



TESIS (TM 142501)

**STUDI EKSPERIMENTAL GASIFIKASI BRIKET
MUNICIPAL SOLID WASTE DENGAN REAKTOR
GASIFIKASI TIPE *DOWNDRAFT* BERPENGENDALI
SUHU OTOMATIS PADA ZONA *PARTIAL*
*COMBUSTION***

INDARTO YUWONO
NRP 2114202016

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T.

PROGRAM MAGISTER
REKAYASA KONVERSI ENERGI
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016



THESES (TM 142501)

***MUNICIPAL SOLID WASTE GASIFICATION
EXPERIMENTAL STUDY ON DOWNDRAFT
GASIFIER USING AUTOMATIC TEMPERATURE
CONTROL ON THE PARTIAL COMBUSTION ZONE***

INDARTO YUWONO

NRP 2114202016

SUPERVISOR

Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T.

MAGISTER PROGRAMME

ENERGY CONVERSION ENGINEERING

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT

INDUSTRIAL TECHNOLOGY FACULTY

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2016

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (MT)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh :

INDARTO YUWONO

Nrp. 2114202016

Tanggal Ujian : 20 Juli 2016

Periode Wisuda : September 2016

Disetujui oleh:

1. Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT

NIP. 197301161997021001


(Pembimbing)

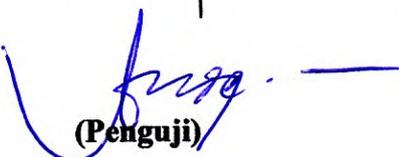
2. Dr. Bambang Arip D, ST, M.Eng

NIP. 197804012002121001


(Penguji)

3. Dr. Ir Budi Utomo K W, ME

NIP. 195312191981031001


(Penguji)

4. Ary Bachtiar KP, ST, MT, Ph.D

NIP. 197105241997021001


(Penguji)



Direktur Program Pascasarjana,


Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc, Ph.D

NIP. 196012021987011001

STUDI EKSPERIMENTAL GASIFIKASI BRIKET *MUNICIPAL SOLID WASTE* DENGAN REAKTOR GASIFIKASI TIPE *DOWNDRAFT* BERPENGENDALI SUHU OTOMATIS PADA *ZONA PARTIAL COMBUSTION*

Nama Mahasiswa : Indarto Yuwono
ID Mahasiswa : 2114202016
Pembimbing : Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT
Co – Supervisor : ---

ABSTRAK

Peningkatan jumlah penduduk menyebabkan peningkatan kebutuhan energi dan juga timbulan sampah. Gasifikasi adalah proses termokimia yang digunakan dalam proses konversi sampah (*MSW*) menjadi energi berupa gas yang disebut *producer gas* atau *syngas* (*synthetic gas*). Penelitian dengan metode eksperimental menggunakan briket *MSW* ini bertujuan untuk meneliti proses gasifikasi briket *MSW* berpengendali suhu otomatis pada zona *partial combustion*, serta untuk menemukan pengaruh penggunaan pengendalian suhu zona *partial combustion* suhu secara otomatis pada proses gasifikasi briket *MSW* terhadap produktifitas dan kualitas *syngas* dan korelasinya terhadap kapasitas gasifikasi.

Eksperimen dilakukan dengan menggunakan *gasifier* tipe *downdraft*, dengan melakukan proses gasifikasi briket *MSW* tanpa sistem pengendalian suhu otomatis dengan laju alir massa udara yang bervariasi dengan tujuan untuk mengumpulkan data distribusi suhu, AFR, LHV *syngas*, dan efisiensi energi gasifikasi yang akan digunakan sebagai acuan pemrograman sistem pengendali suhu otomatis yang akan digunakan pada eksperimen proses gasifikasi berikutnya. Eksperimen berikutnya yaitu proses gasifikasi briket *MSW* dengan menggunakan sistem pengendalian suhu yang telah diprogram berdasar eksperimen sebelumnya, dan menghasilkan data yang dibandingkan dengan eksperimen gasifikasi briket *MSW* tanpa sistem pengendali suhu otomatis.

Pada proses gasifikasi dengan GCU dengan perubahan *setpoint value* (SV) dari 500⁰C menjadi 750⁰C maka terjadi peningkatan laju alir *syngas* sebesar 15,8% , peningkatan nilai LHV sebesar 7% , dan efisiensi gasifikasi yang mengalami peningkatan sebesar 16%. Bila dibandingkan dengan proses gasifikasi tanpa GCU maka nilai tertinggi efisiensi energi gasifikasi pada proses gasifikasi dengan GCU mengalami peningkatan sebesar 2%. Dari hasil yang telah disebutkan dapat disimpulkan adanya pengaruh pemakaian sistem pengendali suhu otomatis terhadap produktifitas dan kualitas *syngas* dan juga terkorelasi terhadap kapasitas gasifikasi.

Kata kunci : *municipal solid waste*, gasifikasi, *gasifier* tipe *downdraft*, pengendalian suhu operasi otomatis, kualitas dan kuantitas *syngas*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

**MUNICIPAL SOLID WASTE GASIFICATION EXPERIMENTAL
STUDY ON DOWNDRAFT GASIFIER
USING AUTOMATIC TEMPERATURE CONTROL
ON THE PARTIAL COMBUSTION ZONE**

Name : Indarto Yuwono
Student ID : 2114202016
Supervisor : Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT
Co – Supervisor : ----

ABSTRACK

The increase in population led to an increase in energy demand and waste generated. Gasification is a thermochemical process that is used to convert the municipal solid waste into energy. This study aims to examine the process of gasification of MSW briquettes on a downdraft gasifier that uses an automatic temperature control in partial combustion zone and also to discover the effect of the automatic partial combustion zone temperature control in the process of gasification of MSW briquettes on productivity and quality of the syngas and its correlation to the gasification capacity.

Experiments conducted using downdraft gasifier, by doing MSW briquettes gasification process experiments without temperature control system with the mass flow rate of air is varied in order to gather data on the distribution of temperature, AFR, LHV syngas, gasification and energy efficiency that will be used as a reference for programming the automatic temperature control system that will be used in subsequent experiments. The next experiments are briquettes MSW gasification process using the temperature control system has been programmed based on data from previous experiments, and generate data that compared with the experimental gasification of MSW briquettes without an automatic temperature control system.

In the gasification process with a temperature control system using a setpoint value of 500⁰C there is an increase of LHV value by 7%, an increase in syngas mass flow rate of 15,8%, an increase of gasification energy efficiency by 16%. When compared to gasification without GCU there is an increase at highest energy gasification efficiency by 2%. From the results mentioned it can be concluded the use of automatic temperature control system affect the productivity and quality of the syngas and also correlated to the gasification capacity.

Key words: municipal solid waste, gasification, downdraft gasifier, automatic temperature control operation, the quality and quantity of syngas.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	5
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	7
2.1 Biomassa	7
2.1.1 Komposisi biomassa	8
2.1.2 Kelembaban biomassa	10
2.1.3 Densitas biomassa	10
2.1.4 Nilai kalor biomassa	11
2.2 Gasifikasi	12
2.2.1 Media gasifikasi	13
2.2.2 Proses gasifikasi	14
2.2.3 Reaktor gasifikasi tipe <i>fixed bed</i>	17
2.2.4 Parameter-parameter pengoperasian reaktor gasifikasi	22

2.2.5	Parameter-parameter unjuk kerja reaktor gasifikasi	27
2.2.6	Pengendalian otomatis reaktor gasifikasi	29
2.3	Penelitian Terdahulu	32
2.3.1	Penelitian karakteristik <i>MSW</i>	32
2.3.2	Penelitian proses gasifikasi	35
2.3.3	Penelitian pada reaktor gasifikasi berpengendali Otomatis	40
BAB 3	METODOLOGI PENELITIAN	43
3.1	Rancangan Penelitian	43
3.2	Bahan, Alat, dan Perlengkapan Penelitian	47
3.2.1	Briket <i>MSW</i>	47
3.2.2	Reaktor gasifikasi	47
3.2.3	Alat ukur	50
3.2.4	<i>Temperature controller</i>	51
3.3	Prosedur Eksperimen dan Pengambilan Data	51
BAB 4	Hasil dan Pembahasan	
4.1	Karakteristik Briket <i>MSW</i>	53
4.2	Data dan Analisa Eksperimen Gasifikasi Tanpa Sistem Pengendalian suhu secara otomatis	54
4.2.1	Distribusi suhu gasifikasi	54
4.2.2	<i>Air – fuel ratio</i>	57
4.2.3	Komposisi kandungan <i>syngas</i>	59
4.2.4	Nilai kalor <i>syngas</i>	61
4.2.5	Efisiensi gasifikasi	63
4.3	Data dan analisa Eksperimen Dengan Sistem Pengendalian Suhu Otomatis	65
4.3.1	Suhu zona <i>partial combustion</i> dengan pengendalian otomatis	67
4.3.2	Distribusi suhu gasifikasi berpengendalian otomatis	69

4.3.3 Air – Fuel Ratio	72
4.3.4 Nilai kalor <i>syngas</i>	74
4.3.5 Efisiensi gasifikasi	76
4.4 Perbandingan Parameter Operasi dan Unjuk Kerja Proses Gasifikasi Briket MSW	77
BAB 5 Penutup	
5.1 Kesimpulan	81
5.2 Saran	82
DAFTAR PUSTAKA	83
LAMPIRAN	85

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Karakteristik dari reaktor gasifikasi <i>fixed bed</i>	19
Tabel 2.2	Klasifikasi komponen dan hasil analisa karakteristik komponen sampah	33
Tabel 2.3	Analisa <i>proximate</i> dari briket dan referensinya (biomassa dan batubara)	34
Tabel 2.4	Energi spesifik dari material dan briket	34
Tabel 3.1	Tabel variabel-variabel dalam penelitian	45
Tabel 4.1	Data laju alir massa udara dan briket <i>MSW</i> serta <i>Air- Fuel Ratio</i>	57
Tabel 4.2	Komposisi kandungan <i>syngas</i>	59
Tabel 4.3	Nilai LHV dari senyawa gas yang dapat terbakar	61
Tabel 4.4	Nilai kalor <i>syngas</i> untuk tiap variasi AFR	62
Tabel 4.5	Efisiensi gasifikasi untuk masing-masing variasi	64
Tabel 4.6	Air - fuel ratio gasifikasi briket <i>MSW</i> dengan pemakaian GCU	73
Tabel 4.7	Komposisi senyawa dalam <i>syngas</i> hasil proses gasifikasi briket <i>MSW</i> dengan pemakaian GCU	75
Tabel 4.8	Nilai kalor <i>syngas</i> hasil proses gasifikasi briket <i>MSW</i> dengan pemakaian <i>MSW</i>	76
Tabel 4.9	Efisiensi gasifikasi briket <i>MSW</i> dengan pemakaian GCU	77

Halaman ini sengaja dilosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema reaktor (a) <i>updraft</i> ; (b) <i>downdraft</i> , dan reaksi-reaksi yang ada pada tiap zona proses gasifikasi	20
Gambar 2.2	Skema reaktor tipe <i>crossdraft</i>	21
Gambar 2.3	Efek perubahan ER	23
Gambar 2.4	Profil suhu dan zona pada reaktor gasifikasi <i>updraft</i>	25
Gambar 2.5	Profil suhu dan zona pada reaktor gasifikasi <i>downdraft</i>	26
Gambar 2.6	Blok diagram dasar dari proses gasifikasi	31
Gambar 2.7	Diagram blok sistem pengendalian proses dalam reaktor gasifikasi	32
Gambar 2.8	Grafik energi panas yang dilepaskan dari pembakaran briket	35
Gambar 2.9	Pengaruh suhu reaktor dan ukuran butiran terhadap produksi <i>syngas</i>	36
Gambar 2.10	Grafik air-fuel ratio (<i>AFR</i>) vs (a) Efisiensi gasifikasi, (b) <i>LHV</i> , (c) Kandungan <i>synthetic gas</i> .	37
Gambar 2.11	Efek kadar air kadar kelembaban dan <i>superficial velocity</i> terhadap temperatur dan laju konsumsi biomassa ($\dot{m}_{biomassa}$) pada proses gasifikasi.	38
Gambar 2.12	Efek <i>equivalence ratio</i> dan laju pemasokan biomassa terhadap temperatur pada reaktor gasifikasi <i>downdraft</i>	39
Gambar 2.13	Grafik perbandingan antara efisiensi dan komposisi gas pada proses gasifikasi tanpa pengendalian otomatis dan pada proses gasifikasi dengan pengendalian otomatis	41
Gambar 3.1	Skema peralatan eksperimen	46
Gambar 3.2	Unit utama reaktor gasifikasi <i>downdraft</i>	48
Gambar 3.3	(a) <i>blower</i> , dan (b) <i>suction pump</i>	48
Gambar 3.4	(a) <i>Cyclone</i> ; (b) <i>Water scrubber</i>	49
Gambar 4.1	Briket <i>MSW</i> yg digunakan dalam penelitian	53

Gambar 4.2	Distribusi suhu gasifikasi dengan <i>duty cycle</i> blower 10%	54
Gambar 4.3	Distribusi suhu gasifikasi dengan <i>duty cycle</i> blower 15%	55
Gambar 4.4	Distribusi suhu gasifikasi dengan <i>duty cycle</i> blower 20%	55
Gambar 4.5	Distribusi suhu gasifikasi dengan <i>duty cycle</i> blower 25%	56
Gambar 4.6	Grafik perbandingan distribusi suhu rata-rata untuk laju alir massa udara yang bervariasi	57
Gambar 4.7	Hubungan antara perubahan <i>duty cycle</i> dan laju alir massa udara, laju alir massa briket serta <i>air – fuel ratio</i>	59
Gambar 4.8	Grafik hubungan antara AFR dan komposisi <i>syngas</i>	60
Gambar 4.9	Grafik hubungan antara perubahan AFR dengan LHV <i>syngas</i>	63
Gambar 4.10	Grafik hubungan antara perubahan AFR dan efisiensi gasifikasi	64
Gambar 4.11	Diagram alir logika pengendalian suhu gasifikasi pada GCU	67
Gambar 4.12	Grafik suhu pada zona <i>partial combustion</i> berpengendalian otomatis dengan setpoint suhu 500 ⁰ C	68
Gambar 4.13	Grafik suhu pada zona <i>partial combustion</i> berpengendalian otomatis dengan setpoint suhu 750 ⁰ C	69
Gambar 4.14	Grafik distribusi suhu gasifikasi berpengendalian otomatis dengan <i>setpoint value</i> suhu 500 ⁰ C	71
Gambar 4.15	Grafik distribusi suhu gasifikasi berpengendalian otomatis dengan <i>setpoint value</i> 750 ⁰ C	71
Gambar 4.16	Grafik hubungan antara perubahan laju alir massa udara dengan perubahan suhu rata-rata zona <i>partial combustion</i> proses gasifikasi tanpa dan dengan GCU	72
Gambar 4.17	Perbandingan antara AFR proses gasifikasi dengan GCU dengan AFR proses gasifikasi tanpa GCU	74
Gambar 4.18	Perbandingan antara laju alir massa briket MSW pada proses gasifikasi dengan GCU dan laju alir massa <i>syngas</i> pada proses gasifikasi GCU	74

Gambar 4.19	Perbandingan antara laju alir massa <i>syngas</i> pada proses gasifikasi dengan GCU dan laju alir massa <i>syngas</i> pada proses gasifikasi tanpa GCU	75
Gambar 4.20	Grafik perbandingan nilai LHV <i>syngas</i> pada proses gasifikasi dengan GCU dan nilai LHV <i>syngas</i> pada proses gasifikasi tanpa GCU	76
Gambar 4.21	Grafik perbandingan efisiensi gasifikasi	78
Gambar 4.22	Grafik perbandingan suhu operasional rata-rata zona <i>partial combustion</i> , nilai LHV <i>syngas</i> , laju alir massa <i>syngas</i> , dan efisiensi energi gasifikasi	79

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Diagram Alir Penelitian	85
Lampiran 2.	Diagram alir penelitian tanpa penggunaan GCU	88
Lampiran 3.	Diagram alir penelitian dengan penggunaan GCU	89
Lampiran 4.	Pengatur putaran <i>blower</i>	91
Lampiran 5.	Rangkaian pengendali suhu otomatis (GCU)	92

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Berdasarkan data kependudukan (BPS dan Sensus Nasional Tahunan), jumlah penduduk Indonesia pada periode 2000-2010 bertambah dari 206,3 juta jiwa (2000) menjadi 237,6 juta jiwa (2010) dengan laju pertumbuhan rata-rata sekitar 1,43% per tahun. Jumlah rumah tangga (RT) untuk periode yang sama adalah 52,0 juta RT (2000) dan 61,2 juta RT (2010) dengan laju pertumbuhan rata-rata sekitar 1,63% per tahun (IEO, 2012). Seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk maka kebutuhan energi semakin meningkat, demikian juga timbulan sampah juga meningkat. Seperti diketahui solusi masalah energi dan timbulan sampah telah banyak diusahakan di Indonesia dan kebanyakan dijalankan secara terpisah.

Perkembangan teknologi terkini telah memungkinkan untuk menjadikan sampah sebagai sumber energi terbarukan dengan menggunakan proses termokimia. Kelebihan penggunaan proses termokimia, menurut Arena (2012) adalah sebagai berikut :

1. Pengurangan jumlah sampah dengan lebih cepat,
2. Pengurangan lahan untuk pengolahan sampah,
3. Pemusnahan bahan organik pencemar,
4. Menjadikan sampah bahan organik pencemar lebih terkonsentrasi dan tidak bergerak,
5. Penggunaan bahan yang dapat di daur ulang pada sisa proses,
6. Pengurangan emisi gas rumah kaca,
7. Mengurangi beban pada lingkungan hidup,
8. Pengambilan energi terbarukan dari sampah sangat sesuai untuk kelestarian lingkungan hidup.

Salah satu potensi timbulan sampah yang dapat dikonversikan menjadi energi adalah timbulan sampah padat yang dihasilkan masyarakat, atau lebih dikenal sebagai *Municipal Solid Waste (MSW)*. *MSW* dapat digunakan sebagai

sumber biomassa setelah melalui proses pemilahan, pengeringan, dan pencacahan saja ataupun dapat juga ditambahkan proses pembriketan. Kelebihan utama dari proses pembriketan adalah peningkatan densitas, dan selain itu lebih mudah dalam penyimpanan dan pemasokan dalam reaktor gasifikasi (Reed dan Das, 1988)

Gasifikasi adalah salah satu proses termokimia yang dapat digunakan dalam proses konversi sampah menjadi energi. Gasifikasi mempunyai beberapa langkah umum dalam prosesnya, yaitu proses pengeringan, proses pirolisis, proses reduksi, dan proses pembakaran sebagian (*partial combustion*). Selain itu pada gasifikasi juga menggunakan media gasifikasi berupa udara, oksigen ataupun uap air. Gas yang dihasilkan oleh proses gasifikasi biasa disebut sebagai *producer gas* atau *syngas (synthetic gas)*. *Syngas* yang dihasilkan oleh proses gasifikasi dapat digunakan secara langsung dengan cara dibakar, dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk motor pembakaran dalam, ataupun digunakan sebagai bahan baku untuk proses kimia lebih lanjut.

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). 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.

Penggunaan *syngas* pada motor pembakaran dalam, membutuhkan beberapa syarat, salah satu syaratnya adalah *syngas* harus memiliki kadar tar yang rendah, kurang dari 100 mg/Nm^3 (Arena, 2012), karena endapan tar pada bagian-bagian yang bergerak pada motor pembakaran dalam bisa mengurangi unjuk kerja

dan umur operasionalnya. Dari beberapa tipe reaktor gasifikasi yang ada, reaktor tipe *fixed bed downdraft* menghasilkan gas dengan kandungan tar terendah, yaitu pada kisaran 0,015-3.0 g/Nm³ (Basu, 2013), sehingga reaktor dengan tipe ini sangat tepat digunakan sebagai penghasil gas yang digunakan pada motor pembakaran dalam. .

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.

Pengaturan jumlah udara yang masuk dalam reaktor gasifikasi untuk mengendalikan suhu proses gasifikasi 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* berubah-ubah pula ataupun terjadi kondisi reaktor yang tidak bisa berfungsi. Oleh karena itu temperatur operasi dari reaktor gasifikasi secara kontinyu diawasi agar saat terjadi perubahan suhu dapat diatasi, salah satu caranya yaitu dengan mengatur jumlah udara masuk dalam reaktor.

Pengawasan suhu operasional gasifikasi dan pengendalian jumlah udara ini dapat dilakukan dengan banyak cara, baik secara manual ataupun dengan

proses otomatis. Penggunaan sistem pengendali suhu otomatis pada reaktor gasifikasi menjadi salah satu solusi pengendalian operasional reaktor gasifikasi, didukung dengan perkembangan teknologi otomatis saat ini maka memungkinkan penggunaan proses otomatis untuk pengendalian suhu proses gasifikasi. Penggunaan teknologi otomatis diharapkan dapat menambah nilai ekonomis dari reaktor gasifikasi, terutama yang berkapasitas kecil karena mengurangi keberadaan operator pada pengoperasiannya.

Proses pengendalian operasional reaktor gasifikasi secara otomatis dengan hanya mengawasi dan mengendalikan suhu pada zona *partial combustion* dengan cara mengatur jumlah pasokan media gasifikasi adalah metode yang menjadi pilihan utama. Akan tetapi sistem ini tentunya memiliki cara pengaturan yang tersendiri bila digunakan pada reaktor gasifikasi yang menggunakan briket *MSW* sebagai bahan baku gasifikasi yang akan memiliki karakteristik tertentu dan nantinya akan menghasilkan karakteristik *syngas* yang tertentu pula. Penelitian yang detail perlu dilakukan pada proses gasifikasi briket *MSW* dengan reaktor gasifikasi tipe *downdraft* berpengendali suhu otomatis pada zona *partial combustion* agar dapat diketahui pengaruh penggunaannya terhadap produktifitas dan kualitas *syngas* yang dihasilkan serta korelasi penggunaan sistem pengendali suhu otomatis gasifikasi dengan kapasitas gasifikasi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas maka dapat dirumuskan beberapa masalah untuk penelitian ini, yaitu :

1. Bagaimanakah pengaruh penggunaan pengendalian suhu zona *partial combustion* secara otomatis pada proses gasifikasi briket *MSW* terhadap produktifitas dan kualitas *syngas* yang dihasilkan.
2. Bagaimanakah korelasi penggunaan pengendalian suhu zona *partial combustion* secara otomatis pada proses gasifikasi briket *MSW* dengan kapasitas gasifikasi

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk menemukan pengaruh penggunaan pengendalian suhu zona *partial combustion* secara otomatis pada proses gasifikasi briket *MSW* terhadap produktifitas dan kualitas *syngas* yang dihasilkan
2. Untuk menemukan korelasi penggunaan pengendalian suhu zona *partial combustion* secara otomatis pada proses gasifikasi briket *MSW* dengan kapasitas gasifikasi

1.4 Batasan Masalah

1. Penelitian ini akan dilakukan secara eksperimental dengan menggunakan reaktor gasifikasi yang ada pada laboratorium Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya
2. Biomassa yang digunakan adalah *MSW* berbentuk briket yang telah disiapkan dan dikondisikan di laboratorium Jurusan Teknik Mesin ITS dengan komposisi 60% bahan organik dan 40% bahan non-organik
3. Media gasifikasi menggunakan udara pada kondisi suhu udara normal.
4. Unit pengendali suhu menggunakan suhu pada zona *partial combustion* sebagai variabel terukur, dan laju massa udara pada *throat nozzle* sebagai variabel terkendali.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Dapat memberikan informasi dan wacana baru tentang efektifitas penggunaan pengendalian suhu secara otomatis pada proses gasifikasi, khususnya gasifikasi pada *MSW*.
2. Dapat digunakan sebagai batu pijakan untuk penelitian lebih lanjut yang terkait dengan pengendalian proses pada reaktor gasifikasi secara otomatis.
3. Dapat digunakan sebagai acuan pengembangan reaktor gasifikasi yang menggunakan *MSW* sebagai bahan baku biomassa.
4. Dapat memberikan kontribusi pada program konversi sampah menjadi energi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 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.

Biomassa adalah sumber energi yang dapat terbarukan, dan keberadaannya banyak terdapat di lingkungan sekitar. Biomassa juga merupakan sumber energi yang ramah lingkungan, mudah terjangkau walaupun ditempat terpencil dan juga dapat mengurangi emisi yang mengakibatkan efek rumah kaca.

“Biomassa berpotensi sebagai sumber energi energi terbesar didunia” (Roesch, 2011) yang juga menyebutkan bahwa berdasar data yang berasal dari sebuah laporan (*Adam Brown. 2010 survey of energy resources. Technical report, World Energy Council*) bahwa dengan keragaman jenis bahan bakunya, maka dapat diestimasi potensi anual dunia dari biomassa dapat sebesar kurang lebih 1500 EJ/tahun pada 2050.

Sebagaimana telah disebutkan diatas, salah satu sumber biomassa adalah aktifitas masyarakat yang menghasilkan biomassa berbentuk sampah. Sampah yang dihasilkan dan dibuang oleh masyarakat sebagian besar berbentuk padatan, yang merupakan campuran dari sampah dapur, kertas, plastik dan beberapa komponen lainnya. Komposisi campuran sampah sangat sulit untuk dipastikan karena akan berbeda-beda terutama tergantung pada area asal timbulan sampah tersebut, sebagai contoh sampah yang berasal dari area pasar akan berbeda komposisinya dengan sampah yang berasal dari area perumahan. Pemanfaatan potensi energi dari sampah merupakan salah satu solusi dari peningkatan timbulan sampah. Salah satu cara mengubah sampah menjadi energi adalah dengan proses gasifikasi, karena sampah masih merupakan bagian dari biomassa. Proses gasifikasi secara termokimia tampaknya lebih menarik saat ini karena peningkatan timbulan sampah dapat segera diproses tanpa perlu menunggu waktu yang lama.

Untuk memanfaatkan potensi energi dari biomassa ini maka diperlukan pemahaman beberapa karakteristik yang dipunyai oleh biomassa yang nantinya akan menentukan karakteristik dari proses gasifikasi dan hasil akhirnya. Karakteristik biomassa ini dapat diketahui dengan melakukan beberapa analisa, yaitu analisa *ultimate* dan *proximate*, analisa densitas, analisa kelembaban, dan analisa nilai kalor

2.1.1 Komposisi 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 biomassanya. Dalam konteks konversi termal seperti pembakaran, dua analisa komposisi dari biomassa berikut ini biasanya digunakan :

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

2.1.1.1 Analisa *Ultimate*.

Pada analisa ini komposisi hidrokarbon dari bahan biomassa akan diketahui, kecuali kandungan air dan abu, dan dinyatakan dalam bentuk persentase berat dari masing-masing elemen unturnya, sehingga bila dijumlahkan total persentase berat unsur hidrokarbon berikut persentase kandungan air dan abu adalah 100%. Sebagai contoh, berdasarkan tabel yang disusun oleh Basu (2013, hal. 76) hasil analisa ultimate dari sampah padat perkotaan (*MSW*) adalah : C 47,6% ; H 6% ; N 1,2% ; S 0,3% ; O 32,9%.

Tidak semua elemen unsur terkandung dalam biomassa. Sebagai contoh, sebagian besar biomassa tidak mengandung unsur sulfur (S). Kandungan air dalam biomassa dinyatakan secara terpisah, sehingga hidrogen dan oksigen pada analisa *ultimate* tidak menyatakan hidrogen dan oksigen yang ada dalam kandungan air tetapi hanya yang terdapat pada biomassa saja.

2.1.1.2 Analisa *Proximate*

Analisa *proximate* menyatakan komposisi biomassa secara global, dalam hal ini adalah komposisi dari kandungan air, *volatile matter*, abu, dan karbon tetap. Sebagai contoh, pada tabel yang disusun oleh Reed dan Das (1988, hal 11) hasil analisa proximate dari sampah padat perkotaan (*MSW*) adalah : kandungan *volatile matter* 65,9%; kandungan karbon tetap 9,1%; kandungan abu 25,0%.

Volatile matter dari biomassa adalah gas terkondensasi atau tidak terkondensasi yang dilepaskan oleh biomassa saat dipanaskan. Jumlahnya tergantung oleh laju pemanasan dan suhu saat biomassa tersebut dipanaskan.

Karbon tetap (*fixed carbon*) menyatakan jumlah karbon padat yang tetap berada pada arang dari biomassa saat proses pirolisis setelah terjadinya proses

devolatilisasi. Karbon tetap ini juga merupakan parameter penting dalam proses gasifikasi karena sebagian besar proses konversi dari karbon tetap ini menjadi gas menentukan laju dan hasil gasifikasi. Proses reaksi konversi ini menjadi bagian yang paling lambat dalam proses gasifikasi dan digunakan untuk menentukan ukuran dari reaktor gasifikasi.

Abu (*Ash*) merupakan sisa padatan inorganik yang terjadi setelah biomassa terbakar seluruhnya. Kandungan utama dalam abu adalah silika, aluminium, besi dan kalsium. Sejumlah kecil kandungan magnesium, titanium, sodium, dan potasium kemungkinan juga terjadi.

