



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**KARAKTERISTIK GASIFIKASI PADA *UPDRAFT DOUBLE GAS OUTLET*  
*GASIFIER* MENGGUNAKAN BAHAN BAKAR KAYU KARET**

**SKRIPSI**

**GUSWENDAR RINOVIANTO**

**0806454771**

**FAKULTAS TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN**

**DEPOK**

**JULI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**KARAKTERISTIK GASIFIKASI PADA *UPDRAFT DOUBLE GAS OUTLET*  
*GASIFIER* MENGGUNAKAN BAHAN BAKAR KAYU KARET**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**GUSWENDAR RINOVIANTO**

**0806454771**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JULI 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Guswendar Rinovianto**

**NPM : 0806454771**

**Tanda Tangan : **

**Tanggal : 4 Juli 2012**

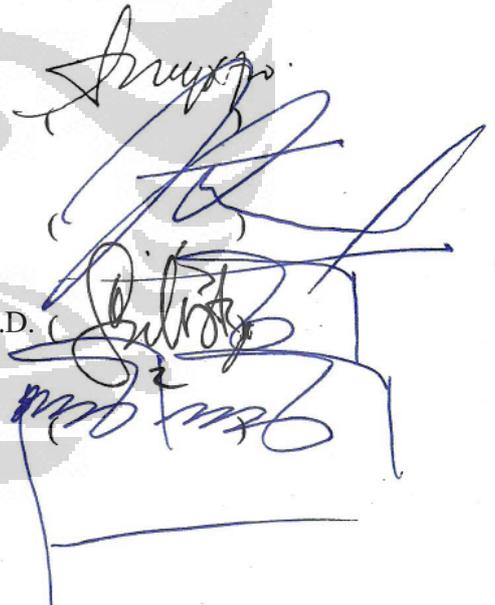
## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Guswendar Rinovianto  
NPM : 0806454771  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : Karakteristik Gasifikasi pada *Updraft Double Gas Outlet Gasifier*  
Menggunakan Bahan Bakar Kayu Karet

**Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagaibagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia**

### Dewan Penguji

Pembimbing : Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M.Eng  
Penguji : Prof. Dr. I Made K Dhiputra Dipl. Ing,  
Penguji : Prof. Ir. Yulianto S. Nugroho M.,Sc., Ph.D.  
Penguji : Prof. Dr. Ir. Bambang Sugiarto M.Eng



Ditetapkan di : Depok (Universitas Indonesia)  
Tanggal : 4 Juli 2012

## KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi tentang gasifikasi ini, sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar sarjana teknik.

Penulisan Skripsi ini ditujukan untuk lebih memperdalam pengetahuan lagi tentang teknologi gasifikasi dalam upayanya untuk studi pemanfaatan energi alternatif pendamping energi fosil yang kian hari kian menipis sehingga dapat dijadikan sebagai rujukan untuk penelitian selanjutnya.

Penulis menyadari bahwa penyusunan Skripsi ini tidak akan terwujud tanpa bantuan dari berbagai pihak. Melalui kesempatan ini, penulis menyampaikan rasa terima kasih dan penghargaan sebesar-besarnya kepada :

1. Muji Waluyo (bapak), Heni Purwaningsih (mama), Septian Derrys Arvianto dan Dava Kurnia Trivianto (adik), serta keluarga penulis lainnya yang tidak henti-hentinya memberikan semangat, doa, dan dukungan baik moril maupun materiil dalam penyelesaian skripsi ini.
2. Dr. Ir. Adi Surjosatyo., M. Eng, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikirannya untuk mengarahkan dan membimbing penulis beserta tim dalam penyusunan Skripsi ini.
3. Prof. Dr. I Made K Dhiputra Dipl.-Ing, selaku pembimbing akademis yang senantiasa memberikan pengarahan selama penulis menuntut pendidikan di Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia terutama berkaitan dengan permasalahan akademis.
4. Seluruh staf pengajar Departemen Teknik Mesin UI atas bimbingannya selama periode kuliah.
5. Fajri Vidian, S.T., M.T, selaku asisten dosen pembimbing sekaligus rekan penelitian yang telah banyak membantu penulis baik dalam hal penelitian maupun penarikan analisa sebagai hasil akhir dari riset penelitian yang merupakan bagian dari disertasi program S3 beliau.
6. Susan Ananda Putri yang telah banyak memberi semangat serta doa demi kelancaran penyusunan Skripsi ini.

7. Ardyan Humala Gumanti, Priza Karunia, Irvan Nurtanio, Arya Yuwana, Eggi Ikhsan, dan Wiweko sebagai rekan satu bimbingan yang telah bahu membahu mengerjakan proyek gasifikasi maupun FBC, serta sebagai rekan diskusi yang baik selama penyusunan skripsi ini.
8. Mas Suryadi Mas Syarief, dan karyawan DTM lain yang telah banyak membantu dalam persiapan sebelum dan sesudah penelitian di laboratorium Termodinamika proyek Gasifikasi.
9. Hernadi dan rekan-rekan di laboratorium lantai dua dan lantai tiga yang telah banyak penulis repotkan dengan peminjaman laptop maupun komputernya untuk kelengkapan penulisan dan pengolahan data Skripsi.
10. Rekan-rekan Termonator yang telah banyak mendukung selama 4 tahun ini dalam hal akademis maupun masalah-masalah di luar kampus
11. Rekan-rekan Mesin dan Kapal angkatan 2008 yang telah banyak membantu selama 4 tahun baik dari sisi akademis maupun non-akademis.

Segala kebaikan dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis, semoga Allah SWT berkenan melimpahkan rahmat-Nya, Amin.

Penulis menyadari bahwa Skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan dengan segala keterbatasan dan kekurangan yang terdapat di dalamnya. Semoga karya yang jauh dari sempurna ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak yang membacanya.

Depok, Juli 2012

Penulis

## HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

### TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

---

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Guswendar Rinovianto  
NPM : 0806454771  
Program Studi : Teknik Mesin  
Departemen : Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

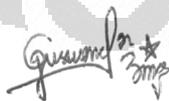
demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia, **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

#### **Karakteristik Gasifikasi pada *Updraft Double Gas Outlet Gasifier* Menggunakan Bahan Bakar Kayu Karet**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagaipenulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok (Universitas Indonesia)  
Pada tanggal : 4 Juli 2012  
Yang menyatakan :



( Guswendar Rinovianto )

## ABSTRAK

Nama : Guswendar Rinovianto  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul : Karakteristik Gasifikasi pada *Updraft Double Gas Outlet Gasifier* Menggunakan Bahan Bakar Kayu Karet

Sistem gasifikasi merupakan salah satu contoh pemanfaatan biomassa sebagai 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 di dalam reaktor gasifikasi untuk dimanfaatkan selanjutnya sebagai sumber energi. Riset kali ini akan menguji sistem gasifikasi *updraft* dengan memodifikasinya menjadi suatu sistem dengan dua daerah keluaran yaitu di daerah atas *gasifier* seperti sistem konvensional dan di daerah bawah *gasifier* dalam upaya untuk mengurangi kandungan tar pada gas mampu bakarnya. Penelitian ini menggunakan *blower* dengan laju alir udara yang dihembuskan masuk ke reaktor adalah sebesar 108 lpm dan hasil dari pengujian akan dibandingkan dengan sistem konvensional sehingga didapat karakteristik pengujian. Hasil dari pengujian tersebut menunjukkan bahwa gas mampu bakar dapat keluar dari kedua buah pipa aliran dengan nilai LHV masing-masing adalah sebesar 4,470 MJ/m<sup>3</sup> untuk daerah atas dan 4,082 MJ/m<sup>3</sup> untuk daerah bawah dimana komposisi gas mampu bakar yang keluar dari daerah atas dan bawah memiliki nilai presentase yang kurang lebih sama yaitu untuk CO adalah sebesar 22,695% berbanding 20,805%, gas H<sub>2</sub> sebesar 9,835% berbanding 9,05%, dan gas CH<sub>4</sub> sebesar 2,66% berbanding 2,38%. Sedangkan nilai yang didapat dari sistem konvensional yaitu sebesar 4,473 MJ/m<sup>3</sup> dengan komposisi gas CO, H<sub>2</sub>, dan CH<sub>4</sub> sebesar 21,92%, 10,51%, dan 2,74%. Efisiensi *cold gas* untuk sistem dengan dua daerah keluaran memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan sistem konvensional yaitu 53,087% berbanding 46,519%.

**Kata Kunci** : Gasifikasi, Kayu Karet, Tar, *Double Gas Outlet*, dan *Syngas*

## ABSTRACT

Name : Guswendar Rinovianto  
Major : Mechanical Engineering  
Title : Gasification Characteristics of an Updraft Double Gas Outlet *Gasifier* Using Rubber Wood as a Fuel

Gasification system is one example of the utilization of biomass for energy. Change solid fuel gasification combustible gas like CO, H<sub>2</sub>, and CH<sub>4</sub> because of the reaction occurring in the gasification reactor to be used later as an energy source. This research will test the updraft gasification system by modifying it into a system with two outputs, namely in the area of the *gasifier* as a conventional system and the area under the *gasifier* in an effort to reduce the tar content in gas can burn. This study uses a blower with a flow rate of exhaled air into the reactor amounted to 108 lpm and the results of testing will be compared with the conventional system in order to get the characteristics of the test. The results of these tests indicate that the gas could be burned out of both pieces of pipe flow with LHV value of each is equal to 4.470 MJ/m<sup>3</sup> to the top and bottom area of 4.082 MJ/m<sup>3</sup> for which the fuel gas composition capable of coming out of the area and below the percentage value that is approximately the same for CO is equal to 22.695% to 20.805%, H<sub>2</sub> gas of 9.835% versus 9.05%, and CH<sub>4</sub> gas at 2.66% versus 2.38%. While the value obtained from the conventional system that is equal to 4.473 MJ/m<sup>3</sup> with gas composition CO, H<sub>2</sub>, and CH<sub>4</sub> at 21.92%, 10.51%, and 2.74%. Cold gas efficiency for systems with two output areas has a higher value than the conventional system is 53.087% to 46.519%.

**Keywords:** *Gasification, Rubber Wood, Tars, Double Gas Outlet, and Syngas*

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
HALAMAN PERSETUJUAN.....	vii
ABSTRAK.....	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL .....	xiii
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Pembatasan Masalah.....	5
1.5 Metodologi Penelitian.....	6
1.6 SistematikaPenulisan.....	7
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Pengertian Gasifikasi.....	9
2.1.1 Jenis-Jenis Alat Gasifikasi.....	10
2.1.4 Proses-Proses Pada Reaktor Gasifikasi.....	17
2.2. Biomassa.....	22
2.2.1 KayuKaret.....	23
2.3 PerhitunganDasarGasifikasi.....	27
2.3.1 Perhtungan Kesetimbangan Massa ( <i>Mass Balance</i> ).....	28
2.3.2 LajuAliranUdaraGasifikasi.....	29
2.3.3 Perhitungan Kesetimbangan Energi ( <i>Energy Balance</i> ).....	29
2.4 AlatUkur Orifis.....	34
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b>	
3.1 Garis Besar Pengujian .....	38
3.2 Skematik Alat Pengujian.....	39
3.3 Pengujian Karakteristik Operasi Sistem <i>Double Gas Outlet</i> .....	40
3.3.1 Persiapan Pengujian.....	41
3.3.1.1 Persiapan Bahan Bakar.....	41
3.3.1.2 Persiapan Alat Ukur.....	42
3.3.1.3 Persiapan Gasifikasi <i>Updraft</i> .....	46
3.4 Prosedur Pengujian.....	47
3.4.1 Persiapan Awal .....	47
3.4.2 Pembakaran Awal ( <i>pre-Heat</i> ) .....	49

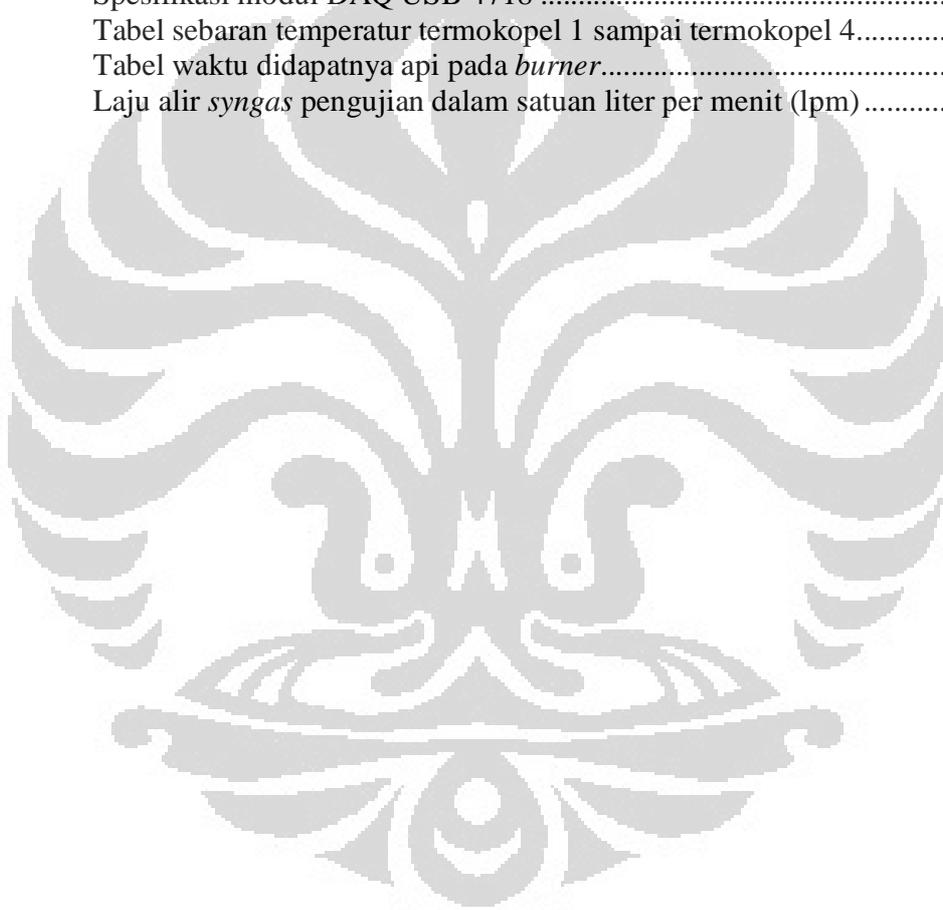
3.4.3 Tahapan Pengujian.....	49
3.4.4 Selesai Pengujian .....	51
3.4.5 Alur Kerja Pengujian .....	52
3.5 Prosedur Pengukuran dan Perhitungan Hasil Pengujian.....	53
3.5.1 Pengukuran Distribusi Temperatur.....	53
3.5.2 Pengukuran <i>Flowrate</i> Udara dan <i>Syngas</i> .....	53
3.5.3 Perhitungan Laju Pemakaian Bahan Bakar.....	54
3.5.4 Perhitungan Massa Jenis Gas .....	54
3.5.5 Perhitungan Nilai Kalor <i>Syngas</i> .....	54
3.5.6 Perhitungan <i>Cold Gas Efficiency</i> .....	54
<b>BAB IV HASIL DAN ANALISA</b>	
4.1. Kondisi Operasional Pengujian .....	55
4.2. Kondisi Peralatan Selama Pengujian.....	56
4.2.1 Sambungan Pada Gasifikasi <i>Updraft</i> .....	57
4.2.2 Pipa Aliran <i>Syngas</i> .....	57
4.3 Perbandingan Karakteristik Sistem Gasifikasi <i>Updraft</i> Sistem <i>Double Gas Outlet</i> dengan Sistem Gasifikasi <i>Updraft</i> Konvensional dalam Pengujian 1 <i>Batch</i> .....	58
4.3.1. Distribusi Temperatur.....	58
4.3.1.1 Zonafikasi Daerah-Daerah Gasifikasi.....	60
4.3.2 <i>Flowrate Syngas</i> Pengujian .....	63
4.3.3 Parameter Gasifikasi.....	66
4.3.3.1 Laju Pemakaian Bahan Bakar .....	66
4.3.3.2 Ekuivalensi Rasio.....	68
4.3.3.3 Komposisi Gas.....	70
4.3.3.4 LHV <i>Syngas</i> .....	72
4.3.3.5 Efisiensi <i>Cold Gas</i> .....	73
4.4 Perbandingan Karakteristik Operasi Sistem <i>Double Gas Outlet</i> dalam Pengujian 2 <i>Batch</i> .....	74
4.4.1 Distribusi Temperatur.....	74
4.4.2 <i>Flowrate Syngas</i> Pengujian.....	76
4.4.3 Karakteristik Pengujian .....	77
4.4.3.1 Durasi Operasional.....	77
4.4.3.2 Durasi <i>Flame</i> .....	78
4.4.3.3 Jumlah Arang dan Abu .....	79
4.5 Visualisasi Api pada <i>Burner</i> Alat Pengujian .....	79
4.5.1 Visualisasi Api pada Pengujian 1 <i>Batch</i> Sistem <i>Double Outlet</i> dengan Sistem Konvensional.....	80
4.5.2 Visualisasi Api pada Pengujian 2 <i>Batch</i> .....	81
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1 Kesimpulan .....	82
5.2 Saran.....	83
<b>DAFTAR REFERENSI</b> .....	85
<b>LAMPIRAN</b> .....	86

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	<i>Moving bed gasifier</i> .....	11
<b>Gambar 2.2</b>	<i>Fluidized bed gasifier</i> .....	11
<b>Gambar 2.3</b>	<i>Entrained flow gasifier</i> .....	12
<b>Gambar 2.4</b>	Reaktor gasifikasi <i>updraft</i> .....	13
<b>Gambar 2.5</b>	Reaktor gasifikasi <i>downdraft</i> .....	14
<b>Gambar 2.6</b>	4 Tahapan pada proses gasifikasi .....	18
<b>Gambar 2.7</b>	Segitiga api .....	22
<b>Gambar 2.8</b>	Aliran energi masuk dan keluar reaktor gasifikasi.....	30
<b>Gambar 2.9</b>	Mekanisme kerja orifis .....	34
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram Alur Penelitian .....	37
<b>Gambar 3.2</b>	Diagram Alur Pengujian .....	38
<b>Gambar 3.3</b>	Skematik Pengujian.....	39
<b>Gambar 3.4</b>	Komponen Utama Sistem.....	40
<b>Gambar 3.5</b>	Perlakuan Bahan Bakar.....	41
<b>Gambar 3.6</b>	Pelat orifis .....	42
<b>Gambar 3.7</b>	Manometer U .....	43
<b>Gambar 3.8</b>	Timbangan analog dan timbangan digital.....	44
<b>Gambar 3.9</b>	Modul DAQ USB 4718 dan tampilan temperatur.....	45
<b>Gambar 3.10</b>	Termokopel tipe-K dan pemasangannya pada reaktor gasifikasi.....	46
<b>Gambar 3.11</b>	Kondisi <i>burner</i> sebelum dan setelah terjadi eksperimen gasifikasi .....	47
<b>Gambar 3.12</b>	Kerak tar yang terdapat dalam pipa aliran <i>syngas</i> .....	47
<b>Gambar 4.1</b>	Metode gasifikasi <i>updraft</i> dengan sistem <i>double gas outlet</i> .....	55
<b>Gambar 4.2</b>	Kondisi pipa aliran <i>syngas</i> .....	58
<b>Gambar 4.3</b>	Distribusi temperatur pengujian <i>double gas outlet</i> .....	59
<b>Gambar 4.4</b>	Rataan distribusi temperatur .....	61
<b>Gambar 4.5</b>	<i>Flowrate</i> rata-rata pengujian .....	64
<b>Gambar 4.6</b>	Indikasi adanya kandungan uap air .....	66
<b>Gambar 4.7</b>	Laju pemakaian bahan bakar .....	67
<b>Gambar 4.8</b>	Perbandingan durasi <i>flame</i> pengujian .....	68
<b>Gambar 4.9</b>	Perbandingan ekivalensi rasio pengujian.....	69
<b>Gambar 4.10</b>	Perbandingan komposisi gas .....	71
<b>Gambar 4.11</b>	Komposisi gas sistem konvensional .....	71
<b>Gambar 4.12</b>	LHV <i>syngas</i> pengujian.....	72
<b>Gambar 4.13</b>	Perbandingan efisiensi <i>cold gas</i> .....	73
<b>Gambar 4.14</b>	Distribusi temperatur pengujian 2 <i>batch</i> .....	75
<b>Gambar 4.15</b>	<i>Flowrate syngas</i> metode 2 <i>batch</i> .....	76
<b>Gambar 4.16</b>	Durasi operasional pengujian 2 <i>batch</i> .....	78
<b>Gambar 4.17</b>	Durasi <i>flame</i> pengujian 2 <i>batch</i> .....	78
<b>Gambar 4.18</b>	Jumlah arang dan abu pengujian 2 <i>batch</i> .....	79
<b>Gambar 4.19</b>	Visualisasi api pada pengujian 1 <i>batch</i> .....	80
<b>Gambar 4.20</b>	Visualisasi api pada pengujian 2 <i>batch</i> sistem <i>double outlet</i> .....	81

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Parameter kerja alat gasifikasi.....	15
<b>Tabel 2.2</b>	Produksi kandungan tar pada alat gasifikasi.....	16
<b>Tabel 2.3</b>	Data perkebunan besar di Indonesia (satuan dalam ribu Ha).....	25
<b>Tabel 2.4</b>	Produksi perkebunan besar di Indonesia ( dalam satuan ribu Ha).....	25
<b>Tabel 2.5</b>	Data pengujian spesimen kayu berdasarkan analisis <i>proximate</i> dan <i>ultimate</i> .....	26
<b>Tabel 2.6</b>	Tabel LHV <i>Syngas</i> .....	34
<b>Tabel 3.1</b>	Spesifikasi timbangan digital .....	44
<b>Tabel 3.2</b>	Spesifikasi modul DAQ USB 4718 .....	45
<b>Tabel 4.1</b>	Tabel sebaran temperatur termokopel 1 sampai termokopel 4.....	62
<b>Tabel 4.2</b>	Tabel waktu didapatnya api pada <i>burner</i> .....	65
<b>Tabel 4.3</b>	Laju alir <i>syngas</i> pengujian dalam satuan liter per menit (lpm).....	77



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Indonesia sebagai negara dengan jumlah populasi terbesar kedua di dunia dan dikenal sebagai negara kepulauan yang terletak di daerah tropis memiliki potensi ekonomi yang besar untuk masa yang akan datang. Jumlah penduduk yang semakin meningkat dari tahun ke tahun dan penggunaan energi yang semakin besar seiring dengan percepatan pembangunan di setiap daerah mendorong Indonesia menjadi negara dengan tingkat konsumsi energi yang tinggi di dunia.

Data yang dihimpun oleh Kementerian ESDM berdasarkan pada Ditjen Migas, cadangan minyak bumi di Indonesia yang telah ada adalah sebesar 4,04 miliar barrel dan cadangan potensial sebanyak 3,69 miliar barrel. Sedangkan tingkat produksi minyak bumi dan kondensatnya di Indonesia untuk data sementara di tahun 2011 adalah sebesar 329595 barrel dan apabila dilihat dari tren tahun sebelumnya dimana produksi keseluruhan di tahun 2010 sebesar 344836 barrel dan pada tahun 2008 dan 2009 masing-masing adalah sebesar 357500 ribu barel dan 346313 ribu barrel, maka dapat dilihat bahwa produksi minyak Indonesia mengalami penurunan sehingga untuk pemenuhan kebutuhan konsumsi dalam negeri sejumlah 388241 SBM (Setara Barrel Minyak) pada tahun 2010 harus dipenuhi dari produk impor yang didatangkan dari negara luar yaitu sebesar 23633 kiloliter pada tahun yang sama. Apabila kondisi tersebut terus berlangsung dalam jangka waktu yang lama, maka dapat dipastikan Indonesia akan menjadi negara yang selalu bergantung dari pasokan energi dari luar sehingga dapat menghambat pembangunan yang tengah digalakkan oleh pemerintah Indonesia. Hal ini dapat terjadi karena Indonesia tidak memiliki cukup sumber daya minyak untuk memenuhi kebutuhan domestiknya sedangkan tingkat permintaan BBM dalam negeri terus meningkat, yaitu sebesar 374691 SBM di tahun 2006,

383453 SBM pada 2007, 388107 SBM di 2008, dan melonjak menjadi 388241 SBM pada 2010.

Berdasarkan data tersebut, jika tidak ditemukan cadangan minyak baru untuk meningkatkan produksi maka tingkat permintaan akan minyak bumi dalam negeri tidak akan terpenuhi dan dapat menimbulkan krisis energi yang semakin meluas. Untuk itu, dalam upaya untuk mengurangi ketergantungan akan energi fosil di masa yang akan datang, perlu diadakannya penelitian untuk mengetahui potensi energi alternatif yang mungkin dapat menjadi basis utama pemanfaatan energi di Indonesia terutama dalam konteksnya dengan pemanfaatan energi yang berhubungan dengan sumber daya alam yang terbarukan sehingga masyarakat ke depannya tidak perlu cemas dengan fakta yang terjadi bahwa cadangan energi fosil di bumi semakin menipis seiring dengan pemanfaatannya yang semakin masif yang dimulai sejak terjadinya revolusi industri di Inggris pada tahun 1966.

Semakin menipisnya cadangan minyak bumi di Indonesia memicu percepatan pemberdayaan energi alternatif sebagai tumpuan pemanfaatan energi di Indonesia di masa yang akan datang. Salah satu energi alternatif yang memiliki potensi untuk dikembangkan di Indonesia adalah sumber energi yang berasal dari makhluk hidup atau lazim disebut dengan *biomass*. *Biomass* sebagai basis utama energi alternatif memiliki keunikan tersendiri. Hal ini tidak lepas dari komoditas setiap negara dalam menghasilkan energi berbasis *biomass* berbeda-beda tergantung pada komoditas yang banyak tersebar di negara tersebut sehingga pemanfaatan energinya dapat disesuaikan dengan keunggulan masing-masing daerahnya. Kayu karet sebagai contoh *biomass* memiliki potensi untuk dikembangkan di Indonesia. Dari sisi ketersediaan bahan baku, menurut data dari Badan Pusat Statistik bahwa luas perkebunan karet di Indonesia termasuk dalam skala perkebunan besar, hanya kalah dari perkebunan kelapa sawit untuk jangka waktu antara 1995-2010. Data terakhir yang dihimpun pada nilai sementara menjelang akhir 2010, jumlah perkebunan karet di Indonesia adalah sebesar 472200 hektar dengan nilai produksi karet kering adalah sebesar 585,427 ton. Dari data tersebut, maka potensi pengembangan biomassa berdasarkan

kayu karet masih sangat besar. Nilai sebesar itu tentunya akan menghasilkan produk kayu karet yang juga besar sehingga potensi pengembangannya untuk digunakan pada bahan bakar biomassa tidak akan mengganggu komoditi yang lain seperti kerajinan meubel, ukiran, dan bahan bangunan yang selama ini menjadi primadona utama dalam pemanfaatan kayu karet sebagai suatu produk olahan. Untuk iklim Indonesia sendiri, pohon karet memiliki potensi untuk dikembangkan secara masif untuk memenuhi permintaan domestik akan kebutuhan getah karet yang biasanya digunakan untuk industri otomotif dan juga untuk kebutuhan industri furnitur yang memerlukan kayu karet sebagai bahan baku utama industri. Sedangkan stok yang melimpah dari pohon karet yang sudah tidak lagi produktif yang tidak mampu diserap oleh industri kerajinan dan furnitur, maka opsi kayu karet sebagai pilihan pemanfaatan bahan bakar biomassa dapat mendorong daerah-daerah dengan potensi perkebunan karet yang besar untuk mencapai suatu kemandirian dalam hal energi dan juga dihasilkan energi yang lebih ramah lingkungan tanpa harus tergantung akan pasokan energi dari pusat berupa energi yang berbasiskan pada energi fosil yang ketersediaannya semakin menyusut dari tahun ke tahun.

