



TUGAS AKHIR - TM141585

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH
PENAMBAHAN SISTEM CERATAN PADA
GASIFIKASI BIOMASSA *BRIKET MUNICIPAL
SOLID WASTE* TERHADAP PERFORMA
GASIFIER TIPE *DOWNDRAFT***

HENDRA BHAKTI
NRP 2113 106 029

Dosen Pembimbing
Dr. Bambang Sudarmanta, ST. MT.

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TM141585

**EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF
ADDING BYPASS SYSTEM FOR GASIFICATION
OF BIOMASS BRIQUETT MUNICIPAL SOLID
WASTE TO PERFORMANCE OF DOWNDRAFT
GASIFIER**

HENDRA BHAKTI
NRP 2113 106 029

Supervisor
Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT.

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENAMBAHAN SISTEM CERATAN PADA GASIFIKASI BIOMASSA BRIKET MUNICIPAL SOLID WASTE TERHADAP PERFORMA GASIFIER TIPE DOWNDRAFT

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

HENDRA BHAKTI
NRP. 2113106029

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT. (Pembimbing)
NIP. 197301161997021001
2. Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc. (Penguji I)
NIP. 196604021989031002
3. Dr. Ir. Budi Utomo K. W., ME. (Penguji II)
NIP. 195312191981031001
4. Ary Bachtiar K. P., ST, MT, PhD. (Penguji III)
NIP. 197105241997021001



SURABAYA

Juli, 2016

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH
PENAMBAHAN SISTEM CERATAN PADA
GASIFIKASI BIOMASSA *BRIKET MUNICIPAL
SOLID WASTE* TERHADAP PERFORMA *GASIFIER
TIPE DOWNDRAFT***

Nama Mahasiswa : Hendra Bhakti
NRP : 211 3106 029
Jurusan : Teknik Mesin FTI – ITS
Dosen Pembimbing: Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT

Abstrak

Sejalan dengan pemanfaatan *syngas* sebagai bahan bakar campuran bahan bakar mesin *diesel dual fuel* (DDF) menimbulkan beberapa permasalahan. Konsumsi *syngas* maupun minyak solar sebagai bahan bakar tidak tetap karena dipengaruhi oleh putaran dan beban yang diterima oleh mesin. Di sisi lain, operasional sebuah *gasifier* cenderung pada interval tertentu, sehingga terjadi ketidak - sesuaian antara produksi dan konsumsi atau terbuang sebagian. Dari fakta tersebut diperlukan sistem ceratan untuk mengalirkan kembali *syngas* yang terbuang karena sisa pembakaran mesin DDF ke dalam reaktor. *Syngas* yang dipakai berasal dari proses gasifikasi yang dilakukan pada *downdraft gasifier* dengan bahan bakar briket MSW.

Mekanisme ceratan gas hasil gasifikasi dilakukan dengan pemasangan katup pada pipa aliran *syn-gas* setelah *induced fan* menuju reaktor gasifikasi kembali. *Syngas* hasil ceratan di campur dengan udara sebagai *gasifying agent* dengan *mixer* sebelum masuk ke blower udara. Pipa aliran dipasang *flowmeter* untuk mengetahui aliran *syngas* maupun udara. Laju alir massa *syn-gas* yang dicerat divariasikan mulai 0%, 11%, 23%, dan 54%. Pengukuran dilakukan terhadap temperatur reaktor, waktu konsumsi biomassa briket MSW, laju aliran massa *syn-gas*, dan laju aliran massa *syn-gas* yang dicerat. Gas hasil eksperimen ditangkap menggunakan *bagtrap* dan di uji laboratorium LPPM-

ITS untuk mengetahui kualitas *syn-gas*. Sample briket diuji di LPPM-ITS untuk mengetahui nilai kalor Briket MSW.

Dari penelitian dan analisa yang telah dilakukan, diketahui bahwa nilai rasio udara-bahan bakar menurun seiring penambahan ceratan *syn-gas* yaitu dari 1,04 – 0,44 dan equivalence ratio dari 0,18 – 0,09. Dengan penambahan ceratan diketahui efisiensi terbaik terjadi saat penambahan prosentasi ceratan 11% dengan efisiensi sebesar 66,81%. LHV meningkat seiring penambahan ceratan dengan LHV terbaik terjadi pada ceratan *syn-gas* 55% sebesar 3912,37 kJ/kg. Temperatur kerja gasifikasi cenderung menurun dengan penambahan ceratan *syn-gas*. Temperatur kerja T1 – T5 berada pada kisaran 70, 250, 983, 589, dan 115°C. Kandungan *combustible* gas meningkat dan *uncombustible* gas menurun seiring dengan penambahan ceratan *syn-gas*. Nilai kalor briket MSW sebesar 4698 kJ/kg.

Kata Kunci :Performa, sistem *dual-fuel*, *syn-gas*, minyak solar, suhu gas buang, ceratan, gasifikasi, *downdraft*.

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF ADDING BYPASS SYSTEM FOR GASIFICATION OF BIOMASS BRIQUETT MUNICIPAL SOLID WASTE TO PERFORMANCE OF DOWNDRAFT GASIFIER

Name : Hendra Bhakti
NRP : 2113 106 029
Department : Mechanical Engineering FTI-ITS
Supervisor : Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT.

ABSTRACT

Along with the use of syngas as a fuel mixture of fuel diesel dual fuel engine (DDF), raises some problems. Consumption of syngas or oil as fuel is not fixed because it is influenced by the rotation and loads received by the machine. Beside that, operating a gasifier tends at certain intervals, resulting in non-compliance between the production and consumption or partially wasted. So, it is necessary to drain back the syngas is wasted due to fuel of DDF engines into reactor with bypass system. Syngas is derived from the gasification process which carried out in a downdraft gasifier with briquettes MSW as a biomass.

Bypass mechanism of gasification is done by mounting the valve on the pipe syn-gas flow after the induced fan back to the gasifier. Syngas mixed with air as a gasifying agent with a mixer before entering the air blower. Flowmeter installed in the pipe to determine the flow of syngas or air flow. Mass flow rate of bypass syn-gas varied ranging 0%, 11%, 23% and 54%. Measurements were taken of the temperature of the reactor, while the consumption of biomass briquettes MSW, mass flow rate of syngas, and the mass flow rate bypass of syn-gas. Gas captured using bagtrap and tested in LPPM –ITS laboratory to determine the quality of the syn-gas. Sample briquettes were tested in LPPM-ITS to determine the calorific value of MSW briquets.

From research and analysis, it is known that the value of the air-fuel ratio decreases with increasing bypass syn-gas from 1.04 to 0.44 and the equivalence ratio of 0.18 to 0.09. With the addition of known best bypass efficiency occurred while adding bypass syn-gas percentage of 11% with an efficiency of 66.81%. LHV increases with increasing bypass with best LHV occurred in bypass syn-gas 55% amounting to 3912.37 kJ / kg. Working temperature bypass gasification tends to decrease with the addition of syn-gas. Working temperature T1 - T5 are in the range of 70, 250, 983, 589, and 115°C. The content of combustible gas got increases and uncombustible gas decreases along with the addition of bypass syn-gas. The calorific value of MSW briquettes of 4698 kJ / kg.

Keywords: *Performance, dual-fuel system, syn-gas, diesel oil, exhaust gas temperature, bypass, gasification, downdraft.*

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL INDONESIA	
TITLE PAGE	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK INDONESIA	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	vii
BAB I Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II Tinjauan Pustaka	7
2.1 Briket <i>Municipal Solid Waste</i>	7
2.2 Bahan Bakar	8
2.2.1 Bahan Bakar Minyak.....	8
2.2.2 Bahan Bakar Gas	11
2.2.3 Bahan Bakar Padat	11
2.3 Karakteristik Bahan Bakar	11
2.4 Teori Pembakaran.....	15
2.4.1 Perhitungan Stoikiometri Kebutuhan Udara	16
2.4.2 Pembakaran Non Stoikiometri	17
2.5 Parameter Pengoperasian Reaktor Gasifikasi.....	18
2.5.1 Equivalency Ratio	18
2.5.2 Suhu Reaktor Gasifikasi.....	20
2.5.3 Superficial Velocity / Heart Load	21

2.5.4 Komposisi dan Properti Fisik Biomassa.....	23
2.5.5 Komposisi dan Suhu Media Gasifikasi	23
2.6 Parameter Unjuk Kerja Reaktor Gasifikasi	23
2.6.1 Komposisi Gas.....	24
2.6.2 Nilai Kalor Gas.....	24
2.6.3 Cold Gas Efficiency	25
2.6.4 Kandungan Tar	25
2.7 Penelitian Terdahulu.....	25
BAB III Metodologi Penelitian.....	33
3.1 Metode Penelitian.....	33
3.2 Skema Percobaan.....	33
3.3 Alat Uji dan Bahan	35
3.3.1 Peralatan Uji	35
3.3.2 Alat Ukur.....	40
3.3.3 Bahan Eksperimental.....	45
3.4 Prosedur Pengujian.....	45
3.4.1 Persiapan Pengujian.....	45
3.4.2 Langkah Pengambilan Data.....	45
3.4.3 Langkah Pengujian	46
3.5 Rancangan Eksperimen	46
3.6 Flowchart Penelitian.....	48
3.7 Jadwal Penelitian	49
BAB IV Analisa dan Pembahasan Data	51
4.1 Analisis Propertis Biomassa Briket Municipal Solid Waste .	51
4.2 Kondisi Pengoperasian Reaktor Zona Gasifikasi	52
4.2.1 Distribusi Temperatur Reaktor Fungsi Waktu ($\Phi = 0,18$), tanpa Ceratan Syn-gas	52
4.2.2 Distribusi Temperatur Reaktor Fungsi Waktu ($\Phi = 0,16$), dengan laju alir massa Ceratan Syn-gas = 0,00009 kg/s ...	54
4.2.3 Distribusi Temperatur Reaktor Fungsi Waktu ($\Phi = 0,14$), dengan laju alir massa Ceratan Syn-gas = 0,00019 kg/s ...	56
4.2.4 Distribusi Temperatur Reaktor Fungsi Waktu ($\Phi = 0,09$), dengan laju alir massa Ceratan Syn-gas = 0,00042 kg/s ...	57

4.3 Analisis Performa Gasifikasi	59
4.3.1 Analisis Kandungan synthetic-gas	59
4.3.2 Massa Jenis Synthetic Gas	61
4.3.3 Analisis laju alir massa produksi syn-gas sebelum dicerat. 62	
4.3.4 Analisis laju alir massa ceratan Syn-gas	62
4.3.5 Analisis laju alir massa udara	63
4.3.6 Analisis laju alir massa Briket MSW	64
4.3.7 Analisis Rasio Udara Bahan-Bakar Aktual (AFR).....	64
4.3.8 Analisis Rasio Udara-Bahan Bakar Stoikiometri (AFR _s) .	65
4.3.9 Analisis Equivalence Ratio (Φ).....	65
4.3.10 Analisis nilai kalor ditinjau dari LHV Synthetic Gas (<i>Low heating Value</i>)	67
4.3.11 Analisa Effisiensi Gas Dingin	71
BAB V Penutup	73
5.1 Kesimpulan.....	73
5.1 Saran.....	75
Daftar Pustaka.....
Lampiran.....

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi MSW	7
Tabel 2.2 Hasil pengujian proximate komponen MSW	12
Tabel 2.3 Hasil pengujian ultimate komponen MSW	14
Tabel 3.1 Keterangan gambar skema pengujian	27
Tabel 3.2 Parameter Eksperimen dan visualisasi	36
Tabel 3.3 Jadwal kegiatan Tugas Akhir	38
Tabel 4.1 Hasil Uji Komposisi <i>Synthetic Gas (Syn-gas)</i>	59
Tabel 4.2 Equivalence ratio berdasarkan AFR aktual	66
Tabel 4.3 Nilai LHV <i>synthetic-gas</i> pada Briket MSW dengan variasi prosentase ceratan <i>syn-gas</i>	69

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Proses analisa <i>proximate</i>	13
Gambar 2.2 Analisa <i>ultimate</i> dan <i>proximate</i>	14
Gambar 2.3 Proses konversi termal biomassa	15
Gambar 2.4 Zona temperature dan air fuel ratio proses termokimia	15
Gambar 2.5 Efek perubahan ER terhadap (a) temperatur pembakaran untuk biomassa dengan komposisi atom $CH_{1,4}O_{0,6}$ 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	20
Gambar 2.6 Profil suhu dan zona pada reaktor gasifikasi up-draft	21
Gambar 2.7 Profil suhu dan zona pada reaktor gasifikasi down-draft	22
Gambar 2.8 a. <i>Sfc</i> dan b. <i>Fuel Consumption</i> terhadap beban	26
Gambar 2.9 Skema pengujian biomassa	27
Gambar 2.10 Grafik pengaruh tingkat suhu reaktor terhadap produksi gas	28
Gambar 2.11 Skema pengujian gasifikasi penelitian Hernandez, dkk	29
Gambar 2.12 Pengaruh temperature tinggi terhadap gas produksi pada bahan bakar biomasa (a) sekam padi, (b) serbuk kayu	29
Gambar 2.13 Pengaruh diameter partikel terhadap (a) Gas <i>composition</i> , (b) Gas <i>yield</i> dan LHV	32
Gambar 2.14 Pengaruh temperatur reaktor terhadap produksi gas CO dan H_2	32
Gambar 2.15 Grafik temperature gasifikasi terhadap waktu pada penggunaan gasifying agent udara dank abut gasifikasi	32
Gambar 3.1 Skema pengujian reaktor dengan sistem ceratan <i>syn-gas</i>	25

Gambar 3.2 Reaktor gasifikasi <i>downdraft</i>	28
Gambar 3.3 <i>Induced fan</i>	28
Gambar 3.4 <i>Blower syngas</i>	29
Gambar 3.5 Pompa air.....	29
Gambar 3.6 <i>Cyclone</i>	30
Gambar 3.7 <i>Dimmer</i>	30
Gambar 3.8 <i>Water scrubber</i>	31
Gambar 3.9 Mekanisme sistem ceratan.....	31
Gambar 3.10 <i>Mixer ceratan syngas dan udara pada gasifying agent inlet</i>	31
Gambar 3.11 (a)Termometer inframerah (b) Termokopel stik....	32
Gambar 3.12 Skematik <i>pitot tube</i> dengan <i>mass flowmeter</i>	33
Gambar 3.13 <i>Mass flowmeter</i>	34
Gambar 3.14 Flowchart penelitian	48
Gambar 4.1 Zona Distribusi Temperatur Reaktor Gasifikasi	52
Gambar 4.2 Grafik distribusi Temperatur pada $\Phi = 0,18$ tanpa in ceratan syn-gas fungsi waktu	52
Gambar 4.3 Distribusi temperature pada $\Phi = 0,16$ dengan laju alir massa ceratan syn-gas 0,00009 kg/s	54
Gambar 4.4 Distribusi temperature pada $\Phi = 0,14$ dengan laju alir massa ceratan syn-gas 0,00019 kg/s	56
Gambar 4.5 Distribusi temperature pada $\Phi = 0,09$ dengan laju alir massa ceratan syn-gas 0,00042 kg/s	57
Gambar 4.6 Grafik kandungan <i>synthetic gas</i> terhadap <i>Equivalence ratio</i>	60
Gambar 4.7 Grafik <i>Equivalence ratio</i> terhadap temperature	65
Gambar 4.8 Grafik <i>Equivalence Ratio</i> (Φ) terhadap prosentase ceratan syn-gas.....	67
Gambar 4.9 Nilai LHV <i>synthetic gas</i> terhadap <i>Equivalence Ratio</i> (Φ)	69
Gambar 4.10 Grafik Effisiensi gas dingin terhadap <i>equivalence ratio</i> (Φ)	71

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Jumlah penduduk Indonesia meningkat dari 205 juta jiwa pada tahun 2000 mencapai 245 juta jiwa pada tahun 2012 dengan pertumbuhan rata-rata 1,31% per tahun [1]. Di sisi lain, cadangan sumber energi utama Indonesia yaitu bahan bakar fosil kian menipis. Dengan pola konsumsi yang boros dan semakin banyak mengakibatkan cadangan tersebut semakin kritis. Oleh karena itu, perlu adanya solusi guna mengoptimalkan konsumsi energi yang ada serta pengembangan energi alternatif terbarukan.

Sampah merupakan masalah yang harus ditanggulangi secepatnya. *Municipal Solid Waste* (MSW) atau sampah padatan kota adalah jenis sampah umum yang mencakup sampah rumah tangga, sampah badan komersil, sampah di area-area umum dan ada kalanya sampah hasil *treatment plant site* yang dikumpulkan *municipality* dalam wilayah tertentu. Menurut Status Lingkungan Hidup Daerah Kota Surabaya [2], volume sampah yang masuk ke TPA sebesar 10.000 m³/hari. Sedangkan timbulan sampah kota Surabaya tahun 2012 sebesar 1200 ton/hari. Komposisi sampah tersebut antara lain: sampah organik 64,1%, sampah kertas 7,58%, sampah plastik 7,69 %, logam 1,11%, dan 9,46% lain-lain. Sedangkan untuk kadar air sampah di dataran tinggi pada musim hujan dan kemarau sekitar 43% dan 35% [2]. Untuk selanjutnya sampah yang digunakan adalah MSW.

Gasifikasi merupakan salah satu metode yang efisien dan bersih guna memanfaatkan sumber daya dengan kepadatan energi rendah serta tinggi kandungan *volatile*, Zhou [5]. Gasifikasi adalah proses perubahan bahan bakar padat secara termokimia menjadi gas (*syngas*) yang *flammable*. Perbandingan udara dan bahan bakar pada proses gasifikasi lebih rendah daripada pembakaran normal (stoikiometri). *Syngas* biasanya dimanfaatkan sebagai bahan bakar campuran pada motor pembakaran dalam. Contoh penelitian

syngas hasil biomassa dari serbuk kayu yang dilakukan oleh Kahardiyansyah menunjukkan bahwa gas hasil gasifikasi mengandung unsur $\text{CH}_4=1,81\%$ *weight*, $\text{H}_2=5,34\%$ *weight*, $\text{O}_2=12,79\%$ *weight*, $\text{N}_2=49,26\%$ *weight*, $\text{CO}_2=11,23\%$ *weight*, $\text{CO}=19,57\%$ *weight*. *Lower heating value (LHV)* serbuk kayu sebesar 9262,96 KJ/kg [3].

Dalam pemanfaatannya, telah dilakukan berbagai macam inovasi untuk meningkatkan unjuk kerja reaktor gasifikasi. Salah satunya yaitu penggunaan *gasifying agent* bertemperatur tinggi pada sistem pemasukan udara pembakaran reaktor. Dari penelitian gasifikasi biomassa sekam padi dan serbuk kayu yang dilakukan oleh Zhou, dkk [5] dengan perbandingan massa O_2 /biomassa 0,4 dan *preheater gasifying agent* N_2 mulai 100 °C memasuki reaktor, dapat meningkatkan temperatur reaktor dari 1000 °C menjadi 1400 °C dengan ikutan peningkatan efisiensi gas dingin biomassa sekam padi dan serbuk kayu masing-masing 16% dan 11%. Dari grafik yang dihasilkan juga terlihat peningkatan produksi H_2 dan CO masing-masing 10% *weight*, dan penurunan produksi CO_2 dan CH_4 mencapai 11% *weight* dan 5% *weight* pada biomassa sekam padi, sedangkan gasifikasi dengan biomassa serbuk kayu terjadi peningkatan produksi H_2 dan CO masing-masing 7% *weight* dan 11% *weight*, dan penurunan produksi CO_2 dan CH_4 masing-masing mencapai 10% *weight* dan 8% *weight*. Hal tersebut selaras dengan penelitian Qin, dkk [18] yang menyebutkan bahwa dengan meningkatkan temperatur reaksi dapat meningkatkan produksi gas total menjadi 72% *weight*. Hal tersebut dikarenakan temperature reaksi yang tinggi (>1000 °C) dapat membentuk ulang tar dan hidrokarbon berat.

