



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGUJIAN EKSPERIMENTAL KARAKTERISTIK
PEMBAKARAN PADA FLUIDIZED BED COMBUSTOR UI
MENGUNAKAN BAHAN BAKAR RANTING POHON**

SKRIPSI

**A.A GDE N.R DHARMA
04 05 02 00 14**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
DEPOK
JUNI 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGUJIAN EKSPERIMENTAL KARAKTERISTIK
PEMBAKARAN PADA FLUIDIZED BED COMBUSTOR UI
MENGUNAKAN BAHAN BAKAR RANTING POHON**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**A.A GDE N.R DHARMA
04 05 02 00 14**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
KEKHUSUSAN KONVERSI ENERGI
DEPOK
JUNI 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : A.A Gde N.R Dharma

NPM : 04 05 02 00 14

Tanda Tangan :

Tanggal : 9 Juli 2009



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : A.A Gde N.R Dharma
NPM : 04 05 02 00 14
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi :PENGUJIAN EKSPERIMENTAL KARAKTERISTIK
PEMBAKARAN PADA FLUIDIZED BED
COMBUSTOR UI MENGGUNAKAN BAHAN
BAKAR RANTING POHON

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian dari 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. Dr. Ir. Bambang Sugiarto M.Eng ()
Penguji : Ir. Yulianto Sulistyono, M.Sc., Ph.D ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 9 Juli 2009

KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- 1) Dr. Ir. Adi Surjosatyo., M.Eng, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- 2) Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
- 3) Sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 26 Juni 2009

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : A.A Gde N.R Dharma

NPM : 04 05 02 00 14

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 :

**PENGUJIAN EKSPERIMENTAL KARAKTERISTIK PEMBAKARAN
PADA FLUIDIZED BED COMBUSTOR UI MENGGUNAKAN
BAHAN BAKAR RANTING POHON**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 9 Juli 2009
Yang menyatakan,

(A.A GDE N.R DHARMA)

ABSTRAK

Nama : A.A Gde N.R Dharma
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Pengujian Eksperimental Karakteristik Pembakaran Pada Fluidized Bed Combustor UI Menggunakan Bahan Bakar Ranting Pohon

Limbah yang berasal dari area perhutanan seperti ranting pohon merupakan potensi energi biomassa yang cukup besar di Indonesia karena sebagian besar wilayahnya terdiri dari hutan. Sampai saat ini masih sedikit yang memanfaatkan ranting tersebut sebagai sumber energi alternatif. Teknologi *fluidized bed combustor* merupakan teknologi yang tepat untuk mengkonversi energi biomassa tersebut menjadi energi panas.

Pengujian pada FBC jenis *bubbling* ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik pembakaran dari ranting pohon dengan melihat distribusi temperturnya. Parameter yang menjadi pertimbangan adalah variasi kecepatan aliran udara dan laju aliran bahan bakar yang dianggap dapat mempengaruhi hasil eksperimental.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa temperatur bed dapat mencapai temperatur 700-750°C, dan akan menjadi lebih optimal dengan bertambahnya laju aliran udara dan laju aliran massanya. Hasil tersebut sudah cukup tinggi untuk biomassa seperti ranting pohon, sehingga dapat dikatakan bahwa ranting pohon memiliki potensi sebagai bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar fosil.

Kata kunci
Fluidized bed combustor, Energi Biomassa, Ranting pohon, Karakteristik pembakaran

ABSTRACT

Name : A.A Gde N.R Dharma
Study Program: Mechanical Engineering
Title : Combustion Characteristic Experimental Testing of Tree Branch in Fluidized Bed Combustor UI

Forestry waste like tree branch is one of the biomass energy that has great potential in Indonesia because most of it's area are forests. Until now, there is not much researcher use the tree branch as an alternative energy. Fluidized bed combustor is the appropriate technology to convert biomass energy into heat energy.

The objective of this experiment at bubbling type of fluidized bed is to learn the combustion characteristics of tree branch by recording it's temperature distribution in every minute. The parameters are the variations of air flow rate and the fuel feed rate that could be considered have an effect in the experiment.

The result of this experimental testing shows that bed temperature can reach for about 700-750°C, and will increase due to additional of air flow rate and fuel feed rate. That was high enough for tree branch type of biomass, so it would become a great potential as an alternative energy to replace the fossil fuel.

Keyword

Fluidized bed combustor, Biomass energy, Tree branch, Combustion characteristic

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Judul Penelitian	1
1.2 Latar Belakang Masalah	1
1.3 Perumusan Masalah.....	5
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Batasan Masalah.....	6
1.6 Metodologi Penelitian.....	6
1.7 Sistematika Penulisan	7
BAB 2 LANDASAN TEORI.....	10
2.1 Energi Biomassa.....	10
2.1.1 Jenis-Jenis Biomassa.....	10
2.1.1.1 Solid Biomassa.....	10
2.1.1.2 Biogas	11
2.1.1.3 Liquid Biofuel.....	11
2.1.2 Teknologi Pengkonversian Biomassa.....	11
2.1.2.1 Proses Thermal.....	12
2.1.2.2 Proses Biologis.....	13
2.1.3 Kelebihan Dan Kekurangan	16
2.2 Karakteristik Biomassa	16
2.3 Sistem Reaksi Pembakaran	19
2.3.1 Hal-Hal Yang Harus Diperhatikan Dalam Proses Pembakaran.....	21
2.3.2 Komponen-Komponen Utama Reaksi Pembakaran	22
2.4 Fluidized Bed Combustor	25
2.4.1 Jenis-Jenis Fluidized Bed Combustor.....	28
2.4.2 Prinsip Kerja Fluidized Bed Combustor	29
2.4.3 Bagian-Bagian Fluidized Bed Combustor.....	31
2.4.3.1 Fluidization Vessel	31
2.4.3.2 Solid Feeder	33
2.4.3.3 Burner	35
2.4.3.4 Bed Material.....	36
2.4.3.5 Cyclone Separator	37
2.4.3.6 Blower	38
2.4.3.7 Instrumentation	39
2.5 Fenomena Fluidisasi	41
2.5.1 Proses Fluidisasi	41

2.5.2 Kondisi Fluidisasi	41
2.5.3 Jenis-Jenis Fluidisasi	43
2.5.3.1 Fluidisasi Partikulat	43
2.5.3.2 Fluidisasi Gelembung	44
2.5.4 Parameter-Parameter Fluidisasi	45
2.5.4.1 Ukuran Partikel	45
2.5.4.2 Massa Jenis Padatan	45
2.5.4.3 Sphericity	46
2.5.4.4 Bed Voidage	46
2.5.4.5 Kecepatan Fluidisasi Minimum	46
2.5.4.6 Penurunan Tekanan Melintas Hamparan	47
2.5.4.7 Penurunan Tekanan Melintas Distributor	48
2.5.4.8 Klasifikasi Pasir	50
2.5.4.9 Daerah Batas Fluidisasi	54
BAB 3 PERSIAPAN DAN PROSEDUR PENGUJIAN	56
3.1 Persiapan Pengujian	56
3.1.1 Bahan Bakar Biomassa	56
3.1.1.1 Ranting Pohon	57
3.1.2 Pasir	59
3.1.3 Perlengkapan Dan Peralatan	63
3.2 Standar Operasi Pengujian	69
3.2.1 Sistem Feeder	69
3.2.2 Blower	71
3.2.3 Sistem Burner	73
3.3 Prosedur Pengujian Pembakaran	77
3.3.1 Rangkaian Alat Pengujian	78
3.3.2 Prosedur Pengambilan Data Pembakaran	79
3.3.2.1 Prosedur Pemanasan Awal Pembakaran	79
3.3.2.2 Prosedur Pengambilan Data Pembakaran	80
3.3.2 Prosedur Pengambilan Data Feed Rate	81
3.3.3 Prosedur Pengambilan Data Karakteristik Blower	82
BAB 4 HASIL DAN ANALISA	84
4.1 Hasil	84
4.1.1 Karakteristik Sistem Feeder	84
4.1.1.1 Hasil Pengujian Untuk Bahan Bakar Ranting Pohon	84
4.1.2 Karakteristik Blower	86
4.1.3 Karakteristik Pembakaran Biomassa	88
4.1.3.1 Karakteristik Ranting Pohon	88
4.2 Analisa	96
4.2.1 Analisa Karakteristik Blower	96
4.2.2 Analisa Karakteristik Sistem Feeder	97
4.2.3 Analisa Daya Panas Yang Dihasilkan	99
4.2.4 Analisa Distribusi Temperatur Terhadap Ketinggian Termokopel	100
4.2.5 Analisa Distribusi Temperatur Terhadap Waktu	102
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	105

