruber</i>	39
Gambar 3.5	<i>Dimmer</i>	40
Gambar 3.6	(a) Termometer inframerah (b) <i>Thermocouple</i>	41
Gambar 3.7	<i>Pitot Static Tube</i>	41
Gambar 3.8	<i>Stopwatch</i>	43
Gambar 3.9	<i>Gas Chromatography</i>	43
Gambar 3.10	Skema Pengujian.....	44
Gambar 3.11	<i>Flowchart</i>	48
Gambar 4.1	Pelet MSW yang digunakan dalam penelitian.	51
Gambar 4.2	Grafik hubungan antara <i>duty cycle</i> dengan laju alir massa udara	56
Gambar 4.3	Hubungan antara perubahan <i>duty cycle</i> dengan AFR	57

Gambar 4.4	Distribusi temperatur zona gasifikasi	57
Gambar 4.5	Distribusi Temperatur v ketinggian pada AFR 0,78 dengan duty cycle 85%	58
Gambar 4.6	Distribusi Temperatur v ketinggian pada AFR 1,08 dengan duty cycle 90%	60
Gambar 4.7	Distribusi Temperatur v ketinggian pada AFR 1,12 dengan duty cycle 95%	61
Gambar 4.8	Distribusi Temperatur v ketinggian pada AFR 1,3 dengan duty cycle 100%	62
Gambar 4.9	Distribusi temperatur tiap AFR.....	64
Gambar 4.10	Skema Pengaruh m udara terhadap kenaikan temperature reaktor.....	65
Gambar 4.11	Grafik hubungan antara AFR dan komposisi <i>syngas</i>	66
Gambar 4.12	Nilai LHV <i>synthetic gas</i> pada variasi rasio udara - bahan bakar (AFR).....	69
Gambar 4.13	Grafik hubungan antara perubahan AFR dan efisiensi gasifikasi	72
Gambar 4.14	Grafik perbandingan komposisi <i>flameable gas</i> beberapa penelitian.....	73
Gambar 4.15	Grafik perbandingan nilai <i>Low Heating Value gas</i> beberapa penelitian.....	75
Gambar 4.16	GSKema Analisa kesetimbangan massa	76

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi MSW	13
Tabel 2.2 Nils Heating Value <i>gasyfing Agent</i>	16
Tabel 3.1 Tabel Variabel-variabel dalam penelitian.....	35
Tabel 4.1 Data hasil pengujian kandungan <i>Pellet</i> MSW	51
Tabel 4.2 Data laju alir massa udara melalui alat ukur <i>Pressure Transducer</i>	53
Tabel 4.3 Data laju alir massa udara dan <i>Pellet MSW</i> serta <i>Air-Fuel Ratio (AFR)</i>	55
Tabel 4.4 Komposisi kandungan <i>syngas</i> (% volume).....	65
Tabel 4.5 Nilai LHV dari senyawa gas mampu bakar	67
Tabel 4.6 Komposisi gas dan massa jenis	68
Tabel 4.7 Nilai LHV <i>syngas</i> untuk masing – masing variasi	69
Tabel 4.8 Nilai laju alir massa <i>syngas</i> untuk masing – masing variasi	70
Tabel 4.9 Efisiensi gasifikasi untuk masing-masing variasi	72
Tabel 4.10 Tabel Analisa kesetimbangan massa (<i>mass balance</i>) reaktor	77

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Minyak bumi merupakan energi fosil yang paling banyak digunakan sebagai bahan bakar di Indonesia. Dengan pemakaian energi fosil yang terus-menerus untuk berbagai macam kebutuhan energi, maka cadangan bahan bakar fosil kian lama kian menipis. Untuk jumlah penduduk Indonesia pada tahun 2015 mencapai 255.46 juta jiwa meningkat dari 252,07 juta jiwa pada tahun 2014 dengan pertumbuhan rata-rata 1,35 % per tahun padahal data pada tahun 2012 sampai dengan 2014 rata – rata pertumbuhan hanya 1,31 % per tahun (Badan Pusat Penelitian Teknologi Indonesia 2016)[1]. Hal tersebut mengakibatkan peningkatan konsumsi bahan bakar fosil yang semakin meningkat. Disamping itu, Peningkatan aktifitas manusia serta perkembangan teknologi akan membutuhkan energi yang besar serta menghasilkan limbah yang besar pula. Sehingga perlu adanya solusi untuk dapat mengurangi atau menggantikan pemakaian energi fosil yang selama ini menjadi sumber energi utama, yaitu berupa pengembangan energi alternatif (*Renewable Energy*).

Disamping permasalahan energi fosil yang kian menipis, terdapat pula masalah yang sering muncul di bagian terkecil kehidupan yaitu sampah. Sehingga diperlukan perhatian khusus terhadap permasalahan tersebut. Sampah padatan kota adalah jenis sampah umum yang mencakup sampah rumah tangga, sampah badan komersil, sampah di area-area pemukiman penduduk. Menurut Status Lingkungan Hidup Daerah (SLHD) Kota Surabaya [2], volume sampah yang masuk ke TPA sebesar 10.000 m³/hari. Timbunan sampah kota Surabaya tahun 2012 dengan jumlah rumah tangga 806.794 yaitu 1200 ton/hari. Komposisi sampah di Surabaya antara lain: sampah organik 64,1%, sampah kertas 7,58%, sampah plastik 7,69 %, logam 1,11% dan 9,46% lain-lain. Sedangkan untuk kadar air sampah di dataran tinggi pada musim hujan sekitar 43% sedangkan pada musim kemarau 35%. Dari

penjelasan tersebut, berikutnya penulis akan menyebut sampah sebagai *Municipal Solid Waste (MSW)*. Setelah dilakukan penelitian lebih lanjut, oleh para peneliti ternyata di ketahui bahwa MSW memiliki kandungan energi tertentu tergantung komposisi MSW tersebut.

Salah satu Teknologi yang memungkinkan untuk mengubah sampah menjadi energi terbarukan (*renewable energy*) adalah dengan menggunakan proses termokimia, Indarto (2016). Salah satu Cara pemanfaatan sampah perkotaan *Municipal Solid Waste (MSW)* adalah dengan menggunakannya sebagai bahan bakar pada *engine* melalui proses gasifikasi. Namun ukuran biomassa sebagai *Feedstock* proses gasifikasi juga berpengaruh semakin kecil dan rapat jarak antar biomassa akan menghasilkan syngas yang baik . Oleh karena itu pada penelitian kali ini digunakan Pellet sampah sebagai biomassa gasifikasi. Untuk nilai kalor MSW mentah adalah sekitar 1000 kcal/kg. Sementara itu nilai kalor pellet bahan bakar adalah 4000 kcal/kg. Karena pelletisasi memperkaya kandungan organik sampah melalui penghapusan bahan organik dan kelembaban (Azeus.) serta dapat meningkatkan *HHV (Higher Heating Value)* dan kadar air (*moisture content*) pada bahan baku tersebut, (Nyakoma, 2016) [7].

Gasifikasi sangat tepat bila digunakan pada proses pengolahan *MSW* menjadi energi. Hal utama yang menjadikannya sangat menarik adalah karena gasifikasi dapat mengkonversikan *MSW* ataupun bahan bakar bernilai rendah, menjadi bahan kimia bernilai tinggi, (Basu, 2013) [8]. Selain itu bila dibandingkan dengan penggunaan *syngas* pada pembangkit tenaga dengan siklus *Rankine*, terdapat potensi efisiensi konversi yang lebih tinggi bila *syngas* dipergunakan pada motor bakar torak ataupun turbin gas, bahkan lebih baik lagi bila gasifikasi yang diintegrasikan dengan siklus kombinasi (Arena, 2012). Sudarmanta (2015) telah melakukan penelitian unjuk kerja mesin *diesel dual fuel* dengan menggunakan bahan bakar *biodiesel* dan *syngas*, dari penelitian tersebut diperoleh hasil bahwa penggunaan *syngas* dapat mengurangi pemakaian bahan bakar *diesel* hingga 60%. Dari hal-hal yang telah disebutkan diatas maka sangatlah beralasan untuk

memanfaatkan *syngas* sebagai bahan bakar motor pembakaran dalam yang dapat menghasilkan daya kerja untuk kepentingan lebih lanjut.

Dalam Proses gasifikasi, Pengaturan jumlah udara yang masuk dalam reaktor menjadi salah satu kunci dari pengendalian komposisi dan jumlah *syngas* (Reed dan Das, 1988). Bila reaktor gasifikasi digunakan pada kondisi biomassa dengan karakteristik yang berubah-ubah, maka dapat menimbulkan potensi perubahan suhu pada proses gasifikasi sehingga komposisi *syngas* nya pun berubah.

Pada penelitian ini Reaktor yang digunakan untuk proses gasifikasi adalah reaktor tipe *downdraft*, karena dari kandungan tar yang dihasilkan lebih rendah pada kisaran 0,015-3.0 g/Nm³, konversi karbon yang tinggi, seperti terlihat pada (Molio.Antonio dkk, 2015). [16]. Proses gasifikasi dengan menggunakan reaktor gasifikasi memiliki beberapa parameter operasional. Suhu adalah salah satu parameter operasional yang penting pada proses gasifikasi karena jumlah dan komposisi dari gas yang diproduksi sangat dipengaruhi oleh suhu demikian juga kandungan tar didalam *syngas*. Untuk reaktor gasifikasi dengan tipe *fixed bed downdraft* suhu proses gasifikasi berkisar 600° C hingga 800° C (Reed dan Das, 1988). Sumber energi panas yang dibutuhkan pada proses gasifikasi berasal dari oksidasi/pembakaran parsial (*partial combustion*) pada biomassa setelah melalui proses pirolisis. Pembakaran parsial ini terjadi karena jumlah oksigen yang digunakan kurang dari jumlah oksigen yang diperlukan untuk pembakaran sempurna, atau dalam kata lain pembakaran parsial ini adalah pembakaran yang tidak sempurna. Pada pembakaran parsial ini jumlah oksigen sangat berpengaruh pada temperatur, semakin besar jumlah oksigen maka temperatur akan semakin meningkat. Oleh karena itu pada reaktor gasifikasi untuk mengatur suhu proses gasifikasi salah satu langkahnya adalah dengan cara mengatur jumlah udara yang masuk dalam reaktor. Gasifikasi adalah suatu proses perubahan bahan bakar padat secara termokimia menjadi gas, di mana udara yang diperlukan lebih

rendah dari udara yang digunakan untuk proses pembakaran, Suyitno[5]. Gas tersebut atau biasa disebut syngas mempunyai sifat mudah terbakar yang kemudian dapat digunakan sebagai bahan bakar pada motor pembakaran. Contoh penelitian syngas hasil biomassa dari serbuk kayu yang dilakukan oleh Kahardiyansyah[6] dengan sistem batch menunjukkan bahwa gas hasil gasifikasi mengandung unsur $\text{CH}_4=1,81$ % weight, $\text{H}_2 = 5,34$ % weight, $\text{O}_2 = 12,79$ % weight, $\text{N}_2= 49,26$ % weight, $\text{CO}_2=11,23$ % weight, $\text{CO}=19,57$ % weight. Lower heating value (LHV) serbuk kayu sebesar 9262,96 KJ/kg.

Parameter performansi lain pada proses gasifikasi adalah efisiensi gas dingin (*cold gas efficiency*), laju produksi gas (SGR), LHV *syngas*, dan kandungan tar. Dalam proses gasifikasi, salah satu parameter yang mempengaruhi yaitu *Air Fuel Ratio* (AFR) . Dari penelitian Sudarmanta[3], dengan umpan tongkol jagung dan melakukan variasi terhadap AFR (air fuel ratio) menunjukkan bahwa proses pembakaran dengan rasio perbandingan udara dan bahan bakar yang paling optimal adalah 1,05. Dari penelitian tersebut juga didapatkan hasil syngas dengan komposisi $\text{H}_2 = 13,29$ %, $\text{CO}_2 = 8,33$ %, $\text{CO} = 10,52$ %, $\text{CH}_4 = 1,4$ %, dan $\text{C}_2\text{H}_6 = 0,08$ % dengan nilai kalor bawah sebesar 2642,88 kJ/kg. Sedangkan dari penelitian sebelumnya oleh Ardianto[4], batas bawah dan atas AFR (air fuel ratio) yang digunakan berada dalam range 0,70 – 1,24. Berdasarkan uraian tersebut diketahui bahwa pasokan udara sangat dominan mempengaruhi kinerja dari proses gasifikasi, sehingga pada penelitian ini kami ingin mengetahui pengaruh perubahan pasokan udara terhadap performansi gasifikasi sistem kontinu yang ditunjukkan dengan Distribusi temperatur gasifikasi pada tiap tiap zona, Komposisi syngas, Nilai Kalor Bawah (LHV), serta efisiensi Gasifikasi dengan pengumpanan biomasa yang tetap yaitu pellet MSW.

1.2 Rumusan Masalah

Dalam penelitian ini, Permasalahan dirumuskan sebagai berikut:

Bagaimana Pengaruh perubahan pasokan udara yang diindikasikan sebagai *Air Fuel Ratio* (AFR) terhadap pellet MSW yang di lakukan secara kontinyu (cara memasukan biomasa ke reaktor) pada *Gasifier* tipe *Downdraft* yang dapat ditunjukkan dengan parameter performansi gasifikasi antara lain: Distribusi tempertaur tiap tiap zona gasifikasi (*drying, Pyrolysis, Oksidasi Partial Oxidation, Reduction*), Komposisi dan properti fisik biomasa , serta Parameter Unjuk Kerja reaktor gasifikasi yang meliputi : Komposisi *Syngas*, Nilai Kalor *Syngas*, efisiensi gasifikasi (*Cold gas efficiency*)

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian dan Pembahasan Tugas Akhir ini akan dilakukan secara eksperimental dengan menggunakan reaktor gasifikasi tipe *downdraft* yang ada pada laboratorium Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya
2. Bahan baku (*feedstock*) yang digunakan adalah MSW berbentuk pelet yang dikondisikan memiliki komposisi 60% bahan organik dan 40% bahan anorganik
3. Pada Penelitian ini tidak dibahas mengenai perpindahan panas secara radiasi dikarenakan kondisi reaktor dikondisikan terisolasi.

1.4 Tujuan Pernelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Untuk mendapatkan nilai pasokan udara terbaik terhadap unjuk kerja gasifikasi dengan pengumpanan MSW berbentuk pelet yang tetap sistem kontinyu.
2. Untuk mendapatkan besaran suhu pada zona-zona gasifikasi yang terdiri dari zona *drying, Pyrolysis, Oksidasi Parsial* dan reduksi.
3. Pada Penelitian ini tidak dibahas mengenai perpindahan panas secara radiasi dikarenakan kondisi reaktor dikondisikan terisolasi.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Sebagai sumber energi alternatif pengganti bahan bakar fosil yang semakin langka.
2. Membantu menyelesaikan permasalahan sampah perkotaan (MSW) yang semakin sulit diatasi.
3. Hasil penelitian dapat dipergunakan untuk penelitian lanjutan dalam pengembangan gasifikasi dari pellet MSW sebagai pengganti bahan bakar konvensional.
4. Mampu mengembangkan pemikiran dalam penemuan-penemuan teknologi bahan bakar yang dapat diperbaharui untuk meningkatkan taraf hidup masyarakat.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Teori Pendukung

2.1.1. Biomassa

Biomassa secara umum adalah bahan organik yang berasal dari tumbuh tumbuhan baik secara langsung maupun tidak langsung dan dimanfaatkan sebagai energi atau bahan dalam jumlah besar (Yokayama, 2008). “Secara tidak langsung” mengacu pada produk yang diperoleh melalui peternakan dan industri makanan. Sebagai sebuah sumber daya yang terbarukan, biomassa secara kontinyu terbentuk melalui interaksi antara materi yang terkandung pada udara, air, tanah, dengan cahaya matahari dalam proses fotosintesis yang terjadi pada tumbuh-tumbuhan. Pada umumnya biomassa terdiri dari unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O) dan nitrogen (N).

Sumber-sumber umum dari biomassa berdasarkan yang telah ditulis oleh Basu (2013) adalah sebagai berikut :

- a. Pertanian dan Peternakan : biji-bijian , ampas tebu, tongkol jagung, jerami, kulit buah/biji, kotoran ternak
- b. Hutan : batang kayu, serbuk kayu sisa pengergajian.
- c. Masyarakat : sampah rumahtangga, potongan tanaman rumah
- d. Tanaman energi : kayu sengon, sawit, kelapa, kedelai
- e. Biologis : kotoran hewan, tanaman air, sampah biologis

Selain itu biomassa juga dapat dibagi menjadi dua kelompok yaitu :

- a. Biomassa murni, seperti contohnya : kayu, tanaman, daun, hasil pertanian, dan sayuran.
- b. Biomassa sampah, baik dalam bentuk padat ataupun cair, seperti contohnya : sampah rumah tangga, lumpur selokan, kotoran hewan atau manusia, gas dari TPA, dan sampah pertanian

2.1.2. Karakteristik Biomassa

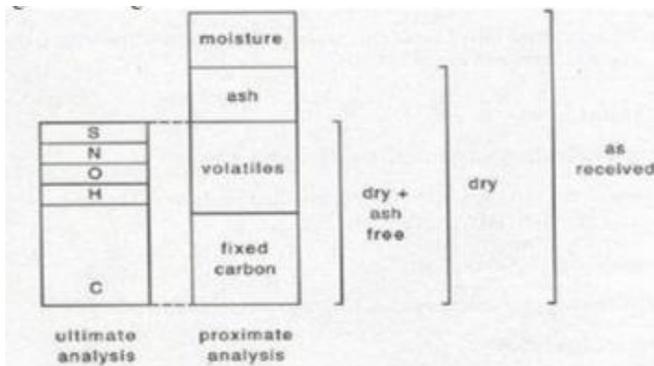
Biomassa terdiri dari campuran bahan organik yang kompleks, kandungan air, dan sejumlah kecil bahan inorganik yang bisa disebut sebagai abu. Campuran organik terdiri dari empat elemen utama : karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), dan nitrogen (N). Biomassa (semisal sampah perkotaan dan kotoran hewan) kemungkinan juga mengandung sejumlah kecil klorin (Cl) dan sulfur (S).

Desain termal dari sebuah sistem yang mempergunakan biomassa, baik sebuah reaktor gasifikasi ataupun pembakar sangat tergantung pada komposisi elemental biomasanya. Dalam konteks konversi termal seperti pembakaran, dua analisa komposisi dari biomassa berikut ini biasanya digunakan :

- a. Analisa ultimate atau analisa elemental.
- b. Analisa proximate.

2.1.2.1 Analisa Ultimate dan Proximate

Kandungan yang dimiliki biomassa mempengaruhi proses gasifikasi yang akan dilalui, 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), volatile matter (ketika dipanaskan sampai 950°C), fixed carbon, dan abu yang dimiliki oleh biomassa, sedangkan analisa ultimate menyatakan komposisi dari karbon, hidrogen, nitrogen, belerang, dan oksigen.



Gambar 2.1 Analisa *Ultimate* dan Proximate

Gambar 2.1 menjelaskan komponen yang terkandung dalam biomassa dalam analisa secara ultimate dan proximate. Untuk mendapatkan unsur yang diperlukan yaitu C, S, N, O, H maka kandungan moisture dari biomassa harus dikeluarkan terlebih dahulu, moisture yang keluar akan membentuk molekul H_2O . Proses devolatilisasi atau pengeluaran volatil dari biomassa menghasilkan unsur-unsur C, H, O dan bersama fixed carbon dari biomassa bereaksi bersama udara media gasifikasi membentuk synthetic-gas, sedangkan ash akan terbentuk sebagai sisa hasil proses. Dibandingkan dengan batubara, biomassa mempunyai kadar volatile yang lebih tinggi (sekitar 60-80%) dan kadar karbon tetap yang lebih rendah serta kadar abu yang juga lebih rendah (Suyitno, 2007) [5], sehingga dapat dikatakan biomassa lebih reaktif dibanding batubara. Pada pembakaran maupun gasifikasi, abu dari biomassa juga lebih aman karena banyak mengandung mineral seperti fosfat dan potassium. Pada temperatur operasi tidak lebih dari 950 °C atau 1000 °C, abu dari biomassa tidak menimbulkan terak.