2.1.2 Kelembaban biomassa

Biomassa memiliki karakter kelembaban/kandungan air yang cukup tinggi. Kandungan air total pada beberapa jenis biomassa bisa mencapai 90% (*dry basis*), salah satu contoh data kelembaban biomassa seperti yang tercantum pada tabel yang disusun oleh Reed dan Das (1988, hal 12) adalah kelembaban rata-rata dari biomassa sampah perkotaan (*MSW*) yaitu sekitar 35% (*wet basis*) atau 55% (*dry basis*).

Kelembaban menyerap banyak energi yang dihasilkan oleh proses gasifikasi, dan energi untuk meng-evaporasi kandungan air ini tidak dapat dipulihkan. Hal ini penting untuk dimengerti saat perancangan proses gasifikasi karena dapat menimbulkan biaya dan energi yang lebih untuk proses pengeringan biomassa.

Kandungan air pada biomassa dapat terjadi dalam dua jenis, yaitu : (1) kelembaban eksternal, (2) kelembaban inherent/ekuilibrium. Kelembaban eksternal merupakan kandungan air yang terjadi pada permukaan biomassa atau diluar dinding sel dari biomassa, sedangkan kelembaban inherent merupakan kelembaban yang terkandung didalam dinding sel dari biomassa.

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 (305mm x 305mm x 305mm) dengan cara dikucurkan dari ketinggian 610mm. 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 dinyatakan dalam dua cara, yaitu dalam bentuk Nilai Kalor Atas (*Higher Heating Value/HHV*) ataupun dalam bentuk Nilai Kalor Bawah (*Lower Heating Value/LHV*).

Nilai Kalor Atas adalah jumlah energi yang dihasilkan oleh sejumlah massa atau volume biomassa yang dibakar dan suhunya meningkat dimulai dari 25⁰C hingga terbakar habis dan suhunya kembali 25⁰C (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.

Nilai Kalor Bawah atau juga dikenal sebagai Nilai Kalor Bersih adalah besarnya energi yang dikeluarkan saat pembakaran sempurna biomassa tanpa mengikutsertakan besarnya energi yang digunakan untuk menguapkan kandungan air.

Metode eksperimen merupakan alat yang paling dapat diandalkan untuk menentukan nilai kalor dari biomassa. Bila tidak dapat dilakukan, metode empiris dengan menggunakan persamaan Dulong-Berthelot, dapat digunakan untuk

menentukan Nilai Kalor Atas. Persamaan ini sebenarnya dikembangkan untuk batu bara tetapi dapat digunakan untuk biomassa dengan memodifikasi koefisien untuk biomassa. Basu (2013) menuliskan dalam bukunya penggunaan persamaan empiris yang dibuat oleh Channiwala dan Parikh (2002) untuk mencari Nilai Kalor Atas biomassa. Persamaan tersebut didapat berdasarkan penelitian terhadap 15 korelasi yang ada dan 50 jenis bahan bakar, termasuk biomassa, bahan bakar cair, gas, serta batubara. Persamaannya adalah sebagai berikut :

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

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 :

$$\begin{aligned} 0 < C < 92\% & ; 0,43 < H < 25\% ; \\ 0 < O < 50\% & ; 0 < N < 5,6\% : \\ 0 < \text{abu} < 71\% & ; 4745 < \text{HHV} < 55,345 \text{ kJ/Kg} \end{aligned}$$

Hubungan antara Nilai Kalor Atas dan Nilai Kalor Bawah adalah sebagai berikut :

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

Dimana H dan M adalah persentase dari hidrogen dan kelembaban dari biomassa pada kondisi *as receive*. Dan h_g 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 Gasifikasi

Gasifikasi adalah proses konversi dari bahan cair ataupun padat menjadi gas yang berguna atau sebagai bahan kimia yang dapat dibakar untuk menghasilkan energi atau digunakan sebagai bahan baku produksi bahan kimia yang lebih bernilai. Gasifikasi dan pembakaran merupakan dua proses termokimia yang hampir sama tetapi ada perbedaan yang sangat penting diantara keduanya. Gasifikasi menyatukan energi pada ikatan kimia dalam gas yg dihasilkan, sedangkan pembakaran memecahkan ikatan kimia untuk melepaskan sejumlah energi. Pada proses pembakaran langsung, energi yang dapat

dimanfaatkan adalah energi panas dalam bentuk *flue gas* yang dihasilkan oleh pembakaran *MSW*.

Proses termokimia untuk menghasilkan gas dari cairan ataupun padatan ada dua jenis proses, yaitu pirolisis dan gasifikasi. Proses pirolisis adalah proses dekomposisi cairan ataupun padatan menjadi gas dengan tanpa adanya media apapun dan menggunakan energi eksternal untuk prosesnya, sedangkan, sedangkan proses gasifikasi membutuhkan media gasifikasi berupa uap air, udara, ataupun oksigen untuk mengatur ulang struktur molekul dari bahan baku agar berubah menjadi gas. Dalam proses gasifikasi tidak diperlukan adanya energi eksternal karena menggunakan sebagian dari biomassa (*MSW*) untuk proses pembakaran yang menghasilkan energi panas untuk proses pirolisis dalam gasifikasi. Gas yang diperoleh dari proses gasifikasi lazim disebut *producer gas/synthetic gas (syngas)*.

2.2.1 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 air dan oksigen, seperti yang ditabelkan oleh Basu (2013, hal 201).

2.2.2 Proses gasifikasi

Proses gasifikasi pada umumnya mengikuti urutan langkah sebagai berikut :

- Pemanasan awal dan pengeringan
- Pirolisis
- Pembakaran (*partial combustion*)
- Gasifikasi arang (*reduction*)

Walaupun urutan langkah ini seringkali dimodelkan secara urut tetapi tidak terdapat batas yang jelas diantara urutan tersebut dan kadangkala terjadi penumpukan antar urutan langkah.

2.2.2.1 Pengeringan

Proses pertama dari gasifikasi adalah pengeringan, yang dimaksud disini adalah pengeringan didalam reaktor gasifikasi. Seperti diketahui biomassa dapat memiliki kandungan air/kelembaban yang tinggi, sekitar 30% - 60% untuk kayu yang baru saja ditebang, bahkan bisa mencapai 90% untuk biomassa tertentu. Setiap kilogram kelembaban dalam biomassa akan menyerap energi minimal 2242 kJ dari energi yang dihasilkan pembakaran pada reaktor gasifikasi, dan energi ini

tidak bisa dipulihkan (Basu, 2013). Untuk kandungan air yang tinggi, kehilangan energi ini sangat penting untuk diperhatikan, terutama bila digunakan pada sistem pembangkitan energi. Bila kelembaban inherent yang terdapat dalam dinding sel biomassa tidak dapat dikondisikan, maka kelembaban yang terdapat pada permukaan biomassa dapat dikondisikan untuk dihilangkan dengan proses pengeringan awal untuk mengurangi tingkat kelembaban biomassa sebelum digunakan dalam reaktor gasifikasi. Untuk menghasilkan gas bahan bakar dengan nilai kalor yang cukup maka sebagian besar sistem gasifikasi menggunakan biomassa kering dengan tingkat kelembaban 10-20%.

Pengeringan akhir terjadi dalam reaktor gasifikasi, saat biomassa menerima energi panas dari zona gasifikasi selanjutnya (zona pembakaran sebagian). Energi panas ini memberikan pemanasan awal dan menguapkan kandungan air didalam biomassa. Saat temperatur mencapai 100⁰C maka ikatan air pada biomassa akan hilang secara irreversibel. Bersama dengan kenaikan temperatur lebih lanjut kandungan zat bermassa molekul rendah akan mulai ter volatilisasi. Proses ini akan berlanjut hingga temperatur mencapai sekitar 200⁰C.

2.2.2.2 Pirolisis

Proses pirolisis merupakan proses pemanasan biomassa dengan suhu tertentu hingga molekul bermassa besar dalam biomassa akan terpecah menjadi molekul dengan massa yang lebih ringan. Pemanasan biomassa untuk proses pirolisis ini biasanya terjadi pada suhu sekitar 350⁰C. Hasil dari proses pirolisis biomassa adalah arang, gas (CO, CO₂, H₂, H₂O, dan CH₄), dan juga uap tar.

Bila proses pemanasan pada pirolisis ini dilakukan secara lambat maka akan lebih banyak terbentuk karbon dalam bentuk padatan sehingga arang akan lebih banyak terjadi. Bila pemanasan dilakukan dalam waktu cepat maka akan lebih banyak terjadi gas dengan kandungan C-H dan pengurangan kandungan oksigen dalam jumlah besar, sehingga juga dihasilkan hidrokarbon dalam bentuk cair. Proses pirolisis ini umumnya mendahului proses gasifikasi.

Salah satu produk penting dari pirolisis adalah pembentukan tar yang terjadi dari pengkondensasian uap yang dihasilkan pada proses pirolisis. Karena

kondisinya yang berupa cairan lengket, tar menyebabkan kesulitan yang besar pada penggunaan *syngas* untuk keperluan selanjutnya.

2.2.2.3 Reaksi gasifikasi arang

Langkah urutan proses gasifikasi melibatkan reaksi kimia antara hidrokarbon pada biomassa, uap air, karbon dioksida, oksigen, dan hidrogen dalam reaktor, serta terjadi reaksi kimia terjadi antara gas-gas yang terbentuk. Dari hal tersebut, reaksi pada gasifikasi arang adalah yang paling penting. Arang biomassa yang terbentuk lewat proses pirolisis belum tentu murni unsur karbon. Arang tersebut kemungkinan mengandung sejumlah hidrokarbon yang terdiri dari hidrogen dan oksigen. Gasifikasi dari arang biomassa melibatkan beberapa reaksi antara arang dan media gasifikasi.

Gasifikasi dari arang dengan karbon dioksida lebih terkenal dengan nama reaksi *Boudouard*, yaitu :



Reaksi berikutnya adalah reaksi antara arang dengan uap air, lebih dikenal dengan nama reaksi *water – gas*, yaitu :



Reaksi *water – gas* ini kemungkinan adalah reaksi yang paling penting dalam proses gasifikasi.

Selain itu masih terdapat reaksi yang lain, yaitu reaksi yang terjadi antara uap air dan gas yang menjadi produk *intermediate* dalam reaksi gasifikasi arang, reaksi ini biasa disebut sebagai reaksi *water – gas shift*, yaitu :



Perbedaan lainnya dari reaksi ini dengan reaksi sebelumnya adalah reaksi ini terjadi pada fase gas. Reaksi ini meningkatkan kandungan hidrogen dari gas yang dihasilkan dan mengurangi kandungan karbon monoksida yang dihasilkan dari reaksi sebelumnya. Reaksi *water – gas shift* ini merupakan langkah awal dari produksi *synthetic gas (syngas)* untuk langkah selanjutnya pada proses gasifikasi,

yang membutuhkan perbandingan antara hidrogen dan karbon monoksida sebagai hal yang sangat penting.

2.2.2.4 Reaksi pembakaran sebagian (*partial combustion*)

Sebagian besar reaksi dalam gasifikasi adalah reaksi endotermik (memerlukan/menyerap panas). Untuk menyediakan panas yang dibutuhkan untuk reaksi, yang juga dibutuhkan untuk pengeringan dan pirolisis, maka sejumlah reaksi pembakaran eksotermik dilakukan pada reaktor gasifikasi. Reaksi pembakaran yang sangat mungkin bisa terjadi pada reaktor gasifikasi adalah reaksi pembakaran oleh arang. Terdapat 2 jenis reaksi pembakaran pada arang dalam reaktor gasifikasi dan keduanya dibedakan dari hasil reaksi dan panas yang ditimbulkan. Reaksinya adalah sebagai berikut :



Reaksi kedua menghasilkan jumlah energi yang terbesar (394 kJ/mol) untuk setiap mol karbon yang bereaksi sedangkan reaksi yang pertama hanya menghasilkan 111 kJ/mol untuk setiap mol karbon yang bereaksi, tetapi reaksi pertama menghasilkan gas CO yang merupakan gas bahan bakar. Sebagai informasi tambahan bahwa reaksi pertama memiliki laju reaksi yang lebih lambat daripada reaksi yang kedua. Bila oksigen bereaksi dengan karbon maka kedua reaksi pembakaran diatas dapat terjadi, tetapi keberadaannya sangat tergantung pada suhu.

2.2.3 Reaktor gasifikasi tipe *fixed bed*

Reaktor gasifikasi dalam hal ini adalah sebuah tempat terjadinya langkah-langkah proses gasifikasi. Penyebutan reaktor gasifikasi lebih populer digunakan untuk menyebut alat yang digunakan untuk proses gasifikasi secara langsung, dalam hal ini yang dimaksud secara langsung adalah keberadaan sumber energi panas (reaksi pembakaran) yang langsung dihasilkan dari biomassa itu sendiri.

Pembagian tipe-tipe reaktor gasifikasi secara umum dibagi menjadi tiga tipe utama berdasarkan dengan cara bertemunya udara dengan biomassa, yaitu :

- *Fixed/moving bed reactor*
- *Fluidized reactor*
- *Entrained flow reactor*

Satu jenis reaktor gasifikasi belum tentu bisa memenuhi kebutuhan kapasitas gasifikasi. “Terdapat batasan untuk penyesuaian jangkauan dari penggunaannya, sebagai contoh, untuk tipe *fixed/moving bed reactor* digunakan untuk unit gasifikasi dengan kapasitas yang paling kecil (< 10 MWth) ; tipe *fluidized bed* digunakan untuk unit gasifikasi dengan kapasitas menengah (5-100 MWth); *entrained flow reactor* digunakan untuk reaktor dengan kapasitas besar (> 50 MWth)” (Basu, 2013).

Selain dari batasan kapasitas reaktor, dalam pemilihan tipe reaktor juga harus mempertimbangkan penggunaan gas yang dihasilkan oleh reaktor. Apakah gas yang dihasilkan oleh reaktor akan digunakan pada pembakaran langsung, sebagai bahan bakar motor pembakaran dalam, ataupun dipersiapkan untuk proses produksi gas lebih lanjut. Pertimbangan tersebut diperlukan karena masing-masing tipe reaktor memiliki karakteristik kandungan tar dalam gas yang dihasilkan berbeda-beda. Dalam hal ini reaktor dengan tipe *fixed bed downdraft* memiliki kandungan tar terendah dalam gas yang dihasilkannya sehingga reaktor ini sangat sesuai untuk penggunaan sebagai reaktor penghasil gas untuk digunakan pada motor pembakaran dalam.

Reaktor gasifikasi tipe *fixed/moving bed* adalah reaktor yang paling sederhana dan paling sesuai untuk penggunaan skala kecil. Reaktor ini dinamakan *fixed bed reactor* dikarenakan biomassa yang digunakan berada diatas *grate* yang tidak bergerak. Selain itu juga disebut sebagai *moving bed reactor* karena biomassa yang digunakan bergerak turun dalam reaktor. Reaktor tipe ini sangat menarik karena dapat dibuat dengan mudah dengan biaya relatif rendah. Terdapat tiga jenis utama reaktor gasifikasi tipe *fixed/moving bed*, yaitu : *updraft*, *downdraft*, dan *crossdraft*. Tabel 2.1 merupakan tabel perbandingan karakteristik dari tiga jenis reaktor tipe *fixed bed*.

2.2.3.1 Reaktor gasifikasi *updraft*

Reaktor gasifikasi jenis *updraft* adalah desain reaktor gasifikasi yang tertua dan paling sederhana. Pada reaktor ini biomassa dimasukkan dari bagian atas reaktor dan media gasifikasi masuk melalui bagian bawah reaktor, sehingga biomassa bergerak dengan arah yang berlawanan dengan media gasifikasi dan melalui zona-zona yang berbeda (pengeringan, pirolisis, reduksi, dan oksidasi) secara berturut-turut.

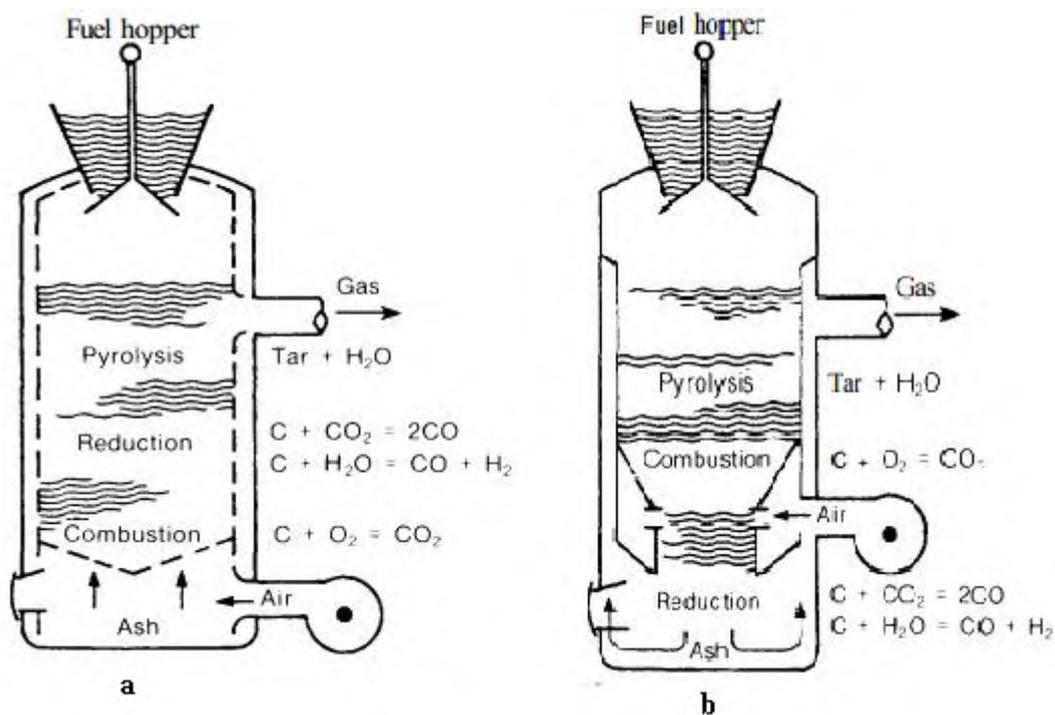
Tabel 2.1 Karakteristik dari reaktor gasifikasi *fixed bed*

Fuel (wood)	Updraft	Downdraft	Crossdraft
Moisture wet basis (%)	60 max	25 max	10–20
Dry-ash basis (%)	25 max	6 max	0.5–1.0
Ash-melting temperature (°C)	>1000	>1250	
Size (mm)	5–100	20–100	5–20
Application range (MW)	2–30	1–2	
Gas exit temperature (°C)	200–400	700	1250
Tar (g/N m ³)	30–150	0.015–3.0	0.01–0.1
Gas LHV (MJ/N m ³)	5–6	4.5–5.0	4.0–4.5
Hot-gas efficiency (%)	90–95	85–90	75–90
Turn-down ratio (–)	5–10	3–4	2–3
Hearth load (MW/m ²)	<2.8		

Sumber : Basu, 2013

Biomassa dikeringkan pada bagian atas dari reaktor, sehingga biomassa dengan tingkat kelembaban yang tinggi dapat digunakan. Sejumlah arang yang terbentuk akan turun dan terbakar untuk menghasilkan panas. Gas metana dan gas yang kaya akan tar meninggalkan reaktor melalui bagian atas reaktor, dan abu akan turun melalui *grate* menuju tempat abu di dasar reaktor. Skema dari reaktor tipe *updraft* dapat dilihat pada Gambar 2.1a.

Reaktor ini memiliki pemanfaatannya panas pembakaran yang efektif karena arah aliran gas yang berlawanan dengan arah laju biomassa, dan memiliki efisiensi *cold gas* yang sangat baik, tetapi kandungan tar yang sangat tinggi merupakan kekurangan utama dari reaktor ini. Reaktor jenis *updraft* sangat sesuai bila digunakan pada pembakaran langsung, dalam hal ini gas yang dihasilkan langsung dibakar dalam tungku atau *boiler* tanpa perlu dibersihkan kandungannya ataupun didinginkan.



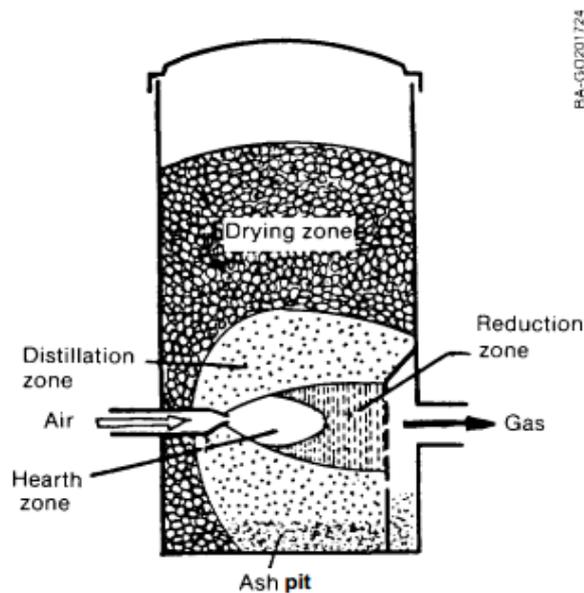
Gambar 2.1 Skema reaktor (a) *updraft*; (b) *downdraft*, dan reaksi-reaksi yang ada pada tiap zona proses gasifikasi. (Reed dan Das, 1988)

2.2.3.2 Reaktor gasifikasi *downdraft*

Biomassa pada reaktor *downdraft* dimasukkan dalam reaktor dari bagian atas reaktor dan bergerak kebawah menuju *grate*, demikian juga gas-gas yang dihasilkan yang akan bergerak kebawah melewati *grate* dan keluar dari bagian bawah reaktor. Media gasifikasi di masukkan dalam reaktor melalui *nozzle* yang berada di sekeliling batas antara zona pembakaran dan zona reduksi/gasifikasi.

Salah satu karakter fisik dari reaktor ini adalah *throat*, yaitu pengecilan *cross section area* pada zona reduksi. Pengecilan *cross section area* ini dimaksudkan untuk memaksa agar seluruh hasil pirolisis melewati bagian yang menyempit dan panas sehingga dihasilkan distribusi temperatur yang lebih seragam dan mendorong sebagian besar tar untuk terurai (*cracked*). Skema dari reaktor *downdraft* dapat dilihat pada Gambar 2.1b.

Pada reaktor *downdraft* terdapat fenomena yang disebut sebagai *flaming pyrolysis*, yaitu terbakarnya sebagian dari gas hasil pirolisis sebelum memasuki zona reduksi/gasifikasi sehingga energi panas yang dibutuhkan untuk pengeringan, pirolisis dan gasifikasi disediakan oleh peristiwa tersebut. *Flaming pyrolysis* menghasilkan sebagian besar gas yang mudah terbakar yang terjadi selama proses gasifikasi dan secara bersamaan mengurangi hingga 99% kadar tar dalam gas



Gambar 2.2 Skema reaktor tipe *crossdraft* (Reed dan Das, 1988)

2.2.3.3 Reaktor gasifikasi *crossflow*

Reaktor jenis ini lebih banyak digunakan untuk proses gasifikasi dengan bahan baku arang yang memiliki kandungan abu sangat sedikit. Bahan baku dimasukkan dari bagian atas reaktor dan bergerak kebawah menuju *bed*.

Perbedaannya dengan reaktor *updraft* maupun *downdraft* adalah *syngas* keluar dari reaktor dari sisi yang berlawanan dengan masuknya media gasifikasi. Skema dari reaktor gasifikasi jenis ini dapat dilihat pada Gambar 2.2

2.2.4 Parameter-parameter pengoperasian reaktor gasifikasi

Dalam pengoperasian sebuah reaktor gasifikasi terdapat beberapa parameter yang selalu memegang peranan penting. Parameter-parameter pengoperasian reaktor ini erat kaitannya dengan kualitas dan kuantitas dari gas yang nantinya akan dihasilkan.

2.2.4.1 *Equivalence ratio (ER)*

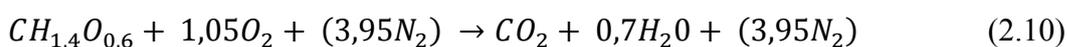
Equivalence ratio (ER) adalah parameter yang sangat penting pada pengoperasian reaktor gasifikasi. ER merupakan perbandingan antara *air-fuel ratio (AFR)* aktual pada pengoperasian reaktor gasifikasi dengan *air-fuel ratio (AFR)* stoikiometris.

$$ER = AFR_{\text{aktual}} / AFR_{\text{stoikiometris}} \quad (2.8)$$

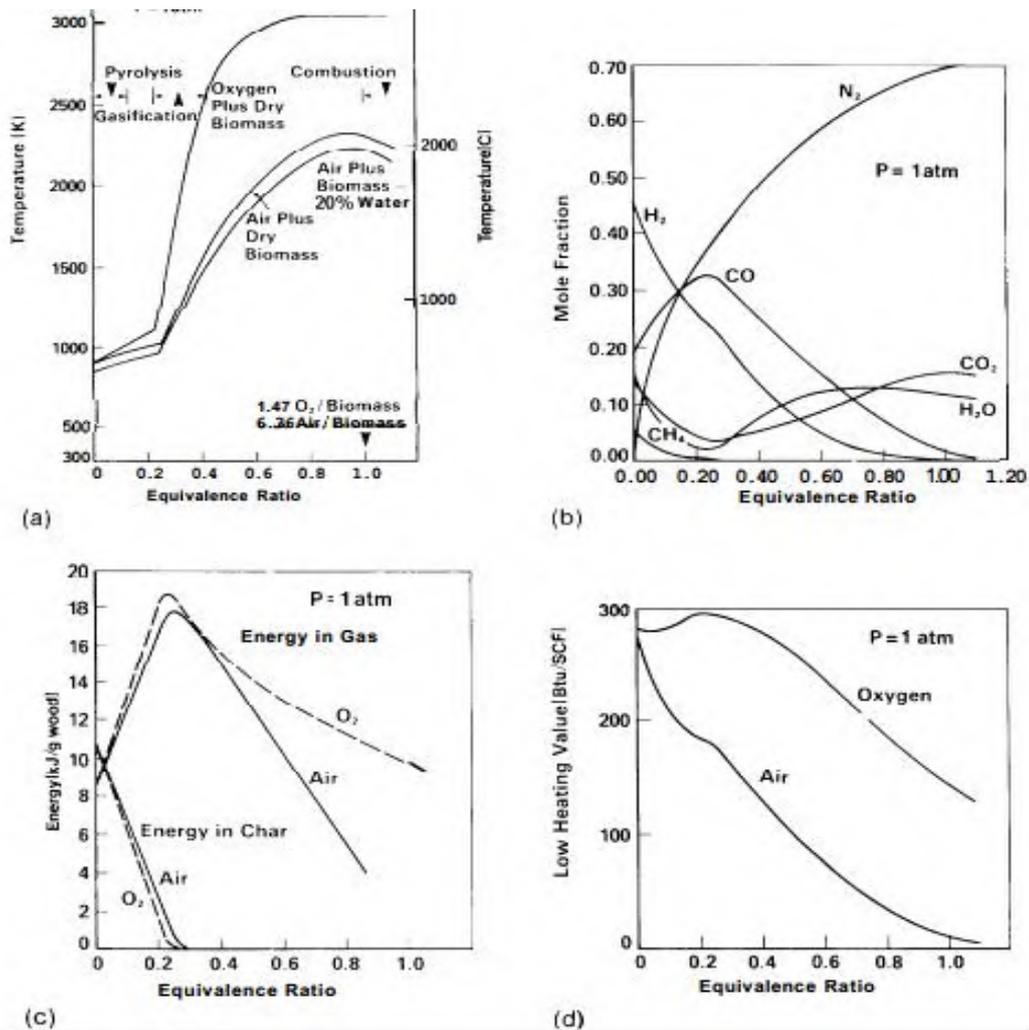
AFR merupakan perbandingan antara jumlah udara dengan jumlah bahan bakar pada proses pembakaran. *AFR* stoikiometris adalah jumlah perbandingan massa udara dan massa bahan bakar yang menghasilkan pembakaran sempurna.

$$AFR = \text{Massa}_{\text{udara}} / \text{Massa}_{\text{bahan bakar}} \quad (2.9)$$

Kondisi stoikiometris teoritis biomassa diperoleh dengan mengetahui terlebih dahulu kandungan unsur kimia dari biomassa, kemudian dilakukan perhitungan persamaan reaksi yaitu reaksi oksidasi. Reed dan Das (1988) 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 :



Nitrogen ditunjukkan dalam tanda kurung karena merupakan bagian yang tidak berubah (*inert*) dari udara dan tidak turut serta dalam reaksi dan tetap muncul pada hasil reaksi. Dari reaksi diatas dapat dilihat perbandingan antara udara dan biomassa untuk pembakaran sempurna adalah 10 berbanding 1 ($AFR = 10$).