5.1 Kesimpulan	105
5.2 Saran	105
REFERENSI	107



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Fluidized Bed Combustor	4
Gambar 1.2 <i>Flow Chart</i> Metodologi	9
Gambar 2.1 <i>Chart</i> Teknologi Konversi Biomassa.....	11
Gambar 2.2 Proses Gasifikasi.....	12
Gambar 2.3 <i>Anaerobic Digester</i>	14
Gambar 2.4 Rangkaian Instalasi Biogas	15
Gambar 2.5 Analisis Proximat untuk Beberapa Jenis Bahan Bakar Padat	18
Gambar 2.6 Definisi Analisis Ultimat dan Proximat	18
Gambar 2.7 Skematis Fluidized Bed Combustor	26
Gambar 2.8 Diagram Proses Pencampuran (<i>mixing</i>) dalam <i>Fluidized Bed Combustor</i>	27
Gambar 2.9 Tahapan Proses Kerja <i>Fluidized Bed Combustor</i> ; (a) Tahapan pada Kondisi Awal; (b) Tahapan Proses Pemanasan; (c) Tahapan pada Kondisi Operasi.....	30
Gambar 2.10 Ruang Bakar Utama <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI	31
Gambar 2.11 Perilaku Gelembung Setiap Jenis Distributor; (a) <i>Porous Plate</i> ; (b) <i>Perforated Plate</i> ; (c) <i>Nozzle-typeTuyere</i> ; (d) <i>Bubble Cap Tuyere</i>	32
Gambar 2.12 Distributor yang Sebelumnya Digunakan pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI.....	33
Gambar 2.13 Jenis-Jenis <i>Solid Flow Control</i> ; (a) <i>Slide Valve</i> (b) <i>Rotary Valve</i> ; (c) <i>Table Feeder</i> ; (d) <i>Screw Feeder</i> ; (e) <i>Cone Valve</i> ; (f) <i>L Valve</i>	34
Gambar 2.14 <i>Screw Feeder</i>	35
Gambar 2.15 Burner yang Digunakan pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI.....	36
Gambar 2.16 Cyclone Separator Fluidized Bed Combustor UI.....	38
Gambar 2.17 Blower Sentrifugal yang Digunakan pada FBC	39
Gambar 2.18 <i>Control Panel</i>	40
Gambar 2.19 <i>Data Logger</i>	40
Gambar 2.20 Skematik Fluidisasi.....	41
Gambar 2.21 Hubungan Tinggi Hampan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hampan Zat Padat.....	42
Gambar 2.21 Hubungan Tinggi Hampan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hampan Zat Padat.....	43
Gambar 2.23 Diagram Klasifikasi Jenis-Jenis Pasir	50
Gambar 2.24 Daerah batas fluidisasi	55
Gambar 3.1 Perbandingan Ranting Pohon Partikel Besar dan Kecil.....	57
Gambar 3.2 Ranting Pohon Sebelum Dilakukan Pemetongan.....	58
Gambar 3.3 Pasir Silika Mesh 30-50 yang Digunakan pada FBC UI	62
Gambar 3.4 Generator Set yang Digunakan.....	63
Gambar 3.5 Ketinggian Termokopel.....	65
Gambar 3.6 Konfigurasi Termokopel (a). T1 - T3, dan (b). T4 – T5	65
Gambar 3.7 Temperature Data Logger.....	66
Gambar 3.8 Tachometer Digital	67
Gambar 3.9 Timbangan dengan Skala Maksimum 2 kg	67

Gambar 3.10 <i>Control panel</i> yang Digunakan untuk Feeder dan Blower.....	68
Gambar 3.11 Anemometer	69
Gambar 3.12 Sistem Feeder pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI.....	70
Gambar 3.13 <i>Ring Blower</i> pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI.....	72
Gambar 3.14 Bagian-bagian <i>Hi-Temp Premixed Burner</i>	76
Gambar 3.15 Rangkaian Seluruh Alat untuk Melakukan Pengujian Pembakaran	79
Gambar 4.1 Grafik Putaran Motor <i>Feeder</i> terhadap <i>Feed Rate</i> Ranting Pohon	86
Gambar 4.2 Grafik Putaran Blower terhadap <i>Flow Rate</i> Udara.....	88
Gambar 4.3 Grafik Distribusi Temperatur terhadap Waktu dengan Laju Aliran Udara 4,9 m ³ /menit.....	91
Gambar 4.4 Grafik Distribusi Temperatur terhadap Waktu dengan Laju Aliran Udara 5,3 m ³ /menit.....	93
Gambar 4.5 Grafik Hubungan Distribusi Temperatur terhadap Ketinggian Termokopel pada Laju Aliran Udara 4,9 m ³ /menit.....	94
Gambar 4.6 Grafik Hubungan Distribusi Temperatur terhadap Ketinggian Termokopel pada Laju Aliran Udara 5,3 m ³ /menit.....	95
Gambar 4.7 Grafik Daya Panas yang Dihasilkan terhadap Variasi <i>Feed Rate</i> Bahan Bakar	96
Gambar 4.8 Grafik Hasil Daya Terhadap Daya Listrik yang Digunakan.....	96

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Potensi Energi Terbaharukan di Indonesia.....	2
Tabel 2.1 <i>Ultimate Analysis</i> Beberapa Jenis Biomassa.....	19
Tabel 2.2 <i>Proximate Analysis</i> Beberapa Jenis Biomassa	19
Tabel 2.3 Nilai LHV Beberapa Jenis Biomassa	19
Tabel 2.4 Jenis-Jenis Bahan Bakar	22
Tabel 2.5 Increasing Size and Density	54
Tabel 3.1 <i>Specific Heat</i> Berbagai Substansi.....	59
Tabel 3.2 Sifat Fisik, Termal, dan Mekanik Pasir Silika.....	60
Tabel 3.3 Distribusi Ukuran Pengayakan Pasir Silika	61
Tabel 3.4 Spesifikasi <i>Motor Feeder</i>	70
Tabel 3.5. Spesifikasi Teknis <i>Ring Blower</i>	72
Tabel 3.6 Spesifikasi Teknis <i>Hi-Temp Premixed Burner</i>	77
Tabel 4.1 Hubungan Kecepatan Putar Motor dengan <i>Feed Rate</i> untuk Ranting Pohon Partikel Kecil.....	85
Tabel 4.2 Hubungan Kecepatan Putar Motor dengan <i>Feed Rate</i> untuk Ranting Pohon Partikel Besar	85
Tabel 4.3 Hubungan Putaran Blower dengan Laju Aliran Udara	86
Tabel 4.4 Hubungan Temperatur Termokopel dengan Waktu pada Laju Aliran Udara 4,9 m ³ /menit.....	88
Tabel 4.5 Hubungan Temperatur Termokopel dengan Waktu pada Laju Aliran Udara 5,3 m ³ /menit.....	91
Tabel 4.6 Hubungan Distribusi Temperatur terhadap Ketinggian Termokopel pada Laju Aliran Udara 4,9 m ³ /menit.....	94
Tabel 4.7 Hubungan Distribusi Temperatur terhadap Ketinggian Termokopel pada Laju Aliran Udara 5,3 m ³ /menit.....	94
Tabel 4.8 Hubungan <i>Feed Rate</i> Bahan Bakar dengan Daya Panas yang Dihasilkan ..	95

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 JUDUL PENELITIAN

Pengujian Eksperimental Karakteristik Pembakaran Pada Fluidized Bed Combustor UI Menggunakan Bahan Bakar Ranting Pohon.