2.1.3 Densitas Biomassa

Densitas juga merupakan salah satu parameter yang penting pada biomassa. Dari beberapa macam densitas yang ada (true density, apparent density dan bulk density) maka yang sering

digunakan untuk menilai karakter dari biomassa adalah bulk density yang merupakan massa sekumpulan biomassa dibagi volume ruang yang digunakan. Untuk menentukan bulk density dari biomassa berdasarkan standar pengukuran ASTM E-873-06 dapat dilakukan dengan mengisikan biomassa dalam kotak berukuran terstandar (305 mm x 305 mm x 305 mm) dengan cara dikucurkan dari ketinggian 610 mm. Kemudian kotak tersebut dijatuhkan dari ketinggian 150mm sebanyak 3 kali untuk pemadatan, kemudian ditambahkan lagi biomassa hingga penuh. Massa akhir dari biomassa dibagi dengan volume kotak merupakan bulk density dari biomassa.

2.1.4 Nilai Kalor Biomassa

Merupakan salah satu properti yang penting pada proses konversi energi dari biomassa. Dibandingkan dengan bahan bakar fosil, nilai kalor biomassa sangat rendah, terutama bila dihitung berdasarkan volumenya, karena densitas dari biomassa sangat rendah dan tingginya kandungan oksigen dalam biomassa. Nilai kalor merupakan suatu angka yang menyatakan jumlah energi panas (kalor) yang dilepaskan bahan bakar pada waktu 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. Ditinjau dari nilai kalor bahan bakar dibedakan atas :

- a. Nilai Kalor Atas atau *High Heating Value* (HHV)
nilai kalor yang diperoleh dari pembakaran 1 kg bahan bakar dengan memperhitungkan panas kondensasi uap (air yang dihasilkan dari pembakaran berada dalam wujud cair) atau energi yang dihasilkan oleh sejumlah massa atau volume biomassa yang dibakar (Basu, 2013). Energi yang dihasilkan termasuk juga energi yang digunakan sebagai panas laten penguapan kandungan air. Reed dan Das (1988, hal 13) menuliskan dalam tabel, beberapa Nilai Kalor Panas dari biomassa, dapat dilihat salah satunya adalah sampah

padat perkotaan (MSW) yang memiliki Nilai Kalor Panas 19,83 kJ/g.

- b. Nilai Kalor Bawah atau *Low Heating Value* (LHV) 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) atau besarnya energi yang dikeluarkan saat pembakaran sempurna biomassa tanpa mengikutsertakan besarnya energi yang digunakan untuk menguapkan kandungan air.

Harga nilai kalor baik HHV dan LHV dapat diperoleh dengan cara berikut :

1. Mengambil harga nilai kalor dari literatur yang ada.
2. Menghitung nilai kalor bahan bakar dengan menggunakan rumus Dulong dan Petit. Rumus dulong dan Petit menurut (2) yaitu :

$$\text{➤ Nilai Kalor Atas : } 349,1C + 1178,3H + 100,5S - 103,4O - 15,1N - 21,1 \text{ ASH kJ/Kg} \quad (2.1)$$

Dimana C, H, S, O, N, dan ASH adalah persentase berat dari karbon, hidrogen, sulfur, oksigen, nitrogen, dan abu yang diperoleh dari analisa ultimate dalam kondisi dry basis. Persamaan empiris diatas dapat digunakan bila :
 $0\% < C < 92\%$; $0,43\% < H < 25\%$; $0\% < O < 50\%$; $0\% < N < 5,6\%$; $0\% < \text{abu} < 71\%$;
 $4745 \text{ kJ/kg} < \text{HHV} < 55,345 \text{ kJ/kg}$

- $$\text{➤ Hubungan antara Nilai Kalor Atas dan Nilai Kalor Bawah adalah sebagai berikut :}$$

$$\text{Nilai Kalor Bawah} = \text{Nilai Kalor Atas} - \text{hfg}(9H/100 - M/100) \quad (2.2)$$

Dimana H dan M adalah persentase dari hidrogen dan kelembaban dari biomassa pada kondisi as receive. dan hfg adalah panas laten dari uap air dengan satuan yang sama dengan Nilai Kalor Atas.

Panas laten dari penguapan air bila menggunakan referensi suhu penguapan 100°C adalah 2260 kJ/kg.

2.2. Pellet *Municipal Solid Waste*

MSW (*Municipal Solid Waste*) 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, dll) dan anorganik (sampah plastik yang sebagian besar berupa plastik *Polypropylene*) (indarto). Jumlah MSW dipengaruhi oleh proses urbanisasi (Shweta dan Somnath 2015). Setiap jenis sampah memiliki fraksi massa dan volume yang berbeda-beda seperti pada tabel berikut :

Tabel 2.1 Komposisi MSW

Component	Mass Fraction (%)	Volume Fraction (%)
Organic matter	35.58	44.51
Food waste	22.58	11.75
Paper	13.67	14.24
Recyclable plastic	7.06	15.30
Non recyclable Plastic	5.69	4.91
Glass	3.19	2.58
Metal	3.31	1.61
Textile	1.94	0.92
Rubber	0.68	0.36
Styrofoam	0.25	0.83
Electronic waste	0.56	0.4
Others	5.49	2.59

Dari Tabel 2.1 di atas dapat diamati prosentase kandungan unsur-unsur yang terdapat dalam biomassa secara fisik maupun kimiawi. Kandungan karbon dan oksigen menunjukkan jumlah yang cukup dominan, unsur-unsur ini menjadi komponen utama dalam reaksi pembentukan syn-gas. Kandungan C dan H yang cukup tinggi mampu menghasilkan nilai kalor gas yang cukup potensial untuk dimanfaatkan. Kandungan moisture briket MSW yang relatif rendah tidak membutuhkan energi yang terlalu besar untuk menghilangkannya. 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 H_2 (*flammable component*), namun untuk menjaga proses produksi H_2 dibutuhkan energi yang cukup besar dari proses eksoterm, dimana dalam proses eksoterm menghasilkan CO_2 yang bersifat tidak bisa terbakar. Energi hasil proses eksoterm yang terambil pada produksi H_2 dari moisture justru mengurangi energi yang diperlukan pada proses produksi H_2 dan CO yang flammable dari reaksi endoterm, sehingga hal itu cukup merugikan. Nilai kalor yang dimiliki briket MSW cukup tinggi membuat proses gasifikasi mampu tercapai dengan mudah.

MSW yang akan digunakan sebagai bahan baku untuk proses gasifikasi biasanya dirubah terlebih dahulu menjadi bentuk pelet. Hal ini didasarkan untuk meningkatkan nilai kalor terendah (LHV) dari MSW tersebut. Gambar 2.1 merupakan salah satu contoh bentuk pellet MSW.



Gambar 2.2 Pellet MSW

2.3. Gasifikasi

2.3.1. Definisi

Gasifikasi adalah suatu teknologi proses konversi biomassa yang mengandung karbon (baik padat maupun cair) menjadi gas yang memiliki nilai bakar dengan cara oksidasi parsial pada temperatur tinggi. Gas yang dimaksud adalah gas-gas yang keluar dari proses gasifikasi dan umumnya berbentuk CO , CO_2 , N_2 , O_2 , H_2 , dan CH_4 . Gasifikasi dengan bahan baku biomassa padat ini terjadi pada kondisi yang terisolasi dari udara sekitar (oksigen terbatas), berada pada tekanan yang relatif terhadap tekanan ambient. Gas

produk dari gasifikasi ini dinamakan Syngas atau Synthetic Gas. Nilai kalori dari gas hasil proses ini berkisar antara 1000 – 1200 kcal.Nm³ (Husein, 2005)[10].

2.3.2. Media Gasifikasi

Media gasifikasi akan bereaksi dengan karbon padat dan zat hidrokarbon yang lebih berat untuk mengkonversinya menjadi gas dengan massa molekul yang ringan seperti CO dan H₂. Media utama yang digunakan pada proses gasifikasi adalah sebagai berikut :

- Oksigen
- Uap air
- Udara

Oksigen merupakan media gasifikasi yang paling dikenal, kegunaan utamanya adalah untuk pembakaran sebagian pada reaktor gasifikasi. Oksigen dapat disuplai dalam reaktor gasifikasi baik dalam bentuk murni ataupun dalam bentuk udara. Nilai kalor dan komposisi dari gas yang dihasilkan dari reaktor gasifikasi merupakan fungsi kuat dari kondisi dan jumlah dari media gasifikasi. Bila media gasifikasi memiliki kandungan oksigen yang rendah maka CO akan terbentuk dan bila kandungan oksigen tinggi maka akan terbentuk CO₂. Bila jumlah oksigen melebihi jumlah oksigen tertentu (kondisi stoikiometris) maka proses akan berubah menjadi proses pembakaran yang akan menghasilkan flue gas. Selain itu jumlah oksigen yang tinggi juga mengurangi jumlah kandungan hidrogen yang dihasilkan dan memperbanyak campuran yang berbasis karbon dalam gas yang dihasilkan. Bila uap air digunakan sebagai media gasifikasi maka kandungan hidrogen dalam gas yang dihasilkan akan meningkat sehingga perbandingan antara hidrogen dan karbon (H/C) dalam gas akan meningkat. Pemilihan media gasifikasi juga mempengaruhi nilai kalor dari gas yang dihasilkan. Sebagai contoh, bila udara yang digunakan sebagai media gasifikasi maka nitrogen dalam udara akan mempengaruhi gas yang dihasilkan dan mengurangi nilai kalornya. Udara sebagai media gasifikasi menghasilkan gas dengan nilai kalor terendah

(sekitar 4-7 MJ/Nm³) dibandingkan dengan media gasifikasi uap dan oksigen, seperti yang ditabelkan oleh Basu (2013, hal 119).

Tabel 2.2 Nilai Heating value *gasifying agent*

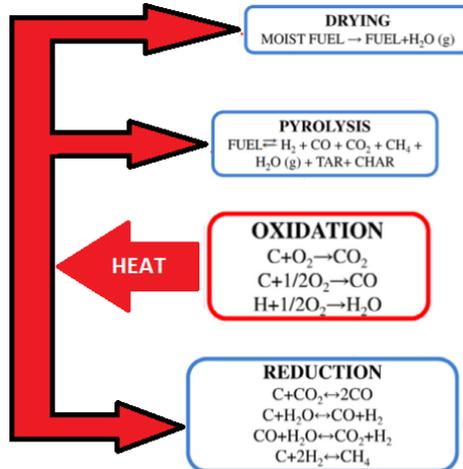
Heating Values for Product Gas Based on Gasifying Medium	
Medium	Heating Value (MJ/Nm ³)
Air	4-7
Steam	10-18
Oxygen	12-28

2.3.3. Proses Gasifikasi

Reaksi utama gasifikasi adalah endotermik dan energi yang diperlukan untuk terjadinya proses tersebut, umumnya, didapat dari proses oksidasi yang merupakan bagian dari biomassa, melalui fase allothermal atau autothermal. Dalam proses auto-termal, Gasifier dipanaskan secara internal melalui pembakaran parsial, sementara dalam proses allo-termal energi yang dibutuhkan untuk gasifikasi disuplai secara eksternal. Mengingat sistem auto-termal, gasifikasi dapat dilihat sebagai urutan dari beberapa tahapan. Langkah-langkah utama dari proses gasifikasi adalah:

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

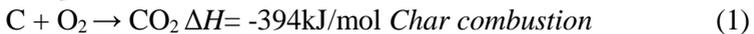
Langkah tambahan, yang terdiri dari dekomposisi tar, dapat juga termasuk dalam rangka untuk menjelaskan pembentukan hidrokarbon ringan karena dekomposisi molekul tar besar. Pada gambar 2.3 diperlihatkan sebuah representasi skematis dari proses gasifikasi:



Gambar 2.3 Tahapan dalam Proses Gasifikasi

a. Oksidasi

Terjadi pada suhu $> 900\text{ }^\circ\text{C}$ Oksidasi dilakukan dalam kondisi kekurangan oksigen sehubungan dengan rasio stoikiometri untuk mengoksidasi hanya sebagian dari bahan bakar. dengan memanfaatkan *supply* O_2 terbatas pada reaktor dan melepas sejumlah panas. Panas ini digunakan untuk memecah Hidrokarbon hasil pirolisis serta untuk mengatasi kebutuhan panas proses reduksi. Reaksi yang berlangsung selama fase oksidasi adalah sebagai berikut:



Produk utama berupa energi panas yang sangat diperlukan untuk seluruh proses, sedangkan produk pembakaran merupakan campuran gas CO , CO_2 , dan H_2O . Dalam campuran ini nitrogen dapat hadir jika oksidasi biomassa dilakukan dengan udara. Dari reaksi tersebut terdapat ΔH yang merupakan Delta atau perbedaan harga Entalpi dari tiap proses. ΔH dirumuskan dengan $H_{\text{produk}} -$

H_{reaktan} , misal pada reaksi *Partial oksidation* H_{produk} diperoleh dari CO (Carbon Monoksida) dan H_{reaktan} diperoleh dari C dan O_2 dan mengalami proses eksotermal (menghasilkan panas sebesar 111 kJ/mol)

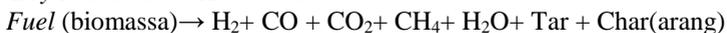
b. *Drying* / Pengerinan

Proses *Drying* terletak antara range suhu 100 – 300 °C yang bersifat endoterm (menyerap panas). Pengerinan terdiri atas penguapan uap air yang terkandung dalam bahan baku. Jumlah panas yang dibutuhkan dalam tahap ini sebanding dengan kadar kelembabannya. Pengerinan dapat dianggap lengkap ketika suhu biomassa 150 °C dicapai (Hamelinck et al). Proses pengerinan ini sangat penting dilakukan agar pengapian pada burner dapat terjadi lebih cepat dan lebih stabil. Pada reaksi ini, bahan bakar yang mengandung air akan dihilangkan dengan cara diuapkan dan dibutuhkan energi sekitar 2260 kJ untuk melakukan proses tersebut sehingga cukup menyita waktu operasi. (*Moist Feedstock* + *Heat* >> *Dry Feedstock* + H_2O)

c. *Pirolisis*

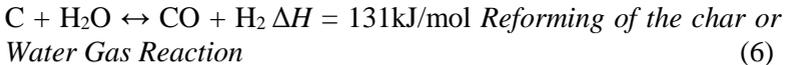
Merupakan fase dekomposisi termokimia dari bahan matriks karbon; khususnya, *cracking* ikatan kimia berlangsung dengan pembentukan molekul dengan berat molekul rendah.. Fraksi padat, yang bisa berkisar dari 5-10% berat untuk gasifikasi fluidized bed. fraksi ini termasuk bahan lembam yang terkandung dalam biomassa dalam bentuk abu dan sebagian kecil kandungan karbon yang tinggi, yang disebut "char". Fraksi cairan, biasanya disebut "tar".

Reaksi pirolisis berlangsung dengan suhu di kisaran 300-900 °C. termasuk dalam kondisi endotermik, seperti pada langkah pengerinan, panas yang dibutuhkan berasal dari tahap proses oksidasi. Skematik proses pirolisis dapat dilihat pada keseluruhan reaksi berikut:



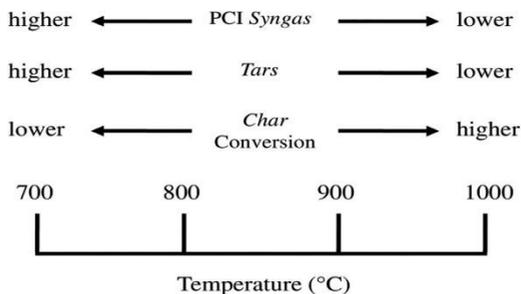
d. *Reduksi*

Proses Reduksi terjadi pada kisaran suhu 400-900 °C Langkah reduksi melibatkan semua produk dari tahap sebelumnya dari pirolisis dan oksidasi; campuran gas dan arang bereaksi satu sama lain sehingga pembentukan akhir berupa *syngas*. Reaksi utama yang terjadi pada langkah reduksi adalah:



Reaksi (5 dan 6) adalah endotermik, sementara reaksi (7 dan 8) adalah eksotermik; Namun, kontribusi kedua Boudouard Reaction (5) dan reformasi arang (6) membuat langkah reduksi endotermik, dan kemudian seluruh langkah membutuhkan energi dari reaksi oksidasi. Reaksi (5-8) adalah reaksi kesetimbangan kimia seperti yang didefinisikan oleh hukum kesetimbangan termodinamika. Secara umum, dapat dinyatakan bahwa Reaksi endotermik (5 dan 6) lebih diunggulkan (kondisi keseimbangan bergeser ke arah pembentukan produk) saat suhu meningkat, sementara Reaksi (7 dan 8) diunggulkan pada suhu rendah. Suhu di mana langkah reduksi dilakukan memiliki peranan penting dalam menentukan komposisi *syngas*, dan karena itu karakteristiknya (heating value yang lebih rendah, kehadiran tar). suhu tinggi meningkatkan oksidasi char (mengurangi residu padat pada prosesnya) dan mengurangi pembentukan tar. Di sisi lain hal tersebut meningkatkan risiko abu yang melekat dan mengurangi kandungan energi dari *syngas*.

Suhu reduksi adalah parameter kunci dari proses keseluruhan, menentukan karakteristik residu padat dan dari *syngas* itu. Efek ini dirangkum dalam Gambar. 2.4



Gambar 2.4 Pengaruh proses suhu pada karakteristik *syngas*

Pengaruh suhu pada proses gasifikasi seluruhnya telah menyebabkan pengembangan beberapa solusi teknologi, masing-masing ditandai dengan komposisi *syngas* yang berbeda dan jumlah residu padat yang berbeda. Kisaran suhu khusus untuk proses gasifikasi telah dikembangkan pada skala penuh adalah 800-1100 °C, sedangkan pada proses gasifikasi yang menggunakan oksigen, suhu proses berada di kisaran 500-1600 °C

2.3.4. Produk Gasifikasi Biomassa

Produksi akhir gasifikasi biomassa untuk fase padat dan gas/uap akan sangat berbeda. Fase padat berupa abu yang terdiri dari bahan lembam yang muncul dalam bahan baku dan tidak bereaksi dengan arang. Arang yang terdapat di abu memiliki persentase yang sangat rendah dari total jumlah abu. Secara umum beratnya lebih rendah dari 1% perubahan matrik pada karbon didalam gas menjadi objek pada keseluruhan proses .

a. Gas Mampu Bakar (*Syngas*)

Gas mampu bakar atau yang lebih dikenal Gas Sintetik (*Syngas*) merupakan campuran Hidrogen dan Karbon Monoksida. Kata sintetik gas diartikan sebagai pengganti gas alam yang dalam hal ini terbuat dari gas metana. *Syngas* merupakan bahan baku yang penting untuk industri kimia dan industri pembangkit daya. Nilai LHV bahan bakar dan LHV *Syngas* dapat ditentukan dari komposisi yang terkandung dalam satuan unit massa bahan bakar dan satuan unit volume *Syngas*.

syngas (produk gas) yang dibagi lagi menjadi fase gas dan fase kondensasi. Fase gas adalah campuran gas yang berisi gas yang tidak terkondensasi pada suhu ruangan, CO, H₂, CO₂, hidrokarbon ringan, CH₄ dan beberapa C₂-C₃. Jika

udara digunakan dalam proses oksidasi pada gasifikasi, maka kandungan nitrogen (N_2) akan muncul pada fase gas tersebut. Komponen kecil seperti NH_3 dan gas asam anorganik (H_2S dan HCl dan beberapa senyawa kecil gas [182-184] (RIF)) juga muncul pada fase gas. Jumlah komponen minor tergantung pada komposisi biomassa. Jumlah *syngas* dapat berkisar di 1-3 Nm^3/kg dalam kondisi kering, dengan LHV lebih dari 4-15 MJ / Nm^3 . Nilai-nilai ini sangat dipengaruhi oleh teknologi gasifikasi yang dipilih serta variabel operasi gasifikasi. Pertimbangan tertentu diperlukan untuk fase terkondensasi, tar, karena terbuat dari beberapa senyawa organik yang sangat kental, dapat dianggap sebagai minyak bituminous. Standarisasi *European board* [21] mendefinisikan tar sebagai: "semua senyawa organik yang terdapat dalam *syngas* kecuali gas hidrokarbon dari C_1 sampai C_6 ".