Gambar 2.3 Efek perubahan ER terhadap (a) temperatur pembakaran untuk biomassa dengan komposisi atom $\text{CH}_{1,4}\text{O}_{0,6}$ bereaksi dengan udara dan oksigen; (b) Komposisi ekuilibrium saat bereaksi dengan udara; (c) Kandungan energi pada fase padat dan gas; (d) Nilai kalor bawah gas. (Reed dan Das, 1988, diperoleh dari Reed, 1981)

Oksigen yang digunakan dalam proses menentukan produk dan temperatur dari reaksi. Disaat reaksi menggunakan oksigen dalam jumlah sangat sedikit ataupun tidak sama sekali ($\text{ER} = 0$) maka dapat diindikasikan terjadi proses pirolisis, bila oksigen yang digunakan kurang dari kondisi stoikiometris ($\text{ER} < 1$) maka kemungkinan reaksi berlangsung pada proses gasifikasi, bila oksigen yang digunakan lebih besar atau sama dengan kondisi stoikiometris ($\text{ER} \geq 1$) maka bisa dipastikan berlangsung proses oksidasi/pembakaran.

Reaksi gasifikasi secara umum akan terjadi saat ER antar 0,2 dan 0,3. Reed dan Das (1988) menyebutkan bahwa pada reaktor gasifikasi downdraft proses gasifikasi beroperasi secara optimal saat $ER = 0,25$. Gambar 2.3 menunjukkan efek dari ER terhadap temperatur, fraksi mol, energi pada gas dan padatan, serta nilai kalor bawah *syngas*. Pada $ER = 0,25$ ini seluruh arang dapat terkonversi mejadi gas , dan fraksi energi dari biomassa yang terkonversi menjadi gas mencapai maksimum. Bila terjadi kekurangan oksigen maka sejumlah arang tidak terkonversi; bila terjadi kelebihan oksigen maka sejumlah gas akan ikut terbakar dan temperatur akan naik dengan cepat. Sehingga sangat diinginkan untuk mengoperasikan reaktor gasifikasi sebisa mungkin pada kondosi $ER= 0,25$.

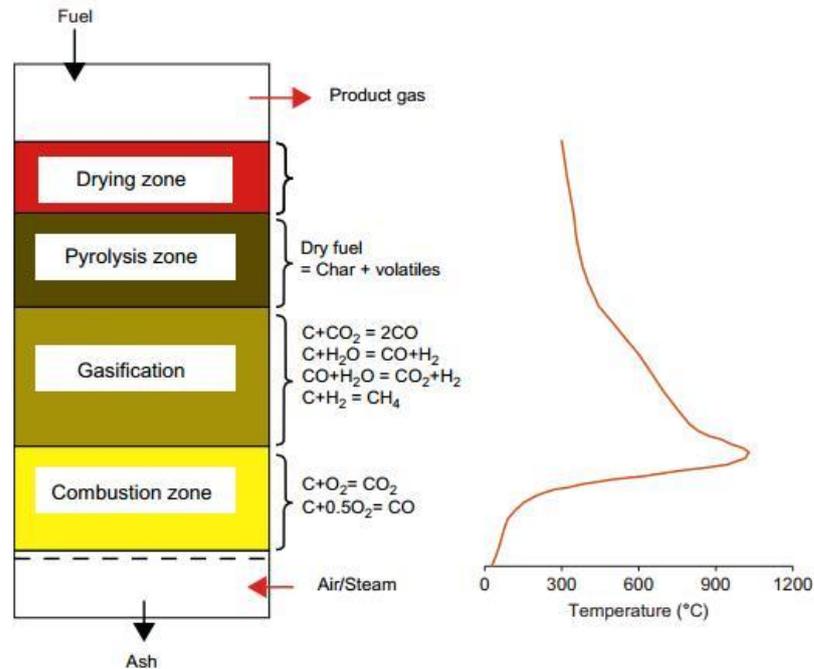
Akan tetapi menjadi sebuah pertanyaan tentang kemungkinam untuk mengoperasikan reaktor gasifikasi tepat pada $ER= 0,25$. Pada reaktor gasifikasi tipe *fixed bed*, pengoperasian pada kondisi ER yang lebih rendah dapat menimbulkan adanya arang yang berlebihan dan tertimbun diatas *bed/grate* dalam reaktor, kecuali bila *grate* digetarkan sehingga arang akan jatuh pada kotak abu. Pengoperasian pada kondisi ER yang lebih tinggi dari 0,25 akan mengurangi arang dan temperatur naik dengan cepat. Jadi menjaga *bed* dalam kondisi suhu yang tepat adalah dengan cara menjaga pasokan udara yang tepat secara otomatis.

2.2.4.2 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*.

Gambar 2.4 dan 2.5 merupakan contoh profil suhu pada reaktor gasifikasi *updraft* dan *downdraft*. Pada gambar 2.4 dan 2.5 terlihat bahwa suhu tertinggi terjadi pada zona gasifikasi dan pembakaran terjadi pada kisaran suhu 1000°C hingga 1200°C.

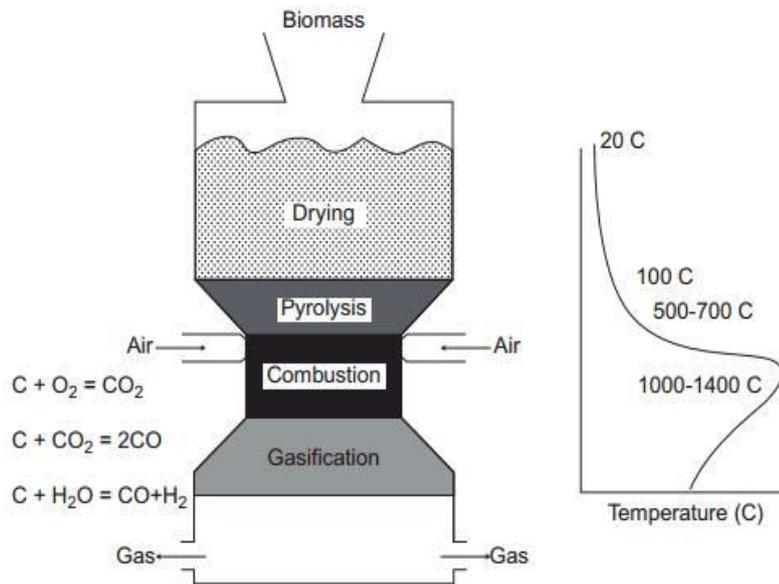


Gambar 2.4 Profil suhu dan zona pada reaktor gasifikasi *updraft* (Basu, 2013)

2.2.4.3 *Superficial velocity/hearth load*

Parameter operasional reaktor gasifikasi ini mungkin agak sedikit sulit untuk dibayangkan akan tetapi memegang peranan yang penting. *Superficial velocity* walaupun terdapat kata “kecepatan (*velocity*)” dan memiliki satuan m/s akan tetapi sebenarnya bukan kecepatan yang sesungguhnya.

Superficial velocity diukur pada bagian tersempit dari reaktor gasifikasi, dan didapatkan dengan membagi laju volume gas pada bagian tersebut dengan *cross sectional area* bagian tersebut. Walaupun memiliki satuan kecepatan, akan tetapi pengertian sebenarnya dari *superficial velocity* adalah laju spesifik produksi gas (Reed dan Das, 1988).



Gambar 2.5 Profil suhu dan zona pada reaktor gasifikasi *downdraft* (Basu, 2013)

Superficial velocity ini juga bisa disebut sebagai *hearth load* untuk reaktor gasifikasi *downdraft* yang memiliki *throat*, karena area *throat* pada reaktor ini juga disebut sebagai *hearth*. *Hearth load* merupakan perbandingan antara laju alir massa dengan *cross sectional area* dari *hearth*

Pada akhirnya *superficial velocity/hearth load* ini akan terkait dengan *residence time*, yaitu lamanya gas dan biomassa berada pada reaktor gasifikasi (utamanya pada area *hearth*). *Residence time* ditentukan oleh *grate*, yang mengatur kapan arang atau abu harus dibuang ke bagian akhir reaktor. Bila gas terlalu lama berada di area gasifikasi ataupun area pembakaran maka gas dan arang yang bereaksi akan lebih banyak, dan sebagian gas yang berguna akan ikut terbakar sehingga energi dalam *syngas* akan berkurang. Sebaliknya bila terlalu cepat berada dalam reaktor gasifikasi maka arang dan gas tidak akan sempat bereaksi sehingga jumlah arang yang dihasilkan meningkat dan kandungan tar dalam *syngas* akan meningkat.

2.2.4.4 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.

Beberapa dari properti tersebut sangat berpengaruh sehingga sebagian besar proses gasifikasi yang ada saat ini dioperasikan dengan biomassa yang telah diberikan proses awal, sebagai contoh : pengeringan dan pembriketan. Proses awal pada intinya adalah agar batas kelayakan dari biomassa dapat tercapai, dalam hal ini dapat dicontohkan bila biomassa yang digunakan adalah sampah padat perkotaan (*MSW*) yang memiliki tingkat heterogenitas komposisi yang tinggi agar dapat mencapai kondisi kadar kelembaban dan densitas yang cukup maka dilakukan proses pengeringan dan pembriketan.

2.2.4.5 Komposisi dan suhu media gasifikasi

Parameter ini banyak mempengaruhi kesetimbangan massa dan energi dalam proses gasifikasi dalam reaktor. Untuk media gasifikasi yang tetap, maka suhu media gasifikasi yang akan masuk dalam reaktor akan mempengaruhi profil temperatur dalam reaktor gasifikasi. Demikian juga akan berhubungan dengan kemungkinan untuk pendaur-ulangan panas yang terdapat pada *syngas*. Komposisi media gasifikasi juga terkait dengan hasil akhir dari proses gasifikasi, yaitu nilai kalor dari *syngas*, seperti yang telah dijelaskan pada Sub Bab 2.21.

2.2.5 Parameter-parameter unjuk kerja reaktor gasifikasi

Dari sekian banyak parameter-parameter yang mempengaruhi kondisi operasional reaktor gasifikasi, maka demikian halnya juga unjuk kerja reaktor gasifikasi memiliki parameter-parameter utama yang digunakan sebagai pertimbangan efisiensi dari proses gasifikasi yang dilakukan. Parameter-parameter untuk penilaian efisiensi dari reaktor gasifikasi ini sebagian besar sebenarnya dilakukan dengan melakukan analisa pada gas hasil proses gasifikasi.

2.2.5.1 Komposisi gas

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 ini maka nantinya dapat diperhitungkan kandungan energi dalam gas ataupun untuk menganalisa pengoperasian dari reaktor gasifikasi. Analisa rasio antara CO dan CO₂ (CO/CO₂) adalah salah satu cara untuk mengukur kualitas dari gas dan proses gasifikasi.

2.2.5.2 Nilai kalor gas

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 :

$$NKB_{GAS} = \sum_{i=1}^n (Y_i \cdot NKB_i) \quad (2.11)$$

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

NKB_i = Nilai kalor bawah gas terbakar (CO, CH₄, H₂)

Seperti telah dijelaskan pada bagian-bagian sebelumnya nilai kalor *syngas* ini sangat terpengaruh oleh temperatur operasional reaktor gasifikasi, dan juga diketahui bahwa temperatur operasional reaktor gasifikasi juga tergantung dari parameter yang lain, yaitu : *equivalence ratio*, *residence time*, komposisi unsur biomassa, dan kadar kelembaban.

2.2.5.3 Cold gas efficiency

Cold gas efficiency (η_{CG}) merupakan perbandingan antara energi kimia yang dihasilkan oleh *syngas* (didapatkan dari perkalian antara laju alir massa dengan Nilai Kalor Bawah gas) dengan energi kimia dari biomassa (didapatkan dari perkalian antara laju alir massa biomassa dengan Nilai Kalor Bawah biomassa).

$$\eta_{CG} = \frac{(\dot{m}_{gas} \cdot NKB_{gas})}{(\dot{m}_{biomassa} \cdot NKB_{biomassa})} \quad (2.12)$$

2.2.5.4 Hot gas efficiency

Hot gas efficiency (η_{HG}) merupakan perbandingan antara penjumlahan energi kimia dan *sensible heat* dari syngas (H_{gas}) dan penjumlahan energi kimia dan *sensible heat* biomassa ($H_{biomass}$).

$$\eta_{HG} = \frac{(\dot{m}_{gas} \times NKB_{gas}) + H_{gas}}{(\dot{m}_{biomassa} \times NKB_{biomassa}) + H_{biomassa}} \quad (2.13)$$

2.2.5.5 Kandungan tar

Merupakan parameter yang krusial dikarenakan tar, yang merupakan campuran kompleks dari hidrokarbon yang dapat terkondensasi, termasuk didalamnya senyawa aromatik satu cincin hingga lima cincin dan juga terdapat hidrokarbon yang mengandung oksigen dan hidrokarbon poliaromatik, menyebabkan masalah pada proses juga pada peralatan lain yang menggunakan *syngas*. Tar menyebabkan kenaikan kemungkinan terjadinya *slagging* pada *boiler* dan pada logam lain serta pada permukaan *refractory*, dapat merusakkan *reforming catalyst*, sistem *sulphur remover*, dan filter keramik; dapat menyebabkan hambatan dan korosi serta mengurangi efisiensi keseluruhan dari proses. Selanjutnya bila kandungan tar ini dikurangi dengan alat yang menggunakan metode pembasahan secara fisik, tar hanya akan berpindah dari gas menuju air limbah saja, dengan konsekuensi kerugian ganda yaitu berkurangnya energi kimia dalam gas dan menghasilkan air limbah.

Pada akhirnya kandungan tar dan komposisinya akan dapat memberikan acuan untuk peralatan konversi energi yang dapat digunakan pada kondisi tar yang ada, dan juga kandungan tar menjadi pertimbangan teknis dan ekonomis dari cara pembersihan kandungan tar agar dapat sesuai dengan kebutuhan proses lebih lanjut.

2.2.6 Pengendalian otomatis reaktor gasifikasi

Pengoperasian dari reaktor gasifikasi mempunyai beberapa parameter yang nantinya akan menentukan kualitas dan kuantitas dari *syngas*. Dari beberapa parameter tersebut mempunyai keterkaitan satu sama lain, pada saat terjadi perubahan pada satu parameter dapat mempengaruhi satu atau dua parameter yang

lain, sebagai contoh perubahan *equivalence ratio* yang direpresentasikan dalam perubahan laju massa alir dari media gasifikasi akan menyebabkan perubahan temperatur dan juga perubahan kandungan energi dari *syngas*. Atau dapat juga dengan memperhatikan perubahan suhu yang terjadi dapat digunakan untuk mengindikasikan terjadinya perubahan pada parameter-parameter yang lain.

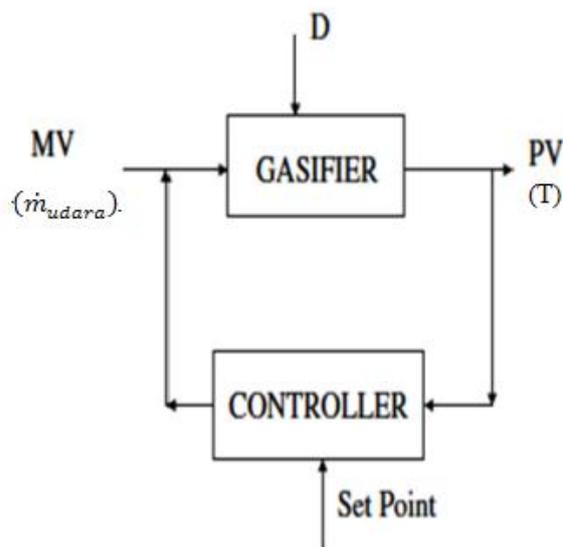
Pada awalnya reaktor gasifikasi adalah sebuah alat yang sederhana dan tidak mudah digunakan. Akan tetapi dengan berkembangnya pemahaman tentang reaktor gasifikasi maka alat ini akhirnya menjadi berkembang menjadi lebih aman, mudah dioperasikan dan dikendalikan. Penggunaan instrumentasi pengukur untuk mengukur parameter-parameter operasional (suhu, tekanan, laju alir massa media gasifikasi) membuat reaktor gasifikasi ini menjadi lebih mudah dipahami dan dikembangkan. Pemakaian instrumentasi pengukur dengan basis elektronik dan data akuisisi semakin melengkapi data tentang pengoperasian reaktor gasifikasi.

Fakta yang terjadi, pengendalian operasional reaktor gasifikasi ini membutuhkan keberadaan operator yang mampu untuk menyelaraskan kondisi operasional dari reaktor. Hal ini menyebabkan biaya tetap tambahan untuk pengoperasian reaktor, sehingga mengakibatkan reaktor-reaktor gasifikasi dengan kapasitas besar lebih disukai. Pengoperasian reaktor gasifikasi yang otomatis dan minim operator pada akhirnya menjadi hal yang penting secara ekonomis untuk pengoperasian reaktor gasifikasi skala kecil.

Dari sekian parameter operasional yang telah disebutkan diatas dan perkembangan teknologi instrumentasi memunculkan sebuah potensi untuk memanfaatkan sistem pengendalian otomatis pada reaktor gasifikasi. Suhu ternyata menjadi sebuah faktor paling utama dalam proses gasifikasi karena memiliki pengaruh yang besar terhadap proses gasifikasi sehingga bila suhu ini dapat selalu diawasi dan dikendalikan maka kualitas dan kuantitas *syngas* dapat dikendalikan.

Sistem pengendalian otomatis proses gasifikasi pada reaktor gasifikasi dapat dilakukan dengan suhu sebagai parameter terukur. Bila suhu reaktor gasifikasi (T) adalah parameter yang diukur dan kemudian dikendalikan, maka *equivalence ratio* (ER) adalah parameter yang dapat digunakan sebagai

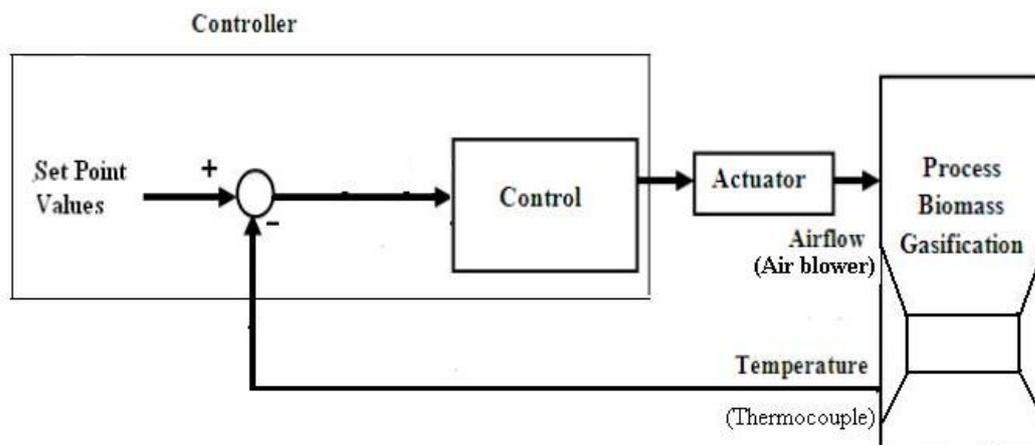
pengendali tingkatan suhu dalam reaktor gasifikasi. Perubahan ER dalam hal ini dapat direpresentasikan pada perubahan laju alir massa media gasifikasi (\dot{m}_{udara}). Selain itu terdapat parameter-parameter lain yang tidak terukur dan tidak terkendali yang nantinya akan mengakibatkan perubahan suhu, parameter-parameter ini disebut sebagai parameter pengganggu/*disturbance* (D), contohnya adalah : kadar kelembaban biomassa yang berubah-ubah, *feed rate* biomassa yang tidak konstan, ukuran fisik partikel biomassa yang tidak seragam, densitas biomassa yang heterogen, dan yang lainnya. Dari beberapa faktor pengganggu yang telah disebutkan kadar kelembaban biomassa adalah faktor yang sangat mengganggu proses gasifikasi.



Gambar 2.6 Blok diagram dasar dari proses gasifikasi (disunting dari Gandhi, dkk 2012)

Pada gambar 2.6 dapat dilihat blok diagram dasar dari proses gasifikasi, dari gambar dapat dilihat beberapa jenis variabel yang membangun proses gasifikasi, yaitu variabel proses/*process variable* (PV) dalam hal ini dapat berupa parameter-operasional ataupun parameter unjuk kerja dari reaktor gasifikasi, contohnya adalah temperatur. Variabel dalam otomasi berikutnya adalah variabel termanipulasi/*manipulated variabel* (MV), yang biasanya merupakan parameter

operasional dari reaktor gasifikasi. Dan yang terakhir adalah variabel pengganggu (D), yang merupakan parameter-parameter yang bisa mengakibatkan perubahan-perubahan pada parameter proses dan unjuk kerja. Gambar 2.7 adalah gambar diagram blok sistem pengendalian proses gasifikasi dengan menggunakan temperatur sebagai variabel proses, dan laju alir massa udara sebagai variabel termanipulasi.



Gambar2.7 Diagram blok sistem pengendalian proses dalam reaktor gasifikasi

2.3 Penelitian-penelitian terdahulu

2.3.1 Penelitian karakteristik MSW

Sampah adalah sumber biomassa yang memiliki keunikan karena komposisi dari sampah yang sulit diprediksi. Zhou, dkk (2014) melakukan penelitian untuk membuat klasifikasi komponen dari sampah padat perkotaan (*Municipal Solid Waste/MSW*) untuk proses konversi termal dalam riset konversi sampah menjadi energi. Penelitian tersebut dilakukan 26 jenis bahan yang sering ditemukan pada sampah. Pada penelitian tersebut karakteristik dari 26 komponen sampah tersebut dianalisa secara uji proximate, uji ultimate, dan uji kandungan energi (nilai kalor atas/*HHV*) dan diklasifikasikan menjadi 6 kelas utama komponen pembentuk sampah. Sebagian hasil penelitian dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Klasifikasi komponen dan hasil analisa karakteristik komponen sampah

Groups	Samples	Proximate analysis (wt%)			Ultimate analysis (wt%)					HHV (MJ/kg)
		A ^d	V ^d	FC ^d	C ^{daf}	H ^{daf}	O ^{daf}	N ^{daf}	S ^{daf}	
Food residue	Chinese cabbage (CHC)	9.91	67.60	22.49	47.49	5.88	41.79	4.11	0.73	16.99
	Rice (RI)	0.40	84.42	15.18	45.97	6.35	45.74	1.69	0.25	18.14
	Potato (PO)	3.15	79.52	17.33	44.41	5.33	47.82	1.81	0.64	17.10
	Tangerine peel (TP)	2.91	76.49	20.60	48.74	5.92	43.83	1.43	0.08	18.47
	Banana peel (BP)	10.85	64.38	24.77	35.80	4.79	54.93	4.37	0.10	16.39
	Pakchoi (PA)	18.44	63.97	17.59	43.37	5.93	48.64	1.25	0.81	18.90
	Celery (CE)	14.58	65.36	20.06	38.46	6.16	54.52	0.21	0.65	13.57
	Orange peel (OP)	2.15	77.93	19.92	40.28	6.12	52.46	1.08	0.06	17.10
	Spinach (SP)	15.97	65.26	18.77	47.58	6.48	43.93	1.57	0.43	17.08
Wood waste	Poplar wood (PW)	7.54	73.85	18.61	51.36	5.89	41.00	1.52	0.22	18.50
	Poplar leaf (PL)	15.69	68.74	15.57	49.54	5.24	43.30	1.32	0.59	16.85
	Chinar leaf (CL)	9.23	69.74	21.03	52.95	4.88	40.51	1.01	0.65	19.12
	Gingko leaf (GL)	11.62	73.19	15.19	41.35	5.54	50.88	1.36	0.87	15.28
Paper	Blank printing paper (BPP)	10.69	79.33	9.98	45.12	5.31	48.91	0.38	0.28	13.51
	Tissue paper (TIP)	0.52	90.47	9.01	45.18	6.13	48.32	0.25	0.11	17.25
	Newspaper (NE)	8.07	79.54	12.39	48.01	5.71	45.86	0.33	0.09	17.16
Textiles	Cotton cloth (CC)	1.52	84.53	13.95	46.51	5.80	46.98	0.43	0.28	17.43
	Absorbent cotton gauze (ACG)	0.14	94.85	5.01	46.74	5.69	47.23	0.27	0.08	16.82
	Terylene (TE)	0.49	88.60	10.91	62.16	4.14	33.12	0.29	0.28	20.86
Plastics	PS	0.04	99.57	0.39	86.06	6.27	1.93	5.73	0.00	38.93
	LDPE	0.00	99.98	0.02	85.98	11.20	2.61	0.21	0.00	46.48
	HDPE	0.18	99.57	0.25	85.35	12.70	1.90	0.05	0.14	46.36
	PVC	0.00	94.93	5.07	38.34	4.47	56.96 ^a	0.23	0.00	20.83
	PP	0.02	99.98	0.00	83.51	10.64	5.63	0.22	0.00	45.20
	PET	0.09	90.44	9.47	63.01	4.27	32.69	0.04	0.00	23.09
Rubber	Rubber (RU)	10.24	62.83	26.93	89.53	6.70	1.07	0.69	2.02	35.74

Sumber : Zhou, dkk, 2014

Dari Tabel 2.2 dapat terlihat ternyata bahan plastik memiliki nilai *HHV* dan *volatile content* yang tinggi, serta kandungan abu yang terendah dibandingkan dengan bahan yang lain.

Gug, dkk (2014) melakukan penelitian pada briket biomassa sampah yang mengandung campuran plastik yang dapat di daur ulang. Dalam penelitian tersebut sampah domestik yang berupa kertas, material berserat termasuk kain, pakaian dan kayu dicampur dengan plastik yang dapat didaur ulang (PET, HDPE dan PP), serta *styrofoam*. Setelah proses pencacahan hingga ukuran serpih 8mm dilakukan pencampuran dengan persentase 70% sampah domestik, 5% *styrofoam*, dan 25% salah satu dari bahan plastik yang dapat didaur ulang. Proses pengurangan kadar air di lakukan dengan 2 cara yaitu: (1) pemanasan saja dan (2) pemanasan serta pem-vakum-an. Proses pembriketan dilakukan dengan 2 suhu yang berbeda. Sebagian hasil penelitian dari Gug, dkk (2014) dapat dilihat pada Tabel 2.2, Tabel 2.3, dan Gambar 2.8.

Tabel 2.3 Analisa proximate dari briket dan referensinya (biomassa dan batubara)

Proximate analysis result of investigated briquettes and reference data.

Samples		M (%)	VM (%)	Ash (%)	FC (%)
125 °C (un-dried)	PP	1.73	87.02	5.40	5.85
	PET	2.13	82.50	4.99	10.38
	HDPE	2.46	82.29	5.80	9.45
150 °C (un-dried)	PP	1.36	84.94	5.00	8.71
	PET	1.70	83.16	5.09	10.05
	HDPE	2.23	82.91	5.69	9.17
150 °C (vacuumed)	PP	1.40	83.66	6.19	8.75
	PET	2.35	81.31	5.69	10.65
	HDPE	2.42	82.00	5.99	9.59
150 °C (S. dried)	PP	1.41	83.49	6.28	8.82
	PET	1.95	82.72	5.89	9.44
	HDPE	2.01	84.29	5.58	8.12
150 °C (L. dried)	PP	1.03	84.46	4.28	10.23
	PET	1.86	82.47	5.39	10.28
	HDPE	1.63	84.39	5.38	8.60
DSW (no Plastics)		5.6	75.0	9.5	9.9
Biomass	Pistachio Shell	8.75	82.5	1.3	7.45
	Wheat Grain	10.3	80.0	2.8	6.9
	Wood Pellets	7.96	82.0	1.3	8.74
	Anthracite	0.4	6.2	6.1	87.4
Coal	Bituminous	1.4	38.5	7.7	52.4
	Lignite	7.6	36.8	7.9	47.7

Note: DSW = domestic solid waste (not including plastics), M = moisture content, VM = volatile matter, Ash = ash residue, FC = fixed carbon

Sumber : Gug, dkk, 2014

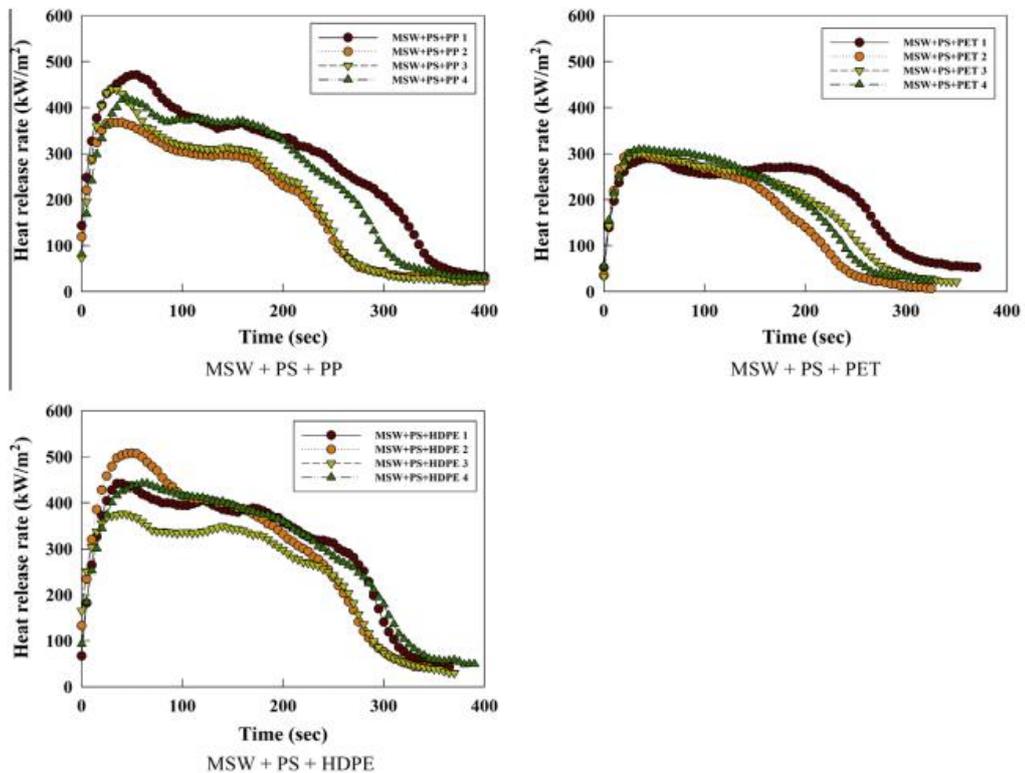
Pada Tabel 2.2 terdapat referensi berupa biomassa dan batubara yang digunakan sebagai pembandingan. Isi dari Tabel 2.3 adalah hasil perhitungan energi dari briket dan referensi.