Berdasarkan uraian tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi temperatur *gasifying agent* yang masuk ke dalam reaktor, dapat membantu meningkatkan produksi gas H_2 dan CO. Gas tersebut merupakan komponen utama *syngas* yang *flammable* selain CH_4 . Dari uraian tersebut juga diketahui dengan penambahan temperatur tinggi pada reaktor dapat menurunkan

produksi gas CO₂ (*unflammable*) yang menandakan bahwa kualitas *syngas* yang dihasilkan cukup bagus.

Diesel bahan bakar ganda atau *Diesel Dual Fuel* (DDF) adalah mesin standar diesel yang ditambahkan bahan bakar lain pada *intake manifold* dan penyalaan bahan bakar dilakukan oleh semprotan solar yang disebut *pilot fuel*. Aplikasi *syngas* dengan sistem DDF pada mesin diesel dapat meningkatkan unjuk kerja dan efisiensi mesin, Azimov, dkk [4].

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Maulana [6], tentang sistem *dual-fuel engine* menunjukkan bahwa penambahan *syngas* yang keluar dari *pressure regulator* pada tekanan 2,5 bar sebagai bahan bakar dapat menggantikan konsumsi minyak solar hingga 70,83% dengan pembebanan 2400 watt. Nilai *specific fuel consumption* (sfc) *dual fuel* mengalami peningkatan sebesar 54,37% dari kondisi sfc standard, sedangkan untuk *specific fuel consumption* (sfc) bahan bakar solar mengalami penurunan mencapai 70,83% dari kondisi standar single fuel, penurunan AFR sebesar 54,34% dari AFR standar single fuel, serta nilai efisiensi thermal mengalami penurunan sebesar 36,51%.

Namun demikian, timbul beberapa masalah dalam pemanfaatan tersebut. Salah satunya adalah konsumsi *syngas* maupun minyak solar sebagai bahan bakar yang tidak tetap. Hal tersebut dipengaruhi oleh putaran dan beban yang diterima oleh mesin. Di sisi lain, operasional sebuah *gasifier* cenderung pada interval tertentu, sehingga terjadi ketidak- sesuaian antara produksi dan konsumsi *syngas*. Dari fakta tersebut, didapatkan gagasan untuk melakukan ceratan atau *bypass* pada *syngas* sisa yang terbuang untuk dimasukkan ke dalam reaktor kembali. Ceratan dimaksudkan sebagai pemanas reaktor tambahan dan campuran *gasifying agent*. Dari mekanisme tersebut juga diharapkan dapat menampung kembali *syngas* sisa hasil produksi yang terbuang.

1.2 Perumusan Masalah

Dalam penelitian ini, permasalahan dirumuskan sebagai berikut :

1. Bagaimana mekanisme ceratan *syngas* hasil gasifikasi briket MSW ke dalam reaktor *gasifier*?
2. Bagaimana besarnya suhu pada zona gasifikasi mencakup zona drying, pirolisis, oksidasi parsial, reduksi dan produksi syngas?
3. Bagaimana unjuk kerja reaktor gasifikasi dengan penambahan ceratan *syngas* dari hasil gasifikasi briket MSW?

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini pokok bahasannya dibatasi oleh beberapa hal sebagai berikut :

1. Percobaan menggunakan reaktor gasifikasi *downdraft*.
2. Kondisi udara sekitar dalam keadaan ideal.
3. Tidak membahas proses pembuatan *syngas* hasil gasifikasi serta reaksi kimia yang terjadi.
4. Bahan bakar yang digunakan adalah briket MSW dengan pengumpanan 5kg per jam.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Untuk mengetahui mekanisme ceratan *syngas* hasil gasifikasi briket MSW ke dalam reaktor *gasifier*.
2. Untuk mengetahui besarnya suhu pada zona gasifikasi mencakup zona drying, pirolisis, oksidasi parsial, reduksi dan produksi syngas.
3. Untuk mengetahui unjuk kerja reaktor gasifikasi dengan penambahan ceratan *syngas* dari hasil gasifikasi briket MSW.

1.5 Manfaat penelitian

Dengan dilaksanakannya penelitian ini, hasil yang diperoleh diharapkan :

1. Mampu memanfaatkan MSW menjadi sebuah briket yang digunakan untuk umpan pada *gasifier* sebagai sumber energi alternatif.
2. Hasil penelitian dapat dipergunakan untuk penelitian lanjutan dalam pengembangan hasil gasifikasi *syngas* dengan umpan briket MSW sebagai bahan mesin pembakaran dalam.
3. Mampu memberikan pengetahuan kepada masyarakat dengan adanya sumber energi yang berasal dari briket MSW tersebut.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistem penulisan dibagi dalam beberapa bab sebagai berikut:

1. Bab I Pendahuluan

Bab ini berisi tentang latar belakang dari penelitian ini, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, serta manfaat dari penelitian yang dilakukan.

2. Bab II Tinjauan Pustaka

Bab ini di bagi menjadi 2 bagian, yaitu dasar teori dan penelitian terkait yang sudah ada. Dasar teori berisi semua hal yang menunjang dalam penganalisaan hasil penelitian. Sedangkan penelitian terkait yang sudah ada berisi tentang penelitian-penelitian sebelumnya yang ada korelasinya dengan penelitian kali ini, yang juga menjadi penunjang dalam analisa data.

3. Bab III Metode Penelitian

Bab ini menerangkan tentang peralatan eksperimen yang meliputi alat ukur, benda uji dan metode penelitian yang digunakan.

4. Bab IV Pembahasan dan Analisa Data

Bab ini berisi tentang hasil-hasil eksperimen dan pengolahan dari data yang didapat, kemudian dianalisa dan didiskusikan lebih lanjut.

5. Bab V Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisi tentang kesimpulan sistem hasil analisa dan saran – saran perbaikan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Briket *Municipal Solid Waste*

Briket adalah sebuah blok bahan padat yang dapat digunakan sebagai bahan bakar dengan ketahanan dalam menjaga kualitas api pembakaran. Biasanya bahan baku yang digunakan dalam pembuatan briket adalah batu bara, arang, serta biomassa sampah domestik dengan bantuan perekat seperti tepung tapioka. Pada prosesnya, pembriketan dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa mekanisme mesin yaitu tipe ulir, stamping dan hidrolis. Sedangkan studi eksperimen yang sedang dilakukan menggunakan mesin briket tipe stamping pada cetakan dengan 4 *cavity*.

Municipal Solid Waste (MSW) merupakan sampah kota yang dihasilkan dari sisa konsumsi harian rumah tangga dan juga industri. Setiap jenis sampah memiliki fraksi massa dan volume yang berbeda-beda seperti pada tabel berikut :

Tabel 2.1 Komposisi MSW [7]

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

Dengan melakukan pembriketan biomassa MSW, berpotensi memaksimalkan daur ulang sampah perkotaan maupun industri

sebagai bahan bakar terbarukan. Disamping itu, dapat mengurangi konsumsi perekat dengan memanfaatkan kertas yang mengandung sukrosa dari sampah yang ada.

2.2. Bahan Bakar

Bahan bakar adalah material dengan suatu jenis energi yang bisa diubah menjadi energi berguna lainnya. Bahan bakar dalam aplikasi mesin pembakaran memiliki 3 (tiga) jenis bentuk fisik atau wujudnya baik itu berupa padat, cair dan gas. Tapi untuk mesin pembakaran dalam, khususnya mesin diesel menggunakan 2 jenis bahan bakar yaitu cair dan gas. Walaupun bahan bakar padat seperti batubara juga dapat digunakan, tapi sebelumnya akan di proses terlebih dahulu yang nantinya menjadi wujud gas.

2.2.1. Bahan Bakar Minyak

Mesin diesel merupakan sebuah mesin yang dirancang dengan menggunakan bahan bakar *fossil diesel* yang diperoleh dari proses destilasi pendidihan minyak mentah (*crude oil*) pada suhu 250 sampai 370 °C, (Kawano dan Sungkono, 2014) [8]. Bahan bakar *fossil diesel* diklasifikasikan menjadi tiga macam, yaitu *fossil diesel-1D*, yaitu bahan bakar untuk daerah beriklim dingin, *fossil diesel-2D*, yaitu bahan bakar untuk mesin diesel otomotif dan putaran mesin tinggi (lebih dari 1200 rpm) serta *fossil diesel-4D*, yaitu bahan bakar untuk mesin diesel stasioner putaran rendah (kurang dari 500 rpm). Bahan bakar fossil diesel-2D dikenal dengan istilah HSD (*High Speed Diesel*). Sifat fisis bahan bakar perlu diperhatikan untuk menghindari kerusakan alat dan kerugian lainnya yang mungkin timbul akibat penggunaan bahan bakar tersebut. Selain itu sifat fisis juga berpengaruh pada kualitas penyalaan, (Nasution, 2010) [9].

Properti bahan bakar adalah sifat atau karakter yang dimiliki oleh suatu bahan bakar yang terkait dengan kinerja bahan bakar tersebut dalam proses atomisasi dan pembakaran. Properti umum yang perlu diketahui untuk menilai kinerja bahan bakar mesin diesel antara lain, (Mathur dan Sharma, 1980) [10]:

a. *Density, Specific Gravity dan API Gravity*

Density didefinisikan sebagai perbandingan massa bahan bakar terhadap *volume* bahan bakar pada suhu acuan 15°C. Sedangkan *Specific Gravity (SG)* didefinisikan sebagai perbandingan berat dari sejumlah *volume* minyak bakar terhadap berat air untuk *volume* yang sama pada suhu tertentu densitas bahan bakar, relatif terhadap air. *Specific Gravity* dinyatakan dalam persamaan:

$$SG_{\text{terhadap air}} = \frac{\text{densitas}_{\text{bahan bakar}}}{\text{densitas}_{\text{air}}} \quad (2.1)$$

Sementara hubungan nilai *Spesific Gravity* dengan *API Gravity* adalah sebagai berikut :

$$API \text{ Gravity} = \frac{141,5}{SG} - 131,5 \quad (2.2)$$

b. *Viskositas*

Viskositas atau kekentalan dari suatu cairan adalah salah satu sifat cairan yang menentukan besarnya perlawanan terhadap gaya geser. Viskositas terjadi terutama karena adanya interaksi antara molekul-molekul cairan. Viskositas merupakan sifat penting dalam penyimpanan dan penggunaan bahan bakar. Viskositas mempengaruhi derajat pemanasan awal yang diperlukan untuk *handling*, penyimpanan dan atomisasi yang memuaskan dan jika viskositas terlalu tinggi maka akan menyulitkan dalam pemompaan dan sulit untuk diinjeksi sehingga atomisasi bahan bakar menjadi jelek.

c. Titik nyala bahan bakar

Titik nyala suatu bahan bakar adalah suhu terendah dimana bahan bakar dapat menyala dengan sendirinya sehingga pada saat memasuki ruang bakar, bahan bakar dapat menimbulkan ledakan.

d. *Pour Point*

Pour point atau titik tuang suatu bahan bakar adalah suhu terendah dimana bahan bakar masih dapat mengalir karena gaya gravitasi. Ini merupakan indikasi yang sangat kasar untuk suhu terendah dimana bahan bakar minyak siap untuk dipompakan.

e. *Sulphur Content*

Sulphur content atau kandungan belerang dalam bahan bakar diesel dari hasil penyulingan sangat tergantung pada asal minyak mentah yang akan diolah. Keberadaan belerang tidak diharapkan karena sifatnya merusak yaitu apabila oksida belerang bereaksi dengan air merupakan bahan yang korosif terhadap logam di ruang bakar. Selain itu menimbulkan polusi lingkungan akibat oksidasi belerang dengan oksigen selama proses pembakaran.

f. *Distillation atau Destilasi*

Karakteristik destilasi dari bahan bakar menunjukkan kemampuan bahan bakar berubah menjadi uap pada suhu tertentu.

g. *Cetane Number*

Cetane number atau angka setana merupakan bilangan yang menyatakan perbandingan penyalan (*ignition delay*) dibandingkan dengan campuran volumetris *cetane* ($C_{16}H_{34}$) dan α -*methylnaphthalene* ($C_{10}H_7CH_3$) pada *CFR engine* pada kondisi yang sama.

h. *Calorific Value*

Calorific value atau nilai kalor merupakan suatu angka yang menyatakan jumlah panas atau kalori yang dihasilkan dari proses pembakaran sejumlah tertentu bahan bakar dengan udara atau oksigen. Nilai kalor dinyatakan dalam 2 ukuran besaran, yaitu nilai kalor atas, NKA (jika air hasil pembakaran dalam phase cair) dan nilai kalor bawah, NKB (jika air hasil pembakaran dalam phase uap). Besarnya nilai kalor atas diuji dengan *bomb calorimeter*, dan nilai kalor bawah dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$NKB = NKA - \left(\frac{m_{air}}{m_{sample}} \times LH \right) \quad (2.3)$$

i. *Carbon Residue*

Banyaknya deposit atau kerak pada dinding ruang bakar mengindikasikan tingginya kandungan *carbon residue* suatu bahan bakar. *Carbon residue* atau residu karbon dalam ruang pembakaran dapat mengurangi kinerja mesin, karena pada suhu tinggi karbon ini dapat membara sehingga menaikkan suhu ruang bakar.

2.2.2. Bahan Bakar Gas

Bahan bakar memiliki banyak jenis tergantung dari asal gas tersebut dan proses pembuatannya. Jenis-jenis gas tersebut antara lain :

1. Bahan bakar yang secara alami didapatkan dari alam
 - Gas alam
 - Metan dari penambangan batu bara
2. Bahan bakar gas yang terbuat dari bahan bakar padat
 - Gas yang terbentuk dari batu bara
 - Gas yang terbentuk dari limbah dan biomassa
 - Dari proses industry lainnya (*gas blast furnace*)
3. Gas yang terbuat dari minyak bumi
 - Gas petroleum cair (LPG)
 - Gas hasil penyulingan
 - Gas dari gasifikasi minyak
 Gas-gas dari proses fermentasi.

2.2.3. Bahan Bakar Padat

Bahan bakar padat merupakan bahan bakar berbentuk padat dan kebanyakan menjadi sumber energi panas misalnya kayu dan batu bara. Energi panas yang dihasilkan bisa digunakan untuk memanaskan air menjadi uap untuk menggerakkan peralatan dan menyediakan energi.

Biasanya, untuk memaksimalkan penggunaan bahan bakar padat, dilakukan dengan membriket. Dengan menjadikan bahan bakar sebagai briket dapat menjaga stabilitas panas yang dihasilkan. Disamping itu, briket diketahui dapat menghemat penggunaan bahan bakar karena tahan lama.

2.3 Karakteristik Bahan Bakar

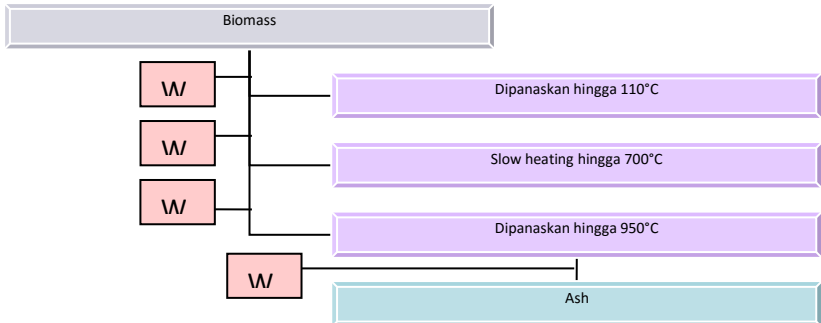
Secara umum, karakteristik bahan bakar dapat dianalisa dengan 2 (dua) cara yaitu *ultimate* dan *proximate*. Untuk mengetahui karakter dan komposisi dari biomass digunakan metode pemeriksaan secara analitis (analisa *proximate*) dan pemeriksaan secara kimia (analisa *ultimate*) deskripsi mengenai

kedua analisa ini terdapat dalam ASTM. Pada analisa *proximate* yang dianalisa adalah kandungan air (*moisture*), *volatile matter*, karbon tetap, dan abu. Sedangkan analisa *ultimate* menyatakan komposisi dari karbon, hidrogen, nitrogen, belerang, dan oksigen.

Tabel 2.2 Hasil pengujian *proximate* komponen MSW [7]

Sample Mark	Moisture %, adb	Ash %, adb	Volatile Matter %, adb	Fixed Carbon %, adb
Leaf	10.78	7.28	62.27	19.67
Food waste	8.48	4.51	72.52	14.49
Wood	8.82	7.15	66.64	17.39
Thick Paper	7.56	5.40	75.01	12.03
Writing paper	6.42	11.77	75.13	6.68
Duplex paper	20.64	9.54	61.02	8.80
Box paper	6.81	8.44	75.34	9.41
PVC	0.28	4.96	79.83	14.93
Bottle plastic	0.63	0.62	89.32	9.43
Hard plastic	0.52	0.41	89.90	9.17
Wrapping plastic	0.31	3.54	89.76	6.39
Toy plastic	0.20	1.70	98.09	0.01
PP plastic	0.07	0.66	99.23	0.04
OPP plastic	0.76	0.18	99.06	0.00
Container plastic	0.20	1.49	98.05	0.26
HD plastic	0.06	0.41	99.53	0.00
Syringe	0.36	0.69	98.48	0.47
PE plastic	0.03	0.41	99.56	0.00
Plastic bag	0.12	1.85	98.03	0.00
Medical plastic	0.21	0.46	94.33	0.00
Plastic cup	0.18	0.79	99.03	0.00
Styrofoam	1.45	0.84	96.75	0.96
Synthetic	1.54	14.97	70.27	13.22
Waste sample I	5.80	26.77	54.98	12.45
Waste sample II	33.08	8.98	48.66	9.28
Textile	1.23	0.42	89.07	9.28
Rubber	0.01	22.91	74.84	2.23
Others	5.72	0.28	79.08	14.89

Analisa proximate relatif sederhana dan dapat dilakukan menggunakan *drying oven*, *laboratory furnace*, dan sebuah penyeimbang. Kadar *moisture* dianalisa melalui pengurangan berat yang terjadi saat biomass dikeringkan hingga suhu 110°C, *volatile matter* dikeluarkan dari biomass melalui *slow heating* hingga 950°C kemudian biomass dipanaskan kembali. Urutan proses yang terjadi untuk mendapatkan hasil pada analisa *proximate* dijelaskan pada ilustrasi di bawah ini :



Gambar 2.1 Proses analisa *proximate* [7]

Keterangan :

W_1 : berat biomassa

$W_1 - W_2$: berat *moisture*

$W_2 - W_3$: berat *volatile matter*

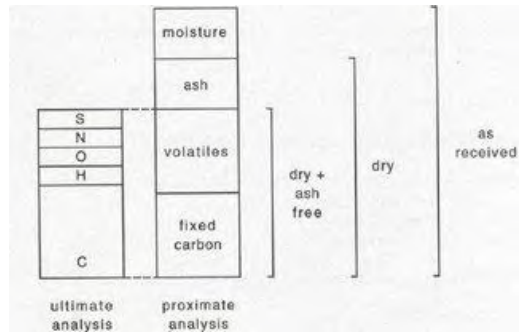
$W_3 - W_4$: berat *fixed carbon*

W_4 : berat *ash*

Biomass umumnya mempunyai kadar volatil yang tinggi, kadar karbon tetap yang rendah dan kadar abu yang juga lebih rendah dibandingkan pada batubara. Biomass mempunyai kadar *volatile* yang tinggi (sekitar 60-80%) dibanding kadar *volatile* pada batubara, maka biomassa lebih reaktif dibanding batubara.