2.4 Komponen Gasifikasi

2.4.1 Reaktor

Reaktor yang digunakan pada skala industri untuk mengubah biomassa menjadi gas biasanya disebut *Gasifier*, pada dasarnya *gafier* berbeda fungsi salah satunya untuk:

- (1) Cara menghubungkan antara suplai bahan baku dan agen gasifikasi
- (2) Cara dan laju perpindahan panas
- (3) Waktu yang dibutuhkan untuk memasukkan bahan ke dalam zona reaksi

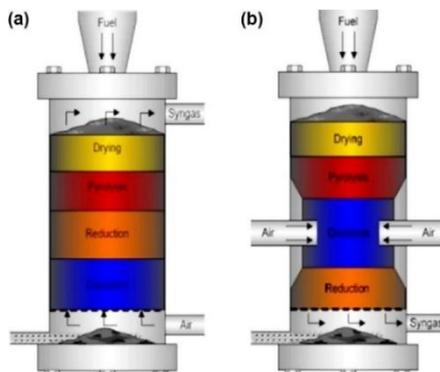
Solusi teknologi yang berbeda dapat diimplementasikan untuk mendapatkan konfigurasi pembangkit yang berbeda; khususnya, modus kontak biomassa dengan agen gasifikasi mungkin berlawanan arah, atau searah, atau berlawanan aliran, dan panas dapat ditransfer dari luar atau langsung dari dalam reaktor menggunakan agen pembakaran; waktu yang dibutuhkan dalam jam (*Gasifier* diam, *Rotary kiln*) atau dalam

menit (*Gasifier fluidized bed*). Reaktor yang digunakan dalam proses gasifikasi biomassa adalah:

1. *Fixed Bed Reaktor*

solusi teknologi utama berdasarkan reaktor *fixed-bed* adalah reaktor *updraft* dan reaktor *downdraft* (Gambar 2.8 a dan b). Pada reaktor *updraft* biomassa padat bergerak ke bawah sehubungan dengan agen gasifikasi dan kemudian *syngas* yang dihasilkan bergerak ke atas (berlawanan).

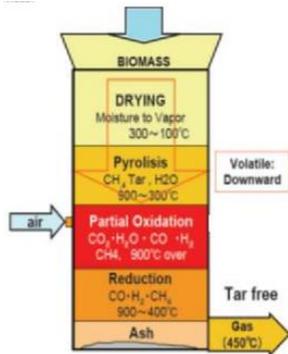
Reaktor tipe *downdraft* hampir sama dengan tipe *updraft* hanya saja letak zona oksidasi dan zona reduksi yang berbeda. Bahan bakar dalam reaktor dimasukkan dari atas dan udara dari blower dihembuskan dari samping menuju ke zona oksidasi sedangkan produk berupa *syngas* hasil pembakaran, keluar melalui burner yang terletak dibawah ruangan bahan bakar sehingga saat volume gas makin meningkat maka *syngas* mencari jalan keluar melauai daerah dengan tekanan yang lebih rendah. Sistem tersebut memiliki maksud agar *syngas* yang terbentuk akan tersaring kembali oleh bahan bakar dan melalui zona pirolisis sehingga kandungan tar dapat dikurangi. Produk pirolisis yang dihasilkan melewati zona oksidasi pada suhu tinggi. Untuk mengurangi penyumbatan gas di dalam reaktor, maka digunakan blower hisap untuk menarik *syngas* dan mengalirkan ke arah burner. Kelebihan reaktor ini mengandung sedikit tar dibandingkan tipe *updraft*. Kekurangannya yaitu tidak bisa digunakan untuk limbah biomassa dengan densitas rendah (Gumanti Humala, A, 2012).



Gambar 2.5. reaktor Fixed Bed: (a) updraft, (b) downdraft

- Reaktor Downdraft

Pada gasifikasi downdraft, arah aliran udara dan bahan baku sama-sama ke bawah. Gasifikasi jenis ini menghasilkan tar yang lebih rendah dibandingkan jenis updraft. Hal ini karena tar hasil pirolisis terbawa bersama gas dan kemudian masuk ke daerah gasifikasi dan pembakaran yang temperaturnya tinggi. Pada daerah gasifikasi dan pembakaran inilah, tar kemudian akan terurai. Hasil gas-gas dari gasifikasi sistem downdraft ini setelah disaring dan didinginkan dapat langsung dimasukkan ke dalam mesin pembakaran dalam.



Gambar 2.6 ReaktorDowndraft (Satake, 2006)[10

Gasifikasi jenis ini mempunyai beberapa kelebihan, yaitu :

1. Cocok untuk kapasitas sampai 15 MWh.
2. Umumnya spesifik untuk kualitas bahan bakar biomassa tertentu, memerlukan kadar air yang rendah, dan kadar abu yang rendah pula. Gas yang dihasilkan lebih panas dibandingkan pada sistem updraft dan hanya membutuhkan teknik pembersihan gas yang lebih sederhana.
3. Sangat cocok untuk diaplikasikan pada engine karena gas yang dihasilkan rendah tar.
4. Proses sederhana dan lebih murah.

5. Kandungan tar yang dihasilkan cukup rendah karena hingga 99,9% dari tar yang terbentuk dikonsumsi, hanya membutuhkan pembersihan tar yang minimum.

Sedangkan kekurangan dari gasifikasi downdraft adalah:

1. Membutuhkan masukan bahan baku dengan kandungan moisture yang sangat rendah.
2. Syngas hasil gasifikasi keluar reaktor pada temperatur yang sangat tinggi, sehingga membutuhkan sistem secondary heat recovery (pendinginan lanjutan)
3. 4-7% karbon yang tersisa tidak bisa diproses atau diubah ke bentuk lain.

2.5 Faktor yang Mempengaruhi Hasil Proses Gasifikasi

Kualitas *Syngas* dari proses gasifikasi ditentukan oleh kondisi dari biomass yang digunakan sebagai bahan baku serta bagaimana desain reaktor yang dilakukan. Proses gasifikasi bukanlah semata-mata proses pengkonversian biomassa cair atau padat menjadi combustible gas, banyak variabel di dalamnya yang menjadi parameter penentu kinerja reaktor, tahapan proses dan temperatur dalam reaktor atau bahkan kondisi dan komposisi gas yang dihasilkan. Beberapa parameter tersebut akan dibahas pada subbab berikut ini antara lain propertis biomassa, dan rasio bahan bakar dengan udara yang digunakan.

2.5.1 Properties Biomassa

Sesuai dengan penelitian Rajvanshi (2006)[11], sifat-sifat yang dimiliki biomassa baik secara fisik maupun kimia mampu mempengaruhi baik dari segi energi yang dihasilkan maupun heat loss-nya. Sifat tersebut antara lain :

- Kandungan Moisture

Untuk proses gasifikasi biomassa, umumnya dipilih biomassa yang memiliki kandungan moisture yang rendah. Karena kandungan moisture yang tinggi akan menyebabkan heat loss yang berlebihan dan beban pendinginan semakin tinggi karena pressure drop yang terjadi juga meningkat. Idealnya kandungan

moisture yang sesuai untuk bahan baku gasifikasi tidak lebih dari 20 %.

- **Kandungan TAR**

Tar merupakan salah satu kandungan yang paling merugikan dan harus dihindari. Tar adalah cairan hitam kental yang terbentuk dari destilasi destruktif pada material organik. Tar yang terbentuk dari batubara atau minyak bumi diperkirakan bersifat racun karena kandungan benzena di dalamnya. Apabila hasil gas yang mengandung tar relatif tinggi dipakai pada kendaraan bermotor, dapat menimbulkan deposit pada karburator dan intake valve sehingga menyebabkan gangguan. Desain gasifier yang baik setidaknya menghasilkan tar tidak lebih dari 1 g/m³.

- **Ash dan Slagging**

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

- **Dust**

Semua bahan baku gasifikasi menghasilkan *dust* (debu). Adanya *dust* ini sangat mengganggu karena berpotensi menyumbat saluran sehingga membutuhkan *maintenance* lebih. Desain gasifier yang baik setidaknya menghasilkan kandungan *dust* yang tidak lebih dari 2 – 6 g/m³.

- **Energi**

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

2.5.2 Udara Pembakaran

Reaksi kimia terjadi ketika ikatan-ikatan molekul dari reactan berpisah, kemudian atom-atom dan elektron menyusun kembali membentuk unsur-unsur pokok yang berlainan yang disebut hasil (produk). Oksidasi yang terjadi secara kontinyu pada bahan bakar menghasilkan pelepasan energi sebagai hasil dari pembakaran. Pembakaran dapat dikatakan sempurna (stoichiometric) apabila semua karbon (C) yang terkandung dalam bahan bakar diubah menjadi karbondioksida (CO_2) dan semua hidrogen diubah menjadi air (H_2O) (IrvanNurtian, 2007). Jika salah satu tidak terpenuhi, maka pembakaran tidak sempurna. Syarat terjadinya pembakaran adalah adanya oksigen (O_2). Dalam aplikasi pembakaran yang banyak terjadi, udara menyediakan oksigen yang dibutuhkan. Dua parameter yang sering digunakan untuk menentukan jumlah dari bahan bakar dan udara pada proses pembakaran adalah perbandingan udara bahan bakar. Perbandingan udara bahan bakar dapat diartikan sebagai jumlah udara dalam suatu reaksi jumlah bahan bakar. Perbandingan udara bahan bakar dari suatu pembakaran berpengaruh menentukan bagaimana komposisi produk dan juga terhadap jumlah panas yang dilepaskan selama reaksi berlangsung dan dapat ditulis dalam basis mol (molar basis) atau basis massa (mass basis).

2.5.3 Rasio Udara Bahan Bakar (AFR)

Rasio massa udara ke bahan bakar disetiap satuan pembakaran didefinisikan sebagai rasio udara bahan bakar (*air fuel ratio*/AFR). Rasio minimum udara yang benar-benar dibutuhkan bahan bakar yang cukup tepat untuk membakar bahan bakar disebut sebagai rasio stoikiometrik. Pembakaran bahan bakar membutuhkan rasio stoikiometrik minimum udara ke bahan bakar, sementara gasifikasi membutuhkan rasio udara bahan bakar lebih rendah dari rasio stoikiometri atau sering disebut semi-stoikiometri. Rasio kesetaraan (*equivalent ratio*/ER) dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara rasio udara bahan bakar dari proses gasifikasi dan rasio udara bahan bakar untuk pembakaran yang sempurna.

Equivalent ratio/ER yang tinggi akan mengakibatkan Nilai kalor bawah (*LHV*) gas menurun, Karena ER akan terkait dengan AFR dimana hal ini menyebabkan udara yang memasuki ruang bakar akan tinggi sehingga akan menyebabkan penurunan nilai kalor *flameable gas* CO, CH_4, H_2 . Disisi lain, hasil ER rendah mengakibatkan nilai kalor komposisi *flameable gas* naik sehingga Nilai Kalor Bawah gas (*LHV gas*) akan tinggi (kumar, A *et al*, 2009).

Perbandingan bahan bakar dan udara dalam proses gasifikasi mempengaruhi reaksi yang terjadi dan tentu saja pada kandungan syngas yang dihasilkan. Kebutuhan udara pada proses gasifikasi berada di antara batas konversi energi pirolisis dan pembakaran. Karena itu dibutuhkan rasio yang tepat jika menginginkan hasil syngas yang maksimal. Pada gasifikasi biomass rasio yang tepat untuk proses gasifikasi berkisar pada angka 1,00 - 1,5.

$$AFR = \text{Massa udara} : \text{Massa biomassa (bahan bakar)} \quad (2.1)$$

$$ER = AFR_{\text{aktual}} / AFR_{\text{stoikiometris}} \quad (2.2)$$

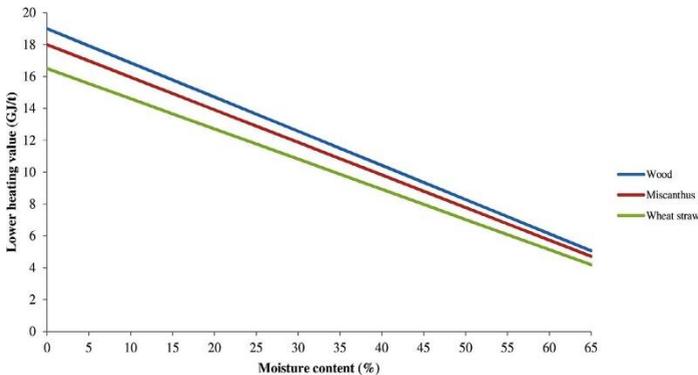
Kondisi stoikiometris teoritis biomassa diperoleh dengan mengetahui terlebih dahulu kandungan unsur kimia dari biomassa, kemudian dilakukan perhitungan persamaan reaksi yaitu reaksi oksidasi. Reed dan Dash[9] memberikan rumus kimia rata-rata dari biomassa yaitu $CH_{1,4}O_{0,6}$, sehingga bila direaksikan dengan udara akan menjadi pembakaran sempurna sebagai berikut : $CH_{1,4}O_{0,6} + 1,05O_2 + (3,95N_2) \rightarrow CO_2 + 0,7H_2O + (3,95N_2)$ (2.3)

2.5.4 Suhu Reaktor Gasifikasi

Dalam setiap langkah proses gasifikasi yang terjadi temperatur memiliki peranan penting pada masing-masing proses, sehingga dalam satu reaktor gasifikasi terdapat distribusi suhu yang dapat merepresentasikan masing-masing zona dari proses gasifikasi, beberapa faktor yang mempengaruhi distribusi tersebut adalah: komponen dan properti fisik biomassa, *Equivalen Ratio* (ER) kedua factor ini akan mempengaruhi performa gasifikasi antara lain : superficial velocity, Parameter unjuk kerja Reaktor Gasifikasi, serta kandungan TAR.

2.5.5 Nilai LHV (*Low Heating Value*)

Kadar air merupakan salah satu parameter yang paling penting dan kritis mempengaruhi keseimbangan energi dari proses gasifikasi biomassa. Gambar 2.7 menunjukkan tren *Low Heating Value* (LHV) sebagai fungsi kadar air pada beberapa jenis biomasa.



Gambar. 2.7. Pengaruh proses suhu pada karakteristik *syngas*

2.5.6 Parameter Performa

Dalam meninjau performa gasifikasi ada beberapa hal yang menjadi parameter. (Basu, P, 2010) menjelaskan bahwa parameter prestasi sistem gasifikasi dapat diukur menggunakan indikator dibawah ini (Basu, P, 2010):

a. Suhu Reaktor Gasifikasi

Dalam setiap langkah proses gasifikasi yang terjadi dalam reaktor gasifikasi selalu berhubungan erat dengan temperatur untuk masing-masing proses, sehingga dalam satu reaktor gasifikasi terdapat profil sebaran suhu yang dapat merepresentasikan masing-masing zona dari proses gasifikasi. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, bahwa suhu ini juga terkait dengan nilai *equivalence ratio*. Selain itu suhu atau profil suhu pada reaktor gasifikasi juga dipengaruhi oleh faktor parameter yang lain, seperti: properti biomassa,

superficial velocity, suhu media gasifikasi, insulator, dan yang lainnya. Pada sisi lain suhu reaktor gasifikasi menjadi penentu dari beberapa parameter unjuk kerja dari reaktor gasifikasi, seperti : tingkat keadaan abu, komposisi dan keberadaan tar pada syngas.

b. Komposisi dan Properti fisik biomassa

Pada dasarnya unjuk kerja proses gasifikasi pada reaktor gasifikasi juga sangat dipengaruhi oleh properti spesifik dari biomassa. Properti yang paling penting pada gasifikasi adalah komposisi elemen/unsur biomassa, nilai kalor, kandungan abu, kadar kelembaban, kadar *volatile mater*, unsur yang terkandung lainnya (N, S, Cl, alkali, logam berat, dan lainnya), densitas dan ukuran.

c. Parameter Unjuk Kerja Reaktor Gasifikasi

a. Komposisi *syngas*

Sama halnya dengan analisa komposisi pada biomassa, maka *syngas* juga harus dianalisa komposisi gasnya. Unsur yang ada dalam *syngas* umumnya adalah CO, CO₂, H₂, CH₄, hidrokarbon berat dan N₂. Kandungan gas tersebut ada yang bisa terbakar seperti CO, H₂ dan CH₄ serta gas yang tidak bisa terbakar seperti CO₂ dan N₂. Dari komposisi gas tersebut, nantinya dapat diperhitungkan kandungan energi dalam gas ataupun untuk meng- analisa pengoperasian dari reaktor gasifikasi. Analisa rasio antara CO dan CO₂ (CO/CO₂) adalah salah satu cara untuk mengukur kualitas dari gas dan proses gasifikasi.

b. Nilai Kalor (*LHV*) *syngas*

Jumlah kandungan energi pada syngas dapat dihitung secara teoritis dari analisa komposisinya, yaitu dengan menggunakan persamaan untuk menghitung Nilai Kalor Bawah gas (NKB_{gas}) sebagai berikut :

$$NKB_{GAS} = \sum_{i=1}^n (Y_i \cdot NKB_i) \quad (2.5)$$

Keterangan :

Y_i = Konsentrasi gas yang terbakar (CO, CH₄, H₂)

LHV_i = Nilai Kalor rendah dari gas terbakar (CO , CH_4, H_2)

c. *Cold Gas Efficiency*

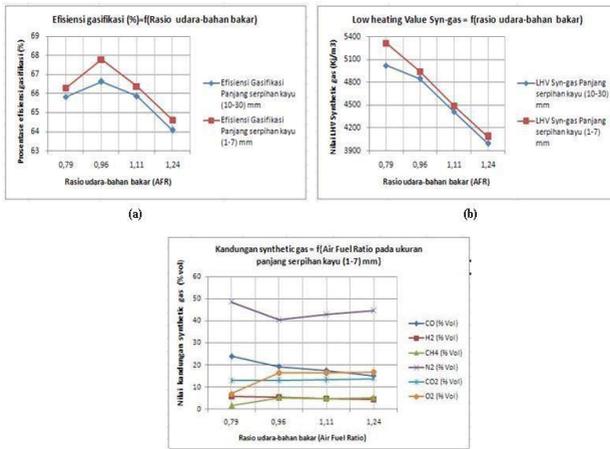
Gasifier yang efektif mampu mengkonversi biomassa yang dimasukkan dengan tambahan udara menjadi *combustible gas* yang nantinya memiliki nilai guna yang lebih tinggi untuk diaplikasikan dalam berbagai kegiatan. Bila semua proses diatas dilakukan seefisien mungkin, maka kandungan energi dari produksi gas mampu berada pada kisaran (70-80) % dari kandungan energi biomassa yang digunakan pada gasifier,. Perhitungan efisiensi menggunakan persamaan berikut :

$$\eta_{CG} = \frac{(\dot{m}_{gas} \cdot NKB_{gas})}{(\dot{m}_{biomassa} \cdot NKB_{biomassa})} \quad (2.6)$$

2.6 Penelitian Terdahul

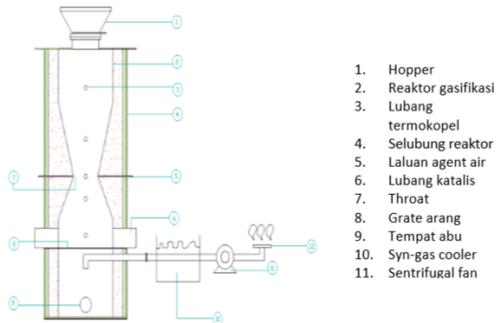
2.6.1 *Downdraft Gasifier*

Ardianto (2011) telah melakukan serangkaian eksperimen untuk meneliti karakter gasifikasi pada reaktor gasifikasi downdraft dengan variasi pada air-fuel ratio dan ukuran serpihan kayu, yang memberikan hasil bahwa berdasar data penelitian terlihat bahwa peningkatan AFR menghasilkan penurunan yang signifikan pada komposisi dan energi pada *syngas* serta menurunkan juga efisiensi gasifikasi, sehingga disimpulkan bahwa nilai AFR merupakan pembatas parameter operasional dari reaktor gasifikasi, sehingga bila pasokan udara sebagai media gasifikasi terlalu banyak maka AFR akan meningkat dan menghasilkan hal-hal yang telah disebutkan diatas. Hasil penelitian tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.8.