Tabel 2.4 Energi spesifik dari material dan briket

Material	MJ/kg
PE	46.3
PP	46.2
PET	25.6
PS	41.4
DSW (based on paper)	18.6
DSW + PS + PP	$(0.7 \times 18.6) + (0.05 \times 41.4) + (0.25 \times 46.2) = 26.6$
DSW + PS + PET	$(0.7 \times 18.6) + (0.05 \times 41.4) + (0.25 \times 25.6) = 21.5$

Sumber : Gug, dkk, 2014

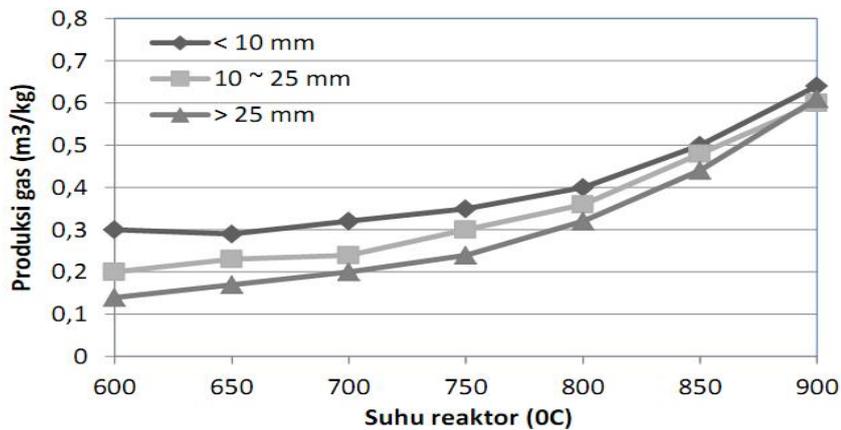
Gambar 2.8 adalah grafik energi panas yang dilepaskan oleh briket pada proses pembakaran dari pembriketan dengan suhu 150⁰ dan kondisi bahan baku ter-vakum.



Gambar 2.8. Grafik energi panas yang dilepaskan dari pembakaran briket (Gug, dkk, 2014)

2.3.2 Penelitian proses gasifikasi.

Sudarmanta (2011) melakukan penelitian tentang pengaruh suhu reaktor gasifikasi dan ukuran partikel terhadap karakterisasi gasifikasi biomassa limbah kayu. Pada Gambar 2.9 yang merupakan hasil penelitian tersebut terlihat bahwa produksi gas dari proses gasifikasi dipengaruhi secara signifikan oleh kondisi operasi yaitu berupa suhu reaktor dan ukuran partikel biomassa. Semakin kecil ukuran partikel biomassa limbah kayu menunjukkan produksi gas yang semakin tinggi, begitu juga dengan suhu ruangan reaktor, yaitu semakin tinggi suhu ruangan reaktor maka produksi gas juga semakin tinggi. Hal ini dapat dijelaskan bahwa penambahan suhu reaktor dapat mendorong terjadinya dekomposisi rantai karbon dan uap tar yang selanjutnya dikonversi menjadi gas melalui reaksi *Boudouard* dan *thermal cracking*.

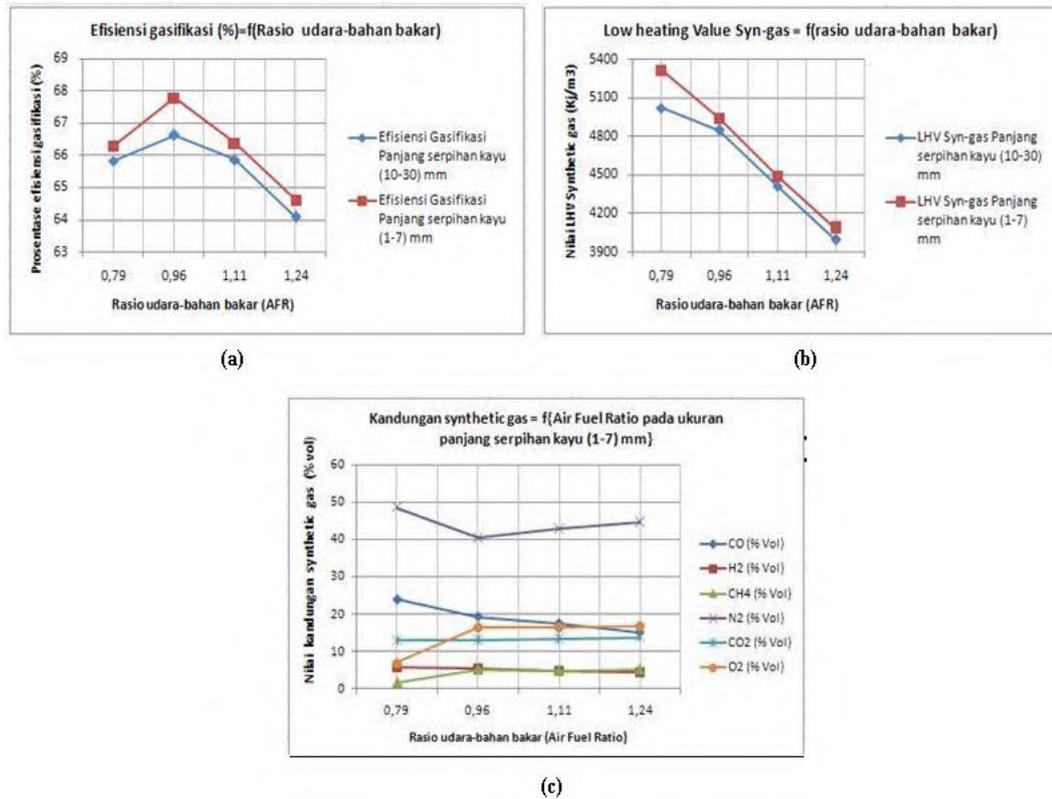


Gambar 2.9 Pengaruh suhu reaktor dan ukuran butiran terhadap produksi *syngas* (Sudarmanta, 2011)

Pada suhu reaktor gasifikasi yang sama, ukuran partikel yang lebih kecil dan kenaikan suhu reaktor cenderung menghasilkan kenaikan jumlah gas yang dihasilkan dengan kandungan tar dan arang lebih rendah. Pengaruh perbedaan ukuran partikel terhadap gas yang dihasilkan signifikan pada suhu reaktor gasifikasi 600 s/d 800⁰C, sedangkan pada suhu diatas 800⁰C, gas yang dihasilkan relatif konstan. Juga didapatkan kecenderungan bahwa pada ukuran partikel <10 mm menghasilkan komposisi H₂ dan CO yang lebih tinggi dibandingkan ukuran partikel >10 mm. 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: H₂ = 14,20 %, CO₂ = 8,32%, CO = 10,42%, CH₄ = 1,54%, dan C₂H₆ = 0,18% dengan nilai kalor bawah sebesar 3246,80 KJ/kg.

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 2.10.

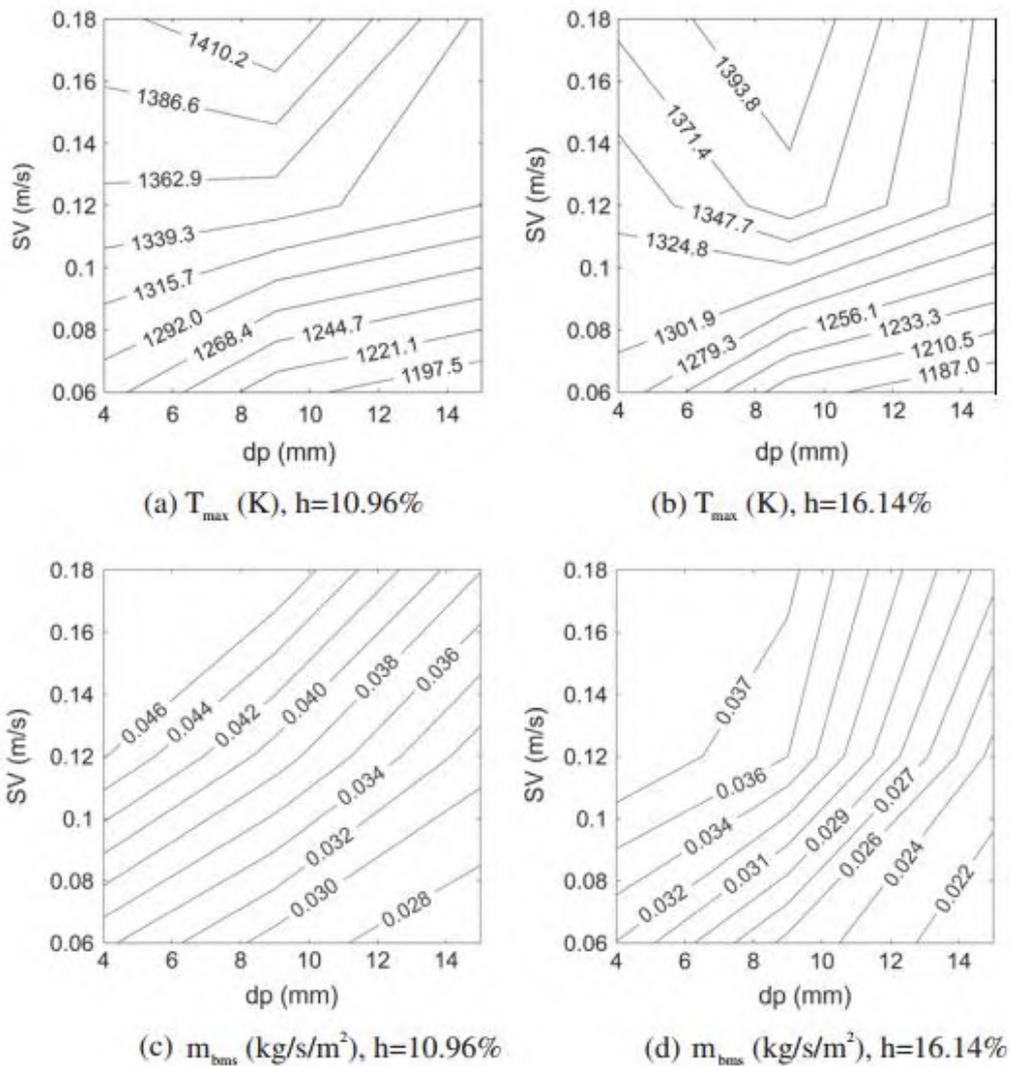


Gambar 2.10 Grafik air-fuel ratio (*AFR*) vs (a) Efisiensi gasifikasi, (b) *LHV*, (c) Kandungan *synthetic gas*. (Ardianto, 2011)

Sebuah penelitian dengan metode eksperimental dilakukan oleh Pérez, dkk, (2012) untuk mengetahui efek dari parameter operasional dan desain, terutama pada geometri reaktor, *superficial velocity* udara, kadar kelembaban biomassa, ukuran partikel biomassa dan jenis biomassa (kulit pinus dan lumpur selokan) pada unjuk kerja pembakaran/gasifikasi biomassa sampah dalam reaktor gasifikasi jenis *fixed bed downdraft*. Salah satu hasil yang penting dari penelitian ini adalah efek dari kadar kelembaban biomassa terhadap parameter operasional, terutama suhu reaktor, yang dapat dilihat pada Gambar 2.11.

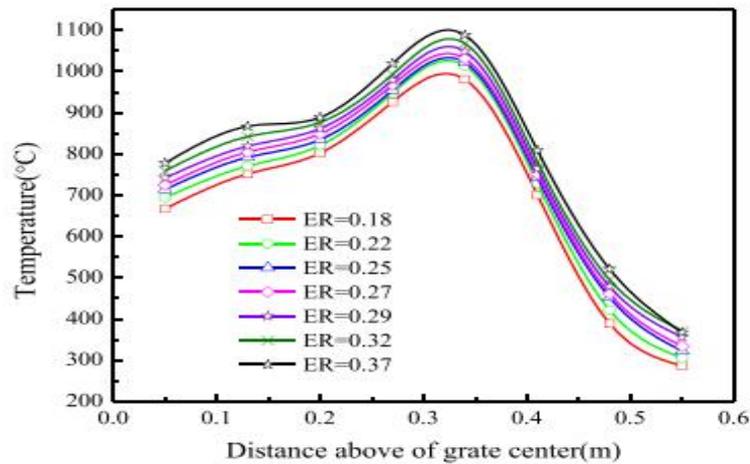
Dari Gambar 2.11 dapat dilihat bahwa peningkatan kadar kelembaban (h) pada biomassa berakibat meningkatnya massa air yang harus diuapkan. Hal ini menyebabkan berkurangnya temperatur maksimum (gambar 2.10a dan b) dan

turunnya laju konsumsi biomassa (Gambar 2.10c dan d). Keduanya didalam proses gasifikasi mempengaruhi kondisi stoikiometri dan kecepatan reaksi, sehingga pada akhir berpengaruh pada penurunan *equivalence ratio*. Hasil lainnya adalah terjadinya penurunan temperatur, penurunan laju konsumsi biomassa, dan penurunan *equivalence ratio* akibat peningkatan diameter partikel (*dp*).

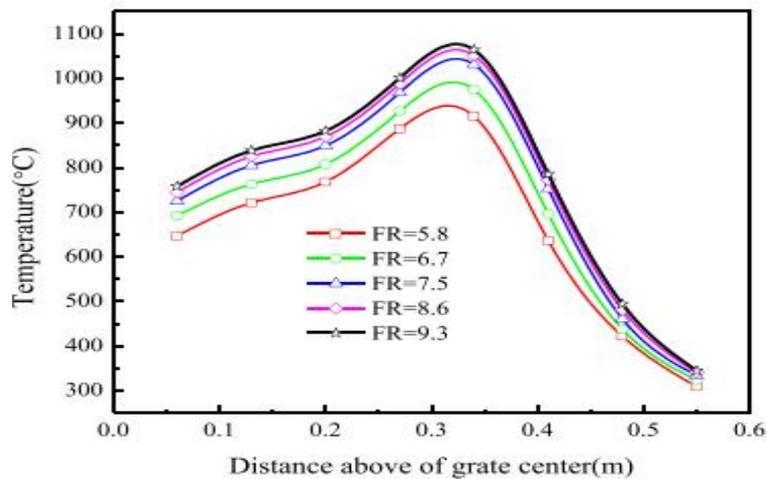


Gambar 2.11 Efek kadar air kadar kelembaban dan *superficial velocity* terhadap temperatur dan laju konsumsi biomassa ($\dot{m}_{biomassa}$) pada proses gasifikasi. (Pérez, dkk, 2012)

Guo, dkk (2014) melakukan sebuah studi eksperimen yang mempelajari efek dari desain dan parameter operasional pada proses gasifikasi biomassa pada reaktor gasifikasi *fixed bed downdraft*. Parameter yang diteliti adalah geometri reaktor, *equivalence ratio*, dan laju pemasokan biomassa. Biomassa yang digunakan adalah batang tanaman jagung.



(a)



(b)

Gambar 2.12 Efek *equivalence ratio* dan laju pemasokan biomassa terhadap temperatur pada reaktor gasifikasi *downdraft* (Guo, dkk, 2014)

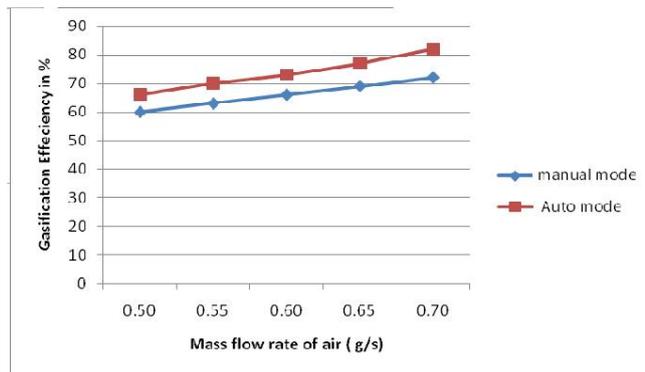
Sebagian hasil penelitian tersebut dapat dilihat Gambar 2.12, pada grafik (a) terlihat bahwa peningkatan *equivalence ratio* akan mengakibatkan peningkatan

temperatur proses gasifikasi karena memicu kenaikan reaksi pembakaran yang melepaskan energi panas lebih banyak. Pada Gambar 2.12 grafik (b) menunjukkan bahwa temperatur pada reaktor gasifikasi juga merupakan fungsi laju pemasokan (*feed rate*) biomassa. Dapat dilihat bahwa temperatur akan meningkat seiring dengan kenaikan laju pasokan biomassa hal ini dikarenakan meningkatnya laju pasokan biomassa mengakibatkan percepatan laju reaksi dalam reaktor gasifikasi, terutama menghasilkan reaksi oksidasi yang lebih kuat dan akhirnya meningkatkan temperatur proses gasifikasi

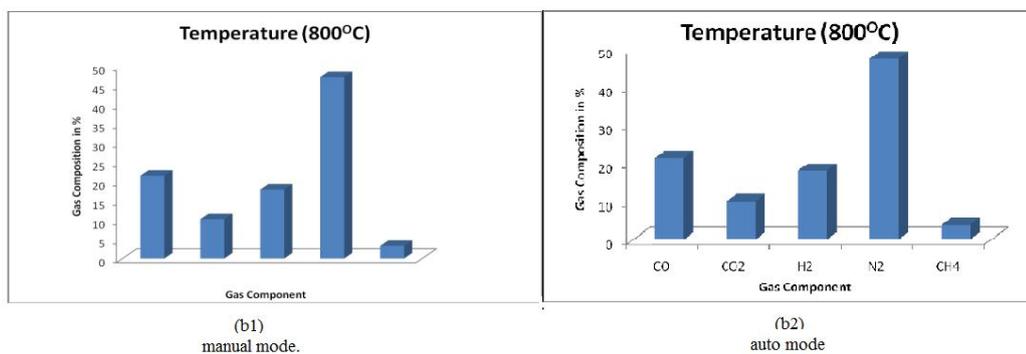
2.3.3 Penelitian pada reaktor gasifikasi berpengendali otomatis

Sivakumar,dkk (2012) melakukan penelitian pada proses gasifikasi briket serpihan kayu dengan binder kotoran sapi pada reaktor gasifikasi *downdraft* berkapasitas 10 kW yang telah berpengendali otomatis dengan tujuan untuk meneliti efektifitas dari proses gasifikasinya. Penilaian efektifitas dilakukan dengan membandingkannya dengan kinerja reaktor gasifikasi yang tanpa pengendalian otomatis. Data hasil dari penelitian tersebut menunjukkan adanya peningkatan pada komposisi *syngas* dan efisiensi pada proses gasifikasi dengan menggunakan pengendalian otomatis, grafik hasil penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.13.

Penelitian yang dilakukan oleh Striugas,dkk (2014) dengan melakukan studi eksperimen untuk mengevaluasi kinerja produksi gas dari reaktor gasifikasi *downdraft* yang sudah menggunakan pengendalian otomatis dengan biomassa yang berbeda-beda. Pada reaktor gasifikasi untuk penelitian tersebut telah terpasang sistem pengendalian otomatis dengan basis PID untuk mengendalikan temperatur proses, ketinggian biomassa dalam reaktor, dan sistem pembuangan arang, dengan menggunakan variabel termanipulasi yaitu udara untuk gasifikasi, laju pasokan biomassa, gerakan *grate* dan *conveyor*. Eksperimen dilakukan dengan beberapa jenis biomassa dengan menggunakan pengaturan proses pada sistem kendali yang tidak berubah. Tujuannya adalah untuk mengetahui perbedaan parameter proses yang terjadi dan untuk mengetahui apakah diperlukan pengaturan ulang untuk setiap penggantian biomassa agar kualitas dan kuantitas *syngas* tetap stabil.



(a)



Gambar 2.13. Grafik perbandingan antara efisiensi dan komposisi gas pada proses gasifikasi tanpa pengendalian otomatis dan pada proses gasifikasi dengan pengendalian otomatis (Sivakumar, 2012)

Hasil dari penelitian tersebut adalah bahwa terjadi perbedaan yang signifikan pada temperatur proses, *pressure drop*, dan kandungan residu, selain itu jumlah gas yang dihasilkan dan energinya juga bervariasi sesuai dengan biomassa yang digunakan. Walaupun terjadi perbedaan dalam prosesnya dan hasil akhir gas tetapi bermacam-macam biomassa yang digunakan terbukti dapat diproses dengan satu reaktor gasifikasi yang telah menggunakan pengendalian otomatis tanpa mengubah pengaturan proses.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian dilaksanakan dengan metode eksperimental, diawali dengan studi literatur dengan mengumpulkan informasi yang berasal dari buku, *e-book*, jurnal/paper, dan tugas akhir. Langkah berikutnya adalah melakukan survei, pengolahan dan pengujian briket *MSW*.

Sebelum pelaksanaan eksperimen utama selalu dilakukan persiapan, pemeriksaan, dan uji coba operasional pada reaktor gasifikasi dalam rangka memastikan kesiapan reaktor gasifikasi dan perlengkapannya untuk proses pengambilan data dan juga menjaga keselamatan kerja saat pelaksanaan eksperimen. Persiapan alat ukur dan kalibrasi juga dilakukan sebelum pelaksanaan masing-masing eksperimen untuk menjamin validitas dari pengukuran.

Inti dari penelitian yang akan dilakukan adalah pelaksanaan 2 eksperimen utama sebagai berikut :

1. Gasifikasi briket *MSW* dengan reaktor gasifikasi *downdraft* dengan melakukan variasi pada laju alir massa udara yang masuk zona *partial combustion* tanpa sistem pengendali suhu.
2. Gasifikasi briket *MSW* dengan reaktor gasifikasi *downdraft* yang menggunakan sistem pengendalian suhu zona *partial combustion* dengan masukan data program berdasarkan data suhu dan laju alir massa dari eksperimen pertama.

Eksperimen pertama akan dilakukan dengan metode *batch*, yaitu dilakukan dengan satu kali 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 pertama bertujuan untuk memperoleh karakteristik proses gasifikasi briket *MSW* dan juga untuk mempersiapkan data yang nantinya akan digunakan untuk pengaturan sistem otomatis pengendalian suhu reaktor gasifikasi pada eksperimen kedua.

Untuk perhitungan-perhitungan efisiensi energi gasifikasi diperlukan analisa nilai kalor pada briket *MSW* yang akan dilakukan di Laboratorium Pusat Studi Energi dan Rekayasa LPPM ITS.

Eksperimen kedua akan dilakukan dengan metode *continuous*, dengan cara melakukan pengisian *MSW* dalam reaktor hingga mencapai tingkat batas atas tertentu dan dilakukan pengisian ulang bila briket *MSW* telah mencapai batas bawah tertentu dari reaktor gasifikasi. Pada eksperimen kedua, akan digunakan sistem kendali otomatis suhu zona *partial combustion* pada reaktor gasifikasi. Sistem pengendalian otomatis ini akan menggunakan satu sensor suhu pada zona *partial combustion* sebagai masukan untuk *controller* yang akan diolah dan akan menghasilkan keluaran sinyal yang akan mengatur putaran motor *blower* udara sehingga laju alir massa udara dapat berubah untuk mengatur suhu agar selalu pada kondisi yang telah di-*setpoint*-kan sebelumnya. Untuk pengoperasian sistem tersebut akan digunakan masukan data suhu dan laju alir massa udara dari eksperimen pertama. Eksperimen kedua hanya mengalami 2 variasi perubahan pengaturan yang dilakukan pada sistem pengendalian suhu. Dengan menggunakan pengaturan berdasar data dari eksperimen pertama, variasi pertama menggunakan data suhu dan laju alir massa udara yang menghasilkan kualitas *syngas* tertinggi dan variasi kedua menggunakan data suhu dan laju alir massa udara yang menghasilkan kuantitas *syngas* tertinggi. Eksperimen kedua ini bertujuan untuk menguji kinerja dan efektifitas sistem pengendalian suhu.

Dari kedua eksperimen akan didapatkan data sebagai berikut:

1. Data laju alir massa udara (\dot{m}_{udara}) untuk masing-masing eksperimen.
2. Data suhu pada masing-masing *thermocouple* pada tiap eksperimen.
3. Data komposisi dan nilai kalor dari *syngas* pada tiap-tiap eksperimen (LHV_{syn}).
4. Data laju alir massa *syngas* (\dot{m}_{syn}) pada tiap-tiap eksperimen

5. Data laju alir massa MSW (\dot{m}_{MSW}) pada tiap-tiap eksperimen.

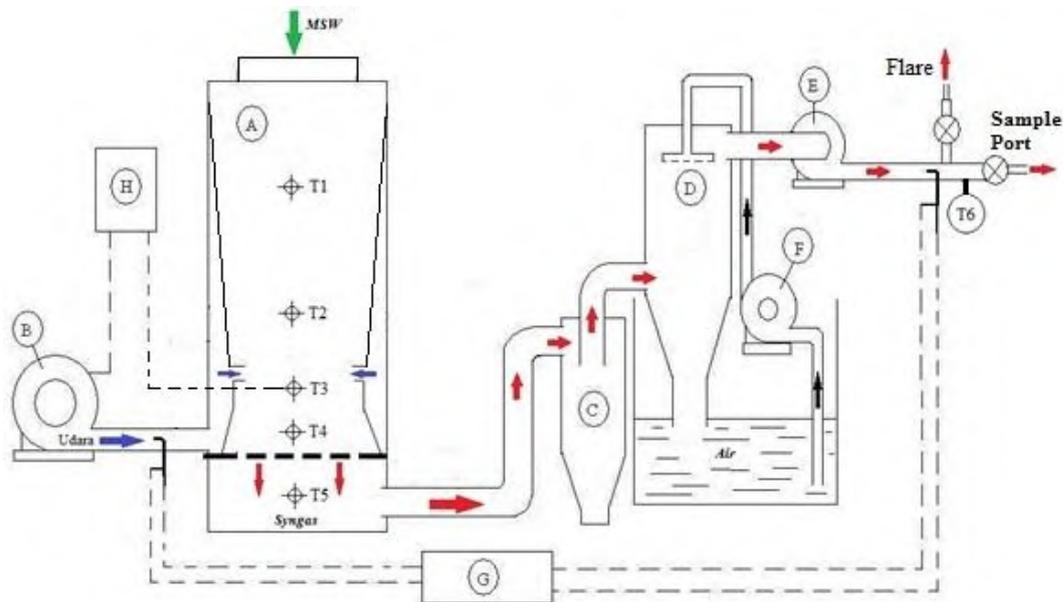
Berdasarkan data-data diatas akan dilakukan perhitungan *air-fuel ratio* (*AFR*), nilai kalor dari *syngas* , dan efisiensi gasifikasi/*cold gas efficiency* (η_{CG}). Data hasil eksperimen akan ditabelkan dan diolah menjadi grafik dan dianalisa untuk pengambilan kesimpulan.

Tabel 3.1. Tabel variabel-variabel dalam penelitian

	Variabel Tetap	Variabel Berubah	Variabel Terukur	Variabel Terhitung	Visualisasi
Parameter Operasional Reaktor Gasifikasi	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensi reaktor gasifikasi • Suhu udara • Massa <i>batch</i> briket MSW (khusus untuk eksperimen I) • Briket <i>MSW</i> • Putaran <i>suction pump</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Laju alir massa udara (khusus untuk eksperimen I) • <i>Setting value</i> suhu dan laju alir massa udara (khusus untuk eksperimen II) 	<ul style="list-style-type: none"> • Laju alir massa udara • Suhu pada reaktor (4 titik) • Suhu inlet media gasifikasi • Massa total briket <i>MSW</i> • Massa <i>re-load</i> briket <i>MSW</i> (khusus untuk eksperimen II) • Waktu operasional reaktor • Waktu antara <i>re-load</i> briket MSW (khusus untuk eksperimen II) 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Air-fuel ratio</i> (<i>AFR</i>) • Laju alir massa <i>MSW</i> 	
Parameter Unjuk Kerja Reaktor Gasifikasi			<ul style="list-style-type: none"> • Laju alir massa <i>syngas</i> • Komposisi <i>syngas</i> • Nilai kalor <i>MSW</i> • Suhu <i>syngas</i> yang keluar dari reaktor • Suhu <i>syngas</i> yang keluar dari <i>suction pump</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Nilai kalor <i>syngas</i> • Efisiensi gasifikasi 	Nyala api <i>syngas</i>

Dari data variabel terukur dan terhitung yang terdapat pada Tabel 3.1 maka akan diolah menjadi beberapa grafik perbandingan antara eksperimen I dan II sebagai berikut :

Skema peralatan eksperimen dapat dilihat pada Gambar 3.1. Diagram alir dari alur penelitian dapat dilihat pada Lampiran 1, 2, dan 3.