Pada umumnya hasil analisis *ultimate* dan *proximate* akan diberi tambahan keterangan *daf (dry ash free)* yaitu hasil analisisnya tidak mengikutkan abu dan air. Massa biomassa awal umumnya diistilahkan sebagai *as received* (mengandung air, abu, volatil, dan karbon). Kadar abu dari biomassa berkisar dari 1% sampai 12% untuk kebanyakan jerami-jeramian. Abu dari biomassa lebih ramah dibandingkan abu dari batubara karena banyak mengandung mineral seperti fosfat dan potassium. Pada saat pembakaran maupun gasifikasi, abu dari biomassa juga lebih aman dibandingkan abu dari batubara. Dengan temperatur operasi tidak lebih dari 950°C atau 1000°C, abu dari biomassa tidak

menimbulkan terak. Abu biomass mempunyai jumlah oksida keras (silika dan alumina) yang lebih rendah.



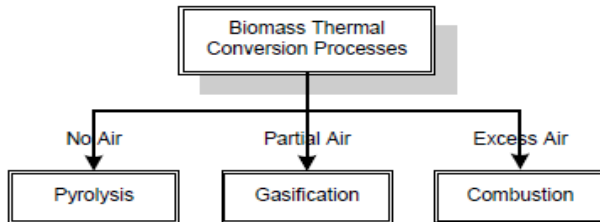
Gambar 2.2 Analisa *ultimate* dan *proximate* [7]

Tabel 2.3 Hasil pengujian *ultimate* komponen MSW [7]

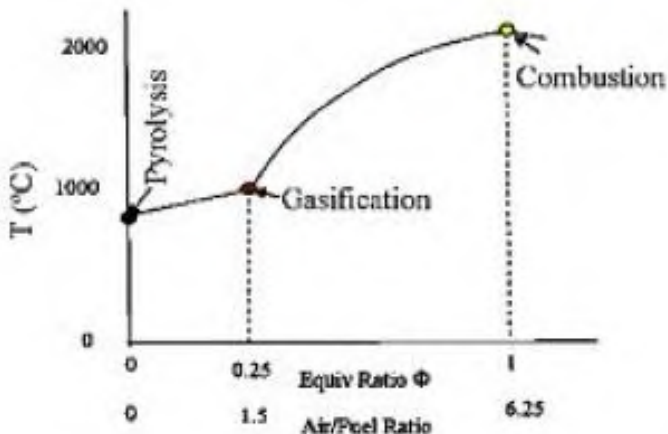
Sample Mark	HHV kJ/kg, adb	C %, adb	H ₁ %, adb	N %, adb	S %, adb	O ₁ %, adb	Cl %, adb
Leaf	17258	42.50	5.86	0.98	0.39	42.99	0.40
Food waste	20009	45.06	6.98	2.90	0.27	40.28	2.70
Wood	15684	41.93	5.72	0.70	0.10	44.40	0.10
Thick Paper	15165	41.72	5.95	0.07	0.11	46.75	0.07
Writing paper	12548	34.96	4.60	0.08	0.08	48.51	0.02
Duplex paper	12297	32.68	6.20	0.12	0.12	51.34	0.12
Box paper	15474	39.00	5.70	0.45	0.16	46.25	0.08
PVC	19418	36.00	4.91	0.00	0.17	53.96	3.83
Bottle plastic	21876	62.50	4.76	0.03	0.09	32.00	0.04
Hard plastic	23375	70.50	6.52	0.45	0.08	22.04	0.06
Wrapping plastic	31041	60.55	7.53	0.11	0.23	28.04	3.82
Toy plastic	44966	87.23	7.71	0.01	0.08	3.27	0.04
PP plastic	45770	85.71	13.15	0.04	0.07	0.37	0.06
OPP plastic	45766	84.01	12.66	0.01	0.11	3.03	0.03
Container plastic	44795	83.81	10.05	0.06	0.01	4.49	0.08
HD plastic	45586	72.30	11.33	0.02	0.13	15.81	0.02
Syringe	45653	83.60	11.10	0.04	0.09	4.48	0.07
PE plastic	46084	83.75	13.08	0.05	0.08	2.63	0.06
Plastic bag	45008	89.95	5.68	0.07	0.10	2.45	0.04
Medical plastic	45644	83.93	13.70	0.03	0.09	1.88	0.04
Plastic cup	46143	81.22	15.33	0.04	0.07	33.21	0.12
Styrofoam	38359	91.35	6.49	0.07	0.14	1.11	0.02
Synthetic waste	21956	45.72	6.67	1.45	0.39	30.80	3.85
Waste sample I	14712	27.80	3.18	0.92	0.23	41.10	0.08
Waste sample II	11045	24.33	10.78	0.55	0.16	55.20	0.10
Textile	18774	52.54	5.69	0.44	0.21	40.71	0.03
Rubber	28948	45.72	6.67	1.45	0.39	30.80	3.85
Others	22588	42.25	5.79	0.84	0.25	43.69	0.10

2.4 Teori Pembakaran

Pembakaran adalah suatu runtutan reaksi kimia antara suatu bahan bakar dan suatu oksigen, disertai dengan produksi panas dalam bentuk api. Dalam suatu reaksi pembakaran lengkap, suatu senyawa bereaksi dengan zat pengoksidasi dan produknya adalah senyawa dari tiap elemen dalam bahan bakar dengan zat pengoksidasinya. Pada aplikasinya, oksidan pada pembakaran adalah oksigen pada udara. Tiga unsur kimia utama dalam elemen mampu bakar (combustible) pada bahan bakar adalah karbon, hidrogen dan sulfur.



Gambar 2.3 Proses konversi termal biomassa



Gambar 2.4 Zona temperature dan air fuel ratio proses termokimia

2.4.1 Perhitungan Stoikometri kebutuhan udara

Jika ketersediaan oksigen untuk oksidasi mencukupi, maka bahan bakar hidrokarbon akan dioksidasi secara menyeluruh, yaitu karbon dioksidasi menjadi karbon dioksida (CO_2) dan hidrogen dioksidasi menjadi uap air (H_2O). Pembakaran yang demikian disebut sebagai pembakaran stoikiometri dan selengkapnya persamaan reaksi kimia untuk pembakaran stoikiometri dari suatu bahan bakar hidrokarbon ($\text{C}_\alpha\text{H}_\beta$) dengan udara dituliskan sebagai berikut :



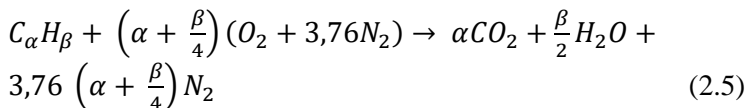
Kesetimbangan C : $\alpha = \beta$

Kesetimbangan H : $\beta = 2c \rightarrow c = \beta/2$

Kesetimbangan O : $2a = 2b + c \rightarrow a = b + c/2 \rightarrow a = \alpha + \beta/4$

Kesetimbangan N : $2(3.76)a = 2d \rightarrow d = 3.76a \rightarrow d = 3.76 (\alpha + \beta/4)$

Substitusi persamaan-persamaan kesetimbangan di atas ke dalam persamaan reaksi pembakaran reaksi pembakaran $\text{C}_\alpha\text{H}_\beta$ menghasilkan persamaan sebagai berikut :



Jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mendapatkan pembakaran stoikiometri adalah :

$$m_{\text{O}_2} = \frac{m_{\text{atom O}_2}}{m_{\text{atom C}_\alpha\text{H}_\beta}} X \% \text{C}_\alpha\text{H}_\beta \frac{\text{kg}}{\text{kg bahan bakar}} \quad (2.6)$$

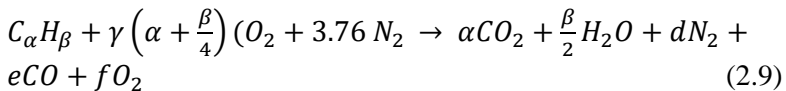
Stoikiometri massa yang didasarkan pada rasio udara dan bahan bakar (*air fuel ratio*) untuk bahan bakar hidrokarbon ($\text{C}_\alpha\text{H}_\beta$) adalah sebagai berikut :

$$\left(\frac{A}{F}\right)_s = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{(\sum n_i M_i)_{air}}{(\sum n_i M_i)_{fuel}} \quad (2.7)$$

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{\left(\alpha + \frac{\beta}{4}\right)M_{O_2} + 3,76\left(\alpha + \frac{\beta}{4}\right)M_{N_2}}{\alpha M_C + \beta M_H} \quad (2.8)$$

2.4.2 Pembakaran Non Stoikiometri

Menurut Heywood [11] dalam aplikasinya, mekanisme pembakaran dituntut dapat berlangsung secara cepat sehingga sistem-sistem pembakaran dirancang dengan kondisi udara berlebih. Hal ini dimaksudkan untuk mengantisipasi kekurangan udara akibat tidak sempurnanya proses pencampuran antara udara dan bahan bakar. Pembakaran yang demikian disebut sebagai pembakaran non stoikiometri dan selengkapnya persamaan reaksi kimia untuk pembakaran non stoikiometri dari suatu bahan bakar hidrokarbon ($C_\alpha H_\beta$) dengan udara dituliskan sebagai berikut:



- a. Pembakaran dengan komposisi campuran stoikiometri
Pada proses ini terjadi perpindahan panas yang maksimum dengan kehilangan panas yang minimum. Hasil pembakaran berupa CO_2 , uap air, dan N_2 .
- b. Pembakaran dengan komposisi campuran miskin
Pada proses ini terjadi perpindahan panas yang maksimum tetapi diikuti dengan bertambahnya kehilangan 15 panas karena udara berlebih. Hasil pembakaran berupa CO_2 , uap air, O_2 dan N_2 .
- c. Pembakaran dengan komposisi campuran kaya
Pada proses ini terjadi perpindahan panas yang kurang maksimum karena ada bahan bakar yang belum terbakar. Hasil pembakaran berupa HC , CO , CO_2 , H_2O , dan N_2 . Sedangkan fraksi karbon terbentuk dari reaksi sekunder antara CO dan H_2O . Rasio udara-bahan bakar ideal untuk pembakaran dalam ruang bakar CI mesin berada pada kisaran $18 \leq AFR \leq 80$ [5].

2.5 Parameter Pengoperasian Reaktor Gasifikasi

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

2.5.1. *Equivalence ratio (ER)*

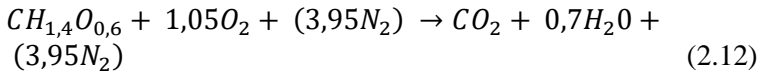
Equivalence ratio (ER) adalah parameter yang sangat penting pada pengoperasian reaktor gasifikasi. ER merupakan perbandingan antara *air-fuel ratio (AFR)* aktual pada pengoperasian reaktor gasifikasi dengan *air-fuel ratio (AFR)* stoikiometris.

$$ER = AFR_{\text{aktual}} / AFR_{\text{stoikiometris}} \quad (2.10)$$

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

$$AFR = \text{Massa}_{\text{udara}} / \text{Massa}_{\text{bahan bakar}} \quad (2.11)$$

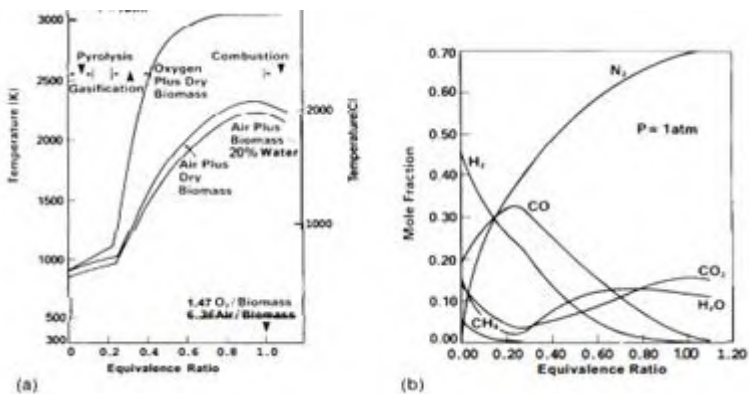
Kondisi stoikiometris teoritis biomassa diperoleh dengan mengetahui terlebih dahulu kandungan unsur kimia dari biomassa, kemudian dilakukan perhitungan persamaan reaksi yaitu reaksi oksidasi. Reed dan Das(1988) memberikan rumus kimia rata-rata dari biomassa yaitu $CH_{1,4}O_{0,6}$, sehingga bila direaksikan dengan udara akan menjadi pembakaran sempurna sebagai berikut :

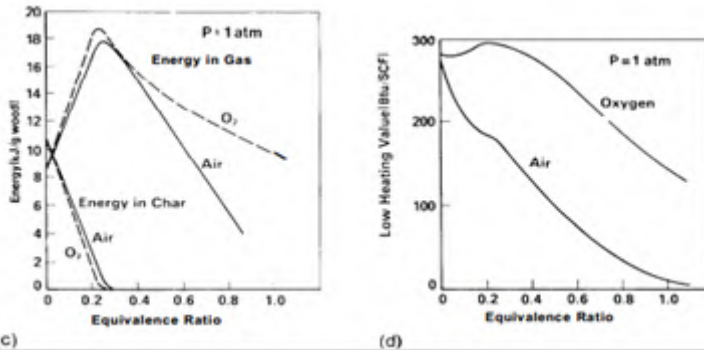


Nitrogen ditunjukkan dalam tanda kurung karena merupakan bagian yang tidak berubah (*inert*) dari udara dan tidak turut serta dalam reaksi dan tetap muncul pada hasil reaksi. Dari reaksi diatas dapat dilihat perbandingan antara udara dan biomassa untuk pembakaran sempurna adalah 10 berbanding 1 (AFR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

Oksigen digunakan untuk proses menentukan produk dan temperatur dari reaksi. Disaat reaksi menggunakan oksigen dalam jumlah sangat sedikit ataupun tidak sama sekali ($ER = 0$) maka dapat diindikasikan terjadi proses pirolisis, bila oksigen yang digunakan kurang dari kondisi stoikiometris ($ER < 1$) maka kemungkinan reaksi berlangsung pada proses gasifikasi, bila oksigen yang digunakan lebih besar atau sama dengan kondisi stoikiometris ($ER \geq 1$) 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, dan 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 kondisi $ER = 0,25$.





Gambar 2.5 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. [17]

Akan tetapi menjadi sebuah pertanyaan tentang kemungkinan untuk mengoperasikan reaktor gasifikasi tepat pada $\text{ER} = 0,25$. 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 yang suhu yang tepat adalah dengan cara menjaga pasokan udara yang tepat secara otomatis.

2.5.2 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

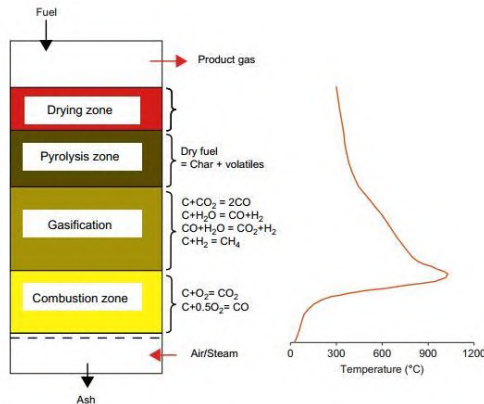
parameter yang lain, seperti : properti biomassa, *superficial velocity*, suhu media gasifikasi, insulator, dan yang lainnya. Pada sisi lain suhu reaktor gasifikasi menjadi penentu dari beberapa parameter unjuk kerja dari reaktor gasifikasi, seperti : tingkat keadaan abu, komposisi dan keberadaan tar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

Gambar 2.6 dan 2.7 merupakan contoh profil suhu pada reaktor gasifikasi *updraft* dan *downdraft*. Pada gambar 2.6 dan 2.7 terlihat bahwa suhu tertinggi terjadi pada zona gasifikasi dan pembakaran terjadi pada kisaran suhu 1000°C hingga 1200°C.

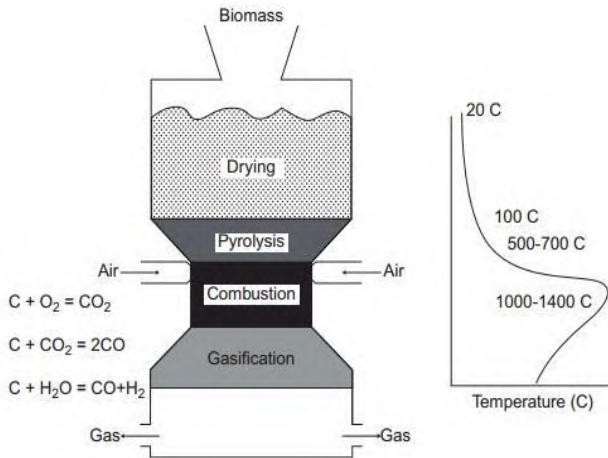
2.5.3 *Superficial velocity/hearth load*

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) [17].



Gambar 2.6 Profil suhu pada reaktor gasifikasi *updraft*. [16]



Gambar 2.7 Profil suhu dan zona pada reaktor gasifikasi *downdraft*. [16]

Superficial velocity 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.

2.5.4 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 yang memiliki tingkat heterogenitas komposisi yang tinggi agar dapat mencapai kondisi kadar kelembaban dan densitas yang cukup maka dilakukan proses pengeringan dan pembriketan.

2.5.5 Komposisi dan suhu media gasifikasi

Parameter komposisi dan suhu media gasifikasi banyak mempengaruhi keseimbangan massa dan energi dalam proses gasifikasi. 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 pendaurlulangan panas yang terdapat pada *syngas*. Komposisi media gasifikasi juga terkait dengan hasil akhir dari proses gasifikasi, yaitu nilai kalor dari *syngas*.

2.6 Parameter Unjuk Kerja Reaktor Gasifikasi

Dari sekian banyak parameter-parameter yang mempengaruhi kondisi operasional reaktor gasifikasi, maka demikian halnya unjuk kerja reaktor gasifikasi juga 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.

2.6.1 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 tersebut, 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.

2.6.2 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 :

$$NKB_{GAS} = \sum_{i=1}^n (Y_i \cdot NKB_i) \quad (2.13)$$

Keterangan :

Y_i = kosentrasi 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.

2.6.3 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).

$$\eta_{CG} = \frac{(\dot{m}_{gas} \cdot NKB_{gas})}{(\dot{m}_{biomassa} \cdot NKB_{biomassa})} \quad (2.14)$$

2.6.4 Kandungan tar

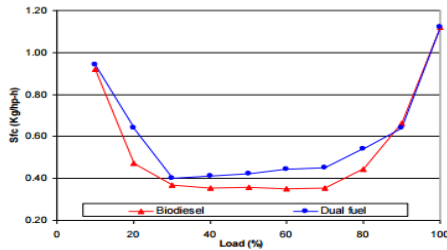
Kandungan tar merupakan parameter yang krusial. Hal tersebut dikarenakan tar yang merupakan campuran kompleks dari hidrokarbon yang dapat terkondensasi, termasuk didalamnya senyawa aromatik satu cincin hingga lima cincin dan juga terdapat hidrokarbon yang mengandung oksigen dan hidrokarbon poliaromatik, 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.

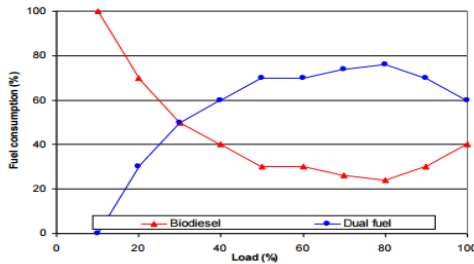
2.7 Penelitian terdahulu

1. Penelitian yang dilakukan oleh Sudarmanta [12]

Penelitian Bambang menggunakan biodiesel dan syngas hasil dari gasifikasi dengan umpan sekam padi dengan sistem downdraft gasifier reactor. Penelitian ini menggunakan mesin diesel satu silinder yang terkopel dengan generator.