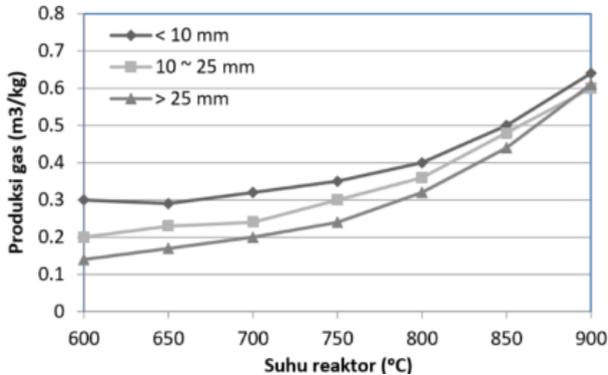
Gambar 2.8 Grafik air-fuel ratio (AFR) vs (a) Efisiensi gasifikasi, (b) LHV, (c) Kandungan synthetic gas. (Ardianto, 2011)

Penelitian yang dilakukan oleh Sudarmanta [15] Penelitian Sudarmanta selanjutnya mengenai pengaruh suhu reaktor dan ukuran partikel biomassa limbah kayu terhadap karakter syngas yang dihasilkan. Penelitian variasi suhu reaktor dilakukan pada rentang 600 – 900 °C. sedangkan rentang ukuran partikel biomassa pada >10 mm, 10-25 mm, dan >25 mm.



Gambar 2.9 Skema Pengujian Biomassa

Dengan variasi peningkatan suhu reaktor dapat meningkatkan kualitas produksi syngas (H_2 , CO , CH_4). Dengan variasi ukuran partikel syngas, juga menunjukkan semakin kecil ukuran partikel dapat meningkatkan produksi gas. Hal tersebut dapat dilihat pada grafik di bawah ini.



Gambar 2.10 Grafik pengaruh tingkat suhu reaktor terhadap produksi gas

Secara kuantitatif, karakterisasi biomassa limbah kayu menghasilkan nilai kalor bawah sebesar 14,45 MJ/kg. Perhitungan efisiensi gasifikasi pada kondisi terbaik bisa mencapai 34,20%, dengan komposisi syngas sebagai berikut: $H_2 = 14,20\%$, $CO_2 = 8,32\%$, $CO = 10,42\%$, $CH_4 = 1,54\%$, dan $C_2H_6 = 0,18\%$ dengan nilai kalor bawah sebesar 3246,80 KJ/kg.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI

3.1 Metode Penelitian

Pengujian dilakukan dengan metode eksperimental untuk mengetahui gas yang dihasilkan dari proses gasifikasi (Syn-gas) dengan metode gasifikasi downdraft berbahan baku Pellet sampah. Pengujian dilakukan dengan menggunakan sistem kontinyu, artinya pengamatan dilakukan dengan pemasukan biomassa secara terus menerus. Dalam pengujian ini, dilakukan variasi dimmer di blower centrifugal pada udara media gasifikasi yang masuk melalui pipa throat reaktor, kemudian diamati bagaimana proses distribusi temperatur yang terjadi di dalam reaktor selama operasi dari awal hingga biomassa habis, agar dapat menghasilkan gas yang flammable dan stabil. Data-data yang dicatat berupa: laju alir massa udara, laju alir massa syn-gas, temperatur di dalam reaktor, temperatur dinding reaktor, dan komposisi yang terkandung di dalam syn-gas. Eksperimen akan dilakukan dengan metode Kontinyu, yaitu dilakukan dengan beberapa pengisian briket MSW dalam reaktor dan seluruh data diambil hingga ketinggian briket MSW mencapai batas bawah yang telah ditentukan sebelumnya. Pada eksperimen pertama akan dilakukan perubahan laju alir massa udara dengan mengatur putaran motor blower udara. Pengaturan putaran blower udara dilakukan dengan pengaturan duty cycle arus listrik motor penggerak blower. Laju alir massa udara akan mengalami 4 kali perubahan, dengan laju alir massa udara yang menghasilkan AFR kurang dari 1,5.

Eksperimen bertujuan untuk memperoleh karakteristik proses gasifikasi pellet MSW dan juga untuk mempersiapkan data yang nantinya akan digunakan untuk pengaturan sistem otomatis pengendalian suhu reaktor gasifikasi pada eksperimen selanjutnya. Untuk perhitungan-perhitungan efisiensi energi gasifikasi diperlukan analisa nilai kalor pada pellet MSW yang akan dilakukan di Laboratorium Pusat Studi Energi dan Rekayasa LPPM ITS. Dari Eksperimen akan didapatkan data sebagai berikut :

1. Data laju masa alir udara (\dot{m}_{udara})
2. Data suhu pada masing-masing *thermocouple*
3. Data komposisi dan nilai kalor dari *Syngas* (LHV_{Syngas})
4. Data laju alir masa *Syngas* (\dot{m}_{Syngas})
5. Data laju alir massa MSW (\dot{m}_{MSW})

Berdasarkan data-data diatas akan dilakukan perhitungan air-fuel ratio (AFR), nilai kalor dari syngas , dan efisiensi gasifikasi/cold gas efficiency (η_{CG}). Data hasil eksperimen akan ditabelkan dan diolah menjadi grafik dan dianalisa untuk pengambilan kesimpulan.

Tabel 3.1 Tabel variable-variabel dalam Penelitian

	Variabel tetap	Variabel Berubah	Variabel Terukur	Variabel Terhitung	Visualisasi
Parameter Operasional Reaktor Gasifikasi	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensi Reaktor • Suhu Udara • Laju alir massa biomassa • Putaran suction pump 	<ul style="list-style-type: none"> • Laju alir massa udara 	<ul style="list-style-type: none"> • Laju alir massa udara • Suhu pada reaktor (7 titik) • Waktu Operasi 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Air Fuel Ratio</i> (AFR) 	
Parameter unjuk kerja reaktor gasifikasi			<ul style="list-style-type: none"> • Laju air massa <i>syngas</i> • Nilai Kalor MSW • Suhu <i>syngas yang</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Nilai Kalor <i>syngas</i> • Efisiensi Gasifikasi 	<ul style="list-style-type: none"> • Nyala api <i>syngas</i>

			<i>keluar dari reactor</i> <ul style="list-style-type: none"> • Suhu syngas yang keluar dari Sucton pump 		
--	--	--	---	--	--

3.2 Bahan Uji

3.2.1 Pellet MSW

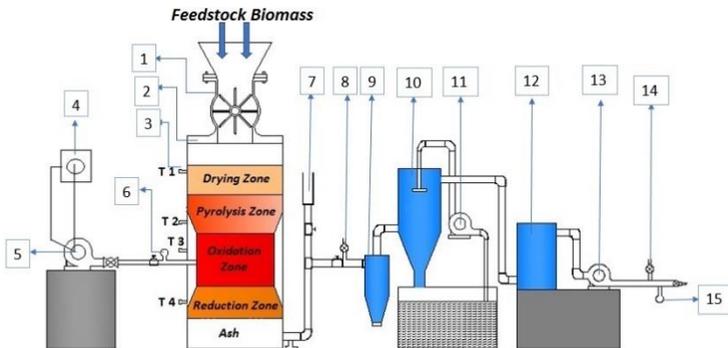
Bahan biomassa yang akan digunakan pada penelitian ini adalah Pellet MSW yang memiliki komposisi 30 % sampah organik tumbuhan, 20% serbuk kayu, 40 % sampah plastik *Polypropylene*(PP) dan 10 % materi pengikat/binder berupa *starch* (kanji) (Indarto 2015). Pelet yang digunakan memiliki ukuran diameter 6 mm dan rata-rata panjang 5-15 mm (Rollinson,2017) [17] berasal dari sampah perkotaan (Indarto .2017) bahan anorganik. Bahan organik dalam briket MSW ini adalah : sampah dapur (sayur mayur dan sisa makanan), bermacam jenis kertas, dan potongan tumbuh-tumbuhan (kayu, ranting, dan dedaunan). Bahan anorganik dalam briket MSW ini sebagian besar adalah plastik, terutama plastik yang tidak terambil oleh pemulung seperti contohnya : tas kresek, plastik bungkus, dan styrofoam. Sebelum dipeletkan seluruh bahan telah melalui proses pencacahan hingga ukuran partikel tertentu. Seluruh proses pemeletan akan dilakukan di laboratorium jurusan Teknik Mesin ITS. Sebelum digunakan dalam eksperimen, Pelet MSW tersebut akan diukur kandungan airnya, dan nilai kalornya di Laboratorium Pusat Studi Energi dan Rekayasa LPPM ITS. Berikut Penguian properties biomassa pellet MSW :

1. *Analisa Proximate*
Pada pengujian ini dianalisa mengenai kadar kandungan moisture content, volatil matter, fixed carbon, dan abu yang dimilikinya.
2. *Analisa Nilai Kalor*
Pada pengujian ini dianalisa mengenai nilai kandungan kalor (Low Heating Value) yang di uji pada alat bomb kalorimeter dimana, nilai yang keluar dari alat tersebut yaitu dalam bentuk High Heating Value.

Untuk analisa ultimate diambil pendekatan dari penelitian Zhou,dkk(2014) untuk mendapatkan nilai pengujian analisa ultimate yang lebih spesifik, sebagai referensi dalam pengujian. Berhubung dengan jenis briket MSW yang digunakan sama. sedangkan analisa proxymate dan Analisa Nilai Kalor dilakukan pengujian di laboratorium pusat studi energi dan rekayasa LPPM ITS.

3.3 Alat uji

Skema peralatan eksperimen dapat dilihat pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Skema instalasi proses gasifikasi

Keterangan:

- | | |
|------------------------------|--------------------------|
| 1. Hoper | 9. Cyclone |
| 2. <i>Downdraft Gasifier</i> | 10. <i>Water Scruber</i> |

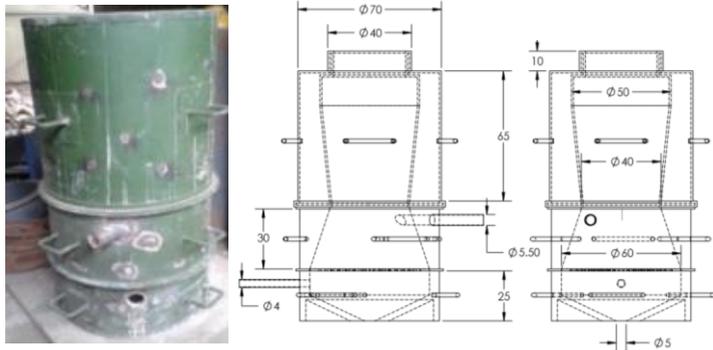
- | | |
|------------------------|------------------------|
| 3. Termokopel | 11. Pompa Air |
| 4. Dimmer | 12. <i>Dry Filter</i> |
| 5. Blower | 13. Pompa Hisap |
| 6. <i>Pitot Tube</i> | 14. <i>Flare Point</i> |
| 7. <i>Flare Point</i> | 15. <i>Pitot Tube</i> |
| 8. <i>Gas Sampling</i> | |

Alat uji yang akan digunakan dalam penelitian ini antara lain sebagai berikut:

1. Reaktor Gasifikasi

Reaktor gasifikasi yang digunakan bertipe downdraft yang telah dilengkapi dengan sistem peralatan pembersih syngas yang berupa cyclone dan water scrubber. Selain itu reaktor tersebut memiliki satu blower untuk memasok udara dan satu induced fan untuk menghisap syngas.

Dimensi Reaktor gasifikasi (*Downdraft*)



Gambar 3.2 Dimensi Reaktor Gasifikasi *Downdraft*

2. *Blower dan Induced Fan*

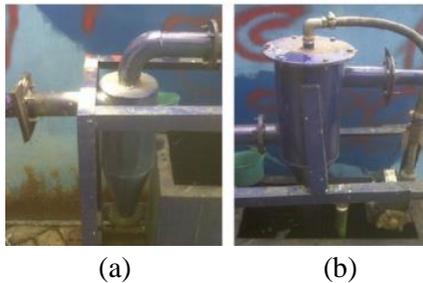
Blower dan suction pump berupa centrifugal pump yang digerakkan oleh motor listrik arus AC dengan voltase 220 v. Blower berfungsi untuk memberikan pasokan udara pada zona partial combustion, sedangkan suction pump berfungsi untuk menghisap syngas.



Gambar 3.3 (a). *Blower* (b). *Induced Fan*

3. *Cyclone dan Water Scrubber*

Cyclone dan Water scrubber berfungsi sebagai perlengkapan untuk membersihkan syngas dan juga menurunkan suhu syngas, seperti terlihat pada gambar 3.4. Cyclone berfungsi hanya untuk membersihkan kandungan debu dan partikel, sedangkan water scrubber memiliki fungsi utama untuk mengurangi kandungan tar dalam syngas.



Gambar 3.4 (a) *Cyclone* (b) *Water Scrubber*

4. *Dimmer*

Dimmer berupa resistor yang digunakan untuk memvariasikan kecepatan suplai udara dari blower dengan cara membatasi arus listrik yang mengalir, untuk mendapatkan nilai *Air Fuel Ratio* yang diinginkan. Adapun *dimmer* yang digunakan dalam pengambilan data mampu mengubah tingkat kecepatan sesuai dengan yang diinginkan.



Gambar 3.5 Dimmer

3.4 Alat Ukur

Untuk mendapatkan data yang dibutuhkan dalam penelitian, reaktor gasifikasi yang telah dilengkapi dengan alat pengukur suhu dan alat pengukur laju alir massa media gasifikasi serta syngas.

1. Alat Ukur Suhu

Alat ukur suhu pada reaktor gasifikasi yang akan digunakan menggunakan sensor berupa thermocouple tipe K dengan posisi pemasangan tersebar pada 7 titik, dengan pengaturan sebagai berikut :

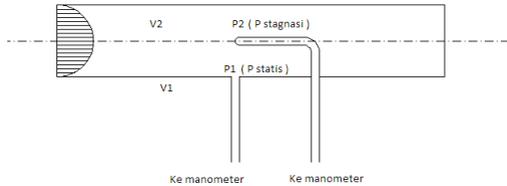
1. T_1 hingga T_7 pengukuran pada unit utama reaktor gasifikasi difungsikan untuk mengukur profil suhu pada zona-zona gasifikasi.
2. T_7 titik pengukuran terakhir berada pada pipa keluaran suction pump untuk mengukur suhu syngas setelah melewati peralatan pembersih syngas.



Gambar 3.6 (a) Termometer inframerah (b) Thermocouple

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. Pengukuran laju aliran massa akan dilakukan pada 2 titik, yaitu : 1. Titik pertama pengukuran pada pipa inlet reaktor gasifikasi, berfungsi untuk pengukuran laju aliran massa udara sebagai media gasifikasi. 2. Titik kedua ditempatkan pada pipa outlet water scrubber untuk mengukur laju alir massa syngas.



Gambar 3.7 Pitot Static Tube

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

$$\frac{P_0}{\rho} + \frac{V_0^2}{2} + gz_0 = \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \dots \dots \dots (3.1)$$

Dimana :

P_0 = Tekanan stagnasi (pada titik 0) (Pa)

P_1 = Tekanan statis (pada titik 1) (Pa)

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

V_1 = Kecepatan di titik 1 (m/s)

V_0 = Kecepatan di titik 0, kecepatan pada titik *stagnasi* = 0 m/s

Dengan mengasumsikan $\Delta_z = 0$ maka persamaan menjadi :

$$\frac{V_1^2}{2} = \frac{P_0 - P_1}{\rho} \dots \dots \dots (3.2)$$

Untuk mencari kecepatan udara yang masuk kedalam ruang bakar dari persamaan diatas menjadi:

$$V_1 = \sqrt{\frac{2(P_0 - P_1)}{\rho_{udara}}} \dots\dots\dots(3.3)$$

Dimana :

$$P_0 - P_1 = \rho_{red\ oil} \cdot g \cdot h \dots\dots\dots(3.4)$$

$$\rho_{red\ oil} = (\rho_{H_2O} \cdot SG_{red\ oil}) \dots\dots\dots(3.5)$$

Sehingga pada inclined manometer diperoleh persamaan,

$$P_0 - P_1 = (\rho_{H_2O} \cdot SG_{red\ oil}) \cdot g \cdot h \cdot \sin \theta \dots\dots\dots(3.6)$$

h adalah perbedaan ketinggian cairan pada *inclined manometer* dengan $\theta = 10^0$, maka persamaan menjadi :

$$V_1 = \sqrt{\frac{2(\rho_{H_2O} \cdot SG_{red\ oil} \cdot g \cdot h \cdot \sin \theta)}{\rho_{udara}}} \dots\dots\dots(3.7)$$

Dengan :

$SG_{red\ oil}$: *Spesific gravity red oil* (0.827)

ρ_{H_2O} : Massa jenis air (999 kg/m³)

ρ_{udara} : Massa jenis udara (1.1447 kg/m³)

h : Total perbedaan ketinggian cairan pada *incline manometer* (m)

θ : Sudut yang digunakan pada *inclined manometer* (degree)

namun V_1 merupakan kecepatan maksimal, terlihat dari profil kecepatan aliran pada *internal flow*. Hal ini dikarenakan posisi pitot berada pada *centerline* pipa. Sehingga perlu dirubah menjadi *average velocity* (\bar{V}) yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{\bar{V}}{V_{max}} = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \dots\dots\dots(3.8)$$

Dimana:

\bar{V} : Kecepatan rata – rata (m/s)

V_{max} : Kecepatan maksimal dari profil kecepatan aliran.

n : *variation of power law exponent*.

Yang di rumuskan sebagai berikut:

$$n = -1,7 + 1,8 \log Re_{V_{max}} \dots \dots \dots (3.9)$$

untuk $Re_{V_{max}} > 2 \times 10^4$ (aliran turbulen).

