

**SKRIPSI**

**PENGARUH VARIASI LAJU ALIR UDARA TERHADAP EFISIENSI  
TERMAL PADA PROSES GASIFIKASI DENGAN SISTEM *UPDRAFT***

**Disusun dan Diajukan oleh:**

**NURSALIM NURULHUDA**

**D021171519**



**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA**

**2022**

**SKRIPSI**

**PENGARUH VARIASI LAJU ALIR UDARA TERHADAP EFISIENSI  
TERMAL PADA PROSES GASIFIKASI DENGAN SISTEM *UPDRAFT***

**Disusun dan Diajukan oleh:**

**NURSALIM NURULHUDA**

**D021171519**

**Merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik  
Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA**

**2022**

## LEMBAR PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu persyaratan Mengikuti Ujian Akhir guna memperoleh gelar Sarjana Teknik Mesin pada Departemen Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

### JUDUL:

**PENGARUH VARIASI LAJU ALIR UDARA TERHADAP EFISIENSI TERMAL PADA PROSES GASIFIKASI DENGAN SISTEM *UPDRAFT***

**NURSALIM NURULHUDA**

**D021171519**

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Gowa, 1 Maret 2022

Dosen Pembimbing I

**Dr. Eng. Novriany Amaliyah, ST., MT**

**NIP. 19791112 200812 2 002**

Dosen Pembimbing II

**Prof. Dr. Eng. Ir. Andi Erwin Eka Putra, ST., MT**

**NIP. 19711221 199802 1 001**

Mengetahui,

Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin



**Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT**

**NIP. 19720825 200003 1 001**

## PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Nursalim Nurulhuda  
NIM : D021171519  
Program Studi : Teknik Mesin  
Jenjang : S-1  
Judul Skripsi : Pengaruh Variasi Laju Alir Udara terhadap Efisiensi Termal pada Proses Gasifikasi dengan Sistem Updraft

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi ini merupakan hasil penelitian, pemikiran, dan pemaparan asli dari saya sendiri. Saya tidak mencantumkan tanpa pengakuan bahan-bahan yang telah dipublikasikan sebelumnya atau ditulis oleh orang lain atau sebagai bahan yang pernah diajukan untuk gelar atau ijazah pada Universitas Hasanuddin atau perguruan tinggi lainnya.

Apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Hasanuddin

Demikian pernyataan ini saya buat

Gowa, 22 Februari 2022

Yang membuat pernyataan



  
**Nursalim Nurulhuda**

## ABSTRAK

Biomassa merupakan bahan bakar yang dapat diperbarui dan secara umum berasal dari makhluk hidup. Gasifikasi merupakan salah satu bentuk teknologi yang memanfaatkan biomassa untuk dikonversi menjadi sebuah energi. Gasifikasi mengubah padatan bahan bakar menjadi gas mampu bakar seperti CO, H<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> sebagai hasil dari reaksi yang terjadi didalam reaktor gasifikasi. Salah satu parameter penting dari gasifikasi adalah rasio ekivalen. Ketika rasio ekivalen terlalu tinggi hingga mendekati pembakaran sempurna maka akan memperkaya komponen CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O. Sedangkan jika rasio ekivalen terlalu rendah maka produk arang yang dihasilkan semakin tinggi, jumlah produksi gas yang menjadi lebih sedikit dan panas kalor yang dihasilkan juga semakin rendah. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi laju alir udara terhadap efisiensi termal, waktu operasi gas mampu bakar dan laju alir volumetrik syngas. Pada penelitian ini menggunakan kayu trembesi sebanyak 3 kg sebagai bahan bakar dan menggunakan variasi laju alir udara 0.0046 kg/s, 0.0058 kg/s dan 0.0069 kg/s. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi termal tertinggi diperoleh pada laju alir udara 0.0069 kg/s sebesar 12.08%. Waktu operasi terlama diperoleh pada laju alir udara 0.0046 kg/s selama 0.5983 jam atau ini setara dengan 35 menit 53 detik. Sedangkan laju alir volumetrik syngas yang tertinggi diperoleh pada laju alir udara 0.0069 kg/s sebesar 0.00494 kg/s.

Kata kunci: biomassa, gasifikasi, laju alir udara, efisiensi termal

## **ABSTRACT**

Biomass is a renewable fuel and generally comes from living things. Gasification is a form of technology that utilizes biomass to be converted into energy. Gasification converts solid fuel into combustible gases such as CO, H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> as a result of the reactions that occur in the gasification reactor. One of the important parameters of gasification is the equivalence ratio. When the equivalence ratio is too high to approach complete combustion, it will enrich the CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O components. Meanwhile, if the equivalence ratio is too low, the resulting charcoal product will be higher, the amount of gas production will be less and the heat generated will also be lower. This study aims to determine the effect of variations in air flow rate of thermal efficiency, operating time of combustible gas and the rate of syngas flow produced. In this study, 3 kg of trembesi wood was used as fuel and used variations in air flow rates of 0.0046 kg/s, 0.0058 kg/s and 0.0069 kg/s. The results showed that the highest thermal efficiency obtained at the air flow rate of 0.0069 kg/s was 12.08%. The longest operating time obtained at the air flow rate of 0.0046 kg/s for 0.5983 hours or this is equivalent to 35 minutes 53 seconds. Meanwhile, the highest volumetric flow rate of syngas obtained at the air flow rate of 0.0069 kg/s was 0.00494 kg/s.

**Keywords:** biomass, gasification, air flow rate, thermal efficiency

## **KATA PENGANTAR**

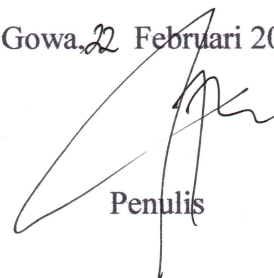
Puji dan syukur senantiasa kita panjatkan ke-hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat dan berkat-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Pengaruh Variasi Laju Alir Udara terhadap Efisiensi Termal pada Proses Gasifikasi dengan Sistem Updraft” yang mana merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Selama proses pengerjaan skripsi ini penulis menerima begitu banyak bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu peneliti ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Kedua orang tua tercinta Bapak Lahuda dan Ibu Nurhayati yang selalu mendampingi, memberi semangat dan mendoakan.
2. Dr.Eng. Jalaluddin, ST., MT. sebagai Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin beserta seluruh staf Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala bantuan dan kemudahan yang diberikan
3. Dr.Eng Novriany Amaliyah, ST., MT. dan Prof. Dr.Eng. Ir. Andi Erwin Eka Putra, ST., MT. sebagai Dosen Pembimbing I dan Dosen Pembimbing II yang telah memberikan waktu, arahan, dan saran selama proses pengerjaan skripsi ini.
4. Ir. Baharuddin Mire, MT. dan Ir. Andi Mangkau, MT. selaku penguji yang telah memberikan saran-saran selama proses pengerjaan skripsi.
5. Prof. Dr. Ir. Luther Sule, MT. sebagai Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan ilmu dan nasehat sejak menjadi mahasiswa baru.
6. Bapak/Ibu dosen Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin yang telah memberikan ilmu, nasehat dan pengalaman kepada penulis selama menempuh studi di dunia perkuliahan
7. Bapak H. Muis Tolla selaku laboran di Laboratorium Motor Bakar yang senantiasa membantu dalam penelitian saya.