Gambar 3.1 Skema peralatan eksperimen, yang terdiri dari : A. Reaktor gasifikasi; B. *blower* udara; C. *Cyclone*; D. *Water scrubber*; E. Pompa hisap syngas (*Syngas suction pump*); F. Pompa air; G. Data akuisisi laju alir massa; H. *Gasifier Control Unit* (GCU); T1 s/d T6. *Thermocouple*.

3.2 Bahan, Alat, dan Perlengkapan Penelitian

3.2.1. Briket *MSW*

Bahan biomassa yang akan digunakan pada penelitian ini adalah briket *MSW* yang berasal dari sampah perkotaan dengan persentase bahan organik 60% dan 40% 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 dibriketkan seluruh bahan telah melalui proses pencacahan hingga ukuran partikel tertentu. Seluruh proses pembriketan akan dilakukan di laboratorium jurusan Teknik Mesin ITS. Sebelum digunakan dalam eksperimen,

briket *MSW* tersebut akan diukur kandungan airnya, dan nilai kalornya di Laboratorium Pusat Studi Energi dan Rekayasa LPPM ITS.

3.2.2. 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*.

- **Unit reaktor gasifikasi**

Unit gasifikasi pada reaktor tersebut merupakan reaktor gasifikasi tipe *fixed bed* dengan aliran *downdraft* atau biasa disebut reaktor gasifikasi *downdraft* saja, dapat dilihat pada gambar 3.2. Bentuk umum reaktor ini adalah silinder dengan ukuran diameter luar 650 mm dan tinggi 1250 mm. Pintu pengisian biomassa berada pada bagian atas reaktor

- ***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*, memiliki kemampuan menghasilkan laju alir massa udara maksimum sebesar 0,352 kg/s, sedangkan *suction pump* berfungsi untuk menghisap *syngas*. Dua perlengkapan ini dapat dilihat pada gambar 3.3.

- ***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 3.2 Unit utama reaktor gasifikasi *downdraft*.

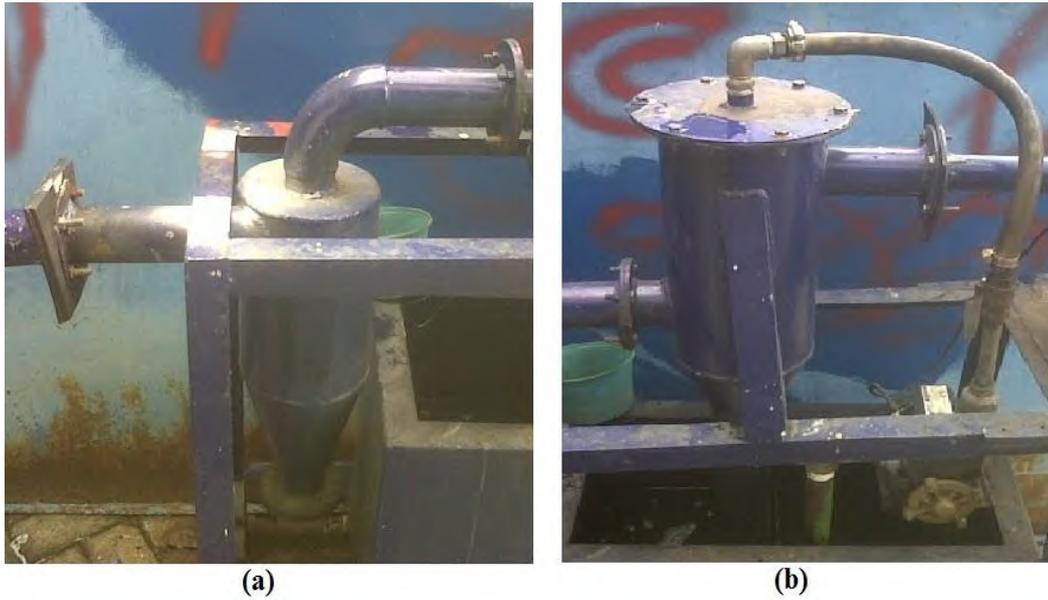


(a)



(b)

Gambar 3.3 (a) *blower*, dan (b) *induced fan*.



Gambar 3.4 (a) *Cyclone*; (b) *Water scrubber*

- **Pengatur putaran *blower*.**

Karena pada eksperimen pertama akan dilakukan variasi pada laju alir massa udara yang memasuki reaktor gasifikasi maka dipergunakan alat pengatur putaran *blower* agar laju alir massa udara keluaran dari pompa udara tekan dapat bervariasi. Cara kerja pengatur putaran tersebut secara garis besar adalah dengan mengatur *duty cycle* dari frekuensi arus listrik pada motor arus AC penggerak *blower*, yang pada akhirnya akan mengubah putaran *blower* dan laju alir massa udara akan ikut berubah.

3.2.3. 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*.

- **Alat ukur suhu**

Alat ukur suhu pada reaktor gasifikasi yang akan digunakan menggunakan sensor berupa *thermocouple* tipe K dengan posisi pemasangan tersebar pada 6 titik, dengan pengaturan sebagai berikut :

1. T1 hingga T5 pengukuran pada unit utama reaktor gasifikasi difungsikan untuk mengukur profil suhu pada zona-zona gasifikasi.
2. T6 titik pengukuran terakhir berada pada pipa keluaran *suction pump* untuk mengukur suhu *syngas* setelah melewati peralatan pembersih *syngas*.

Suhu pada masing-masing titik akan diukur secara simultan dengan menggunakan perangkat data akuisisi suhu. Posisi titik pengukuran suhu dapat dilihat pada Gambar 3.1.

- **Alat ukur laju alir massa**

Alat ukur laju alir massa media gasifikasi dan *syngas* yang digunakan memakai *pitot-static tube* untuk menghasilkan perbedaan tekanan (δ_p) 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*.

3.2.4. *Temperature Controller*

Alat ini merupakan sistem pengendali suhu otomatis zona *partial combustion*. *Temperature controller* ini terdiri dari komponen utama berupa *programmable micro controller* yang didalamnya terdapat telah terdapat program pengendalian suhu reaktor. Masukan (*input*) dari alat ini berasal dari sensor suhu berupa *thermocouple* tipe K yang diletakkan pada zona *partial combustion*. Data suhu dan laju alir massa udara yang didapatkan dari eksperimen pertama akan digunakan untuk pemrograman pada alat ini.

Alat ini akan terus-menerus mengawasi suhu pada zona *partial combustion*, bila terjadi penurunan ataupun kenaikan suhu melebihi pengaturan batas suhu maka alat ini akan mengatur putaran *blower* udara secara otomatis agar suhu tetap terjaga.

3.3 Prosedur eksperimen dan pengambilan data

Berikut ini adalah prosedur pelaksanaan eksperimen dan pengambilan data pada proses gasifikasi.

1. Mempersiapkan briket *MSW* sesuai kebutuhan.
2. Memeriksa dan mempersiapkan reaktor gasifikasi dan perlengkapannya.
3. Memeriksa dan mempersiapkan alat ukur.
4. Memeriksa dan mempersiapkan sistem pengendali suhu (khusus untuk eksperimen kedua).
5. Melakukan proses penyalaan reaktor gasifikasi dengan langkah sebagai berikut :
 - menghidupkan *suction pump* selama 2 menit untuk membuang sisa-sisa gas yang mungkin masih ada dalam reaktor.
 - menyalakan reaktor (dalam kondisi *suction pump* hidup) dengan cara memasukkan material pemancing bara api (arang, kertas, atau kain) kedalam reaktor (*throat*) secukupnya, kemudian dinyalakan dengan memberi sedikit akseleran (*solar*), bila bara api tidak terjadi maka ditambahkan lagi material dan akseleran secukupnya.
 - bila bara api telah terbentuk, tunggu hingga merata dan stabil.
 - memasukkan briket *MSW* sedikit demi sedikit hingga mencapai jumlah yang ditentukan
6. Untuk eksperimen I, menghidupkan *blower* udara dengan pengaturan kondisi putaran minimum (laju alir massa udara minimum) kemudian menaikkan putaran *blower pump* hingga mencapai kondisi putaran untuk laju alir massa yang ditentukan
7. Untuk eksperimen II, saat *blower* udara dihidupkan maka secara otomatis sistem pengendali suhu akan berfungsi secara otomatis mengatur laju alir massa udara yang telah ditentukan sesuai target pengendalian suhu yang telah ditentukan
8. Memulai proses pengambilan data dan sampel *syngas*.

9. Untuk eksperimen pertama dengan sistem *batch* maka pengambilan data dilakukan hingga briket *MSW* mencapai batas bawah yang telah ditentukan. Untuk eksperimen kedua dengan sistem *continuous*, ketinggian briket *MSW* dalam reaktor selalu diawasi agar tidak kurang dari batas bawah yang telah ditentukan, bila batas bawah telah tercapai maka dilakukan pengisian ulang.
10. Melakukan proses mematikan reaktor gasifikasi dengan langkah kebalikan dari langkah penyalaan reaktor.
11. Untuk eksperimen berikutnya dilakukan setelah suhu reaktor telah kembali mencapai suhu ruangan.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik briket *MSW*

Briket *municipal solid waste (MSW)* merupakan biomassa yang akan digasifikasikan pada penelitian ini, oleh karena itu perlu diketahui karakteristik dari briket tersebut sebelum digunakan pada proses gasifikasi. Briket *MSW* yang digunakan pada penelitian ini merupakan hasil riset dan pengembangan yang dilakukan oleh Lab. Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar Teknik Mesin ITS, briket tersebut memiliki komposisi sebagai berikut :

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

Briket *MSW* tersebut mengalami proses penekanan dalam proses pembuatannya sehingga berbentuk silinder dengan diameter 70 mm dan tinggi 150 mm. Contoh briket *MSW* dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Briket *MSW* yg digunakan dalam penelitian

Setelah mengalami proses penekanan, briket tersebut di keringkan secara alami dengan sinar matahari hingga kandungan airnya mencapai 20-30%. Kandungan air dari briket diuji dengan menggunakan alat uji kandungan air portabel dengan metoda sampel acak untuk tiap *batch* produksi briket.

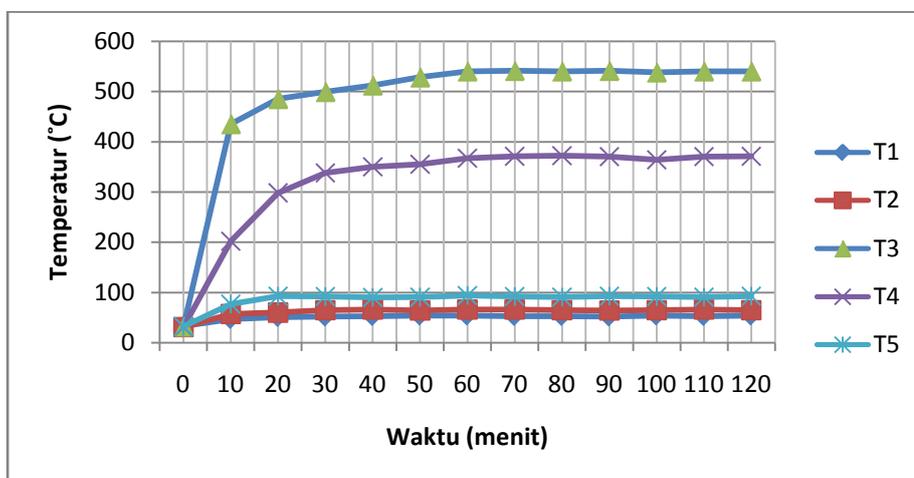
Sampel briket yang telah mencapai kandungan air yang telah ditetapkan kemudian dikirim ke Laboratorium Energi LPPM-ITS untuk diuji nilai kalornya dengan metode uji *bomb calorimeter*. Nilai kalor rata-rata hasil pengujian briket MSW adalah sebesar 4698 kJ/kg.

4.2 Data dan analisa hasil eksperimen gasifikasi tanpa sistem pengendalian suhu otomatis

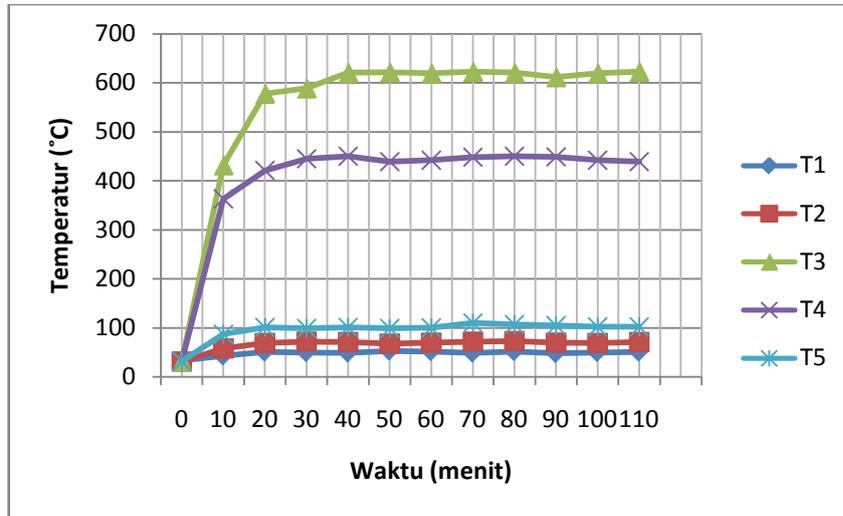
Eksperimen ini dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan karakteristik gasifikasi briket MSW dan data-data yang nantinya diperlukan untuk melakukan *programming* pada sistem pengendalian suhu otomatis.

4.2.1 Distribusi suhu gasifikasi

Pada eksperimen pertama dilakukan proses gasifikasi pada briket MSW dengan melakukan variasi pada laju alir massa udara gasifikasi dengan melakukan pengaturan *duty cycle* pada motor penggerak *blower*. Variasi *duty cycle* dilakukan pada *duty cycle* 10%; 15%; 20%; dan 25%. Data dan analisa distribusi suhu gasifikasi disajikan pada paragraf berikut.

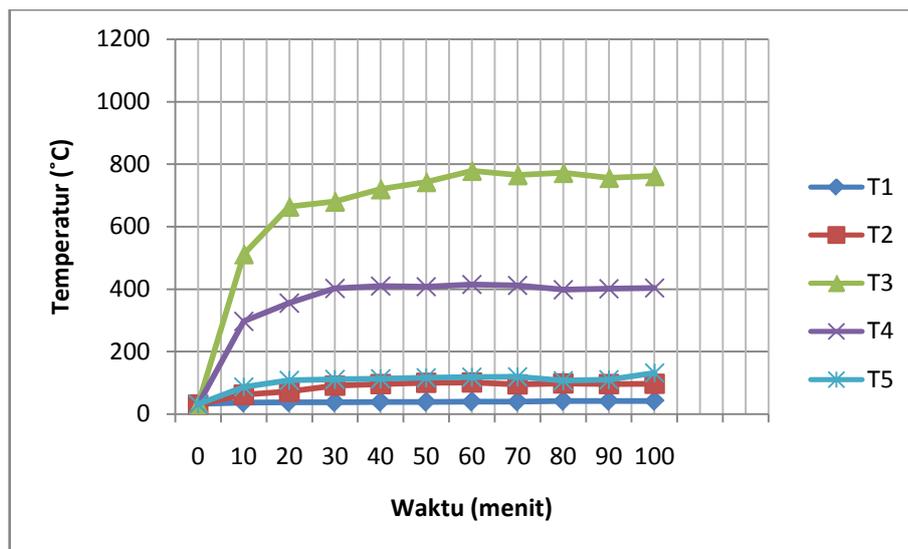


Gambar 4.2 Distribusi suhu gasifikasi dengan *duty cycle blower* 10%

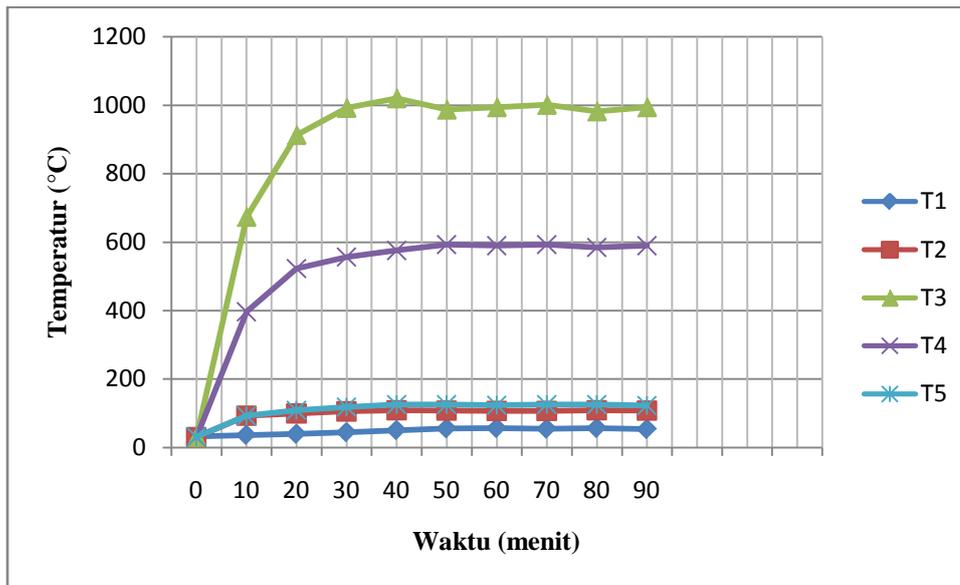


Gambar 4.3 Distribusi suhu gasifikasi dengan *duty cycle* blower 15%

Pada gambar 4.3 hingga 4.6 dapat dilihat suhu-suhu yang terukur pada termokopel 1 (T1) hingga termokopel 5 (T5). Terlihat pada gambar-gambar tersebut bahwa suhu tertinggi terjadi pada T3 dan dapat dipastikan bahwa T3 berada pada zona *partial combustion*. Suhu pada T3 inilah yang nantinya akan digunakan sebagai patokan untuk pengaturan pada sistem pengendalian otomatis suhu zona *partial combustion*.



Gambar 4.4 Distribusi suhu gasifikasi dengan *duty cycle* blower 20%

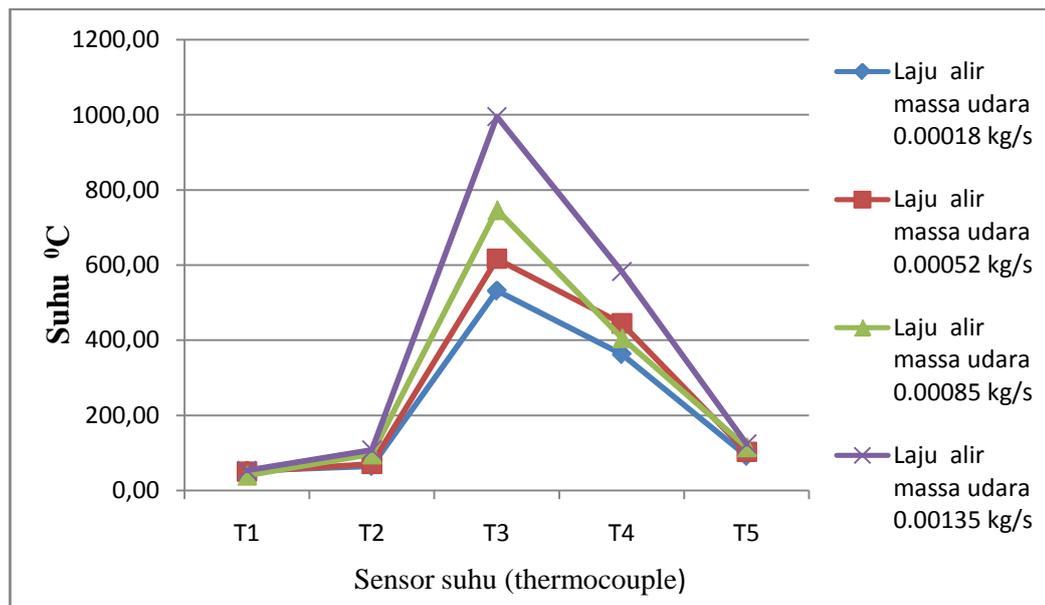


Gambar 4.5 Distribusi suhu gasifikasi dengan *duty cycle* blower 25%

Termokopel yang lainnya juga digunakan sebagai petunjuk untuk mengidentifikasi zona-zona pada proses gasifikasi ini. T1 yang cenderung paling rendah suhunya (33-54 °C) menunjukkan bahwa suhu disekitar T1 masih berada pada zona pemanasan awal.

Pada T2 terlihat bahwa suhu pada termokopel ini (60-100 °C) masih belum mencapai suhu zona pirolisis (200-300 °C). Berdasar kondisi suhu T3 (540-1020 °C) maka zona pirolisis dapat diperkirakan berada diantara T2 dan T3. Suhu pada T4 (372-593 °C) dapat dipastikan merupakan 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 4.6 perubahan distribusi suhu pada reaktor gasifikasi karena perubahan laju aliran udara dapat tergambar dengan jelas.



Gambar 4.6 Grafik perbandingan distribusi suhu rata-rata untuk laju alir massa udara yang bervariasi

4.2.2 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*) yang telah diperoleh datanya dari pengujian yang dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data laju alir massa udara dan briket *MSW* serta *Air- Fuel Ratio*

<i>Duty cycle</i> (%)	Laju alir massa udara (kg/s)	Waktu operasi (menit)	Massa briket <i>MSW</i> (kg)	Laju alir massa briket <i>MSW</i> (kg/s)	<i>Air Fuel Ratio</i> (Rasio udara bahan bakar)
10	0.00018	118	5	0.00071	0.25
15	0.00052	110	5	0.00076	0.69
20	0.00085	98	5	0.00085	1.00
25	0.00135	87	5	0.00096	1.41

Laju alir massa briket *MSW* didapat dengan memasukkan data massa briket *MSW* dan waktu operasi yang telah didapatkan pada rumus, seperti sebagai berikut :

Massa briket *MSW* 5 kg ; Waktu operasi 118 menit

$$\dot{m}_{briket\ MSW} = \frac{5\ kg}{118\ menit} \cdot \frac{1\ menit}{60\ second}$$

$$\dot{m}_{briket\ MSW} = 0.00071\ \frac{kg}{s}$$

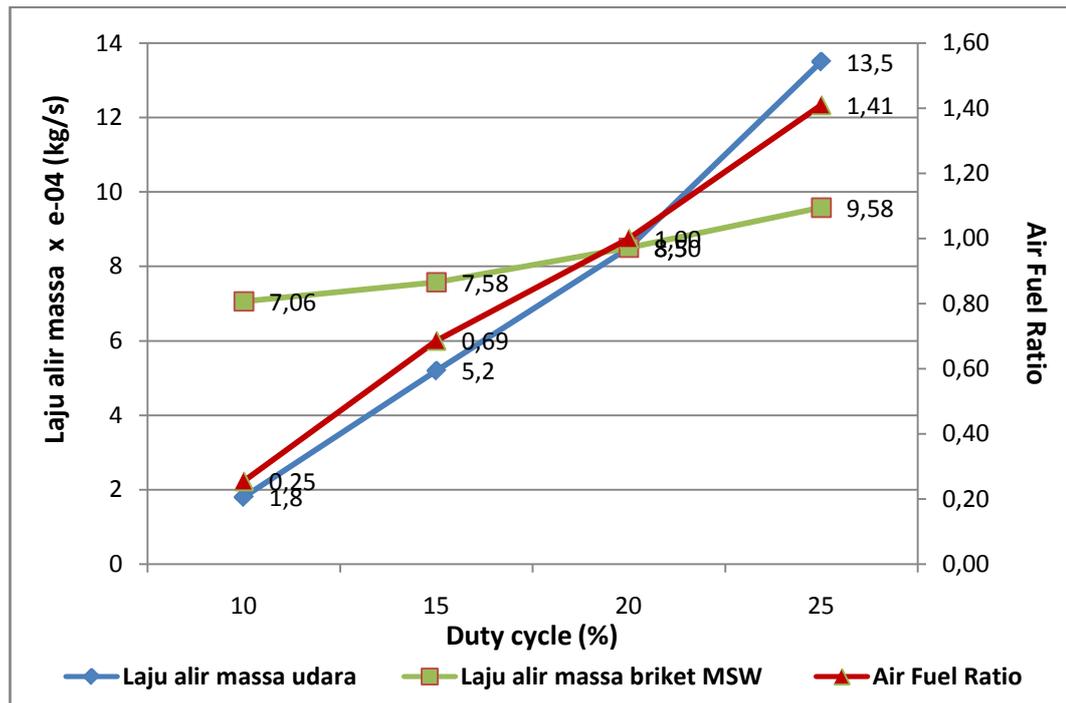
Air – Fuel Ratio didapatkan dari perhitungan sebagai berikut :

$$\dot{m}_{udara} = 0,00018\ \frac{kg}{s} \quad ; \quad \dot{m}_{briket\ MSW} = 0.00071\ \frac{kg}{s}$$

$$(AFR) = \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{bahanbakar\ (briket\ MSW)}}$$

$$(AFR) = \frac{0,00018\ \frac{kg}{s}}{0.00071\ \frac{kg}{s}} = 0,25$$

Dari tabel 4.1 diatas dapat dilihat perubahan laju alir massa udara disertai dengan perubahan pada laju alir massabriket *MSW*, hal ini terjadi karena perubahan besarnya perubahan 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 briket *MSW*, dapat dilihat semakin besar pasokan udara dengan jumlah massa briket bahan bakar yang sama maka waktu operasi akan berkurang sehingga laju alir massa briket *MSW* juga meningkat. 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 4.7.



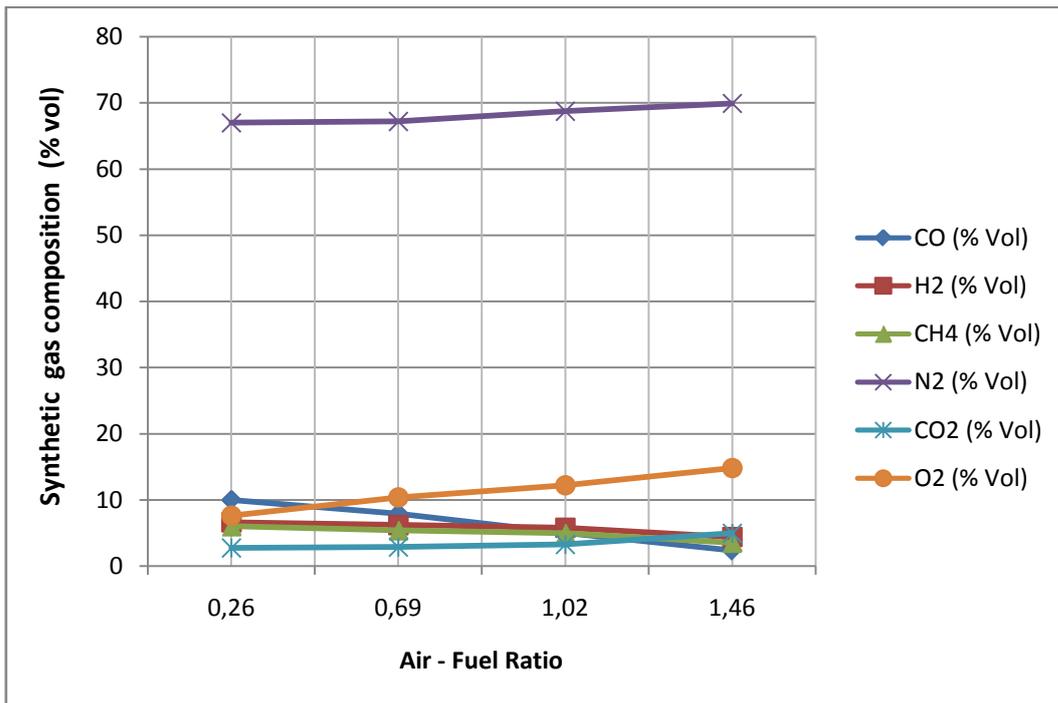
Gambar 4.7 Hubungan antara perubahan duty cycle dan laju alir massa udara, laju alir massa briket serta *air – fuel ratio*.

4.2.3 Komposisi kandungan syngas

Nilai kalor dari *syngas* yang 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.