The specific fuel consumption vs percentage of load



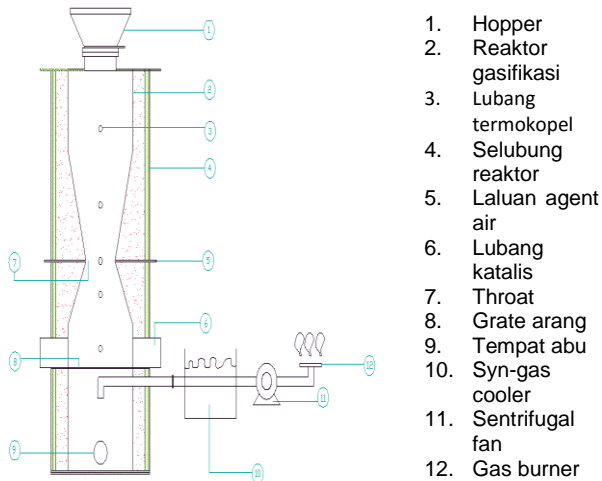
. Percentage fuel consumption vs percentage of load

Gambar 2.8 a. *Sfc* dan b. *Fuel Consumption* fungsi Beban [12]

Pada gambar 2.4 a, menyatakan bahwa konsumsi bahan bakar spesifik biodiesel lebih kecil dari bahan dual fuel karena nilai heating value yang lebih rendah dari syn-gas lebih kecil dari bahan bakar biodiesel. Tes mesin bisa berjalan di kedua diesel dan syn-gas, bukan berjalan hanya pada diesel. Syn-gas dimasukkan ke dalam mesin diesel untuk membiarkan mesin beroperasi di mode dual-fuel, sehingga mengurangi konsumsi solar sebesar lebih dari 60% seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4 b. Rasio udara-gas adalah 1: 1. Mesin ini terhubung generator 3 kW untuk pengukuran pembebanan.

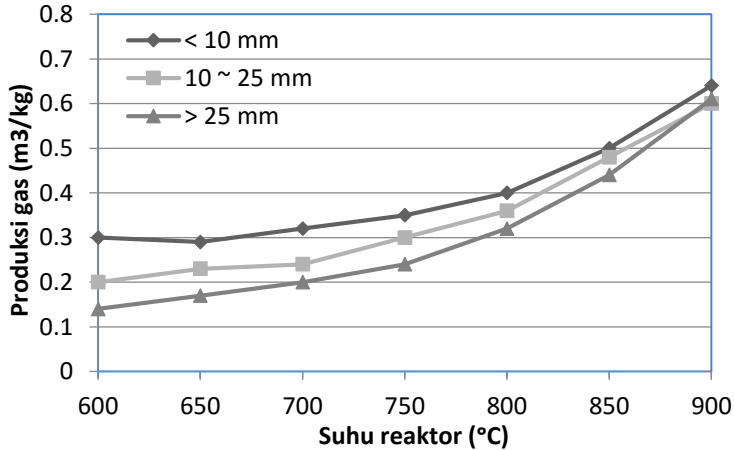
2. Penelitian yang dilakukan oleh Sudarmanta, dkk [13]

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



Gambar 2.9 Skema pengujian biomassa [13]

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

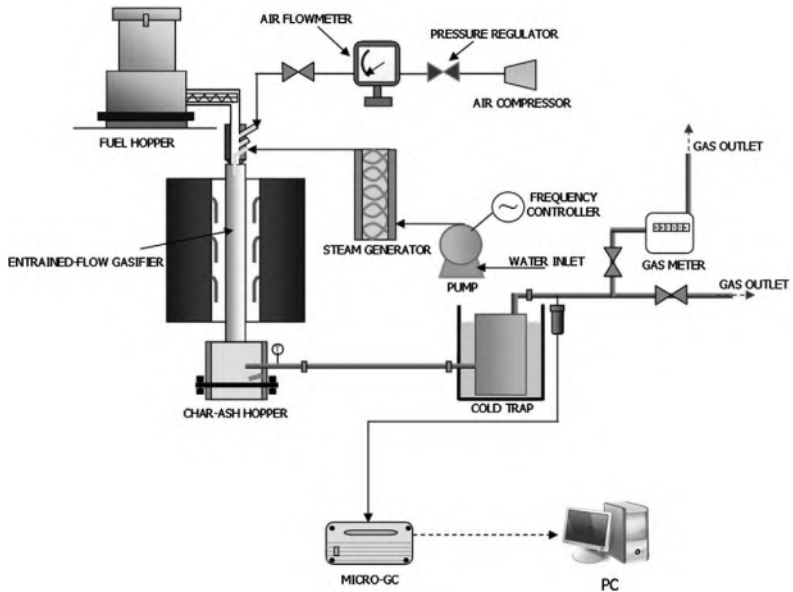


Gambar 2.10 Grafik pengaruh tingkat suhu reaktor terhadap produksi gas [13]

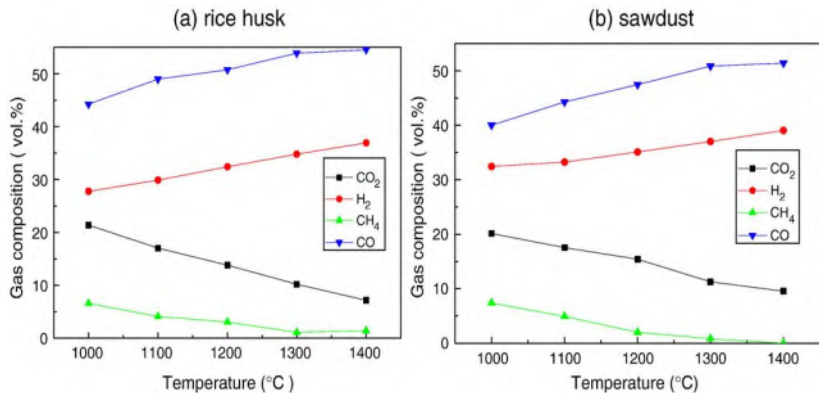
Secara kuantitatif, karakterisasi biomassa limbah kayu menghasilkan nilai kalor bawah sebesar 14,45 MJ/kg. Perhitungan efisiensi gasifikasi pada kondisi terbaik bisa mencapai 34,20%, dengan komposisi *syngas* sebagai berikut: $H_2 = 14,20\%$, $CO_2 = 8,32\%$, $CO = 10,42\%$, $CH_4 = 1,54\%$, dan $C_2H_6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

3. Penelitian yang dilakukan oleh Hernandez, dkk [14]

Penelitian yang dilakukan oleh Hernandez, dkk menggunakan bahan bakar sekam padi dan serbuk kayu dengan mengamati pengaruh penambahan *steam* pada reaktor gasifikasi *downdraft* melalui saluran masuk udara.



Gambar 2.11 Skema pengujian gasifikasi penelitian Hernandez, dkk [14]



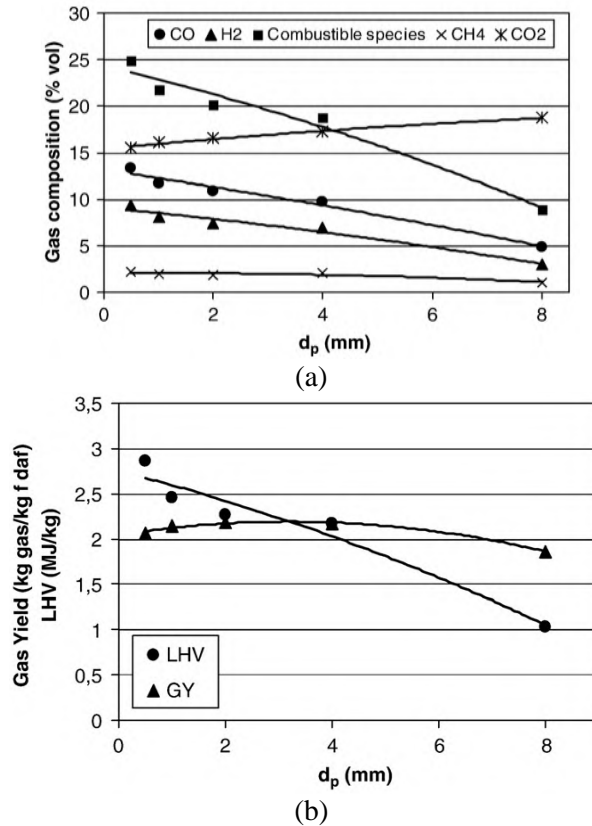
Gambar 2.12 Pengaruh temperature tinggi terhadap gas produksi pada bahan bakar biomasa (a) sekam padi, (b) serbuk kayu [14]

Dari grafik tersebut menjelaskan bahwa semakin tinggi temperatur reaksi dalam reactor menyebabkan produksi gas CO dan H₂ yang dihasilkan dari pembakaran biomassa sekam padi dan serbuk kayu meningkat sementara pada produksi gas CO₂ dan CH₄ menurun. Hal tersebut menunjukkan bahwa karakter *syngas* yang dihasilkan cukup bagus.

Pada penggunaan *gasifying agent* udara mengandung gas N₂ jauh lebih sedikit yaitu rata-rata $6,36 \times 10^{-2} : 3,4 \times 10^{-2}$ daripada penggunaan *gasifying agent* saja karena pengaruh komposisi kandungan gas pembakaran awal. Kandungan gas N₂ sekitar 78% *weight* pada udara pembakaran. Jadi, dalam penelitian tugas akhir yang dilakukan akan mengandung gas yang meningkat pada *syngas* hasil ceratan dikarenakan gas yang dicerat sebagai campuran *gasifying agent* merupakan *syngas*.

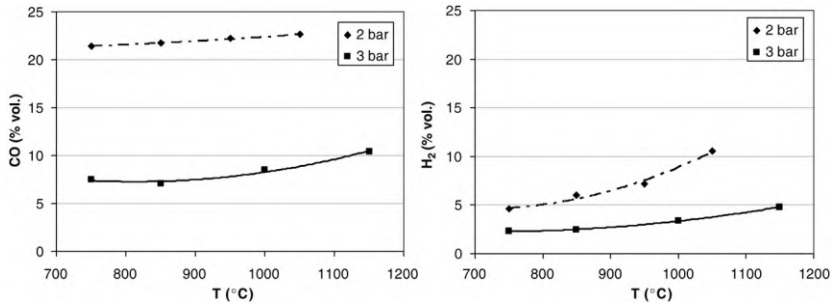
4. Penelitian yang dilakukan oleh Hernandez, dkk [15]

Hernandes melakukan penelitian guna mengetahui pengaruh ukuran partikel umpan biomassa (sekam padi dan batu bara) dan peningkatan suhu pada gasifikasi *fixed bed*. Dalam penelitian tersebut menghasilkan kesimpulan dengan menggunakan diameter umpan biomassa semakin kecil dari 8 mm sampai 0.5 mm dapat meningkatkan produksi gas CO dan H₂ masing-masing sekitar 8% volume serta menurunkan produksi gas CO₂ sekitar 5% seperti pada grafik 2.11 (a). Hal tersebut serupa terjadi pada gas produksi dan LHV dari *syngas* yang juga meningkat masing-masing sekitar $2 \text{ kg}_{\text{gas}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$ dan 0.1 MJ/kg dengan menggunakan diameter partikel umpan biomassa gasifikasi yang kecil seperti dapat terlihat pada grafik 2.11 (b).



Gambar 2.13 Pengaruh diameter partikel terhadap (a) Gas composition, (b) Gas yield dan LHV [15]

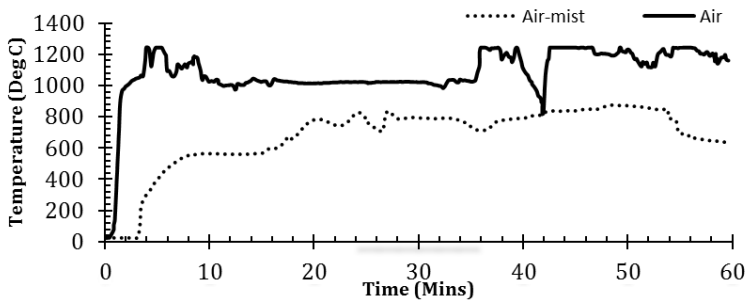
Sedangkan pengaruh suhu pada produksi gas juga cukup signifikan terjadi. Dari grafik yang ditunjukkan pada gambar 2.12 dibawah, terjadi peningkatan produksi gas CO dan H₂ sebesar 10% volume dan 3 % volume seiring dengan peningkatan suhu reaksi dari 750 – 1150 °C pada reaktor.



Gambar 2.14 Pengaruh temperatur reaktor terhadap produksi gas CO dan H₂ [15]

5. Penelitian yang dilakukan oleh Brar, dkk.[19]

Dari penelitian yang dilakukan oleh Brar, dkk dengan judul “Co gasification of coal and hardwood pellets : A case study” menunjukkan bahwa dengan penggunaan udara dan kabut gasifikasi dapat menurunkan temperature kerja gasifikasi. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar dibawah :



Gambar 2.15 Grafik temperature gasifikasi terhadap waktu pada penggunaan gasifying agent udara dan kabut gasifikasi

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

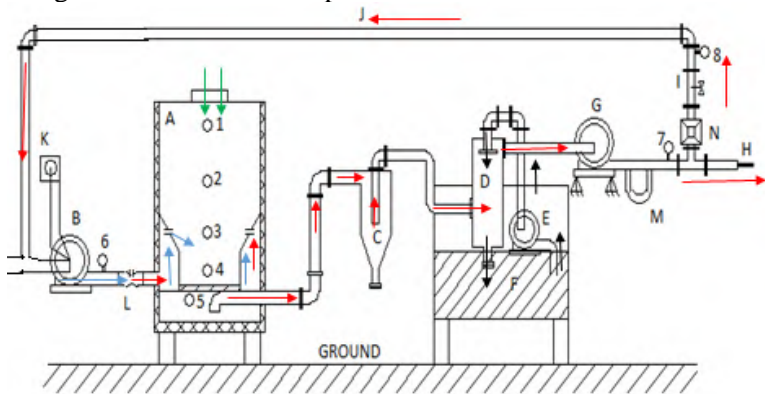
3.1. Metode Penelitian

Pengujian dilakukan pada reaktor *downdraft* dengan saluran masuk penambahan *syngas* ke dalam reaktor. Pengujian ini dilakukan di Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS Surabaya. *True experimental method* pada penelitian ini dibagi atas 2 (dua) kelompok, yaitu:

1. Kelompok kontrol adalah massa aliran *syngas* menuju reaktor dan massa aliran udara sebagai *gasifying agent*.
2. Kelompok uji adalah *syngas* hasil pembakaran dengan variasi *bypass syngas* menuju reaktor.

3.2 Skema Percobaan

Percobaan ini dilakukan untuk mendapatkan kualitas gas *yields* terbaik, agar bahan bakar yang dihasilkan dapat digunakan sebagai bahan bakar motor pembakaran dalam secara maksimal.



Gambar 3.1 Skema pengujian reaktor dengan sistem ceratan *syngas*

Keterangan panah :

Hijau : Alur proses briket MSW

Merah : Alur proses *syngas*

Biru : Alur proses udara

Hitam : Alur proses air

Tabel 3.1 Keterangan gambar

Thermocouple/Mass flowrate		Alat Uji	
No	Keterangan	No	Keterangan
1	$T_{Zona\ Drying}$	A	Reaktor
2	$T_{Zona\ Pyrolysis}$	B	<i>Blower</i> udara
3	$T_{Zona\ Combustion}$	C	<i>Cyclone</i>
4	$T_{Zona\ Gasification}$	D	<i>Water scrubber</i>
5	$T_{Syngas\ 1}$	E	Pompa air
6	\dot{m}_{udara} T_{udara}	F	Bak air
7	\dot{m}_{syngas} $T_{Syngas\ 2}$	G	<i>Blower syngas</i>
8	$\dot{m}_{ceratan\ syngas}$	H	<i>Burner (Visualitator)</i>
		I	<i>Katup ceratan syngas</i>
		J	Pipa alir ceratan <i>syngas</i>
		K	<i>Dimmer</i>
		L	<i>Mixer ceratan dan udara</i>
		M	H ₂ O dan Tar trap
		N	Filter

3.3 Alat Uji

3.3.1 Peralatan Uji

1. Reaktor Gasifikasi

Reaktor tersusun dari satu reaktor gasifikasi downdraft dengan pemasukan biomassa secara sistem batch serta dilengkapi dengan pipa saluran gas tempat pengeluaran gas hasil proses gasifikasi untuk pengujian kandungan gas dan pemanfaatan lainnya. Reaktor dibuat dari batu tahan api yang diisolasi dengan lapisan semen dan diselubungi oleh besi yang di-roll hingga berbentuk tabung untuk menjaga temperatur dan agar *heat losses* yang terjadi tidak terlalu besar. Reaktor mempunyai dimensi keseluruhan dengan tinggi 1,5 m dan diameter dalam 0,35 m. Kontrol terhadap temperatur yang terjadi pada tiap tahapan proses gasifikasi dilakukan dengan pemasangan 5 termokopel yang didistribusi merata sepanjang ketinggian reaktor.

Pada bagian atas terdapat lubang sebagai tempat pemasukan awal sampah. Di bagian tengah reaktor dibuat cekungan (*throat*) agar dengan penampang yang kecil kenaikan temperatur lebih cepat tercapai. Di sekitar *throat* juga terdapat susunan tube sebagai media masuknya udara. Di bawah bagian *throat* terdapat *grate* tempat meletakkan arang.



Gambar 3.2 Reaktor gasifikasi *downdraft*

2. *Blower Udara (Induced Fan)*

Induced fan digunakan untuk menghisap udara sebagai media gasifikasi. Pada penelitian, dilakukan variasi rasio udara-bahan bakar dengan pengaturan arus melalui sebuah dimmer sehingga besar hisapan udara dapat sesuai dengan yang diharapkan.

- *Power* : 0,025 Watt
- *Pressure* : 95 Pa



Gambar 3.3 *Induced fan*

3. *Blower Syngas*

Pada *gasifier* terdapat *throat* tempat masuknya udara. Udara yang dimasukkan memiliki kecepatan tertentu untuk memaksimalkan proses oksidasi di dalam *gasifier*. Udara berkecepatan tersebut diperoleh melalui *blower* tekan seperti pada gambar berikut:

- Diameter : 2"
- \dot{m}_{syngas} : 0,352 kg/s



Gambar 3.4 *Blower syngas*

4. Pompa Air

Pompa air berfungsi untuk mengalirkan air dari bak penampungan menuju *water scrubber* dimana air disini digunakan untuk mendinginkan gas dan membersihkan gas dari kotoran atau partikel ringan yang dibawa gas sehingga akan dihasilkan gas yang bersih pada *burner*. Daya pompa adalah 0,125 kw. Berikut gambar pompa air dibawah ini :



Gambar 3.5 Pompa Air

5. *Cyclone*

Yaitu suatu alat yang berfungsi sebagai alat pemisah partikel dengan gas yang menggunakan prinsip gaya sentrifugal dan tekanan rendah karena adanya perputaran. Pada pengujian ini, *cyclone* digunakan untuk memisahkan gas hasil gasifikasi dengan kandungan lainnya seperti tar, char, ash .