8. Teman-teman Teknik Mesin angkatan 2017 / ZYNCROMEZH'17 yang senantiasa mendukung dan berjuang bersama sejak mahasiswa baru hingga saat ini.
9. Serta seluruh pihak yang telah membantu yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna walaupun telah menerima bantuan dari berbagai pihak. Apabila terdapat kesalahan-kesalahan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis dan bukan para pemberi bantuan. Kritik dan saran yang membangun akan lebih menyempurnakan skripsi ini.

Gowa, 22 Februari 2022



Penulis



## DAFTAR ISI

<b>SAMPUL</b> .....	i
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	ii
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	iii
<b>PERNYATAAN KEASLIAN</b> .....	iv
<b>ABSTRAK</b> .....	v
<b>ABSTRACT</b> .....	vi
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	vii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	ix
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xii
<b>DAFTAR SIMBOL</b> .....	xiii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1. Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2. Rumusan Masalah</b> .....	3
<b>1.3. Tujuan Penelitian</b> .....	3
<b>1.4. Batasan Masalah</b> .....	4
<b>1.5. Manfaat Penelitian</b> .....	4
<b>BAB II LANDASAN TEORI</b> .....	5
<b>2.1. Biomassa</b> .....	5
<b>2.2. Gasifikasi</b> .....	6
<b>2.3. Tipe Reaktor Gasifikasi</b> .....	7
<b>2.4. Tahapan Proses Gasifikasi</b> .....	10
<b>2.5. Faktor yang Mempengaruhi Proses Gasifikasi</b> .....	13
<b>2.6. Parameter Pengujian Gasifikasi</b> .....	16
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	20
<b>3.1. Waktu dan Tempat Penelitian</b> .....	20
<b>3.2. Alat dan Bahan</b> .....	20
<b>3.3. Skema Penelitian</b> .....	27
<b>3.4. Metode Pengambilan Data</b> .....	27

3.5. Prosedur Penelitian .....	28
3.6. Diagram Alir Penelitian .....	30
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>31</b>
4.1. Data Pengujian .....	31
4.2. Data Hasil Pengujian .....	31
4.3. Perhitungan Pengujian dengan Kecepatan Udara 4 m/s .....	32
4.4. Perhitungan Pengujian dengan Kecepatan Udara 5 m/s .....	39
4.5. Perhitungan Pengujian dengan Kecepatan Udara 6 m/s .....	46
4.6. Analisis Grafik Pengujian Gasifikasi dengan Variasi Laju Aliran Udara .....	53
<b>BAB V PENUTUP .....</b>	<b>66</b>
5.1 Kesimpulan .....	66
5.2 Saran .....	67
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>68</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>70</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1.</b> Reaktor Gasifikasi <i>Updraft</i> .....	8
<b>Gambar 2.2.</b> Reaktor Gasifikasi <i>Downdraft</i> .....	10
<b>Gambar 2.3.</b> Reaktor Gasifikasi <i>Crossdraft</i> .....	10
<b>Gambar 3.1.</b> Reaktor gasifikasi dengan sistem <i>updraft gasifier</i> .....	20
<b>Gambar 3.2.</b> Tabung <i>filter</i> gas hasil gasifikasi .....	21
<b>Gambar 3.3.</b> Pipa pendingin gas hasil gasifikasi .....	21
<b>Gambar 3.4.</b> Aki .....	22
<b>Gambar 3.5.</b> Selang .....	22
<b>Gambar 3.6.</b> <i>Fan</i> .....	23
<b>Gambar 3.7.</b> Anemometer .....	23
<b>Gambar 3.8.</b> Termokopel .....	24
<b>Gambar 3.9.</b> Timbangan <i>digital</i> .....	24
<b>Gambar 3.10.</b> <i>Burner</i> .....	25
<b>Gambar 3.11.</b> Panci .....	25
<b>Gambar 3.12.</b> Kayu .....	26
<b>Gambar 3.13.</b> Air .....	26
<b>Gambar 3.14.</b> Skema Penelitian .....	27
<b>Gambar 4.1.</b> Laju Alir Udara terhadap Laju Konsumsi bahan Bakar ( <i>FCR</i> ) .....	53
<b>Gambar 4.2.</b> Laju Alir Udara terhadap Rasio Udara Bahan Bakar Aktual ( <i>AFR actual</i> ) .....	54
<b>Gambar 4.3.</b> Laju Alir Udara terhadap Equivalence Ratio (ER) .....	55
<b>Gambar 4.4.</b> Laju Alir Udara terhadap <i>Startup</i> Gas dapat Terbakar .....	57
<b>Gambar 4.5.</b> Laju Alir Udara terhadap Waktu Operasi Syngas .....	58
<b>Gambar 4.6.</b> Laju Alir Udara terhadap Laju Alir Volumetrik Syngas .....	59
<b>Gambar 4.7.</b> Laju Alir Udara terhadap Panas Sensibel (SH) .....	61
<b>Gambar 4.8.</b> Laju Alir Udara terhadap Panas Laten (LH) .....	62
<b>Gambar 4.9.</b> Laju Alir Udara terhadap terhadap Input Energi Panas .....	63
<b>Gambar 4.10.</b> Laju Alir Udara terhadap Efisiensi Termal .....	64