Pemanfaatan *biomass* menjadi suatu sumber energi tentunya melalui proses-proses tertentu untuk dapat menghasilkan energi siap pakai untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari. Untuk mengubah *biomass* menjadi energi, salah satunya adalah melalui proses yang disebut dengan proses *thermokimia* melalui tiga cara yaitu pembakaran langsung (*direct combustion*), gasifikasi, dan pirolisa. Gasifikasi adalah suatu proses konversi bahan bakar padat menjadi gas mampu bakar ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ , dan  $\text{H}_2$ ) melalui proses pembakaran dengan suplai udara terbatas (20%-40% udara stoikiometri). Reaksi gasifikasi terjadi di dalam suatu reaktor yang disebut *gasifier*.

Sistem gasifikasi *updraft* yang telah dikenal sebelumnya menggunakan satu daerah keluaran di bagian atas dari reaktor sehingga gas yang dihasilkan dapat langsung keluar, sedangkan untuk penelitian kali ini dilakukan modifikasi alat gasifikasi *updraft* sehingga memiliki dua daerah keluaran di bagian atas reaktor dan juga di bagian bawah reaktor. Hasil akhir yang ingin dicapai dari pengujian tersebut

adalah untuk mengetahui karakteristik dan fenomena yang dihasilkan untuk sistem *double outlet* dan membandingkan performa yang dihasilkan dengan sistem konvensional dengan alat pengujian yang serupa, sehingga fenomena yang terjadi selama pengujian dapat dipaparkan sebagai hasil studi yang mungkin dapat berguna sebagai referensi penelitian selanjutnya mengenai sistem gasifikasi *updraft* dalam upayanya menghasilkan sebuah sistem yang efisien untuk dikembangkan dan dapat dimanfaatkan secara massal sebagai opsi pemanfaatan energi selanjutnya.

## 1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini memiliki tujuan untuk mendapatkan sebuah proses oksidasi yang baik pada reaktor gasifikasi *updraft* agar material bahan bakar dengan kandungan karbon tertentu (dalam hal ini kayu karet) dapat menghasilkan gas mampu bakar yang ekonomis, efektif, dan bersih. Temperatur yang dapat mencapai angka lebih dari 1000°C menjadi salah satu parameter penting untuk menghasilkan gas mampu bakar yang bersih sebagai produk utama penelitian. Distribusi temperatur yang bervariasi membentuk suatu zonafikasi tertentu sesuai dengan ketinggian alat sehingga akan mempengaruhi proses reaksi yang terbentuk.

Dengan mempertahankan *flow rate* pada suatu nilai tertentu yang dianggap merupakan *flow rate* optimal berdasarkan penelitian sebelumnya<sup>1</sup>, maka akan dianalisa *syngas* yang terbentuk selama proses berlangsung dan fenomena yang terjadi dari sistem dengan menggunakan dua buah *outlet gas* tersebut apabila dibandingkan dengan sistem gasifikasi *updraft* konvensional dengan 1 buah daerah *outlet gas* di daerah gasifikasi. Analisa tersebut memusatkan perhatian pada pembentukan *syngas* dan keluarnya gas tersebut dari reaktor serta ketahanan nyala api pada kedua *burner* berdasarkan *flow rate* yang diberikan pada kedua buah pipa aliran. Adapun besar *flow rate* yang digunakan dan dinilai merupakan nilai yang optimal berdasarkan penelitian sebelumnya adalah dengan delta h sebesar 6 mm atau setelah dikonversikan setara dengan sekitar 108 lpm.

<sup>1</sup>Kurniawan. *Karakteristik Konvensional Updraft Gasifier Dengan Menggunakan Bahan Bakar Kayu Karet Melalui Pengujian Variasi Flow Rate Udara*. Januari 2012

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Mencari karakteristik alat uji dengan sistem *double outlet gas* meliputi nilai kalor *syngas* yang dihasilkan, efisiensi operasional, ekivalensi rasio, dan durasi operasional.
- Mencari nilai kestabilan gas mampu bakar operasional dengan *flow rate* yang telah ditentukan sebelumnya dan fenomena yang terjadi dengan sistem tersebut.
- Menghitung jumlah bahan bakar, laju aliran gas dan udara, distribusi temperatur, dan sisa pembakaran yang terbentuk
- Menganalisa fenomena dan reaksi yang terjadi selama proses berlangsung
- Melakukan perbandingan antara alat uji *double outlet gas* dengan alat uji dengan sistem keluaran gas *updraft* konvensional

### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diangkat dalam penelitian kali ini mencakup beberapa hal. Hal ini bertujuan agar penelitian dapat terencana dan terarah dengan baik. Adapun batasan permasalahan yang ditetapkan adalah sebagai berikut :

1. Laju alir udara dikondisikan konstan pada nilai optimal berdasarkan penelitian sebelumnya yaitu sebesar 108 lpm
2. Masukan bahan bakar untuk setiap kali penelitian dilakukan, dijaga pada kondisi yang sama dan dalam jumlah yang sama yaitu 6 kilogram untuk setiap *batch*.
3. Menggunakan bahan bakar kayu karet dengan dimensi  $\pm 3 \times 3$  cm
4. Diasumsikan tidak terjadi kebocoran udara dan gas pada saat pengujian berlangsung
5. Tar yang terbentuk saat oksidasi berlangsung tidak digolongkan sebagai sisa oksidasi tetapi hasil dari reaksi oksidasi.

6. Menggunakan 12 titik termokopel pada sisi reaktor dan 2 buah termokopel pada sisi pipa aliran *syngas*.

## 1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian yang digunakan dalam penelitian tentang gasifikasi updraft *double outlet gas* ini antara lain adalah sebagai berikut :

1. Studi literatur

Studi literatur merupakan suatu proses pembelajaran melalui berbagai sumber seperti buku-buku, jurnal, dan situs internet dalam kaitannya dengan pendalaman materi yang akan dibahas dalam penelitian serta penulisan sehingga apa yang ada di dalam penelitian dapat dipertanggungjawabkan.

2. Tahapan persiapan instalasi alat

Sebelum dilakukan penelitian, hal yang harus diperhatikan adalah tahapan persiapan alat uji. Hal ini dimaksudkan agar data yang diperoleh dalam pengujian, efektif dan akurat sehingga berkaitan dengan kualitas data yang diperoleh sebagai hasil akhir dari suatu penelitian. Tahapan persiapan alat ini mencakup kalibrasi alat ukur yang digunakan, pengetesan kebocoran dari alat uji dan cara pengatasan masalahnya, serta *layout* dari alat uji untuk memaksimalkan kinerja selama pengujian berlangsung.

3. Tahapan pengujian alat gasifikasi updraft

Pengambilan data dari penelitian ini atau tahapan pengujian alat gasifikasi updraft *double outlet* ini dilakukan dengan pengukuran temperatur yang terjadi di beberapa titik pada reaktor gasifikasi updraft dengan menggunakan alat uji berupa termokopel yang telah terintegrasi dengan software DAQ pada nilai  $\Delta h$  udara konstan (nilai optimal 108 lpm) serta mencatat seluruh fenomena yang terjadi selama pengujian. Pengujian

ini dilangsungkan sebanyak 1 dan 2 *batch* dalam hari yang sama tergantung pada jenis penelitian menggunakan 1 *batch* atau 2 *batch*.

#### 4. Tahapan analisa dan kesimpulan hasil pengujian

Dari proses pengujian akan diperoleh hasil berupa data-data, baik dari termokopel, manometer U, maupun sisa pembakaran dan hasil reaksi pembakaran yang terjadi. Data –data tersebut diolah untuk kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik untuk dianalisa serta diperbandingkan dengan data-data yang lain untuk melihat fenomena yang terjadi pada sistem alat gasifikasi updraft dengan menggunakan *double outlet gas*.

### 1.6 Sistematika Penulisan

Dalam penyusunan tugas akhir ini, penulis membagi penyusunan publikasi penelitian ini dalam lima bab dengan masing-masing bab terdiri atas sub-bab berupa penjelasan masalah dari bab yang sedang dibahas. Hal tersebut bertujuan untuk memudahkan penulis serta mengarahkan kerangka pembahasan pada tujuan yang diinginkan sebagai hasil akhir dari penelitian agar didapatkan informasi secara menyeluruh. Kerangka penulisan tersebut dapat diuraikan sebagai berikut :

#### **BAB I PENDAHULUAN**

Bagian ini berisi latar belakang yang melandasi penulisan skripsi, penulisan masalah, tujuan penelitian, pembatasan masalah sebagai ruang lingkup dilakukannya penelitian agar penelitian lebih terencana dan terarah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan sebagai hasil akhir suatu produk penelitian.

#### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Bagian ini berisi tentang dasar teori yang merupakan landasan dari dilakukannya penelitian berdasarkan dari studi literatur yang telah dilakukan, yang merupakan komponen utama dari dasar pemikiran yang digunakan dalam tahapan pengolahan dan analisa data hasil penelitian.

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Bagian ini berisi tentang konsep penelitian, daftar alat dan bahan yang digunakan sebagai komponen pengujian, skematik alat pengujian, peralatan pengujian, dan prosedur penelitian

### **BAB IV PENGOLAHAN DATA HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA**

Bagian ini berisi tentang analisa dari data hasil pengujian alat gasifikasi updraft *double outlet gas* yang telah dilakukan serta fenomena yang terjadi selama penelitian dilakukan.

### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Bagian ini berisi tentang kesimpulan yang bisa diambil dari pengujian yang telah dilakukan dan sara-saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian ke depannya berdasarkan hal yang dialami di laboratorium selama penelitian berlangsung.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Pengertian 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*. Ke dalam 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 metan (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 padat menjadi gas mampu bakar (CO, CH<sub>4</sub>, dan H<sub>2</sub>) melalui proses pembakaran dengan suplai udara terbatas (20%-40% udara stoikiometri). Proses gasifikasi merupakan suatu proses kimia untuk mengubah material berkarbon menjadi gas mampu bakar. Berdasarkan definisi tersebut, maka bahan bakar yang digunakan untuk proses gasifikasi menggunakan material yang mengandung hidrokarbon seperti batubara, *petcoke* (*petroleum coke*), dan biomassa. Keseluruhan proses gasifikasi terjadi di dalam

reaktor gasifikasi yang dikenal dengan nama *gasifier*. Di dalam *gasifier* inilah terjadi suatu proses pemanasan sampai temperatur reaksi tertentu dan selanjutnya bahan bakar tersebut melalui proses pembakaran dengan bereaksi terhadap oksigen untuk kemudian dihasilkan gas mampu bakar dan sisa hasil pembakaran lainnya.

### 2.1.1 Jenis-Jenis Alat Gasifikasi

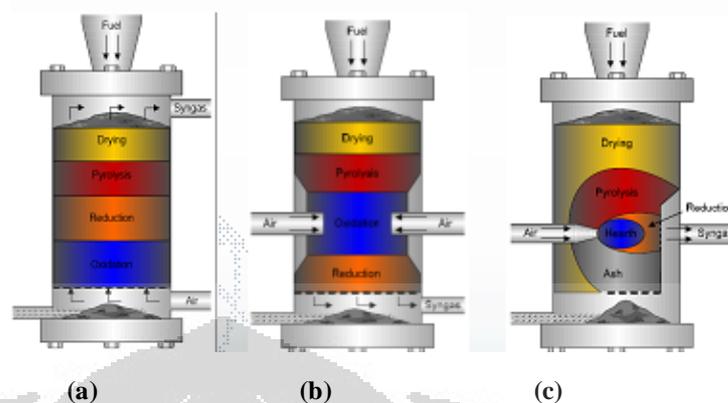
Teknologi gasifikasi yang terus berkembang mengarahkan klasifikasi teknologi sesuai dengan sifat fisik maupun sistem yang berlangsung dalam menciptakan proses gasifikasi. Beberapa kategori alat gasifikasi tersebut antara lain adalah :

a. Berdasarkan mode fluidisasi

Berdasarkan mode fluidisasi, alat gasifikasi dibagi menjadi tiga, yaitu :

1. Gasifikasi unggun bergerak (*moving bed gasifier*)

Pada alat gasifikasi ini, umumnya proses memasukkan bahan bakar terjadi dari atas reaktor dan di isi sampai penuh. Setelah proses *feeding* dilakukan, maka selanjutnya adalah pemberian hembusan oksigen pada bagian bawah reaktor untuk proses oksidasi. Antara bahan bakar dan masuknya udara terdapat sekat pemisah agar udara tidak tetutup sisa pembakaran sehingga dapat terus mengalir. Saat oksidasi terjadi, jumlah bahan bakar di dalam reaktor semakin menipis seiring dengan perubahan fase padatan bahan bakar menjadi gas mampu bakar. Sisa bahan bakar yang tidak menjadi gas akan berubah fase menjadi air maupun tar dan abu dimana air dan tar dapat keluar pada celah atau sambungan pada reaktor dan juga saling mengikat hingga menempel pada dinding reaktor sedangkan abu akan turun ke bawah sebagai akibat dari berat jenis abu dan gaya gravitasi yang mempengaruhinya. Contoh gasifikasi tipe ini adalah gasifikasi updraft dan downdraft.

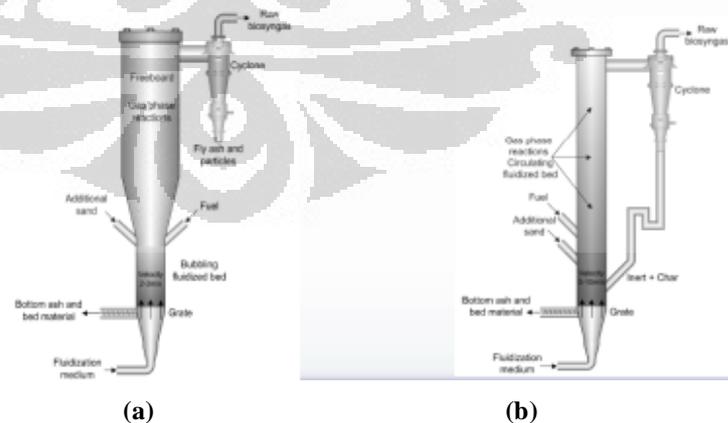


**Gambar 2.1** *Moving bed gasifier : (a) Updraft gasifier, (b) Downdraft gasifier, (c) Crossdraft gasifier*

(sumber :[www.soi.wide.ad.jp](http://www.soi.wide.ad.jp))

## 2. Gasifikasi unggun terfluidisasi (*fluidized bed gasification*)

Gasifikasi tipe ini membutuhkan ukuran bahan bakar yang kecil dengan ukuran maksimal adalah 10 mm dengan partikel pemanas yang juga kecil (biasanya pasir). Tujuannya adalah agar bahan bakar dan partikel tersebut dapat mendapatkan panas dengan cepat dan dapat melayang dalam reaktor sehingga dapat terjadi perpindahan panas melalui kontak antara bahan bakar dan partikel pemanas tersebut. Alat gasifikasi ini beroperasi pada temperatur 800-1000°C untuk menghindari pembentukan gumpalan abu.

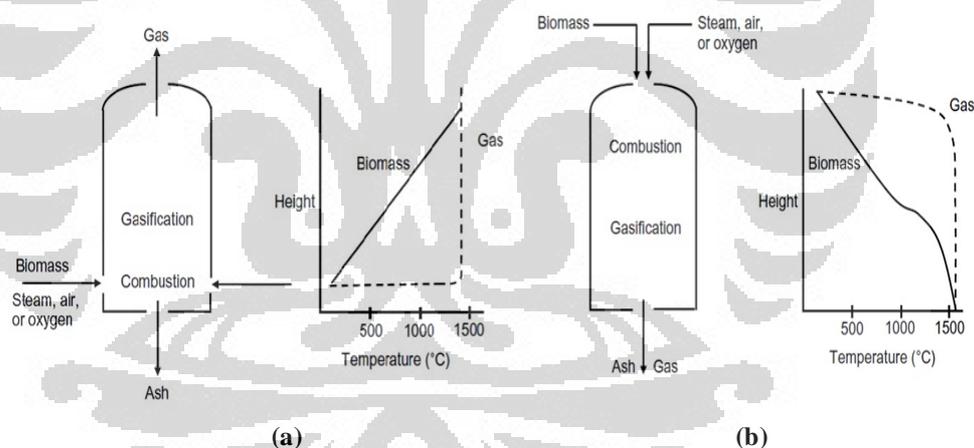


**Gambar 2.2** *Fluidized bed gasifier : (a) Bubbling fluidized bed gasifier dan (b) Circulating fluidized bed gasifier*

(sumber :[www.soi.wide.ad.jp](http://www.soi.wide.ad.jp))

### 3. *Entrained flow reactor*

Gasifikasi ini menggunakan siklus gabungan dan memiliki hasil gas yang bersih dengan sedikit tar. Reaktor sistem ini menggunakan temperatur yang cukup tinggi yaitu sekitar  $1400^{\circ}\text{C}$  dengan tekanan 20-70 bar dengan ukuran bahan bakar yang lebih kecil dari gasifikasi unggun terfluidisasi yaitu sekitar kurang dari 75 mikrometer. Bahan bakar dan oksigen serta uap dimasukkan ke dalam reaktor secara bersamaan. Uap dalam sistem ini digunakan untuk memberi kandungan air pada bahan bakar dalam bentuk bubuk hingga terbentuk bubur agar mudah dimasukkan ke dalam reaktor. Kandungan uap air dalam bahan bakar inilah yang harus dibayar dengan peningkatan konsumsi energi yang besar. Dua jenis reaktor sistem ini diklasifikasikan berdasarkan cara *feeding* bahan bakarnya. Jenis reaktor tersebut adalah dari jenis *side-feed entrained flow reactor* dan *top-feed entrained flow reactor*.



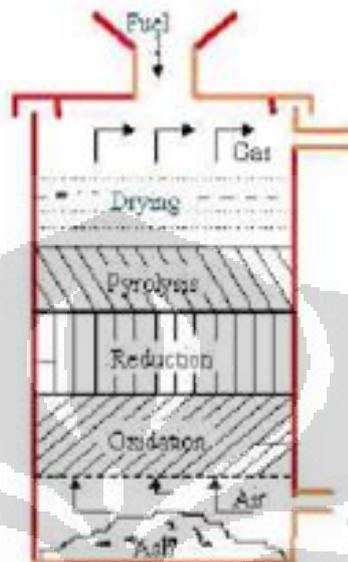
**Gambar 2.3** *Entrained flow gasifier : (a) side-feed entrained flow reactor dan (b) top feed entrained flow reactor*

(sumber :[www.soi.wide.ad.jp](http://www.soi.wide.ad.jp))

#### b. Berdasarkan arah aliran

Arah aliran fluida gas di dalam reaktor gasifikasi menjadi bahan pertimbangan klasifikasi alat gasifikasi berdasarkan arah aliran. Adapun jenis alat gasifikasi tersebut adalah :

## 1. Gasifikasi updraft



**Gambar 2.4** Reaktor gasifikasi updraft

(sumber :teknoperta.wordpress.com)

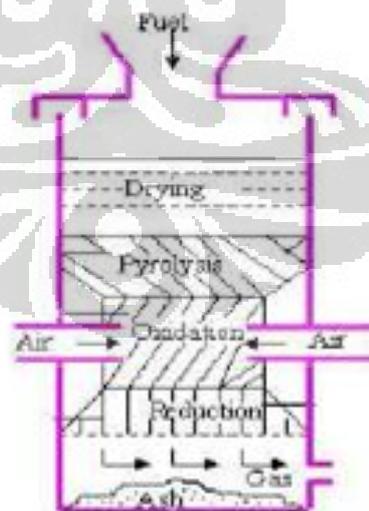
Gasifikasi updraft merupakan reaktor gasifikasi yang umum digunakan secara luas. Ciri khas dari reaktor gasifikasi ini adalah aliran udara dari *blower* masuk melalui bagian bawah reaktor melalui *grate* sedangkan aliran bahan bakar masuk dari bagian atas reaktor sehingga arah aliran udara dan bahan bakar 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 pertukaran panas antara gas dengan temperatur tinggi terhadap bahan bakar

yang memiliki temperatur lebih rendah. Panas *sensible* yang diberikan gas digunakan bahan bakar untuk pemanasan awal dan pengeringan bahan bakar. Kedua proses tersebut yaitu proses pirolisis dan proses pengeringan terjadi pada bagian teratas dari reaktor gasifikasi.

Kelebihan dari reaktor gasifikasi updraft adalah mekanisme kerja yang dimiliki oleh reaktor tipe ini jauh lebih sederhana dibandingkan dengan tipe yang lain, sedangkan dengan mekanisme kerja yang lebih sederhana tersebut, ternyata tingkat toleransi reaktor terhadap tingkat kekasaran bahan bakar lebih baik. 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. Gasifikasi downdraft



**Gambar 2.5** Reaktor gasifikasi downdraft

(sumber :teknoperta.wordpress.com)

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 oksidasi sedangkan *syngas* hasil pembakaran keluar melalui *burner* yang terletak di 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*.

Setiap alat gasifikasi memiliki karakteristik tersendiri yang membedakan suatu sistem gasifikasi dengan sistem gasifikasi yang lain. Hasil reaksi dan *syngas* yang dihasilkan dari reaksi gasifikasi tersebut dipengaruhi oleh karakteristik masing-masing alat gasifikasi tersebut. Berikut beberapa contoh tabel yang memperlihatkan sistem operasi dari alat gasifikasi tersebut :

**Tabel 2.1** Parameter kerja alat gasifikasi

(sumber : [werkudarazero6.wordpress.com](http://werkudarazero6.wordpress.com))

Parameter	Fixed/Moving Bed	Fluidized Bed	Entrained Bed
Ukuran umpan	< 51 mm	< 6 mm	< 0.15 mm
Toleransi kehalusan partikel	Terbatas	Baik	Sangat baik
Toleransi kekasaran	Sangat baik	Baik	Buruk

<b>partikel</b>			
<b>Toleransi jenis umpan</b>	Batubara kualitas rendah	Batubara kualitas rendah dan biomassa	Segala jenis batubara, tetapi tidak cocok untuk biomassa
<b>Kebutuhan oksidan</b>	Rendah	Menengah	Tinggi
<b>Kebutuhan kukus</b>	Tinggi	Menengah	Rendah
<b>Temperatur reaksi</b>	1090 °C	800 – 1000 °C	> 1990 °C
<b>Temperatur gas keluaran</b>	450 – 600 °C	800 – 1000 °C	> 1260 °C
<b>Produksi abu</b>	Kering	Kering	Terak
<b>Efisiensi gas dingin</b>	80%	89.2%	80%
<b>Kapasitas penggunaan</b>	Kecil	Menengah	Besar
<b>Permasalahan</b>	Produksi tar	Konversi karbon	Pendinginan gas produk

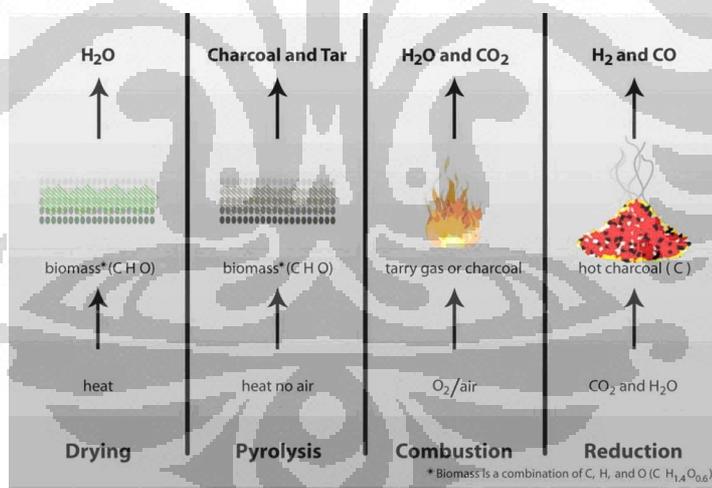
**Tabel 2.2** Produksi kandungan tar pada alat gasifikasi

Jenis gasifikasi	Rata-rata konsentrasi tar dalam produk (g/Nm <sup>3</sup> )	Persentase tar pada bahan bakar biomasa
Downdraft	<1	<2
Fludized bed	10	1-5
Updraft	50	10-20
Entrained flow	Negligible	

### 2.1.2 Proses-Proses Pada Reaktor Gasifikasi

Gasifikasi secara sederhana dapat dijelaskan sebagai proses pembakaran bertahap. Hal ini dilakukan dengan membakar bahan bakar padat dengan ketersediaan oksigen yang terbatas sehingga gas yang terbentuk dari hasil pembakaran masih memiliki potensi untuk terbakar. Bahan bakaar gasifikasi dapat berupa material padatan berkarbon yang merupakan senyawa organik. Semua senyawa organik mengandung atom karbon, hidrogen, dan oksigen dalam wujud molekul kompleks yang bervariasi. Gasifikasi itu sendiri memiliki tujuan untuk memutuskan ikatan dari molekul kompleks tersebut menjadi gas sederhana mampu bakar yaitu H<sub>2</sub> dan CO. Kedua gas tersebut mudah terbakar dan memiliki kerapatan energi dan densitas yang tinggi. Keduanya merupakan gas yang sangat bersih dimana hanya memerlukan satu atom oksigen untuk dibakar menghasilkan karbon dioksida dan air. Hal inilah yang menyebabkan gasifikasi memiliki emisi yang relatif bersih karena tujuan dari gasifikasi adalah untuk mengendalikan proses termal secara terpisah yang biasanya tercampur dalam proses pembakaran sederhana dan diatur untuk menghasilkan produk yang diinginkan.

Gasifikasi terdiri dari empat tahapan terpisah yang terdiri dari proses pengeringan, pirolisis, oksidasi/pembakaran, dan reduksi. Keempat tahapan ini terjadi secara alamiah dalam suatu proses pembakaran. Dalam gasifikasi, keempat tahapan ini dilalui secara terpisah sedemikian hingga dapat menginterupsi api dan mempertahankan gas mampu bakar tersebut dalam bentuk gas dan mengalirkan *syngas* tersebut ke tempat lain. Proses zonafikasi tersebut terjadi pada rentang temperatur yang berbeda dan menjadi karakteristik dari masing-masing daerah tersebut. Proses pengeringan terjadi pada temperatur kurang dari 150°C, proses pirolisis terjadi pada temperatur antara 150 °C sampai 300 °C, daerah reduksi terjadi pada temperatur antara 500 °C sampai 1000 °C, sedangkan daerah oksidasi terjadi pada temperatur antara 700 °C sampai 1500 °C. Proses pengeringan, pirolisis, dan reduksi bersifat menyerap panas (endotermik) sedangkan proses oksidasi bersifat melepas panas (eksotermik).