Tabel 4.2. Komposisi kandungan *syngas*

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)
0,26	9,99	6,60	6,04	66,99	2,74	7,65
0,69	7,93	6,19	5,42	67,20	2,87	10,38
1,02	5,01	5,79	4,98	68,73	3,26	12,23
1,46	2,36	4,40	3,56	69,91	4,96	14,82



Gambar 4.8. Grafik hubungan antara AFR dan komposisi *syngas*

Dari tabel 4.2 dan gambar 4.8 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.

4.2.4 Nilai kalor syngas

Berdasarkan komposisi senyawa dalam syngas diatas maka LHV dari syngas dapat dihitung dengan persamaan 2.11 sebagai berikut :

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

Keterangan :

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

LHV_i = Nilai kalor rendah dari gas yang dapat terbakar (CO, CH₄, H₂)

Nilai Kalor Bawah (LHV) dari masing-masing gas yang dapat terbakar dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Nilai LHV dari senyawa gas yang dapat terbakar

Gas yang terbakar	$LHV_i \left(\frac{kJ}{m^3} \right)$
CO	12696
CH ₄	10768
H ₂	35866

Sumber : Martinez, et al, 2011

Berikut ini adalah contoh perhitungan untuk nilai LHV dengan menggunakan data dari komposisi syngas pada AFR 0,25

- Y_i untuk gas CO = 7,99% = 0,0799
- Y_i untuk gas H₂ = 7,6% = 0,076
- Y_i untuk gas CH₄ = 0,04% = 0,0004

$$LHV_{Syngas} = \sum_{i=1}^n (0,0799 \cdot 12696) + (0,076 \cdot 35866) + (0,0004 \cdot 10768)$$

$$LHV_{Syngas} = 3743,96 \frac{kJ}{m^3}$$

Tabel 4.4 Nilai kalor syngas untuk tiap variasi AFR

Air - Fuel Ratio	Nilai Kalor Bawah (LHV) syngas (kJ/m ³)	Massa jenis syngas (kg/m ³)	Nilai Kalor bawah (LHV) syngas (kJ/kg)
0,25	4285,30	1,08	4361,66
0,69	3812,13	1,08	3926,54
1,00	3250,24	1,06	3358,96
1,41	2258,84	1,07	2407,49

Nilai LHV untuk masing-masing variasi AFR dapat dilihat pada tabel 4.4 dan pada tabel tersebut terdapat dua nilai LHV untuk tiap variasi AFR hal tersebut dikarenakan perhitungan menggunakan persamaan 2.11 menghasilkan LHV dengan satuan kJ/m³ 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 :

$$\rho_{gas} = \sum_{i=1}^n Y_i \cdot \rho_{igas} \quad (4.1)$$

Y_i = kosentrasi senyawa gas dalam *syngas* (CO, CH₄, H₂, CO₂, O₂, N₂)

ρ_{igas} = Nilai massa jenis senyawa gas dalam *syngas*
(CO, CH₄, H₂, CO₂, O₂, N₂)

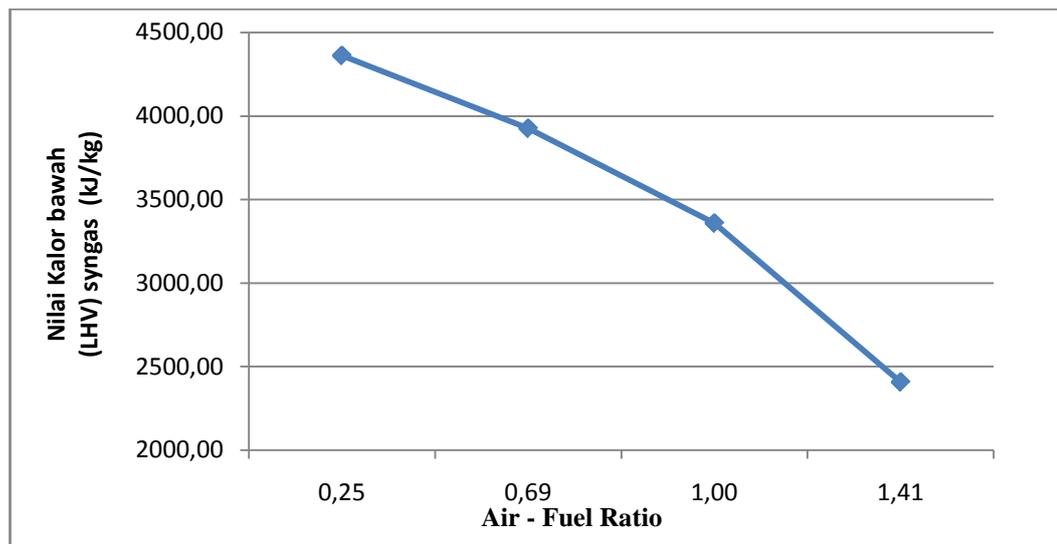
Besarnya massa jenis gas ditentukan oleh suhu *syngas*, dalam hal ini adalah suhu yang diukur pada pipa *outlet* terluar dari reaktor setelah *syngas* mengalami proses pembersihan dengan *cyclone* dan *water scrubber*. Berdasar suhu yang ada dan tabel A4 (Incropera, 2007) maka didapat tabel 4.5.

Berikut ini adalah contoh perhitungan untuk mencari massa jenis *syngas* pada AFR 0,25 :

$$\rho_{gas} = \sum_{i=1}^n (0,079 \cdot 1,087) + (0,076 \cdot 0,0078) + (0,0004 \cdot 0,502) + (0,067 \cdot 1,722) + (0,61 \cdot 1,092) + (0,15 \cdot 1,248)$$

$$\rho_{gas} = 1,08 \frac{kg}{m^3}$$

Berdasarkan hasil perhitungan maka terlihat bahwa peningkatan AFR mengakibatkan penurunan besarnya LHV pada *syngas*, hal ini terjadi karena peningkatan AFR diakibatkan naiknya laju alir massa udara yang akhirnya meningkatkan kecepatan pembakaran dan suhu *zona partial combustion* dan mempengaruhi reaksi-reaksi gasifikasi sehingga komposisi kandungan senyawa yang dapat terbakar pada *syngas* juga menurun, terutama CO dan H₂, walaupun terdapat kenaikan pada kandungan CH₄ akan tetapi dikarenakan nilai LHV H₂ merupakan yang terbesar maka secara signifikan penurunan kandungan H₂ mengakibatkan penurunan LHV *syngas*. Grafik hubungan antara perubahan AFR dan besarnya LHV dapat dilihat pada gambar 4.9



Gambar 4.9. Grafik hubungan antara perubahan AFR dengan LHV *syngas*

4.2.5 Efisiensi gasifikasi

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

$$\eta_{CG} = \frac{(\dot{m}_{gas} \cdot NKB_{gas})}{(\dot{m}_{biomassa} \cdot NKB_{biomassa})} \cdot 100$$

$$\dot{m}_{gas} = \text{laju alir massa syngas}$$

$$\dot{m}_{biomassa} = \text{laju alir massa briket MSW}$$

Berikut adalah perhitungan efisiensi gasifikasi untuk AFR 0,25 :

$$\dot{m}_{gas} = 0.00034 \text{ kg/s}$$

$$NKB_{gas} = 4046.77 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{m}_{biomassa} = 0.00071 \text{ kg/s}$$

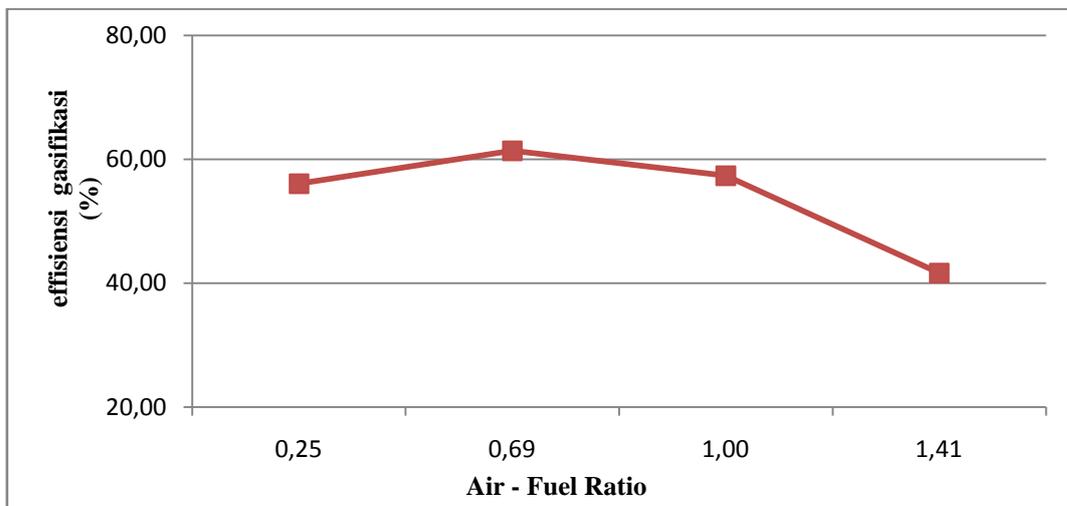
$$NKB_{biomassa} = 4698 \text{ kJ/s}$$

$$\eta_{CG} = \frac{(0.00034 \frac{kg}{s} \cdot 4046,77 \frac{kJ}{s})}{(0.00071 \frac{kg}{s} \cdot 4698 \frac{kJ}{s})} \cdot 100 = 42.06 \%$$

Tabel 4.5 Efisiensi gasifikasi untuk masing-masing variasi

Air - Fuel Ratio	LHV briket MSW (kJ/kg)	Laju alir massa briket MSW (kg/s)	LHV syngas (kJ/kg)	Laju alir massa syngas (kg/s)	effisiensi gasifikasi (%)
0,25	4698	0,00071	4361,66	0,00043	56,06
0,69	4698	0,00076	3926,54	0,00056	61,36
1,00	4698	0,00085	3358,96	0,00068	57,35
1,41	4698	0,00096	2407,49	0,00078	41,63

Nilai dari efisiensi gasifikasi untuk masing-masing AFR yang berbeda dapat dilihat pada tabel 4.6, sedangkan grafik hubungan antara perubahan AFR dan efisiensi gasifikasi dapat dilihat pada gambar 4.10.



Gambar 4.10 Grafik hubungan antara perubahan AFR dan efisiensi gasifikasi

Dari tabel 4.6 dan gambar 4.10 terlihat bahwa efisiensi gasifikasi meningkat hingga nilai AFR 0,69 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 briket MSW.

4.3 Data dan analisa hasil eksperimen gasifikasi dengan sistem pengendalian suhu otomatis

4.3.1 Pemrograman alat pengendali suhu otomatis

Berdasarkan data dari eksperimen sebelumnya maka dilakukan eksperimen berikutnya dengan melakukan proses gasifikasi yang menggunakan sistem pengendalian suhu otomatis pada *zona partial combustion*. Sebelum dilakukan eksperimen maka dilakukan proses pemrograman pada sistem pengendali otomatis yang selanjutnya akan disebut sebagai *Gasifier Control Unit* (GCU).

Cara kerja dari GCU ini adalah dengan mengendalikan suhu pada *zona partial combustion (operational value)* agar tidak berubah dan tetap/diatas suhu yang telah ditentukan (*setpoint value*). *Operational value* dari GCU ini merupakan hasil pembacaan suhu *zona partial combustion* dengan menggunakan sensor *thermocouple* tipe K. Pembacaan suhu yang telah diubah menjadi sinyal listrik tersebut akan diolah oleh control unit dalam GCU yang kemudian akan memberikan sinyal pada *actuator* yang berupa unit *pulse wide modulator* (PWM) yang akan mengatur *duty cycle* arus listrik yang digunakan oleh motor listrik penggerak blower dan pada akhirnya mengendalikan *blower* sehingga laju alir massa udara yang masuk dalam *gasifier* dapat berubah dan suhu *zona partial combustion* dapat terkendali. Data dari eksperimen sebelumnya yang digunakan dalam pemrograman GCU adalah :

1. Suhu *zona partial combustion* sebagai batas dari suhu kerja gasifier. Untuk menentukannya suhu batas ini maka digunakan nilai LHV *syngas* dan laju alir massa *syngas* yang didapat dari eksperimen

sebelumnya. Pada eksperimen ini dipilih 2 suhu sebagai *setpoint value*, yaitu ;

- suhu zona *partial combustion* yang menghasilkan nilai LHV *syngas* tertinggi
- suhu zona *partial combustion* yang menghasilkan laju alir massa *syngas* tertinggi.

2. *Duty cycle* listrik yang menghasilkan laju alir massa udara yang ditentukan. Pada GCU ini menggunakan 2 data nilai *duty cycle*, yaitu :

- *duty cycle* saat suhu zona *partial combustion* kurang dari suhu *setpoint value* sebagai
- *duty cycle* saat suhu zona *partial combustion* telah mencapai suhu *setpoint value*.

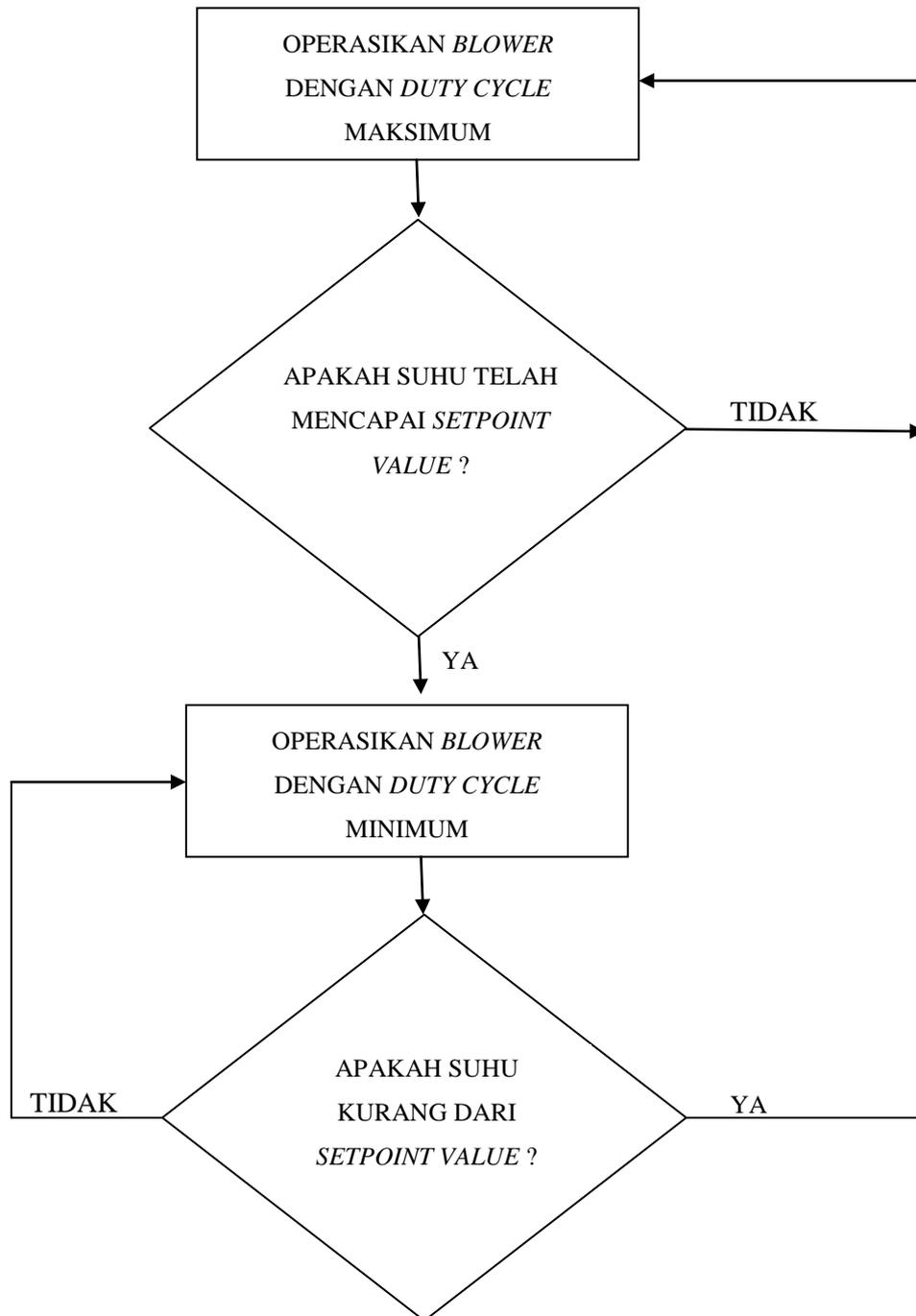
Pola logika pengendalian suhu pada GCU menggunakan pola sederhana yang biasanya digunakan oleh operator reaktor gasifier secara manual, dapat dilihat pada gambar 4.11, yaitu dengan mengawasi suhu zona *partial combustion*, bila suhu pada zona tersebut kurang dari batas yang telah ditentukan maka putaran *blower* udara akan dinaikkan pada tingkat tertentu/maksimum agar laju alir massa udara meningkat dan suhu kembali meningkat, bila suhu telah tercapai maka putaran *blower* akan dikembalikan pada kondisi awal/minimum. Untuk eksperimen ini suhu *setpoint value* yang digunakan yaitu:

- 500⁰C yang pada eksperimen sebelumnya adalah batas suhu *partial combustion* yang menghasilkan LHV *syngas* tertinggi
- 750 ⁰C yang pada eksperimen sebelumnya adalah batas suhu *partial combustion* yang menghasilkan laju alir massa *syngas* yang tertinggi.

Sedangkan *duty cycle* yang digunakan adalah sebagai berikut :

- *Duty cycle* 10% yang pada eksperimen sebelumnya merupakan *duty cycle* dengan nilai laju alir massa terkecil (0,0018 kg/s) yang akan digunakan sebagai *duty cycle* pada kondisi minimum.
- *Duty cycle* 20% yang menghasilkan laju alir massa 0,0085 digunakan sebagai *duty cycle* pada kondisi maksimum. Pemilihan *duty cycle* 20% karena tidak diinginkan laju alir massa udara yang mendadak berubah

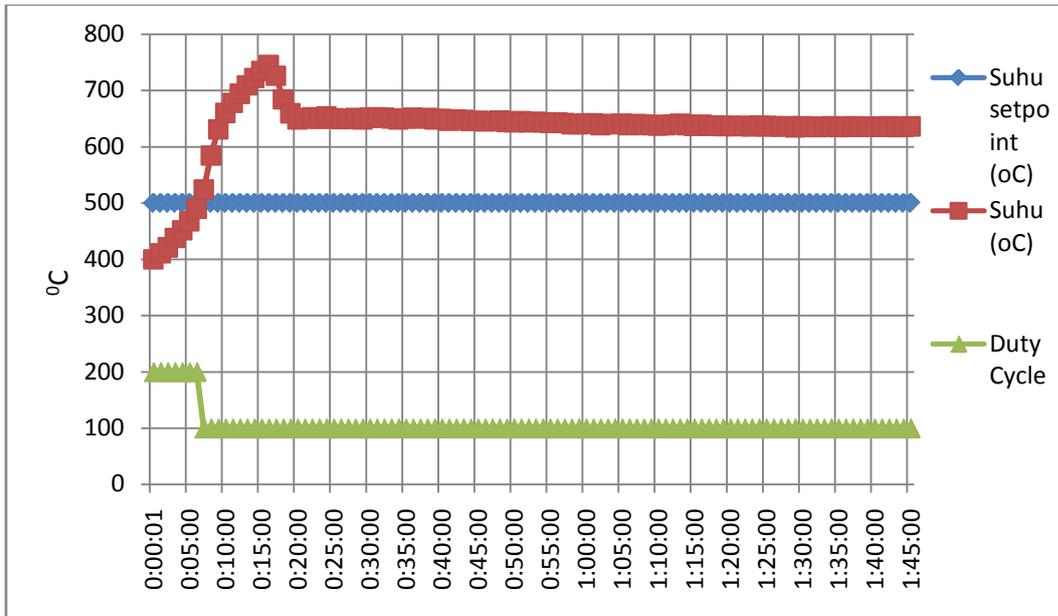
dengan jumlah yang besar dan terlalu cepat karena dikhawatirkan akan mengganggu proses reaksi gasifikasi serta juga agar jarak denganduty cycle pada kondisi *minimum* tidak terlalu jauh.



Gambar 4.11. Diagram alir logika pengendalian suhu gasifikasi pada GCU

4.3.2 Suhu zona *partial combustion* dengan pengendalian otomatis

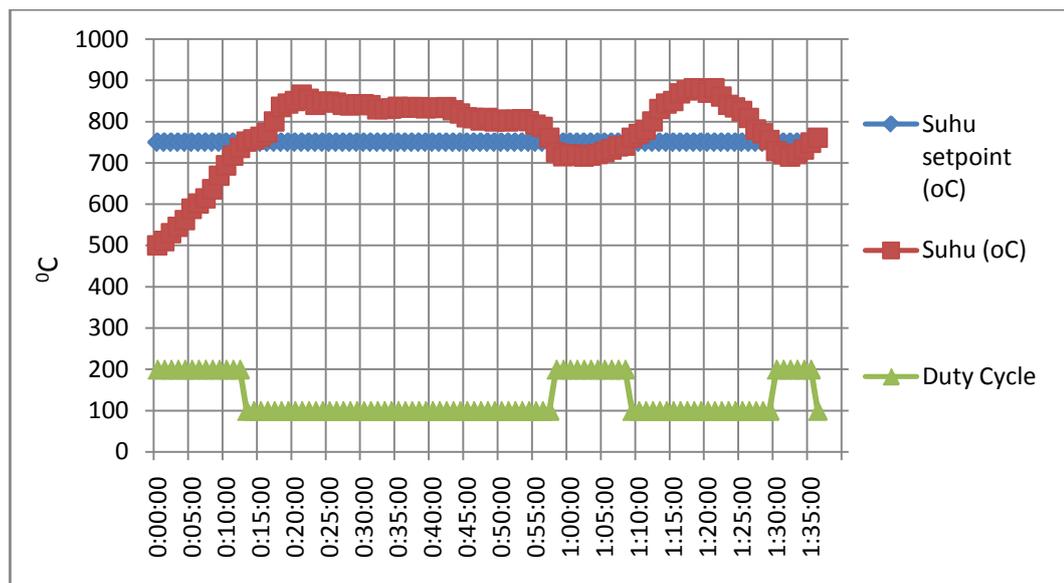
Setelah eksperimen dilakukan maka salah satu data yang dihasilkan adalah data suhu terkendali yang terjadi pada zona *partial combustion*, yang telah digambarkan dalam bentuk grafik dan dapat dilihat pada gambar 4.12 dan 4.13.



Gambar 4.12 Grafik suhu pada zona *partial combustion* berpengendalian otomatis dengan setpoint suhu 500°C

Pada gambar 4.12 dapat dilihat awal mulai proses gasifikasi *duty cycle* berada pada nilai 20% karena sensor suhu pada GCU membaca suhu *partial combustion* masih berada dibawah nilai *setpoint value* 500°C, dan kondisi ini bertahan hingga saat suhu *partial combustion* telah mencapai suhu *setpoint value* maka *duty cycle* pada *blower* diubah menjadi 10% (*minimum*). Setelah *duty cycle* menjadi kondisi *minimum* ternyata peningkatan suhu terus terjadi, hal ini terjadi karena kondisi kelembaman (reaksi permukaan) pada reaksi pembakaran di zona *partial combustion*. Kenaikan suhu terus terjadi hingga pada sekitar menit ke 15 dan suhu mulai turun kemudian pada menit ke 20 suhu cenderung stabil. Kondisi stabil suhu ternyata berada pada kisaran 600-650 °C, hal ini terjadi karena ternyata kondisi *duty cycle* awal *blower* (20%) memicu reaksi pembakaran yang stabil pada kondisi tersebut walaupun *duty cycle* pada *blower* telah berubah menjadi

kondisi *minimum* (10%), hal ini berbeda dengan kondisi pada eksperimen tanpa pengendali otomatis yang mempunyai kisaran suhu stabil pada 500-550 °C dengan *duty cycle* 10%. Pada kondisi *setpoint value* 500 °C ini ternyata juga terjadi kondisi stabilitas suhu yang bertahan hingga jumlah briket telah mencapai batas bawah/habis sehingga sistem pengendalian suhu otomatis hanya sekali bereaksi mengubah nilai *duty cycle* saat suhu telah mencapai *setpoint value* 500 °C.



Gambar 4.13 Grafik suhu pada zona partial combustion berpengendalian otomatis dengan setpoint suhu 750°C

Pada eksperimen berikutnya (Gambar 4.13) dengan menggunakan *setpoint value* 750 °C terjadi hal yang berbeda dengan percobaan yang menggunakan *setpoint value* 500 °C. Pada eksperimen dengan *setpoint value* 750°C pada saat suhu *partial combustion* mencapai suhu *setpoint value* secara otomatis GCU menurunkan *duty cycle* yang awalnya 20% menjadi 10%, hal ini sama dengan yang terjadi pada eksperimen sebelumnya. Akan tetapi setelah suhu naik karena efek kelembaman pembakaran, stabilitas suhu tidak bertahan sepanjang yang terjadi pada eksperimen sebelumnya. Suhu *partial combustion* perlahan turun hingga pada sekitar menit 55 -60 mencapai suhu batas *setpoint value* sehingga GCU harus menaikkan kembali *duty cycle* menjadi 20% untuk menaikkan suhu hingga suhu kembali berada diatas *setpoint value*. Perubahan

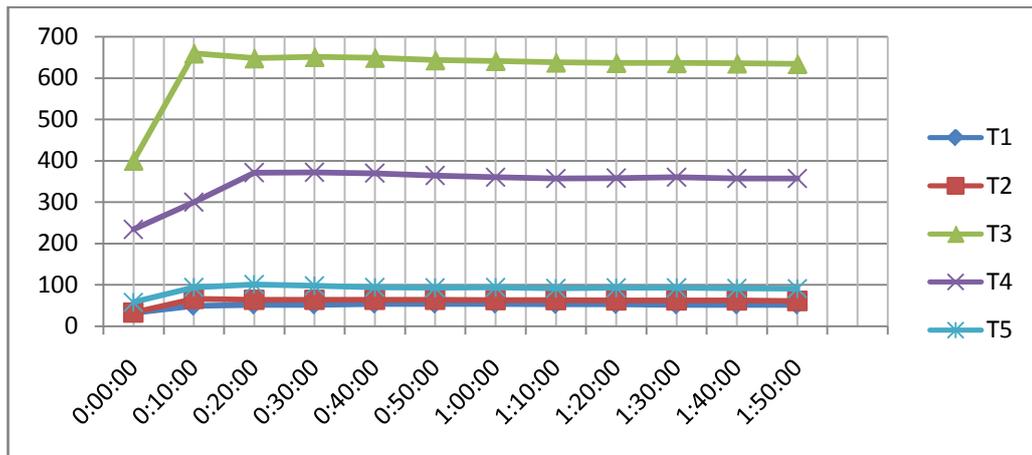
duty cycle ini terjadi beberapa kali hingga jumlah briket mencapai batas bawah. Penurunan suhu yang terjadi sehingga suhu tidak bisa stabil terjadi karena kondisi *minimum* pada *blower* dengan *duty cycle* 10% tidak cukup untuk mempertahankan kondisi suhu lebih dari 750 °C yang pada eksperimen ini bahkan mencapai suhu tertinggi 900 °C. Berdasarkan data dari eksperimen tanpa menggunakan pengendali suhu otomatis, untuk mendapatkan suhu operasional diatas 750 °C maka harus digunakan *duty cycle* 20-25 % agar didapatkan laju alir massa udara yang cukup untuk mempertahankan suhu diatas 750 °C. Walaupun kestabilan suhu tidak terjadi seperti eksperimen sebelumnya akan tetapi pada eksperimen ini terbukti bahwa sistem pengendali suhu otomatis dapat mempertahankan suhu diatas suhu *setpoint value*.

4.3.3 Distribusi suhu gasifier berpengendalian otomatis

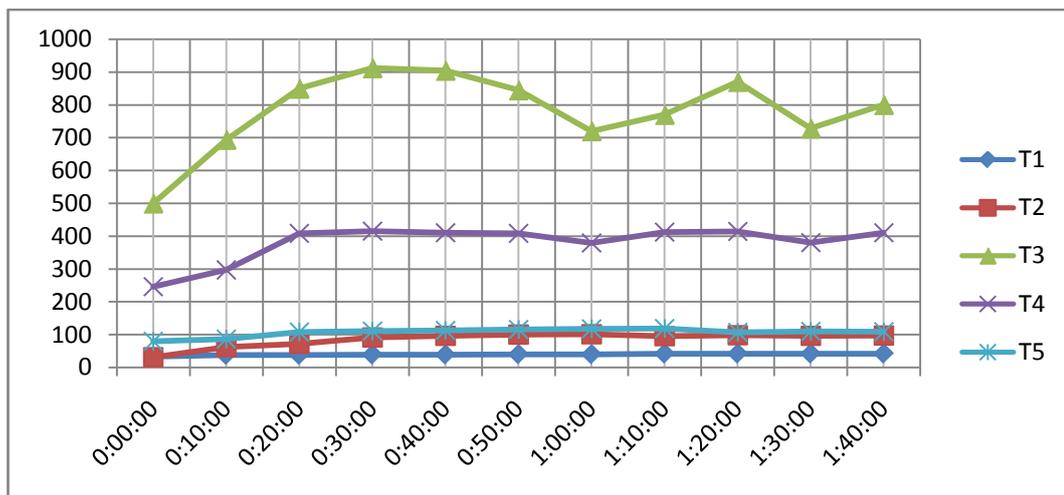
Selain data suhu zona *partial combustion* berpengendali suhu otomatis, didapat juga distribusi suhu gasifier pada proses gasifikasi berpengendalian otomatis.