Sedangkan untuk aliran laminar dapat diperoleh melalui persamaan berikut:

$$V_{max} = 2\bar{V} \dots \dots \dots (3.10)$$

3. *Stopwatch*

Digunakan untuk mengetahui waktu operasi pada proses gasifikasi



Gambar 3.8 Stopwatch

4. *Gas Chromathography*

Digunakan untuk mengetahui komposisi syngas (CO, CO₂ , CH₄, H₂ , N₂) dan kandungan tar pada *syngas*



Gambar 3.9 Gas Chromathography

3.5 Prosedur pengujian

Prosedur pengambilan data dilakukan untuk mendapatkan parameter-parameter yang dibutuhkan untuk performa proses

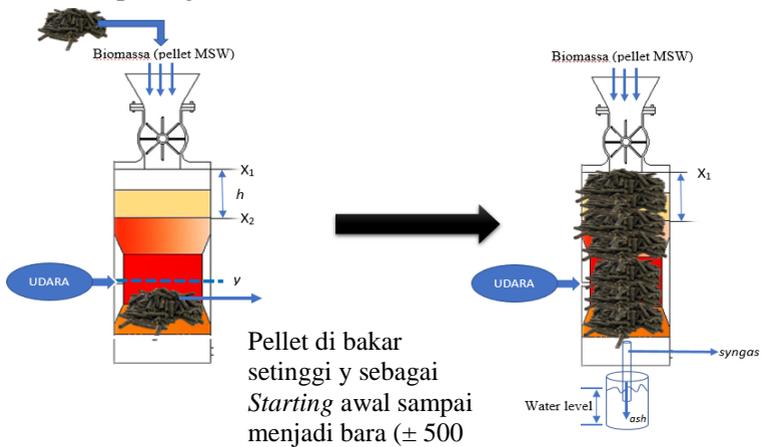
gasifikasi system *Continuous*. Dalam eksperimen ini akan diambil data berupa laju alir massa biomassa, udara, dan syn gas, serta distribusi temperatur di sepanjang reaktor melalui sebuah display thermocouple.

1) Tahap Persiapan

Sebelum pelaksanaan proses pengujian terdapat beberapa persiapan yang harus dilakukan agar pengambilan data dapat dilakukan dengan baik.

1. Pengecekan reaktor gasifikasi dan memastikan semua peralatan penunjang yang lain seperti thermocouple, blower, dan komponen-komponen lainnya telah terpasang dengan baik.
2. Persiapan alat ukur yang digunakan seperti, digital flowmeter, infrared thermocouple, pitot tube, dan stopwatch serta pastikan alat ukur dapat digunakan dengan baik
3. Mempersiapkan Pelet MSW sebagai bahan biomassa.

2) Tahap Pengambilan Data



Gambar 3.10 Skema Pengujian

1. Sebagai data awal, temperatur ruang atau ambient dicatat, temperatur awal dinding reaktor dan sistem perpipaannya menggunakan infrared thermometer.

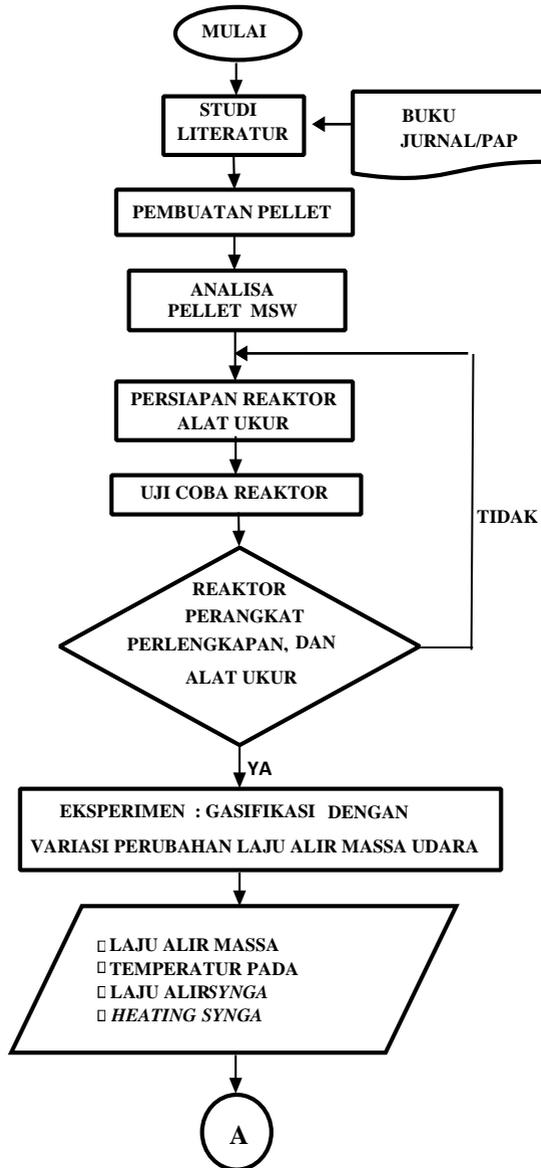
2. Untuk tahap awal , dimasukkan pellet MSW ke dalam reaktor hingga batas bawah (permulaan zona oksidasi) (gambar 3.10)
3. Pellet MSW disulut api sebagai pemanasan awal sebagai starting sampai suhu ± 500 °C.
4. Setelah menjadi bara, masukan pellet hingga batas atas dari gasifikasi
5. Secara bersamaan, blower dinyalakan, putaran dimmer diatur sesuai tahap pengambilan data sampai kondisi *Steady* (saat hasil *syngas* sudah flammable)
6. Tunggu waktu 10 menit kemudian isi lagi reaktor dengan pellet sampai batas atas kemudian naikan putaran blower melalui dimmer. Sampai kondisi *steady*
7. Data temperatur diambil pada tiap thermokopel untuk mengetahui distribusi terhadap AFR yang ada untuk nantinya digunakan mengidentifikasi zona tahapan gasifikasi.
8. Data mass flowrate diambil dengan pitot tube untuk mengetahui besarnya kecepatan udara yang masuk ke dalam gasifier melalui lubang (*throat*) udara.
9. Pada saluran pipa keluaran juga dipasang pitot tube untuk mengukur laju alir syn-gas.
10. Lakukan semua pengukuran di atas tiap 10 menit dengan menggunakan data akuisisi
11. Pengambilan data temperatur tiap titik thermocouple, laju alir massa udara, dan laju alir massa syn-gas diulangi dengan memberi variasi kecepatan udara masukan melalui putaran dimmer pada blower. Perubahan variasi ini dilakukan dengan mengatur duty cycle pada blower.
12. Setelah itu dilakukan pengujian syn-gas hasil gasifikasi. Pengujian dilakukan di Laboratorium Pusat Studi Energi dan Rekayasa, Lembaga Pengabdian Masyarakat (LPPM) dengan sampel

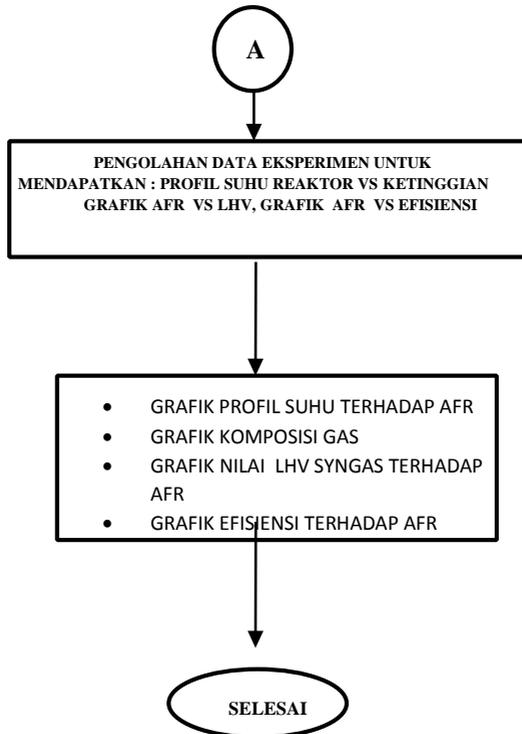
syngas pada tiap variasi Air Fuel Ratio. Pengujian dilakukan dengan cara menyimpan syngas ke suatu tempat yang tertutup dan terisolasi dari udara luar. Komposisi gas yang diujikan antarlain H_2 , O_2 , N_2 , CO , CO_2 , CH_4 .

3) Tahap Akhir Pengujian

1. Mematikan blower perlahan.
2. Mematikan dimmer
3. Mencatat temperatur akhir dari reaktor dan sistem perpipaannya.
4. Membiarkan reaktor sampai api benar-benar padam dan temperatunya turun.

3.6 Flowchart penelitian





Gambar 3.11 *Flowchart* penelitian

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas performa dari suatu *gasifier* untuk menghasilkan gas yang *flammable*. Untuk menentukan performa dari suatu *gasifier* dalam menghasilkan gas yang *flammable* dapat di tinjau dari beberapa parameter yaitu distribusi temperatur di dalam reaktor, komposisi gas yang dihasilkan, dan efisiensi yang dimiliki oleh *gasifier* tersebut. Parameter inilah, yang nantinya akan memiliki nilai yang berbeda untuk tiap variasi rasio udara-bahan bakar (*Air Fuel Ratio*) dengan mengubah nilai *duty cycle*-nya , dari perbedaan tersebut akan dianalisa performa *gasifier*-nya, sehingga kita dapat menentukan efisiensi terbesar berada pada AFR tertentu. Selain itu penelitian dilakukan dengan memvariasikan rasio udara bahan bakar (*Air Fuel Ratio*) untuk menentukan nilai batas atas dan batas bawah dengan melakukan pengujian AFR diluar batas bawah dan atas yang didapat dari penelitian.

4.1 Karakteristik Pellet MSW

Pada penelitian ini akan digunakan biomassa berupa sampah padatan kota atau yang disebut sebagai *Municipal Solid Waste* (MSW) dalam bentuk pellet yang selanjutnya akan dilakukan proses gasifikasi. Pellet MSW yang digunakan pada penelitian ini merupakan hasil riset dan pengembangan yang dilakukan oleh Lab. Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar Teknik Mesin ITS, Pellet tersebut memiliki komposisi sebagai berikut :

- 30% sampah organik tumbuhan (kompos)
- 20% serbuk kayu
- 40% sampah plastik yang sebagian besar berupa plastik *Polypropylene* (PP)
- 10% materi pengikat/*binder* berupa *starch* (kanji).

MSW tersebut dilakukan poses peletisasi dengan ukuran rata rata diameter 6 mm serta panjang 5 – 15 mm . Contoh Pellet MSW dapat dilihat pada gambar 4.1



Gambar 4.1 Pellet MSW yang digunakan dalam penelitian

Setelah dilakukan proses pelletisasi biomassa dari MSW, selanjutnya pellet MSW dikeringkan secara alami dengan sinar matahari hingga kandungan air mencapai 20 – 30 %. Setelah pellet dikeringkan, lalu dilakukan proses penumbukan sampai hancur dan rata mendekati bentuk bubuk sebanyak ± 200 gram sebagai sampel yang akan dilakukan uji *proximate* (*Moisture content* / kandungan air, *ash content* / kadar abu, *Volatle matter*, kadar *fixed carbon* dan *Gross calorific value* / Nilai Kalor Atas HHV) di Laboratorium Energi LPPM-ITS untuk diuji nilai kalornya dengan metode uji *bomb calorimeter*. dari pengujian *proximate* tersebut didapatkan Nilai kalor rata-rata hasil pengujian Pellet MSW adalah sebesar 13843 kJ/kg.

Tabel 4.1 Data hasil pengujian kandungan *Pellet* MSW

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

Untuk mencari nilai kalor bawah *syngas* digunakan persamaan sebagai berikut, dimana hg (panas laten) yang digunakan sebesar 2260 kJ/kg

$$LHV = HHV - hg \left(\frac{9H}{100} + \frac{M}{100} \right)$$

Dimana :

- LHV : Nilai Kalor Bawah (kJ/kg)
- HHV : Nilai Kalor Bawah (kJ/kg)
- H : presentase Hidrogen (%)
- M : presentase Moisture Content (%)
- hg : Panas Laten (kJ/kg)

$$\begin{aligned} &= 13843 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2260 \text{ kJ/kg} \left(\frac{9 \times 6.7}{100} + \frac{9.82}{100} \right) \\ &= 12258 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

4.2 Data dan Analisa Hasil Eksperimen Hasil Gasifikasi

Eksperimen ini dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan karakteristik gasifikasi Pellet *MSW* melalui variasi udara bahan bakar (AFR).

4.2.1 Air Fuel Ratio (AFR)

Parameter operasional ini menentukan suhu operasional dari proses gasifikasi. Perubahan *duty cycle* mengakibatkan perubahan putaran *blower* sehingga mengakibatkan laju alir massa udara berubah yang pada akhirnya akan mengubah nilai AFR pada proses gasifikasi. Untuk menentukan nilai AFR diperlukan laju alir massa udara dan bahan bakar (briket *MSW*). Untuk data laju alir masa udara telah diperoleh dari pengujian melalui alat ukur *Pressure Transducer* yang dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.2 Data laju alir massa udara melalui *Pressure Transducer*

Duty cycle	Pressure (Pa)	v max (m/s)	Re vmax	n	v rata-rata (m/s)	m dot (kg/s)
100%	16.6	5.346	17066.02	5.91	4.21	0.0099
95%	11.3	4.411	14098.63	5.76	3.45	0.0081
90%	9.2	3.980	12721.31	5.68	3.11	0.0073
85%	3.4	2.419	7733.52	5.29	1.86	0.0044

4.2.1.1 Analisa perhitungan laju air massa udara pada *Duty Cycle 100%*:

- Mengamati beda ketinggian yang terbaca pada manometer V
Dari hasil pengamatan dengan *Duty cycle 100 %* didapatkan perbedaan Tekanan yang terbaca pada alat ukur *Pressure Transducer* sebesar 16.6 Pa
- Mencari harga kecepatan Maksimum (V_{max})

$$V_1 = \sqrt{\frac{2(P_0 - P_1)}{\rho_{udara}}} = \sqrt{\frac{2(\rho_{H_2O} \cdot SG_{red\ oil}) \cdot g \cdot h \cdot \sin \theta}{\rho_{udara}}}$$

Dimana :

- ρ_{H_2O} : Massa jenis air (999 kg/m³)
- ρ_{udara} : Massa jenis udara (1.1614 kg/m³)
- h : Total perbedaan ketinggian cairan pada *incline manometer* (m)
- θ : Sudut yang digunakan pada *Incline manometer* (15°)
- $SG_{red\ oil}$: *Spesific gravity red oil* (0.827)

Didapatkan :

$$V_1 = \sqrt{\frac{2(P_0 - P_1)}{\rho_{udara}}} = \sqrt{\frac{2 \times 16.6}{1,1614}} = 5,34 \text{ m/s}$$

- Mencari Harga Re_{vmax}

$$Re_{vmax} = \frac{\rho \cdot Vmax \cdot D}{\mu}$$

$$= \frac{1.1614 \times 5,34 \times 0.0508}{184,6 \times 10^{-7}}$$

Diperoleh : 17066.028 ($\mu = 184,6 \times 10^{-7}$)

- Mencari harga n (*variation of power law exponent*)

$$n = -1,7 + 1,8 \log Re_{Vmax}$$

$$n = 5,91$$

- Mencari harga V_{avg}

diperoleh dengan persamaan:

$$\frac{\bar{v}}{Vmax} = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} ; Vmax = 4.217 \text{ m/s}$$

- Laju alir masa udara ($m_{dot \text{ udara}}$)

$$M_{dot \text{ udara}} = \rho \cdot V_{avg} \cdot A$$

$$= 1.1614 \text{ kg/m}^3 \cdot 4.217 \text{ m/s} \cdot \pi/4 \cdot 0.0508^2$$

$$= 0.0099 \text{ m/s}$$

4.2.1.2 Analisa perhitungan laju air massa bahan bakar :

- Mencari Bulk Density pellet MSW

- Berat gelas ukur kosong = 132,02 gr
- Berat pellet MSW pada volume 200 ml pada gelas ukur = 209,5 gr
- Bulk density pellet :

berat pellet pada gelas ukur – berat gelas ukur kosong

volume pellet pada gelas ukur

$$= \frac{(209,5 - 132,02) \text{ gr}}{200 \text{ ml}} = 0,3674 \text{ g/ml}$$

$$= 0,3674 \frac{\text{g}}{\text{mL}} \times \frac{\text{kg}}{1000 \text{ g}} \times \frac{1000 \text{ mL}}{\text{L}} \times \frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3}$$

$$= 387,4 \text{ kg/m}^3$$

- Volume yang terisi

$$V = \text{Lalas} \times t \quad (9 \text{ cm} = 0,09\text{m})$$

$$= \pi/4 \cdot d^2 \times t$$

$$= \pi/4 \cdot (0,5 \text{ m})^2 \times 0,09 \text{ m}$$

$$= 0,01787 \text{ m}^3$$

- Masa bahan bakar pada volume tersebut

$$\rho = m / v$$

$$m = \rho \times v = 387,4 \text{ kg/m}^3 \times 0,01787 \text{ m}^3 \\ = 6.845 \text{ kg}$$

- Dengan waktu operasi 15 menit laju alir masa bahan bakar adalah

$$\text{Laju alir masa bahan bakar} = \frac{6.845 \text{ kg}}{15 \text{ menit}} \times \frac{\text{menit}}{60 \text{ s}} \\ = 0,00761 \text{ kg/s}$$

4.2.1.3 Analisa Rasio Udara - Bahan Bakar (AFR) pada saat *Duty Cycle* 100 %

Perhitungan Rasio udara-bahan bakar (*Air Fuel Ratio*) dapat diperoleh dari perhitungan berikut :

$$\dot{m}_{\text{udara}} = 0,0099 \text{ kg/s}$$

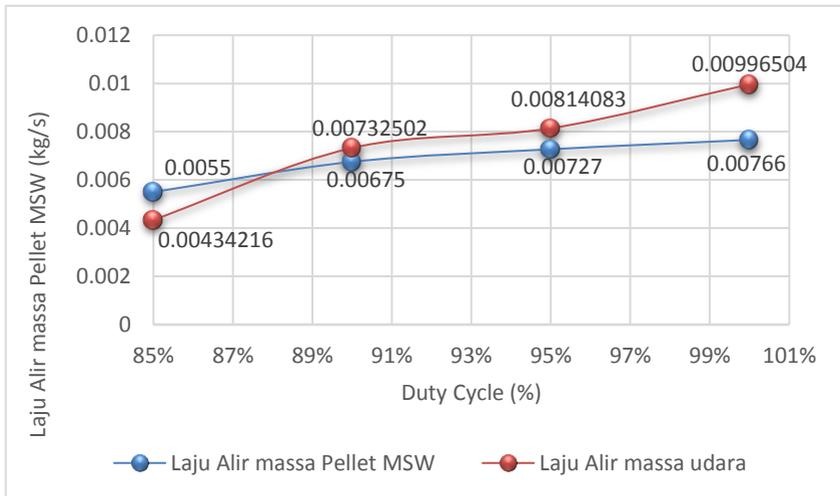
$$\dot{m}_{\text{bahan bakar}} = 0,0076 \text{ kg/s}$$

$$\text{Air Fuel Ratiio (AFR)} = \frac{\dot{m}_{\text{udara}}}{\dot{m}_{\text{bahan bakar (pellet MSW)}}} \\ = \frac{0,0099 \text{ kg/s}}{0,0076 \text{ kg/s}} = 1.3$$

Dari hasil pengujian yang dilakukan serta Analisa perhitungan laju alir masa udara dan laju alir masa bahan bakar (pellet MSW) telah diperoleh data *Air Fuel Ratio* (AFR) yang dapat dilihat pada tabel 4.3

Tabel 4.3 Data laju alir massa udara dan Pellet MSW serta *Air-Fuel Ratio* (AFR)

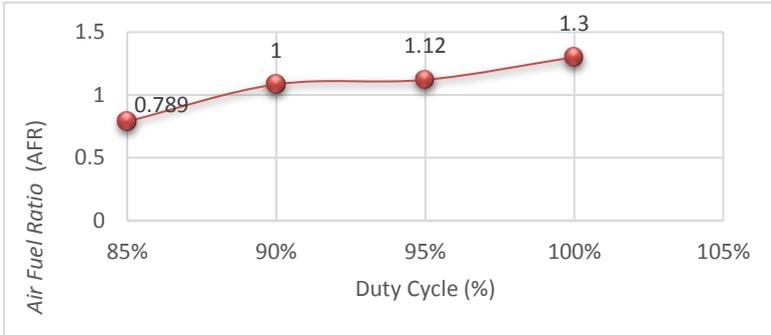
<i>Duty Cycle</i> (%)	Laju Alir massa Udara (kg/s)	Waktu Operasi (menit)	Massa Pellet MSW (kg/s)	Laju Alir massa Pellet MSW (kg/s)	<i>Air Fuel Ratio</i> (Rasio udara - bahan bakar)
85%	0.0043	20.7	6.87	0.0055	0.78
90%	0.0073	16.9	6.86	0.00675	1.08
95%	0.0081	15.6	6.85	0.00727	1.12
100%	0.0099	15	6.845	0.00766	1.3



Gambar 4.2 Grafik hubungan antara *duty cycle* dengan laju alir massa udara dan bahan bakar

Dari tabel 4.2 diatas dapat dilihat bahwa perubahan laju alir massa udara disertai dengan perubahan pada laju alir massa pellet MSW, hal ini terjadi karena perubahan besarnya laju alir massa udara akibat perubahan *duty cycle* pada blower, mengubah besarnya pasokan udara pada proses partial combustion yang mengakibatkan perubahan kondisi pembakaran dan kecepatan pembakaran pellet MSW, dapat dilihat semakin besar pasokan udara dengan jumlah massa pellet bahan bakar yang relatif tetap maka waktu operasi akan berkurang dikarenakan dengan penambahan laju alir masa udara akan meningkatkan laju proses pembakaran, yang menyebabkan laju konsumsi bahan bakar meningkat serta semakin menurunnya waktu operasi . Efek paling akhir dari perubahan laju alir massa udara dan briket MSW adalah berubahnya nilai AFR, semakin tinggi laju alir massa udara maka AFR akan meningkat. Selain itu bila dilihat kembali pada bagian sebelumnya yaitu distribusi suhu yang berbeda maka dapat juga dikatakan bahwa perubahan AFR mengakibatkan perubahan suhu

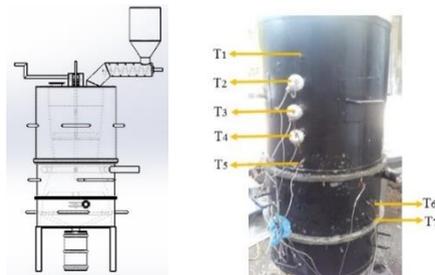
operasional gasifikasi. Hubungan antara perubahan duty cycle pada blower dan laju alir massa udara, massa briket serta air fuel ratio dapat dilihat pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Hubungan antara perubahan duty cycle dengan *Air Fuel Ratio* (AFR).