Gambar 2.6 4 Tahapan pada proses gasifikasi

(sumber: [www.sasak.org](http://www.sasak.org))

### 1. Proses Pengeringan (*Drying*)

Reaksi ini terletak pada bagian atas reaktor dan merupakan zona dengan temperatur paling rendah di dalam reaktor yaitu di bawah 150 °C. Proses

pengeringan ini sangat penting dilakukan agar pengapian pada burner dapat terjadi lebih cepat dan lebih stabil. Pada reaksi ini, bahan bakar yang mengandung air akan dihilangkan dengan cara diuapkan dan dibutuhkan energi sekitar 2260 kJ untuk melakukan proses tersebut sehingga cukup menyita waktu operasi.

## 2. Proses Pirolisis

Pada pirolisis, pemisahan *volatile matters* (uap air, cairan organik, dan gas yang tidak terkondensasi) dari padatan karbon bahan bakar menggunakan panas yang diserap dari proses oksidasi sehingga pirolisis (devolatilisasi) disebut juga gasifikasi parsial. Suatu rangkaian proses fisik dan kimia terjadi selama proses pirolisis. Komposisi produk yang tersusun merupakan fungsi dari temperatur, tekanan, dan komposisi gas selama proses pirolisis berlangsung. Produk cair yang menguap akibat dari fenomena penguapan komponen yang tidak stabil secara termal mengandung tar dan *polyaromatic hydrocarbon*. Produk pirolisis terdiri atas gas ringan, tar, dan arang.

Pirolisis adalah proses pemecahan struktur bahan bakar dengan menggunakan sedikit oksigen melalui pemanasan menjadi gas. Proses pirolisis pada bahan bakar kayu terbentuk pada temperatur antara 150 °C sampai 300 °C di dalam reaktor. Proses pirolisis menghasilkan produk berupa arang atau karbon, tar, gas ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ , dan  $\text{C}_6\text{H}_6$ ). Ketika temperatur pada zona pirolisis rendah, maka akan dihasilkan banyak arang dan sedikit cairan (air, hidrokarbon, dan tar). Sebaliknya, apabila temperatur pirolisis tinggi maka arang yang dihasilkan sedikit tetapi banyak mengandung cairan. Untuk mendapatkan produk dari reaksi pirolisis terdapat berbagai cara, yaitu :

- Untuk mendapatkan cairan yang banyak, maka harus dilakukan pemanasan yang sedang (450 °C -600 °C) dengan gas yang rendah pada waktu residen

- Untuk mendapatkan gas yang efektif maka pemanasan dilakukan pada temperatur rendah (700 °C-900 °C) dengan gas yang tinggi pada waktu residen

### 3. Proses Reduksi

Reduksi melibatkan suatu rangkaian reaksi endotermik yang disokong oleh panas yang diproduksi dari reaksi pembakaran. Reaksi reduksi terjadi antara temperatur 500 °C sampai 1000 °C. Pada reaksi ini, arang yang dihasilkan melalui reaksi pirolisis tidak sepenuhnya karbon tetapi juga mengandung hidrokarbon yang terdiri dari hidrogen dan oksigen. Untuk itu, agar dihasilkan gas mampu bakar seperti hidrogen dan karbon monoksida, maka arang tersebut harus direaksikan dengan air dan karbon dioksida. Proses stoikiometri reaksi tersebut adalah sebagai berikut :

- Arang (karbon) + O<sub>2</sub> → CO<sub>2</sub> + CO
- Arang (karbon) + CO<sub>2</sub> → CO

dan

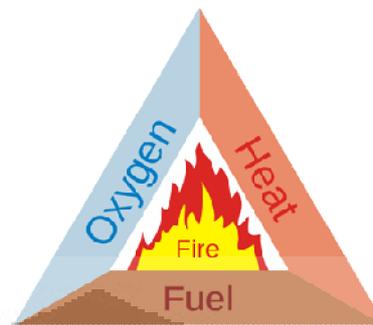
- Arang (karbon) + H<sub>2</sub>O → CH<sub>4</sub> + CO
- Arang (karbon) + H<sub>2</sub> → CH<sub>4</sub>

### 4. Proses Oksidasi (Pembakaran)

Proses pembakaran mengoksidasi kandungan karbon dan hidrogen yang terdapat dalam bahan bakar dengan reaksi eksotermik, sedangkan gasifikasi mereduksi hasil pembakaran menjadi gas bakar dengan reaksi endotermik. Oksidasi merupakan reaksi terpenting di dalam reaktor gasifikasi karena reaksi ini menyediakan seluruh energi panas yang dibutuhkan pada reaksi endotermik. Oksigen yang dipasok ke dalam reaktor bereaksi dengan substansi yang mudah terbakar yang menghasilkan produk berupa CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O yang secara berurutan

direduksi ketika kontak dengan arang yang diproduksi pada proses pirolisis. Produk lain yang dihasilkan dalam reaksi oksidasi berupa air, panas, cahaya,  $N_2$  dan gas lainnya ( $SO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_2$ , dan lain-lain).

Untuk melakukan reaksi pembakaran, terdapat tiga elemen penting yang saling mengisi satu sama lain yaitu panas (*heat*), bahan bakar (*fuel*), dan udara. Reaksi pembakaran sangat berkaitan dengan keberadaan ketiga elemen tersebut. Hal ini dapat diartikan bahwa apabila salah satu dari ketiga elemen tersebut tidak ada, maka hampir dapat dipastikan tidak akan terjadi proses pembakaran. Bahan bakar merupakan elemen sensitif apabila direaksikan dengan oksigen dan dapat menghasilkan energi panas dan cahaya. Sedangkan udara merupakan elemen pereaksi yang terdapat bebas di lingkungan. Di dalam udara tidak hanya terkandung oksigen tetapi juga nitrogen yang mampu menyerap panas ketika terjadi proses pembakaran. Nitrogen dianggap sebagai racun udara apabila terikat dengan oksigen dan juga sebagai pengencer penurun temperatur yang harus ada untuk mencapai oksigen yang dibutuhkan dalam proses pembakaran. Nitrogen juga berpengaruh terhadap terbentuknya cairan pada gas buang dari reaksi pembakaran sehingga dapat menurunkan efisiensi pembakaran. Selain itu, panas adalah salah satu hasil dan tujuan reaksi pembakaran. Energi yang dibutuhkan untuk menciptakan panas tidak selalu sama dan tergantung dengan kondisi lingkungan, sifat bahan bakar, dan juga elemen penyusun bahan bakar.



**Gambar 2.7** Segitiga api

## 2.2 Biomassa

Biomassa adalah bahan bakar yang dapat diperbaharui dan secara umum berasal dari makhluk hidup (non-fosil) yang didalamnya tersimpan energi atau dalam definisi lain, biomassa merupakan keseluruhan materi yang berasal dari makhluk hidup, termasuk bahan organik yang hidup maupun yang mati, baik di atas permukaan tanah maupun yang ada di bawah permukaan tanah. Biomassa merupakan produk fotosintesa dimana energi yang diserap digunakan untuk mengkonversi karbon dioksida dengan air menjadi senyawa karbon, hidrogen, dan oksigen.

Teknologi biomassa telah diterapkan sejak zaman dahulu dan telah mengalami banyak perkembangan. Biomassa memegang peran penting dalam menyelamatkan kelangsungan energi di bumi ditinjau dari pengaruhnya terhadap kelestarian lingkungan. Sifat biomassa yang merupakan energi dengan kategori sumber energi terbarukan mendorong penggunaannya menuju ke skala yang lebih besar lagi sehingga manusia tidak hanya tergantung dengan energi fosil. Biomassa memiliki kelebihan yang memberi pandangan positif terhadap keberadaan energi ini sebagai alternatif energi pengganti energi fosil. Beberapa kelebihan itu antara lain, 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.

Biomassa tidak selalu berupa padatan tetapi termasuk di dalamnya gas dan cairan yang berasal dari reaksi dekomposisi alam. Beberapa sumber biomassa yang dikenal antara lain adalah :

- Agrikultural : ampas padi, batang jagung, kulit kacang, dan gandum kering
- Hutan : ranting pohon, kulit kayu, ampas gergaji, dan daun kering
- *Municipal* : sampah organik dan kotoran manusia
- Energi : kelapa sawit, kacang kedelai, dan alga
- Biologikal : kotoran hewan dan hasil pembusukan makhluk hidup

### 2.2.1 Kayu Karet

Biomassa sebagai salah satu opsi dalam mengatasi krisis energi yang terus meningkat dari tahun ke tahun memiliki banyak pilihan dalam mengembangkan sumber daya yang efektif untuk suatu negara, disesuaikan dengan potensi yang dimiliki negara tersebut untuk memenuhi kebutuhan energinya sendiri hingga terwujud kemandirian energi yang hakiki. Hal ini yang menjadi nilai tambah karena setiap negara memiliki potensi masing-masing sehingga dalam pengembangan energi terbarukan, tidak harus tergantung dari pengaruh negara lain dalam penanganan masalah energinya tetapi dapat melihat ke masing-masing daerah untuk mengetahui sumber daya yang mungkin untuk dikembangkan untuk negara tersebut.

Kayu karet yang dalam dunia internasional disebut dengan sebutan *rubber wood*, merupakan tanaman asli dari daerah Amazon, Brasil yang pada awalnya dikembangkan di India pada akhir abad ke-18 namun tidak berhasil dan setelah itu dibawa hingga ke Asia Tenggara dan masuk ke Indonesia. Kayu karet dibudidayakan dengan tujuan utama untuk mendapatkan getah karet sebagai bahan utama karet hingga kini. Pohon karet dapat tumbuh hingga ketinggian 30 meter dan akan memproduksi getah karet setelah 5-6 tahun. Setelah 25 tahun, pohon karet akan ditebang dan digantikan pohon yang baru karena sudah tidak lagi menghasilkan *lateks*

(getah karet). Hal inilah yang menjadikan pemanfaatan pohon karet berpotensi untuk dikembangkan sebagai produk biomassa karena selama ini pemanfaatannya terbatas hanya pada industri kerajinan dan furnitur. Secara tekniskayu karet tergolong kayu yang lunak-keras dan lumayan berat dengan densitas antara 435-625 kg/m<sup>3</sup> pada level 12 % *moisture content* pada kayu. Setelah melalui proses pengeringan, penyusutan kayu sangat kecil dengan angka rata-rata di bawah 2% pada arah radialnya. Kayu karet berwarna putih kekuningan dan akan berubah sedikit kecoklatan apabila telah mulai mengering.

Untuk Indonesia sendiri, salah satu potensi energi yang mungkin untuk dikembangkan sebagai bahan bakar biomassa adalah kayu karet. Dari sisi ketersediaan bahan baku, menurut data dari Badan Pusat Statistik bahwa luas perkebunan karet di Indonesia termasuk dalam skala perkebunan besar, hanya kalah dari perkebunan kelapa sawit untuk jangka waktu antara 1995-2010. Data terakhir yang dihimpun pada nilai sementara menjelang akhir 2010, jumlah perkebunan karet di Indonesia adalah sebesar 472200 hektar dengan nilai produksi karet kering adalah sebesar 585,427 ton. Apabila dilihat dari nilai pada tabel 2.3 dan 2.4, maka potensi pengembangan biomassa berdasarkan kayu karet masih sangat besar. Nilai sebesar tersebut tentunya akan menghasilkan produk kayu karet yang juga besar sehingga potensi pengembangannya untuk digunakan pada bahan bakar biomassa tidak akan mengganggu komoditi yang lain seperti kerajinan meubel, ukiran, dan bahan bangunan yang selama ini menjadi primadona utama dalam pemanfaatan kayu karet sebagai suatu produk olahan. Untuk iklim Indonesia sendiri, pohon karet memiliki potensi untuk dikembangkan secara masif untuk memenuhi permintaan domestik akan kebutuhan getah karet yang biasanya digunakan untuk industri otomotif dan juga untuk kebutuhan industri furnitur yang memerlukan kayu karet sebagai bahan baku utama industri. Sedangkan stok yang melimpah dari pohon karet yang sudah tidak lagi produktif yang tidak mampu diserap oleh industri kerajinan dan furnitur, maka opsi kayu karet sebagai pilihan pemanfaatan bahan bakar biomassa dapat mendorong daerah-daerah dengan potensi perkebunan karet yang besar untuk mencapai suatu kemandirian dalam hal energi dan juga dihasilkan energi yang lebih ramah

lingkungan tanpa harus tergantung akan pasokan energi dari pusat berupa energi yang berbasiskan pada energi fosil yang ketersediaannya semakin menyusut dari tahun ke tahun.

**Tabel 2.3** Data perkebunan besar di Indonesia (satuan dalam ribu Ha)

(sumber :[www.bps.go.id](http://www.bps.go.id))

Tahun	Karet 1)	Kelapa Sawit 1)	Coklat 1)	Kopi 1)	Teh 1)	Kina 1)	Tebu 2)	Tembakau 2)
1995	471.9	992.4	125.4	49.3	81.0	4.6	496.9	9.1
1996	538.3	1146.3	129.6	46.7	88.8	2.2	400.0	4.3
1997	557.9	2109.1	146.3	61.8	89.3	2.3	378.1	4.5
1998	549.0	2669.7	151.3	62.5	91.2	0.6	405.4	5.7
1999	545.0	2860.8	154.6	63.2	91.6	1.3	391.1	5.2
2000	549.0	2991.3	157.8	63.2	90.0	1.3	388.5	5.2
2001	506.6	3152.4	158.6	62.5	83.3	1.2	393.9	5.3
2002	492.9	3258.6	145.8	58.2	84.4	1.2	375.2	5.4
2003	517.6	3429.2	145.7	57.4	83.3	3.3	340.3	5.2
2004	514.4	3496.7	87.7	52.6	83.3	3.2	344.8	3.3
2005	512.4	3593.4	85.9	52.9	81.7	3.1	381.8	4.8
2006	513.2	3748.5	101.2	53.6	78.4	3.1	396.4	5.1
2007	514.0	4101.7	106.5	52.5	77.6	3.0	427.8	5.8
2008	515.8	4451.8	98.4	58.3	78.9	3.0	436.5	4.6
2009	482.7	4,888.0	95.3	48.7	66.9	3.0	422.9	4.2
2010*	472.2	5,032.8	95.9	48.7	67.4	3.0	429.4	4.2

1) Luas areal untuk tanaman tahunan adalah areal yang ditanami di akhir tahun

2) Luas areal untuk tanaman musiman adalah luas panen kumulatif bulanan area.

\*) Angka Sementara

**Tabel 2.4** Produksi perkebunan besar di Indonesia (satuan dalam ribu Ha)

(sumber :[www.bps.go.id](http://www.bps.go.id))

Tahun	Karet Kering	Minyak Sawit	Biji Sawit	Coklat	Kopi	Teh	Kulit Kina	Gula Tebu <sup>1)</sup>	Tembakau <sup>1)</sup>
1995	341,000	2,476,400	605,300	46,400	20,800	111,082	300	2,104,700	9,900
1996	334,600	2,569,500	626,600	46,800	26,500	132,000	400	2,160,100	7,100
1997	330,500	4,165,685	838,708	65,889	30,612	121,000	500	2,187,243	7,800
1998	332,570	4,585,846	917,169	60,925	28,530	132,682	400	1,928,744	7,700
1999	293,663	4,907,779	981,556	58,914	27,493	126,442	917	1,801,403	5,797
2000	375,819	5,094,855	1,018,971	57,725	28,265	123,120	792	1,780,130	6,312
2001	397,720	5,598,440	1,117,759	57,860	27,045	126,708	728	1,824,575	5,465
2002	403,712	6,195,605	1,209,723	48,245	26,740	120,421	635	1,901,326	5,340
2003	396,104	6,923,510	1,529,249	56,632	29,437	127,523	784	1,991,606	5,228
2004	403,800	8,479,262	1,861,965	54,921	29,159	125,514	740	2,051,642	2,679
2005	432,221	10,119,061	2,139,652	55,127	24,809	128,154	825	2,241,742	4,003
2006	554,634	10,961,756	2,363,147	67,200	28,900	115,436	800	2,307,000	4,200
2007	578,486	11,437,986	2,593,198	68,600	24,100	116,501	500	2,623,800	3,100
2008	586,081	12,477,752	2,829,201	62,913	28,074	114,689	400	2,668,428	2,614
2009	522,312	13,872,602	3,145,549	67,602	28,672	107,350	600	2,333,885	4,100
2010*	585,427	14,290,054	3,240,061	70,919	28,677	108,963	600	2,278,127	4,049

Catatan :

1). Termasuk produksi yang menggunakan bahan mentah dari perkebunan rakyat

\*) Angka sementara

Pada pengujian yang dilakukan oleh BPPT menggunakan analisis *proximate* dan *ultimate* didapat data sebagai berikut :

**Tabel 2.5** Data pengujian spesimen kayu karet berdasarkan analisis *proximate* dan *ultimate* oleh BPPT, Tangerang

<b>Proximate Analysis</b>	<b>Result (%)</b>	<b>Standard method</b>
Volatile matter	71,81	<i>ASTM D-3175</i>
Fixed carbon	15,25	<i>By difference</i>
<b>Calorific value</b>	<b>Result</b>	<b>Standard method</b>
Cal/gram	4069	<i>ASTM D 5865</i>
<b>Density</b>	<b>Result</b>	<b>Standard method</b>
Gram/cm <sup>3</sup>	0.64	<i>ASTM D 167</i>
<b>Ultimate analysis</b>	<b>Result (%)</b>	<b>Standard method</b>
Moisture	10,24	<i>ASTM D-3173</i>
Ash	2,71	<i>ASTM D-3174</i>
Carbon	43,33	<i>ASTM D-5373</i>
Hydrogen	5.11	<i>ASTM D-5373</i>
Nitrogen	0,0	<i>ASTM D-5373</i>
Oxygen	38,61	<i>By difference</i>

Dimana analisis *proximate* merupakan sebuah metode pengujian bahan untuk melakukan analisis terhadap kandungan *fixed carbon*, bahan bakar yang menguap, kadar air, dan persen abu yang berguna untuk perancangan *grate* tungku, volume pembakaran, peralatan kendali polusi, dan sistem *handling* abu pada tungku berdasarkan dari hasil uji dan analisis kadar abu. Sementara *fixed carbon* adalah bahan bakar padat yang tertinggal dalam pembakaran setelah bahan yang mudah menguap didistilasi yang penting untuk memperhitungkan perkiraan nilai kasar dari nilai panas bahan bakar. Analisis yang kedua adalah analisis *ultimate* yang merupakan metode analisa bahan dimana seluruh komponen bahan baik padatan maupun gas diperhitungkan dan analisisnya berguna untuk mendapatkan kandungan kimia pada bahan uji. Analisa tersebut berguna untuk menentukan jumlah udara yang dibutuhkan saat pembakaran, serta volume dan komposisi gas bakar. Untuk melakukan kedua analisis tersebut diperlukan kelengkapan alat laboratorium pengujian dan juga tenaga ahli yang terampil.

Arang adalah suatu bahan padat berpori yang merupakan hasil pemanasan dari bahan yang mengandung karbon melalui proses pirolisis. Kualitas jenis kayu untuk arang ada hubungannya dengan nilai bakarnya. Nilai bakar ini berhubungan pula dengan berat jenis kayu. Kayu yang mempunyai berat jenis 0.60-0.75 termasuk ke dalam kelas III atau baik (Oey Djoen Seng, 1951). Makin tinggi berat jenis kayu, makin keras arang yang dihasilkan, dan makin tinggi rendemen arangnya, makin tinggi kadar karbon terikatnya, dan makin rendah zat menguapnya (Syachri dan Hartoyo, 1976). Berdasarkan data analisis proksimat dan ultimat, kayu karet memiliki densitas  $0,64 \text{ g/cm}^3$  yang artinya kayu karet termasuk dalam kelas III (0,6-0,75) dan artinya baik dalam pemanfaatan energi biomassa.

### 2.3 Perhitungan Dasar Gasifikasi

Selama proses gasifikasi terjadi dua transformasi utama yaitu perpindahan massa dan perpindahan kalor (energi panas). Perpindahan massa ditentukan oleh kesetimbangan massa zat yang masuk dengan massa yang keluar dari sistem tersebut.

Sedangkan perpindahan kalor ditentukan oleh kesetimbangan energi yang masuk dengan energi yang keluar. Kesetimbangan massa adalah jumlah semua unsur yang terkandung dalam suatu unit massa *input* ( bahan bakar dan udara) sama dengan jumlah unsur-unsur yang dihasilkan pada *output* berupa *syngas* dan abu selama proses gasifikasi terjadi. Sedangkan kesetimbangan energi adalah kondisi dimana besar energi kalor yang dihasilkan dalam suatu unit massa bahan bakar dengan nilai kalor spesifik tertentu dikurangi dengan kerugian kalor yang terjadi selama proses gasifikasi.

### 2.3.1 Perhitungan Kesetimbangan Massa (*Mass Balance*)

Perhitungan kesetimbangan massa dan energi secara umum tergantung dengan masing-masing jenis sistem reaktor gasifikasi. Perhitungan ini juga meliputi perhitungan aliran *syngas* (*flow rate*), laju konsumsi bahan bakar (*mass fuel rate*), dan laju aliran udara gas gasifikasi.

- Laju aliran *syngas*

$$V_g = \frac{Q}{LHV_g} \quad (2.1)$$

$V_g$  = Laju aliran *syngas* ( $m^3/s$ )

$Q$  = Energi kalor *output* yang dibutuhkan (kkal/s)

$LHV_g$  = *Low Heating Value syngas* ( $kkal/m^3$ )

- Laju konsumsi bahan bakar

$$M_f = \frac{Q}{LHV_f \times \eta_{gef}} \quad (2.2)$$

$M_f$  = Laju konsumsi bahan bakar (kg/s)

$Q$  = Energi kalor *output* yang dibutuhkan (kkal/s)

$LHV_f$  = *Low Heating Value* bahan bakar ( $kkal/m^3$ )

$\eta_{gef}$  = Efisiensi *gasifier*

Nilai LHV bahan bakar dan nilai LHV *syngas* dapat ditentukan dari komposisi yang terkandung dalam satuan unit massa bahan bakar dan satuan unit volume *syngas*. Komposisi tersebut didapat dari analisis *proximate* dan *ultimate* pada uji laboratorium yang dilakukan.

### 2.3.2 Laju Aliran Udara Gasifikasi

Kebutuhan jumlah udara gasifikasi selalu lebih kecil daripada kebutuhan jumlah udara stoikiometri (pembakaran sempurna). Jumlah udara gasifikasi sangat tergantung pada reaksi pembakaran masing-masing unsur yang terkandung dalam satuan massa bahan bakar dengan udara secara sempurna dan *Equivalence Ratio* (ER).

$$ER = \frac{\text{Laju alir udara gasifikasi} \times \text{Durasi operasioal}}{\text{Jumlah masa bahan bakar} \times \left(\frac{A}{F}\right)_{\text{untuk } \phi=1}} \quad (2.3)$$

Pada reaksi pembakaran masing-masing unsur dalam bahan bakar akan diketahui jumlah mol bahan bakar sehingga dengan persamaan kesetimbangan reaksi maka akan diperoleh jumlah mol udara yang dibutuhkan untuk proses pembakaran secara sempurna, misalnya :

#### Unsur karbon (C)



Pada pembakaran karbon, jumlah mol udara sama dengan mol karbon

#### Unsur Hidrogen (H)



Pada pembakaran hidrogen, jumlah mol udara sama dengan setengah mol hidrogen

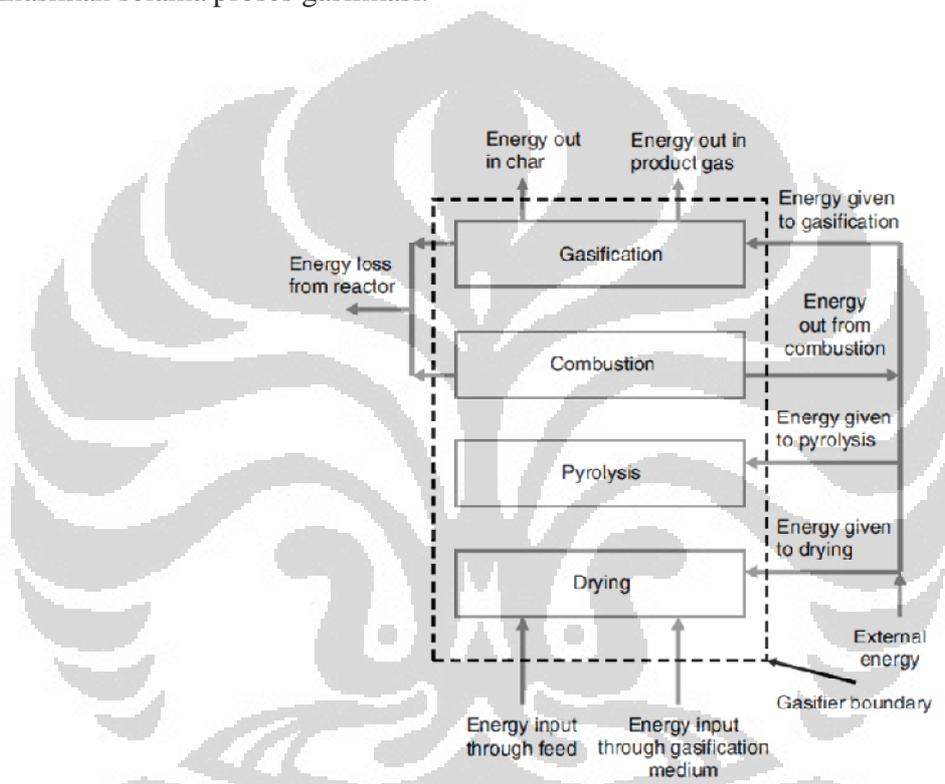
#### Unsur Sulfur (S)



Pada pembakaran sulfur, jumlah mol udara sama dengan mol sulfur

### 2.3.3 Perhitungan Kesetimbangan Energi (*Energy Balance*)

Pada dasarnya energi yang diinputkan berasal dari entalpi yang dihasilkan oleh bahan bakar pada temperatur tertentu ditambah dengan nilai kalor bahan bakar dan *heat* dari luar. Sedangkan energi *output* merupakan jumlah entalpi dari *syngas* yang dihasilkan ditambah dengan nilai kalor dari *syngas* dan *heat losses* yang dihasilkan selama proses gasifikasi.