Pada gambar 4.14 dan 4.15 terlihat bahwa pola perubahan suhu pada gasifier (T1 s/d T5) dapat menggambarkan urutan zona dalam gasifier yang juga merupakan urutan proses dalam proses gasifikasi (*Drying, pyrolysis, partial combustion, dan reduction*).

Bila dibandingkan dengan distribusi suhu pada bagian eksperimen tanpa GCU, distribusi suhu pada eksperimen gasifikasi dengan GCU dengan *setpoint value* 500 °C ditinjau dari kondisi suhu tertinggi berkecenderungan memiliki pola yang sama dengan eksperimen gasifikasi tanpa GCU dengan penggunaan *duty cycle* 15%. Sedangkan pada eksperimen gasifikasi memakai GCU dengan *setpoint value* 750 °C memiliki kecenderungan pola distribusi suhu yang sama dengan eksperimen gasifikasi tanpa GCU dengan *duty cycle* 25%.



Gambar 4.14 Grafik distribusi suhu gasifikasi berpengendalian otomatis dengan *setpoint value* suhu 500⁰C



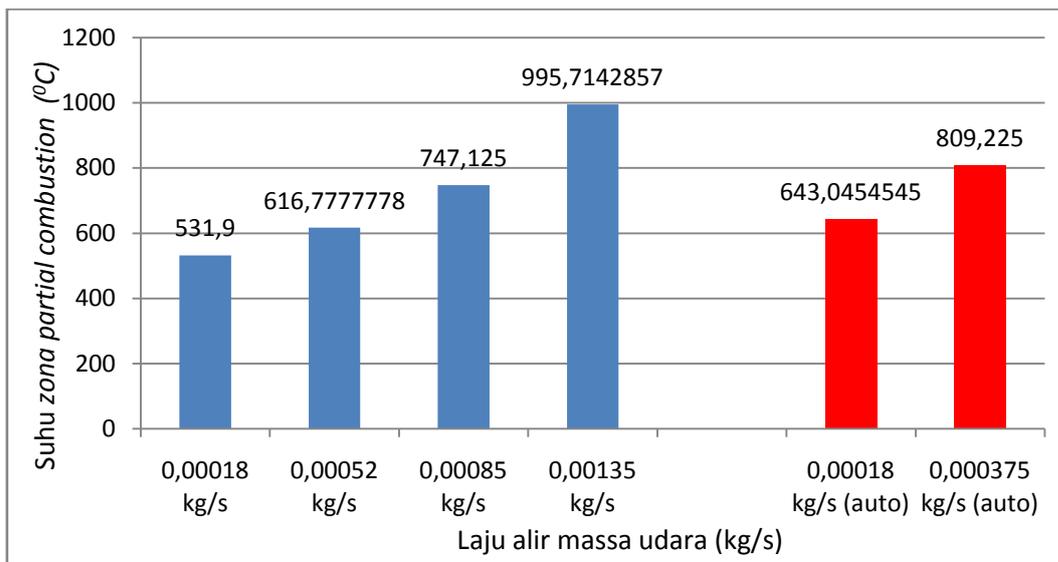
Gambar 4.15 Grafik distribusi suhu gasifikasi berpengendalian otomatis dengan *setpoint value* 750⁰C.

Akan tetapi khusus untuk eksperimen gasifikasi briket MSW menggunakan GCU dengan *setpoint value* 750⁰C terdapat dua hal yang perlu diperhatikan.

Yang pertama yaitu kondisi suhu diatas *setpoint value* yang tidak sestabil kondisi suhu pada eksperimen dengan *setpoint* 500⁰C, hal ini telah diterangkan sebabnya pada sub bab sebelumnya.

Yang kedua adalah bila ditinjau dari sistem pengendalian suhunya maka dapat dikatakan sistem tersebut telah bisa mengendalikan suhu diatas *setpoint*

value-nya, tetapi bila diteliti lebih mendalam, sistem pengendalian suhu yang digunakan pada eksperimen ini mempengaruhi hubungan antara laju alir massa udara dan parameter operasional serta unjuk kerja gasifier. Kondisi laju alir massa udara pada proses gasifikasi briket MSW dengan GCU tidak sebesar laju alir massa pada proses gasifikasi tanpa GCU untuk mencapai suhu tertinggi yang sama (*duty cycle* 25%; laju alir massa 0,00135 kg/s)), dan pada saat terjadi perubahan *duty cycle* dari kondisi maksimum (20%) menjadi minimum (10%) laju alir massa udara yang terjadi adalah minimum juga, hal ini terjadi lebih sering daripada saat eksperimen dengan menggunakan *setpoint value* 500°C. Selama terjadinya proses gasifikasi laju alir massa udara yang terjadi berubah-ubah dari 0,0018 kg/s hingga 0,00085 kg/s sesuai besarnya *duty cycle*.



Gambar 4.16 Grafik hubungan antara perubahan laju alir massa udara dengan perubahan suhu rata-rata zona *partial combustion* proses gasifikasi tanpa dan dengan GCU

Kondisi laju alir massa yang berhubungan dengan perubahan suhu zona *partial combustion* ini nantinya akan berpengaruh pada nilai AFR, laju alir massa *syngas*, LHV *syngas*, dan efisiensi energi gasifikasi yang akan dianalisa pada sub bab selanjutnya. Pada gambar 4.16 dapat dilihat perbandingan antara suhu rata-rata zona *partial combustion* antara eksperimen gasifikasi tanpa GCU dan

eksperimen gasifikasi dengan GCU yang berubah terhadap perubahan laju alir massa udara.

4.3.4 Air – fuel ratio

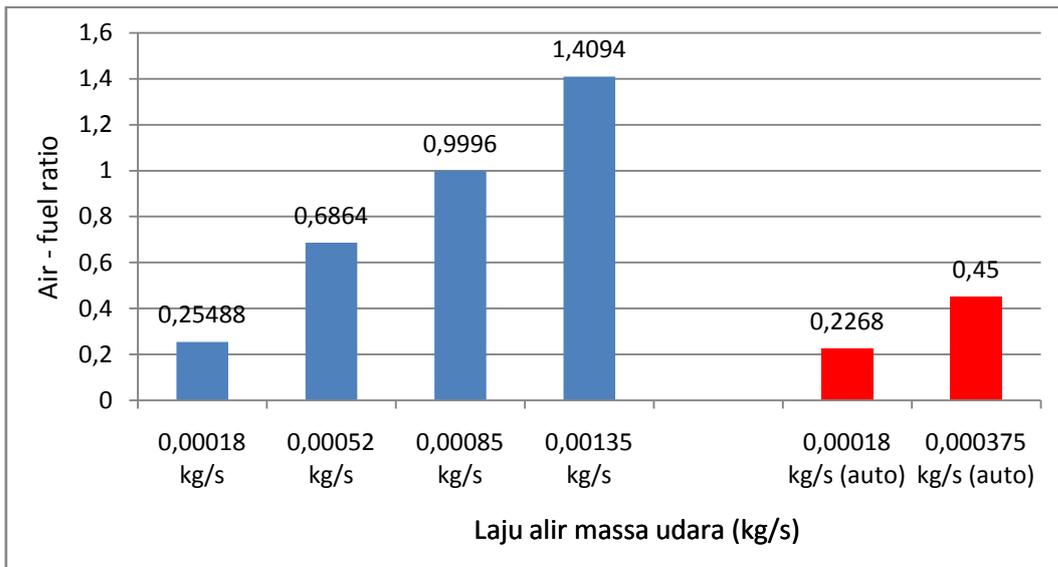
Seperti telah disebutkan pada sub bab sebelumnya kondisi laju alir massa udara yang berubah-ubah pada gasifikasi dengan menggunakan GCU menyebabkan perubahan-perubahan parameter operasional yang berbeda dengan proses gasifikasi tanpa GCU, *air – fuel ratio* (AFR) adalah salah satunya.

AFR yang terjadi adalah hasil perhitungan rasio antara laju alir massa udara dan laju massa alir briket MSW, seperti yang telah dilakukan pada sub bab sebelumnya yang membahas tentang AFR. Tabel 4.6 menyajikan data dan hasil AFR dari proses gasifikasi dengan pemakaian GCU.

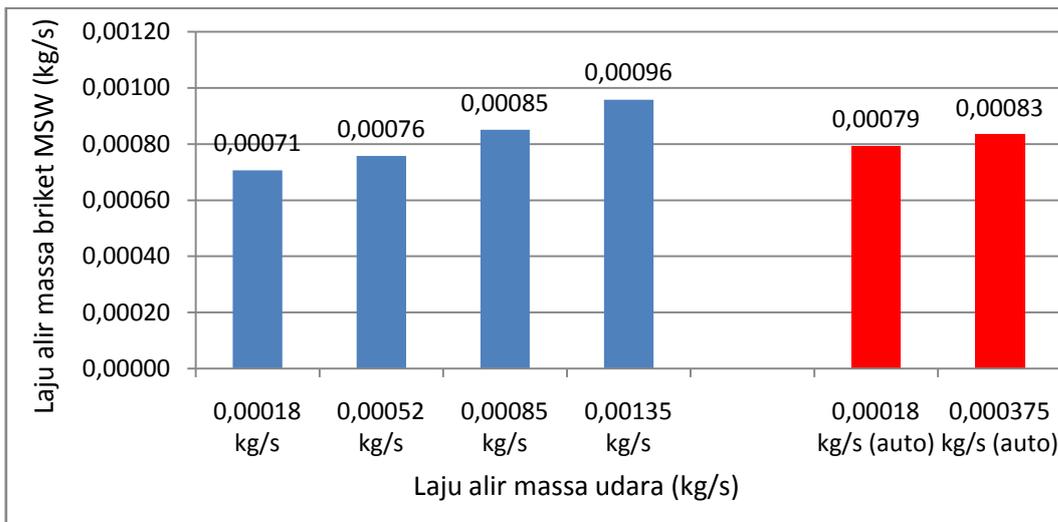
Tabel 4.6 Air - fuel ratio gasifikasi briket MSW dengan pemakaian GCU

Setpoint Value	laju alir massa udara (kg/s)	waktu operasi (menit)	massa briket MSW (kg)	laju alir massa briket MSW (kg/s)	<i>Air Fuel Ratio</i> (rasio udara bahan bakar)
500 °C	0,00018	105	5	0,00079	0,23
750 °C	0,000375	100	5	0,00083	0,45

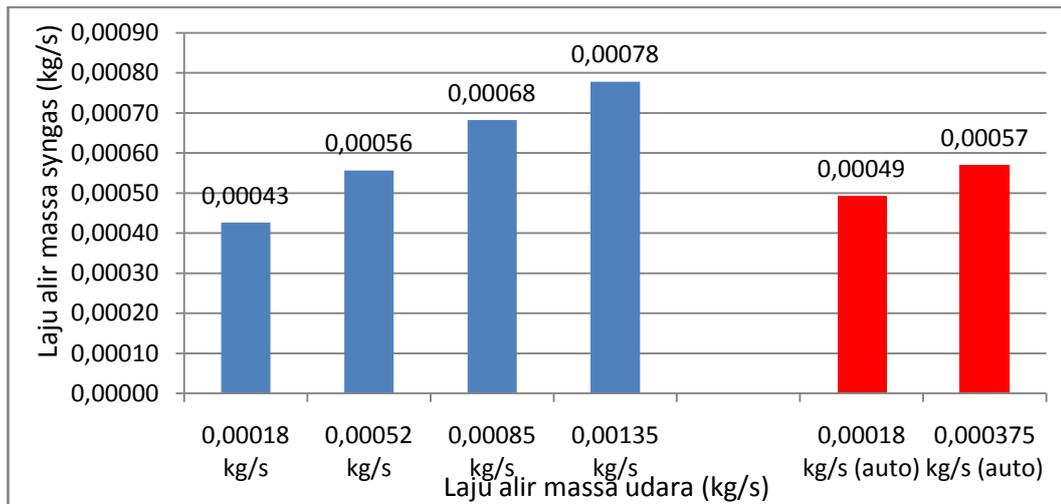
Pada gambar 4.17 dan 4.18 dapat dilihat perbandingan AFR dan laju alir massa MSW pada proses gasifikasi tanpa GCU dan dengan GCU, dan terlihat pada gambar tersebut kenaikan laju alir massa udara meningkatkan laju massa alir briket MSW dan AFR, tetapi proses gasifikasi dengan menggunakan GCU memiliki laju alir massa MSW yang lebih besar, hal ini terjadi karena suhu operasional yang lebih tinggi dan memicu kecepatan reaksi yang lebih tinggi, kecepatan reaksi yang lebih tinggi ini juga menghasilkan peningkatan laju alir massa *syngas* yang dapat dilihat pada gambar 4.19



Gambar 4.17 Perbandingan antara AFR proses gasifikasi dengan GCU dengan AFR proses gasifikasi tanpa GCU



Gambar 4.18 Perbandingan antara laju alir massabriket MSW pada proses gasifikasi dengan GCU dan laju alir massa *syngas* pada proses gasifikasi GCU



Gambar 4.19 Perbandingan antara laju alir massa *syngas* pada proses gasifikasi dengan GCU dan laju alir massa *syngas* pada proses gasifikasi tanpa GCU

4.3.5 Nilai kalor *syngas*

Salah satu parameter unjuk kerja dari proses gasifikasi adalah nilai kalor dari *syngas* dalam hal ini adalah LHV dari *syngas*, untuk menentukannya salah satu cara adalah menguji kandungan gas terbakar yang ada dalam *syngas* kemudian menghitung LHV-nya.

Tabel 4.7 Komposisi senyawa dalam *syngas* hasil proses gasifikasi briket MSW dengan pemakaian GCU

Setpoint Value (°C)	Konsentrasi kandungan synthetic-gas					
	CO (% Vol)	H2 (% Vol)	CH4 (% Vol)	CO2 (% Vol)	N2 (% Vol)	O2 (% Vol)
500	9,12	6,38	4,29	0,21	65,62	14,38
750	8,77	7,91	3,13	0,20	67,91	12,09

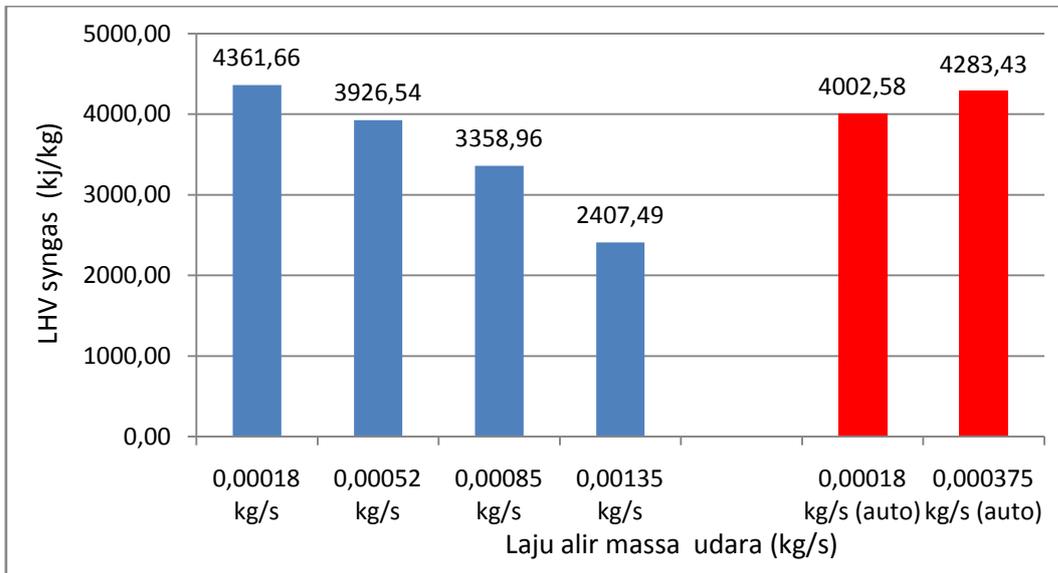
Pada sub bab sebelumnya telah ditunjukkan cara perhitungan dan contoh perhitungannya. Tabel 4.7 menyajikan data komposisi senyawa dalam *syngas* dan

tabel 4.8 menyajikan hasil perhitungan LHV syngas sekaligus massa jenis syngas yang diperoleh juga dari perhitungan seperti pada sub bab sebelumnya.

Tabel 4.8 Nilai kalor syngas hasil proses gasifikasi briket MSW dengan pemakaian MSW

<i>Setpoint Value</i> (°C)	Nilai Kalor bawah (LHV) Syngas (kJ/m ³)	Massa jenis ρ Syn-gas (kg/m ³)	Nilai Kalor bawah (LHV) Syngas (kJ/kg)
500 0C	3908,27	1,02	4002,58
750 0C	4286,70	1,00	4283,43

Bila dibandingkan dengan nilai LHV *syngas* hasil proses gasifikasi briket MSW tanpa GCU ternyata nilai LHV *syngas* hasil proses gasifikasi dengan pemakaian GCU memiliki kecenderungan yang berbeda, yaitu justru terjadinya peningkatan LHV seiring dengan peningkatan suhu rata-rata zona *partial combustion*.



Gambar 4.20 Grafik perbandingan nilai LHV *syngas* pada proses gasifikasi dengan GCU dan nilai LHV *syngas* pada proses gasifikasi tanpa GCU

Hal tersebut berbeda dengan estimasi awal yang didasarkan pada eksperimen gasifikasi briket MSW tanpa GCU yaitu peningkatan suhu operasional akibat meningkatnya laju alir massa udara akan menurunkan nilai LHV *syngas*, tetapi laju alir massa *syngas* akan naik. Peningkatan LHV *syngas* terjadi besar kemungkinan karena operasional dari sistem GCU. Pengaturan laju udara minimum saat *setpoint value* suhu tercapai mengakibatkan komposisi senyawa dalam *syngas* menghasilkan nilai LHV yang berbeda untuk kondisi suhu *partial combustion* yang terjadi. Perbandingan nilai LHV dapat dilihat pada gambar 4.20

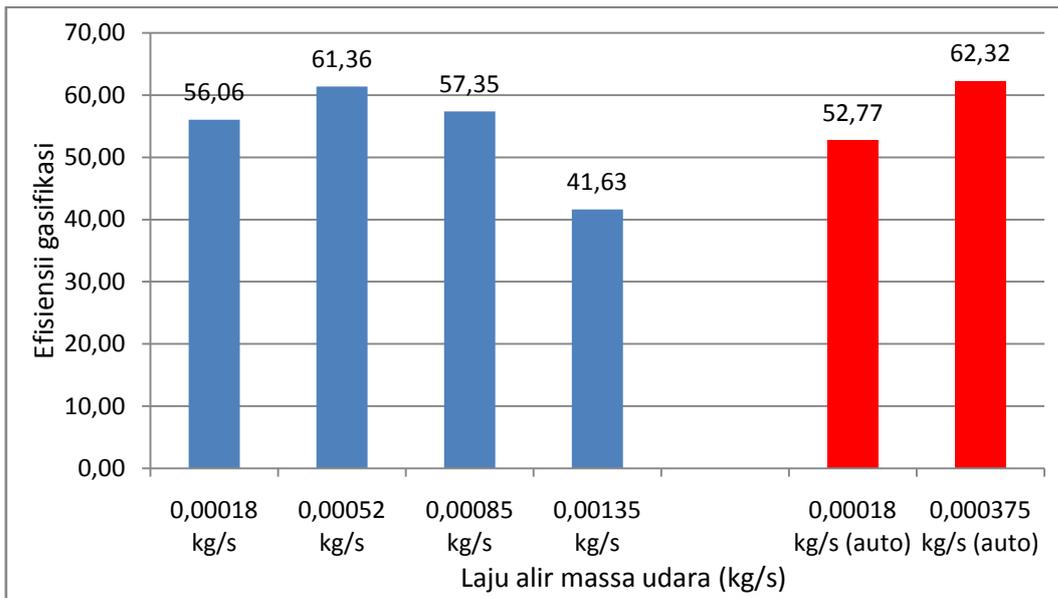
4.3.6 Efisiensi gasifikasi

Parameter unjuk kerja berikutnya adalah efisiensi gasifikasi. Berdasarkan data-data yang telah ada maka dapat dihitung efisiensi gasifikasi (*cold gas efficiency*) dari proses gasifikasi briket MSW dengan sistem pengendalian suhu otomatis dan dapat dilihat pada tabel 4.9

Tabel 4.9 Efisiensi gasifikasi briket MSW dengan pemakaian GCU

Setpoint Value (°C)	Nilai Kalor bawah (LHV) briket MSW (kJ/kg)	laju alir massa briket MSW (kg/s)	Nilai Kalor bawah (LHV) Syngas (kJ/kg)	laju alir massa syngas (kg/s)	efisiensi gasifikasi (%)
500	4698	0,00079	4002,58	0,00049	52,77
750	4698	0,00083	4283,43	0,00057	62,32

Hasil perhitungan efisiensi yang ditampilkan pada tabel 4.10 akan dibandingkan dengan hasil perhitungan efisiensi gasifikasi tanpa sistem pengendali suhu. Grafik perbandingan dapat dilihat pada gambar 4.21

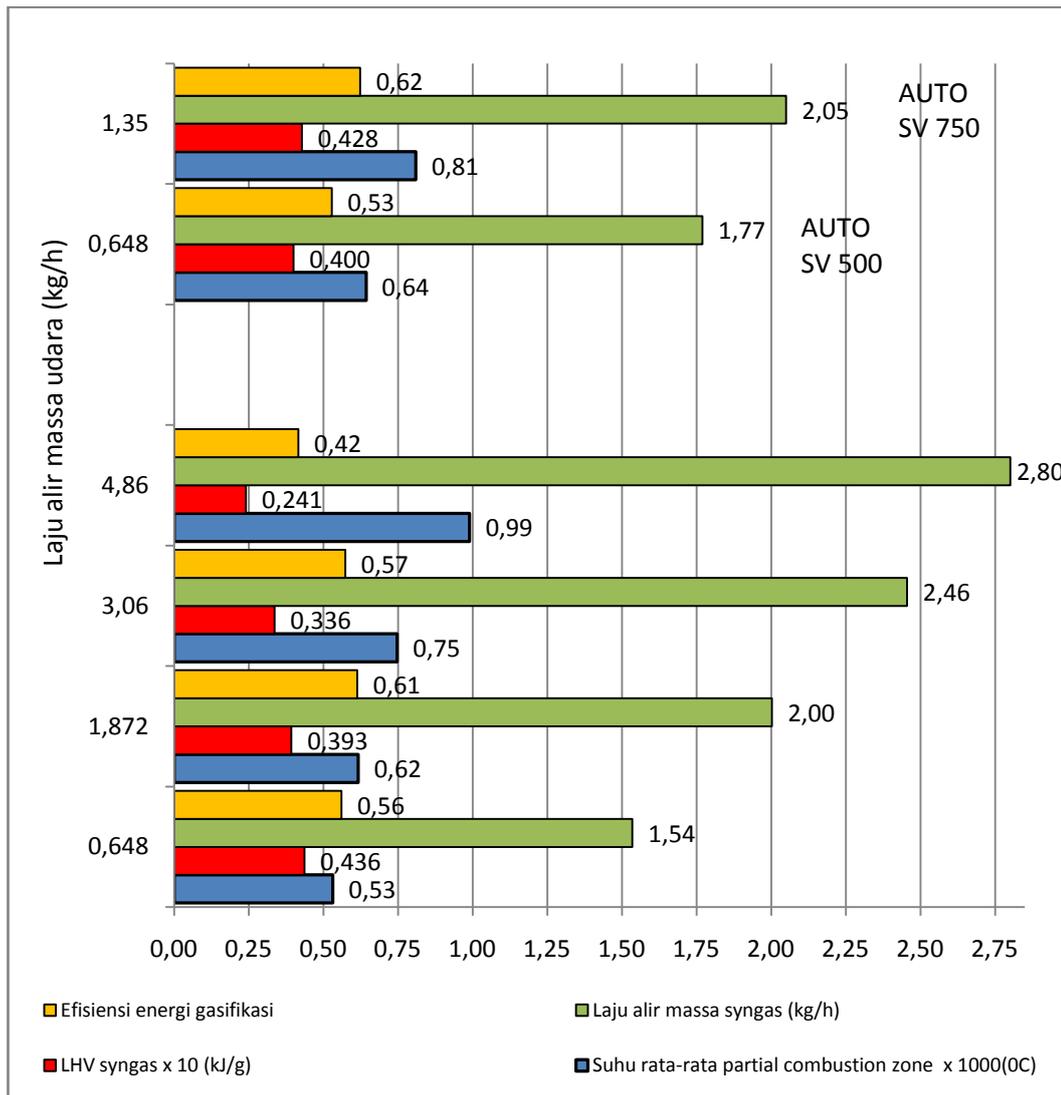


Gambar 4.21 Grafik pebandingan efisiensi gasifikasi.

Dari gambar 4.21 dapat dilihat bahwa peningkatan laju alir massa udara pada eksperimen dengan pengendalian otomatis mengakibatkan kenaikan nilai efisiensi proses gasifikasi, akan tetapi bila dibandingkan dengan eksperimen gasifikasi briket MSW tanpa pengendalian suhu otomatis, untuk suhu operasional rata-rata yang hampir sama pada zona *partial combustion* mengalami peningkatan nilai tertingginya, hal ini terjadi karena naiknya LHV dan laju alir massa *syngas*.

4.4 Perbandingan parameter operasi dan unjuk kerja proses gasifikasi briket MSW

Untuk merangkum data-data dan analisa yang didapat dari eksperimen gasifikasi briket MSW tanpa GCU dan eksperimen gasifikasi briket MSW dengan GCU maka data-data suhu operasional rata-rata zona *partial combustion*, nilai LHV *syngas*, laju alir massa *syngas*, dan efisiensi energi gasifikasi di sajikan dalam satu grafik pada gambar 4.22.



Gambar 4.22 Grafik perbandingan suhu operasional rata-rata zona *partial combustion*, nilai LHV *syngas*, laju alir massasyngas, dan efisiensi energi gasifikasi.