1.2 LATAR BELAKANG MASALAH

Energi merupakan hal yang sangat penting untuk pertumbuhan ekonomi dan perindustrian suatu bangsa. Energi sendiri terkait dengan semua sektor produksi sehingga memainkan peranan penting dalam area ekonomi suatu negara. Oleh sebab itu, berkurangnya ketersediaan energi di suatu negara akan menyebabkan terhambatnya pertumbuhan ekonomi di negara tersebut. Hal inilah yang sedang dialami oleh Indonesia. Menurut data BPS tahun 2006, persediaan energi primer di Indonesia mengalami pertumbuhan mundur yakni -3,53 % sedangkan konsumsi energi mengalami peningkatan sebesar 1,59 %. Hal ini diakibatkan oleh penggunaan energi primer seperti minyak bumi, gas alam secara terus menerus dari tahun ke tahun. Kondisi ini merupakan masalah yang sangat besar yang harus segera ditangani.

Melihat kondisi tersebut, pemerintah telah mengeluarkan **Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional** untuk mengembangkan sumber energi alternatif sebagai pengganti BBM. Walaupun kebijakan tersebut menekankan penggunaan batu bara dan gas sebagai pengganti BBM, tetapi juga menetapkan sumber daya yang dapat diperbaharui untuk memenuhi kebutuhan energi nasional.

Indonesia sebenarnya memiliki beberapa sumber energi terbarukan yang berpotensi besar, antara lain energi hidro dan mikrohidro, energi geotermal, energi biomassa, energi surya dan energi angin. Kelebihan energi terbarukan dibandingkan dengan energi fosil, selain memang sifatnya yang dapat diperbaharui secara terus menerus, juga lebih ramah terhadap lingkungan. Emisi yang dikeluarkan

lebih rendah, terutama gas karbondioksida sehingga mampu mengurangi efek rumah kaca yang menyebabkan pemanasan global.

Tabel 1.1 Potensi Energi Terbaharukan di Indonesia
(Sumber : Direktorat Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi, 2004)

Jenis sumber energi	Potensi	Kapasitas terpasang
Hidro	75,67 GW	4200 MW
Mikrohidro	712 MW	206 MW
Geotermal	27 GW	807 MW
Biomassa	49.81 GW	302.4 MW
Surya	4,8 kWh/m ² /day	6 MW
Angin	3 - 6 m/sec	0,6 MW

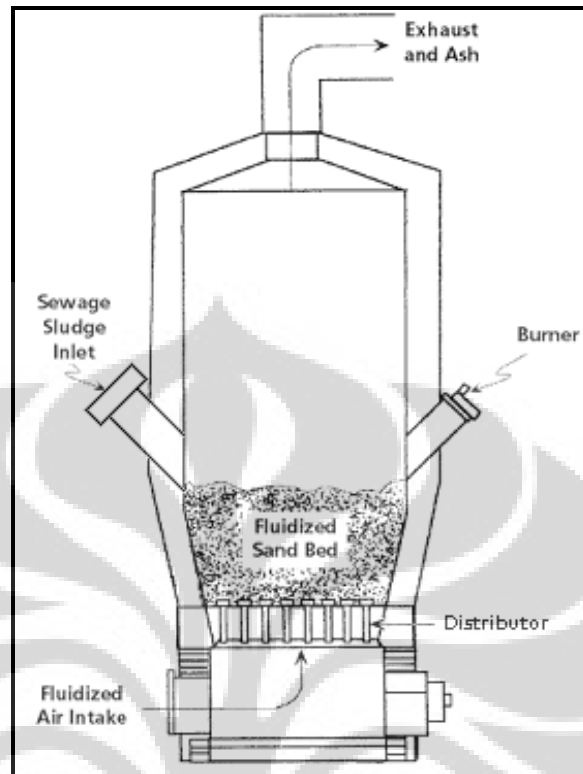
Dari tabel 1.1 dapat dilihat bahwa biomassa memiliki potensi yang besar setelah energi hidro yaitu 49,81 GW namun hanya 302,4 MW saja yang sudah dimanfaatkan atau hanya 0.6% dari seluruh potensi yang ada. Hal ini dikarenakan jumlah instalasi dan kapasitas terpasang masih kurang. Bila kita maksimalkan potensi yang ada dengan menambah jumlah kapasitas terpasang, maka akan membantu bahan bakar fosil yang selama ini menjadi tumpuan dari penggunaan energi. Hal ini akan membantu perekonomian yang selama ini menjadi boros akibat dari anggaran subsidi bahan bakar minyak yang jumlahnya melebihi anggaran sektor lainnya. Energi biomassa menjadi penting bila dibandingkan dengan energi terbaharukan karena proses konversi menjadi energi listrik memiliki investasi yang lebih murah bila dibandingkan dengan jenis sumber energi terbaharukan lainnya. Hal inilah yang menjadi kelebihan biomassa dibandingkan dengan energi lainnya. Proses energi biomassa sendiri memanfaatkan energi matahari untuk merubah energi panas menjadi karbohidrat melalui proses fotosintesis yang selanjutnya diubah kembali menjadi energi panas.

Di Indonesia upaya pemanfaatan biomassa berasal dari limbah industri pertanian, perkebunan, dan kehutanan berupa serat kelapa sawit, cangkang sawit, tempurung kelapa, sabut kelapa, sekam padi, kayu, dan ranting. Limbah kelapa sawit seperti serat dan cangkangnya sudah mulai dimanfaatkan sebagai energi biomassa. Sedangkan potensi energi biomassa yang lain seperti tempurung dan sabut kelapa, sekam padi, limbah kayu dan ranting masih belum banyak dilirik sebagai sumber energi.

Hutan di Universitas Indonesia juga memiliki potensi penghasil biomassa yaitu berupa limbah kayu seperti ranting dan dedaunan. Sebagian besar tanaman yang ada di hutan UI adalah akasia dan meranti. Limbah tersebut apabila dibiarkan saja akan menjadi tak berguna. Oleh karena itu perlu dilakukan pengolahan agar dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi. Pemanfaatan biomassa biasanya dilakukan dengan cara membakarnya sehingga menghasilkan kalor yang nantinya digunakan untuk memanaskan boiler. Uap yang dihasilkan dari pemanasan tersebut kemudian ditransfer ke dalam turbin. Putaran turbin tersebut akan menggerakkan generator sehingga menghasilkan listrik yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan.

Pembakaran biomassa secara langsung memiliki kelemahan yakni efisiensi yang dihasilkan sangat rendah. Oleh karena itu perlu diterapkan beberapa teknologi untuk meningkatkan manfaat biomassa sebagai bahan bakar. Teknologi pembakaran yang digunakan harus simpel, efisien, tidak menimbulkan gangguan terhadap lingkungan sekitar, serta biaya instalasinya relatif tidak terlalu mahal. Teknologi yang memenuhi kriteria tersebut adalah *Fluidized Bed Combustor (FBC)*.