**Gambar 2.8** Aliran energi masuk dan keluar reaktor gasifikasi

(sumber :*Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine System* : T.B. Reed dan A.Das, hal. 203)

Proses pembakaran melepaskan sejumlah energi yang kemudian diterima oleh bahan bakar untuk melakukan proses pirolisis dan pengeringan. Selain itu, energi tersebut juga digunakan pada proses reduksi untuk menghasilkan *syngas*. Sedangkan sisanya merupakan energi yang tidak dimanfaatkan seperti arang dan energi yang

dilepaskan ke lingkungan secara radiasi, konveksi, dan konduksi. Sedangkan parameter yang terkait dengan proses gasifikasi adalah :

Specific Gasification Rate (SGR)

SGR merupakan jumlah bahan bakar yang tergasifikasi melalui sebuah *throat* dengan luas penampang tertentu. SGR sering disebut juga dengan nama *hearth load* dengan terminologi jumlah bahan bakar yang tergasifikasi. SGR dinyatakan dengan persamaan :

$$\text{SGR (Hearth Load)} = \frac{\dot{m}_{bb}}{A} \quad (2.4)$$

SGR = *Specific Gasification Rate* (kg/m<sup>2</sup>h)

$\dot{m}_{bb}$  = Laju aliran massa bahan bakar (kg/h)

A = Luas penampang *throat* (m<sup>2</sup>)

Specific gas Production Rate (SGPR)

SGPR juga dapat dikatakan *hearth load* dengan terminologi jumlah *syngas* yang dihasilkan melalui luas area *throat*. Besarnya laju aliran *syngas* melalui *throat* akan sangat dipengaruhi oleh jumlah bahan bakar yang masuk. Perbandingan antara jumlah bahan bakar dengan jumlah *syngas* yang dihasilkan akan sama dengan perbandingan antara nilai SGR dan SGPR. SGPR dinyatakan dalam persamaan :

$$\text{SGPR (Hearth Load)} = \frac{V_{\text{syngas}}}{A} \quad (2.5)$$

SGPR = *Specific Gas Production Rate* (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h)

$V_{\text{syngas}}$  = Laju aliran *syngas* (m<sup>3</sup>/h)

A = Luas penampang *throat* (m<sup>2</sup>)

Entalpi Pembakaran / Heat of Reaction ( $\Delta H_c$ )

Entalpi pembakaran atau dikenal dengan *heat of reaction* adalah kalor yang dihasilkan dari suatu reaksi pembakaran zat kimia. Dalam proses gasifikasi, untuk mengetahui besarnya kalor yang dihasilkan pada pembakaran *syngas* digunakan

persamaan entalpi pembakaran dengan membagi reaksi pembakaran berdasarkan komposisi gas mampu bakar yang terkandung dalam *syngas* tersebut. Entalpi pembakaran dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$\Delta H_c = n_i (\Delta H_{f_{\text{produk}}} - \Delta H_{f_{\text{reaktan}}}) \quad (2.6)$$

$\Delta h_c$  = Entalpi pembakaran (kJ)

$n_i$  = mol reaksi masing-masing zat (mol)

$\Delta h_f$  = entalpi pembentukan (kJ/mol)

Dalam menghitung entalpi pembakaran suatu zat, ada beberapa parameter lain yang penting pada kondisi tertentu. Jika produk dari reaksi tersebut mengalami perubahan temperatur ( $\Delta T$ ) maka besar entalpi pembakaran akan dipengaruhi oleh perbedaan temperatur awal dan produk serta dengan kalor jenis ( $c_p$ ) dari produk yang mengalami perubahan temperatur. Sehingga dalam persamaan dinyatakan sebagai :

$$\Delta H_c = n_i \left( \{ \Delta H_{f_{\text{produk}}} + \left( \int_{T_0}^{T_1} c_p dT \right) \} - \Delta H_{f_{\text{reaktan}}} \right) \quad (2.7)$$

$T_0$  = Temperatur awal (K)

$T_1$  = Temperatur akhir (K)

Nilai entalpi pembentukan dan kalor jenis suatu zat dapat dilihat dari literatur berdasarkan temperatur dan tekanan referensi standar.

#### Perhitungan Cold Gas Efficiency

Efisiensi gasifikasi adalah persentase energi dari bahan bakar yang diubah menjadi gas mampu bakar (masih mengandung tar). Efisiensi gasifikasi juga dapat diartikan sebagai rasio energi yang dihasilkan oleh pembakaran sejumlah *gas producer* dengan energi yang dihasilkan oleh pembakaran biomassa secara konvensional (dibakar secara sempurna). Persamaan berikut ini digunakan untuk menghitung efisiensi gasifikasi (Mathieu, Phillippe. 2002).

$$\eta = \frac{\text{flowrate syngas} \left( \frac{m^3}{s} \right) \times LHV_{\text{syngas}} \left( \frac{kKal}{m^3} \right)}{\text{massflow bahan bakar} \left( \frac{kg}{s} \right) \times LHV_{\text{bahan bakar}} \left( \frac{kKal}{kg} \right)} \quad (2.8)$$

### Nilai Kalor (*Heating Value*)

Bahan bakar yang digunakan dalam setiap proses pembakaran memiliki nilai kalor yang berbeda-beda satu sama lain. Nilai kalor merupakan jumlah kalor yang dapat dilepaskan oleh sejumlah unit massa atau volume bahan bakar dalam reaksi pembakaran sampai temperatur bahan bakar setelah pembakaran sama dengan temperatur awal bahan bakar. Nilai kalor suatu bahan bakar dapat dibedakan atas dua macam yaitu *High Heating Value* (HHV) dan *Low Heating Value* (LHV). HHV adalah jumlah kalor yang dapat dilepaskan oleh sejumlah unit massa atau volume bahan bakar dalam reaksi pembakaran sampai temperatur bahan bakar setelah pembakaran sama dengan temperatur awal bahan bakar dan disertai dengan kalor laten penguapan air sedangkan LHV tidak disertai dengan kalor laten penguapan air.

Pengujian *proximate* dan *ultimate* dapat digunakan untuk menentukan nilai kalor yang terkandung dalam suatu bahan bakar. Sampel bahan bakar (dalam unit massa) yang diujikan dapat didefinisikan dalam tiga bentuk yaitu :

- *As-received basis*

Sampel bahan bakar secara utuh termasuk kandungan uap air (*moisture content*) dan kandungan abu (*ash*)

- *Dry basis*

Sampel bahan bakar tanpa kandungan uap air

- *Dry ash-free basis*

Sampel bahan bakar tanpa kandungan uap air dan debu

Jika terdapat sejumlah massa bahan bakar ( $M_f$ ) kg dengan kandungan kalor ( $Q$ ) kJ,  $M_w$  kandungan uap air, dan  $M_{ash}$  kandungan abu, maka HHV dapat ditulis dalam bentuk sebagai berikut :

$$HHV_{ar} = \frac{Q}{M_f} \left( \frac{kJ}{kg} \right) \quad (2.9)$$

$$HHV_{ab} = \frac{Q}{M_f - M_w} \left( \frac{kJ}{kg} \right) \quad (2.10)$$

$$HHV_{daf} = \frac{Q}{M_f - M_w - M_{ash}} \left( \frac{kJ}{kg} \right) \quad (2.11)$$

Sedangkan untuk persamaan LHV dapat ditulis sebagai berikut :

$$CV_g = \sum X_i H_i \quad (2.12)$$

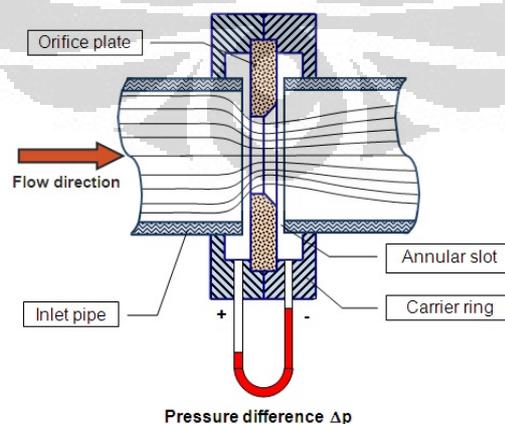
**Tabel 2.6** LHV syngas hasil gasifikasi pada temperatur ruang

LHV Pada Temperatur Ruang (MJ/m <sup>3</sup> )		
1	CO	11.5668
2	H <sub>2</sub>	9.8846
3	CH <sub>4</sub>	32.7938
4	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	51.3223
5	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	54.084
6	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	58.3627

$$LHV = HHV - 2,26(H_2O + 9H_2) \quad (2.13)$$

## 2.4 Alat Ukur Orifis

Pada proses pengoperasian alat gasifikasi, komposisi aliran udara sebagai komponen utama oksidasi harus diberikan dengan tepat. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan proses oksidasi yang baik dan efisien. *Blower* pada sistem gasifikasi updraft berperan untuk memberikan pasokan udara tersebut ke ruang bakar.



**Gambar 2.9** Mekanisme kerja orifis

Untuk mendapatkan komposisi udara oksidasi yang pas, maka pipa pasokan udara blower harus terpasang orifis dan manometer yang tersambung dengan katub untuk mengatur besar kecilnya hembusan udara. Orifis adalah salah satu alat pengukur tekanan fluida pada suatu sistem pemipaan. Alat ini mempunyai sekat pada sambungannya yang telah diberikan lubang dengan diameter tertentu (biasanya setengah dari diameter pipa). Pada bagian depan dan belakang sekat orifis terdapat lubang manometer yang berfungsi sebagai tabung pengukur perbedaan fluida yang masuk dan keluar dari sekat orifis. Aliran udara sebelum masuk sekat orifis akan lebih besar daripada udara setelah keluar dari orifis. Perbedaan tersebut akan menghasilkan perbedaan tinggi fluida yang terjadi pada tabung manometer.

Untuk menghitung besar flowrate aliran fluida yang masuk ke dalam pipa, maka diasumsikan alirannya adalah steady-state, densitas fluida konstan, aliran fluida laminar (tidak ada perubahan elevasi), dan kerugian akibat gesekan diabaikan. Kemudian gunakan persamaan Bernoulli seperti di bawah ini :

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_2^2 \quad (2.14)$$

Atau

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_2^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 \quad (2.15)$$

Dengan persamaan kontinuitas

$$Q = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \quad (2.16)$$

Sehingga

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{Q}{A_2}\right)^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{Q}{A_1}\right)^2 \quad (2.17)$$

Kemudian didapatkan Q sebesar

$$Q = A_2 \sqrt{\frac{2 (P_1 - P_2) / \rho}{1 - (A_2/A_1)^2}} \quad (2.18)$$

Atau

$$Q = A_2 \sqrt{\frac{1}{1 - (d_2/d_1)^4}} \sqrt{2 (P_1 - P_2)/\rho} \quad (2.19)$$

Kemudian masukan nilai  $C_d$  yaitu nilai koefisien debit dalam perhitungan ini dapat digunakan  $C_d = 0,6$  sedangkan  $\beta = d_2/d_1$  sehingga diperoleh persamaan

$$Q = C_d A_2 \sqrt{\frac{1}{1 - \beta^4}} \sqrt{2 (P_1 - P_2)/\rho} \quad (2.20)$$

Parameter - parameter pada persamaan di atas sudah dapat dicari menggunakan alat orifis sehingga dapat dihitung besar debit ( $Q$ ) dengan menggunakan persamaan di atas. Untuk mencari laju aliran masa ( $\dot{m}$ ), maka nilai  $Q$  dapat langsung dikalikan dengan rho ( $\rho$ ) fluida yang mengalir, atau dapat gunakan rumus dibawah ini :

$$\dot{m} = \rho Q = C A_2 \sqrt{2 \rho (P_1 - P_2)} \quad (2.21)$$

$$C = \frac{C_d}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (2.22)$$

Dimana :

$Q$  = aliran volumetric (m<sup>3</sup>/s)

$\rho$  = densitas fluida (kg/m<sup>3</sup>)

$C_d$  = koefisien debit

$A_2$  = luas lubang orifis (m<sup>2</sup>)

$V_1$  = kecepatan hulu (m/s)

$\beta$  = rasio diameter lubang orifis-pipa

$\dot{m}$  = laju aliran masa (kg/s)

$d_1$  = diameter pipa (m)

$V_2$  = kecepatan fluida pada orifis

$d_2$  = diameter lubang orifis (m)

$C$  = koefisien aliran orifis

$P_1$  = tekanan fluida hulu (Pa)

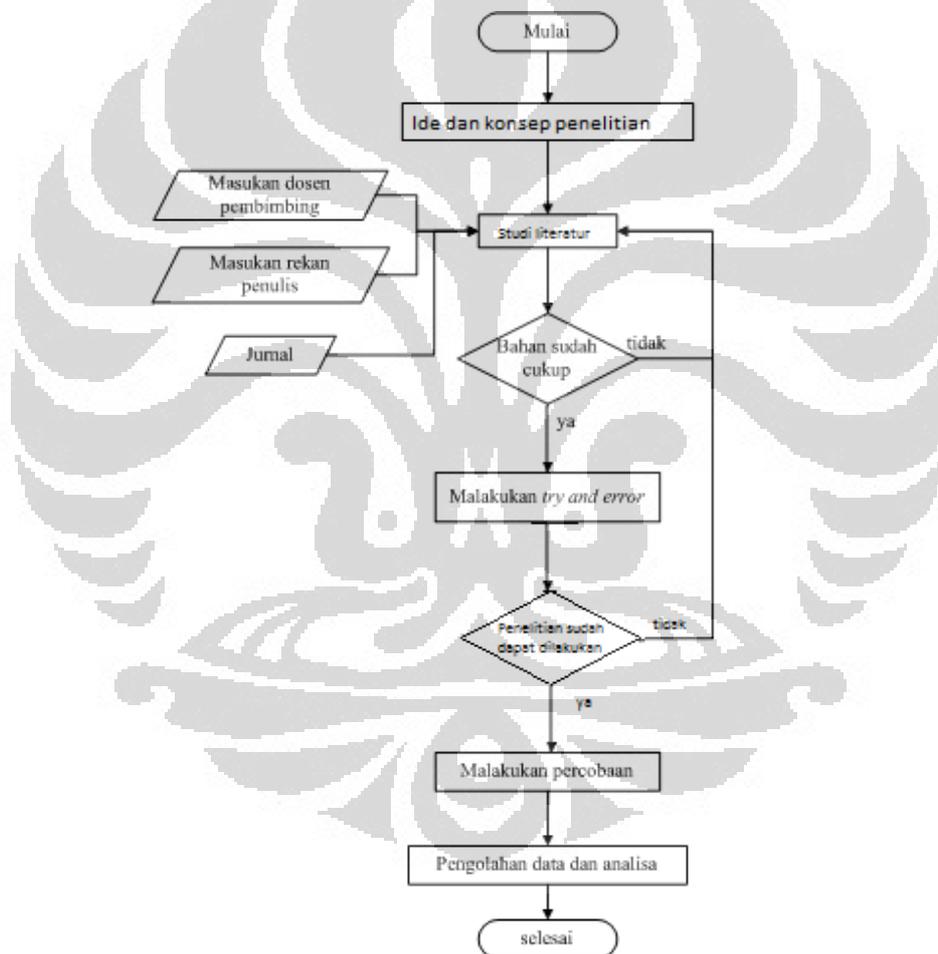
$A_1$  = luas penampang pipa (m<sup>2</sup>)

$P_2$  = tekanan fluida hilir (Pa)

## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

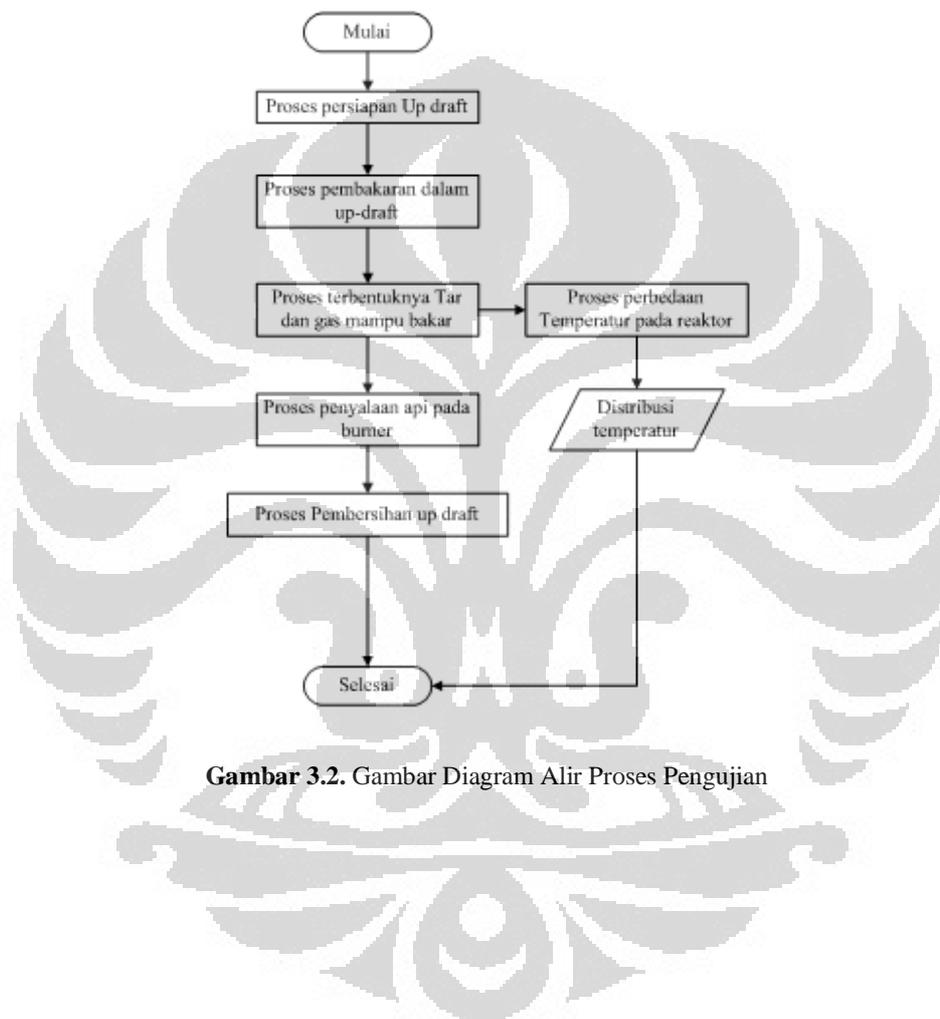
Sebelum dan selama pengujian serta penelitian dilakukan, penulis mendapatkan bimbingan terlebih dahulu dari dosen pembimbing, melakukan tukar pikiran dengan rekan serta studi literatur agar diperoleh data pengujian yang baik. Secara garis besar proses penelitian yang dilakukan penulis seperti diagram alur di bawah ini.



Gambar 3.1. Diagram alur penelitian

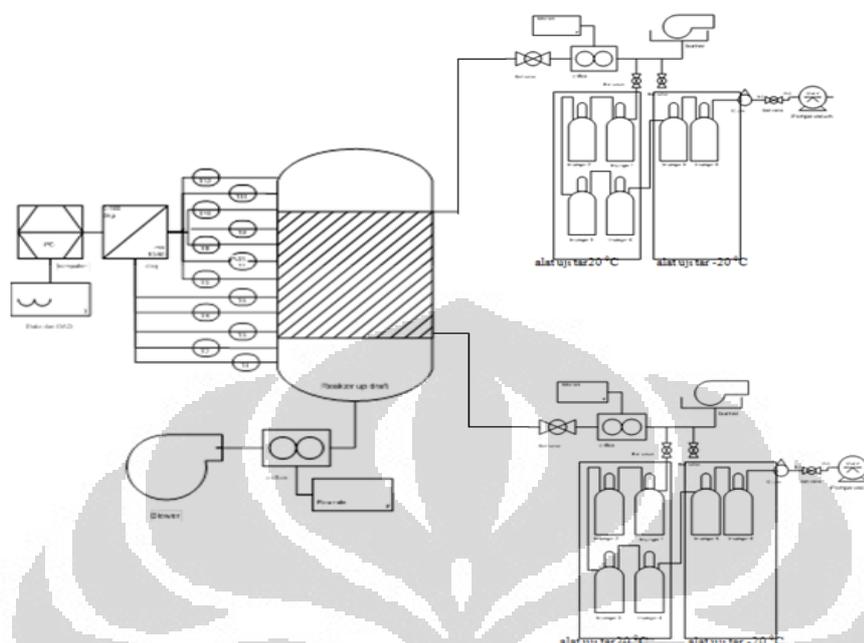
### 3.1 Garis Besar Pengujian

Proses pengujian gasifikasi *updraft* dengan sistem *double outlet* meliputi proses pengujian karakteristik operasional sistem gasifikasi *double gas outlet*. Garis besar proses pengujian tersebut dapat terlihat pada gambar 3.2 untuk mempermudah pemahaman konsep pengujian yang dilakukan oleh penulis.



**Gambar 3.2.** Gambar Diagram Alir Proses Pengujian

### 3.2 Skematik Alat Pengujian



**Gambar 3.3** Skematik pengujian

Pengujian dengan menggunakan sistem *double outlet* membuat ada sedikit modifikasi yang dilakukan pada alat gasifikasi *updraft* tersebut. Modifikasi itu meliputi pipa aliran yang tadinya hanya untuk gas keluar di daerah atas, kali ini ditambah lagi satu pipa alir di daerah bawah dimana letak pipa alir di daerah bawah tersebut merupakan daerah yang diyakini sebagai daerah reduksi pada penelitian sebelumnya. Hal ini dimaksudkan untuk mengetahui daerah operasi dan karakteristik sistem *double outlet*. Akibat dari hal tersebut, maka *burner* yang digunakan berjumlah dua kali lipat dari sistem konvensional begitu juga alat ukur yang digunakan untuk mengetahui *syngas* daerah keluaran berjumlah dua kali lipat dari pengujian konvensional serta perlu penambahan satu buah termokopel tipe-K untuk mengukur temperatur *syngas* keluar.

### 3.3 Pengujian Karakteristik Operasi Sistem *Double Gas Outlet*

Pada pengujian gasifikasi *updraft* dengan *double outlet gas*, komponen utama yang digunakan selain tentunya komponen pendukung pada penelitian ini antara lain adalah reaktor gasifikasi (*gasifier*), *blower*, 2 buah *burner*, dan katup (*valve*) dimana masing-masing komponen utama tersebut saling berkaitan dalam pemenuhan suatu sistem gasifikasi *updraft*.



**Gambar 3.4** Komponen utama sistem gasifikasi *updraft* dengan *double gas outlet*

Reaktor gasifikasi merupakan komponen pengujian yang memiliki fungsi sebagai tempat terjadinya proses gasifikasi sehingga dapat terjadi perubahan fase bahan bakar gasifikasi berupa fase padatan (*solid*) menjadi fase gas. Reaktor tersebut berbentuk silinder dengan dimensi tinggi 800 mm dan diameter 210 mm serta memiliki 12 panel termokopel untuk mengamati setiap proses yang terjadi di dalam reaktor gasifikasi.

Komponen berikutnya adalah *burner*. *Burner* merupakan alat yang berfungsi mencampurkan *syngas* hasil pembakaran dengan udara agar terjadi pembakaran. Tekanan udara di sekitar *syngas* saat gasifikasi berlangsung yang lebih tinggi membuat udara sekitar cenderung terhisap ke dalam burner. Komposisi udara dalam burner menghasilkan api yang cenderung lebih stabil, efektif, dan terarah karena udara yang masuk ke dalam burner dibatasi jumlahnya sesuai dengan ukuran diameter lubang pada burner serta juga jumlah lubang yang terdapat pada burner. Burner yang digunakan berjumlah 2 buah dimana aliran *syngas* yang menuju burner berasal dari daerah residu dan gasifikasi.

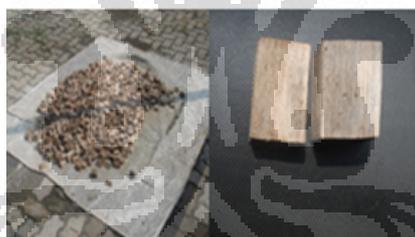
Katup (*valve*) berfungsi sebagai pengendali pemberian udara ke dalam reaktor dengan maksud untuk mempertahankan jumlah *flow rate* tertentu yang dibutuhkan selama proses pembakaran, waktu pengoperasian, suhu maksimal, dan bentuk api pada burner. Digunakan tiga buah *valve* dimana dua untuk aliran *syngas* dan satu untuk aliran udara.

Komponen terakhir adalah *Blower* dimana pada sistem tersebut memiliki fungsi sebagai *supply* udara dari lingkungan untuk kemudian dialirkan ke dalam reaktor sehingga proses pembakaran dapat berlangsung. *Blower* pada sistem tersebut dipasang pada bagian bawah reaktor untuk mengalirkan udara menuju ke burner.

### 3.3.1 Persiapan Pengujian

#### 3.3.1.1 Persiapan Bahan Bakar

Pengujian gasifikasi updraft ini menggunakan kayu karet sebagai bahan bakar utamanya. Kayu karet digunakan karena memiliki densitas yang cukup tinggi dan memiliki tingkat kandungan karbon yang besar. Kayu karet yang digunakan telah dipotong kecil dengan bentuk kubus berdimensi 3x3 cm. Ukuran sebesar itu memiliki maksud agar muatan bahan bakar menjadi optimal sehingga tidak terdapat rongga pada reaktor. Kualitas kayu karet juga menjadi pertimbangan yang penting pada tahap preparasi eksperimen dimana kayu karet yang digunakan selain dilihat dari pertimbangan ukuran juga dari warna serta rongga yang terdapat dalam kayu karet.



**Gambar 3.5** Perlakuan bahan bakar kayu karet pada penelitian gasifikasi *updraft*

Pengeringan kayu karet dilakukan dalam ruangan laboratorium 1 hari sebelum eksperimen dan dilanjutkan dengan pengeringan dibawah sinar matahari langsung selama 2 jam sebelum eksperimen (10.00 sampai 12.00 WIB) dengan maksud agar tekanan parsial kayu karet sama dengan tekanan lingkungan serta juga untuk mengurangi kadar air (*moisture content*) yang terkandung dalam kayu karet.

Dalam satu kali eksperimen dibutuhkan kayu karet sebanyak kurang lebih 12,5 kg untuk 2 *batch* eksperimen dimana masing-masing *batch* membutuhkan 6 kg kayu karet dan 0,5 kg lagi digunakan dalam tahapan *preheat* saat akan memulai eksperimen dimana kondisi reaktor masih dingin.

### 3.3.1.2 Persiapan Alat Ukur

#### 1. Pelat orifis

Pelat orifis digunakan untuk mengukur laju aliran dimana pelat orifis merupakan sebuah hambatan bagi aliran *syngas* dan perbedaan tekanan antara bagaian hulu yang berkecepatan rendah dan bertekanan tinggi serta bagian hilir yang memiliki sifat yang berkebalikan dengan bagian hulu diukur. Pada pengujian dengan 2 *gas outlet* dibutuhkan 3 buah pelat orifis untuk mengukur *flowrate* udara dari blower dan juga *flowrate* udara dari *syngas* daerah reduksi dan daerah gasifikasi. Seluruh dimensi dari pelat yang digunakan sama. Yang patut menjadi perhatian adalah terbentuknya kerak tar pada setiap eksperimen memungkinkan terjadinya sumbatan pada lubang keluar *syngas* terutama pada aliran *syngas* yang menuju pada kedua burner sehingga dapat mempengaruhi data uji sehingga dalam setiap selesai dilakukan eksperimen, membersihkan seluruh komponen aliran *syngas* merupakan suatu hal yang harus dilakukan. Pembersihan tersebut menggunakan larutan aseton dan peralatan mekanik lainnya.



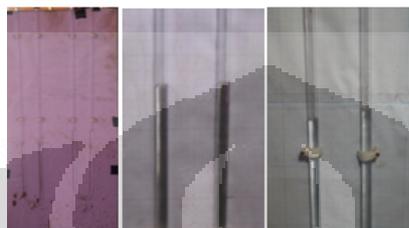
Gambar 3.6 Pelat orifis

#### 2. Manometer U

Manometer U berfungsi mengukur perbedaan tekanan sebelum dan setelah memasuki lubang orifis. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada fungsi dari pelat orifis, prinsip kerja manometer U menggunakan prinsip persamaan Bernoullie dimana tekanan aliran mengalami *pressure drop* akibat dari adanya penyempitan pada lubang orifis sehingga penampang saluran aliran mengalami penyempitan.