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1.</b> Rentang <i>heating value</i> syngas dengan berbagai jenis media .....	15
<b>Tabel 2.2.</b> Perbandingan komposisi syngas antara <i>gasifying agent</i> udara dan oksigen dengan berbagai bahan .....	16
<b>Tabel 4.1.</b> Data Pengujian .....	31
<b>Tabel 4.2.</b> Data Hasil Pengujian .....	31
<b>Tabel 4.3.</b> <i>Ultimate analysis</i> dari Setiap Tanaman .....	34
<b>Tabel 4.4.</b> <i>Proximate analysis</i> dari Setiap Tanaman .....	37
<b>Tabel 4.5.</b> Tabel Hasil Data Perhitungan Pengujian dengan Laju Alir Udara 4 m/s .....	38
<b>Tabel 4.6.</b> Tabel Hasil Data Perhitungan Pengujian dengan Laju Alir Udara 5 m/s .....	45
<b>Tabel 4.7.</b> Tabel Hasil Data Perhitungan Pengujian dengan Laju Alir Udara 6 m/s .....	52

## DAFTAR SIMBOL

FCR atau $\dot{m}_f$	Laju konsumsi bahan bakar	kg/s
$\dot{m}_a$	Laju alir udara	kg/s
$\rho_{\text{udara}}$	Massa jenis udara	kg/m <sup>3</sup>
$A_{\text{pipa}}$	Luas pipa udara <i>supply</i>	m <sup>2</sup>
$V_u$	Kecepatan udara <i>supply</i>	m/s
$Q_s$	Laju alir volumetrik syngas	m <sup>3</sup> /s
$A_{\text{selang syngas}}$	Luas selang syngas	m <sup>2</sup>
$V_s$	Kecepatan syngas	m/s
$AFR_{\text{act}}$	Rasio udara bahan bakar	-
ER	Rasio ekivalen	-
SH	Panas sensibel	kJ/s
$M_{A1}$	Massa awal air	kg
$M_{A2}$	Massa akhir air	kg
$C_p$	Panas jenis air	kJ/kg °C
$\Delta T$	Perbedaan temperatur	°C
$T_{A1}$	Temperatur air mendidih	°C
$T_{A2}$	Temperatur air sebelum mendidih	°C
$t_A$	Waktu mendidihkan air	s
LH	Panas laten	kJ/s
$W_e$	Berat air yang diuapkan	kg
$H_{fg}$	Panas laten air	kJ/kg
$Q_{in}$	Energi panas tersedia dalam bahan bakar	kJ/s
HVF	Nilai kalor biomassa	kJ/kg
$M_b$	Massa biomassa	kg
TE	Efisiensi Termal	%
$D_1$	Diameter pipa udara <i>supply</i>	m
$D_2$	Diameter selang syngas	m
$t_{G1}$	Waktu gas dapat terbakar	s

$t_{G2}$	Waktu gas tidak dapat terbakar	s
$t_A$	Waktu mendidihkan air	s

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Kebutuhan energi semakin meningkat seiring berjalannya waktu. Pada tahun 2018, total produksi energi *primer* yang terdiri dari minyak bumi, gas bumi, batubara, dan energi terbarukan mencapai 411,6 MTOE. Sebesar 64% atau 261,4 MTOE dari total produksi tersebut diekspor terutama batubara dan LNG. Selain itu, Indonesia juga melakukan impor energi terutama minyak mentah dan produk BBM sebesar 43,2 MTOE serta sejumlah kecil batubara kalori tinggi yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan sektor industri. Total konsumsi energi *final* (tanpa biomassa tradisional) tahun 2018 sekitar 114 MTOE terdiri dari sektor transportasi 40%, kemudian industri 36%, rumah tangga 16%, komersial dan sektor lainnya masing-masing 6% dan 2% (Outlook Energi Indonesia, 2019).

Banyak energi alternatif atau energi baru terbarukan (EBT) saat ini yang mulai dimanfaatkan. Contoh pemanfaatan energi alternatif atau energi baru terbarukan (EBT) adalah pemanfaatan energi surya sebagai pembangkit listrik, pemanas air, pemasakan makanan, energi angin dan lain sebagainya. Pemanfaatan biomassa sebagai energi alternatif sudah mulai berjalan namun ketergantungan Indonesia terhadap minyak masih dominan yaitu mencapai 32% sementara pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT) masih sekitar 9% (Outlook Energi Indonesia, 2019).

Biomassa juga adalah energi baru terbarukan (EBT). Energi biomassa dapat menjadi sumber energi alternatif pengganti bahan bakar fosil (minyak bumi) karena beberapa sifatnya yang menguntungkan yaitu dapat dimanfaatkan secara lestari karena sifatnya yang dapat diperbaharui (*renewable resources*) dan mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya hutan dan pertanian (Idzni Qistina, 2016).

Potensi limbah biomassa terbesar berasal dari limbah kayu hutan, kemudian diikuti oleh limbah padi, jagung, ubi kayu, kelapa, kelapa sawit dan tebu. Secara umum bahan baku biomassa dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu pohon berkayu (*woody*) dan rumput-rumputan (*herbaceous*). Saat ini material berkayu diperkirakan merupakan 50% dari total potensial bioenergi sedangkan 20% lainnya adalah jerami yang diperoleh dari hasil samping pertanian (Astri, 2019).

Handoyo (2013), telah melakukan pengujian gasifikasi tipe *updraft gasifier* tentang pengaruh variasi kecepatan udara terhadap temperatur pembakaran pada tungku gasifikasi sekam padi dengan menggunakan kecepatan udara 3,5 m/s, 4,0 m/s dan 4,5 m/s. Hasil pengujian menunjukkan, variasi kecepatan udara sangat berpengaruh terhadap temperatur pembakaran, temperatur pendidihan air, nyala efektif serta efisiensi *thermal* tungku yang dihasilkan.

Setiawan, *et al* (2014), telah melakukan pengujian gasifikasi tipe *updraft gasifier* tentang gasifikasi batu bara lignite dengan variasi kecepatan udara untuk keperluan karbonasi. Penelitian ini menggunakan kecepatan udara yaitu 2,0 m/s, 4,0 m/s dan 6,0 m/s. Hasil penelitian menunjukkan variasi kecepatan udara sangat berpengaruh terhadap temperatur pembakaran, nyala efektif serta efisiensi *thermal* tungku yang dihasilkan. Pada kecepatan udara 2,0 m/s temperatur tertinggi sebesar 232°C dengan nyala efektif 82 menit dan efisiensi *thermal* tungku sebesar 18,46%. Pada kecepatan 4,0 m/s, temperatur tertinggi sebesar 294°C dengan nyala efektif 52 menit dan efisiensi *thermal* tungku sebesar 24,62%. Pada kecepatan 6,0 m/s, temperatur tertinggi sebesar 369°C dengan nyala efektif 47 menit dan efisiensi *thermal* tungku sebesar 31,31%.