Gambar 3.6 *Cyclone*

6. *Dimmer*

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



Gambar 3.7 *Dimmer*

7. *Water Scrubber*

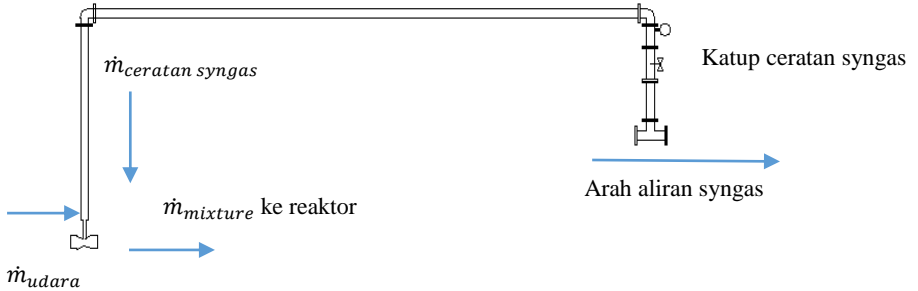
Fungsi *water scrubber* adalah mendinginkan gas dan mengeluarkan partikel abu. Sebelum mencapai dasar dari *scrubber*, gas didinginkan dengan cara melewatkan pada suatu pancaran air atau gelembung air sebelum melewati *water seal*, seal tersebut juga berfungsi sebagai peralatan pengaman tambahan untuk mencegah terjadinya kebocoran gas. *Scrubber* pada penelitian ini digunakan untuk menangkap polutan yang ada pada gas dan mendinginkannya sebelum dimanfaatkan sebagai bahan bakar. Berikut gambar *water scrubber* di bawah ini :



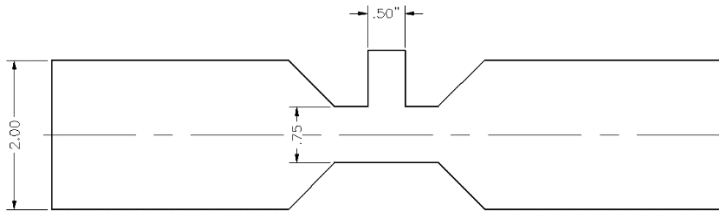
Gambar 3.8 *Water Scrubber*

8. *Pipa aliran ceratan syngas*

Pipa aliran ceratan yang digunakan adalah pipa khusus *steam*, mengingat temperatur *syngas* dari keluaran reaktor cukup tinggi. Mekanisme ceratan dilengkapi dengan katup dan *mass flowmeter* untuk mengatur serta mengetahui besarnya massa aliran *syngas* yang dicerat. Alur pipa ceratan terhubung pada *mixer* yang telah terhubung pada pipa aliran masuk udara pembakaran.



Gambar 3.9 Mekanisme sistem ceratan



Gambar 3.10 Mixer ceratan syngas dan udara pada *gasifying agent* inlet

3.3.2 Alat Ukur

Adapun alat ukur yang digunakan dalam pengambilan data percobaan adalah sebagai berikut :

1. Termokopel

Untuk mendapatkan perhitungan rugi-rugi panas yang terjadi pada sistem gasifikasi, maka perlu diketahui temperatur antara sebelum dan setelah proses. Untuk pengukuran temperatur dinding reaktor dan pipa digunakan *Fluke Infrared Thermometer*. Spesifikasi dari termometer adalah sebagai berikut:

- **Buatan** : Fluke, Inc.
- **Range** : $-40^{\circ}\text{C} - 500^{\circ}\text{C}$ / $-40^{\circ}\text{F} - 932^{\circ}\text{F}$
- **Akurasi** : diatas 0°C (32°F) $\pm 2^{\circ}\text{C} \rightarrow (\pm 4^{\circ}\text{F})$
dibawah 0°C (32°F) $\pm 5^{\circ}\text{C} \rightarrow (\pm 9^{\circ}\text{F})$
- **Response Time** : $\leq 0,8$ sec

- Optical resolution : 8:1



(a)



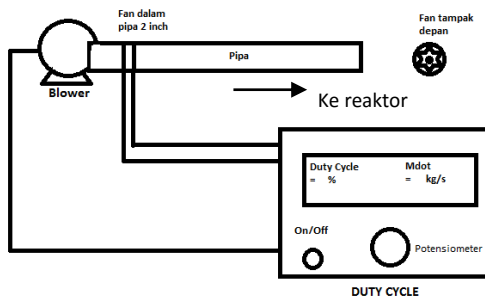
(b)

Gambar 3.11 (a) Termometer inframerah (b) Termokopel stik

Pengukuran temperatur reaksi dalam reaktor gasifikasi menggunakan termokopel stik tipe K. *Range* kemampuan termokopel tersebut dari 0 – 1300 °C.

2. Mass flowmeter

Alat ini dipergunakan untuk mengukur kecepatan *syngas* hasil produksi reaktor, ceratan *syngas*, dan udara masuk yang disuplai ke reaktor. *Mass flowmeter* diletakkan pada keluaran *syngas* dari reaktor setelah *induced fan*, pada pipa aliran menuju reaktor setelah katup ceratan dan bagian setelah *mixer gasifying agent*.



Gambar 3.12 Skematik *mass flowmeter* dengan *duty cycle*

Spesifikasi alat :

Kapasitas tekanan	: 100 kPa
Channel	: 8 unit
Mikroprosesor	: Arduino Uno
Sensor	: MPX 5100DP
D_{Tube}	: 0.03937” (Fix)
D_{Pipe}	: 3”
Autosave	: Ada

Pada penelitian tugas akhir gasifikasi, *mass flowmeter* memiliki 8 *channel* titik pengukuran. Alat ukur menggunakan mikro-prosesor Arduino uno dan sensor putaran menggunakan fan yang bisa dipasang didalam pipa atau udara sekitar.

Prinsip kerja Arduino adalah mengonversi resistansi ke voltase untuk dimasukkan ke dalam persamaan dari data *sheet* sensor menjadi kecepatan dan laju alir massa serta menampilkan hasilnya ke dalam *display*. Display yang dimaksud adalah layar laptop ataupun LCD. Sementara fan dengan memanfaatkan tekanan yang dikonversi menjadi voltase out. Fan terhubung dengan resistor sehingga menyebabkan terjadinya perubahan nilai voltase out yang ditransmisikan menuju Arduino.

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2$$

Dengan :

- P_2 = Tekanan stagnasi (pada titik 2) (Pa)
- P_1 = Tekanan statis (pada titik 1) (Pa)
- ρ = Massa jenis (kg/m^3)
- V_1 = Kecepatan di titik 1, (m/s), kecepatan pada P statis = 0 (m/s)
- V_2 = Kecepatan di titik 2, (m/s),

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

$$\frac{V_2^2}{2} = \frac{P_1 - P_2}{\rho} = \frac{\Delta P}{\rho}$$

Untuk mencari kecepatan udara dari persamaan diatas menjadi:

$$V_{max} = \sqrt{\frac{2 \times \Delta P}{\rho}}$$

Dengan:

ΔP = perbedaan tekanan (kPa)

Perbedaan tekanan didapatkan dari data sheet sensor dengan persamaan:

$$V_{out} = V_s \cdot (0,009P + 0,04) \text{ atau } \Delta P = \frac{V_{out}-0,02}{0,045}$$

V_{out} = voltase out yang diterima sensor (volt)

V_s = voltase maksimal yang ditransmisikan sensor (5 volt)



Gambar 3.13 *Mass flowmeter*

Kecepatan yang diukur menggunakan pitot tube merupakan kecepatan maksimum fluida melewati pipa. Untuk mengetahui

kecepatan rata-rata fluida dalam pipa dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$\tilde{v} = f_k \times V_{max}$$

Dengan:

\tilde{v} = kecepatan rata-rata (m/s)

V = kecepatan maksimum fluida (m/s)

f_k = faktor koreksi (0,86)

Dari kecepatan rata-rata pada aliran pipa, dapat diketahui laju alir massa fluida dengan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{m} = \rho \times \tilde{v} \times A$$

Dengan :

\dot{m} = laju alir massa fluida (kg/s)

ρ = massa jenis fluida (kg/m³)

\tilde{v} = kecepatan rata-rata (m/s)

A = luas penampang pipa (m²)

Massa jenis dari udara adalah 1,2 (kg/m³), sedangkan pada syngas sebesar 0,95 (kg/m³) [19]. Luas penampang pipa aliran adalah 2 inch.

3. Bejana ukur

Alat ini digunakan untuk mengetahui *mass flowrate* syngas hasil gasifier dengan spesifikasi alat tersebut :

Kapasitas: 500 ml

Berat : 0,01 kg



Gambar 3.14 Bejana Ukur

3.3.3 Bahan Eksperimental

Bahan bakar yang digunakan dalam eksperimen gasifikasi dengan penambahan sistem ceratan adalah briket MSW. Briket MSW berasal dari pencampuran sampah organik dan non organik yang dilakukan secara acak dengan komposisi tertentu.

3.4 Prosedur Pengujian

Tahapan-tahapan pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut :

3.4.1 Persiapan Pengujian

Langkah awal yang dilakukan untuk pengujian adalah tahap persiapan. Berikut tahapan-tahapan persiapan :

1. Persiapkan seluruh alat yang akan digunakan seperti *burner*, *blower*, *bypass valve*, dan alat ukur.
2. Pastikan semua alat yang akan digunakan dalam kondisi baik dan berfungsi normal.
3. Peralatan disusun sesuai dengan gambar skema alat pengujian.
4. Pastikan alat tersusun dengan baik dan siap untuk melakukan pengujian.

3.4.2 Langkah Pengambilan Data

Pada tahap pengambilan data dengan memvariasikan laju alir massa *syngas* langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

1. Umpan biomassa briket MSW dimasukkan ke dalam reaktor sejumlah 1kg melalui hopper di bagian atas lalu dibakar sebagai pembakaran awal.
2. Biomassa mulai dibakar, masukkan sisanya hingga 5,5 kg.
3. *Hopper* reaktor ditutup.
4. Katup ceratan ditutup
5. \dot{m}_{udara} diatur tetap sebesar 0,000092 kg/s dengan blower tekan.
6. *Syngas* yang keluar melalui *burner* dibakar untuk mengetahui kualitasnya.

7. Jika syngas sudah dapat terbakar, segera catat \dot{m}_{syngas} pada titik 7 sebagai acuan dari \dot{m}_{syngas} yang diceratan
8. Catat temperature pada titik 1-5 dan \dot{m} pada titik 6-8 sebagai data mekanisme tanpa ceratan.
9. Tunggu 5 menit.
10. \dot{m}_{syngas} divariasikan sebesar 10% untuk ceratan dari \dot{m}_{syngas} total dengan mengatur bukaan *valve* pada saluran ceratan.
11. Tunggu 5 menit.
12. Catat temperature pada titik 1-7 dan \dot{m} pada titik 6-8.
13. *Syngas* ditangkap menggunakan *bagtrap* untuk dilakukan pengujian secara *ultimate*.
14. Percobaan 10-13 diulangi dengan variasi ceratan lanjutan \dot{m}_{syngas} .
15. Setelah pengambilan data selesai, *dimmer* diposisikan kembali pada posisi 0 untuk mematikan blower.

3.4.3 Langkah Pengujian

Pengujian dilakukan secara kromatografi atau uji lab untuk mengetahui kandungan yang terdapat pada *syngas*. Kandungan yang diuji adalah gas H₂, CO, CO₂, CH₄, O₂, dan N₂ di LPPM ITS.

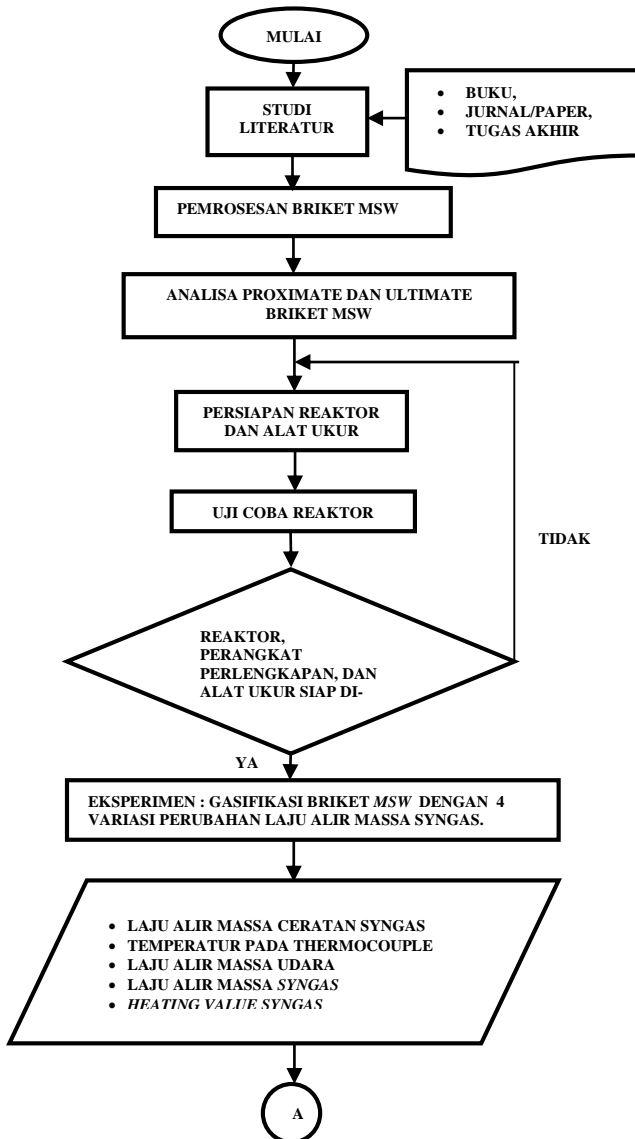
3.5 Rancangan Eksperimen

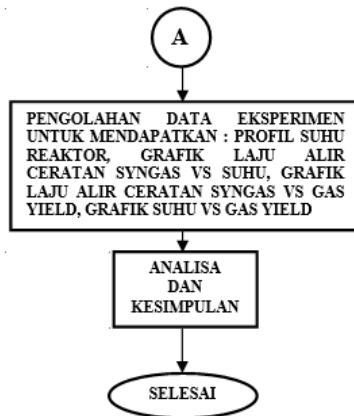
Dalam perancangan eksperimen ini ada beberapa parameter yang ingin didapatkan dalam percobaan ini dengan menetapkan parameter input dan parameter output yang dinyatakan dalam tabel 3.2 yaitu :

Tabel 3.2 Parameter Eksperimen

Parameter input	Parameter output	
	Pengukuran	Perhitungan
1. Dimensi reaktor : D : 650 mm T : 1250 mm 2. Bahan bakar biomassa briket MSW : 5kg/jam 3. $\dot{m}_{gasifying\ agent}$ 1. \dot{m}_{udara} 2. $\dot{m}_{ceratan\ syngas}$ 4. \dot{m}_{syngas}	1. \dot{m}_{syngas} 2. $\dot{m}_{ceratan\ syngas}$ 3. \dot{m}_{udara} 4. Temperatur reaktor: 1. Zona <i>drying</i> 2. Zona <i>pyrolysis</i> 3. Zona <i>Combustion</i> 4. Zona <i>Gasification</i> 5. <i>Syngas</i> 5. Temperatur <i>gasifying agent</i> 1. Temperatur udara 2. Temperatur <i>ceratan syngas</i>	1. Efisiensi reaktor 2. LHV 3. Mol <i>weight gas</i> (H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , N ₂ , O ₂)

3.6 Flowchart Penelitian





Gambar 3.15 Flowchart penelitian

3.7 Jadwal Penelitian

Tabel 3.3 Jadwal kegiatan Tugas Akhir

Kegiatan	Bulan I				Bulan II				Bulan III			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi literatur												
Persiapan briket MSW												
Persiapan reaktor gasifikasi												
Eksperimen												
Pengolahan data												
Proses analisa dan pengambilan kesimpulan												
Sidang Proposal												
Sidang TA												

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN DATA

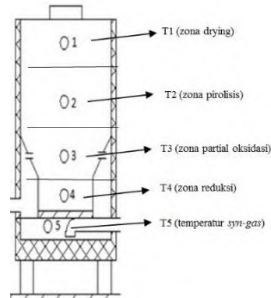
Performa dari suatu gasifier dalam menghasilkan gas yang mudah terbakar (*combustible*) dapat di tinjau dari beberapa parameter antara lain distribusi temperatur di dalam reaktor yang merupakan indikator dari 4 zona tahapan yang terjadi pada proses gasifikasi, komposisi gas yang dihasilkan, ukuran biomassa, dan efisiensi yang dimiliki oleh gasifier tersebut. Parameter inilah, nantinya pasti memiliki nilai yang berbeda untuk tiap variasi rasio udara-bahan bakar (*Air Fuel Ratio*) dan ukuran biomassa Briket MSW, sehingga perbedaan itulah yang akan dianalisa.

4.1 Analisa Propertis Briket Municipal Solid Waste

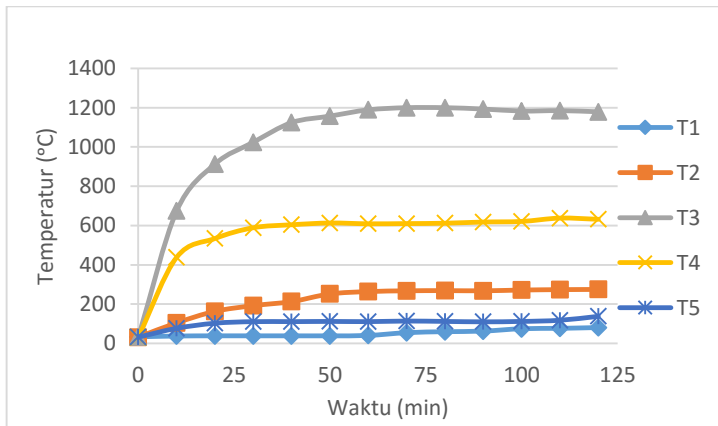
Biomassa yang digunakan telah dilakukan pengujian nilai kalornya yang dilakukan di laboratorium pusat studi energi dan rekayasa ITS, dengan nilai LHV sebesar 4698 kJ/kg. Biomassa briket MSW yang digunakan dalam pengujian memiliki kandungan *moisture content* sebesar 20% - 25%. Komposisi yang digunakan 60% organik dan 40% anorganik.

4.2 Kondisi Pengoperasian Reaktor Zona Gasifikasi

4.2.1 Distribusi Temperatur Reaktor Fungsi Waktu ($\lambda = 0,18$), tanpa Ceratan Syn-gas



Gambar 4.1 Zona Distribusi Temperatur Reaktor Gasifikasi



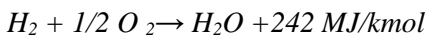
Gambar 4.2 Grafik distribusi Temperatur pada $\lambda = 0,18$ tanpa in ceratan syn-gas fungsi waktu

Pada Gambar 4.2 diatas, termokopel 1 (T_1) memiliki temperatur konstan kisaran 72°C , mengindikasikan bahwa termokopel 1 masih merupakan permulaan zona *drying*, dimana kandungan moisture yang dimiliki briket MSW dihilangkan melalui proses penguapan atau *evaporasi*.