Pada eksperimen dengan menggunakan 2 buah *gas outlet*, manometer U yang digunakan berjumlah 5 buah yaitu 1 buah untuk mengukur aliran tekanan gas pada aliran udara dari blower, 1 untuk aliran tekanan *syngas* daerah gasifikasi, 1 untuk tekanan statik daerah gasifikasi, dan 2

lainnya untuk aliran tekanan *syngas* dan statik pada daerah reduksi. Kondisi fluida pada manometer patut menjadi perhatian dimana tidak diperkenankan adanya partikel ataupun cairan lain selain fluida isi manometer berupa minyak tanah. Kertas milimeter juga harus bersih untuk mempermudah pembacaan ketinggian fluida tetap presisi untuk menentukan tekanan aliran yang terdapat dalam sistem.



**Gambar 3.7** Manometer U

### 3. Timbangan

Jenis timbangan yang dibutuhkan untuk eksperimen ini adalah timbangan analog dan timbangan digital. Timbangan analog digunakan untuk mengukur berat dalam satuan kilogram. Timbangan ini digunakan untuk mengukur berat kayu karet yang digunakan sebagai bahan bakar pengujian. Sedangkan timbangan digital digunakan untuk melakukan pengukuran berat dengan satuan gram hingga ketelitian dua angka di belakang koma dengan berat maksimum yang dapat dialokasikan adalah sebesar 600 gram. Timbangan digital digunakan untuk mengukur berat tar, arang, dan abu hasil dari reaksi pembakaran selama proses gasifikasi berlangsung. Saat akan melakukan pengukuran, pastikan bahwa timbangan dalam kondisi bebas dengan melakukan proses *tare* sebelum dilakukan penimbangan.



**Gambar 3.8** Timbangan analog dan timbangan digital

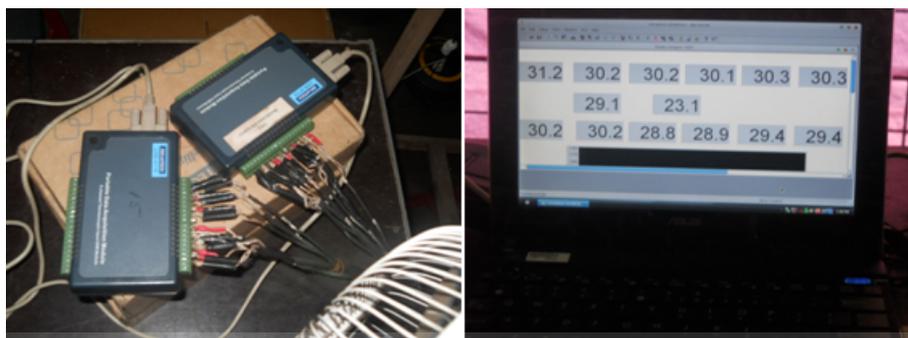
**Tabel 3.1** Spesifikasi timbangan digital

Mode	DJ102C	DJ202C	DJ302C	DJ502C	DJ602C	DJ1002C
Weight Limits	100g	200g	300g	500g	600g	1000g
Resolution	0,01 g					
Operation Temperature	0-40°C					
Power Supply	DC9V					

#### 4. Modul DAQ USB 4718

Modul DAQ USB 4718 adalah hardware komputer yang digunakan untuk membaca perubahan temperatur melalui termokopel secara berlanjut dalam jangka waktu tertentu. Kebutuhan minimum dari modul ini antara lain adalah komputer yang digunakan harus menggunakan sistem operasi Windows XP dan sudah terpasang *softwareLab View*. Modul ini memiliki delapan *port* termokopel sehingga dalam eksperimen diperlukan dua buah modul DAQ untuk memfasilitasi kebutuhan termokopel sebanyak 14 buah untuk membaca temperatur di *port-port* yang tersedia pada reaktor gasifikasi updraft tersebut. Hasil pengukuran dapat diselaraskan dengan waktu aktual dan waktu pengujian sehingga pemantauan terhadap raksi dan fenomena yang terjadi dapat dianalisis setelah data tersebut diolah menggunakan komputer.

Saat pengujian dilakukan, perlakuan yang perlu diperhatikan dalam pemasangan modul DAQ adalah peletakan modul tersebut yang harus jauh dari radiasi panas reaktor agar suhunya terjaga dan bila diperlukan, penambahan kipas angin juga disarankan. Pemasangan kabel termokopel ke modul DAQ juga menjadi perhatian agar pembacaan temperatur dapat seakurat mungkin sesuai dengan kondisi yang terjadi saat pengujian berlangsung. Untuk itu sebelum pengujian dilakukan, pemasangan kabel termokopel pada modul DAQ harus dipastikan terpasang dengan baik dengan melakukan percobaan terlebih dahulu dengan memperhatikan *trend* tampilan temperatur di layar komputer.



**Gambar 3.9** Modul DAQ USB 4718 dan tampilan temperatur dari termokopel pada layar komputer

**Tabel 3.2** Spesifikasi modul DAQ USB 4718

<b>Analog Input</b>		<b>Isolated Digital Output</b>	
▪ Accuracy	±0.1% for voltage input	▪ Channels	8
▪ Bandwidth	13.1 Hz @ 50 Hz, 15.72 Hz @ 60 Hz	▪ Output Type	Sink (NPN)
▪ Channels	8 differential	▪ Isolation Protection	2,500 V <sub>DC</sub>
▪ Ch. Independent Conf.	Yes	▪ Output Voltage	5 – 30 V <sub>DC</sub> , 1.1 A max./total
▪ CMR @ 50/60 Hz	92 dB min.	▪ Sink Current	200 mA max./channel
▪ Resolution	16 bits	▪ Opto-isolator Response	25 µs
▪ Input Impedance	1.8 MΩ	<b>General</b>	
▪ Input Range	0 – 15 mV, 0 – 50 mV, 0 – 100 mV, 0 – 500 mV, 0 – 1 V, 0 – 2.5 V, 0 – 20 mA, 4 – 20 mA	▪ Bus Type	USB 2.0
▪ Input Types	Thermocouple, mV, V, mA	▪ I/O Connector	Onboard screw terminal
▪ Sampling Rate	10 S/s (shared for all channels)	▪ Dimensions (L x W x H)	132 x 80 x 32 mm (5.2" x 3.15" x 1.26")
▪ Span Drift	±25 ppm/°C	▪ Power Consumption	100 mA @ 5 V
▪ T/C Type and Temperature Ranges		▪ Watchdog Timer	1.6 sec. (system)
<b>J</b>	0 – 760° C	▪ Operating Temperature	0 – 60° C (32 – 140° F) (refer to IEC 68-2-1, 2)
<b>K</b>	– 1370° C	▪ Storage Temperature	– 20 – 70° C (– 4 – 158° F)
<b>T</b>	– 100 – 400° C	▪ Storage Humidity	5 – 95% RH non-condensing (refer to IEC 68-2-3)
<b>E</b>	0 – 1000° C		
▪ TVS/ESD Protection	Built-in		
▪ Zero Drift	±0.3 µV/°C		
<b>Isolated Digital Input</b>			
▪ Channels	8		
▪ Input Voltage	Logic 0: 2 V max. Logic 1: 5 V min. (30 V max.)		
▪ Isolation Protection	2,500 V <sub>DC</sub>		
▪ Opto-isolator Response	25 µs		

## 5. Termokopel tipe-K

Temperatur di setiap bagian dari reaktor gasifikasi berbeda-beda saat operasional dan pengukuran distribusi temperatur di setiap bagian dari reaktor gasifikasi tersebut menggunakan alat berupa termokopel tipe-K berjumlah 14 buah. Rincian dari ke-empat belas termokopel tersebut adalah 12 termokopel terdapat pada reaktor secara vertikal dan 2 buah termokopel lagi digunakan untuk menghitung suhu *syngas* sebelum memasuki *burner*. Pemasangan termokopel

harus dilakukan secara seksama untuk memastikan seluruh data yang didapat dapat mendekati kondisi aktual. Celah yang terdapat saat pemasangan termokopel harus ditutupi menggunakan perekat dari bahan silikon untuk mencegah kebocoran gas saat pengujian berlangsung.



**Gambar 3.10** Termokopel tipe-K dan pemasangannya pada reaktor gasifikasi

### 3.3.1.3 Persiapan Gasifikasi *Updraft*

Saat pengujian dilakukan, seluruh komponen harus dipastikan berfungsi dengan benar karena pengujian gasifikasi dilakukan secara kontinyu dalam hari yang sama sehingga tidak diperkenankan adanya komponen yang rusak atau berhenti beroperasi. Sambungan setiap komponen yang rata-rata dihubungkan menggunakan komponen-komponen *fastener* seperti mur dan baut harus dipastikan telah terpasang dengan kencang agar meminimalisir terjadinya kebocoran gas saat pengujian berlangsung. Selain memastikan kencangnya mur dan baut yang terpasang, pemasangan *packing* di beberapa bagian sambungan tersebut menjadi penting juga untuk mencegah kebocoran gas yang mungkin terjadi.

Hal yang juga menjadi penting adalah perlakuan setelah eksperimen sebagai tahapan persiapan eksperimen selanjutnya dimana setelah eksperimen dilakukan, penumpukan tar yang merupakan hasil dari reaksi pembakaran di dalam reaktor gasifikasi dapat menyumbat saluran di sepanjang pipa aliran *syngas* dan dapat menutup aliran *syngas* tersebut sehingga pencampuran udara dan gas tidak akan optimal. Selain itu sumbatan pada pipa aliran tersebut juga dapat mempengaruhi bacaan pada manometer U sehingga data yang didapat tidak akurat. Untuk itu setiap selesai eksperimen, seluruh komponen yang terdapat tar dibersihkan baik menggunakan aseton maupun pembersihan manual dengan sikat hingga bersih.



**Gambar 3.11** Kondisi *burner* sebelum dan setelah terjadi eksperimen gasifikasi



**Gambar 3.12** Kerak tar yang terdapat dalam pipa aliran *syngas*

### 3.4 Prosedur Pengujian

#### 3.4.1 Persiapan Awal

Persiapan yang harus menjadi perhatian sebelum eksperimen dilakukan dan menjadi komponen penting untuk menjaga kondisi yang relative konstan antara pengujian satu dengan pengujian yang lain adalah sebagai berikut :

##### ➤ Pengujian Karakteristik

- Menjemur bahan bakar di dalam ruangan laboratorium gasifikasi satu hari sebelum eksperimen dilakukan dan menggunakan panas matahari secara langsung di luar laboratorium kurang lebih dua jam sebelum pengujian dilakukan.
- Melakukan pemeriksaan secara detail terhadap kondisi sambungan dan pipa aliran *syngas* agar tidak terjadi kebocoran dan sumbatan aliran fluida
- Memasang modul DAQ USB 4718 yang telah terinterkoneksi dengan termokopel tipe-K yang terpasang pada reactor dan menghubungkannya pada lapyop (computer) untuk mengetahui nilai bacaan temperature. Pastikan seluruh termokopel terpasang dengan baik

dan tidak terdapat keganjilan dalam pembacaan temperature yang ditampilkan pada layar monitor.

- Memasang manometer U yang berjumlah lima buah masing-masing pada aliran daerah konvensional (dua buah), aliran daerah reduksi (dua buah), dan juga pada aliran daerah tiupan *blower*.

#### ➤ **Pengujian kandungan Tar**

- Memastikan kebersihan dari tabung-tabung impinger dan selang-selang silikon yang akan digunakan.
- Memasukkan 50 ml *solvent* (isopropanol) ke dalam sepuluh tabung impinger untuk setiap *batch* pengujian.
- Memasukkan kapas ke dalam dua tabung impinger untuk setiap *batch* pengujian.
- Memasukkan tabung impinger ke dalam dua kotak kondensasi, yaitu masing-masing 4 buah tabung berisi *solvent* pada kotak kondensasi pertama, satu buah tabung berisi *solvent* dan satu buah tabung kosong pada kotak kondensasi kedua, serta satu buah tabung berisi kapas diletakkan di luar kotak kondensasi kedua yang bertujuan agar tidak ada tar yang terhisap masuk ke dalam pompa vakum.
- Menghubungkan tabung impinger satu dan lainnya dengan menggunakan selang silikon dan memastikan tutup tabung berada pada posisi yang benar, yaitu selang kaca panjang pada posisi jalur masukkan gas sampel ke dalam tabung dan selang kaca pendek pada posisi jalur keluaran gas sampel dari tabung.
- Memasukkan air pada kotak kondensasi pertama dan es batu pada kotak kondensasi kedua.
- Memastikan minyak pompa vakum masih dalam keadaan yang cukup dan pompa vakum dapat berfungsi dengan baik.
- Memasang pipa *heater* pada nozel keluaran gas sampel dan memastikan *heater* dapat berfungsi dengan baik.
- Memasang *ball valve* pada ujung pipa *heater*, lalu memastikannya tidak tersumbat dan berada pada posisi tertutup.

### 3.4.2 Pembakaran Awal (*pre-Heat*)

Tahapan *pre-heat* merupakan tahapan paling penting dalam proses eksperimen. Dalam tahapan tersebut dilakukan proses ignisasi awal dimana bahan bakar, dalam hal ini mengalami proses awal pembakaran untuk mentransmisikan panas ke proses selanjutnya sehingga didapat proses pembakaran yang berkelanjutan hingga dihasilkan *syngas* hasil dari gasifikasi. Adapun langkah-langkah dilakukannya tahapan *pre-heat* adalah sebagai berikut :

- Masukkan bahan bakar kayu karet sebanyak 0,5 kg ke dalam reaktor gasifikasi dan siram dengan miyak tanah.
- Atur bukaan katup pada daerah aliran tiupan blower hingga manometer U menunjukkan nilai  $\Delta h$  sebesar 6 mm atau dengan kata lain, debit aliran adalah sebesar 108 lpm.
- Pastikan katup aliran di daerah gasifikasi konvensional dan daerah reduksi terbuka penuh.
- Sulut bahan bakar di dalam reaktor dengan api dan tunggu selama 10 menit atau sampai mendapatkan bahan bakar telah menjadi bara.
- Perhatikan bacaan temperatur pada monitor dan pastikan seluruh termokopel berfungsi dengan baik, perhatikan juga pemasangan modul DAQ USB 4718 apabila terjadi keganjilan dalam pembacaan temperatur.

### 3.4.3 Tahapan Pengujian

Tahapan pengujian gasifikasi *updraft* dengan *double gas outlet* inidilakukan melalui dua metode yaitu metode *single batch* dan metode *double batch*. Prinsip kerja antara kedua metode tersebut sama, yang membedakan hanya apabila pada metode *single batch*, setelah eksperimen selesai maka pengujian diakhiri tetapi pada metode *double batch*, setelah *batch* pertama selesai dilakukan maka eksperimen untuk *batch* kedua dilakukan setelah temperatur pada termokopel pertama yang terletak di bagian paling bawah dari reaktor menunjukkan temperatur yang mendekati temperatur pengambilan tar pada *batch* pertama. Jumlah masukan bahan bakar pada *batch* kedua sama dengan pada *batch* pertama yaitu sebanyak 6 kg untuk tiap *batch* sedangkan apabila pada *batch* pertama didapat pemanasan awal dari proses *pre-heat*, maka pada *batch* kedua pemanasan awal didapat dari sisa bara hasil dari pembakaran *batch* pertama. Prosedur pengujian adalah sebagai berikut :

## ➤ Pengujian Karakteristik

### Batch pertama

- Masukkan bahan bakar sebanyak 6 kg setelah didapatkan bara, dan matikan *blower* untuk sementara. Setelah semua bahan bakar masuk, tutup reaktor gasifikasi.
- Mulai pengambilan data pembacaan temperatur berbarengan dengan aliran udara dari *blower* ditiupkan.
- Lakukan percobaan indikasi adanya gas mampu bakar dengan melakukan penyulutan terhadap kedua jalur keluar aliran *syngas* dan catat waktu didapatkannya api pada masing-masing *burner*.
- Lakukan pengecekan pada manometer setiap 10 menit pengujian sampai kepada habisnya *syngas* yang ditandai dengan matinya api pada *burner* terakhir dan catat lamanya durasi eksperimen mulai dari waktu dimulainya pengujian hingga api pada *burner* terakhir padam.
- Proses pengambilan gas dilakukan ketika gas mampu bakar yang keluar dari dalam reaktor sudah stabil dan *syngas* dapat disulut dengan api dan menyala secara stabil dan dilakukan pada saat termokopel 1 menunjukkan temperatur sebesar 1000°C. Adapun gas yang diambil untuk diuji komposisinya harus melalui kondenser terlebih dahulu agar tar yang masih dalam fasa gas berubah menjadi fase solid/liquid dan tidak ikut masuk kedalam *sampel bag*.
- Apabila pengujian *single batch* maka setelah api padam di *batch* pertama maka sisa arang harus langsung diambil dan sisa abu diambil setelah reaktor dingin.

### Batch kedua

- Saat api terakhir pada burner padam, tunggu termokopel pertama pada reaktor turun hingga pada temperatur yang mendekati temperatur pengambilan tar di *batch* pertama lalu masukkan bahan bakar sebanyak 6 kg.
- Mulai prosedur percobaan seperti pada *batch* pertama hingga selesai pengujian.

### 3.4.4 Selesai Pengujian

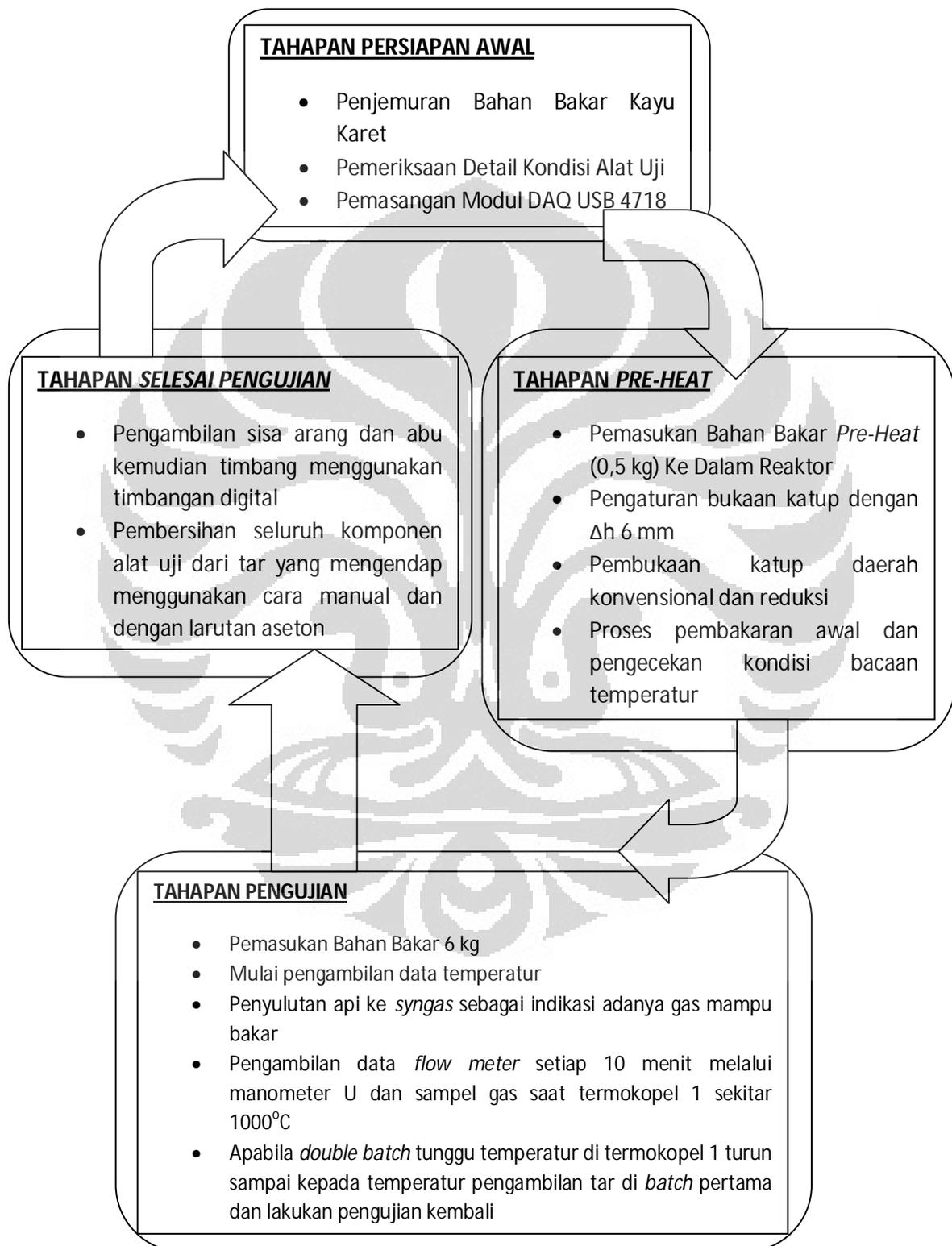
Tahapan selesai pengujian dilakukan untuk mengetahui sisa pembakaran berupa arang di dalam reaktor dan juga sisa abu yang dihasilkan selama proses pembakaran. Tahapan ini juga dilakukan untuk sistem pengkondisian alat uji agar kondisi pengujian selanjutnya sama dengan kondisi pengujian yang dilakukan sebelumnya terutama untuk membersihkan aliran *syngas* dari endapan tar. Prosedur tahapan selesai pengujian adalah sebagai berikut :

#### ➤ Pengujian Karakteristik

- Ambil sisa arang dan abu selama proses pengujian melalui saluran di bagian sisi dari reaktor.
- Bersihkan seluruh komponen dari reaktor, pipa aliran *syngas*, dan alat uji dari tar menggunakan cara manual dan dengan larutan aseton dengan cara melepasnya per bagian.
- Pasang kembali alat uji dengan kondisi yang sama untuk pengujian selanjutnya.

### 3.4.5 Alur Kerja Pengujian

#### ➤ Pengujian Karakteristik



### 3.5 Prosedur Pengukuran dan Perhitungan Hasil Pengujian

Pengukuran dilakukan dengan cara pengujian secara berulang-ulang dan dilakukan sebanyak dua *batch* untuk setiap pengujian dengan mempertahankan *flow rate* udara tiupan dari *blower* sebesar 108 lpm. Walaupun seluruh parameter, sistem dan pengaturan pengujian menggunakan kondisi yang sama tetapi data penelitian yang didapat dapat berbeda-beda. Hal ini berhubungan erat dengan berbagai faktor seperti kadar *moisture* bahan bakar, kondisi lingkungan saat eksperimen, kondisi komponen alat gasifikasi, serta pembacaan alat ukur yang menuntut ketelitian tinggi. Untuk itu, tingkat keakuratan data dapat tergantung dari banyak faktor yang mengikutinya. Menjadi penting untuk menjaga kondisi dari setiap komponen pengujian agar data yang didapat memiliki tingkat keakuratan yang baik.

#### 3.5.1 Pengukuran Distribusi Temperatur Reaktor Gasifikasi

Pengukuran distribusi temperatur pada reaktor gasifikasi dimulai setelah proses pemanasan awal dilakukan untuk mendapatkan bara api sebagai pemicu terjadinya pembakaran (kurang lebih selama 10 menit tahapan pre-heat). Setelah itu, bahan bakar untuk *batch* pertama sebanyak 6 kg dimulai. Setelah *syngas* mulai muncul, penyulutan menggunakan api dilakukan tanpa harus menunggu waktu tertentu. Pencatatan perubahan suhu dilakukan setiap detik dengan bantuan modul DAQ. *Batch* pertama dilakukan mulai dari tahapan setelah proses pemanasan awal sampai kepada waktu dimana api terakhir pada burner padam. Proses pengambilan data distribusi temperatur pada *batch* kedua sama dengan *batch* pertama, bahan bakar untuk *batch* kedua dimasukkan pada saat temperatur pada termokopel pertama yang letaknya di bagian paling bawah reaktor gasifikasi mendekati temperatur data pengambilan tar *batch* pertama. *Batch* kedua dimulai saat bacaan di termokopel pertama memiliki temperatur mendekati waktu untuk data pengambilan tar pada *batch* pertama. Jadi untuk *batch* pertama dan *batch* kedua memiliki waktu delay beberapa saat.

#### 3.5.2 Pengukuran *Flowrate* Udara dan *Syngas*

Proses pengambilan data *flow rate* dilakukan dengan melakukan pengamatan manual peredaan ketinggian cairan yang terdapat dalam manometer U setiap 10 menit selama eksperimen berlangsung. Seluruh manometer dilakukan pengecekan selama eksperimen

dilakukan setiap 10 menit sehingga didapatkan data perbedaan ketinggian antara kedua permukaan cairan.

### 3.6.3 Perhitungan Laju Pemakaian Bahan Bakar

Laju pemakaian bahan bakar merupakan perbandingan antara jumlah bahan bakar yang digunakan dalam eksperimen dengan waktu operasional dari eksperimen mulai dari timbulnya *syngas* pada *burner* hingga padamnya api pada kedua *burner* yang menandakan bahwa *syngas* sudah tidak lagi mengalir.

### 3.5.4 Perhitungan Massa Jenis Gas

Perhitungan massa jenis *syngas* selama proses gasifikasi dapat dihitung dengan mengukur komposisi dan persentase *syngas* pada saat pengapian telah terjadi di *burner*. Temperatur yang digunakan saat perhitungan adalah temperatur yang paling dekat dengan posisi pengambilan *syngas*

$$\rho = \frac{(A\%xmr_a + B\%xmr_b + \dots) \times P}{R \times T} \quad (3.1)$$

Dimana =  $m_{r_x}$  : massa molekul gas X (kg/mol gas)  
 P : tekanan absolut (Pa)  
 R : konstanta gas ( $\text{m}^3\text{Pa mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), 8.314  
 T : Temperatur (K)

### 3.5.5 Perhitungan Nilai Kalor Syngas

Perhitungan nilai kalor *syngas* (LHV) dapat dihitung dengan mengukur komposisi *syngas* (khususnya CO, H<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub>) lalu mengkalikannya dengan nilai LHV masing-masing komposisi pada temperature ruang.

### 3.5.6 Perhitungan Cold Gas Efficiency

Performa dari *gasifier* diperkirakan dengan menggunakan *cold gas efficiency* dari gasifikasi, dimana berdasarkan Segiani et. al, rumus menghitung *cold gas efficiency* adalah :

$$\text{Cold Gas Efficiency} = \frac{\text{Flow Rate Syngas } (\text{m}^3/\text{s}) \times \text{LHV}_{\text{syngas}} (\frac{\text{kcal}}{\text{m}^3})}{\text{Laju Pemakaian Bahan Bakar } (\frac{\text{kg}}{\text{s}}) \times \text{LHV}_{\text{kayu karet}} (\frac{\text{kcal}}{\text{kg}})} \quad (3.2)$$

## BAB IV

### HASIL DAN ANALISA

Setiap pengujian menggunakan metode *double outlet gas* ini, menggunakan *flowrate* optimal berdasarkan pengujian yang dilakukan sebelumnya yaitu dimana angka pada manometer pengukuran aliran udara *blower* menunjukkan  $\Delta h$  sebesar 6 milimeter atau setelah dikonversi menggunakan kalkulasi matematis alat pengujian adalah sebesar 108 lpm. Kondisi setiap pengujian diupayakan untuk menggunakan metode dan sistem yang sama secara berulang dengan tujuan mendapatkan data yang akurat. Namun demikian, untuk menjaga data yang dihasilkan konstan sangatlah sulit sehingga masih terdapat perbedaan data tiap pengujian dilakukan. Perbedaan-perbedaan tersebut meliputi perbedaan waktu operasi alat uji untuk jumlah masukan bahan bakar yang konstan, bentuk grafik distribusi suhu, *flowrate syngas* untuk setiap pipa alir, dan jumlah sisa pembakaran yang terbentuk. Bab ini akan membahas tentang analisa yang mungkin dapat di ambil dari fenomena yang terjadi selama pengujian tersebut dengan menggunakan parameter-parameter gasifikasi yang dihasilkan dari setiap pengujian yang dilakukan.