Heru, *et al* (2014), telah melakukan pengujian gasifikasi tipe *downdraft gasifier* tentang pengaruh *equivalence ratio* terhadap efisiensi termal proses gasifikasi sistem *downdraft* satu saluran udara masuk dengan menggunakan biomassa sekam padi. Variasi nilai *equivalence ratio* pada proses gasifikasi



yang digunakan ialah 0,21, 0,26, 0,31, dan 0,36. Hasil penelitian didapatkan efisiensi paling besar pada nilai *equivalence ratio* 0,26 dimana efisiensi termalnya adalah 59,64%.

Gasifikasi menggunakan sejumlah udara yang kurang dari stoikiometri, apabila udara yang diberikan pada kondisi stoikiometri maka hanya terjadi proses pembakaran dan apabila tidak terdapat oksigen sama sekali maka proses yang terjadi adalah pirolisis. Kebutuhan udara pada proses gasifikasi berada di antara batas proses pirolisis dan proses pembakaran, maka dibutuhkan rasio yang tepat untuk menghasilkan syngas yang maksimal, oleh karena itu penulis akan melakukan penelitian dengan judul **“PENGARUH VARIASI LAJU ALIR UDARA TERHADAP EFISIENSI TERMAL PADA PROSES GASIFIKASI DENGAN SISTEM *UPDRAFT*”**.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Adapun beberapa rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi laju alir udara terhadap efisiensi termal pada proses gasifikasi dengan sistem *updraft*
2. Bagaimana pengaruh variasi laju alir udara terhadap waktu operasi syngas
3. Bagaimana pengaruh variasi laju alir udara terhadap laju alir volumetrik syngas

## **1.3. Tujuan Penelitian**

1. Untuk menganalisis pengaruh variasi laju alir udara terhadap efisiensi termal pada proses gasifikasi dengan sistem *updraft*
2. Untuk menganalisis pengaruh variasi laju alir udara terhadap waktu operasi syngas
3. Untuk menganalisis pengaruh variasi laju alir udara terhadap laju alir volumetrik syngas

#### **1.4. Batasan Masalah**

1. Tipe tungku pembakaran yang digunakan adalah *updraft gasifier*
2. Biomassa yang digunakan adalah kayu trembesi
3. *Gasifying agent* yang digunakan adalah udara

#### **1.5. Manfaat Penelitian**

Manfaat dari dilaksanakannya penelitian ini adalah sebagai bahan informasi untuk penelitian selanjutnya yang kemudian dapat dikembangkan untuk penelitian lebih lanjut.

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1. Biomassa**

Biomassa adalah bahan bakar yang dapat diperbarui dan secara umum berasal dari makhluk hidup yang didalamnya tersimpan energi. Biomassa terdiri dari karbon (C), hidrogen (H<sub>2</sub>) dan oksigen (O<sub>2</sub>) dengan senyawa kimia yang terkandung yaitu selulosa, hemiselulosa dan lignin. Biomassa merupakan keseluruhan materi yang berasal dari makhluk hidup yang meliputi bahan organik yang hidup maupun yang mati. Biomassa bersifat mudah didapatkan, ramah lingkungan, dan terbarukan. Potensi energi biomassa secara umum berasal dari sektor kehutanan, perkebunan, dan pertanian. Contoh biomassa antara lain adalah tanaman, pepohonan, rumput, limbah pertanian dan limbah hutan. Selain digunakan untuk bahan pangan, pakan ternak, minyak nabati, dan sebagainya, biomassa juga digunakan sebagai sumber energi (bahan bakar). Pada umumnya yang digunakan sebagai bahan bakar adalah biomassa yang nilai ekonomisnya rendah atau merupakan limbah setelah diambil produk primernya.

Salah satu potensi biomassa bersumber dari kayu. Selain ketersediaannya cukup banyak di Indonesia, biomassa kayu juga cenderung tidak menyebabkan dampak negatif pada lingkungan. Sumber energi biomassa mempunyai beberapa kelebihan antara lain merupakan sumber energi yang dapat diperbaharui sebagai alternatif pengganti energi fosil, biomassa dapat mengurangi efek rumah kaca, mengurangi limbah organik, melindungi kebersihan air dan tanah, mengurangi polusi udara, dan mengurangi adanya hujan asam dan kabut asam.

Sebelum mengenal bahan bakar fosil, manusia sudah menggunakan biomassa sebagai sumber energi, misalnya dengan menggunakan kayu untuk menyalakan api unggun. Namun penggunaan energi besar-besaran telah membuat manusia mengalami krisis energi. Hal ini disebabkan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil seperti minyak bumi dan gas alam yang sangat

tinggi. Fosil merupakan sumberdaya alam yang tidak terbarukan, sehingga mengatasi krisis energi masa depan perlu beberapa alternatif sumber energi dikembangkan dimana salah satunya adalah energi biomassa.

Secara umum bahan baku biomassa dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu pohon berkayu (*woody*) dan rumput rumputan (*herbaceous*). Saat ini material berkayu diperkirakan merupakan 50% dari total potensial bioenergi sedangkan 20% lainnya adalah jerami yang diperoleh dari hasil samping pertanian. Batang kayu merupakan contoh aplikasi biomassa untuk energi yang pertama kali dikenal. Bagaimanapun juga penggunaan batangan kayu untuk tujuan energi saat ini bersaing dengan penggunaan non-energi yang mempunyai nilai lebih seperti untuk produksi pulp, industri furnitur, dan lain-lain sehingga menyebabkan tingginya harga bahan baku pengolahan biomassa serta meningkatnya konsumsi terhadap pohon. Bahan baku berkayu yang dimaksud adalah bahan berkayu hasil sisa pengolahan kertas, furnitur, peralatan rumah tangga dan lain-lain.