Fluidized Bed Combustor (FBC) merupakan salah satu teknologi pembakaran yang mempunyai keunggulan mengkonversi berbagai jenis bahan bakar baik sampah, limbah, biomassa ataupun bahan bakar fosil berkalori rendah. Teknologi ini menggunakan konsep turbulensi benda padat yang terjadi pada proses pembakaran, dimana dalam mekanisme pembakarannya tersebut terjadi perpindahan panas dan massa yang tinggi. Teknologi ini telah diperkenalkan sejak abad kedupuluhan dan telah diaplikasikan dalam banyak sektor industri dan pada tahun-tahun belakangan ini telah diaplikasikan untuk mengkonversi biomassa menjadi energi.



Gambar 1.1 *Fluidized Bed Combustor*

Fluidized bed combustor memiliki bentuk seperti sebuah tungku pembakar biasa, namun memiliki media pengaduk berupa pasir. Pasir yang digunakan bisa pasir kuarsa ataupun pasir silika. Fungsi pasir ini berfungsi sebagai penyimpan dan pendistribusi panas, sehingga panas yang dihasilkan dapat merata. *Fluidized bed combustor* memiliki temperatur pengoperasian antara 600 sampai 900°C sehingga bahan bakar seperti limbah dapat habis terbakar hingga menjadi abu yang tidak berbahaya bagi lingkungan.

Teknologi ini dapat menjadi salah satu teknologi pembakaran limbah partikel atau padatan dalam jumlah yang relatif besar secara cepat. Emisi yang dihasilkan pembakaran juga relatif kecil sehingga menekan polusi udara yang mungkin timbul akibat pembakaran yang kurang sempurna. Teknologi *fluidized bed combustor* ini juga lebih baik bila dibandingkan dengan teknologi pembakaran biomassa yang konvensional, karena laju pembakaran yang cukup tinggi, dan juga dapat membakar limbah biomassa yang berkadar air tinggi. Namun masih ada beberapa kelemahannya

seperti kurangnya penelitian yang dilakukan terhadap teknologi *fluidized bed combustor* ini di Indonesia.

1.3 PERUMUSAN MASALAH

Krisis energi yang terjadi saat ini merupakan masalah yang sangat serius dan perlu segera diselesaikan. Salah satu solusi adalah dengan memanfaatkan potensi biomassa sebagai sumber energi alternatif. Walaupun energi biomassa tidak dapat menggantikan peranan minyak bumi dan gas secara keseluruhan, namun setidaknya dapat membantu untuk memenuhi kebutuhan energi nasional.

Hutan Universitas Indonesia memiliki potensi yang besar sebagai penghasil biomassa. Limbah hutan seperti kayu, ranting, dan dedaunan berpotensi sebagai sumber energi. Limbah tersebut apabila dibiarkan saja akan menjadi tidak berguna dan menumpuk sehingga menimbulkan masalah baru seperti munculnya bibit-bibit penyakit yang berbahaya bagi warga di lingkungan sekitar. Sehingga diperlukan suatu unit pengolahan yang handal agar limbah tersebut dapat dimanfaatkan menjadi energi yang berguna.

Fluidized Bed Combustor di Universitas Indonesia merupakan unit pemanfaatan limbah yang masih dalam pengembangan. Masih banyak kekurangan yang perlu diperbaiki seperti pada sistem feeder. Oleh karena itu diperlukan suatu pengujian untuk mengetahui performa serta karakteristik sistem feeder tersebut terhadap berbagai ukuran bahan bakar. Selain itu diperlukan juga pengujian dengan bahan bakar biomassa seperti ranting dan cangkang kelapa. Tujuannya untuk mengetahui kualitas dan karakteristik pembakaran dengan bahan bakar tersebut.

1.4 TUJUAN PENELITIAN

Sesuai perumusan masalah yang telah diuraikan di atas, maka tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui karakteristik sistem feeder dengan menggunakan bahan bakar cangkang kelapa dan ranting pohon.

2. Mengetahui karakteristik pembakaran biomassa dengan menggunakan *fluidized bed combustor* yang ada di Universitas Indonesia.
3. Mengetahui pengaruh variasi kecepatan aliran udara yang melewati hamparan terhadap kualitas pembakaran.
4. Mengetahui pengaruh jumlah masukan bahan bakar terhadap nilai kalor yang dihasilkan.

1.5 BATASAN MASALAH

Dalam melakukan penelitian perlu dilakukan pembatasan agar penelitian biasa lebih terfokus. Adapun batasan-batasan tersebut adalah sebagai berikut :

1. Penelitian yang dilakukan hanya mencakup eksperimental pembakaran yang tujuannya untuk mengetahui karakteristik pembakaran dengan bahan bakar biomassa. Sedangkan penghitungan nilai *heat rate output* dari proses pembakaran, perhitungan efisiensi alat serta emisi gas buang yang dihasilkan tidak akan dibahas secara mendalam dalam tulisan ini.
2. Bahan bakar biomassa yang digunakan adalah ranting pohon akasia dan cangkang kelapa.
3. Dari pengujian ini hanya diambil dua variasi laju aliran udara blower yakni 4,891 m³/min dan 5,291 m³/min.

1.6 METODOLOGI PENELITIAN

Metode penulisan yang digunakan dalam penyusunan skripsi ini dilakukan dengan melalui beberapa tahapan, yaitu :

1. Persiapan
 - 1.1. Identifikasi masalah yang akan dibahas
 - 1.2. Penelusuran literatur
 - 1.3. Pemilihan beberapa jenis bahan bakar yang akan digunakan serta menentukan ukurannya
2. Set Up Preparation
 - 2.1. Instalasi Laboratorium

- 2.2. Penentuan dimensi bahan bakar dan screening
- 2.3. Kalibrasi Instrumentasi
- 2.4. Instalasi Instrumentasi laboratorium
3. Pengujian dan Pengambilan Data
 - 3.1. Pengukuran variasi kecepatan dan putaran yang digunakan pada sistem feeding
 - 3.2. Pengukuran massa dan ukuran rata-rata setiap jenis bahan bakar sebelum memasuki feeding dan setelah keluar dari feeding
 - 3.3. Pengukuran variasi putaran pada blower
 - 3.4. Pengukuran temperatur freeboard area dengan variasi laju aliran massa bahan bakar divariasi dengan putaran blower tertentu.
4. Pengolahan Data dan Grafik
 - 4.1. Perhitungan laju aliran massa bahan bakar pada feeding dengan variasi kecepatan yang ditentukan
 - 4.2. Perhitungan laju aliran massa bahan bakar dalam kondisi pembakaran terhadap blower
 - 4.3. Interpretasi grafik perbandingan dari berbagai kondisi dari hasil pengolahan data
5. Analisa dan Kesimpulan
 - 5.1. Menganalisa kestabilan dari proses pembakaran dengan pemasukan bahan bakar yang terkontrol
 - 5.2. Menganalisa korelasi dan pengaruh dari laju aliran massa bahan bakar dan temperatur yang dicapai
 - 5.3. Menarik kesimpulan dari keseluruhan proses penelitian yang dilakukan

1.7 SISTEMATIKA PENULISAN

Dalam penyusunan tugas akhir ini, penulis akan membagi dalam lima bab, dimana masing-masing bab terdiri dari beberapa sub bab. Hal tersebut dimaksudkan untuk memudahkan dan mengarahkan pembahasan agar didapatkan informasi secara menyeluruh. Kerangka penulisan tersebut diuraikan sebagai berikut :

Bab I Pendahuluan

Bab ini berisi latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, pembatasan masalah, metodologi penulisan, serta sistematika penulisan.

Bab II Landasan Teori

Bab ini berisi dasar-dasar teori yang digunakan mengenai energi biomassa, sistem reaksi pembakaran, *fluidized bed combustor*, fenomena fluidisasi serta tentang *solid feeder*.