#### 4.1 Kondisi Operasional Pengujian

Pengujian menggunakan metode *double outlet gas* ini dilakukan dengan memodifikasi reaktor gasifikasi *updraft* sehingga memiliki dua buah daerah keluaran *syngas* hasil gasifikasi seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.1 berikut :



**Gambar 4.1** Metode gasifikasi *updraft* dengan sistem *double outlet gas*

Maksud dari metode pengeluaran gas dari dua daerah pengeluaran tersebut adalah untuk mengetahui karakteristik operasional reaktor gasifikasi apabila pada saat yang bersamaan gas dikombinasikan keluar melalui kedua sisi reaktor bagian atas dan bagian bawah serta pengaruhnya terhadap kinerja reaktor gasifikasi secara keseluruhan. Selain itu, kondisi gas yang dihasilkan melalui metode tersebut dapat diketahui melalui komposisi gas yang dihasilkan serta kandungan tar pada masing-masing daerah keluaran sehingga akan diketahui bahwa *syngas* yang dihasilkan dari masing-masing daerah keluaran tersebut memiliki karakteristik tertentu yang nantinya pemanfaatan hasil reaksi gasifikasi tersebut dapat diarahkan sesuai dengan nilai yang dihasilkan dari pengujian yang telah dilakukan.

Analisa yang dapat diambil sebagai pembandingan antara sistem *double outlet* dengan sistem *single outlet* adalah sesuai dengan sistem kesetimbangan massa bahwa jumlah massa yang keluar pada suatu sistem akan sama dengan jumlah massa yang masuk pada sistem tersebut, maka dengan mempertimbangkan bahwa kapasitas reaktor gasifikasi menggunakan reaktor yang sama dengan sistem *single outlet* maka jumlah gas yang dihasilkan dari reaksi gasifikasi dengan laju alir udara yang sama memiliki kuantitas yang sama, yang membedakan ialah pada sistem *double outlet*, nilai laju alir *syngas* yang dihasilkan terbagi pada dua daerah keluaran dimana laju alir pada daerah keluaran di bagian bawah reaktor lebih rendah dari laju alir di bagian atas reaktor gasifikasi. Adapun analisa lebih mendalam tentang pengaruh laju alir *syngas* tersebut akan dibahas pada sub-bab selanjutnya.

## **4.2 Kondisi Peralatan Selama Pengujian**

Pengujian gasifikasi menggunakan *double outlet gas* ini dilakukan dalam 2 metode yaitu metode pengujian 1 *batch* dan metode pengujian 2 *batch* dimana untuk setiap pengujian menggunakan metode 1 *batch* membutuhkan waktu sekitar 1,5-2 jam dari mulai tahapan persiapan sampai pengujian selesai dilakukan dan 2,5-3 jam untuk pengujian menggunakan metode 2 *batch* karena terdapat waktu *delay* antar *batch* sampai kepada temperatur pada termokopel pertama memiliki temperatur yang kurang lebih mendekati temperatur pengambilan tar pada *batch* pertama. Pengujian menggunakan metode 1 *batch* dilakukan pada pagi hari sedangkan metode 2 *batch* digunakan pada siang hari. Bahan bakar yang digunakan adalah kayu karet dengan dimensi  $\pm 3 \times 3$  cm. Pengujian dapat berlangsung dengan baik walaupun terdapat beberapa kendala saat reaktor mulai beroperasi.

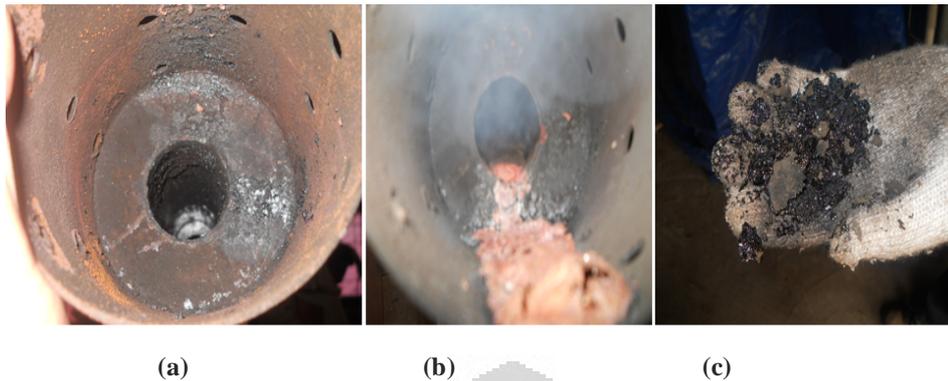
#### 4.2.1 Sambungan Pada Gasifikasi Updraft

Reaktor gasifikasi updraft dirancang secara bertingkat dimana setiap tingkatnya memiliki diameter 200 mm dengan tinggi 190 mm dan disambung menggunakan baut. Desain tersebut memiliki kelebihan dalam hal kemudahan penambahan volume reaktor dan juga pada sisi dimana apabila salah satu bagian reaktor akan dimodifikasi, tidak perlu membawa reaktor secara utuh karena terbagi pada setiap modul. Tetapi reaktor yang terbagi pada tiap modul tersebut memiliki kekurangan dalam hal rentannya terjadi kebocoran gas hasil gasifikasi karena celah yang terdapat pada setiap modul tersebut. Hal ini juga berlaku pada pipa aliran *syngas* yang dapat dilepas menjadi beberapa bagian. Kebocoran gas dapat membahayakan bagi kesehatan dan juga dari sisi teknis dapat menurunkan tingkat efisiensi bahan bakar pada reaktor pun ikut berkurang.

#### 4.2.2 Pipa Aliran *Syngas*

Dari referensi yang telah penulis baca, reaktor gasifikasi updraft memiliki kandungan material tak terbakar yang cukup tinggi (tar, air, dll) yang cukup tinggi dan terbawa oleh *syngas* yang dihasilkannya. Hal tersebut membuat banyak tar yang menempel di sepanjang aliran *syngas* sehingga dapat mempengaruhi kondisi pengujian yang dapat berakibat pada kualitas data yang didapat.

Pembersihan pipa aliran *syngas* dari kandungan tar yang menempel pada dinding pipa dilakukan dengan cara melepas sambungan yang terdapat pada pipa aliran *syngas* lalu menggunakan cairan acetone dan menyikatnya hingga tar yang menempel tersebut hilang. Perlakuan khusus diberikan kepada pipa pengambilan tar yang harus ditiup dengan menggunakan udara bertekanan untuk menghilangkan sumbatan tar pada pipa yang memiliki diameter kecil tersebut. Hal ini dilakukan karena pipa tersebut rentan tersumbat saat pengujian sehingga perlu dipastikan bahwa saluran tersebut bersih dari tar yang menyumbatnya. Pembersihan ini dilakukan setiap kali sehabis dilakukan pengujian untuk menjaga kualitas data yang didapat dari pengujian tersebut.

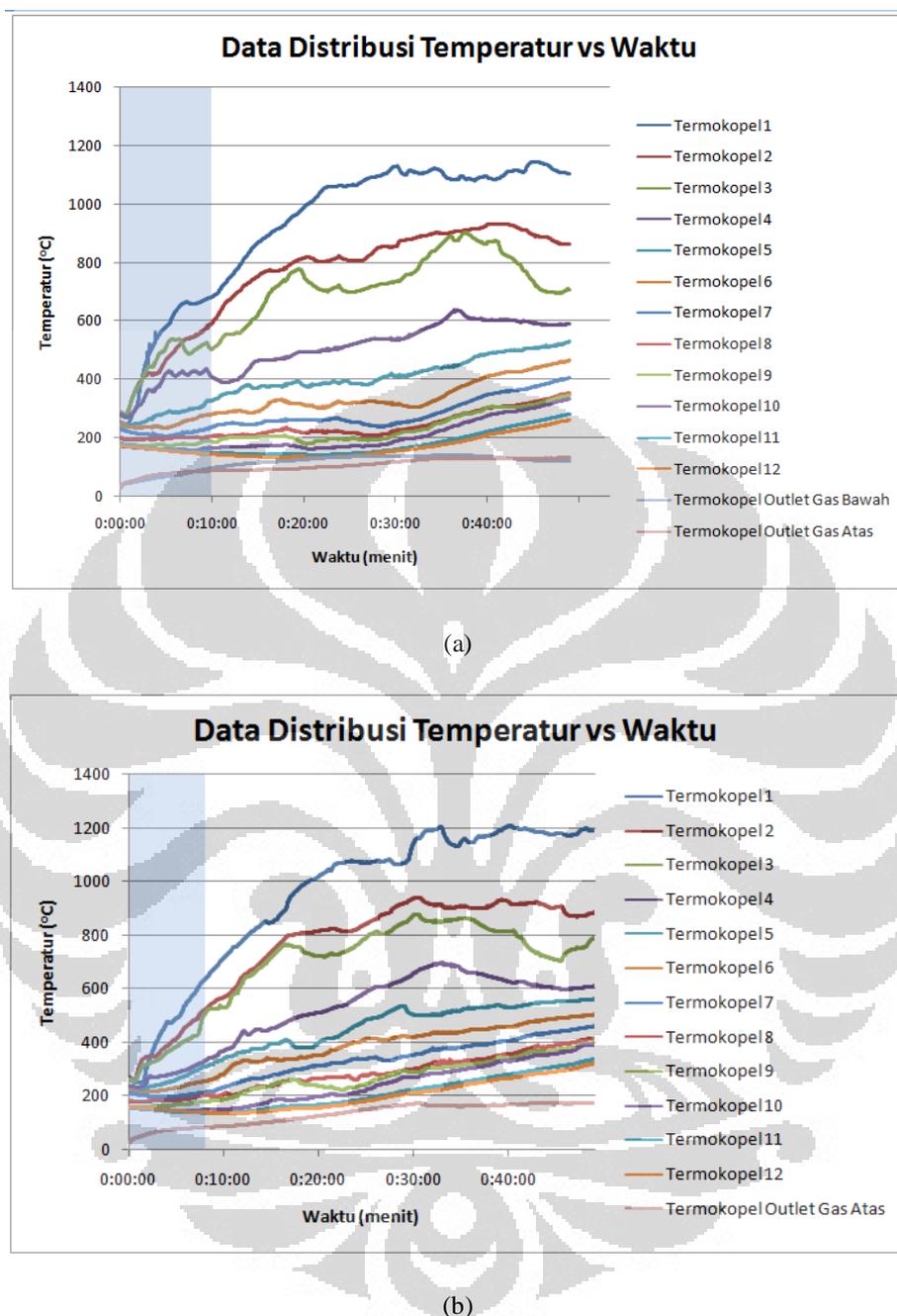


**Gambar 4.2** Kondisi pipa aliran *syngas* sebelum (a) dan sesudah (b) pengujian serta kandungan tar yang terdapat pada pipa aliran *syngas* (c)

### 4.3 Perbandingan Karakteristik Sistem Gasifikasi *UpdraftSingle Outlet Gas* Daerah Keluaran Atas dengan Sistem Gasifikasi *Double Outlet Gas* dalam Pengujian 1 Batch

#### 4.3.1 Distribusi Temperatur

Pengukuran temperatur sepanjang pengujian, dilakukan dengan menggunakan peralatan berupa termokopel tipe-K dan juga dengan menggunakan modul DAQ USB-4718 yang dapat melakukan pembacaan fluktuasi temperatur di dalam reaktor gasifikasi setiap satuan detik. Pembacaan temperatur tersebut dilakukan saat memulai pengujian hingga pengujian berakhir dalam satu kali pengujian. Durasi operasional dari suatu pengujian gasifikasi *updraft* ini tergantung dari kondisi bahan bakar dan juga kondisi lingkungan sekitar saat pengujian dilakukan. Hal yang dapat menjadi perhatian, ketika pengujian mulai dilakukan sampai kepada didapatkannya api sebagai tanda proses gasifikasi telah mampu menghasilkan gas mampu bakar yang efektif adalah waktu pengeringan bahan bakar untuk melepaskan kadar air yang terkandung di dalam bahan bakar itu sendiri akibat kenaikan temperatur yang terjadi di dalam reaktor. Waktu pengeringan antara satu pengujian dengan pengujian lainnya berbeda-beda.



**Gambar 4.3** Distribusi temperatur pengujian *double outlet gas* (a) dan pengujian konvensional (b)

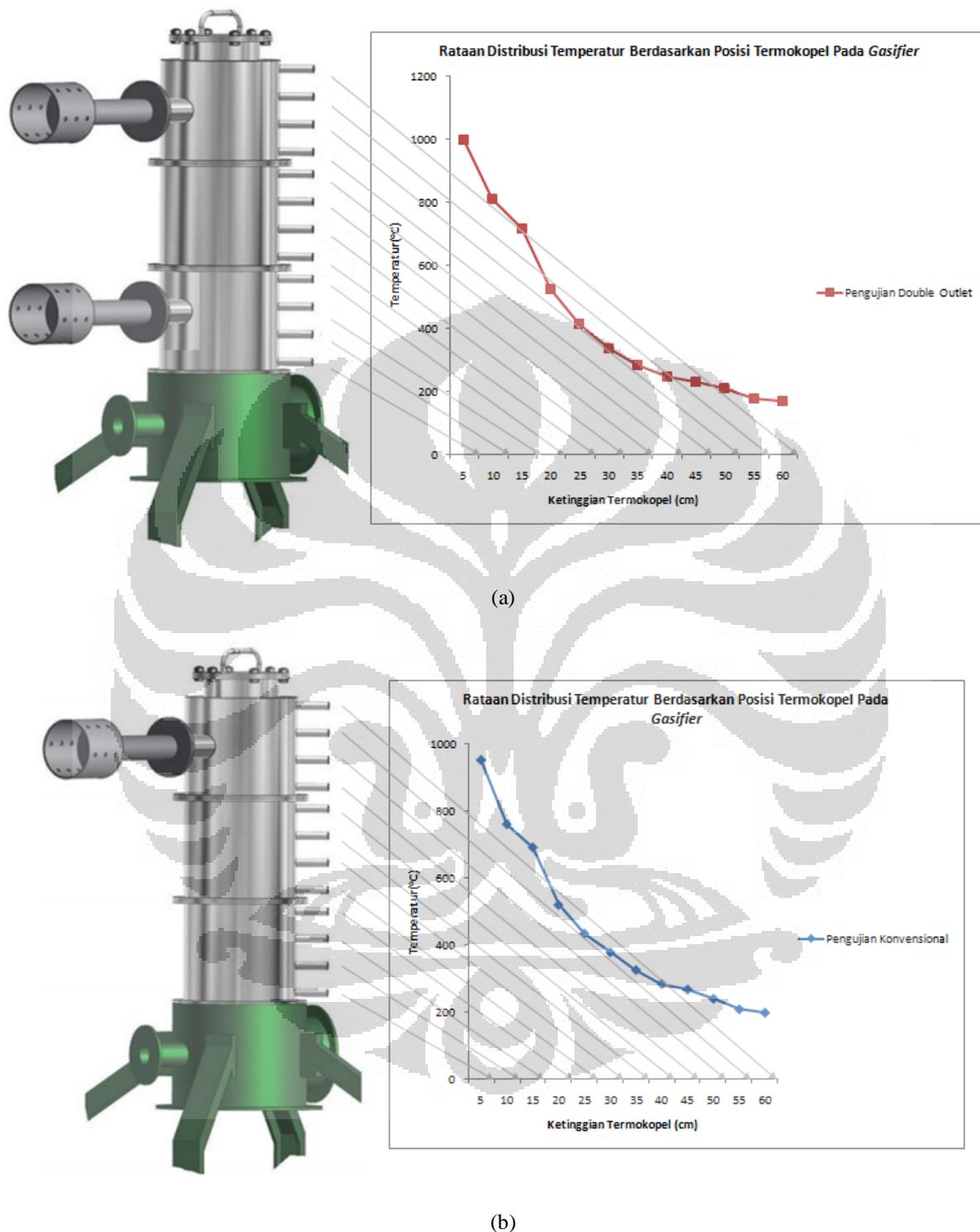
Grafik distribusi temperatur di atas memberikan gambaran bagaimana proses yang terjadi di dalam reaktor gasifikasi terjadi. Dari grafik tersebut, waktu pengeringan kadar uap air bahan bakar diberikan tanda oleh daerah dengan warna biru. Waktu pengeringan bahan bakar yang

diperlukan oleh sistem *double outlet gas* pada saat pengujian adalah sekitar 10 menit dan oleh sistem konvensional sekitar 8 menit sampai kepada didapatkan gas mampu bakar yang ditandai dengan menyala api pada *burner*. Adapun waktu operasional pengujian keseluruhan adalah sama yaitu sebesar 49 menit.

Dari gambar distribusi temperatur tersebut, dapat dilihat bahwa pada posisi termokopel 1 sampai 4 terjadi fluktuasi nilai temperatur yang sangat besar sedangkan pada termokopel 5 sampai 12, kondisi kenaikan nilai temperatur cenderung landai. Hal tersebut mengindikasikan bahwa pada termokopel 5 sampai 12, kenaikan temperatur merupakan pengaruh dari proses-proses yang terjadi di bawahnya sehingga dapat dikatakan bahwa pada termokopel di posisi tersebut, proses gasifikasi yang terjadi adalah proses yang terdapat pada zona pengeringan dimana panas yang didapat merupakan rambatan panas dari proses di bawahnya. Sedangkan untuk daerah pembakaran, reduksi, dan pirolisis dapat ditentukan dari sebaran temperatur rata-rata yang terdapat di dalam proses mulai dari didapatkan api sampai padamnya api. Daerah dengan warna biru pada grafik merupakan waktu pengeringan dari suatu proses pengujian dimana masih banyak terdapat uap air di daerah tersebut sehingga belum terdapat gas mampu bakar yang efektif sebagai hasil dari proses gasifikasi. Akhir dari proses tersebut merupakan indikasi adanya gas mampu bakar yang dihasilkan, ditandai dengan adanya *syngas* yang mampu dibakar pada ujung *burner* keluaran *syngas* sehingga didapat daerah gasifikasi yang efektif.

#### **4.3.1.1 Zonafikasi Daerah-Daerah Gasifikasi**

Sebaran temperatur di dalam *gasifier* dari setiap pengujian tersebut berperan penting dalam penentuan daerah-daerah zonafikasi proses-proses gasifikasi yang terdapat di dalam reaktor gasifikasi tersebut dilihat dari karakteristik sebaran temperatur pada masing-masing titik termokopel tersebut dan menghubungkannya dengan kisaran zona temperatur di masing-masing daerah sebagaimana yang telah disebutkan pada literatur. Adapun sebaran temperatur yang didapat pada masing-masing pengujian merupakan rata-rata temperatur mulai dari api menyala sampai api padam dimana daerah tersebut merupakan daerah yang diyakini sebagai daerah gasifikasi yang efektif dan diklasifikasikan berdasarkan posisi dari termokopel dan ketinggiannya terhadap posisi acuan awal terjadinya daerah pembakaran di dalam reaktor gasifikasi.



**Gambar 4.4** Rataan distribusi temperatur pengujian *double outlet gas* (a) dan pengujian konvensional (b) untuk penentuan zonafikasi gasifikasi

Gambar tersebut menyatakan bahwa semakin tinggi posisi termokopel dari daerah pembakaran sebagai titik acuan penentuan titik 0 centimeter, maka semakin rendah temperatur yang terdapat di dalam reaktor gasifikasi tersebut. Dari gambar 4.3 telah diketahui bahwa pada termokopel 5 sampai 12 (posisi 25 cm sampai 60 cm) merupakan daerah pengeringan sehingga untuk menentukan daerah gasifikasi lainnya, maka digunakan posisi termokopel 1 sampai 4 (posisi 5 cm sampai 20 cm) dimana sebaran temperatur di daerah tersebut mengindikasikan hal tersebut.

**Tabel 4.1** Tabel sebaran temperatur termokopel 1 sampai termokopel 4

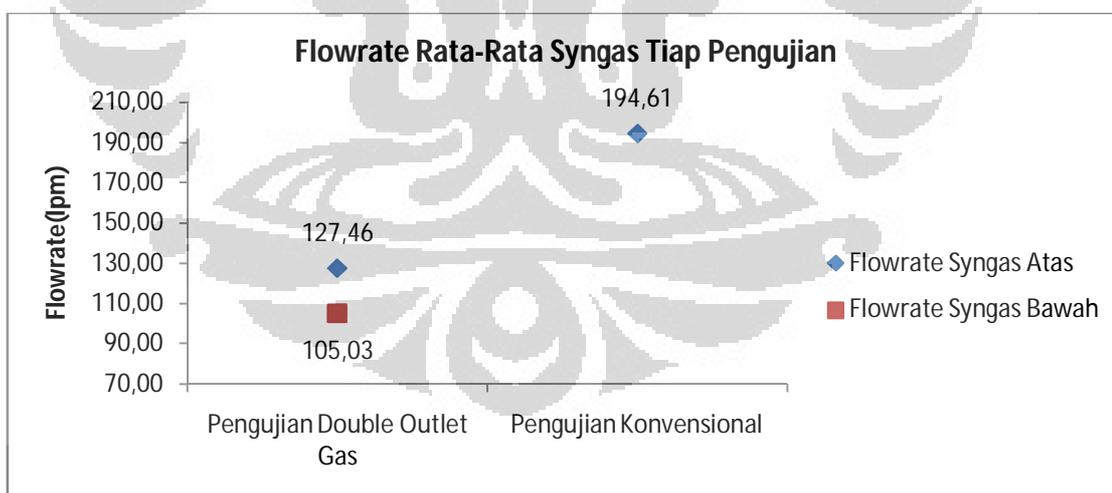
	Ketinggian (cm)	Pengujian Double Outlet	Pengujian Konvensional
Termokopel 1	5	997.924	952.316
Termokopel 2	10	810.362	760.599
Termokopel 3	15	718.148	691.697
Termokopel 4	20	523.254	519.700

Tabel 4.1 menjadi dasar pemikiran penentuan daerah pembakaran, reduksi, dan pirolisis berdasarkan sebaran temperatur yang didapat dari hasil pengujian dan membandingkannya dengan literatur penelitian yang dilakukan sebelumnya sehingga hasil dari penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan dalam penentuan karakteristik operasi alat gasifikasi *updraft* yang terdapat dalam laboratorium termodinamika Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia. Dari data yang didapat, apabila melihat berdasarkan referensi literatur bahwa daerah pembakaran terjadi pada temperatur antara 800°C sampai 1400°C, daerah reduksi pada 600°C-900°C, dan daerah pirolisis adalah antara 150°C sampai 800°C, maka dapat ditentukan bahwa pada sistem *double outlet gas* daerah cakupan termokopel 1 adalah daerah pembakaran, daerah termokopel 2 merupakan daerah transisi antara daerah pembakaran dan reduksi, daerah termokopel 3 adalah daerah reduksi, dan daerah pirolisis merupakan cakupan daerah termokopel 4. Daerah pirolisis juga dapat terjadi sepanjang termokopel 5 sampai 12 apabila melihat sebaran temperatur yang didapat. Hanya saja, apabila melihat dari gambar grafik 4.3 dengan fenomena yang terjadi seperti yang telah disebutkan sebelumnya maka analisa yang dapat diambil adalah karena bahan bakar bergerak ke arah bawah seiring dengan habisnya bahan bakar yang digunakan selama proses gasifikasi yang dilakukan, maka daerah pirolisis terpusat pada daerah di sekitar termokopel 4. Reaktor yang memiliki skala dan kapasitas kecil tersebut dapat menjadi suatu kesulitan tersendiri dalam penentuan daerah gasifikasi karena sebaran temperatur antar daerah tersebut tidak

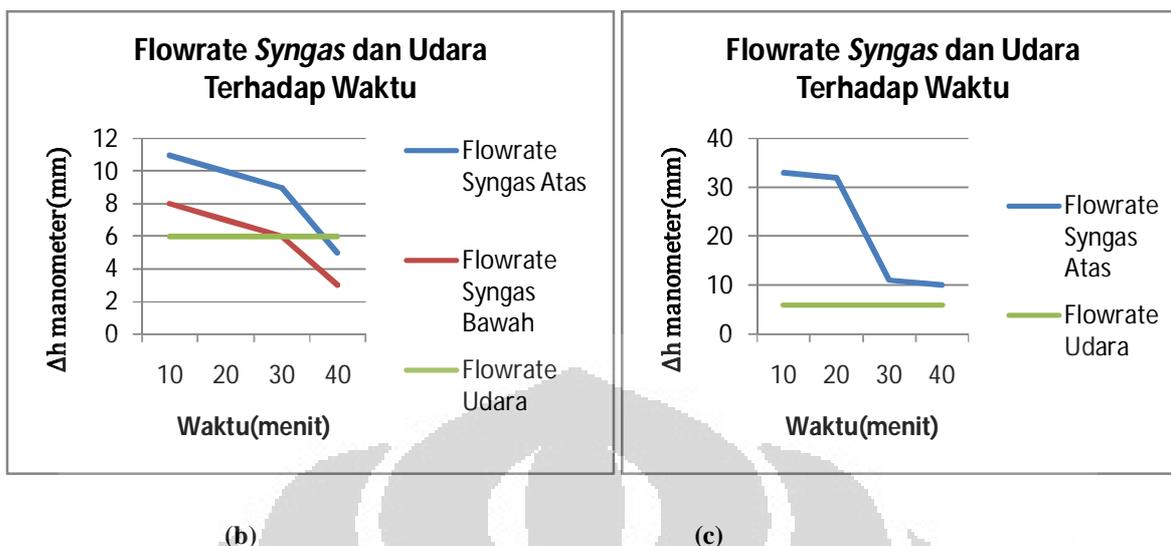
memiliki *range* yang luas sehingga memungkinkan untuk terjadinya daerah gasifikasi yang berhimpitan dengan daerah lain sehingga dapat mempengaruhi hasil pengujian lain seperti pengujian kandungan tar dan juga hasil *syngas* dari proses gasifikasi yang telah dilakukan. Fenomena serupa terjadi pada sistem konvensional dengan *gasifier* yang sama namun dengan temperatur operasional yang lebih rendah, terjadi pergeseran zonafikasi gasifikasi tersebut yaitu daerah termokopel 1 sebagai daerah pembakaran, termokopel 2 dan 3 sebagai daerah reduksi, dan sisanya merupakan daerah pirolisis dan pengeringan.

#### 4.3.2 Flowrate Syngas Pengujian

Laju alir (*flowrate*) dari masing-masing aliran udara dan *syngas* menunjukkan fenomena dari arah dimana aliran *syngas* keluar reaktor menuju *burner* cenderung bergerak ke arah *burner* atas atau bawah. Hal ini dapat diamati melalui perubahan tekanan pada manometer U yang ditunjukkan dengan perubahan ketinggian fluida yang terdapat di dalamnya tergantung pada besar kecilnya aliran fluida yang melalui orifis. Dari pengujian yang dilakukan, didapatkan grafik sebagaimana yang ditunjukkan pada grafik pada gambar 4.5 yang menunjukkan fenomena yang terjadi selama pengujian dilakukan.