Sebagai bahan bakar, biomassa perlu dilakukan pengolahan terlebih dahulu agar dapat lebih mudah dipergunakan yang dikenal sebagai konversi biomassa. Teknologi konversi biomassa tentu saja membutuhkan perbedaan pada alat yang digunakan untuk mengkonversi biomassa dan menghasilkan perbedaan bahan bakar yang dihasilkan. Teknologi konversi biomassa menjadi bahan bakar dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu pembakaran langsung, konversi termokimia (gasifikasi) dan konversi biokimia (pirolisis). Perbedaan tersebut terletak pada banyaknya udara (oksigen) yang dikonsumsi saat proses konversi berlangsung

## **2.2. Gasifikasi**

Teknologi gasifikasi merupakan suatu bentuk peningkatan pendayagunaan energi yang terkandung di dalam bahan biomassa melalui suatu konversi dari bahan padat menjadi gas dengan menggunakan proses degradasi termal material-material organik pada temperatur tinggi di dalam pembakaran yang tidak sempurna. Proses ini berlangsung di dalam suatu alat

yang disebut *gasifier*. Didalam alat ini dimasukkan bahan bakar biomassa untuk dibakar di dalam reaktor (ruang bakar) secara tidak sempurna. Dengan kata lain, proses gasifikasi merupakan proses pembakaran parsial bahan baku padat, melibatkan reaksi antara oksigen dengan bahan bakar padat. Uap air dan karbon dioksida hasil pembakaran direduksi menjadi gas yang mudah terbakar, yaitu karbon monoksida (CO), hidrogen (H<sub>2</sub>) dan metana (CH<sub>4</sub>). Gas-gas ini dapat dipakai sebagai pengganti BBM guna berbagai keperluan seperti menggerakkan mesin tenaga penggerak (diesel atau bensin), yang selanjutnya dapat dimanfaatkan untuk pembangkitan listrik, menggerakkan pompa, mesin giling maupun alat alat mekanik lainnya. Selain itu gas ini juga dapat dibakar langsung untuk tanur pembakaran, mesin pengering, oven dan sebagainya yang biasanya memerlukan pembakaran yang bersih.

Gasifikasi adalah suatu proses konversi bahan bakar menjadi gas yang bisa terbakar, melalui reaksi termokimia dengan menggunakan sejumlah oksigen yang kurang dari stoikiometri. Sama halnya dengan pirolisis, pada gasifikasi juga terjadi dekomposisi bahan bakar. Jika untuk pirolisis dekomposisi terjadi tanpa adanya oksigen sama sekali, namun untuk gasifikasi dibutuhkan oksigen dengan jumlah tertentu. Gasifikasi biasanya dibuat di ruangan yang bisa diatur jumlah udara masukannya yang dikenal sebagai reaktor. Udara dengan jumlah terbatas tersebut dimasukkan ke dalam reaktor melalui *fan* atau *blower*. Pada dasarnya, gas yang dihasilkan selama proses gasifikasi terdiri dari gas yang bisa terbakar seperti, karbon monoksida, hidrogen, metana, dan gas yang tidak dapat terbakar seperti karbon dioksida, nitrogen serta menghasilkan sedikit uap air.

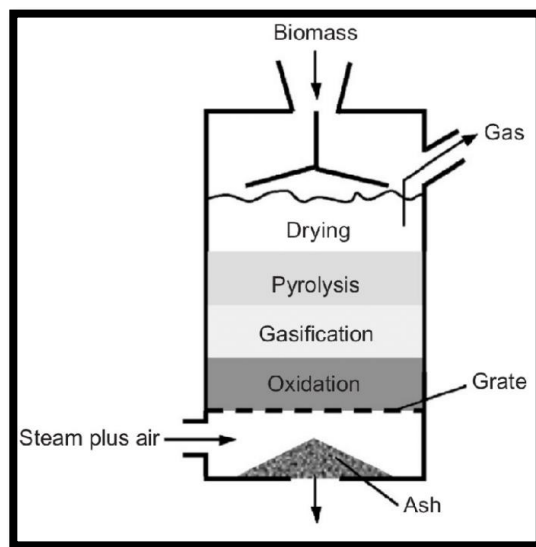
### **2.3. Tipe Reaktor Gasifikasi**

Teknologi gasifikasi yang terus berkembang mengarahkan klasifikasi teknologi sesuai dengan sistem yang berlangsung dalam menciptakan proses gasifikasi. Adapun jenis alat gasifikasi tersebut adalah:

### 2.3.1. Gasifikasi *Updraft*

Gasifikasi *updraft* merupakan reaktor gasifikasi yang umum digunakan secara luas. Ciri khas dari reaktor gasifikasi ini adalah aliran udara dari blower masuk melalui bagian bawah reaktor sedangkan aliran gas hasil gasifikasi keluar dari bagian atas reaktor sehingga arah aliran udara dan aliran gas hasil gasifikasi memiliki prinsip yang berlawanan (*counter current*).

Produksi gas dikeluarkan melalui bagian atas dari reaktor sedangkan abu pembakaran jatuh ke bagian bawah gasifier karena pengaruh gaya gravitasi dan berat jenis abu. Di dalam reaktor, terjadi zonafikasi area pembakaran berdasarkan pada distribusi temperatur reaktor gasifikasi. Zona pembakaran terjadi di dekat grate yang dilanjutkan dengan zona reduksi yang akan menghasilkan gas dengan temperatur yang tinggi. Gas hasil reaksi tersebut akan bergerak menuju bagian atas dari reaktor yang memiliki temperatur lebih rendah dan gas tersebut akan kontak dengan bahan bakar yang bergerak turun sehingga terjadi proses pirolisis dan pengeringan bahan bakar. Kedua proses tersebut yaitu proses pirolisis dan proses pengeringan terjadi pada bagian teratas dari reaktor gasifikasi.

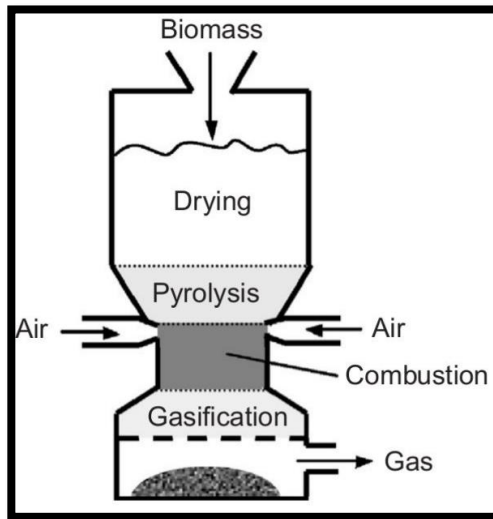


**Gambar 2.1.** Reaktor Gasifikasi *Updraft*  
Sumber: Amirhoushang, 2015

Kelebihan dari reaktor gasifikasi *updraft* adalah mekanisme kerja yang dimiliki oleh reaktor tipe ini jauh lebih sederhana dibandingkan dengan tipe yang lain. Selain itu jenis reaktor ini memiliki kemampuan untuk mengolah bahan bakar kualitas rendah dengan temperatur gas keluaran relatif rendah dan memiliki efisiensi yang tinggi akibat dari panas gas keluar reaktor memiliki temperatur yang relatif rendah. Sedangkan kelemahan reaktor gasifikasi *updraft* adalah tingkat kadar tar dalam *syngas* hasil reaksi relatif cukup tinggi sehingga mempengaruhi kualitas dari gas yang dihasilkan serta kemampuan muatan reaktor yang relatif rendah.