Bab III Persiapan dan Prosedur Pengujian

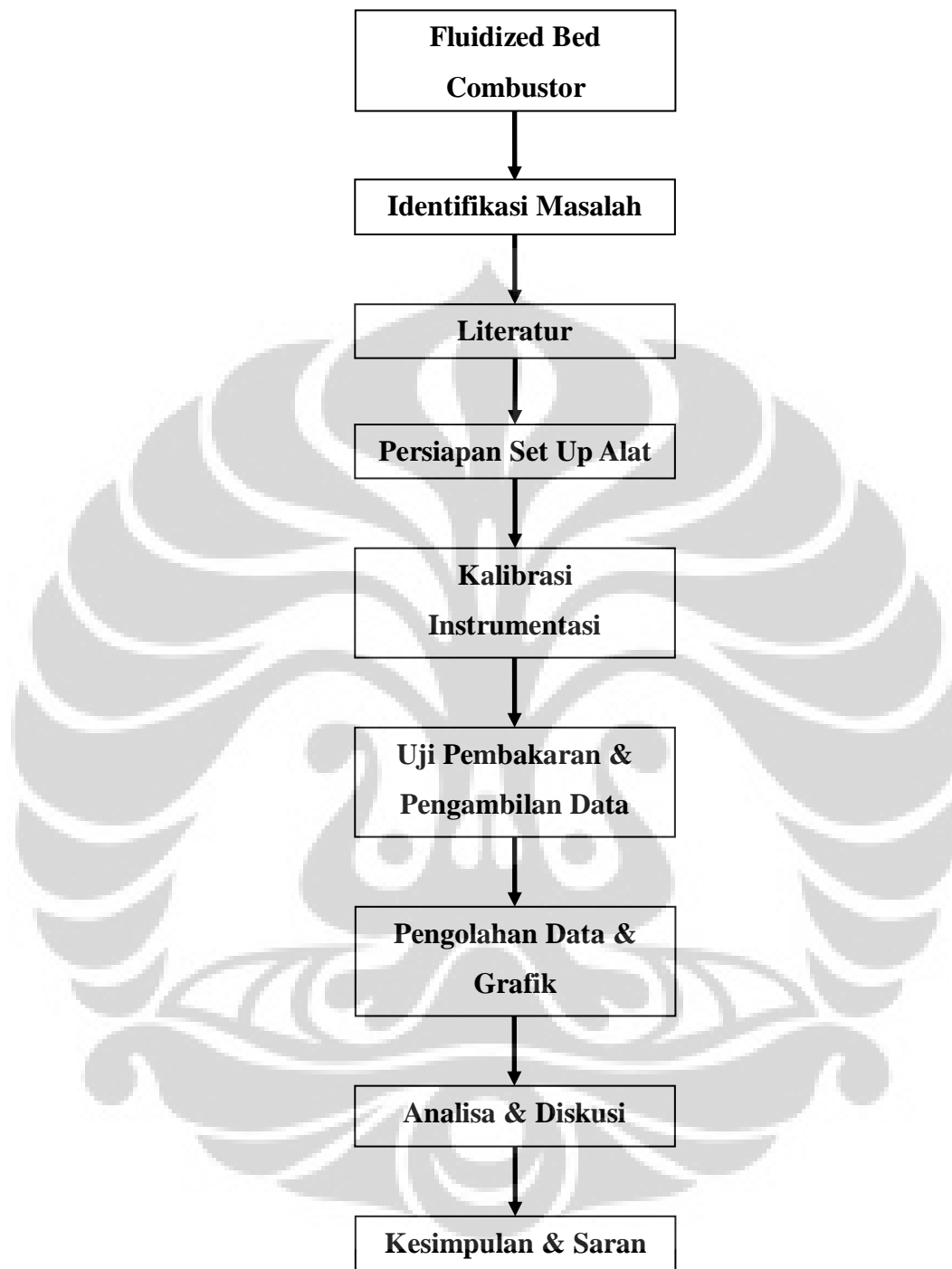
Bab ini membahas mengenai mekanisme eksperimental pembakaran biomassa dengan *fluidized bed combustor* yaitu meliputi persiapan yang dilakukan sebelum melakukan pengujian serta prosedur pengujian.

Bab IV Hasil dan Analisa

Bab ini membahas hasil pengujian yang telah dilakukan dan analisisnya, parameter-parameter yang berpengaruh serta kendala-kendala yang dihadapi saat pengujian alat.

Bab V Kesimpulan dan Saran

Bab ini membahas mengenai kesimpulan dari hasil eksperimental pembakaran dengan menggunakan *fluidized bed combustor*.



Gambar 1.2 Flow Chart Metodologi

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 ENERGI BIOMASSA

Biomassa adalah sumber energi yang berasal dari material organik, misalnya tumbuhan dan hewan, oleh karenanya energi ini merupakan energi terbarukan. Energi ini juga merupakan energi yang ramah lingkungan karena menghasilkan emisi gas buang yang tidak sebesar emisi gas buang bahan bakar fosil.

Biomassa merupakan salah satu bentuk energi kimia, dimana energi yang terkandung disimpan dalam bentuk ikatan atom dan molekul, energi kimia inilah yang nantinya dapat dikonversikan dan digunakan untuk kesejahteraan manusia.

Contoh dari biomassa adalah hasil pertanian, perkebunan, sampah organik, limbah cair pembuatan tahu, limbah padat dan cair penggilingan tebu, feses hewan ternak, kayu, jerami, dan sebagainya. Macam-macam biomassa ini menggunakan cara yang berbeda untuk mengkonversikan energi yang terkandungnya.

2.1.1 Jenis-Jenis Biomassa

Biomassa, berdasarkan bentuk dan wujudnya dibagi menjadi 3 kategori, yaitu:

2.1.1.1 Solid Biomassa

Bahan dasar yang digunakan berasal dari material organik kering seperti misalnya pohon, sisa-sisa tumbuhan, hewan, kotoran manusia, sisa-sisa industri dan rumah tangga, yang kemudian dibakar secara langsung untuk menghasilkan panas. Wilayah penghasil biomassa, secara umum dibagi menjadi 3 daerah geografis, yaitu:

a) *Temperate Regions (wilayah beriklim sedang)*

Menghasilkan kayu, sisa tumbuhan, serta kotoran manusia dan hewan.

b) *Arid and semi – arid Regions (wilayah beriklim kering)*

Menghasilkan sedikit vegetasi untuk sumber energi.

c) *Humid Tropical Regions (wilayah beriklim lembab)*

Menghasilkan persediaan kayu dan sisa – sisa tumbuhan yang sangat berlebih serta kotoran manusia dan hewan.

2.1.1.2 Biogas

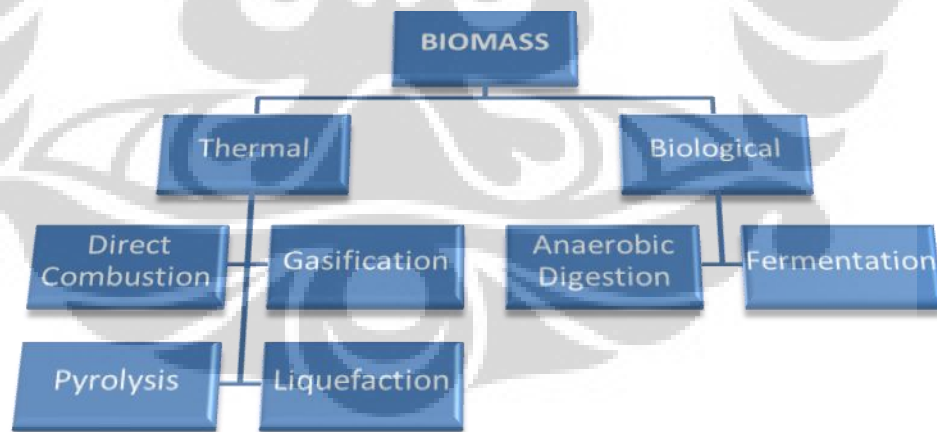
Biogas berasal dari material organik yang telah melewati proses fermentasi atau anaerob digesting oleh bakteri pada koindisi udara kekurangan oksigen yang kemudian menghasilkan gas yang dapat terbakar (combustible gas).