4.2.2 Analisa Distribusi Temperatur pada tiap zona Gasifikasi

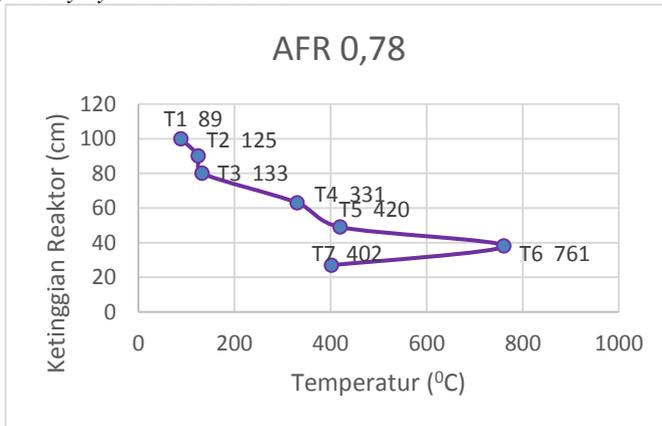
Dalam proses gasifikasi terdapat empat tahapan proses dalam menghasilkan *syngas*, yaitu tahap drying, pirolisis, oksidasi parsial dan reduksi. Masing-masing tahapan tersebut memiliki interval temperatur yang berbeda sebagai indikatornya. Pada subbab berikut akan ditampilkan dalam bentuk grafik distribusi temperatur fungsi variasi rasio udara-bahan bakar (*Air Fuel Ratio*) dengan nilai *duty cycle*. Berikut sketsa gambar zona zona gasifikasi:



Gambar 4.4 Distribusi Temperatur Zona Gasifikasi

4.2.2.1 Distribusi Temperatur Reaktor fungsi (Air Fuel Ratio = 0,78), dengan *duty cycle* = 85%

Berikut gambar distribusi temperatur fungsi waktu pada AFR 0,78 dengan *duty cycle* 85% di bawah ini :



Gambar 4.5 Distribusi Temperatur v ketinggian reaktor pada AFR 0,78 dengan *duty cycle* 85%

Pada Gambar 4.5 diatas, termokopel 1 (T_1) diletakan pada ketinggian 100 cm dari bawah reaktor memiliki temperatur antara 89°C, yang menunjukkan bahwa termokopel 1 (T_1) merupakan permulaan zona *drying*, dimana pellet MSW mengalami penguapan untuk menghilangkan kandungan moisture-nya.

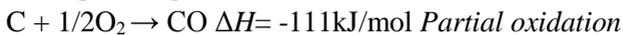
Berikutnya untuk termokopel 2 (T_2) terletak pada ketinggian 90 cm dari bagian bawah reaktor dengan temperature 125 °C, (T_3) dengan ketinggian 80 cm dengan temperatur 133 °C, (T_4) dengan ketinggian 63 cm dengan temperatur 331 °C. serta (T_5) dengan ketinggian 49 cm dengan temperatur 420°C.yang mana mengindikasikan bahwa T_2 smapai dengan T_5 akan masuk zona *pirolisis*. Seperti pada dasar teori bab 2 yang menyatakan bahwa zona pirolisis berada temperatur 150°C-700°C, dimana biomassa kering yang bebas dari *moisture*, mengalami pemanasan terus-menerus yang, diharapkan mampu menghilangkan kandungan

volatile biomassa. Biomassa yang mengalami pemanasan pada temperatur tinggi akan menyebabkan biomassa terpecah menjadi arang (C), tar, minyak, gas dan produk pirolisa lain. Produk *pirolisis* umumnya terdiri dari tiga jenis, yaitu gas ringan (H_2 , CO, CO_2 , H_2O , dan CH_4), tar, dan arang. Secara umum reaksi yang terjadi pada *pirolisis* beserta produknya adalah:



$\text{Fuel (biomassa)} \rightarrow H_2 + CO + CO_2 + CH_4 + H_2O + \text{Tar} + \text{Char (arang karbon)}$

Lalu pada termokopel 6 (T_6) yang terpasang pada ketinggian 38 cm memiliki temperatur paling tinggi diantara yang lainnya, karena pada (T_6) sudah masuk zona oksidasi parsial. Temperatur pada termokopel 6 (T_6) ini adalah sebesar 761°C . Hal ini sesuai dengan dasar teori pada bab 2 bahwa, zona *oksidasi parsial* akan memasuki temperatur $\pm 900^\circ\text{C}$, dimana proses ini menghasilkan panas (*reaksi eksoterm*) yang memanaskan lapisan karbon dibawah. Proses tersebut dipengaruhi distribusi oksigen karena adanya oksigen inilah, terjadi reaksi eksoterm yang menghasilkan panas, yang dibutuhkan dalam keseluruhan proses gasifikasi ini. Sekitar 20% arang bersama *volatile* akan mengalami oksidasi menjadi CO_2 dan H_2O dengan memanfaatkan oksigen terbatas yang disuplaikan ke dalam reaktor (hanya 20% dari keseluruhan udara yang digunakan dalam pembakaran dalam reaktor). Reaksi kimia yang terjadi pada zona ini adalah sebagai berikut :

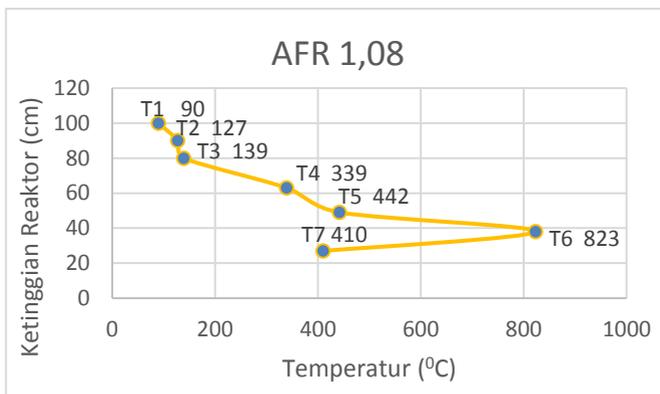


Sedangkan pada termokopel 7 (T_7) pada ketinggian 27 cm, temperatur konstan kisaran sampai 402°C , mengindikasikan bahwa T_7 masuk zona *reduksi* yang berada pada kisaran temperatur 400°C - 800°C , dimana proses ini menyerap atau membutuhkan panas (*reaksi endoterm*). Pada proses ini terjadi beberapa reaksi kimia seperti (*Water-Gas Reactio*, *Boudouard Reaction*, *Shift conversion*, *Methanation*), dimana terbentuknya, senyawa-senyawa yang berguna untuk menghasilkan *flammable gas*, seperti

H₂ dan CO. Sisa 80% dari arang turun ke bawah membentuk lapisan pada daerah reduksi, dimana di bagian ini hampir seluruh karbon akan digunakan dan abu yang terbentuk akan menuju tempat penampungan abu.

4.2.2.2 Distribusi Temperatur Reaktor fungsi (Air Fuel Ratio = 1,08), dengan *duty cycle* = 90%

Berikut gambar distribusi temperatur fungsi waktu pada AFR 1,08 dengan *duty cycle* 90% di bawah ini :



Gambar 4.6 Distribusi Temperatur v ketinggian reaktor pada AFR 1,08 dengan *duty cycle* 90%

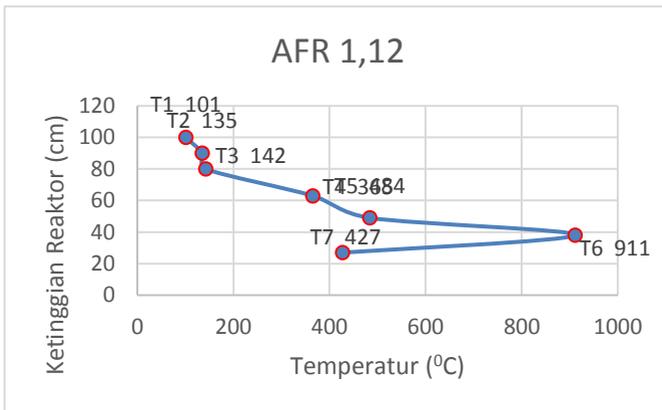
Pada gambar 4.6 diatas yaitu termokopel 1 (T₁) memiliki rentang temperatur yang hampir sama dengan variasi AFR sebelumnya. Untuk temperatur termokopel 1 (T₁) berada pada kisaran 90°C, mengindikasikan bahwa termokopel 1 merupakan permulaan zona *drying*, dimana kandungan moisture yang dimiliki briket MSW dihilangkan melalui proses penguapan atau *evaporasi*. Untuk termokopel 2 (T₂) sampai termokopel 5 (T₅) berturut turut adalah 127°C, 139°C, 339°C, 442°C hal ini mengindikasikan bahwa, T₂ samai T₅ ini akan masuk zona *pirolisis* sesuai dengan dasar teori pada bab 2 bahwa, zona *pirolisis* memasuki temperatur

150°C-700°C, dimana biomassa yang mengalami pemanasan terus-menerus, diharapkan mampu menghilangkan kandungan *volatile* biomassa.

Sedangkan termokopel 6 (T_6), distribusi temperatur yang terjadi memiliki temperatur tertinggi dibandingkan dengan yang lainnya yaitu 823 °C yang merupakan zona *partial oxidation*. Begitu juga dengan temperature 7 (T_7) yang memiliki temperatur pada kisaran yang lebih tinggi, yaitu 410 °C zona reduksi.

4.2.2.3 Distribusi Temperatur Reaktor fungsi (Air Fuel Ratio = 1,12), dengan *duty cycle* = 95%

Berikut gambar distribusi temperatur fungsi waktu pada AFR 1,08 dengan *duty cycle* 90% di bawah ini :



Gambar 4.7 Distribusi Temperatur v ketinggian reaktor pada AFR 1,12 dengan *duty cycle* 95%

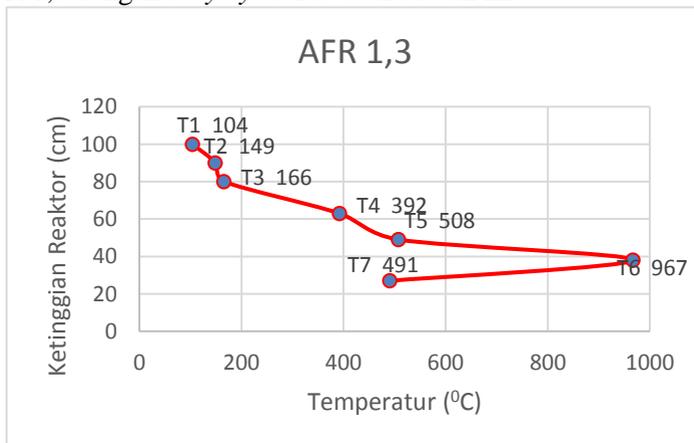
Pada gambar 4.7 diatas yaitu termokopel 1 (T_1) memiliki rentang temperatur yang lebih tinggi dari variasi AFR sebelumnya yakni AFR 0,78 dan 1,08 yang mana berada pada kisaran temperatur 101°C, karena pada termokopel 1(T_1) menunjukkan permulaan zona *drying*, dimana kandungan *moisture* yang dimiliki biomassa briket MSW dihilangkan melalui proses penguapan atau

evaporasi. Untuk Termokopel 2 (T_2) sampai termokopel 5 (T_5) berturut turut adalah 135°C , 142°C , 365°C , 484°C hal ini mengindikasikan bahwa, T_2 samai T_5 ini akan masuk zona *pirolisis* teori pada bab 2 bahwa, zona *pirolisis* memasuki temperatur 150°C - 700°C , dimana biomassa yang mengalami pemanasan terus-menerus, diharapkan mampu menghilangkan kandungan *volatile* biomassa.

Sedangkan termokopel 6 (T_6), distribusi temperatur yang terjadi memiliki temperatur tertinggi dibandingkan dengan yang lainnya yaitu 911°C yang merupakan zona *partial oxidation*. Begitu juga dengan temperature 7 (T_7) yang memiliki temperatur pada kisaran yang lebih tinggi, yaitu 427°C zona reduksi

4.2.2.4 Distribusi Temperatur Reaktor fungsi (Air Fuel Ratio = 1,3), dengan *duty cycle* = 100%

Berikut gambar distribusi temperatur fungsi waktu pada AFR 1,3 dengan *duty cycle* 100% di bawah ini :

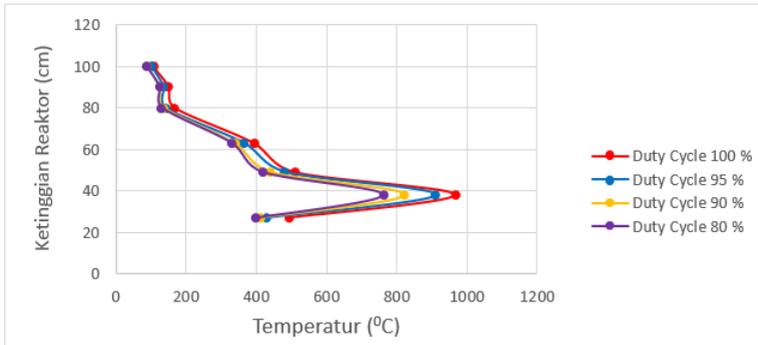


Gambar 4.8 Distribusi Temperatur v ketinggian reaktor pada AFR 1,3 dengan *duty cycle* 100%

Pada gambar 4.8 diatas yaitu termokopel 1 (T_1) memiliki temperatur lebih tinggi sampai dengan temperatur 104°C , dibandingkan AFR sebelumnya. Pada AFR 1,38 (T_1) hanya mampu mencapai temperature pada kisaran 101°C , begitu juga dengan AFR sebelumnya yang lebih kecil yaitu pada AFR 0,72 dan AFR 1,04 nilai pada termokopel 1 (T_1) lebih kecil. Lalu pada Termokopel 2 (T_2) sampai termokopel 5 (T_5) berturut turut adalah 149°C , 166°C , 392°C , 508°C hal ini mengindikasikan bahwa, T_2 samai T_5 ini akan masuk zona *pirolisis* daerah pirolisis pada *duty cycle* 100 % ini memiliki distribusi yang lebih tinggi dari *duty cycle* dibawahnya, hal ini terjadi Karena semakin tinggi pasokan udara akan menyebabkan reaksi semakin meningkat dan paada daerah oksidasi partial akan semakin menghasilkan Temperatur yang lebih tinggi sehingga berdampak juga pada temperature reaktor yang akan meningkat

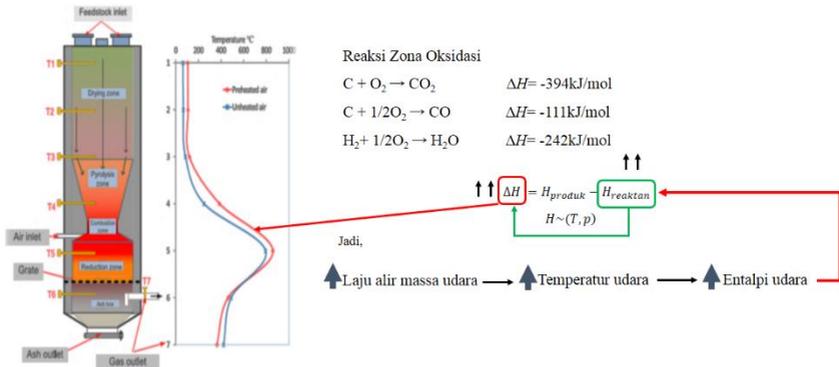
Sedangkan termokopel 6 (T_6), distribusi temperatur yang terjadi memiliki temperatur tertinggi dibandingkan dengan yang lainnya yaitu 967°C yang merupakan zona *partial oxidation* yang mengakibatkan distribusi temperature pada reaktor ikut meningkat, Begitu juga dengan temperature 7 (T_7) yang memiliki temperatur pada kisaran yang lebih tinggi, yaitu 491°C zona reduksi.

Perbedaan-perbedaan suhu pada zona yang sama yang terjadi pada masing-masing poses gasifikasi yang ditunjukkan oleh gambar-gambar diatas sesuai dengan dasar teori yang tersebut pada bab 2, yang menyebutkan bahwa suhu kerja reaktor gasifikasi terutama dipengaruhi oleh besarnya pasokan udara (laju alir massa udara) untuk proses gasifikasi. Pada gambar 4.9 perubahan distribusi suhu pada reaktor gasifikasi karena perubahan laju aliran udara dapat tergambar dengan jelas.