Untuk termokopel 2 (T_2) memiliki temperatur kisaran sampai 255°C mengindikasikan bahwa, T_2 ini akan masuk zona *pirolisis* sesuai dengan dasar teori pada bab 2 bahwa, zona pirolisis memasuki temperatur 300°C - 900°C , dimana biomassa kering yang bebas dari *moisture*, mengalami pemanasan terus-menerus yang, diharapkan mampu menghilangkan kandungan *volatile* biomassa. Biomassa yang mengalami pemanasan pada temperatur tinggi akan menyebabkan biomassa terpecah menjadi arang (C), tar, minyak, gas dan produk pirolisa lain. Produk *pirolisis* umumnya terdiri dari tiga jenis, yaitu gas ringan (H_2 , CO , CO_2 , H_2O , dan CH_4), tar, dan arang. Secara umum reaksi yang terjadi pada *pirolisis* beserta produknya adalah:



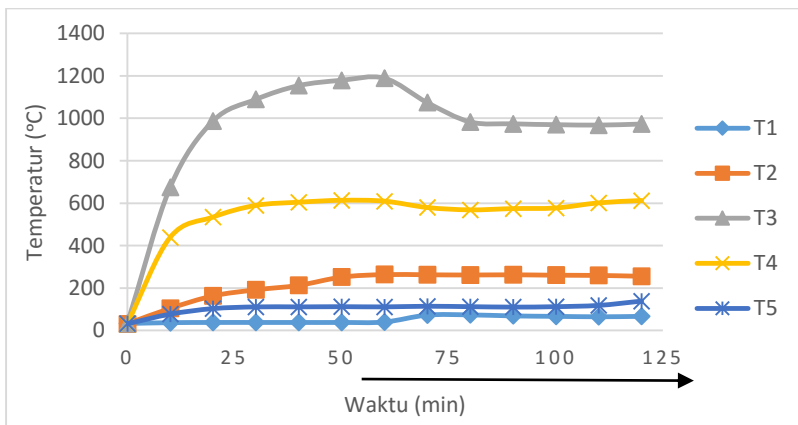
Sedangkan termokopel 3 (T_3) memiliki temperatur paling tinggi dengan kisaran sampai 1163°C sampai 1200°C , mengindikasikan bahwa T_3 telah masuk zona *oksidasi parsial* sesuai dengan dasar teori pada bab 2 bahwa, zona *oksidasi parsial* akan memasuki temperatur $>900^\circ\text{C}$, dimana proses ini menghasilkan panas (*reaksi eksoterm*) yang memanaskan lapisan karbon dibawah. Proses tersebut dipengaruhi distribusi oksigen karena adanya oksigen inilah, terjadi reaksi eksoterm yang menghasilkan panas, yang dibutuhkan dalam keseluruhan proses gasifikasi ini. Sekitar 20% arang bersama *volatile* akan mengalami oksidasi menjadi CO_2 dan H_2O dengan memanfaatkan oksigen terbatas yang disuplai ke dalam reaktor (hanya 20% dari keseluruhan udara yang digunakan dalam pembakaran dalam reaktor). Reaksi kimia yang terjadi pada zona ini adalah sebagai berikut :



Pada termokopel 4 (T_4) ini, masuk temperatur konstan kisaran sampai 620°C , mengindikasikan bahwa T_4 masuk zona *reduksi* sesuai dengan dasar teori pada bab 2 bahwa, zona reduksi memasuki temperatur 400°C - 900°C , dimana proses ini menyerap atau membutuhkan panas (*reaksi endoterm*). Pada proses ini terjadi beberapa reaksi kimia seperti (*Water-Gas Reactio*, *Boudouard Reaction*, *Shift conversion*, *Methanation*), dimana terbentuknya, senyawa-senyawa yang berguna untuk menghasilkan *flammable gas*, seperti H_2 dan CO . Sisa 80% dari arang turun ke bawah membentuk lapisan pada daerah reduksi, dimana di bagian ini hampir seluruh karbon akan digunakan dan abu yang terbentuk akan menuju tempat penampungan abu.

Sebaliknya termokopel 5 (T_5) nilai temperaturnya sampai 117°C menunjukkan sebagai indikator temperatur gas hasil gasifikasi yaitu *synthetic-gas* (*syn-gas*).

4.2.2 Distribusi Temperatur Reaktor Fungsi Waktu ($\lambda = 0,16$), dengan laju alir massa Ceratan Syn-gas = $0,00009 \text{ kg/s}$



Gambar 4.3 Distribusi temperature pada $\lambda = 0,16$ dengan laju alir massa ceratan syn-gas $0,00009 \text{ kg/s}$

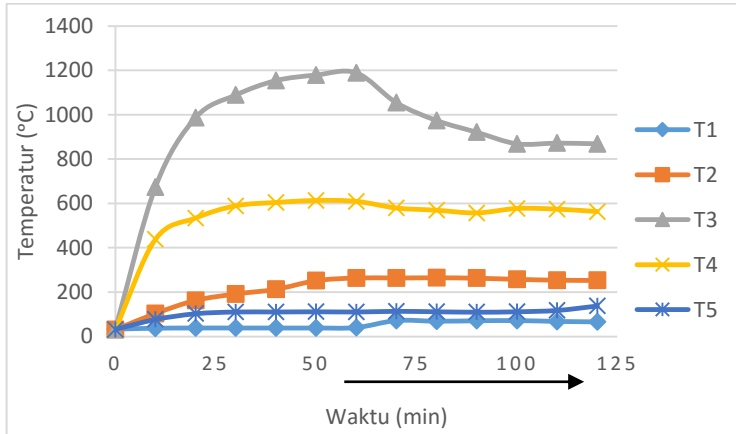
Pada gambar 4.3 diatas, panah menunjukkan fenomena distribusi temperatur reaktor gasifikasi setelah pemasukan ceratan syn-gas sebesar 0,00009 kg/s. Pada termokopel 1 (T_1) memiliki rentang temperatur yang sama dengan variasi *Equivalence Ratio* (λ) sebelumnya yakni $\lambda = 0,18$ sampai 70°C , mengindikasikan bahwa termokopel 1 merupakan permulaan zona *drying*, dimana kandungan moisture yang dimiliki briket MSW dihilangkan melalui proses penguapan atau *evaporasi*. Untuk termokopel 2 (T_2) memiliki rentang temperatur yang hampir sama dengan variasi tanpa ceratan syn-gas sebelumnya sampai dengan temperatur 250°C mengindikasikan bahwa, T_2 ini akan masuk zona *pirolisis* sesuai dengan dasar teori pada bab 2 bahwa, zona *pirolisis* memasuki temperatur 300°C - 900°C , dimana biomassa yang mengalami pemanasan terus-menerus, diharapkan mampu menghilangkan kandungan *volatile* biomassa.

Sedangkan pada termokopel 3 (T_3), fenomena distribusi temperatur yang terjadi adalah menurun perlahan hingga konstan pada kisaran 1014°C daripada distribusi pada variasi awal tanpa penambahan ceratan syn-gas. Hal tersebut dikarenakan ceratan syngas yang masuk menambah jumlah bahan bakar atau biomassa, sehingga rasio udara pembakaran (AFR) menurun. Dimana hal tersebut sesuai dengan teori bahwa semakin rendah nilai AFR maka semakin lambat pula proses terjadinya pembakaran di dalam reaktor.

Pada termokopel 4 (T_4) ini, masuk temperatur konstan kisaran sampai 605°C , dimana nilai tersebut menurun dari variasi awal tanpa ceratan syn-gas. Temperatur tersebut mengindikasikan bahwa T_4 berada pada zona reduksi, dimana biomassa mengalami reaksi kimia dalam pembentukan flammable gas.

Demikian pula pada termokopel 5 (T_5) menunjukkan terjadinya penurunan temperatur dari variasi sebelumnya tanpa ceratan pada kisaran sampai 112°C .

4.2.3 Distribusi Temperatur Reaktor Fungsi Waktu ($\lambda = 0,14$), dengan laju alir massa Ceratan Syn-gas = 0,00019 kg/s



Gambar 4.4 Distribusi temperature pada $\lambda = 0,14$ dengan laju alir massa ceratan syn-gas 0,00019 kg/s

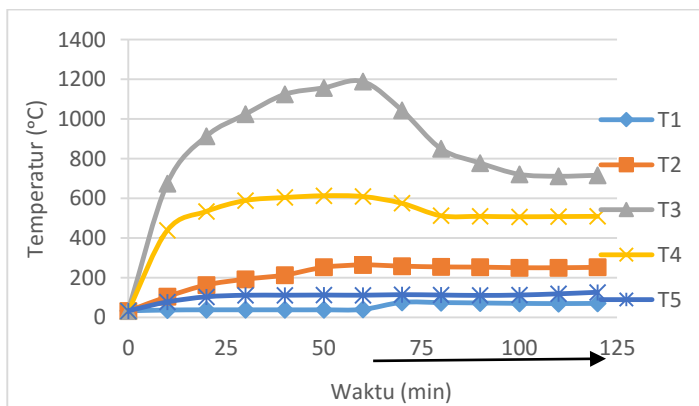
Pada gambar 4.4 diatas, panah menunjukkan fenomena distribusi temperatur reaktor gasifikasi setelah pemasukan ceratan syn-gas sebesar 0,00019 kg/s. Pada termokopel 1 (T_1) memiliki rentang temperatur yang sama dengan variasi *Equivalence Ratio* (λ) sebelumnya yakni $\lambda = 0,18$, mengindikasikan bahwa termokopel 1 merupakan permulaan zona *drying*, dimana kandungan moisture yang dimiliki briket MSW dihilangkan melalui proses penguapan atau *evaporasi*. Untuk termokopel 2 (T_2) memiliki rentang temperatur yang hampir sama dengan variasi tanpa ceratan syn-gas sebelumnya sampai dengan temperatur 250°C mengindikasikan bahwa, T_2 ini akan masuk zona *pirolysis* sesuai dengan dasar teori pada bab 2 bahwa, zona *pirolysis* memasuki temperatur 300°C-900°C, dimana biomassa yang mengalami pemanasan terus-menerus, diharapkan mampu menghilangkan kandungan *volatile* biomassa.

Sedangkan pada termokopel 3 (T_3), fenomena distribusi temperatur yang terjadi adalah menurun lebih cepat hingga konstan pada kisaran 930 °C daripada distribusi pada variasi awal tanpa penambahan ceratan syn-gas. Hal tersebut dikarenakan ceratan syngas yang masuk menambah jumlah bahan bakar atau biomassa, sehingga rasio udara pembakaran (AFR) menurun. Dimana hal tersebut sesuai dengan teori bahwa semakin rendah nilai AFR maka semakin lambat pula proses terjadinya pembakaran di dalam reaktor.

Pada termokopel 4 (T_4) ini, masuk temperatur konstan kisaran sampai 585°C, dimana nilai tersebut menurun dari variasi awal tanpa ceratan syn-gas. Temperatur tersebut mengindikasikan bahwa T_4 berada pada zona reduksi, dimana biomassa mengalami reaksi kimia dalam pembentukan flammable gas.

Demikian pula pada termokopel 5 (T_5) menunjukkan terjadinya penurunan temperatur dari variasi sebelumnya tanpa ceratan pada kisaran sampai 112°C..

4.2.4 Distribusi Temperatur Reaktor Fungsi Waktu ($\lambda = 0,09$), dengan laju alir massa Ceratan Syn-gas = 0,00042 kg/s



Gambar 4.5 Distribusi temperature pada $\lambda = 0,09$ dengan laju alir massa ceratan syn-gas 0,00042 kg/s

Pada gambar 4.5 diatas, panah menunjukkan fenomena distribusi temperatur reaktor gasifikasi setelah pemasukan ceratan syn-gas sebesar 0,00042 kg/s. Pada termokopel 1 (T_1) memiliki rentang temperatur yang sama dengan variasi *Equivalence Ratio* (λ) sebelumnya yakni $\lambda = 0,18$, mengindikasikan bahwa termokopel 1 merupakan permulaan zona *drying*, dimana kandungan moisture yang dimiliki briket MSW dihilangkan melalui proses penguapan atau *evaporasi*. Untuk termokopel 2 (T_2) memiliki rentang temperatur yang hampir sama dengan variasi tanpa ceratan syn-gas sebelumnya sampai dengan temperatur 250°C mengindikasikan bahwa, T_2 ini akan masuk zona *pirolisis* sesuai dengan dasar teori pada bab 2 bahwa, zona *pirolisis* memasuki temperatur 300°C-900°C, dimana biomassa yang mengalami pemanasan terus-menerus, diharapkan mampu menghilangkan kandungan *volatile* biomassa.

Sedangkan pada termokopel 3 (T_3), fenomena distribusi temperatur yang terjadi adalah menurun lebih cepat hingga konstan pada kisaran 720 °C daripada distribusi pada variasi awal tanpa penambahan ceratan syn-gas. Hal tersebut dikarenakan ceratan syngas yang masuk menambah jumlah bahan bakar atau biomassa, sehingga rasio udara pembakaran (AFR) menurun. Dimana hal tersebut sesuai dengan teori bahwa semakin rendah nilai AFR maka semakin lambat pula proses terjadinya pembakaran di dalam reaktor.

Pada termokopel 4 (T_4) ini, masuk temperatur konstan kisaran sampai 540°C, dimana nilai tersebut menurun dari variasi awal tanpa ceratan syn-gas. Temperatur tersebut mengindikasikan bahwa T_4 berada pada zona reduksi, dimana biomassa mengalami reaksi kimia dalam pembentukan flammable gas.

Demikian pula pada termokopel 5 (T_5) menunjukkan terjadinya penurunan temperatur dari variasi sebelumnya tanpa ceratan pada kisaran sampai 110°C.

4.3 Analisis Performa Gasifikasi

Dari hasil pengolahan data melalui parameter yang diukur dan dihitung maka didapatkan analisa yang terlibat dalam reaksi. Berikut adalah contoh perhitungan data yang didapatkan pada $\lambda = 0,16$, $AFR_{\text{aktual}} 0,93$, dengan laju alir massa ceratan syn-gas 11% sebesar 0,00009 kg/s dimana memiliki efisiensi gasifikasi tertinggi.

4.3.1 Analisis Kandungan *synthetic-gas*

Pengujian *Synthetic gas* hasil percobaan gasifikasi dilakukan di Laboratorium Pusat Studi Energi dan Rekayasa LPPM ITS di Gedung Robotika menggunakan peralatan *gas chromatography*. Komposisi kandungan gas yang diuji meliputi H_2 , O_2 , N_2 , CO , CO_2 , CH_4 . Berikut adalah tabel 4.1 hasil pengujian komposisi gas yang telah dilakukan :

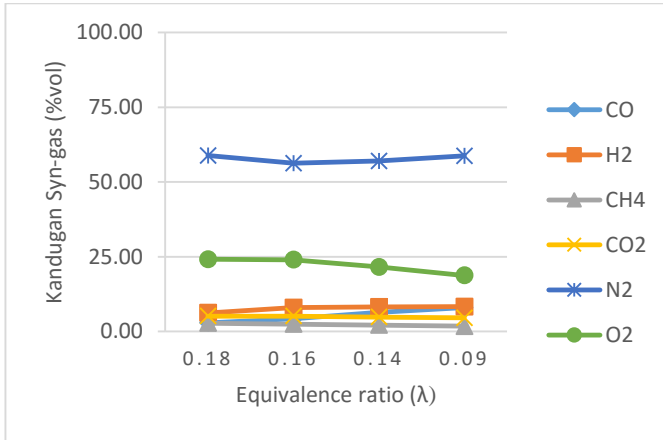
Tabel 4.1 Hasil Uji Komposisi *Synthetic Gas (Syn-gas)*

$\dot{m}_{\text{ceratan}}^{\text{syn-gas}}$ (%)	Air fuel ratio	Komposisi <i>synthetic-gas</i> (% Vol)						
		CO	H_2	CH_4	CO_2	N_2	O_2	TOTAL
0	1.04	2.89	6.20	2.79	5.15	58.85	24.12	100
11	0.93	4.24	7.98	2.45	5.11	56.24	23.98	100
23	0.67	6.34	8.16	2.13	4.79	57.01	21.57	100
55	0.19	7.99	8.27	1.74	4.56	58.70	18.74	100

Sumber : Hasil pengujian di laboratorium studi energi dan rekayasa LPPM ITS

Adanya penyimpangan hasil N_2 cukup besar yaitu $>50\%$ mengindikasikan adanya udara luar, yang bukan hasil proses gasifikasi ikut masuk saat pengambilan sampel gas. Pengambilan sampel gas menggunakan bola udara plastik dan dimasukkan secara manual menggunakan selang. Sampel gas diambil langsung dari sisi keluaran pipa. Hal ini memang masih rawan terkena

campuran udara dari luar, sehingga hasil pengujian komposisi sedikit kurang mewakili komposisi sesungguhnya dari *synthetic gas* produk proses gasifikasi. Berikut ditampilkan gambar 4.6 kandungan *synthetic gas* fungsi dari laju alir massa ceratan *synthetic gas* :



Gambar 4.6 Grafik kandungan *synthetic gas* terhadap *Equivalence ratio*

Pada gambar 4.6 diatas menunjukkan bahwa, konsentrasi kandungan *synthetic gas* pada gas mudah terbakar (*combustible gas*) cenderung mengalami peningkatan dengan meningkatnya prosentase laju alir massa ceratan syn-gas ($\dot{m}_{ceratan\ syn-gas}$) dari 0 % sampai 55 %. Hal tersebut dapat terlihat, pada $\dot{m}_{ceratan\ syn-gas}$ 0% ke 55%, kandungan gas CO meningkat, dari 2,89 % vol ke 7,99 % vol, untuk kandungan gas H₂ meningkat dari 6.20 % vol ke 8,27 % vol. Sedangkan kandungan gas CH₄ terjadi penurunan dari 2,79 % vol ke 1,74 % vol pada $\dot{m}_{ceratan\ syn-gas}$ 0% sampai 55%.

Sebaliknya, pada $\dot{m}_{ceratan\ syn-gas}$ 0% ke 55% untuk kandungan gas CO₂ menurun secara perlahan dari 5.15 % vol ke 4,56

% vol, kandungan gas N_2 menurun secara perlahan dari 58.85 % vol ke 58.70 % vol, serta kandungan gas O_2 menurun dari 24,12 % vol ke 18,74 % vol.

Adanya peningkatan jumlah combustible gas pada komposisi *synthetic* gas dan penurunan kandungan uncombustible gas dikarenakan suplai udara menuju reaktor berkurang setelah penambahan ceratan *synthetic* gas melalui inlet blower udara. Ceratan *synthetic* gas masuk secara perlahan sehingga menggantikan udara yang menyebabkan rasio udara-bahan bakar (AFR) aktual juga ikut menurun. Dengan penurunan nilai AFR aktual mengakibatkan nilai Equivalence Ratio menurun pula. Hal tersebut sesuai teori bahwa semakin tinggi AFR menyebabkan kandungan combustible gas menurun sementara kandungan uncombustible gas meningkat.