### **2.3.2. Gasifikasi Downdraft**

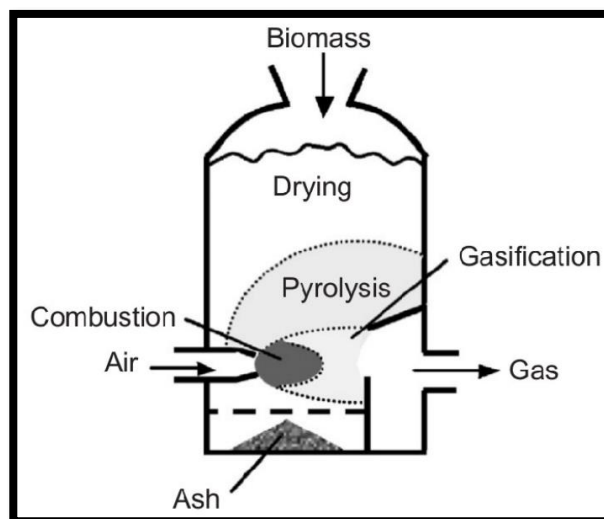
Sistem gasifikasi *downdraft* memiliki sistem yang hampir sama dengan sistem gasifikasi *updraft* yaitu dengan memanfaatkan sistem oksidasi tertutup untuk memperoleh temperatur tinggi. Bahan bakar dalam reaktor gasifikasi *downdraft* dimasukkan dari atas reaktor dan udara dari *blower* dihembuskan dari samping menuju ke zona pembakaran sedangkan *syngas* hasil pembakaran keluar melalui bagian bawah ruangan bahan bakar sehingga saat awal gas akan mengalir ke atas dan saat volume gas makin meningkat maka *syngas* mencari jalan keluar melalui daerah dengan tekanan yang lebih rendah. Sistem tersebut memiliki maksud agar *syngas* yang terbentuk akan tersaring kembali oleh bahan bakar dan melalui zona pirolisis sehingga tingkat kandungan tar dalam gas dapat dikurangi. Untuk menghindari penyumbatan gas di dalam reaktor, maka digunakan *blower* hisap untuk menarik *syngas* dan mengalirkannya ke arah burner.



**Gambar 2.2.** Reaktor Gasifikasi Downdraft  
 Sumber: Amirhoushang, 2015

### 2.3.3. Gasifikasi Crossdraft

Pada gasifikasi tipe crossdraft, udara dihembuskan melalui arah horisontal ke dalam gasifikasi. Umpan gasifikasi diumpankan melalui bagian atas atau samping reaktor.



**Gambar 2.3.** Reaktor Gasifikasi Crossdraft  
 Sumber: Amirhoushang, 2015

### 2.4. Tahapan Proses Gasifikasi

Walaupun mekanisme dari proses gasifikasi berbeda untuk setiap teknologi proses, partikel biomassa akan mengalami empat tahap utama, yaitu:



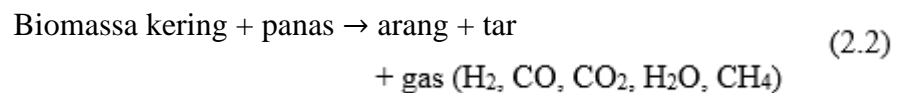
### 2.4.1. Pengeringan

Pengeringan terjadi pada temperatur sekitar 100-120°C. Pengeringan ini bertujuan menghilangkan air yang terdapat pada padatan yang direaksikan. Proses ini akan menguapkan sebagian kandungan air dalam bahan baku.



### 2.4.2. Pirolisis

Setelah pengeringan dilakukan, bahan bakar akan turun dan menerima panas sebesar 250°C - 500°C dalam kondisi tanpa udara. Produk dari hasil pirolisis terbagi menjadi produk cair (tar), produk gas (H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>), tar dan arang. Reaksi kimia pada pirolisis yaitu:



### 2.4.3. Oksidasi/ Pembakaran

Tahap oksidasi merupakan bagian proses untuk mensuplai panas yang dibutuhkan dalam proses pengeringan, pirolisis dan reduksi. Proses oksidasi (pembakaran) ini dapat mencapai temperatur 1200°C. Temperatur yang dihasilkan akan mencapai maksimal dikarenakan distribusi oksigen yang merata pada zona oksidasi. Reaksi kimia yang terjadi pada zona pembakaran adalah sebagai berikut:



Reaksi pembakaran lain yang berlangsung adalah oksidasi hidrogen yang terkandung dalam bahan bakar membentuk kukus. Reaksi yang terjadi adalah:



#### 2.4.4. Reduksi

Pada zona reduksi panas yang berlangsung mencapai suhu 600°C - 900°C. Pada zona ini terjadi beberapa reaksi kimia yang merupakan proses penting terbentuknya beberapa senyawa yang berguna untuk menghasilkan produk gas seperti H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, dan CH<sub>4</sub>. Berikut reaksi kimia di zona reduksi:

a) *Boudouard reaction*

*Boudouard reaction* merupakan reaksi antara CO<sub>2</sub> yang terjadi di dalam gasifier dengan arang untuk menghasilkan CO.



b) *Shift conversion*

*Shift conversion* merupakan reaksi reduksi CO<sub>2</sub> oleh steam untuk memproduksi H<sub>2</sub>. Reaksi ini dikenal sebagai *water-gas shift* yang menghasilkan peningkatan perbandingan H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> pada gas produser untuk pembuatan syngas.



c) *Water-gas reaction*

*Water-gas reaction* merupakan reaksi oksidasi parsial karbon yang dapat berasal dari bahan bakar padat maupun dari sumber yang berbeda. Bahan bakar ini dapat berupa uap air yang dicampur dengan udara dan uap yang diproduksi dari penguapan air.



d) *CO Methanation*

Methanation merupakan reaksi pembentukan gas CH<sub>4</sub>.