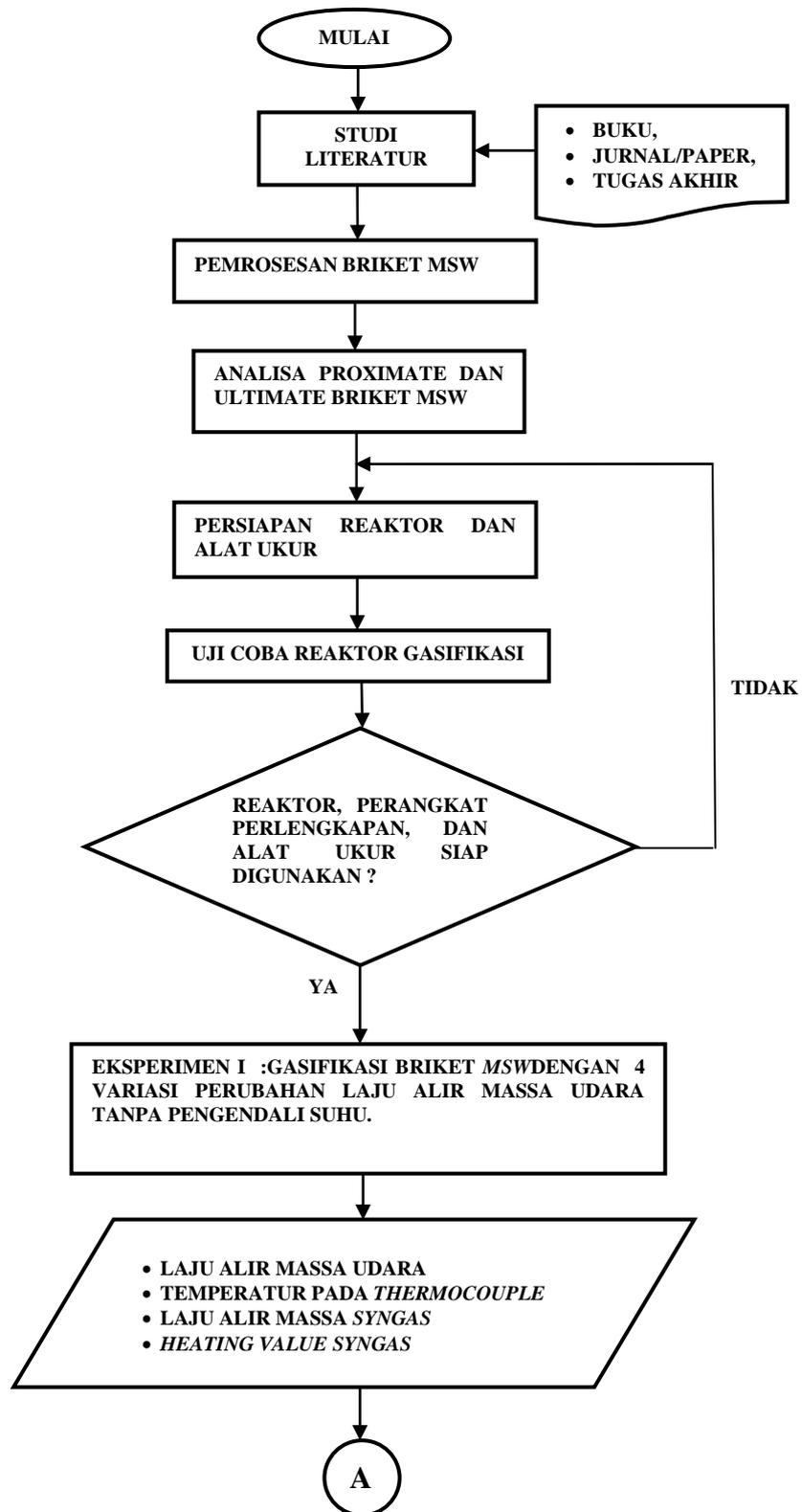
Dari gambar 4.22 dapat dilihat bahwa sistem GCU pada proses gasifikasi briket MSW memiliki pengaruh pada parameter operasional gasifikasi terutama suhu kerja *gasifier* dan mengubah parameter kinerja proses gasifikasi, terlihat dengan berbedanya nilai LHV, laju alir massa *syngas*, dan efisiensi gasifikasi. Berdasarkan deskripsi program pada GCU yang dilakukan sebelumnya maka pemakaian GCU terbukti dapat mengatur laju alir massa syngas yang dihasilkan dapat dilihat pada gambar 4.22 dengan meningkatnya *setpoint value*(SV) dari

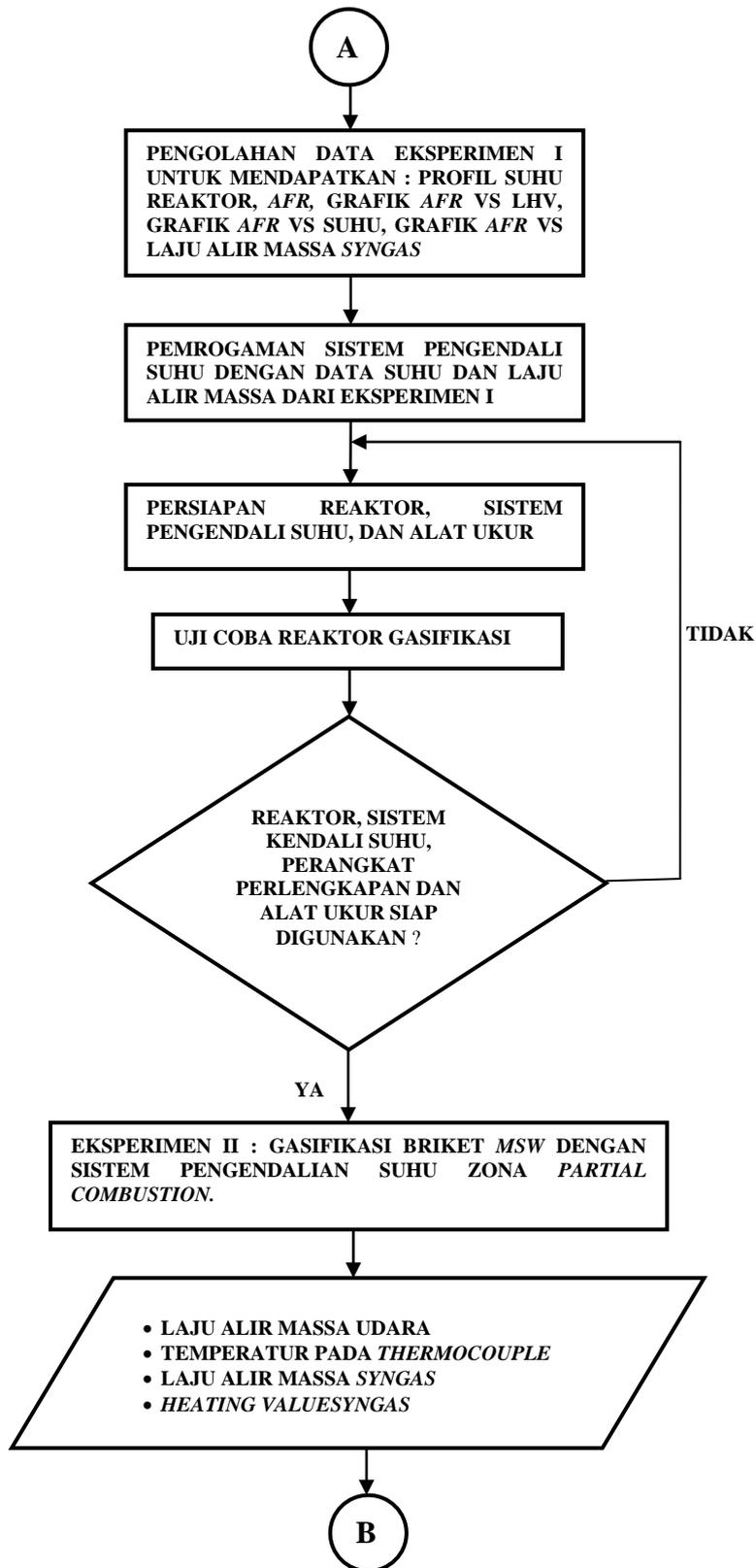
500⁰C menjadi 750⁰C maka laju alir *syngas* juga meningkat sebesar 15,8% dan hal ini sesuai dengan hasil pada eksperimen gasifikasi tanpa GCU bahwa peningkatan suhu operasional zona *partial combustion* akan meningkatkan laju alir *syngas*. Akan tetapi hal berbeda terjadi pada nilai LHV, seharusnya peningkatan suhu operasional zona *partial combustion* akan mengakibatkan penurunan nilai LHV akan tetapi pada proses gasifikasi dengan menggunakan GCU terjadi peningkatan sebesar 7%, hal ini bisa terjadi diakibatkan karena nilai rata-rata laju alir massa udara pada proses gasifikasi dengan GCU pada setting value 750⁰C hanya 0,648 kg/h saja, sehingga mempengaruhi reaksi pembentukan senyawa gas yang dapat terbakar dalam *syngas* dan menghasilkan *syngas* dengan LHV yang lebih tinggi walaupun suhu operasional zona *partial combustion* meningkat.

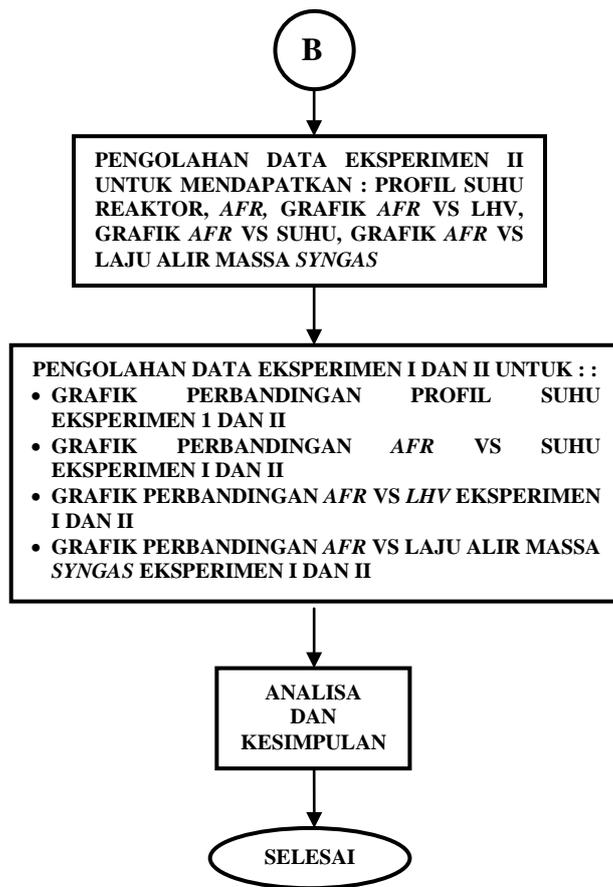
Efisiensi energi gasifikasi pada proses gasifikasi dengan GCU juga mengalami peningkatan sebesar 16% pada perubahan nilai *setpoint value* suhu dari 500⁰C menjadi 750⁰C hal ini terjadi karena peningkatan laju alir massa *syngas* dan nilai LHV. Selain itu bila dibandingkan dengan proses gasifikasi tanpa GCU maka nilai tertinggi efisiensi energi gasifikasi pada proses gasifikasi dengan GCU mengalami peningkatan sebesar 2%, hal ini dimungkinkan terjadi karena laju alir massa udara pada proses gasifikasi dengan GCU yang dapat berubah-ubah sesuai dengan kondisi suhu sehingga mempengaruhi reaksi-reaksi gasifikasi dan akhirnya mempengaruhi nilai LHV *syngas* dan laju alir massa *syngas*

Bila dibandingkan dengan penelitian terdahulu (Sivakumar, dkk, 2012) maka terdapat perbedaan hasil yang cukup signifikan, diantaranya pada nilai efisiensi energi gasifikasi, pada penelitian terdahulu secara umum terjadi peningkatan sedangkan pada penelitian ini perubahan efisiensi energi gasifikasi tergantung pada nilai *setpoint value* suhu pada GCU, demikian halnya pada komposisi *syngas*. Hal-hal tersebut terjadi karena perbedaan sistem pengendalian proses gasifikasi yang digunakan dalam penelitian, pada penelitian yang dilakukan oleh Sivakumar, dkk (2014) sistem pengendalian proses gasifikasi yang digunakan selain mengatur suhu proses gasifikasi, juga mengatur *residence time* dan *feed rate* pada gasifier.

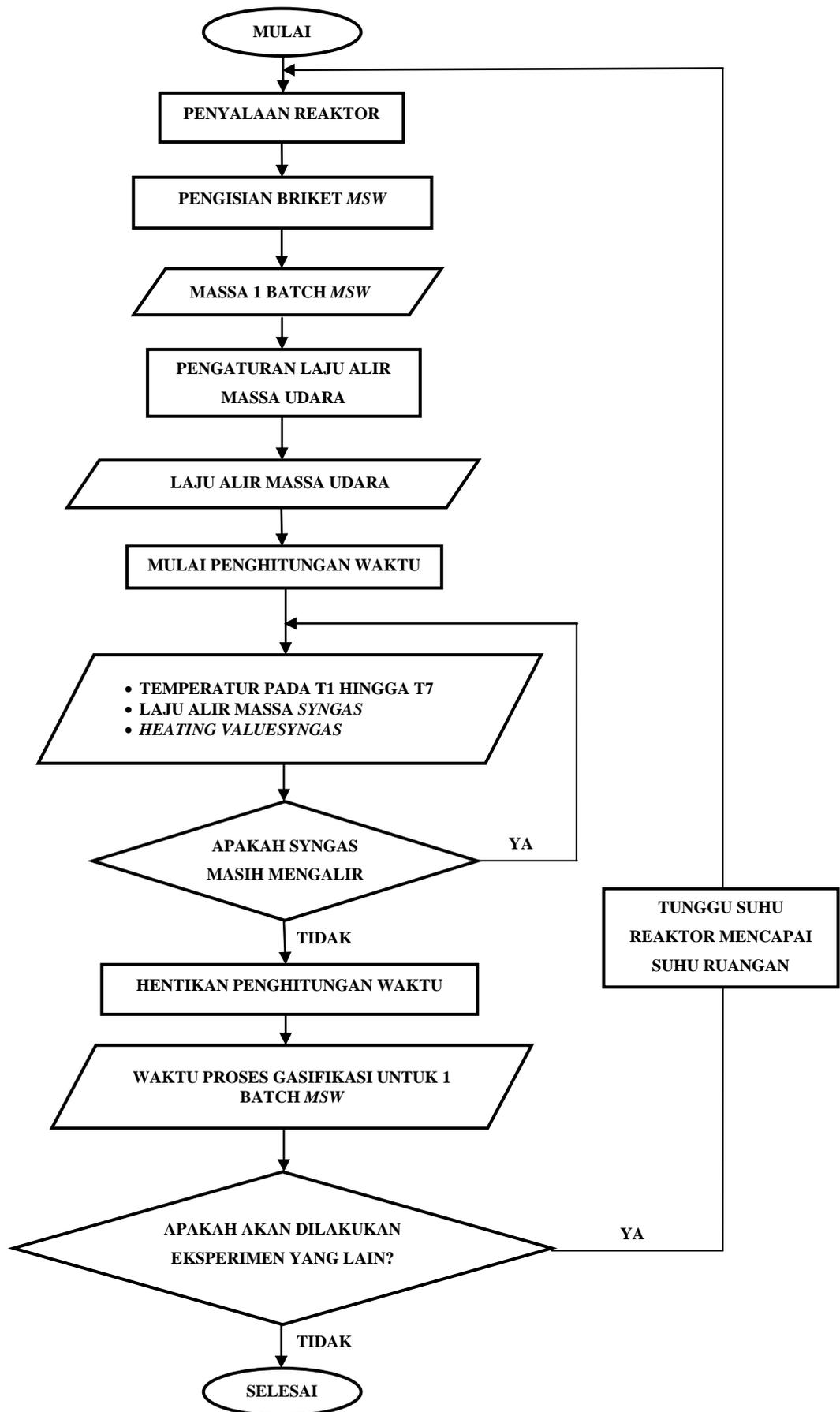
Lampiran 1. Diagram alir penelitian.



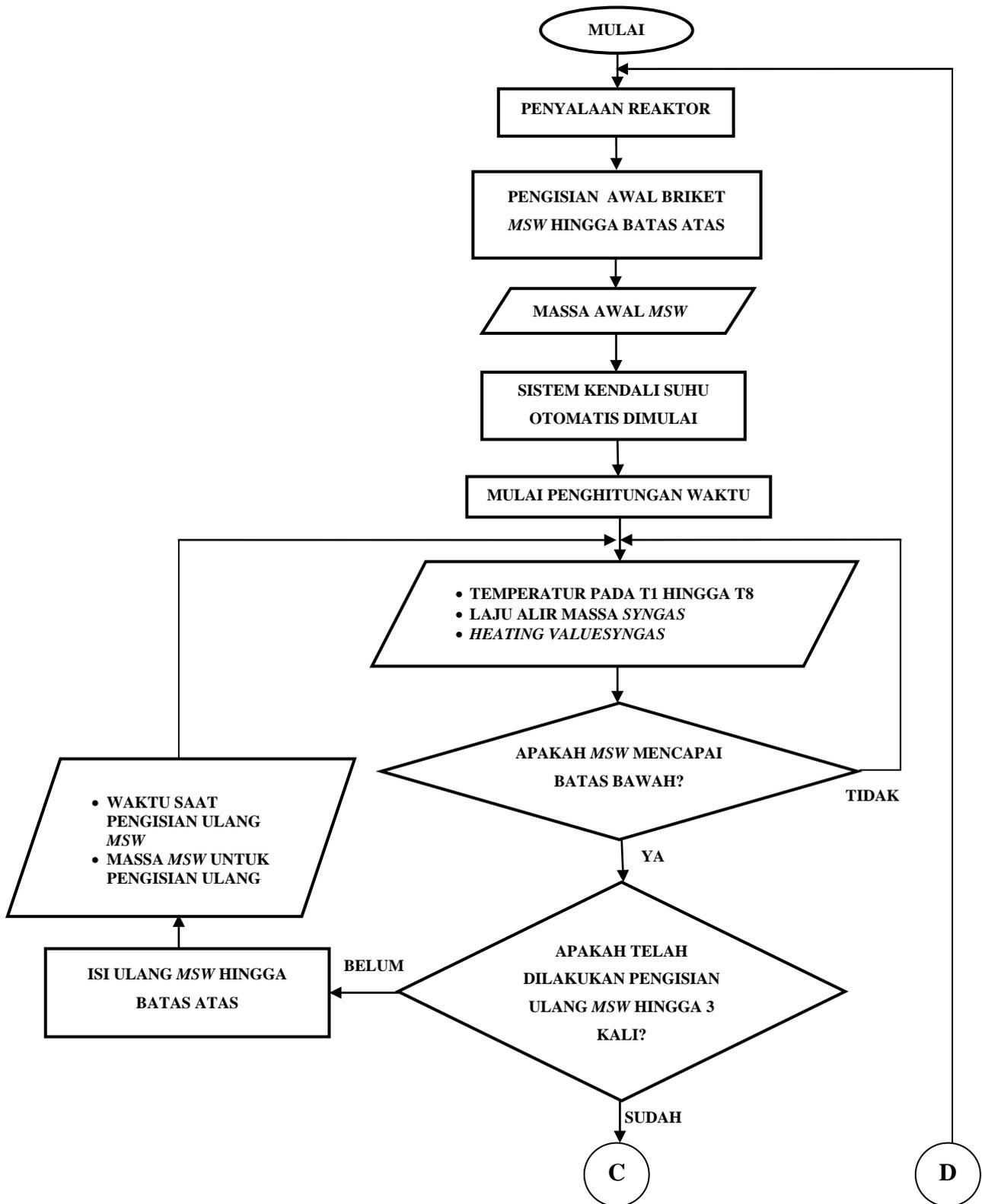


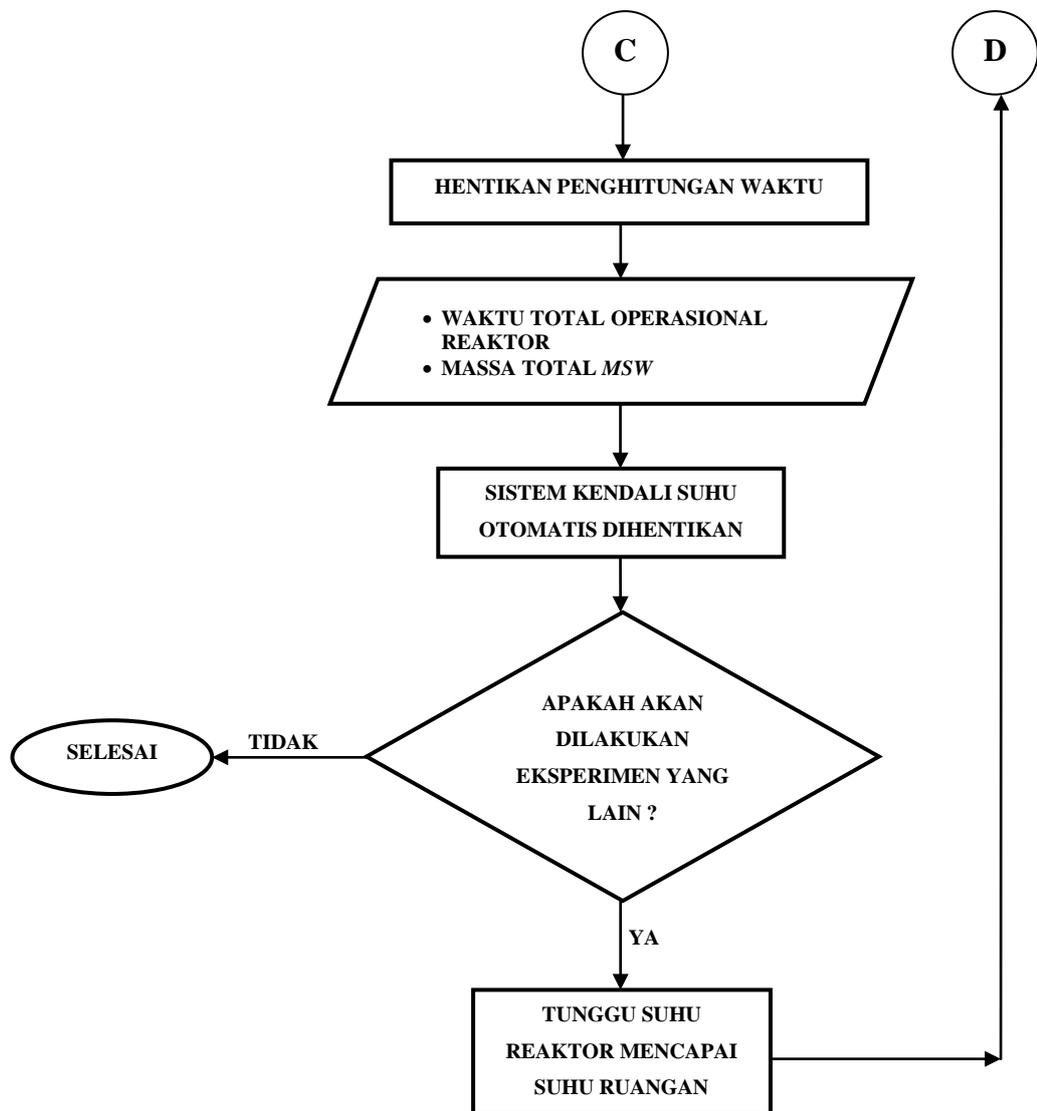


Lampiran 2. Diagram alir penelitian tanpa penggunaan GCU.



Lampiran 3. Diagram alir penelitian dengan penggunaan GCU





Lampiran 4. Pengatur putaran *blower*



Lampiran 5. Rangkaian pengendali suhu otomatis (GCU)



BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan serangkaian eksperimen, pengolahan dan analisa data, maka didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Penggunaan sistem pengendalian suhu secara otomatis pada zona *partial combustion* (*Gasifier Control Unit – GCU*) pada proses gasifikasi *briket municipal solid waste* dapat mempengaruhi kualitas dan kuantitas dari *syngas* yang dihasilkan, hal tersebut nampak pada :
 - Pada perubahan *setpoint value* (SV) dari 500⁰C menjadi 750⁰C maka terjadi peningkatan laju alir *syngas* sebesar 15,8%
 - Peningkatan nilai LHV sebesar 7% yang seiring dengan perubahan *setpoint value* (SV) dari 500⁰C menjadi 750⁰C
2. Penggunaan sistem pengendalian suhu secara otomatis pada zona *partial combustion* untuk proses gasifikasi *briket municipal solid waste* memiliki korelasi dengan kapasitas gasifikasi yang nampak pada :
 - perubahan efisiensi gasifikasi yang mengalami peningkatan sebesar 16% untuk perubahan nilai *setpoint value* (SV) suhu dari 500⁰C menjadi 750⁰C
 - dibandingkan dengan proses gasifikasi tanpa GCU maka nilai tertinggi efisiensi energi gasifikasi pada proses gasifikasi dengan GCU mengalami peningkatan sebesar 2%
3. Berdasarkan hal-hal tersebut diatas maka terdapat kemungkinan untuk menggunakan GCU untuk mengatur kualitas dan kapasitas produksi *syngas* pada sebuah reaktor gasifikasi.

5.2 Saran

1. Penelitian ini baru meneliti sebagian kecil pengaruh sistem pengendalian suhu gasifikasi secara otomatis, oleh karena itu perlu penelitian lebih lanjut yang lebih intensif.
2. Sistem pengendalian otomatis yang digunakan dalam penelitian ini baru menggunakan satu parameter kerja saja sebagai acuan pengendalian kinerja, oleh karena itu perlu penelitian lebih lanjut untuk pengembangan sistem pengendalian otomatis pada gasifier yang menggunakan lebih dari satu parameter untuk pengendalian kinerja gasifier.
3. Briket MSW yang digunakan pada penelitian ini masih belum merupakan pengembangan akhir dari pembuatan briket MSW, oleh karena itu dapat dilakukan penelitian lebih lanjut yang terkait dengan briket MSW.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardianto, Ferry (2011), *Karakterisasi Gasifikasi Biomassa Serpihan Kayu Pada Reaktor Downdraft Sistem Batch Dengan Variasi Air Fuel Ratio (AFR) dan Ukuran Biomassa*, Tugas Akhir Teknik Mesin ITS, Surabaya, Indonesia.
- Arena, U (2012), *Process and Technological Aspects of Municipal Solid Waste Gasification - A Review*, Waste Management 32 (2012) 625–639
- Basu, P. (2013), *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction Practical Design and Theory*, 2nd edition, Elsevier, San Diego, USA.
- Gandhi, S A; Kannadasan, T; Suresh R (2012), *Biomass Downdraft Gasifier Controller Using Intelligent Techniques*, Gasification for Practical Application, Institute for Advanced Engineering, Suwon, Republic of Korea
- Guo, F; Dong, Yuping; Dong, Lei; Gu, Chenlong (2014), *Effect of Design and Operating Parameters on The Gasification Process of Biomass in A Downdraft Fixed Bed - An Experimental Study*, International Journal of Hydrogen Energy 39 (2014) 5625e5633
- Gug, Jeongin; Cacciola, David; Sobkowicz, Margaret J (2014), *Processing and Properties of A Solid Energy Fuel From Municipal Solid Waste (MSW) and Recycled Plastics*, Waste Management 35 (2015) 283–292
- Incropera P. Frank, & Dewitt P. David (2007), “*Fundamentals of Heat and Mass Transfer, fifth edition*”, New York, USA.
- Martinez, Juan Daniel. Lora, electo eduardo silva. Andrade, rubenildo viera & jaen, rene lesme. (2011). “*Experimental study on biomass gasification in a double air stage downdraft reactor*”, Brazil.
- Peréz, Juan F; Melgar, Andrés; Benjumea, Pedro N (2012), *Effect of Operating and Design Parameters on The Gasification Combustion Process of Waste Biomass in Fixed Bed Downdraft Reactors - An Experimental Study*, Fuel 96 (2012) 487–496.

- Reed, T B dan Das, A (1988), *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine System*, Solar Energy Research Institute, SERUSP-271-3022, NTIS.
- Roesch, Hans P (2011), *Downdraft Gasification Of Various Biomass Feedstocks For Energy Production*, Thesis, The Florida State University, USA.
- Sudarmanta, B. (2009). *Dual Fuel Engine Performance Using Biodiesel And Syn-Gas From Rice Husk Downdraft Gasification For Power Generation*. International Seminar On Sustainable Biomass Production And Utilization: Challenges And Opportunities.
- Sudarmanta, B. (2011), *Pengaruh Suhu Reaktor Gasifier dan Ukuran Partikel terhadap Karakterisasi Gasifikasi Biomassa Limbah Kayu Pada Reaktor Gasifier Type Downdraft*. Seminar Teknologi Industri XV.
- Sivakumar, K; Mohan, N. Krishna; Sivaraman, B (2012), *Automation of 10 KW Biomass Gasifier and its effectiveness on saw dust briquettes with binder cow dung*. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN: 2249 – 8958, Volume-1, Issue-5, June 2012.
- Striūgas, N; Zakarauskas, K; Dziugys, A; Navakas, R (2014), *An Evaluation of Performance of Automatically Operated Multi-fuel Downdraft Gasifier for Energy Production*, Applied Thermal Engineering 73 (2014) 1151e1159
- Yokoyama, Shinya, (2008), *Buku Panduan Biomassa Asia*, The Japan Institute of Energy.
- Zhou, Hui; Long, YanQiu; Meng, AiHong; Li, QingHai; Zhang, YanGuo (2014), *Classification of Municipal Solid Waste Components for Thermal Conversion in Waste-to-Energy Research*, Fuel 145 (2015) 151–157
- _____ (2012), *Indonesia Energy Outlook (IEO) 2012*, Pusat Data dan Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral, Kementrian Energi dan Sumber daya Mineral, Indonesia.

BIOGRAFI PENULIS



Penulis dilahirkan sebagai putra terakhir dari enam bersaudara di kota Madiun, pada bulan April tahun 1977. Jalur pendidikan formal yang ditempuh oleh penulis dimulai pada tahun 1983 di SD Negeri Madiun Lor 12 dan lulus pada tahun 1989 yang dilanjutkan pada jenjang menengah di SMP Negeri 1 Madiun dan lulus pada tahun 1992. Setelah lulus dari SMP penulis melanjutkan pendidikan di SMA Negeri 2 Madiun pada tahun 1992 dan menyelesaikan studi pada tahun 1995.

Pada tahun 1995 memulai jenjang pendidikan tinggi Strata 1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada Jurusan Teknik Mesin dengan konsentrasi Teknik Produksi. Pada tahun 2003 penulis menyelesaikan pendidikan dengan tugas akhir mengenai pengujian mesin produksi. Setelah menyelesaikan jenjang S1, penulis pada tahun 2003 memulai karier sebagai pengajar pada pendidikan tinggi bidang vokasi dengan bergabung dalam tim perintis pendirian Politeknik Madiun, dan ditetapkan sebagai pengajar tetap Jurusan Teknik Otomotif Politeknik Madiun pada tahun 2005 dan mengabdikan hingga sekarang.

Pada tahun 2013 penulis memperoleh beasiswa Sainstek – PraPasca dari Kementerian Pendidikan Nasional Indonesia untuk melanjutkan studi di jenjang Strata 2 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Setelah menyelesaikan proses perkuliahan pra-pasca sarjana selama 1 tahun di Jurusan Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember maka pada tahun 2014 penulis memulai pendidikan S2 pada Jurusan Teknik Mesin dengan bidang keahlian Rekayasa Konversi Energi, dan menyelesaikan studi ini pada tahun 2016.