2.1.1.3 Liquid Biofuel

Biofuel berasal dari minyak nabati (ethanol) maupun hewani. Biofuel ini didapat dari reaksi kimia dan atau fisika pada material organik. Minyak yang didapat dapat digunakan untuk melakukan pembakaran, sama seperti bahan bakar fosil.

2.1.2 Teknologi Pengkonversian Energi Biomassa

Teknologi pengkonversian biomassa bisa diklasifikasikan menjadi dua, yaitu termal dan biologis, seperti ditunjukkan oleh chart berikut.



Gambar 2.1 Chart Teknologi Konversi Biomassa

2.1.2.1 Proses Thermal

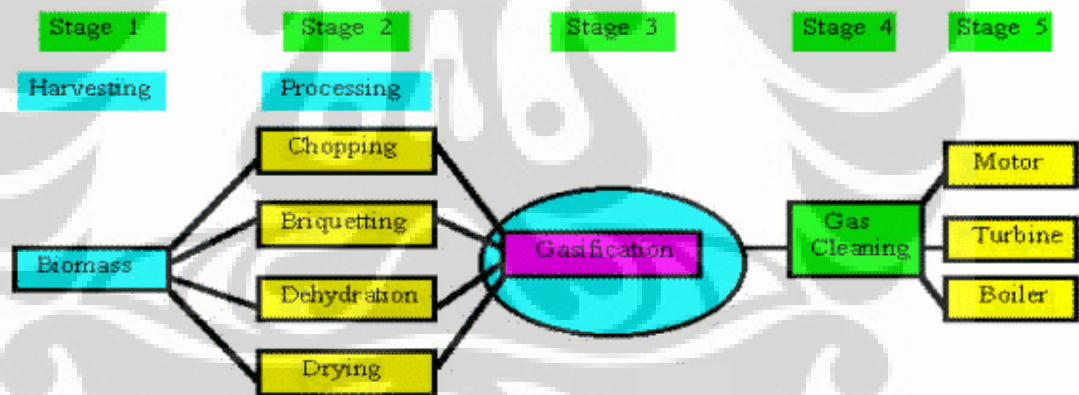
Ada 3 proses pemanasan dalam menghasilkan energi biomassa, yaitu:

1. *Direct Combustor*

Pada proses ini material organik (biomassa) dilakukan pembakaran secara langsung. Agar efisiensi pembakaran baik, dilakukan pengeringan (drying) untuk menghilangkan kadar air pada material organik. Salah satu aplikasi dari direct combustor adalah kompor masak yang menggunakan kayu bakar.

2. *Gassification*

Gasifikasi adalah proses pembentukan gas yang dapat terbakar yang berasal dari material organik, seperti kayu, gabah/sampah pertanian yang dipanaskan dan dibakar dengan keadaan oksigen 1/3 dari jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk pembakaran penuh. Pembakaran dengan keadaan kekurangan oksigen inilah yang disebut dengan pyrolysis. Proses ini menghasilkan gas yang dapat terbakar seperti H₂, CH₄, CO, N₂, dan gas-gas lain yang tak dapat terbakar.



Gambar 2.2 Proses Gasifikasi (sumber : <http://www.w3.org>)

Secara umum ada 3 sesi proses gasifikasi biomassa:

Pyrolysis menghasilkan : $C_6H_{10}O_5 = 5CO + 5H_2 + C$

Oksidasi sebagian menghasilkan : $C_6H_{10}O_5 + O_2 = 5CO + CO_2 + H_2$

Pembentukan uap menghasilkan : $C_6H_{10}O_5 + H_2O = 6CO + 6H_2$

Aplikasi pada proses gasifikasi, salah satunya adalah sebagai sumber energi alternatif untuk pembangkit listrik. Dimana bahan bakar gas hasil dari pembakaran (secara gasifikasi) dari sampah organik digunakan untuk memanaskan air hingga berubah fase menjadi uap panas (steam) bertekanan tinggi untuk ditransportasikan untuk memutar turbin uap. Shaft dari turbin uap dikoneksikan ke shaft generator dan ketika shaft turbin berotasi mengakibatkan shaft generator berotasi dan kemudian membangkitkan listrik. Setelah uap (steam) melewati turbin uap suhunya menjadi lebih rendah dan tekanannya menurun dan dikondensasikan pada cooling system oleh kondensor hingga fasenya kembali berubah menjadi air. Dan seterusnya. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat gambar skema biomassa power plant berikut.

3. *Pyrolysis*

Pyrolysis adalah pemanasan dan pembakaran dengan keadaan tanpa oksigen. Pyrolysis adalah salah satu bagian dari proses gasifikasi, proses ini akan memecah secara kimiawi biomassa untuk membentuk substansi lain.

Produk dari pyrolysis tergantung dari temperatur, tekanan, dan lain lain. Pada suhu 200°C , air akan terpisah dan dibuang, pyrolysis sesungguhnya terjadi pada suhu antara 280 sampai 500°C , pyrolysis menghasilkan banyak karbon dioksida, tar, dan sedikit metil alkohol. Antara 500 sampai 700°C produksi gas mengandung hidrogen. Secara umum pyrolysis menghasilkan $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5 = 5\text{CO} + 5\text{H}_2 + \text{C}$.

4. *Liquefaction*

Liquefaction adalah proses pembentukan cairan dari suatu gas. Pembentukan gas ini dengan tujuan agar bahan bakar gas mudah untuk ditransportasikan. Banyak macam gas yang hanya membutuhkan pendinginan untuk membuatnya menjadi bentuk cairan. LPG adalah salah satu bentuk dari liquefaction

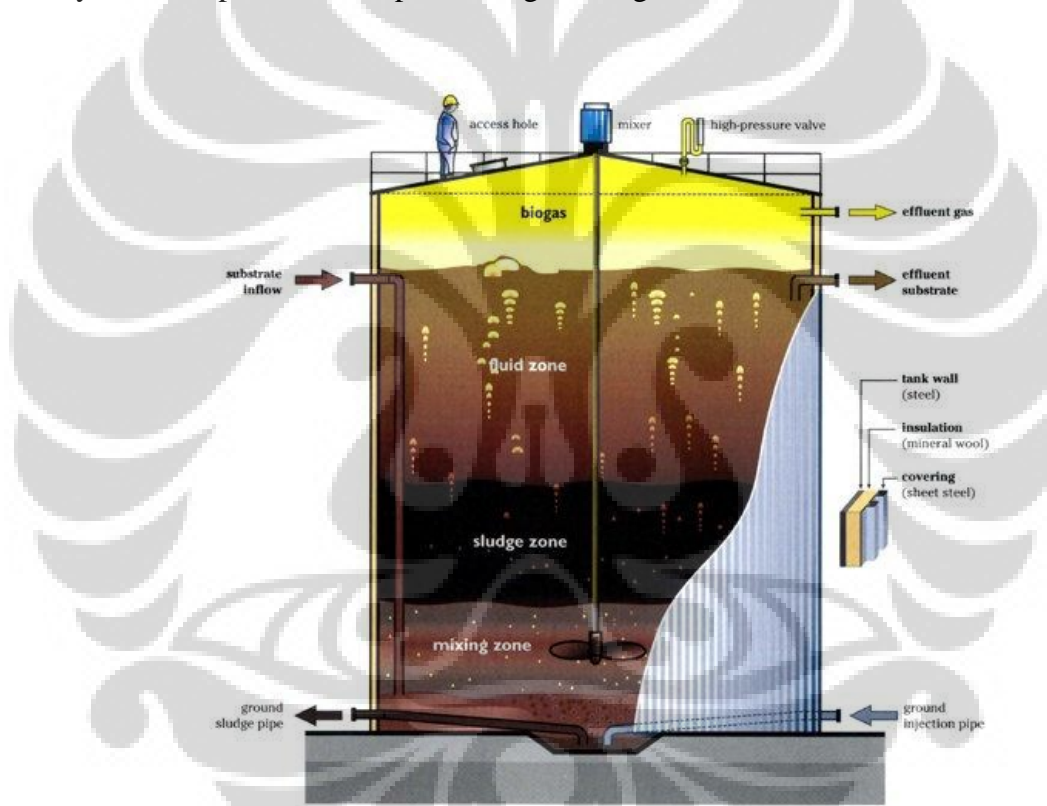
2.1.2.2 Proses Biologis

Proses ini bertujuan untuk menghasilkan gas yang dapat terbakar melalui proses yang mengikutsertakan komponen biologi, yaitu bakteri. Proses ini akan menghasilkan gas dari sampah organik seperti kotoran ternak dan sisa-sisa makanan.