(a)



**Gambar 4.5** *Flowrate* tara-rata pengujian (a) dan kondisi *flowrate syngas* pengujian sistem *double outlet* (b) dan konvensional (c)

Berdasarkan fenomena yang ditunjukkan gambar 4.5, dapat dianalisa bahwa gas yang diproduksi selama proses gasifikasi memiliki kuantitas yang kurang lebih sama sesuai dengan kapasitas bahan bakar dalam reaktor yang sama. Besaran laju alir *syngas* sistem *double outlet* yang cenderung lebih besar disebabkan oleh perbedaan kecepatan reaksi yang terjadi di dalam reaktor selama proses gasifikasi akibat dari perbedaan jumlah daerah keluaran yang lebih banyak. Hal tersebut menyebabkan perbedaan temperatur operasi yang juga berakibat pada perbedaan tekanan operasi di dalam reaktor.

Modifikasi aliran *syngas* menjadi dua buah daerah keluaran membuat gas yang dihasilkan pada sistem pertama akan keluar dalam dua arah pipa aliran *syngas* yaitu daerah atas layaknya sistem konvensional dan daerah bawah. Gas yang keluar dari daerah bawah merupakan gas yang pertama terbentuk karena letaknya yang lebih dekat dengan daerah pembakaran sehingga akibat dari kenaikan temperatur yang lebih cepat maka waktu pengeringan terjadi lebih dahulu serta reaksi yang terjadi lebih cepat sehingga lebih cepat dihasilkan gas mampu bakar. Sedangkan gas yang keluar dari daerah atas merupakan reaksi yang terjadi pada daerah pirolisis sampai pengeringan dan panas yang didapatkan untuk reaksi didapat dari pemanasan bahan bakar dibawahnya. Karena waktu pengeringan yang lebih lambat akibat dari perbedaan temperatur maka waktu api didapat akan lebih lambat. Modifikasi aliran bawah di sekitar daerah reduksi dimaksudkan untuk menghindari kandungan tar pada *syngas* yang dihasilkan yang terbentuk di

daerah pirolisis. Namun ternyata masih ada sedikit kandungan tar yang artinya terdapat sedikit aliran *syngas* di daerah di atasnya yang keluar melalui daerah keluaran bawah sehingga masih terdapat kandungan tar.

Hal yang menarik dari fenomena yang terjadi pada laju aliran *syngas* tersebut adalah pada sistem *double outlet* dimana *flowrate syngas* lebih banyak keluar dari daerah atas, namun gas mampu bakar lebih cepat didapat pada daerah keluaran bagian bawah seperti yang ditunjukkan oleh tabel 4.2 berikut.

**Tabel 4.2** Tabel waktu didapatnya api pada *burner*

Sistem Double Outlet Gas		Sistem Konvensional
Waktu Api Bawah Menyala	Waktu Api Atas Menyala	Waktu Api Atas Menyala
Selepas Dimulai Eksperimen	Selepas Dimulai Eksperimen	Selepas Dimulai Eksperimen
6 Menit	10 Menit	8 Menit

Dari data tersebut, dapat dilakukan analisa bahwa *syngas* yang keluar dari bagian atas reaktor pada awal reaksi lebih banyak mengandung uap air sehingga gas yang keluar lebih banyak mengandung uap air dibandingkan dengan gas mampu bakar. Pada daerah keluaran bagian bawah, di awal operasi juga mengandung uap air sebagai suatu metode pengeringan bahan bakar dari kandungan tersebut akibat dari kenaikan temperatur, hanya saja letak bahan bakar yang dekat dengan daerah pembakaran yang memiliki temperatur lebih tinggi sehingga kandungan uap air yang keluar menuju *burner* akan lebih cepat untuk diuapkan sehingga lebih cepat didapatkan api sebagai indikasi adanya gas mampu bakar yang terkandung dalam pipa alir *syngas*. Sedangkan pada daerah keluaran bagian atas dimana terdapat jumlah bahan bakar yang lebih banyak untuk dikeringkan, maka akan lebih lambat didapatkannya api. Dari fenomena tersebut dapat disimpulkan bahwa waktu di awal operasional pengujian gasifikasi tersebut lebih ditujukan untuk waktu pengeringan bahan bakar atau dengan kata lain untuk mengeluarkan uap air yang masih terkandung di dalam bahan bakar walaupun telah lebih dahulu dilakukan pengeringan terhadap bahan bakar yang akan dipakai untuk pengujian. Indikasi tersebut dapat dilihat pada gambar 4.6 dimana ada tanda keluarnya uap air pada ujung *burner* maupun pada gas hasil gasifikasi saat awal operasional.



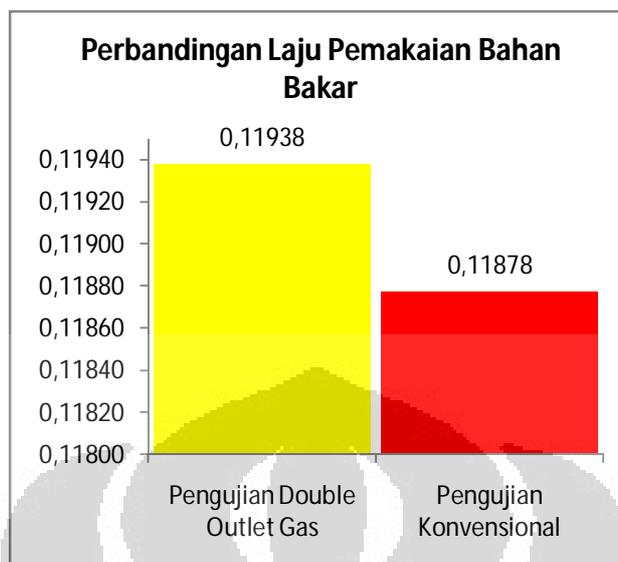
**Gambar 4.6** Indikasi adanya kandungan uap air yang keluar melalui pipa aliran bagian atas

### 4.3.3 Parameter Gasifikasi

Parameter gasifikasi merupakan parameter yang menunjukkan fenomena yang terjadi selama proses gasifikasi. Parameter gasifikasi menunjukkan kecenderungan operasional sistem gasifikasi tertentu sampai kepada efisiensi yang didapat dari sistem tersebut. Parameter gasifikasi dapat dijadikan bahan evaluasi untuk sistem yang telah berjalan maupun untuk mendesain peralatan gasifikasi yang baru didasari dari perhitungan-perhitungan tersebut. Parameter gasifikasi meliputi laju alir bahan bakar, ekivalensi rasio, komposisi gas, LHV *syngas*, dan juga efisiensi gasifikasi.

#### 4.3.3.1 Laju Pemakaian Bahan Bakar

Laju pemakaian bahan bakar merupakan tingkat konsumsi bahan bakar yang diperlukan oleh *gasifier* untuk satu kali pengujian dengan kapasitas tertentu setiap satuan waktu. Laju pemakaian bahan bakar dihitung berdasarkan jumlah bahan bakar yang dipakai dikurangi sisa pembakaran dibagi dengan durasi operasional total, dimana sisa pembakaran merupakan arang sisa yang dihasilkan saat api padam dan harus langsung diambil dan ditimbang sesaat setelah api pada *burner* padam untuk mencegah reaksi arang dengan udara sekitar sedangkan abu tidak dianggap sebagai sisa pembakaran karena abu merupakan produk yang dihasilkan dari proses yang terjadi pada zona pirolisis.

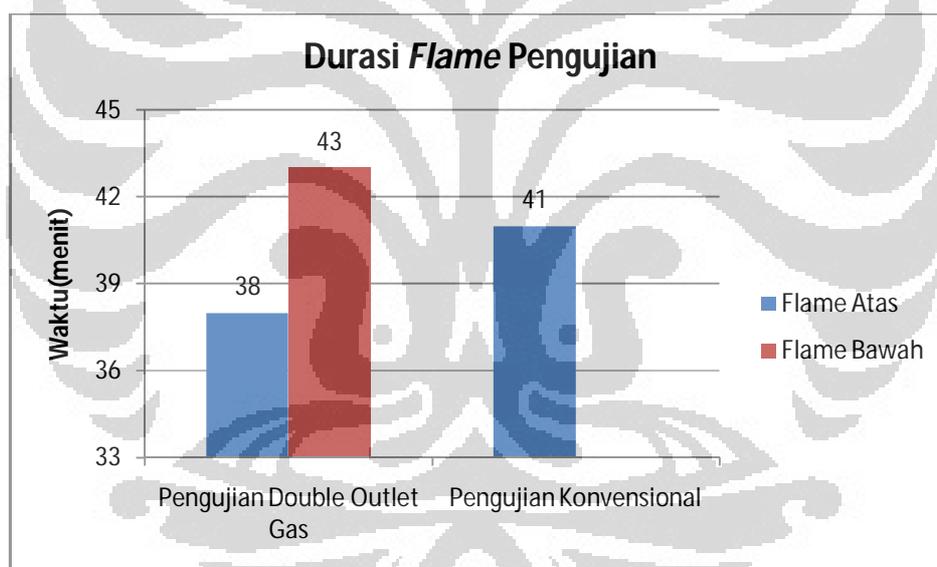


**Gambar 4.7** Laju pemakaian bahan bakar

Laju pemakaian bahan bakar dipengaruhi oleh ketiga faktor yang disebutkan sebelumnya yaitu kapasitas bahan bakar dalam reaktor, sisa pembakaran, dan durasi operasional. Berdasarkan waktu operasi total yang relatif sama yaitu sebesar 49 menit dalam pengujian, maka besarnya nilai laju pemakaian bahan bakar sangat dipengaruhi oleh nilai arang sisa yang dihasilkan dimana pada pengujian *double outlet* dihasilkan arang sebanyak 150,4 gram dan pada pengujian konvensional dihasilkan 180 gram. Sedangkan jumlah arang sisa sangat dipengaruhi oleh reaksi pembakaran arang dan juga reaksi gasifikasi arang di dalam reaktor, dimana kedua tersebut mempengaruhi satu sama lain karena sebagian besar reaksi gasifikasi merupakan reaksi endotermik sehingga diperlukan panas dari reaksi eksotermik yang dihasilkan dari reaksi pembakaran. Hal yang mungkin terjadi dari perbedaan jumlah sisa arang tersebut adalah kecepatan reaksi gasifikasi di dalam reaktor berkurang pada sistem konvensional akibat dari perbedaan temperatur operasi. Perbedaan temperatur operasi disebabkan karena pada sistem *double outlet*, gas hasil dari proses gasifikasi akan dikeluarkan melalui dua buah daerah aliran sehingga berakibat pada peningkatan produksi *syngas* sehingga reaksi pada proses gasifikasi tersebut berlangsung lebih cepat. Hasil dari kecepatan reaksi yang lebih cepat berakibat pada pemanfaatan jumlah arang dari bahan bakar yang juga akan lebih cepat dari proses konvensional sehingga jumlah arang sisa yang dihasilkan akan menjadi lebih sedikit.

Kondisi bahan bakar juga sangat mempengaruhi besaran nilai laju pemakaian bahan bakar karena dengan kondisi bahan bakar yang masih basah, tentunya akan berakibat pada

semakin lamanya waktu operasi sedangkan waktu operasional sejak didapatkannya api sampai api padam berada di kisaran yang tidak terlampau jauh. Berdasarkan analisa aliran *syngas* sebelumnya pada sub-bab 4.3.2, durasi *flame* pengujian seperti yang ditunjukkan gambar 4.8 dapat dianalisa. Api pada daerah atas yang memiliki durasi lebih pendek disebabkan oleh laju pemakaian bahan bakar yang cenderung bergerak ke bawah, sehingga api yang lebih cepat terbentuk di daerah keluaran bagian bawah akan cenderung stabil selama pengujian sedangkan seiring dengan habisnya bahan bakar, maka gas yang dihasilkan akan cenderung bergerak ke daerah keluaran bawah sehingga api lebih cepat padam pada daerah keluaran atas. Apabila dibandingkan dengan sistem konvensional, hal serupa terjadi namun karena api hanya keluar di satu daerah aliran maka gas yang dihasilkan akan keluar ke atas sehingga saat waktu pengeringan selesai dilalui maka akan terbentuk api yang cenderung stabil dari awal hingga akhir pengujian pada daerah *burner*.



Gambar 4.8 Perbandingan durasi *flame* pengujian

#### 4.3.3.2 Ekivalensi Rasio

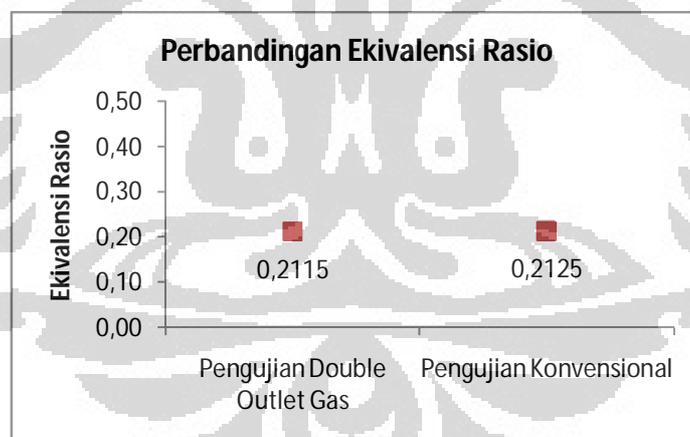
Ekivalensi rasio merupakan salah satu parameter dalam menentukan desain sebuah reaktor gasifikasi. Nilai ER merupakan perbandingan antara rasio udara-bahan bakar aktual dengan rasio udara-bahan bakar stoikiometrik. Besaran nilai ER mempengaruhi hasil dari reaksi yang terjadi di dalam reaktor seperti jumlah arang, gas, dan cairan yang dihasilkan. Untuk

memperhitungkan nilai ER, dibutuhkan variabel berupa laju alir udara pengujian, durasi operasional *gasifier*, jumlah bahan bakar, dan juga rasio udara-bahan bakar.

Berdasarkan analisis data *ultimate*, terdapat dua unsur zat yang dapat bereaksi dengan udara yaitu karbon (C) dan hidrogen (H<sub>2</sub>). Dari data tersebut, dapat diketahui kebutuhan oksigen yang diperlukan untuk mengoksidasi kedua unsur tersebut melalui udara stoikiometrinya. Kebutuhan udara stoikiometri dapat dicari dengan menggunakan komposisi kandungan karbon, hidrogen, dan oksigennya dan memasukkannya ke dalam rumus berikut ini :

$$\frac{1}{0,23} \left[ \frac{8}{3} C + 8H_2 + S - O_2 \right] \quad (4.1)$$

Berat udara stoikiometri tersebut kemudian dibagi dengan massa jenis udara (1,2kg/m<sup>3</sup>) untuk mendapatkan besaran nilai rasio udara-bahan bakar yaitu sebesar 4,26 setelah dilakukam kalkulasi perhitungan. Perbandingan nilai ER untuk pengujian yang dilakukan adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.3 dimana seluruh hasil dari ER merupakan hasil yang didapat dari kalkulasi menggunakan rumus yang ada pada persamaan 2.3 yang telah dibahas pada bab sebelumnya.



**Gambar 4.9** Perbandingan ekivalensi rasio pengujian

Dari grafik seperti yang diperlihatkan di atas, nilai ER dari reaktor gasifikasi *updraft* menggunakan *double gas outlet* dan konvensional berturut-turut adalah 0,2115 dan 0,2125. Berdasarkan buku yang ditulis oleh Prabir basu berjudul *Biomass Gasification and Pyrolysis : Practical Design*, nilai ER mempengaruhi performa dari *gasifier*. Nilai ER yang kecil menghasilkan banyak arang karena arang tidak berubah menjadi gas secara keseluruhan. Selain

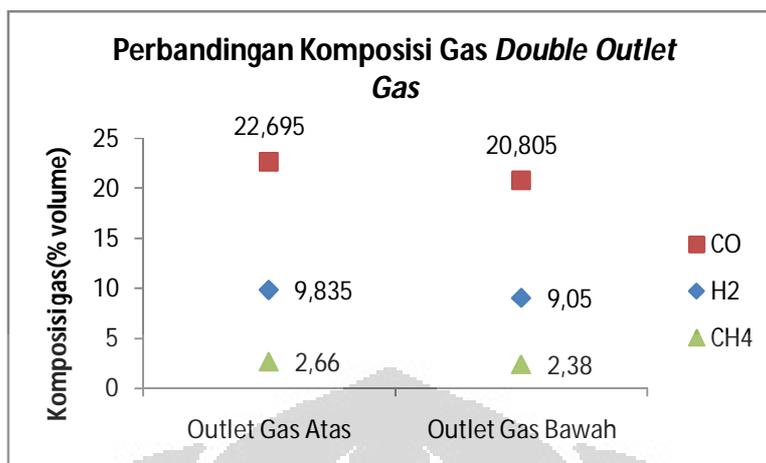
itu nilai ER yang rendah akan berpengaruh juga terhadap produksi tar yang dihasilkan yang juga akan semakin meningkat. Alat gasifikasi *downdraft* memberikan hasil yang terbaik dengan nilai ER berkisar pada nilai 0,25 sedangkan rata-rata alat gasifikasi *updraft* yang tipikal menghasilkan nilai dibawah 0,25 dimana hasil gasifikasinya mengandung banyak tar.

Nilai ER juga mempengaruhi kualitas gas yang dihasilkan dimana nilai tersebut harus dibawah 1,0 untuk memastikan bahwa bahan bakar akan tergasifikasi (tidak terbakar). Nilai ER kurang dari 0,2 menghasilkan beberapa masalah seperti gasifikasi tidak sempurna, formasi arang yang berlebihan, dan produksi gas dengan nilai panas yang rendah. Sedangkan ER lebih dari 0,25 menghasilkan gas produk yang telah terbakar sehingga dapat menaikkan temperatur dan apabila nilai ER lebih dari 0,4 formasi produk yang telah mengalami pembakaran sempurna melimpah. Dari nilai yang dihasilkan dari kedua pengujian tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa reaktor gasifikasi tersebut dapat menghasilkan gas hasil gasifikasi yang dapat dimanfaatkan walaupun kandungan tar pada *gasifier* tersebut termasuk tinggi.

#### 4.3.3.3 Komposisi Gas

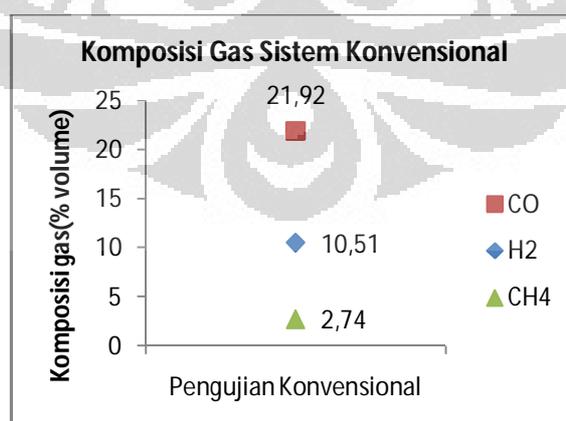
Setiap pengujian gasifikasi *double outlet gas* tersebut, akan dihasilkan *syngas* yang merupakan hasil dari proses gasifikasi dimana indikasi adanya gas hasil dari gasifikasi tersebut dapat dilihat dari komposisi gas mampu bakar yang dihasilkan seperti CO, H<sub>2</sub>, dan CH<sub>4</sub>. Gas-gas tersebut dihasilkan dari reaksi yang terjadi pada daerah pirolisis dan daerah reduksi dari suatu reaktor gasifikasi. Reaksi kimia antara zat-zat tersebut di dalam reaktor gasifikasi telah dibahas pada bab sebelumnya.

Dengan melakukan pengambilan sampel gas pada daerah pipa aliran atas dan bawah pada suatu temperatur tertentu saat api di *burner* sudah menyala sebagai indikasi adanya gas mampu bakar, maka komposisi dari masing-masing gas hasil dari reaksi yang terjadi di dalam reaktor gasifikasi dapat diketahui.



**Gambar 4.10** Perbandingan komposisi gas keluaran atas dan bawah pada sistem *double outlet*

Dari komposisi gas mampu bakar yang dihasilkan sebagai parameter gasifikasi tersebut, maka dapat dianalisa bahwa nilai komposisi gas daerah keluaran atas lebih tinggi dari daerah bawah yang akan mempengaruhi nilai LHV gas. Sedangkan untuk sebaran gas hasil gasifikasi di sepanjang reaktor kurang lebih sama, namun nilai komposisi gas daerah atas yang cenderung lebih tinggi kemungkinan karena temperatur yang lebih tinggi pada daerah termokopel 1 sampai 4 maka kemungkinan terbentuknya gas CO<sub>2</sub> sebagai dampak dari reaksi pembakaran akan tinggi, hal ini berkaitan dengan jumlah gas CO yang terbentuk pada daerah keluaran bawah pun akan lebih sedikit dibandingkan dengan gas CO pada pengeluaran gas atas sehingga proses gasifikasi lebih sempurna terjadi yang diindikasikan oleh kenaikan komposisi gas CO dan H<sub>2</sub> yang terbentuk.

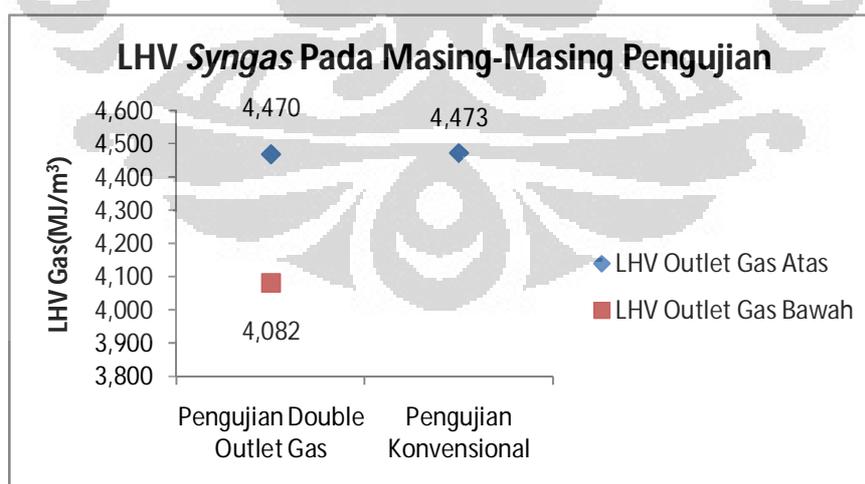


**Gambar 4.11** Komposisi gas sistem konvensional

Dari sisi komposisi gas hasil gasifikasi antara sistem *double outlet* dengan sistem konvensional didapat nilai yang efektif untuk suatu proses gasifikasi dimana dari data tersebut juga dapat disimpulkan bahwa nilai dari karbon monoksida untuk sistem gasifikasi *updraft* di atas 20% dari volume gas keseluruhan, sedangkan nilai hidrogen dan metana berturut-turut adalah antara 8-10% dan sekitar 2%. Sebuah sumber menyatakan bahwa parameter gasifikasi yang terpenting adalah keberadaan gas karbon monoksida dan hidrogen pada *syngas* hasil reaksi. Nilai metana yang fluktuatif mempengaruhi jumlah kedua gas tersebut karena metana akan terpecah ikatannya apabila bereaksi dengan uap air dan oksigen menghasilkan kedua gas tersebut melalui proses oksidasi parsial dan juga reaksi *steam-reforming*. Nilai CO sebesar itu mengindikasikan sudah cukup baik proses gasifikasi yang berlangsung di dalam reaktor, sedangkan nilai H<sub>2</sub> masih kurang untuk menghasilkan gas hasil gasifikasi yang efektif.

#### 4.3.3.4 LHV Syngas

Komposisi gas dari hasil gasifikasi mempengaruhi besaran nilai kalor dari suatu pengujian. Nilai *Lower Heating Value* (LHV) yang dihasilkan dari proses gasifikasi tersebut merupakan hasil dari perkalian jumlah komposisi gas dengan LHV gas pada temperatur ruang sebagaimana yang terdapat pada persamaan 2.12 dan tabel 2.5 sehingga LHV *syngas* pada masing-masing pengujian adalah sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 4.12 berikut.



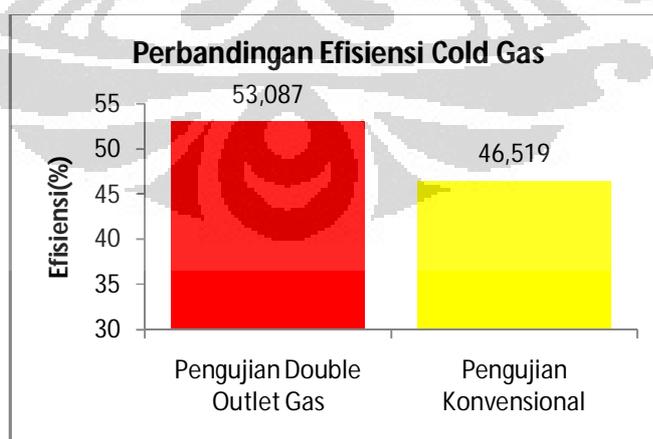
Gambar 4.12 LHV *syngas* pengujian

Dari grafik yang ditunjukkan terlihat bahwa nilai komposisi gas berpengaruh terhadap LHV *syngas* dan dapat dilihat bahwa nilai LHV yang didapatkan kedua sistem tersebut hampir sama yang artinya nilai kalor yang dihasilkan oleh sistem gasifikasi *updraft double outlet* similar dengan nilai kalor sistem konvensional. Hal yang membedakan adalah besaran nilai laju alir antara *syngas* pada kedua sistem tersebut yang akan mempengaruhi nilai efisiensi dari keseluruhan proses gasifikasi.

#### 4.3.3.5 Efisiensi Cold Gas

Efisiensi dari suatu reaktor gasifikasi dipengaruhi oleh banyaknya *syngas* yang dihasilkan per satuan waktu (laju alir *syngas*), nilai LHV *gasifier*, laju pemakaian bahan bakar, dan juga LHV bahan bakar dimana perhitungan efisiensi gasifikasi tersebut dapat dihitung menggunakan persamaan 2.8 pada bab sebelumnya. Nilai LHV bahan bakar dihitung menggunakan persamaan 2.13 dimana komposisi gas dan unsur dalam bahan bakar merupakan hasil pengujian analisis *ultimate* dan *proximate* yang telah dilakukan terhadap bahan bakar kayu karet tersebut. Efisiensi gasifikasi menunjukkan tingkat keberhasilan suatu reaktor gasifikasi untuk menghasilkan energi apabila dibandingkan dengan jumlah energi yang masuk ke dalam suatu sistem gasifikasi.

Pada sistem *double outlet*, energi yang dihasilkan merupakan kombinasi dari jumlah *syngas* dan besaran nilai LHV yang dihasilkan oleh *gasifier*. Sedangkan pada sistem konvensional murni merupakan hasil gasifikasi dari daerah atas.