4.3.2 Massa Jenis *Synthetic* Gas

Perhitungan massa jenis *synthetic* gas dengan pendekatan prosentase komposisi *synthetic* gas menggunakan (Tabel A.4 *Thermophysical properties of gases at atmospheric pressure*) pada AFR 0,93 dan $\lambda = 0,16$, dengan temperatur rata-rata *synthetic* gas = 313,13 K:

4.24	% CO	dengan	$\rho = 0,92418$	kg/m ³
7.98	% H ₂	dengan	$\rho = 0,066488$	kg/m ³
2.45	% CH ₄	dengan	$\rho = 0,52976$	kg/m ³
5.11	% CO ₂	dengan	$\rho = 1,4558$	kg/m ³
56.24	% N ₂	dengan	$\rho = 0,92421$	kg/m ³
23.98	% O ₂	dengan	$\rho = 1,0561$	kg/m ³

Maka didapatkan massa jenis *synthetic* gas dengan persamaan berikut :

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

$$\rho_{gas} = \sum_{i=1}^n (0,0424 \cdot 0,92418) + (0,0798 \cdot 0,066488) + (0,0245 \cdot 0,52976) + (0,0511 \cdot 1,4558) + (0,5624 \cdot 0,92421) + (0,2398 \cdot 1,0561)$$

$$\rho_{gas} = 1,050 \frac{kg}{m^3}$$

4.3.3 Analisis laju alir massa produksi syn-gas sebelum dicerat

Data laju alir massa syngas sebelum dicerat didapatkan dari flowmeter pada keluaran hasil syn-gas, dimana data diperoleh dari pengukuran sebagai berikut:

- Massa jenis syn-gas temp. 40°C = $1,05 \frac{kg}{m^3}$
- $Q_{syn-gas \text{ sebelum dicerat}} = 0,00083 \frac{m^3}{s}$
- Perhitungan laju alir massa syn-gas sebelum dicerat :

$$\begin{aligned} \dot{m}_{syn-gas \text{ sebelum dicerat}} &= \\ \rho_{syn-gas} \cdot Q_{syn-gas \text{ sebelum dicerat}} &= \\ &= 1,05 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,00083 \frac{m^3}{s} = \\ &0,00087 \frac{kg}{s} \end{aligned}$$

4.3.4 Analisis laju alir massa ceratan Syn-gas

Data laju alir massa ceratan syngas didapatkan dari flowmeter pada keluaran hasil syn-gas setelah mengatur bukaan valve ceratan, dimana data diperoleh dari pengukuran sebagai berikut:

- Massa jenis syn-gas temp. 40°C = $1,05 \frac{kg}{m^3}$

- Laju alir volume ceratan syn-gas ($Q_{ceratan\ syn-gas}$)

$$= 0,00009 \frac{m^3}{s}$$
- Perhitungan laju alir massa syn-gas ($\dot{m}_{ceratan\ syn-gas}$) =

$$\begin{aligned}\dot{m}_{ceratan\ syn-gas} &= \rho_{syn-gas} \cdot Q_{ceratan\ syn-gas} \\ &= 1,05 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,00009 \frac{m^3}{s} \\ &= 0,0000945 \frac{kg}{s}\end{aligned}$$

- Prosentase ceratan syngas :

$$\begin{aligned}\text{Prosentase} &= \frac{\dot{m}_{ceratan\ syn-gas}}{\dot{m}_{syn-gas\ sebelum\ dicerat}} \\ &= \frac{0,0000945 \frac{kg}{s}}{0,00087 \frac{kg}{s}} = 11\%\end{aligned}$$

4.3.5 Analisis laju alir massa udara

Data laju alir massa udara awal sebelum dilakukan penceratan syn-gas didapatkan dari mass flowmeter pada duty cycle 30%, dimana data diperoleh dari pengukuran sebagai berikut:

- Massa jenis udara temp. 32°C (ρ_{udara}) = 1,14476 $\frac{kg}{m^3}$
- Diameter pipa inlet udara = 50,8 mm = 0,0508 m
- (\dot{m}_{udara}) tanpa ceratan = \dot{m}_{out} = 0,00092 $\frac{kg}{s}$

Sehingga laju alir massa udara actual setelah penambahan ceratan melalui inlet blower dapat diketahui dengan kesetimbangan massa sebagai berikut :

- $\dot{m}_{ceratan\ syn-gas}$ = 0,0000945 $\frac{kg}{s}$
- Laju alir massa udara (\dot{m}_{udara}) =

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$$

$$\dot{m}_{udara} + \dot{m}_{ceratan\ syn-gas} = \dot{m}_{out}$$

$$\begin{aligned}\dot{m}_{udara} &= \dot{m}_{out} - \dot{m}_{ceratan\ syn-gas} \\ &= 0,00092 \frac{kg}{s} - 0,0000945 \frac{kg}{s} = 0,00083 \frac{kg}{s}\end{aligned}$$

4.3.6 Analisis laju alir massa Briket MSW

Data yang diperoleh dari pengukuran :

- Massa biomassa Briket MSW : 5 kg
- Waktu operasi gasifikasi : 94 menit
- Perhitungan laju alir massa bahan bakar (massa biomassa Briket MSW) :

$$\dot{m}_{briket\ MSW} = \frac{5\ kg}{94\ menit} \cdot \frac{1\ menit}{60\ second}$$

$$\dot{m}_{briket\ MSW} = 0.00089 \frac{kg}{s}$$

4.3.7 Analisis Rasio Udara Bahan-Bakar Aktual (AFR)

Perhitungan Rasio udara-bahan bakar (*Air Fuel Ratio*) dapat diperoleh dari data perhitungan di atas yaitu :

$$\dot{m}_{udara} = 0,00083 \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_{briket\ MSW} = 0.00089 \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_{ceratan\ syn-gas} = 0,00009 \frac{kg}{s}$$

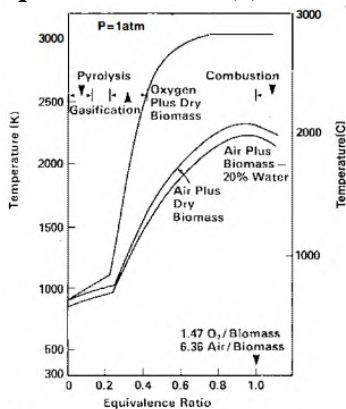
$$(AFR) = \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{briket\ MSW} + \dot{m}_{ceratan\ syn-gas}}$$

$$(AFR) = \frac{0,00083 \frac{kg}{s}}{0,00089 \frac{kg}{s} + 0,00009 \frac{kg}{s}} = 0,93$$

4.3.8 Analisis Rasio Udara-Bahan Bakar Stoikiometri (AFR_s)

Pada studi eksperimental tidak dilakukan pengujian ultimate bahan bakar briket MSW dikarenakan keterbatasan alat ukur dan tempat pengujian, sehingga untuk nilai rasio udara-bahan bakar stoikiometri (AFR_s) mengacu pada buku dan jurnal. Pada buku “*Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine System*” yang ditulis oleh Reed and Dash, menjelaskan bahwa secara teori AFR_s pada pembakaran biomassa dengan udara sebesar **6,36** ekuivalen dengan λ sebesar 1 menggunakan bahan bakar kayu. Sementara regional gasifikasi maksimal terjadi pada AFR 1,5 dengan λ sebesar 0,25. Dikarenakan bahan bakar briket sekitar 60% dari bahan serbuk kayu dan kertas, maka nilai AFR_s mengacu pada nilai tersebut.

4.3.9 Analisis Equivalence Ratio (λ)



Gambar 4.7 Grafik Equivalence ratio terhadap temperature [17]

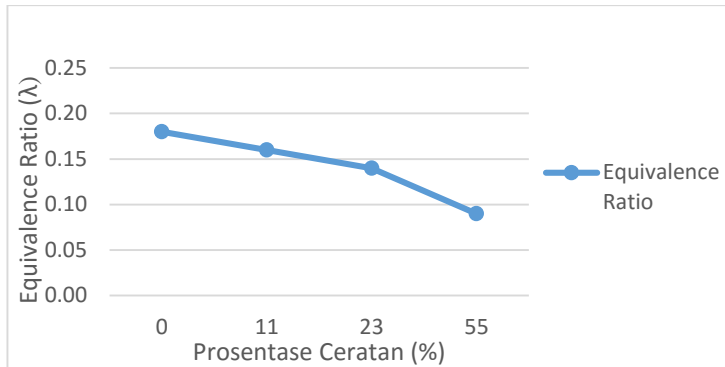
Pada studi eksperimental tidak dilakukan pengujian ultimate bahan bakar briket MSW dikarenakan keterbatasan alat ukur dan tempat pengujian, sehingga untuk nilai rasio udara-bahan bakar stoikiometri (AFR_S) mengacu pada buku dan jurnal. Pada buku "*Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine System*" yang ditulis oleh Reed and Dash, menjelaskan bahwa secara teori AFR_S pada pembakaran biomassa dengan udara sebesar **6,36** ekuivalen dengan λ sebesar 1 menggunakan bahan bakar kayu. Sementara regional gasifikasi maksimal terjadi pada AFR 1,5 dengan λ sebesar 0,25. Dikarenakan bahan bakar briket sekitar 60% dari bahan serbuk kayu dan kertas, maka nilai AFR_S diasumsikan mengacu pada nilai tersebut. Perhitungan equivalence ratio pada AFR 0,93 dengan persamaan ekstrapolasi di bawah ini dengan diketahui:

- $AFR_{aktual} : 0,93$
- $AFR_S : 6,36$
- Maka equivalence ratio pada AFR 0,93 adalah

$$\lambda = \frac{AFR_{aktual}}{AFR_S} = \frac{0,93}{6,36} = 0,16$$

Tabel 4.2 Equivalence ratio berdasarkan AFR aktual

Prosentase Ceratan %	AFR stoik	AFR aktual	ER
0	6.36	1.04	0.18
11	6.36	0.93	0.16
23	6.36	0.77	0.14
55	6.36	0.44	0.09



Gambar 4.8 Grafik Equivalence Ratio (λ) terhadap prosentase ceratan syn-gas

Pada gambar 4.8 menunjukkan nilai λ terhadap prosentase ceratan *synthetic* gas. Nilai λ diketahui sebesar 0,18 tanpa ceratan *synthetic* gas dan menurun hingga 0,09 dengan penambahan ceratan *synthetic* gas sebesar 55% atau 0,00042 kg/s. Secara teori, besar λ maksimal pada proses gasifikasi sebesar 0,25 pada AFR aktual 1,5. Dengan nilai λ dari 0,18 sampai 0,09 pada AFR aktual 1,04 sampai 0,44 menjelaskan bahwa hasil dari eksperimental sudah sesuai dengan teori.

Penurunan nilai λ dikarenakan penurunan pasokan udara bahan bakar setelah disubstitusi oleh ceratan *synthetic* gas, sehingga nilai rasio udara bahan bakar aktual juga menurun. Dengan nilai rasio udara bahan bakar stoikiometri yang konstan mempengaruhi nilai λ semakin menurun sesuai persamaan diatas.

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

Dari prosentase komposisi *Synthetic* gas dapat dilakukan perhitungan *Low heating value* (LHV) pada *synthetic* gas dengan persamaan di bawah yaitu :

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

Keterangan :

Y_i = konsentrasi gas yang terbakar (CO, CH_4, H_2)

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

Nilai LHV_i dapat dilihat pada tabel 4.3 LHV_i dari gas yang terbakar (CO, CH_4, H_2). Berikut perhitungan *Low heating value* syntehtic-gas, untuk variasi $\dot{m}_{ceratan\ syn-gas} = 0,00022 \frac{kg}{s}$ pada (*Air Fuel Ratio* = 1,05) :

- Y_i untuk gas CO = 4,24 % = 0,0424
- Y_i untuk gas H_2 = 7,98 % = 0,0798
- Y_i untuk gas CH_4 = 2,45 % = 0,0245
- LHV_i untuk gas CO = $12696 \frac{kJ}{m^3}$
- LHV_i untuk gas H_2 = $35866 \frac{kJ}{m^3}$
- LHV_i untuk gas CH_4 = $10768 \frac{kJ}{m^3}$

$$LHV_{Syn\ gas} = \sum_{i=1}^n (0,0424 \cdot 12696) + (0,0798 \cdot 35866) + (0,0245 \cdot 10768)$$

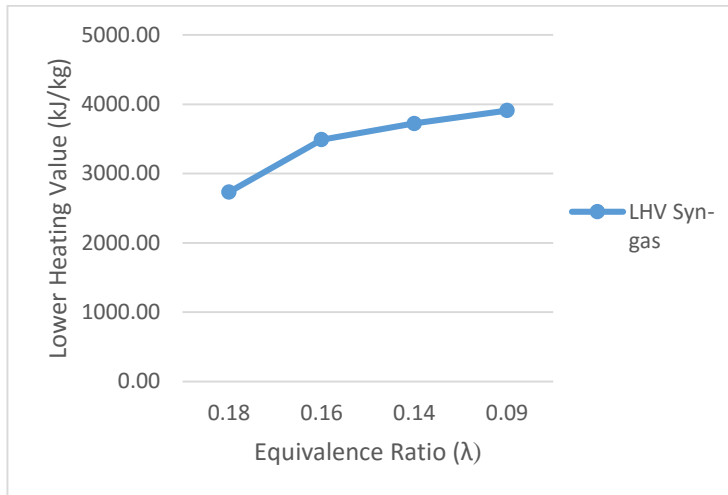
$$LHV_{Syn\ gas} = 3664,23 \frac{kJ}{m^3} = 3489,87 \frac{kJ}{kg}$$

Berikut Tabel 4.3 tentang nilai LHV synthetis-gas:

Tabel 4.3 Nilai LHV synthetis-gas pada Briket MSW dengan variasi prosentase ceratan syn-gas

Prosentase Ceratan Syn-gas (%)	Equivalence Ratio (λ)	Nilai Kalor bawah (LHV) Syngas (kJ/m ³)	Massa jenis ρ Syn-gas (kg/m ³)	Nilai Kalor bawah (LHV) Syngas (kJ/kg)
0	0.18	2891.03	1.06	2733.56
11	0.16	3664.23	1.05	3489.87
23	0.14	3960.95	1.06	3723.29
55	0.09	4167.89	1.07	3912.32

Berikut Gambar 4.9 grafik nilai LHV sintetis gas terhadap equivalence ratio dengan variasi prosentase ceratan syn-gas di bawah :



Gambar 4.9 Nilai LHV *synthetic* gas terhadap Equivalence Ratio (λ)

Pada gambar 4.9 diatas menunjukkan bahwa, *trendline* nilai LHV *synthetic* gas yang meningkat, seiring dengan penurunan nilai equivalence ratio. Terlihat bahwa nilai LHV meningkat dari 2.733,56 kJ/kg pada $\lambda = 0,18$ menjadi 3.912,32 pada $\lambda = 0,09$.

Peningkatan nilai laju alir massa ceratan syn-gas berperan penting pada fenomena tersebut. Hal ini disebabkan oleh penurunan nilai rasio udara-bahan bakar (*AFR*) aktual setelah penambahan ceratan syn-gas akan mensubstitusi suplai laju alir massa udara yang masuk ke dalam reaktor gasifikasi, sehingga mempengaruhi proses reaksi kimia pembentukan kandungan gas terbakar (*combustible gas*). Dimana proses gasifikasi, membutuhkan suplai udara terbatas. Secara teori kandungan gas terbakar (*gas CO, H₂, CH₄*) akan cenderung menurun, jika suplai

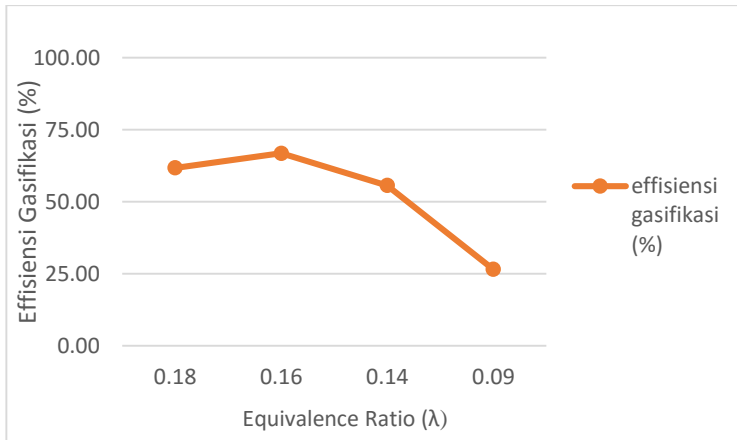
laju alir massa udara meningkat. Sebaliknya (*gas CO₂, N₂, O₂*), meningkat seiring dengan peningkatan suplai laju alir massa udara.

4.3.11 Analisa Efisiensi Gas Dingin

Perhitungan efisiensi gasifikasi atau biasa disebut efisiensi gas dingin dengan menggunakan data pada efisiensi tertinggi 66,81% dengan perolehan data sebagai berikut:

- $\dot{m}_{\text{briket MSW}} = 0.00089 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$
- $\dot{m}_{\text{syn-gas sebelum dicerat}} = 0,00087 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$
- $\dot{m}_{\text{ceratan syn-gas}} = 0,0000945 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$
- $\dot{m}_{\text{syn-gas}} = 0,00078 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$
- $LHV_{\text{Syngas}} = 3489,87 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
- $LHV_{\text{Briket MSW}} = 4698 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
- Perhitungan efisiensi :

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\dot{m}_{\text{syn-gas}} \cdot LHV_{\text{Syngas}}}{\dot{m}_{\text{briket MSW}} \cdot LHV_{\text{Briket MSW}}} \times 100\% \\ &= \frac{0,00078 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 3489,87 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{0.00089 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4698 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \times 100\% = 66.81\% \end{aligned}$$



Gambar 4.10 Grafik Effisiensi gas dingin terhadap equivalence ratio (λ)

Pada gambar 4.10, grafik efisiensi gas dingin terhadap variasi prosentase $\dot{m}_{ceratan\ syn-gas}$ menunjukkan bahwa terjadi peningkatan dari 61,78% pada kondisi awal tanpa ceratan syn-gas menjadi 66,81% pada penambahan $\dot{m}_{ceratan\ syn-gas}$ 10%. Lalu menurun secara perlahan tiap penambahan $\dot{m}_{ceratan\ syn-gas}$ hingga 26,52% pada penambahan ceratan syngas sebesar 55%.