Ada 2 proses yang dapat menghasilkan bahan bakar gas melalui proses biologis, yaitu:

1. *Anaerobic digestion*

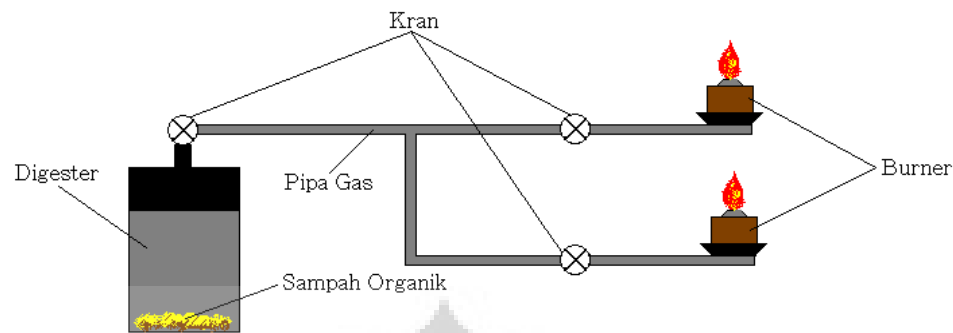
Proses ini adalah proses yang mengikutsertakan mikroorganisme untuk menguraikan material dengan kondisi tanpa oksigen. Proses ini dapat digunakan pada sampah organik dan juga kotoran hewan. Anaerobic digestion merupakan proses yang kompleks. Pertama-tama, mikro organisme mengubah material organik kedalam bentuk asam organik. Bakteri anaerob (methanogenic) akan mengubah asam ini dan menyelesaikan proses dekomposisi dengan menghasilkan metana.



Gambar 2.3 Anaerobic Digester

(sumber: http://www.daviddarling.info/encyclopedia/A/AE_anaerobic_bacteria.html)

Aplikasi dari proses ini, salah satunya adalah untuk menghasilkan uap dari pembakaran gas methana untuk berbagai keperluan. Untuk lebih jelasnya perhatikan gambar rangkaian instalasi berikut.



Gambar 2.4 Rangkaian Instalasi Biogas

Gas methana ini merupakan hasil dari reaksi anaerob oleh bakteri pada suatu ruangan tertutup yang disebut dengan digester. Fungsinya untuk menghindari oksigen dari proses ini. Ada 4 tahapan dalam Anaerob Digestion, yaitu:

2. *Hydrolisis*

Merupakan proses untuk memecah komposisi sampah organik menjadi molekul – molekul yang dapat diuraikan oleh bakteri anaerob, yaitu menjadi gula dan asam amino. Proses hydrolisis menggunakan air untuk melepaskan ikatan kimia antar unsur dari sampah organik.

3. *Fermentasi*

Zat yang telah dirombak pada proses hydrolisis, oleh bakteri anaerob diuraikan menjadi karbohidrat dan enzim serta asam organik.

4. *Acetogenesis*

Produk dari hasil fermentasi diubah menjadi asetat, hidrogen dan karbondioksida oleh bakteri asetogenik.

5. *Methanogenesis*

Mengubah produk dari proses acetogenesis menjadi methana dengan bantuan bakteri metanogenik.

6. *Fermentasi*

Fermentasi adalah proses produksi energi dalam sel dalam keadaan anaerobik (tanpa oksigen). Secara umum, fermentasi adalah salah satu bentuk respirasi anaerobik, akan tetapi, terdapat definisi yang lebih jelas yang mendefinisikan

fermentasi sebagai respirasi dalam lingkungan anaerobik dengan tanpa akseptor elektron eksternal.

2.1.3 Kelebihan dan Kekurangan

Energi biomassa memiliki kelebihan dan kekurangan beberapa diantaranya yaitu:

Kelebihan energi biomassa :

1. Merupakan energi terbarukan
2. Sumbernya dapat diproduksi secara lokal
3. Menggunakan bahan baku limbah yang murah
4. Untuk penggunaan yang tanpa direct combustor efek lingkungan kecil

Kekurangan energi biomassa :

1. Untuk penggunaan secara direct combustor akan menghasilkan gas karbon dioksida dan gas penyebab efek rumah kaca lain yang merupakan penyebab pemanasan global carbon dioxide and other greenhouse gases
2. Membutuhkan energi yang lebih banyak untuk memproduksi biomassa dan mengumpulkannya dari pada energi yang dapat dihasilkan
3. Masih merupakan sumber energi yang mahal dalam memproduksi, mengumpulkan, dan mengubahnya kedalam bentuk energi yang lain

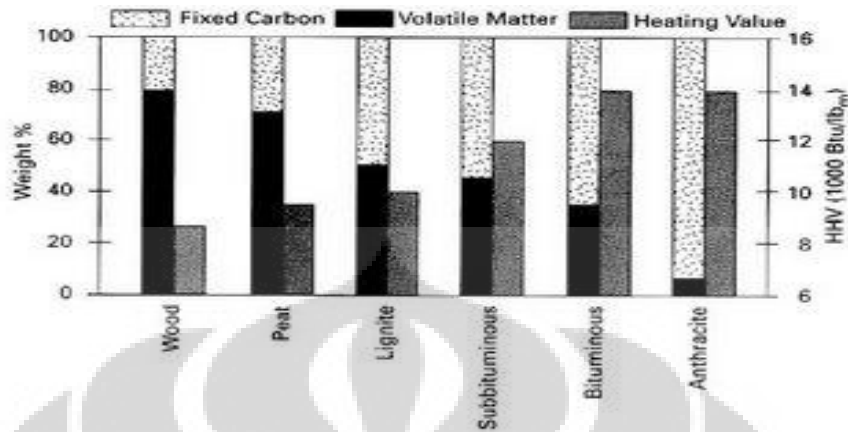
2.2 KARAKTERISTIK BIOMASSA

Potensi biomassa yang melimpah merupakan solusi energi masa depan karena dapat dikategorikan sebagai “*green and sustainable energi*” yaitu pemanfaatannya yang bersifat ramah lingkungan dan keberadaannya melimpah di dunia khususnya di Indonesia. Untuk pemanfaatan dengan cara *indirect combustor*, biomassa dikenal sebagai *zero CO₂ emission*, dengan kata lain tidak menyebabkan akumulasi CO₂ di atmosfer, dan biomassa juga mengandung lebih sedikit sulfur jika dibandingkan dengan batubara.