**Gambar 4.13** Perbandingan efisiensi *Cold Gas*

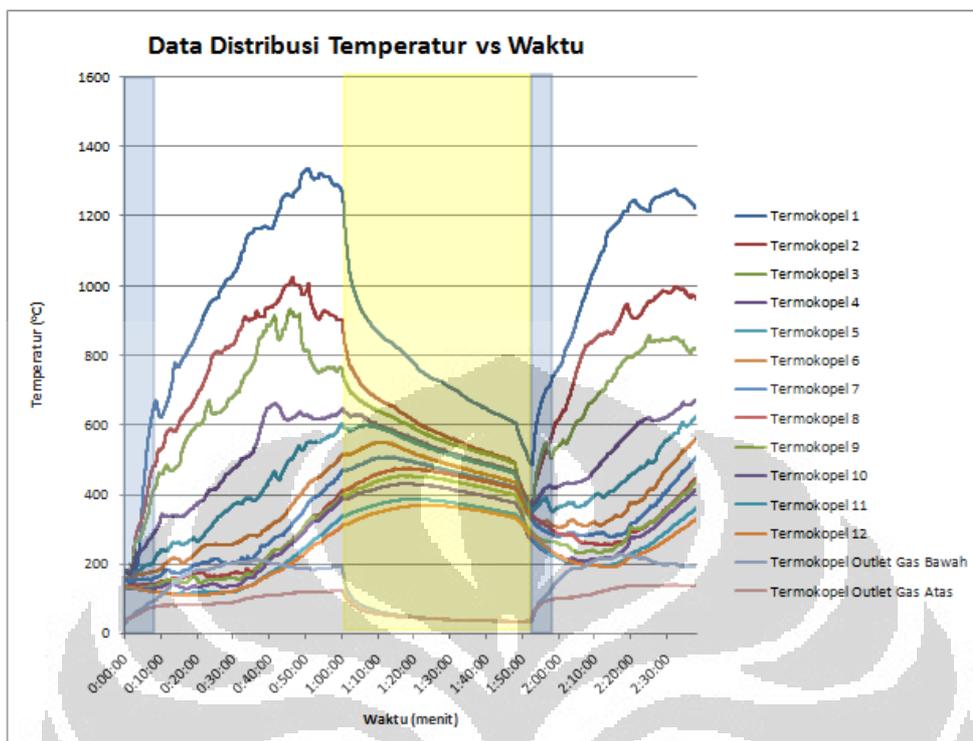
Nilai efisiensi sistem *double outlet* yang lebih tinggi mengindikasikan bahwa kerugian yang dialami oleh reaktor gasifikasi dengan sistem tersebut dapat dikurangi dengan mengeluarkan gas hasil dari proses gasifikasi melalui dua arah aliran. Kerugian yang ditimbulkan oleh proses gasifikasi berupa kerugian dari reaktor berupa energi panas reaktor serta energi tersisa dari arang yang dihasilkan. Nilai arang tersisa yang lebih rendah mengindikasikan bahwa sistem *double outlet* lebih efisien dalam pemakaian bahan bakarnya untuk menghasilkan energi.

#### **4.4 Perbandingan Karakteristik Operasi Sistem Gasifikasi *Updraft Double Outlet Gas* dalam Pengujian 2 *Batch***

Dalam pengujian gasifikasi *updraft* dengan *double outlet gas*, dilakukan juga pengujian dengan metode 2 *batch*, dimana *batch* kedua dilakukan setelah pengujian di *batch* pertama telah selesai dilakukan. Pengujian *batch* kedua dilakukan dengan jeda waktu antar kedua *batch* tersebut tergantung waktu penurunan temperatur pada termokopel pertama di bagian bawah reaktor mendekati temperatur pengambilan tar pada *batch* pertama. Pengujian dengan metode 2 *batch* adalah untuk melihat karakteristik operasi reaktor apabila digunakan secara kontinyu tiap *batch*. Kondisi operasional yang berbeda saat operasional awal pengujian dilakukan merupakan salah satu hal yang diamati selama pengujian dimana temperatur operasi pada awal pengoperasian *batch* kedua pastinya akan lebih tinggi dari temperatur pada awal operasional *batch* pertama. Hal tersebut tentunya akan mempengaruhi waktu operasional dan juga fenomena yang terjadi selama pengujian di dalam reaktor.

##### **4.4.1 Distribusi Temperatur**

Distribusi temperatur yang terjadi selama proses pengujian dapat dilihat pada gambar 4.14 berikut, dimana daerah dengan warna biru merupakan daerah waktu pengeringan reaktor untuk mengeluarkan uap air yang terkandung di dalam bahan bakar dan daerah dengan warna kuning merupakan waktu jeda antar *batch* pertama dan kedua dengan maksud untuk memasukkan bahan bakar untuk *batch* kedua dan juga untuk menurunkan temperatur *gasifier* sampai kepada temperatur pada termokopel pertama memiliki temperatur yang mendekati waktu pengambilan tar pada *batch* pertama agar kondisi pengambilan tar pada *batch* kedua dapat di anggap similar.

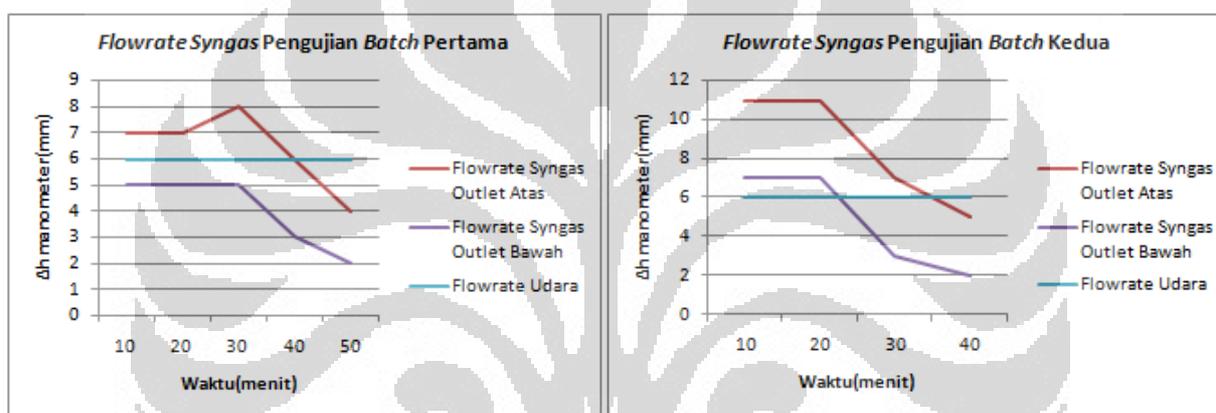


**Gambar 4.14** Distribusi temperatur pengujian 2 batch

Dari pengujian tersebut dapat diamati bahwa karakteristik temperatur pada *batch* pertama dan *batch* kedua memiliki tren yang kurang lebih similar dimana kondisi temperatur saat operasional berada di kisaran angka yang kurang lebih sama antar *batch* tersebut. Kondisi yang membedakan ialah temperatur di awal waktu operasi yang lebih tinggi pada *batch* kedua mengakibatkan waktu untuk pengeringan bahan bakar lebih cepat karena kondisi operasional pada awal *batch* kedua di dalam reaktor mulai dari termokopel 1 di daerah pembakaran ( $>500^{\circ}\text{C}$ ) sampai kepada termokopel di bagian atas reaktor memiliki temperatur di atas  $100^{\circ}\text{C}$  yang mengakibatkan kandungan air dalam bahan bakar akan lebih cepat menguap karena kondisi temperatur yang sudah tinggi sehingga waktu didapkannya gas mampu bakar pun akan lebih cepat dibandingkan dengan fenomena yang terjadi pada *batch* pertama. Meningkatnya waktu didapkannya gas mampu bakar tersebut tentunya akan berakibat pada durasi operasional yang lebih cepat karena proses gasifikasi terjadi lebih cepat akibat pengaruh dari kondisi temperatur yang tinggi.

#### 4.4.2 Flowrate Syngas Pengujian

Nilai laju alir *syngas* pengujian pada setiap pengujian merupakan nilai dari banyaknya *syngas* yang dihasilkan dalam suatu proses gasifikasi tiap satuan menit. Nilai tersebut dapat berbeda-beda setiap pengujian akibat dari faktor-faktor yang dapat mempengaruhinya seperti yang telah di analisa pada pengujian menggunakan metode 1 *batch* sebelumnya. Sedangkan untuk pengujian nilai dari *syngas* yang dihasilkan untuk pengujian menggunakan metode 2 *batch* dilakukan untuk mengetahui kontinuitas nilai yang dihasilkan tersebut. Dari dua pengujian menggunakan metode tersebut, maka didapatkan data berupa laju alir *syngas* dan tekanan statik seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.15 berikut :



Gambar 4.15 Flowrate syngas pengujian metode 2batch

Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa aliran *syngas* keluar dari reaktor menuju *burner* pada *batch* pertama dan kedua memiliki nilai yang kurang lebih similar dan pada awal reaksi terjadi peningkatan laju aliran antara *batch* pertama dan kedua. Analisa yang dapat diambil dari fenomena tersebut adalah pada *batch* pertama dimana temperatur reaktor lebih rendah, tekanan di dalam reaktor pun juga lebih kecil apabila dibandingkan dengan kondisi di *batch* kedua dimana temperatur mulai pengujian sudah lebih tinggi sehingga tekanan di dalam reaktor pun juga akan lebih besar. Hal ini menjelaskan fenomena yang terjadi tersebut dimana pada awal operasi *batch* kedua laju alir *syngas* yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan di *batch* pertama karena tekanan di reaktor lebih tinggi sehingga gas mengalir lebih cepat keluar reaktor. Apabila dibandingkan dengan analisa distribusi temperatur yang menyebutkan bahwa temperatur operasional reaktor tersebut kurang lebih sama, maka nilai laju alir pada saat operasional yang kurang lebih similar antara kedua *batch* tersebut menjelaskan hal ini.

**Tabel 4.3** Laju alir *syngas* pengujian dalam satuan liter per menit (lpm)

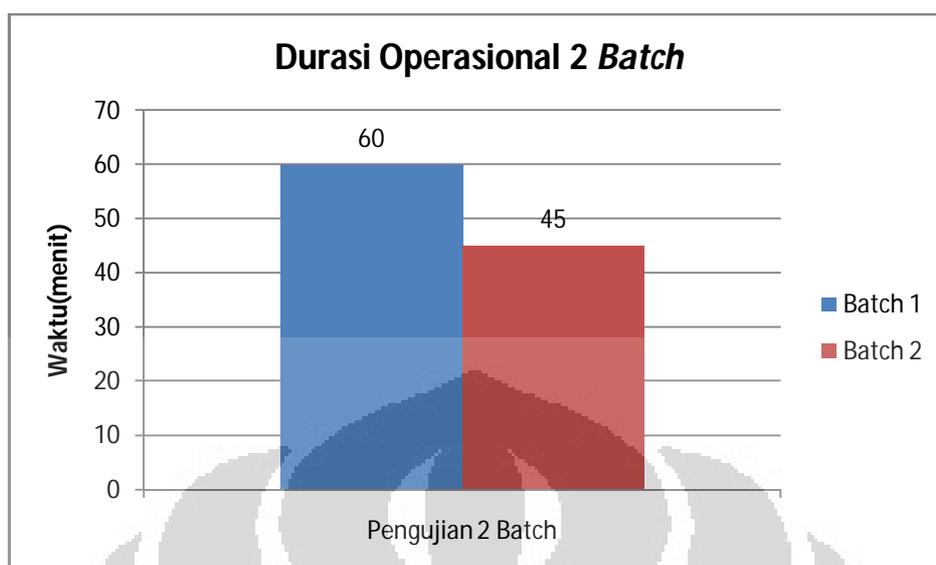
	Pengujian 2 Batch	
	Batch 1	Batch 2
Flowrate Udara	107.71	107.71
Flowrate Syngas Atas	109.41	125.29
Flowrate Syngas Bawah	85.75	91.78

#### 4.4.3 Karakteristik Pengujian

Karakteristik operasi pengujian dengan metode 2 *batch* gasifikasi *updraft double outlet gas* tersebut meliputi durasi operasional pengujian dan juga jumlah sisa arang dan sisa abu sebagai bagian dari reaksi gasifikasi yang terjadi selama pengujian dilakukan. Analisa yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik operasi pengujian mencakup kedua hal tersebut.

##### 4.4.3.1 Durasi Operasional

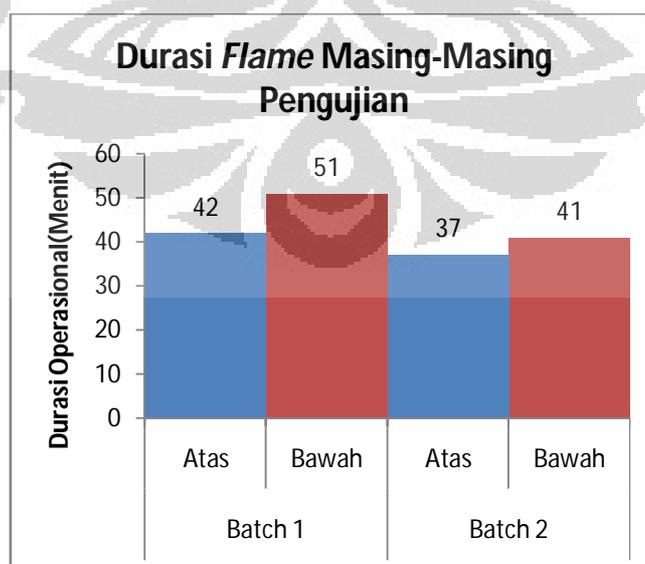
Durasi operasional reaktor gasifikasi *updraft* sangat tergantung dengan kondisi bahan bakar yang digunakan dan juga temperatur operasional saat pengujian dilakukan sebagaimana yang telah dibahas sebelumnya. Dari pengujian 2 *batch* tersebut, didapatkan nilai panjang waktu operasi pada *batch* kedua yang lebih rendah apabila dibandingkan dengan kondisi *batch* pertama berhubungan erat dengan waktu pengeringan yang terjadi di dalam reaktor dimana durasi pengeringan yang lebih pendek pada *batch* kedua dipengaruhi oleh temperatur awal pengujian yang lebih tinggi sehingga uap air yang terkandung di dalam bahan bakar menguap lebih cepat.



**Gambar 4.16** Durasi operasional pengujian 2 batch

#### 4.4.3.2 Durasi Flame

Dengan perbedaan waktu operasi yang sangat jauh membuat perbedaan waktu penyalaan *flame* selama pengujian. Lama waktu pengeringan pada *batch* pertama yang mengakibatkan panjangnya waktu operasi membuat proses gasifikasi cenderung berjalan lambat sehingga durasi *flame* pada *batch* pertama lebih panjang dibandingkan pada *batch* kedua. Kondisi sebaliknya terjadi pada *batch* kedua dimana waktu pengeringan yang singkat membuat proses gasifikasi dapat berlangsung lebih cepat sehingga durasi *flame* pun menjadi lebih cepat.



**Gambar 4.17** Durasi *flame* pengujian 2 batch

#### 4.4.3.3 Jumlah Arang dan Abu

Jumlah arang dan abu memperlihatkan proses yang terjadi di dalam reaktor gasifikasi. Abu merupakan hasil reaksi yang terjadi pada proses pirolisis sehingga abu tidak dikategorikan sebagai sisa pembakaran pada proses gasifikasi yang terjadi, sedangkan arang merupakan sisa pembakaran dimana arang tersisa tersebut sebenarnya masih dapat dibakar akan tetapi tidak dapat lagi menghasilkan gas mampu bakar yang efektif untuk proses gasifikasi yang diindikasikan dengan matinya api pada *burner* sehingga saat api tersebut mati maka *blower* pun harus langsung dimatikan dan arang sisa tersebut harus langsung diambil karena arang tersisa tersebut masih dapat terbakar dan berubah menjadi abu. Dari data yang didapat, dapat dilakukan analisa bahwa jumlah abu yang didapat merupakan akumulasi proses yang terjadi selama pengujian dilakukan (*batch* pertama dan kedua) sedangkan jumlah arang yang dihasilkan murni merupakan hasil reaksi dari *batch* kedua.



Gambar 4.18 Jumlah arang dan abu pengujian 2 *batch*

#### 4.5. Visualisasi Api pada *Burner* Alat Pengujian

Pengamatan secara visual digunakan untuk mengamati kondisi api yang tampak pada *burner* selama proses gasifikasi berlangsung terkait dengan gas yang dihasilkan oleh reaktor gasifikasi selama pengujian.

#### 4.5.1 Visualisasi Api pada Pengujian 1 *Batch* Sistem *Double Outlet* dengan Sistem Konvensional

Dari pengamatan yang dilakukan secara visual dapat diamati bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada bentuk api yang dihasilkan pada kedua *outlet* gas apabila dibandingkan dengan apa yang dihasilkan pada sistem konvensional karena nilai kalor yang dihasilkan relatif sama. Pada daerah *double outlet*, gas yang keluar pada daerah bawah cenderung lebih lama karena bahan bakar cenderung bergerak ke bawah sehingga saat kondisi bahan bakar semakin menipis maka gas akan keluar melalui daerah keluaran terdekat sehingga api di atas lebih cepat padam. Akan tetapi terlihat bahwa api pada sistem konvensional cenderung lebih besar, hal ini karena pada sistem konvensional, gas keluar di satu arah sehingga terjadi akumulasi dari aliran *syngas* keluar dari daerah atas. Sedangkan pada sistem *double outlet*, gas yang keluar terbagi dua sehingga *flowrate syngas* terbagi pada dua daerah keluaran. Api di bagian bawah lebih besar pada awal operasi karena cenderung lebih cepat dihasilkan gas mampu bakar karena reaksi terjadi lebih dahulu.

Waktu (menit)	Bentuk Flame		Waktu (menit)	Bentuk Flame	
	Pengujian <i>Double Outlet Gas</i>	Pengujian Konvensional		Pengujian <i>Double Outlet Gas</i>	Pengujian Konvensional
0 s/d 10			31 s/d 40		
11 s/d 20			41 s/d 50		
21 s/d 30					

**Gambar 4.19** Visualisasi api pada pengujian 1 *batch* antara sistem *double outlet* dan konvensional

#### 4.5.2 Visualisasi Api pada Pengujian 2 Batch

Pengujian 2 batch dapat terlihat bahwa kondisi api pada awal operasi batch kedua cenderung lebih besar dibanding batch pertama, hal ini disebabkan pada awal operasi batch kedua yang memiliki temperatur operasi awal yang lebih besar mengakibatkan tekanan dalam reaktor menjadi lebih besar sehingga gas yang dihasilkan memiliki nilai laju alir yang lebih besar akibat dari kenaikan temperatur dan tekanan dalam reaktor sehingga api yang dihasilkan lebih besar. Kondisi ini juga tidak lepas dari waktu pengeringan bahan bakar di batch kedua cenderung lebih cepat.

Waktu (menit)	Bentuk Flame		Waktu (menit)	Bentuk Flame	
	Pengujian Batch Pertama	Pengujian Batch Kedua		Pengujian Batch Pertama	Pengujian Batch Kedua
0 s/d 10			31 s/d 40		
			41 s/d 50		
11 s/d 20			51 s/d 60		
21 s/d 30					

Gambar 4.20 Visualisasi api pada pengujian 2 batch sistem double outlet

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari data dan analisa hasil pengujian gasifikasi *updraft double outlet gas* yang didapat dari metode pengujian satu *batch* dan membandingkannya dengan hasil yang didapat dari pengujian dengan sistem konvensional serta memperbandingkan hasil yang didapat pada metode 1 *batch* dan metode 2 *batch* untuk mengetahui karakteristik operasi pengujian sistem gasifikasi *double outlet* secara kontinyu tiap *batch*, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan yang berkaitan dengan hasil dari pengujian yaitu sebagai berikut :

1. Karakteristik operasi gasifikasi *updraft* dengan kedua metode tersebut memiliki nilai yang tidak terlalu jauh berbeda.
2. Durasi operasional reaktor gasifikasi tersebut dipengaruhi oleh kondisi kadar air pada bahan bakar dan juga temperatur operasional yang dipengaruhi oleh kondisi pengeringan bahan bakar serta kecepatan reaksi dengan jumlah *flowrate* udara yang diberikan untuk kedua sistem tersebut sama yaitu sebesar 108 lpm.
3. Waktu pengeringan dalam setiap pengujian berbeda-beda tergantung kondisi bahan bakar.
4. Untuk pengujian *double outlet*, pada daerah keluaran bawah lebih cepat didapatkan api karena kandungan uap air bahan bakar mengalami proses pemanasan yang lebih cepat.
5. Nilai Ekivalensi Rasio (ER) yang dihasilkan kedua sistem tersebut mengindikasikan bahwa reaktor gasifikasi yang dipakai untuk pengujian telah mampu menghasilkan gas mampu bakar dengan baik, hanya saja kendala yang dihadapi adalah tipikal alat gasifikasi *updraft* yaitu kandungan tar yang tinggi.
6. Komposisi gas yang dihasilkan sudah mampu menghasilkan komposisi gas mampu bakar dengan komposisi CO berkisar di atas 20%, H<sub>2</sub> 9-10%, dan CH<sub>4</sub> sekitar 2%. Nilai CO sebesar itu mengindikasikan sudah cukup baik proses gasifikasi yang berlangsung di dalam reaktor, sedangkan nilai H<sub>2</sub> masih kurang untuk menghasilkan gas hasil gasifikasi yang efektif.

7. LHV yang dihasilkan oleh sistem *double outlet gas* tidak terlalu jauh berbeda dengan sistem konvensional. Api didapat pada dua daerah keluaran dengan nilai yang berbeda karena terdapat perbedaan nilai komposisi gas yang dihasilkan dimana komposisi gas yang dihasilkan merupakan akumulasi dari setiap tingkatan reaksi pada reaktor.
8. Efisiensi gasifikasi dipengaruhi oleh LHV *syngas*, *flowrate syngas*, laju pemakaian bahan bakar, serta LHV bahan bakar. Pada sistem *double outlet*, efisiensi yang didapat merupakan kombinasi nilai dari daerah keluaran atas dan daerah keluaran bawah sehingga didapatkan nilai efisiensi yang lebih tinggi yaitu 53,087% berbanding 46,519%.
9. Untuk metode *2 batch*, tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara operasional *batch* pertama dan kedua. Hal yang membedakan ialah temperatur awal operasi yang lebih besar pada *batch* kedua mengakibatkan waktu pengeringan terjadi lebih cepat sehingga durasi operasional total akan lebih cepat juga. Temperatur yang tinggi di awal operasi mengakibatkan *flowrate syngas* pada awal pengujian menjadi lebih tinggi akibat dari kenaikan tekanan di dalam reaktor akibat kenaikan temperatur sehingga gas yang keluar di awal operasi akan lebih cepat yang berarti mempercepat pengeluaran kandungan uap air pada bahan bakar.

## 5.2 Saran

Untuk kemajuan penelitian gasifikasi *updraft* sehingga didapatkan hasil penelitian yang sesuai harapan, maka perlu diadakan beberapa perbaikan :

1. Pengecekan sambungan termokopel agar bacaan temperatur dapat lebih akurat lagi.
2. Diperlukan peralatan yang dapat mengukur *flowrate* kontinu selama pengujian agar diketahui jumlah *syngas* yang dihasilkan secara akurat.
3. Perbaikan sirkulasi udara di laboratorium karena pada awal operasi gas yang dihasilkan sangat banyak sebelum api menyala sehingga berbahaya bagi praktikan.
4. Perlu disediakan peralatan keamanan dan keselamatan seperti APAR mengingat resiko yang ditimbulkan sangat besar.
5. Penggunaan *heater* saat pengambilan tar sebaiknya dihindari, karena *heater* akan menyumbat proses penghisapan tar ke dalam tabung reaksi.

6. Perlu dibuat SOP tentang prosedur pengoperasian alat mulai dari tahapan persiapan, pengujian, maupun tahapan yang dilakukan setelah pengujian secara sistematis agar prosedur setiap penelitian yang nantinya akan dikembangkan dari penelitian sebelumnya akan sama.
7. Mengingat tipe *gasifier* yang digunakan merupakan *fixed bed gasifier* diperlukan studi lanjutan mengenai suatu mekanisme kerja dari pipa aliran *syngas* yang dapat bergerak secara *mobile* pada sisi *gasifier* sehingga dapat dilakukan modifikasi apabila dibutuhkan mengenai daerah pengeluaran dari *syngas* yang dihasilkan untuk melakukan studi karakteristik operasi gasifikasi pada tiap zona daerah terjadinya proses gasifikasi.



## DAFTAR REFERENSI

- Arullah, Y1. Nurhadi. Susanto, H., KAJIAN TERMODINAMIKA UPDRAFT GASIFIER dengan SIDE STREAM untuk MENGOLAH BATUBARA SUMATERA SELATAN menjadi GAS SINTESIS, SEMINAR REKAYASA KIMIA DAN PROSES, 4-5 Agustus 2010
- B. Reed, Thomas, & Das, Aqua. 1988. *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine System*. Colorado : US Government
- Bassu, Prabir. 2010. *Biomass Gasification and Pyrolysis : Practical Design*. UK : Elsevier
- Bilad, M.Roil. *Teknologi Gasifikasi Biomassa Alternatif Solusi Bahan Bakar Oven Tembakau (Bagian1konseptdasar)5<sup>th</sup>*. Komunitas Sasak
- Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine System. US Department of Energy. 1988
- Higman, Cristopher, & van der Burgt, Marteen. 2008. *Gasification : Second Edition*. UK : Elsevier
- Okuga, Arthur. *Analysis and Operability Optimization of an Updraft Gasifier Unit*. Eindhoven University of Technology : Department of Mechanical Engineering
- Surjosatyo, Adi, & Vidian, Fajri. 2005. *Studi Eksperimental Cogasifikasi Tandan Kosong dan Tempurung Kelapa Sawit Menggunakan Downdraft Gasifier*. Jurnal Teknologi, No. 4 tahun XXIX
- Vidian, Fajri. 2008. *Gasifikasi Tempurung Kelapa Menggunakan Updraft Gasifier pada Beberapa Variasi Laju Alir Udara Pembakaran*. Jurnal Teknik Mesin, vol. 10 No. 2
- Kurniawan. *Karakteristik Konvensional Updraft Gasifier Dengan Menggunakan Bahan Bakar Kayu Karet Melalui Pengujian Variasi Flow Rate Udara*. Skripsi. Januari 2012



## LAMPIRAN

- Hasil Pengujian Kadar Air Bahan Bakar Kayu karet pada Penelitian 1 *Batch*

Kampus UI Depok 16424, Indonesia (021) Telp. 787 4878 - 727 0029 (Ext.110/111) - 727 0028 (Fax)

**HASIL TEST KADAR AIR** 0001650

Kegiatan Penelitian : BAPAK FAJRI VIDIAN  
 : PENELITIAN S3  
 : TEKNIK MESIN UNIVERSITAS INDONESIA

Jenis Contoh : KAYU  
 Sumber Contoh : --

JENIS PEMERIKSAAN		PERCOBAAN		KETERANGAN
		1	2	
A) Berat Awal	(gram)	1000	1000	Suhu Oven: 107 °C Waktu Pengovenan: 24 jam
B) Berat Akhir	(gram)	914	916	
Kadar Air = $\frac{A - B}{B} \times 100\%$	(%)	9.41	9.17	
Rata-rata	(%)	9.29		

Diperiksa/disetujui,  
 Kepala Laboratorium,  
  
**Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA**

Disahkan oleh : YDP  
 Tanggal : 11 MEI 2012.

Universitas Indonesia