Komposisi gas hasil gasifikasi tentu saja sangat tergantung pada komposisi biomassa. Komposisi gas hasil gasifikasi bisa jauh berbeda antara

biomassa, arang atau batubara. Gasifikasi arang atau batubara akan menghasilkan gas dengan kandungan CO lebih banyak daripada biomassa. Jika diinginkan gas hasil mengandung banyak H<sub>2</sub>, gasifikasi dilakukan dengan agen gasifikasi H<sub>2</sub>O (*steam gasification*).

Jadi, jenis dan komposisi agen gasifikasi sangat menentukan komposisi gas hasil gasifikasi. Gasifikasi dengan udara (21% O<sub>2</sub> dan 79% N<sub>2</sub>) akan menghasilkan gas dengan kandungan N<sub>2</sub> tinggi, dan panas pembakarannya antara 3000-5000 kJ/Nm<sup>3</sup>. Gas ini disebut gas produser (*producer gas*, atau *low heating value gas*). Gas produser tidak ekonomis untuk ditransportasikan, karena itu pemakaiannya setempat, misalnya gas langsung dimasukkan ke motor bakar untuk mengganti bahan bakar cair.

Jika gas O<sub>2</sub> digunakan sebagai agen gasifikasi, prosesnya menghasilkan gas dengan sedikit kandungan N<sub>2</sub>. Tetapi gasifikasi dengan O<sub>2</sub> memiliki resiko terjadinya temperatur tinggi yang dapat merusak bagian dalam *gasifier*. Gasifikasi dengan kukus menghasilkan gas dengan kandungan H<sub>2</sub> tinggi, dengan HHV mencapai 10.000 kJ/Nm<sup>3</sup>, Gas semacam ini sering disebut *medium heating value gas* (sebagai pembanding, HHV gas alam sekitar 30000 kJ/Nm<sup>3</sup>).

Sebagaimana sifat reaksinya, agen gasifikasi sering berupa campuran kukus (*steam*) dan O<sub>2</sub>. Kedua agen gasifikasi ini menjadikan reaksi gasifikasi menjadi autotermal (tidak endotermik dan tidak eksotermik), dan temperatur gasifikasi dapat diatur dengan baik.

## **2.5. Faktor yang Mempengaruhi Proses Gasifikasi**

### **2.5.1. Karakteristik Biomassa**

Tidak semua biomassa baik untuk dikonversi menjadi gas mampu bakar (*flammable syngas*) dengan cara gasifikasi. Biomassa dapat diklasifikasikan baik atau tidak baik untuk dikonversi menjadi gas mampu bakar (*flammable syngas*) dapat dilihat dari beberapa parameter yaitu:

a) Kandungan energi

Setiap biomassa memiliki kandungan energi yang berbeda beda. Energi dalam biomassa akan mempengaruhi energi produk *flammable syngas*. Semakin tinggi kandungan energi yang dimiliki biomassa akan semakin tinggi pula energi produk gas yang dihasilkan.

b) Kadar air

Kandungan air pada bahan biomassa tergantung pada jenis biomassa namun untuk pengkondisian kandungan air dalam biomassa dapat dikurangi dengan cara pengeringan. Kandungan air dalam biomassa dapat mengganggu proses gasifikasi. Kandungan air dapat mengurangi energi panas dalam *gasifier* karena harus menguapkan air pada biomassa. Uap air yang terbentuk  $H_2O$  juga akan bereaksi dengan produk gas yang dihasilkan sehingga kandungan air biomassa juga mempengaruhi produk *flammable syngas*. Kandungan air biomassa dalam gasifikasi umumnya harus dibawah 20%.

c) Debu

Pada semua proses pembakaran biomassa akan menghasilkan debu. Debu harus dikeluarkan secara rutin dalam *gasifier* karena dapat menyumbat *gasifying agent* ataupun gas mampu bakar yang akan keluar *gasifier*. Setiap pengeluaran debu dari *gasifier* harus menghentikan proses gasifikasi. Sehingga tidak akan efisien jika selama proses berlangsung harus mengeluarkan debu dalam beberapa waktu

d) Tar

Tar adalah campuran hidrokarbon dan karbon bebas yang diperoleh dari pembakaran biomassa, tar berbentuk cair kental dan berwarna hitam. Dalam proses gasifikasi tar dapat

menyumbat saluran gas. Jika *syngas* yang banyak mengandung tar digunakan untuk bahan bakar motor bensin, tar dapat merusak ruang bakar karena tar bersifat korosif.

### 2.5.2. Jenis Media Gasifikasi

Salah satu yang berpengaruh dalam gasifikasi adalah media gasifikasi (*gasifying agent*). *Gasifying agent* utama yang sering digunakan adalah oksigen ( $O_2$ ), uap air ( $H_2O$ ), dan udara. Jika *gasifying agent* yang digunakan adalah oksigen  $O_2$  dan ketika oksigen yang disuplai kurang, maka produk yang dihasilkan adalah CO dan ketika oksigen yang diberikan berlebih akan menghasilkan  $CO_2$ . Jika jumlah oksigen ( $O_2$ ) yang diberikan melebihi keadaan stoikiometri maka proses gasifikasi akan bergeser menjadi pembakaran biasa dan produk yang dihasilkan adalah gas sisa (*flue gas*). Tidak satupun *flue gas* dapat dibakar kembali meskipun dilakukan perlakuan seperti seperti perlakuan panas.

Jika yang digunakan untuk *gasifying agent* adalah uap air ( $H_2O$ ) maka produk gas akan berisi lebih banyak hidrogen per unit karbon. Jika udara yang digunakan untuk *gasifying agent* maka nitrogen akan sangat melemahkan produk gas karena udara mengandung kurang lebih 79 % nitrogen ( $N_2$ ) dan oksigen ( $O_2$ ) 21 % (fraksi mol atau volume). Pilihan dari *gasifying agent* akan memberikan pengaruh pada nilai kalor pembakaran (*heating value*) dari gas.

<i>Medium</i>	<i>Heating Value (Mj/Nm<sup>3</sup>)</i>
<i>Air</i>	4-7
<i>Steam</i>	10-18
<i>Oxygen</i>	12-28

**Tabel 2.1.** Rentang *heating value* syngas dengan berbagai jenis media

Sumber: Prabir Basu, 2010

*Gasifying agent* yang menghasilkan heating value yang terbesar adalah oksigen di ikuti dengan uap air dan terakhir udara. Udara menghasilkan heating value rendah karena udara mengandung 79 % nitrogen. Penelitian yang lain juga membuktikan bahwa nilai *calorific value* (CV) antara *syngas* hasil gasifikasi dengan menggunakan *gasifying agent* oksigen lebih besar dibandingkan dengan *gasifying agent* udara.