Gambar 4.9 Distribusi temperatur tiap AFR

Dari gambar 4.9 terlihat dari beberapa variasi *Air fuel ratio* (AFR) dalam hal ini yang berpengaruh adalah laju alir massa udara seiring penambahannya akan meningkatkan Distribusi temperatur reaktor, hal ini dapat terjadi Karena, berdasarkan teori yang terkait bahwa $\Delta H = H_{produk} - H_{reaktan}$ dari persamaan reaksi oksidasi, semakin tinggi O_2 yang diberikan, temperature udara akan naik sehingga entalpi udar juga akan meningkat, saat $H_{reaktan}$ semakin tinggi, maka harga ΔH akan semakin minus (-), semakin besar harga minus ini mengartikan bahwa reaksi oksidasi akan semakin banyak mengeluarkan panas. Karena zona oksidasi ini memiliki temperatur yang tinggi, maka tentunya akan mempengaruhi daerah sekitar reaktor sehingga temperature reaktor juga akan ikut meningkat. Seperti pada skema dibawah ini :



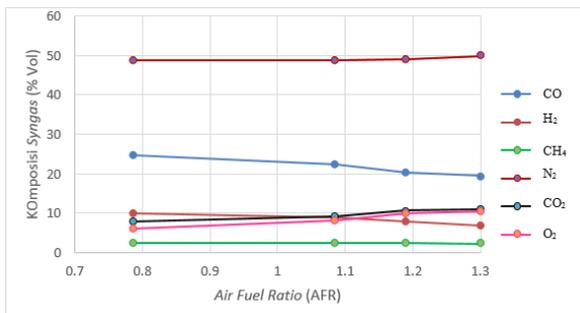
Gambar 4.10 Skema pengaruh m udara terhadap kenaikan temperatur reaktor

4.3 Analisis Komposisi Kandungan syngas

Nilai kalor dari *syngas* dalam hal ini adalah Nilai Kalor Bawah (*Low heating value/LHV*) diperoleh dengan perhitungan dengan menggunakan data dari komposisi *syngas*. Oleh karena itu beberapa sampel *syngas* diambil dengan menggunakan *gas bag* dan diujikan di Lab. Energi LPPM-ITS untuk diketahui komposisinya. kandungan gas yang diuji meliputi H_2 , O_2 , N_2 , CO , CO_2 , CH_4 . Berikut adalah tabel 4.4 hasil pengujian komposisi gas yang telah dilakukan

Tabel 4.4 Komposisi kandungan *syngas* (% volume)

Air fuel ratio (rasio udara bahan bakar)	Konsentrasi kandungan <i>syngas</i>					
	CO (% Vol)	H ₂ (% Vol)	CH ₄ (% Vol)	N ₂ (% Vol)	CO ₂ (% Vol)	O ₂ (% Vol)
0.78	24.79	9.97	2.44	48.77	7.92	6.11
1.08	22.38	8.89	2.42	48.87	9.21	8.23
1.12	20.18	7.98	2.41	48.99	10.62	9.82
1.3	19.41	6.86	2.39	49.89	10.97	10.48



Gambar 4.11. Grafik hubungan antara AFR dan komposisi *syngas*

Dari tabel 4.4 dan gambar 4.11 dapat dilihat komposisi *syngas* untuk tiap-tiap variasi AFR. Senyawa yang terdapat dalam *syngas* terdiri dari senyawa yang dapat terbakar (CO, H₂ dan CH₄) dan senyawa gas yang tidak bisa terbakar (CO₂, N₂ dan O₂). Dari ketiga senyawa gas yang dapat terbakar secara umum mengalami penurunan jumlah persentase volumenya seiring dengan meningkatnya nilai AFR. Hal ini dikarenakan dengan meningkatnya AFR maka pembakaran dalam zona *partial combustion* semakin mendekati kondisi stoikiometrisnya sehingga akan lebih banyak senyawa gas CO₂ yang terjadi dibanding senyawa gas CO. Selain itu semakin naiknya suhu mengakibatkan reaksi pada arang di zona reduksi lebih banyak menghasilkan CO₂. Tingginya kadar Nitrogen (N₂) merupakan hal yang wajar mengingat media gasifikasi yang digunakan adalah udara dan kandungan N₂ dalam udara sekitar 78% serta sifatnya yang *inert*, tidak turut serta dalam reaksi dan tetap muncul dalam hasil reaksi. Kandungan O₂ yang ada dalam senyawa gas hasil reaksi merupakan udarayang tidak ikut bereaksi yang cenderung mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya AFR.

4.4. Analisis nilai kalor ditinjau dari *Low heating Value (LHV) Synthetic Gas*

Berdasarkan komposisi senyawa dalam syngas diatas maka LHV dari syngas dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$LHV_{GAS} = \sum_{i=1} (Y_i \cdot LHV_i)$$

Keterangan :

Y_i = konsentrasi gas yang terbakar (CO, CH₄, H₂)

LHV_i = Nilai Kalor bawah (LHV) gas terbakar (CO, CH₄, H₂)

Nilai Kalor bawah (*Low Heating Value*) dari masing – masing gas yang dapat terbakar dapat dilihat pada tabel 4. 4

Tabel 4.5 Nilai LHV dari senyawa gas mampu bakar

Gas yang terbakar	$LHV_i \left(\frac{KJ}{m^3} \right)$
CO	12633
CH₄	35883
H₂	10783

Berikut ini adalah contoh perhitungan untuk nilai LHV dengan menggunakan data dari komposisi syngas pada AFR 0,785

- Y_i untuk gas CO = 24,79% = 0,2479
- Y_i untuk gas CH₄ = 2,44% = 0,0244
- Y_i untuk gas H₂ = 9,97% = 0,0997

$$\begin{aligned} LHV_{syngas} &= \sum_i^n (0,2479 \cdot 12633) + (0,0244 \cdot 35883) + \\ &\quad (0,0997 \cdot 10783) \\ &= 5082,33 \frac{KJ}{m^3} \end{aligned}$$

Nilai LHV untuk masing-masing variasi AFR dapat dilihat pada tabel 4.5 dan pada tabel tersebut terdapat dua nilai LHV untuk tiap variasi AFR hal tersebut dikarenakan perhitungan untuk mencari LHV menghasilkan satuan kJ/m^3 sedangkan untuk perhitungan selanjutnya dibutuhkan LHV dengan satuan kJ/kg , oleh karena itu diperlukan massa jenis syngas untuk mengkonversi satuan tersebut. Untuk mendapatkan massa jenis syngas maka digunakan perhitungan sebagai berikut :

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

- Y_i = Konsentrasi senyawa gas dalam *syngas* (CO , CH_4 , CH_2 , CO_2 , O_2 , N_2)
- $\rho_{i \text{ gas}}$ = Nilai massa jenis senyawa gas dalam *syngas*

Besarnya massa jenis gas ditentukan oleh suhu syngas, dalam hal ini adalah suhu yang diukur pada pipa outlet terluar dari reaktor setelah syngas mengalami proses pembersihan dengan cyclone dan water scrubber. Berdasar suhu yang ada dan tabel A-4 (Incropera, 2007) maka didapat tabel 4.5.

Tabel 4.6 Komposisi gas dan massa jenis

Komposisi	Persentase volume (%)	ρ (Kg/m^3), pada $T = 300 \text{ K}$
CO	9,99	1,123
H ₂	6,60	0,0807
CH ₄	6,64	0,688
CO ₂	2,74	1,773
N ₂	66,99	1,123
O ₂	7,65	1,284

Berikut ini adalah contoh perhitungan untuk mencari massa jenis syngas pada AFR 0,785 :

$$\begin{aligned} \rho_{\text{syngas}} &= \sum_{i=1}^n (0,099 \times 1,123) + (0,066 \times 0,0807) + \\ & (0,064 \times 0,688) + (0,0274 \times 1,773) + (0,6699 \times 1,123) + \\ & (0,0765 \times 1,284) \\ &= 1,062 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

Jadi untuk nilai *lower heating value* adalah sebagai berikut :

$$LHV_{syngas} = 5082.33 \frac{kJ}{m^3} : \rho_{syngas}$$

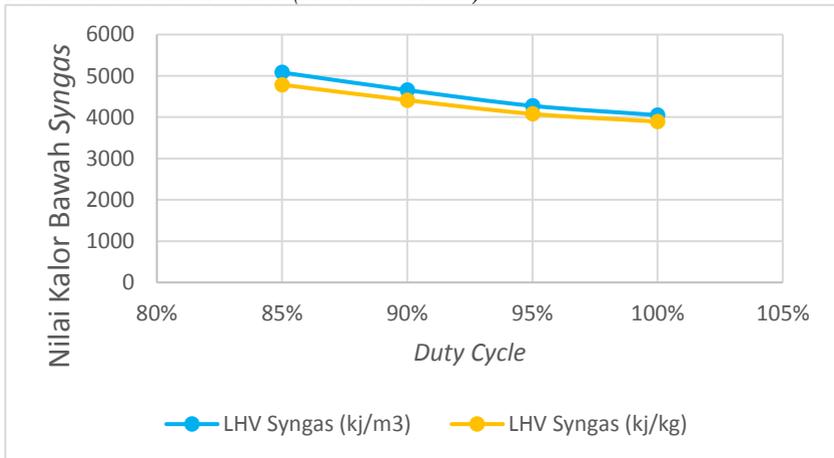
$$LHV_{syngas} = 5082.33 \frac{kJ}{m^3} \times \frac{1}{1,062 \frac{kg}{m^3}}$$

$$LHV_{syngas} = 4785.6 \frac{Kj}{Kg}$$

Tabel 4.7 Nilai LHV *syngas* untuk masing – masing variasi

Duty Cycle (%)	AFR	LHV Syngas (kj/m3)	ρ isyngas (kg/m3)	LHV Syngas (kj/kg)
100%	1.3	4049.38	1.04	3893.6
95%	1.12	4274.60	1.048	4078.8
90%	1.08	4654.24	1.055	4411.2
85%	0.78	5082.33	1.062	4785.6

Berikut merupakan grafik nilai LHV *synthetic gas* pada variasi rasio udara bahan bakar (*Air Fuel Ratio*) :



Gambar 4.12 Nilai LHV *synthetic gas* pada variasi rasio udara - bahan bakar (AFR)

Pada gambar 4.12 diatas menunjukkan bahwa, *trendline* penurunan nilai LHV sythetis gas yang menurun, seiring dengan peningkatan nilai rasio udara-bahan bakar (*Air Fuel Ratio*) ini disebabkan dari, peningkatan nilai rasio udara-bahan bakar (*Air Fuel Ratio*), akan meningkatkan suplai laju alir massa udara yang masuk ke dalam reaktor gasifikasi, sehingga mempengaruhi proses reaksi kimia pembentukan kandungan gas terbakar (*combustible gas*), dimana proses gasifikasi ini, membutuhkan suplai udara terbatas, maka kandungan gas terbakar (*gas CO, H₂, CH₄*) akan cenderung menurun, terutama CO dan H₂, CH₄ dimana nilai LHV CH₄ merupakan yang terbesar (35883 ki/kg) maka secara signifikan penurunan kandungan CH₄ mengakibatkan penurunan LHV syngas, namun jika suplai laju alir massa udara meningkat. Sebaliknya (*gas CO₂, N₂, O₂*), meningkat seiring dengan peningkatan suplai laju alir massa udara. Proses gasifikasi membutuhkan suplai udara yang terbatas, sehingga kandungan gas terbakar (*combustible gas*) akan cenderung meningkat, jika suplai laju alir massa udara terbatas yang dibutuhkan tepat.

4.5 Analisa laju alir massa syngas

Laju alir massa *syngas* dalam penelitian ini digunakan alat ukur *Pressure transducer* dimana alat ukur ini akan langsung membaca berapa perbedaan tekanan dengan satuan (kpa). Berikut adalah data hasil pengamatan laju alir masa *syngas*

Tabel 4.8 Nilai laju alir massa *syngas* untuk masing – masing variasi

Duty cycle	Pressure (Pa)	v max (m/s)	Re v _{max}	n	v rata-rata (m/s)	m dot (kg/s)
100%	12.4	4.620	14768.92	5.80	3.629	0.0085
95%	10.3	4.211	13460.36	5.73	3.298	0.0078
90%	9.2	3.980	12721.31	5.68	3.111	0.0073
85%	3.3	2.383	7618.946	5.28	1.831	0.0043

4.6 Efisiensi Gasifikasi

Untuk menghitung efisiensi gasifikasi maka digunakan persamaan 2.13, yaitu persamaan cold gas efficiency. Yaitu sebagai berikut :

$$\eta_{CG} = \frac{(\dot{m}_{gas} \cdot NKB_{gas})}{(\dot{m}_{biomassa} \cdot NKB_{biomassa})}$$

Dimana :

- \dot{m}_{gas} : Laju Alir massa *syngas* (kg/s)
- NKB_{gas} : Nilai Kalor Bawah (LHV) *syngas* (kJ/kg)
- $\dot{m}_{biomassa}$: Laju Alir massa nahan bakar / biomassa (kg/s)
- $NKB_{biomassa}$: Nilai Klor Bawah (LHV) pellet (kJ/kg)

Berikut adalah perhitungan efisiensi gasifikasi untuk AFR 1,12

$$\dot{m}_{syngas} = 0.0078 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{biomassa} = 0.0073 \text{ kg/s}$$

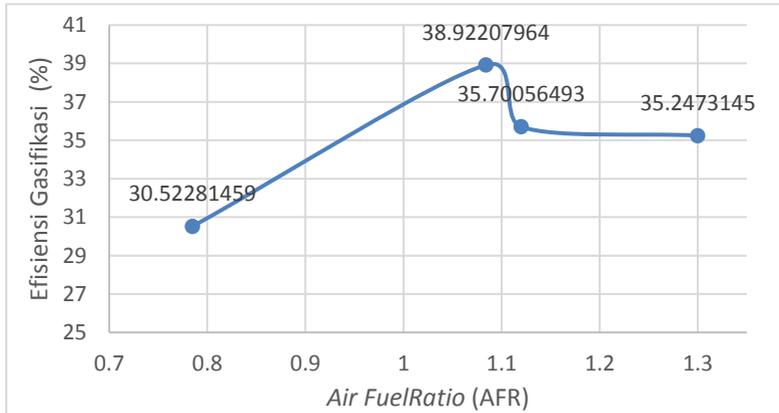
$$NKB (LHV)_{gas} = 4078.8 \text{ kJ/kg}$$

$$NKB (LHV)_{biomassa} = 12258 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{CG} = \frac{0.0078 \frac{kg}{s} \times 4078.8 \frac{kJ}{kg}}{0.0073 \frac{kg}{s} \times 12258 \frac{kJ}{kg}} \times 100 \% = 35.7 \%$$

Tabel 4.9 Efisiensi gasifikasi untuk masing-masing variasi

Nilai dari efisiensi gasifikasi untuk masing-masing AFR yang berbeda dapat dilihat pada tabel 4.7, sedangkan grafik hubungan antara perubahan AFR dan efisiensi gasifikasi dapat dilihat pada gambar 4.13



Gambar 4.13 Grafik hubungan antara perubahan AFR dan efisiensi gasifikasi

Dari tabel 4.9 dan gambar 4.13 terlihat bahwa efisiensi

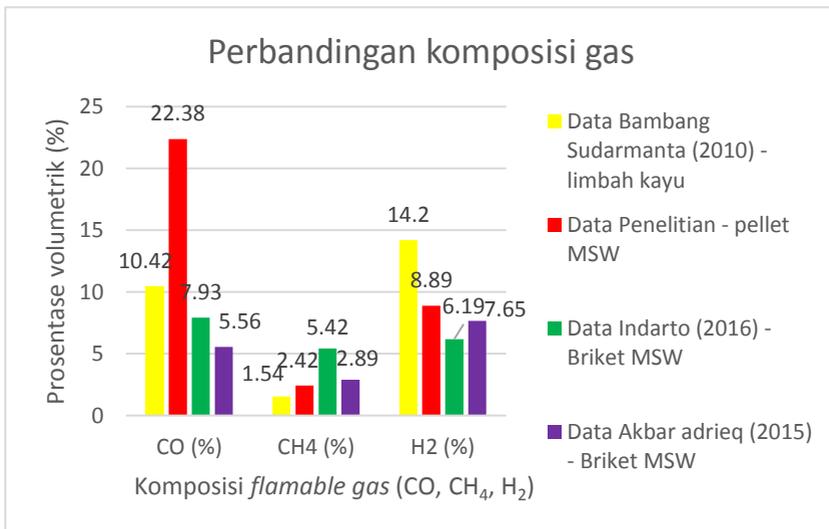
<i>Duty Cycle</i> (%)	Laju Alir massa Udara (kg/s)	Laju Alir massa Pellet MSW (kg/s)	<i>Air Fuel Ratio</i> (Rasio udara - bahan bakar)	laju alir masa <i>syngas</i>	LHV Syngas(NKB gas) (kj/kg)	LHV biomassa (NKB biomassa) kj/kg	Efisiensi (%)
85%	0.0043	0.0055	0.78	0.0043	4785.6	12258	30.52
90%	0.0073	0.00675	1.08	0.0073	4411.6	12258	38.92
95%	0.0081	0.00727	1.12	0.0078	4078.8	12258	35.7
100%	0.0099	0.00766	1.3	0.0085	3893.6	12258	35.2

gasifikasi meningkat hingga nilai AFR 1.085 dan kemudian menurun seiring dengan kenaikan AFR, hal ini terjadi dikarenakan

terjadinya penurunan nilai kalor (LHV) dari syngas, walaupun terjadi kenaikan laju alir massa syngas yang disebabkan oleh kenaikan kecepatan pembakaran (kenaikan kecepatan pembakaran ini disebabkan karena peningkatan laju alir massa udara) yang juga pada akhirnya menyebabkan oleh kenaikan laju alir massa pellet MSW.

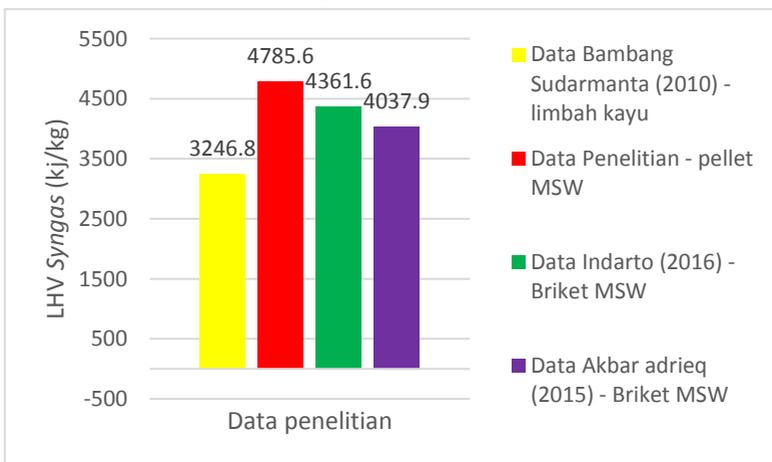
4.7 Analisa perbandingan penelitian terdahulu

Berikut merupakan analisa beberapa penelitian terdahulu proses gasifikasi menggunakan reaktor tipe *downdraft* dengan beberapa biomassa yang berbeda, seperti: Penelitian Bambang Sudarmanta (2010) – limbah kayu, Penelitian Indarto (2016) – Briket *Municipal Solid Waste* (MSW) dan penelitian oleh Akbar Adrieq (2011) – Briket MSW, yang ditinjau dari hasil *flameable gas* (CO, CH₄, H₂), Nilai kalor Bawah (*Low Heating Value*) syngas dan Efisiensi gasifikasi (*cold gas efficiency*)



Gambar 4.14 Grafik Perbandingan komposisi *flameable gas* beberapa penelitian

Dari gambar 4.14 diatas dapat dilihat bahwa hasil dari komposisi *flameable gas* tiap penelitian berbeda - beda terhadap jenis dan bentuk dari biomassa.. Penelitian yang dilakukan oleh Bambang Sudarmanta (2010) menggunakan serbuk kayu memiliki kandungan CO, CH₄, H₂ berturut turut adalah : 10,42 % ; 1,54 % ; 14,2 % . Untuk Data Indarto (2016) biomassa berupa Briket *Municipal Solid Waste* (MSW) memiliki kandungan *flameable gas* CO, CH₄, H₂ berturut turut adalah : 7.93 % ; 5,42% ; 6,13%. Sedangkan penelitian oleh Akbar Adrieq (2015) menggunakan biomassa yang sama dengan penelitian Indarto (2016) didapatkan komposisi *flameable gas* berturut – turut adalah 7.93 % ; 3,56% ; 5,85%. Dari kedua penelitian tersebut (Indarto & Akbar), walaupun menggunakan biomassa yang sama berupa briket MSW menghasilkan kandungam *flameble gas* yang berbeda hal ini dapat terjadi karena komposisi dalam pembuatan briket yang berbeda pula. Hasil penelitian dengan mengubah bentuk MSW dari Briket menjadi pellet didapatkan komposisi *flameable gas* CO, CH₄, H₂ berturut turut adalah : 22.38 % ; 2,42% ; 8,89%. Perbedaan beberapa kandungan ini akan menyebabkan perbedaan pula terhadap nilai *Low Heating Value* (LHV) *syngas* yang diuji melalui *Gas Chromathography* (GC). Nilai LHV tiap – tiap penelitian tersebut dapat dilihat pada gambar 4.15 berikut.