Effisiensi gas dingin dipengaruhi oleh laju alir massa syngas, laju alir massa briket MSW serta LHV syngas dan briket MSW. Secara teori, dengan penambahan ceratan syngas menyebabkan nilai AFR menurun, dimana syn-gas dikategorikan sebagai bahan bakar pada persamaan efisiensi. Dengan penurunan AFR mengakibatkan peningkatan nilai LHV dari peningkatan konsentrasi combustible gas. Disisi lain, penambahan prosentase syn-gas yang dicerat mengakibatkan produksi akhir syn-gas menurun. Semakin kecil nilai AFR menyebabkan equivalence ratio menurun pula. Hal tersebut menyebabkan nilai produksi menurun meskipun laju konsumsi tidak mengalami penurunan secara signifikan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

Tabel C2. Perhitungan LHV terhadap Equivalence Ratio

Prosentase Ceratan Syn-gas (%)	Equivalence Ratio (Φ)	Nilai Kalor bawah (LHV) Syngas (kJ/m ³)	Massa jenis ρ Syn-gas (kg/m ³)	Nilai Kalor bawah (LHV) Syngas (kJ/kg)
0	0.18	2891.03	1.06	2733.56
11	0.16	3664.23	1.05	3489.87
23	0.14	3960.95	1.06	3723.29
55	0.09	4167.89	1.07	3910.40

Tabel C3. Effisiensi Gasifier terhadap Equivalence Ratio

Prosentase Ceratan Syn-gas (%)	Equivalence Ratio (Φ)	effisiensi gasifikasi (%)
0	0.18	61.78
11	0.16	66.81
23	0.14	55.63
55	0.09	26.52

Tabel A4. Thermophysical Properties of Gases at Atmospheric Pressure [20]

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^7$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Air, $M = 28.97$ kg/kmol							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	257	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536
Ammonia (NH₃), $M = 17.03$ kg/kmol							
300	0.6894	2.158	101.5	14.7	24.7	16.6	0.887
320	0.6448	2.170	109	16.9	27.2	19.4	0.870
340	0.6059	2.192	116.5	19.2	29.3	22.1	0.872
360	0.5716	2.221	124	21.7	31.6	24.9	0.872
380	0.5410	2.254	131	24.2	34.0	27.9	0.869

Tabel A4. *Continued*

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^7$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Ammonia (NH₃) (continued)							
400	0.5136	2.287	138	26.9	37.0	31.5	0.853
420	0.4888	2.322	145	29.7	40.4	35.6	0.833
440	0.4664	2.357	152.5	32.7	43.5	39.6	0.826
460	0.4460	2.393	159	35.7	46.3	43.4	0.822
480	0.4273	2.430	166.5	39.0	49.2	47.4	0.822
500	0.4101	2.467	173	42.2	52.5	51.9	0.813
520	0.3942	2.504	180	45.7	54.5	55.2	0.827
540	0.3795	2.540	186.5	49.1	57.5	59.7	0.824
560	0.3708	2.577	193	52.0	60.6	63.4	0.827
580	0.3533	2.613	199.5	56.5	63.8	69.1	0.817
Carbon Dioxide (CO₂), $M = 44.01$ kg/kmol							
280	1.9022	0.830	140	7.36	15.20	9.63	0.765
300	1.7730	0.851	149	8.40	16.55	11.0	0.766
320	1.6609	0.872	156	9.39	18.05	12.5	0.754
340	1.5618	0.891	165	10.6	19.70	14.2	0.746
360	1.4743	0.908	173	11.7	21.2	15.8	0.741
380	1.3961	0.926	181	13.0	22.75	17.6	0.737
400	1.3257	0.942	190	14.3	24.3	19.5	0.737
450	1.1782	0.981	210	17.8	28.3	24.5	0.728
500	1.0594	1.02	231	21.8	32.5	30.1	0.725
550	0.9625	1.05	251	26.1	36.6	36.2	0.721
600	0.8826	1.08	270	30.6	40.7	42.7	0.717
650	0.8143	1.10	288	35.4	44.5	49.7	0.712
700	0.7564	1.13	305	40.3	48.1	56.3	0.717
750	0.7057	1.15	321	45.5	51.7	63.7	0.714
800	0.6614	1.17	337	51.0	55.1	71.2	0.716
Carbon Monoxide (CO), $M = 28.01$ kg/kmol							
200	1.6888	1.045	127	7.52	17.0	9.63	0.781
220	1.5341	1.044	137	8.93	19.0	11.9	0.753
240	1.4055	1.043	147	10.5	20.6	14.1	0.744
260	1.2967	1.043	157	12.1	22.1	16.3	0.741
280	1.2038	1.042	166	13.8	23.6	18.8	0.733
300	1.1233	1.043	175	15.6	25.0	21.3	0.730
320	1.0529	1.043	184	17.5	26.3	23.9	0.730
340	0.9909	1.044	193	19.5	27.8	26.9	0.725
360	0.9357	1.045	202	21.6	29.1	29.8	0.725
380	0.8864	1.047	210	23.7	30.5	32.9	0.729
400	0.8421	1.049	218	25.9	31.8	36.0	0.719
450	0.7483	1.055	237	31.7	35.0	44.3	0.714
500	0.67352	1.065	254	37.7	38.1	53.1	0.710
550	0.61226	1.076	271	44.3	41.1	62.4	0.710
600	0.56126	1.088	286	51.0	44.0	72.1	0.707

Tabel A4. *Continued*

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^7$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Carbon Monoxide (CO) (continued)							
650	0.51806	1.101	301	58.1	47.0	82.4	0.705
700	0.48102	1.114	315	65.5	50.0	93.3	0.702
750	0.44899	1.127	329	73.3	52.8	104	0.702
800	0.42095	1.140	343	81.5	55.5	116	0.705
Helium (He), $M = 4.003$ kg/kmol							
100	0.4871	5.193	96.3	19.8	73.0	28.9	0.686
120	0.4060	5.193	107	26.4	81.9	38.8	0.679
140	0.3481	5.193	118	33.9	90.7	50.2	0.676
160	—	5.193	129	—	99.2	—	—
180	0.2708	5.193	139	51.3	107.2	76.2	0.673
200	—	5.193	150	—	115.1	—	—
220	0.2216	5.193	160	72.2	123.1	107	0.675
240	—	5.193	170	—	130	—	—
260	0.1875	5.193	180	96.0	137	141	0.682
280	—	5.193	190	—	145	—	—
300	0.1625	5.193	199	122	152	180	0.680
350	—	5.193	221	—	170	—	—
400	0.1219	5.193	243	199	187	295	0.675
450	—	5.193	263	—	204	—	—
500	0.09754	5.193	283	290	220	434	0.668
550	—	5.193	—	—	—	—	—
600	—	5.193	320	—	252	—	—
650	—	5.193	332	—	264	—	—
700	0.06969	5.193	350	502	278	768	0.654
750	—	5.193	364	—	291	—	—
800	—	5.193	382	—	304	—	—
900	—	5.193	414	—	330	—	—
1000	0.04879	5.193	446	914	354	1400	0.654
Hydrogen (H₂), $M = 2.016$ kg/kmol							
100	0.24255	11.23	42.1	17.4	67.0	24.6	0.707
150	0.16156	12.60	56.0	34.7	101	49.6	0.699
200	0.12115	13.54	68.1	56.2	131	79.9	0.704
250	0.09693	14.06	78.9	81.4	157	115	0.707
300	0.08078	14.31	89.6	111	183	158	0.701
350	0.06924	14.43	98.8	143	204	204	0.700
400	0.06059	14.48	108.2	179	226	258	0.695
450	0.05386	14.50	117.2	218	247	316	0.689
500	0.04848	14.52	126.4	261	266	378	0.691
550	0.04407	14.53	134.3	305	285	445	0.685

Tabel A4. *Continued*

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^7$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Hydrogen (H₂) (continued)							
600	0.04040	14.55	142.4	352	305	519	0.678
700	0.03463	14.61	157.8	456	342	676	0.675
800	0.03030	14.70	172.4	569	378	849	0.670
900	0.02694	14.83	186.5	692	412	1030	0.671
1000	0.02424	14.99	201.3	830	448	1230	0.673
1100	0.02204	15.17	213.0	966	488	1460	0.662
1200	0.02020	15.37	226.2	1120	528	1700	0.659
1300	0.01865	15.59	238.5	1279	568	1955	0.655
1400	0.01732	15.81	250.7	1447	610	2230	0.650
1500	0.01616	16.02	262.7	1626	655	2530	0.643
1600	0.0152	16.28	273.7	1801	697	2815	0.639
1700	0.0143	16.58	284.9	1992	742	3130	0.637
1800	0.0135	16.96	296.1	2193	786	3435	0.639
1900	0.0128	17.49	307.2	2400	835	3730	0.643
2000	0.0121	18.25	318.2	2630	878	3975	0.661
Nitrogen (N₂), $M = 28.01$ kg/kmol							
100	3.4388	1.070	68.8	2.00	9.58	2.60	0.768
150	2.2594	1.050	100.6	4.45	13.9	5.86	0.759
200	1.6883	1.043	129.2	7.65	18.3	10.4	0.736
250	1.3488	1.042	154.9	11.48	22.2	15.8	0.727
300	1.1233	1.041	178.2	15.86	25.9	22.1	0.716
350	0.9625	1.042	200.0	20.78	29.3	29.2	0.711
400	0.8425	1.045	220.4	26.16	32.7	37.1	0.704
450	0.7485	1.050	239.6	32.01	35.8	45.6	0.703
500	0.6739	1.056	257.7	38.24	38.9	54.7	0.700
550	0.6124	1.065	274.7	44.86	41.7	63.9	0.702
600	0.5615	1.075	290.8	51.79	44.6	73.9	0.701
700	0.4812	1.098	321.0	66.71	49.9	94.4	0.706
800	0.4211	1.122	349.1	82.90	54.8	116	0.715
900	0.3743	1.146	375.3	100.3	59.7	139	0.721
1000	0.3368	1.167	399.9	118.7	64.7	165	0.721
1100	0.3062	1.187	423.2	138.2	70.0	193	0.718
1200	0.2807	1.204	445.3	158.6	75.8	224	0.707
1300	0.2591	1.219	466.2	179.9	81.0	256	0.701
Oxygen (O₂), $M = 32.00$ kg/kmol							
100	3.945	0.962	76.4	1.94	9.25	2.44	0.796
150	2.585	0.921	114.8	4.44	13.8	5.80	0.766
200	1.930	0.915	147.5	7.64	18.3	10.4	0.737
250	1.542	0.915	178.6	11.58	22.6	16.0	0.725
300	1.284	0.920	207.2	16.14	26.8	22.7	0.711

Tabel A4. *Continued*

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^7$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Oxygen (O₂) (continued)							
350	1.100	0.929	233.5	21.23	29.6	29.0	0.733
400	0.9620	0.942	258.2	26.84	33.0	36.4	0.737
450	0.8554	0.956	281.4	32.90	36.3	44.4	0.741
500	0.7698	0.972	303.3	39.40	41.2	55.1	0.716
550	0.6998	0.988	324.0	46.30	44.1	63.8	0.726
600	0.6414	1.003	343.7	53.59	47.3	73.5	0.729
700	0.5498	1.031	380.8	69.26	52.8	93.1	0.744
800	0.4810	1.054	415.2	86.32	58.9	116	0.743
900	0.4275	1.074	447.2	104.6	64.9	141	0.740
1000	0.3848	1.090	477.0	124.0	71.0	169	0.733
1100	0.3498	1.103	505.5	144.5	75.8	196	0.736
1200	0.3206	1.115	532.5	166.1	81.9	229	0.725
1300	0.2960	1.125	568.4	188.6	87.1	262	0.721
Water Vapor (Steam), $M = 18.02$ kg/kmol							
380	0.5863	2.060	127.1	21.68	24.6	20.4	1.06
400	0.5542	2.014	134.4	24.25	26.1	23.4	1.04
450	0.4902	1.980	152.5	31.11	29.9	30.8	1.01
500	0.4405	1.985	170.4	38.68	33.9	38.8	0.998
550	0.4005	1.997	188.4	47.04	37.9	47.4	0.993
600	0.3652	2.026	206.7	56.60	42.2	57.0	0.993
650	0.3380	2.056	224.7	66.48	46.4	66.8	0.996
700	0.3140	2.085	242.6	77.26	50.5	77.1	1.00
750	0.2931	2.119	260.4	88.84	54.9	88.4	1.00
800	0.2739	2.152	278.6	101.7	59.2	100	1.01
850	0.2579	2.186	296.9	115.1	63.7	113	1.02

*Adapted from References 8, 14, and 15.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Setelah serangkaian tahapan proses penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari studi eksperimental yang telah dilakukan, mekanisme ceratan dilakukan dengan memasukkan syngas ke reaktor kembali melalui inlet blower udara dengan memanfaatkan sisi hisap blower untuk memaksimalkan kontinuitas aliran.
2. Dengan penambahan sistem ceratan terjadi fenomena pada temperature zona gasifikasi sebagai berikut :
 - a. Termokopel 1 (T1) rata-rata menunjukkan kisaran temperatur sampai 73°C mengindikasikan memasuki posisi zona pengeringan (*drying*), dimana kandungan moisture, yang dimiliki briket MSW dihilangkan, melalui proses penguapan atau *evaporasi*.
 - b. Termokopel 2 (T2) rata-rata menunjukkan kisaran temperatur sampai 252°C mengindikasikan bahwa akan masuk zona *pirolisis* sesuai dengan dasar teori pada bab 2, zona pirolisis memasuki temperatur 300°C-900°C, dimana biomassa kering yang bebas dari *moisture*, mengalami pemanasan terus-menerus, yang diharapkan mampu menghilangkan kandungan *volatile* biomassa.
 - c. Termokopel 3 (T3) rata-rata menunjukkan kisaran temperatur sampai 983°C mengindikasikan (T3) akan masuk zona *oksidasi parsial* sesuai dengan dasar teori pada bab 2 bahwa, zona *oksidasi parsial* akan memasuki temperatur >900°C, dimana proses ini menghasilkan panas (eksoterm) yang memanaskan lapisan karbon dibawah
 - d. Termokopel 4 (T4) rata-rata menunjukkan kisaran temperatur sampai 589°C mengindikasikan (T4)

masuk zona *reduksi* sesuai dengan dasar teori pada bab 2 bahwa, zona *reduksi* memasuki temperatur 400°C-900°C, dimana proses ini menyerap, atau membutuhkan panas (*reaksi endoterm*).

- e. Termokopel 5 (T5) rata-rata menunjukkan kisaran temperatur sampai 115°C mengindikasikan (T5) sebagai indikator temperatur gas hasil gasifikasi yaitu *synthetic-gas (syn-gas)*.
3. Semakin besar nilai prosentase ceratan *syn-gas* dapat menurunkan besar rasio udara-bahan bakar (Air Fuel Ratio), sehingga menyebabkan konsentrasi kandungan *synthetic gas* pada gas yang mudah terbakar (*combustible gas*) cenderung mengalami peningkatan, sebaliknya kandungan gas O₂, N₂, CO₂ mengalami penurunan secara perlahan.
 4. Range batas atas dan bawah dari ceratan pada prosentase 11% sampai 55% dengan nilai AFR 0,93 sampai 0,44 dan λ 0,16 sampai 0,09.
 5. Prosentase nilai ceratan *syn-gas* terbaik, ditinjau dari efisiensi reaktor gasifikasi yaitu pada besaran 11% dengan nilai efisiensi 66,81%.
 6. Semakin besar prosentase ceratan *syn-gas*, maka nilai kandungan energi ditinjau dari *Low Heating Value synthetic gas* semakin meningkat.
 7. Prosentase nilai ceratan *syn-gas* terbaik, ditinjau dari nilai kandungan energi (*Low Heating Value*) *synthetic gas* yaitu pada 55% sebesar 3912,32 kJ/kg.
 8. Nilai batas bawah dan batas atas pasokan ceratan *syn-gas* untuk kandungan gas yang *flammable* dari prosentase 11% - 55%.

5.2. Saran

1. Adanya penelitian lebih lanjut, mengenai bahan bakar briket MSW, karena memiliki potensi yang besar guna mengurai produksi sampah yang ada.
2. Proses pengambilan sampel gas membutuhkan perlakuan yang hati-hati, agar udara luar tidak ikut masuk pada saat pengambilan sampel.
3. Perlu adanya penelitian lebih lanjut, mengenai pemanfaatan gas hasil gasifikasi agar nantinya, bisa menjadi energi alternatif yang potensial, untuk dikembangkan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sugiono A., Anindhita, Boedoyo, M. S., Adiarso. 2014. **Pengembangan Energi dalam Mendukung Program Substitusi BBM**. Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. Jakarta, Indonesia.
- [2] Nuhartanto, S. 2016. **Volume Sampah Capai 1400 Ton per Hari**. <URL: <http://www.enciety.co/volume-sampah-surabaya-capai-1-400-ton-per-hari/>>.
- [3] Kahardiansyah, Falah. 2015. **Studi Eksperimen Rancangan Burner Type Partially Premixed dengan Bahan Bakar Syngas Biomassa Serbuk kayu dengan Variasi Diameter Outlet Bahan Bakar**. Tugas Akhir. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [4] Azimov, U., Tomita, E., Kawahara, N., Harada, Y. 2011. **Effect of Syngas Compo-sition on Combustion and Exhaust Emission Characteristics in A Pilot-Ignited Dual-Fuel Engine Operated in PREMIER Combustion Mode**. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 18.
- [5] Zhou, J., Chen, Q., Zhao, H., Cao, X., Mei, Q., Luo, Z., Cen, K. 2009. **Biomass-Oxygen Gasification in a High Temperature Entrained-Flow Gasifier**. *State Key Laboratory of Clean Energy Utilization*, Zhejiang University. Huang zhou, China.
- [6] Maulana, A.R. 2015. **Karakteristik Unjuk Kerja Mesin Diesel Generator Set Sistem Dual Fuel Solar dan Syngas Serbuk Kayu**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Mesin ITS. Surabaya.
- [7] Pasek, A.D., Gultom, K.W., Suwono, A. 2013. **Feasibility of Recovering Energy from Municipal Solid Waste to Generate Electricity**. ITB. Bandung.
- [8] Kawano, Sungkono, D. 2014. **Motor Bakar Torak (Diesel)**. Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS. Surabaya.
- [9] Nasution, A.S. 2010. **Proses Pembuatan Bahan Bakar Bensin dan Solar Ramah Lingkungan**. Pusat penelitian dan pengembangan teknologi minyak dan gas bumi, Jakarta.

- [10] Mathur, M.L., & Sharma, R.P. 1980. ***A Course in Internal Combustion Engine 3rd edition***. Dhanpat Rai & Sons. Nai Sarak, Delhi.
- [11] Heywood, J. B. 1988. ***Internal Combustion Engine***. Mc GrawHill, London.
- [12] Sudarmanta, Bambang. 2015. ***Dual Fuel Engine Performance Using Biodiesel and Syn-Gas from Rice Husk Downdraft Gasification for Power Generation. International Seminar Mechanical Engineering Department, Faculty of Technology Industry, Sepuluh Nopember Institut of Technology***. Surabaya, Indonesia.
- [13] Sudarmanta, B., Sungkono, D., Darsopuspito, S., Kadarisman, Isbunyamin. 2011. ***Pengaruh Suhu Reaktor Gasifier dan Ukuran Partikel terhadap Karakterisasi Gasifikasi Biomassa Limbah Kayu Pada Reaktor Gasifier Tipe Downdraft***. Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya, Indonesia.
- [14] Hernandez, J.J., Aranda, G., Barba, J., Mendoza, J.M. 2012. ***Effect of Steam Content in The Air-Steam Flow on Biomass Entrained Flow Gasification***. Universidad de Castilla, La Manca, Spanyol.
- [15] Hernandez, J.J., Almansa G. A., Bula, A. 2010. ***Gasification of biomass wastes in an entrained flow gasifier: Effect of the particle size and the residence time***. Universidad de Castilla, La Manca, Spanyol.
- [16] Basu, Prabir. 2013. ***Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction***. Chennai, India.
- [17] Reed T.B., and Dash A. 1988. ***Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems***. Solar Energy Research Institut. Colorado, USA.
- [18] Qin, K., Lin, W., Jensen, P.A., Jensen, A.D. 2011. ***High Temperature Entrained Flow Gasification of Biomass***. Department of Chemical and Biochemical Engineering, Technical University of Denmark, Denmark.

- [19] Brar, J.S., Singh, K., Zondlo, J., Wang, J. 2013. *Co-Gasification of Coal and Hardwood Pellets a Case Study*. West Virginia University. United State of America.
- [20] Incropera F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S. 2011. *Fundamental of Heat and Mass Transfer*. USA.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kota Kupang, Provinsi Nusa Tenggara Timur pada 07 Oktober 1992 dari Bapak Heri Sugiharto dan Ibu Helena Suprihatin. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Jenjang pendidikan yang pernah ditempuh adalah TKK Sang Timur Sumberjati, SDK Sang Timur Sumberjati, SMP Negeri 1 Purwoharjo, SMA Negeri 1 Purwoharjo.

Pada tahun 2013 penulis lulus dari Program D3 Teknik Permesinan Kapal, Program Studi Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS), ITS Surabaya dengan NRP 6310030009. Kemudian penulis melanjutkan perkuliahan lintas jalur Jurusan S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, ITS Surabaya tahun ajaran 2013/2014 Semester Genap. Di Jurusan S1 Teknik Mesin NRP 2112 105 010, penulis mengambil bidang keahlian Konversi Energi dan mengambil tugas akhir di bidang Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar, yaitu gasifikasi.

Selain itu penulis juga aktif di bidang keorganisasian baik di Himpunan Mahasiswa D3 Teknik Permesinan Kapal PPNS-ITS dan Teater Tiyang Alit ITS. Di Himpunan Mahasiswa D3 Teknik Permesinan Kapal, penulis pernah mendapat amanah sebagai Wakil Kepala Divisi KOMINFO HIMAME 2011-2012, sebagai Kepala Divisi PSDM HIMAME 2012-2013. Aktif dalam Labaoratorium Teknik Pembakaran dan Bahan bakar 2015.

Penulis pernah bekerja di PT. Waskita Karya. Saat ini penulis merupakan direktur PT. Karya Berkah Utama yang bergerak di bidang properti dan kontraktor di Sidoarjo.

Alamat email : hendrabhakti@gmail.com