Feedstock	Gasifying Agent	Syngas composition(% mole)						CV(MJ/Kg)
		H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	
Indian coal	Air	8.8	41.8	0.623	0.018	17.3	32	12.59
	Oxygen	15.3	60.1	0.003	0.492	0.23	0.8	19.55
Rice Husk	Air	22.9	18.4	13.0	8.3	0.8	36.6	5.49
	Oxygen	36.5	21.8	20.2	19.9	0.6	0.4	9.14
Wood pellets	Air	32.1	29.8	7.9	5.7	0.9	23.6	9.22
	oxygen	4.07	37.8	11.3	8.1	1.7	0.9	13.19

**Tabel 2.2.** Perbandingan komposisi syngas antara *gasifying agent* udara dan oksigen dengan berbagai bahan

Sumber: Vaijanath N. Raibhole dan Sapali SN, 2012

## 2.6. Parameter Pengujian Gasifikasi

### 2.6.1. Laju Konsumsi Bahan Bakar (*Fuel Consumption Rate*)

Laju konsumsi bahan bakar adalah jumlah bahan bakar bahan bakar yang digunakan dalam operasi reaktor dibagi dengan waktu operasi. Ini dihitung menggunakan rumus:

$$FCR \text{ atau } \dot{m}_f = \frac{\text{Massa biomassa yang digunakan (kg)}}{\text{Waktu operasi (s)}} \quad (2.9)$$

### 2.6.2. Laju Alir Udara

Laju alir udara adalah massa udara yang mengalir per satuan waktu kedalam reaktor. Ini dihitung menggunakan rumus:

$$\dot{m}_a = \rho_{udara}(\text{kg/m}^3) \times A_{pipa}(\text{m}^2) \times V_u(\text{m/s}) \quad (2.10)$$

Ket:

$\dot{m}_a$  = laju alir udara, (kg/s)

$\rho_{udara}$  = massa jenis udara, (1.2 kg/m<sup>3</sup>)

$A_{pipa}$  = luas pipa udara *supply*, (m<sup>2</sup>)

$V_u$  = kecepatan udara *supply*, (m/s)

### 2.6.3. Laju Alir Volumetrik Syngas

Laju alir volumetrik syngas adalah volume fluida yang mengalir per satuan waktu. Ini dihitung menggunakan rumus:

$$Q_s = A_{selang\ syngas}(m^2) \times V_s(m/s) \quad (2.11)$$

Ket:

$Q_s$  = laju alir volumetrik syngas, (m<sup>3</sup>/s)

$A_{selang\ syngas}$  = luas selang syngas, (m<sup>2</sup>)

$V_s$  = kecepatan syngas, (m/s)

### 2.6.4. Rasio Udara Bahan Bakar Aktual (*Air Fuel Ratio Actual*)

Rasio udara bahan bakar aktual (*AFR actual*) merupakan perbandingan antara laju alir udara aktual terhadap laju alir bahan bakar aktual. Untuk menghitung AFR dalam 1 kali operasi dengan waktu tertentu dapat menggunakan persamaan berikut ini

$$AFR_{act} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \quad (2.12)$$

### 2.6.5. Rasio Ekivalen (*Equivalence Ratio*)

Rasio ekivalen atau *equivalence ratio* atau adalah perbandingan antara AFR aktual dibandingkan dengan AFR stoikiometri. Jika  $ER < 1$  disebut pembakaran kaya (*rich combustion*). Jika  $ER = 1$  disebut pembakaran stoikiometri. Jika  $ER > 1$  disebut pembakaran miskin (*lean combustion*). Pada gasifikasi udara yang digunakan umumnya 20% - 40% dari jumlah udara stoikiometri atau rasio ekivalennya berkisar antara 0.2 hingga 0.4. Ini dihitung menggunakan rumus:

$$ER = \frac{AFR_{act}}{AFR_{stoi}} \quad (2.13)$$

### 2.6.6. Panas Sensibel (*Sensible Heat*)

Panas sensibel adalah jumlah energi panas yang diperlukan untuk menaikkan temperatur air. Ini diukur sebelum dan sesudah air mencapai temperatur pendidihan. Ini dihitung menggunakan rumus:

$$SH = \frac{M_{A1}(kg) \times C_p(kJ/kg \cdot ^\circ C) \times \Delta T (^\circ C)}{t_A (s)} \quad (2.14)$$

Ket:

SH = panas sensibel, (kJ/s)

M<sub>A1</sub> = massa air, (kg), (1kg/liter)

C<sub>p</sub> = panas jenis air, (kJ/kg.°C)

T<sub>A2</sub> = temperatur air mendidih, (100°C)

T<sub>A1</sub> = temperatur air sebelum mendidih, (27-30°C)

t<sub>A</sub> = waktu mendidihkan air, (detik)

### 2.6.7. Panas Laten (*Laten Heat*)

Panas laten adalah jumlah energi panas yang digunakan dalam menguapkan air. Ini dihitung menggunakan rumus:

$$LH = \frac{W_e(kg) \times H_{fg}(kJ/kg)}{Waktu operasi (s) - t_A (s)} \quad (2.15)$$

Ket:

LH = panas laten, (kJ/s)

W<sub>e</sub> = berat air yang diuapkan, (kg)

H<sub>fg</sub> = panas laten air, (kJ/kg)

### 2.6.8. Input Energi Panas

Input energi panas adalah jumlah energi panas yang tersedia dalam bahan bakar. Ini dihitung menggunakan rumus:



$$Q_{in} = \frac{HVF(kJ/kg) \times M_b (kg)}{Waktu Operasi (s)} \quad (2.16)$$

Ket:

$Q_{in}$  = energi panas tersedia dalam bahan bakar, (kJ/s)

HVF = nilai kalor biomassa, (kJ/kg)

$M_b$  = massa biomassa, (kg)

### 2.6.9. Efisiensi Termal

Efisiensi termal adalah rasio energi yang digunakan dalam pendidihan dan dalam penguapan air terhadap energi panas yang tersedia dalam bahan bakar. Ini dihitung dengan rumus:

$$TE = \frac{SH + LH}{Q_{in}} \times 100\% \quad (2.17)$$

Ket:

TE = efisiensi termal, (%)

SH = panas sensibel, (kJ/s)

LH = panas laten, (kJ/s)

$Q_{in}$  = energi panas tersedia dalam bahan bakar, (kJ/s)