Gambar 4.15 Grafik Perbandingan nilai *Low Heating Value* gas beberapa penelitian

Terlihat pada gambar 4.15 diatas bahwa nilai LHV dari beberapa penelitian terdahulu seperti yang dilakukan oleh Bambang Sudarmanta menggunakan limbah kayu menghasilkan LHV gas sebesar 3246,8 kJ/kg, Indarto menggunakan Briket MSW menghasilkan LHV gas sebesar 3614,1 kJ/kg. Akbar menggunakan Briket MSW menghasilkan LHV gas sebesar 2910,7 kJ/kg. Sedangkan penelitian dengan menggunakan pellet MSW diperoleh nilai LHV paling tinggi yakni 4785,6 kJ/kg. Hal ini sesuai teori yang digunakan bahwa penggunaan pellet akan menghasilkan nilai LHV lebih tinggi Karena :

1. Bulk Density lebih tinggi. lebih besar 115% daripada campuran potongan kayu / serbuk kayu (Rollinson. Andrew, 2016) sehingga akan menghasilkan komposisi *flameable gas* yang lebih tinggi daripada serbuk kayu
2. Moisture content lebih rendah 10-15 % (*Production and Gasification of Waste Pellets*.University of BORAS) sedemikian hingga nilai LHV biomassa akan semakin tinggi berdasarkan persamaan:

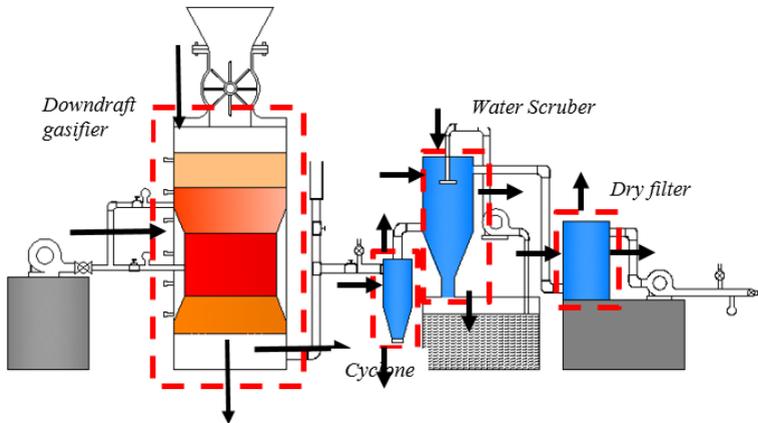
$$LHV = HHV - hg \left(\frac{9H}{100} + \frac{M}{100} \right)$$

3. Dengan menggunakan briket, Karena ukurannya yang relatif besar terdapat celah antara biomassa sehingga mengakibatkan pembakaran sempurna ,bukan lagi gasifikasi (Mohammad Nazmi Zaid moni .dkk) mengakibatkan proses termokimia kurang optimal dan menghasilkan komposisi *flameable gas* kurang maksimum Karena proses termokimia yang seharusnya menghasilkan CO, CH₄, H₂ mengalami pembakaran sempurna menjadi CO₂ dan seagian O₂ maupun N₂.
4. Semakin kecil ukuran bahan bakar perpindahan panas dan masa partikel akan semakin efektif selama luas permukaan

/ volume lebih tinggi Dan fraksi char yang terbentuk selama pirolisis diharapkan lebih rendah dan lebih berpori karena pelepasan volatil yang lebih tinggi. (Babu and Chaurasia, 2003) ukuran pellet yang lebih kecil dibandingkan briket menghasilkan LHV gas yang lebih tinggi Karena, biomassa dapat terkonversi optimal menjadi *flameable gas* CO, CH₄, H₂.

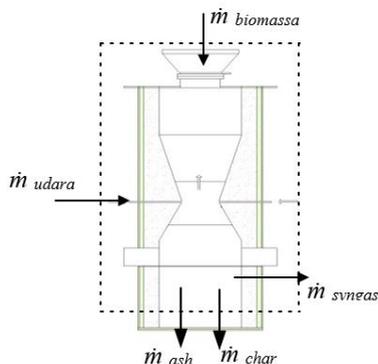
4.8 Analisa kesetimbangan massa (*mass balance*)

Analisa kesetimbangan massa pada sistem gasifikasi yang terbagi pada beberapa komponen seperti : Reaktor gasifikasi, *cyclone*, *water scrubber*, *Dry filter*. Terlihat seperti skema di bawah ini :



Gambar 4.16 skema Analisa kesetimbangan massa

- Analisa kesetimbangan massa pada reaktor
Analisis kesetimbangan massa pada duty cycle 100 %, AFR 1.3



$$\begin{aligned}\sum massa_{masuk} &= \sum massa_{masuk} \\ \dot{m}_{udara} + \dot{m}_{biomassa} &= \dot{m}_{syngas} + \dot{m}_{ash} + \dot{m}_{char} \\ (9.96 + 7.66) \text{ g/s} &= (8.5 + 4.94) \text{ g/s} \\ 17.2 \text{ g/s} &> 13.44 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

Tabel 4.10 Tabel Analisa kesetimbangan masa (*mass balance*) reaktor

balance massa reaktor							
AFR	laju alir massa masuk (g/s)			laju alir massa keluar (g/s)			
	udara	biomassa	total	syngas	ash + char	total	effisi (%)
1.3	9.96	7.66	17.62	8.5	4.94	13.44	23.72
1.12	8.14	7.27	15.41	7.8	5.02	12.82	16.80
1.085	7.32	6.75	14.07	7.3	5.009	12.30	12.51
0.785	4.34	5.5	9.84	4.3	5.012	9.312	5.36

Dari tabel 4.10 diatas terlihat bahwa analisa kesetimbangan massa (*mass balance*) semakin rendah AFR Temperatur reaktor rendah Ash dan char semakin tinggi dikarenakan pembakaran kurang optimal serta laju alir massa masuk ($\dot{m}_{udara} + \dot{m}_{biomassa}$) \neq laju alir massa keluar ($\dot{m}_{syngas} + \dot{m}_{ash \& \text{ char}}$) dimana pada *Duty Cycle* 100 % laju alir massa masuk sebesar 0,0176 kg/s serta laju alir massa keluar 0,00973 kg/s dengan delta (Δ) = 0,00787 kg/s . Delta ini dimungkinkan merupakan *losses* yang terjadi pada sistem gasifikasi antara lain pada reaktor, *cyclone*, *water scrubber*, *dry filter* serta *losses mayor* dan *minor* pada perpipaan dan elbow.

Halaman Sengaja di kosongkan

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan pengujian yang dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

- a. Semakin tinggi laju alir massa udara akan semakin tinggi pula harga *Air Fuel Ratio* (AFR), yang mengakibatkan kenaikan temperatur pada reaktor dan kandungan *synthetic gas* pada gas yang mudah terbakar (*combustible gas*) CO, H₂, CH₄ cenderung mengalami penurunan, sebaliknya gas O₂, N₂, CO₂ mengalami kenaikan secara perlahan.
- b. Distribusi temperatur zona *drying* pada AFR 0,78 adalah 89 °C, zona pirolisis 125 °C - 420 °C, zona oksidasi 761 °C dan zona reduksi 402 °C. untuk AFR 1,3 rata – rata temperatur mengalami peningkatan yakni zona oksidasi adalah 104 °C, zona pirolisis 149 °C - 508 °C, zona oksidasi 967 °C dan zona reduksi 491 °C.
- c. Suhu tertinggi pada reaktor adalah 967 °C pada zona oksidasi partial hal ini terjadi karena terdapat beberapa reaksi seperti : *char combustion*, *Hydrogen combustion*, *partial oxidation* , dimana pada proses tersebut masing masing reaksi akan melepaskan panas, semakin tinggi udara yang dihembuskan semakin tinggi ΔH
- d. Nilai Rasio udara-bahan bakar (*Air Fuel Ratio*) yang terbaik, ditinjau dari kosentrasi kandungan *synthetic gas* pada gas mudah terbakar (*combustible gas*) yaitu pada AFR 0,78.
- e. Semakin besar nilai rasio udara-bahan bakar (*Air Fuel Ratio*), maka nilai kandungan energi ditinjau dari Low Heating Value *synthetic gas* semakin menurun.
- f. Nilai Rasio udara-bahan bakar (*Air Fuel Ratio*) yang terbaik, ditinjau dari nilai kandungan energi (Low Heating Value) *synthetic gas* yaitu pada AFR 0,78 sebesar 4785,6 kJ/kg

- g. Nilai Rasio udara-bahan bakar (Air Fuel Ratio) yang terbaik ditinjau dari efisiensi gasifikasi (%) yaitu pada AFR 1,08 dengan nilai efisiensi gasifikasi sebesar 38,92 %
- h. Nilai batas bawah dan batas atas pasokan udara untuk kandungan gas yang flammable (CO, H₂, CH₄) dari 0,78-1,3

5.2. Saran

Adapun saran dari pengujian adalah sebagai berikut :

- a. Untuk variasi AFR dalam hal ini pengaturan laju alir massa udara melalui Dimmer hendaknya di variasikan dengan rentang rentang yang lebih kecil missal dengan *duty cycle* 0,5 atau 1 %.
- b. Dari hasil penelitian ini, didapatkan komposisi gas berupa *flameable* dan *Unflameable gas*. Kandungan tertinggi terdapat pada N₂ sekitar 40 % lebih, jadi untuk penelitian selanjutnya diharapkan mampu menggunakan *gasifying agent* berupa O₂ murni.
- c. Dibutuhkan penelitian lebih lanjut untuk sistem pengaduk dalam reaktor, dimana hal tersebut dapat mempengaruhi temperatur pada setiap zona dalam reaktor yang belum tereduksi dengan baik.

Halaman Sengaja di kosongkan

DAFTAR PUSTAKA

1. Sugiono A., Anindhita, Boedoyo, M. S., Adiarso. 2014. *Pengembangan Energi dalam Mendukung Program Substitusi BBM. Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. Jakarta, Indonesia*
2. Dinas Kebersihan dan Pertamanan (DKP) Kota Surabaya. 2009. Surabaya, Indonesia.
3. **Sudarmanta, Bambang. 2010 , Variasi Rasio Gasifying Agent – Biomassa Terhadap Karakterisasi Gasifikasi Tongkol Jagung Pada Reaktor Downdraft , Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.**
4. Ardianto, Ferry. 2014 , *Karakterisasi Gasifikasi Biomassa Serpihan Kayu Pada Reaktor Downdraft Sistem Batch Dengan Variasi Air Fuel Ratio (AFR) Dan Ukuran Biomassa* , Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
5. Suyitn, Techn. 2007. *Teknologi Gasifikasi Biomasa untuk Penyediaan Listrik dan Panas Skala Kecil Menengah ; Dalam Kumpulan Potret Hasil Karya IPTEK. UNS Press. Surakarta.*
6. Kahardiansyah, Falah 2015. *Studi Eksperimen Rancangan Burner Type Partially Premixed dengan Bahan Bakar Syngas Biomassa Serbuk kayu dengan Variasi Diameter Outlet Bahan Bakar. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.*
7. Nyakuma, dkk. 2016, *GASIFICATION OF OIL PALM EMPTY FRUIT BUNCHES (OPEFB) BRIQUETTES FOR BIO-SYNGAS PRODUCTION. Centre of Hydrogen Energy, Institute of Future Energy, Universiti Teknologi Malaysia, 81310 UTM Johor Bahru, Johor, Malaysia bDepartment of Chemical Engin*
8. Basu, Pabir. *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory Burlington, MA 01803, USA*

- Elsevier*, The Boulevard, Langford Lane Kidlington, Oxford, OX5 1GB, UK 2013
9. Reed B, Das A. 1988. ***Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems*** Colorado
 10. Husein , M. Z. M.. (2005), “***Semangat Berhemat Energi: Belajar dari Negara Maju***”. Google Search Engine. Indonesia.
 11. Rajvanshi A., 2006, ***Biomass Gasification - chapter 4 in book Alternative Energy in Algriculture***. Y. Goswani. India
 12. Guo F. ., 2014. ***Effect Of Design and Operating Parameters on the Gasification Process of Biomass in a Downdraft Fixed Bed: An Experimental Study***. *China University of Mining and Technology* , Xuzhou
 13. Maulana A.R. 2015. ***Karakteristik Unjuk Kerja Mesin Diesel Generator Set Sistem Dual Fuel Solar dan Syngas Serbuk Kayu***. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Mesin ITS.Surabaya
 14. Sudarmanta, Bambang. 2015. ***Dual Fuel Engine Performance Using Biodiesel and Syn-Gas from Rice Husk Downdraft Gasification for Power Generation***. International Seminar Mechanical Engineering Department, Faculty of Technology Industry, Sepuluh Nopember Institut of Technology. Surabaya, Indonesia
 15. Sudarmanta, B., Sungkono, D., Darsopuspito, S., Kadarisman, Isbunyamin. 2011. ***Pengaruh Suhu Reaktor Gasifier dan Ukuran Partikel terhadap Karakterisasi Gasifikasi Biomassa Limbah Kayu Pada Reaktor Gasifier Tipe Downdraft***. Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya, Indonesia
 16. Molino. Antonio ., *Chianese Simeone .2015. Biomass gasification technology: The state of the art overview A. Molino et al./Journal of Energy Chemistry* 25 (2016) 10–2

17. Rollngson. AN, Williams O.2016.”*Expweriments on torrefied wood pellet*”.R.soc.open.sci.3:150578

LAMPIRAN

1. Data Laju alir massa udara (kg/s) menggunakan alat ukur *Pressure Transducer*

Duty cycle	Pressure (Pa)	v max (m/s)	Re v _{max}	n	v rata-rata (m/s)	m dot (kg/s)
100%	15.7	5.199647628	16618.34422	5.897057951	4.098269787	0.0096
95%	11.4	4.430742517	14160.8835	5.77196263	3.47540578	0.0082
90%	9.7	4.087050031	13062.42444	5.708842825	3.197774561	0.0075
85%	3.8	2.558090385	8175.789901	5.342553501	1.97036556	0.0046
80%	3.4	2.41971126	7733.523023	5.299079289	1.860065593	0.0044
75%	3.2	2.347464732	7502.619361	5.275383244	1.802544707	0.0042
70%	3.2	2.347464732	7502.619361	5.275383244	1.802544707	0.0042
65%	3.2	2.347464732	7502.619361	5.275383244	1.802544707	0.0042
60%	3.2	2.347464732	7502.619361	5.275383244	1.802544707	0.0042
55%	3.2	2.347464732	7502.619361	5.275383244	1.802544707	0.0042
50%	3.2	2.347464732	7502.619361	5.275383244	1.802544707	0.0042

2. Tabel A-4 incropera (ρ komposisi gas)

AFR 0.785			
Komposisi	Persentase volume (%)	ρ (Kg/m ³), pada T = 300 K [17]	ρ syngas
CO	24.79	1.123	1.06978579
H ₂	9.97	0.0807	
CH ₄	2.44	0.688	
CO ₂	7.92	1.773	
N ₂	48.77	1.123	
O ₂	6.11	1.284	

AFR 1,085			
Komposisi	Persentase volume (%)	ρ (Kg/m ³), pada T = 306 K [17]	ρ syngas
CO	22.13	1.119	1.05328793
H ₂	8.89	0.0797	
CH ₄	2.12	0.664	
CO ₂	9.21	1.753	
N ₂	48.81	1.108	
O ₂	6.5	1.265	

AFR 1,12			
Komposisi	Persentase volume (%)	ρ (Kg/m ³), pada T = 312 K [17]	ρ syngas
CO	20.18	1.109	1.04828206
H ₂	7.98	0.0757	
CH ₄	2.41	0.604	
CO ₂	10.62	1.703	
N ₂	48.99	1.1	
O ₂	7	1.202	

AFR 1,3			
Komposisi	Persentase volume (%)	ρ (Kg/m ³), pada T = 319 K [17]	ρ syngas
CO	19.41	1.054	1.04058328
H ₂	6.86	0.0723	
CH ₄	2.39	0.589	
CO ₂	10.97	1.66	
N ₂	49.89	1.06	
O ₂	9.35	1.134	

3. Nilai kalor Bawah (LHV) gas mampu bakar (CO, CH₄, H₂)

Component	H2	CO	CH4	C2H6	C2H4	C2H2	Company
HHV	12.745	12.633	39.819	70.293	63.414		TU Wien
	12.769	12.622	39.781	69.693	63	58.059	NREL
	12.753	12.626	39.721	69.595	62.952		ECN
	12.766	12.641	39.847	70.402	63.998	58.975	DMT
	12.761	12.634	39.747	69.636	62.989	58.039	Carbona
	12.76	12.617	39.663	69.511	63.042	57.934	Univ. Sherbrook
	12.758	12.631	39.739				Vattenfall
	12.761	12.634	39.75	69.642	62.994	58.022	Nykomb
LHV	10.783	12.633	35.883	64.345	59.457		TU Wien
	10.788	12.622	35.814	63.748	59.036	56.078	NREL
	10.789	12.626	35.796	63.704	59.024		ECN
	10.8	12.6	35.8	63.71		56.03	Verenum
	10.757	12.641	35.787	64.333	59.938	56.924	DMT
	10.748	12.634	35.725	63.605	59.011	56.028	Carbona

10.793		35.81				Vattenfall
10.8	12.634	35.823	63.756	59.07	56.06	Nykomb
10.797	12.635	35.821	63.749	59.068		TPS
10.789	12.630	35.812	63.744	59.033	56.088	Bioelettrica

Component	C3H8	C3H6	i-C4H8	i-C4H10	n-C4H10	C6H6	Company
------------------	-------------	-------------	---------------	----------------	----------------	-------------	----------------

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan dari keluarga sederhana di Tuban, 8 September 1993, merupakan anak kedua dari dua bersaudara pasangan Bapak Sumarno dengan Ibu Masti'ah, yang beralamat di Desa Latsari, Kecamatan Tuban, Kabupaten Tuban. Pendidikan formal pertama adalah SDN Latsari 2 Tuban, SMP N 1 Tuban, dan SMAN 1 Tuban. Kemudian penulis lulus dan diterima di Jurusan D-3 Teknik Mesin Produksi Kerjasama ITS-

DISNAKERTRANSDUK Prov. Jawa Timur melalui seleksi ujian masuk D-3 pada tahun 2012 dan terdaftar dengan Nomor Registrasi Pokok (NRP) 2112039011.

Pada Tahun 2015 penulis lulus D-3 ITS kemudian melanjutkan kuliah lintas jalur dan diterima di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan nomor pokok mahasiswa 2115105033. Penulis merupakan anggota Laboraturium Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar. Penulis juga mengikuti publikasi Ilmiah Nasional di Universitas Kristen Petra Surabaya sebagai pengisi / pemateri tahun 2017 Penulis mengambil tugas akhir di bidang Konversi Energi dan mempelajari tentang biodiesel dan gasifikasi,