Nilai kalor rendah (LHV) biomass (15-20 MJ/kg) lebih rendah dibanding nilai kalor batubara (25-33 kJ/kg) dan bahan bakar minyak (gasoline, 42,5 MJ/kg). Artinya untuk setiap kg biomassa hanya mampu menghasilkan energi 2/3 dari energi 1 kg batubara dan 1/2 dari energi 1 kg gasoline. Nilai kalor berhubungan langsung dengan kadar C dan H yang dikandung oleh bahan bakar padat. Semakin besar kadar keduanya akan semakin besar nilai kalor yang dikandung. Menariknya dengan proses charring (pembuatan arang), nilai kalor arang yang dihasilkan akan meningkat cukup tajam. Sebagai gambaran, dari hasil proses pembuatan arang batok kelapa pada temperatur 750°C dapat dihasilkan arang dengan nilai kalor atas (HHV) 31 MJ/kg. Nilai ini setara dengan nilai kalor batubara kelas menengah ke atas.

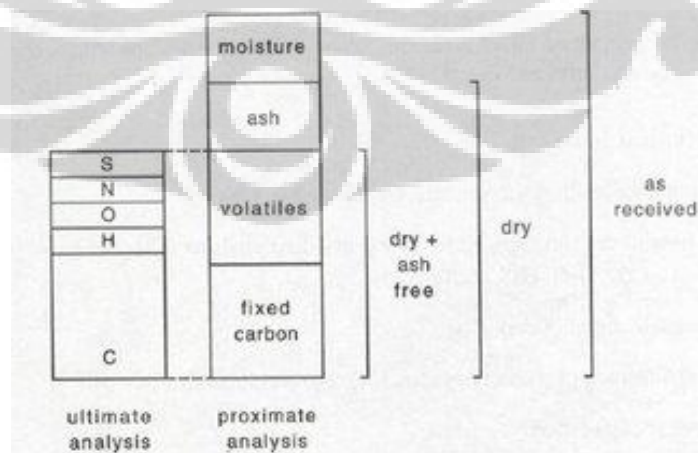
Nilai kalor rendah (LHV, *lower heating value*) adalah jumlah energi yang dilepaskan dari proses pembakaran suatu bahan bakar dimana kalor laten dari uap air tidak diperhitungkan, atau setelah terbakar, temperatur gas pembakaran dibuat 150°C. Pada temperatur ini, air berada dalam kondisi fasa uap. Jika jumlah kalor laten uap air diperhitungkan atau setelah terbakar, temperatur gas pembakaran dibuat 25°C, maka akan diperoleh nilai kalor atas (HHV, *higher heating value*). Pada temperatur ini, air akan berada dalam kondisi fasa cair.

Biomassa mempunyai kadar *volatile* yang tinggi (sekitar 60-80%) dibanding kadar *volatile* pada batubara, maka biomas lebih reaktif dibanding batubara. Perbandingan bahan bakar (FR) dinyatakan sebagai perbandingan kadar karbon dengan kadar volatil. Untuk batubara, FR ~ 1 - 10. Untuk gambut, FR ~ 0.3. Untuk biomass, FR ~ 0.1. Untuk plastik, FR ~ 0. Analisis proximat untuk beberapa jenis bahan bakar padat dapat dilihat pada gambar di bawah.



Gambar 2.5 Analisis Proximat untuk Beberapa Jenis Bahan Bakar Padat.

Pada analisis proximat biomassa juga mengandung abu dan air (lihat Gambar di bawah). Massa biomassa awal umumnya diistilahkan sebagai as received (mengandung air, abu, volatil, dan karbon). Kadar abu dari biomassa berkisar dari 1% sampai 12% untuk kebanyakan jerami-jeramian dan bagas. Abu dari biomassa lebih ramah dibandingkan abu dari batubara karena banyak mengandung mineral seperti fosfat dan potassium. Pada saat pembakaran maupun gasifikasi, abu dari biomassa juga lebih aman dibandingkan abu dari batubara. Dengan temperatur operasi tidak lebih dari 950°C atau 1000°C, abu dari biomassa tidak menimbulkan terak. Abu biomassa mempunyai jumlah oksida keras (silica dan alumina) yang lebih rendah.



Gambar 2.6 Definisi Analisis Ultimat dan Proximat.

Kandungan komposisi beberapa biomassa dapat dilihat dari *proximate* dan *ultimate analysis* yang dapat dilihat pada tabel-tabel di bawah ini.

Tabel 2.1 *Ultimate Anaysis* Beberapa Jenis Biomassa
(Sumber: Walter R. Niessen.)

<i>Solid Waste</i>	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>S</i>	<i>Non Comb.</i>
Daun	52.25	6.11	30.34	6.99	0.16	4.25
Cangkang Kelapa	47.62	6.2	0.7	43.38	-	2.1
Ranting Pohon	50.46	5.97	42.37	0.15	0.05	1
Kertas	43.41	5.82	44.32	0.25	0.20	6.00

Tabel 2.2 *Proximate Analysis* Beberapa Jenis Biomassa
(Sumber: Walter R. Niessen. 1994)

<i>Solid Waste</i>	<i>Moisture</i>	<i>Volatile</i>	<i>Fixed Carbon</i>	<i>Non Comb.</i>
Daun	9.97	66.92	19.29	3.82
Cangkang Kelapa	7,8	80,8	18,8	0,4
Ranting Pohon	20	67.89	11.31	0.8
Kertas	10.24	75.94	8.44	5.38

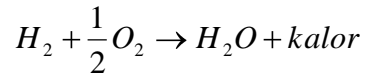
Tabel 2.3 Nilai LHV Beberapa Jenis Biomassa

Jenis Bahan Bakar	LHV
Cangkang Kelapa	17000 kJ/kg
Ranting Pohon	15099 kJ/kg

2.3 SISTEM REAKSI PEMBAKARAN

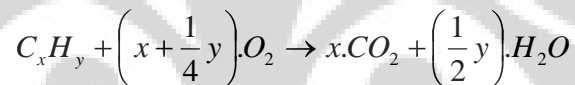
Pembakaran adalah sebuah reaksi antara oksigen dan bahan bakar yang menghasilkan panas. Oksigen diambil dari udara yang berkomposisi 21 % oksigen serta 79 % nitrogen (persentase volume), atau 77 % oksigen serta 23 % nitrogen (persentase massa). Unsur terbanyak yang terkandung dalam bahan bakar adalah

karbon, hidrogen, dan sedikit sulfur. Pembakaran pada umumnya terdiri dari tiga proses, yaitu:



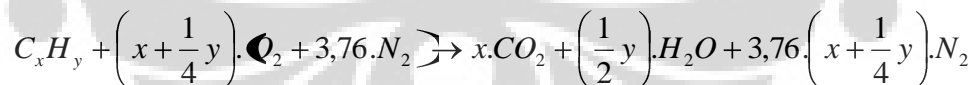
Tiga senyawa dan panas yang dihasilkan tersebut disebut juga sebagai hasil pembakaran.

Pembakaran sempurna adalah pembakaran dengan proporsi yang sesuai antara bahan bakar dengan oksigen. Pada pembakaran yang lebih banyak oksigen dari pada bahan bakar, campuran tersebut dinamakan sebagai campuran kaya. Begitu juga sebaliknya, apabila bahan bakar yang digunakan lebih banyak dari pada oksigen, maka campurannya disebut campuran miskin. Reaksi untuk pembakaran sempurna adalah :



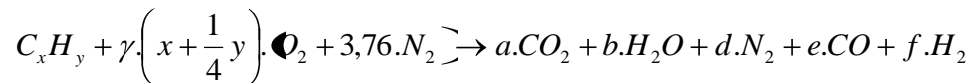
Nilai dari x dan y di atas bergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan. Nilai x adalah fraksi massa untuk kandungan *Carbon*, dan y fraksi massa untuk kandungan *Hidrogen* dalam bahan bakar.

Namun, kandungan dari udara bebas sepenuhnya bukan mengandung oksigen, karena bercampur dengan nitrogen (N_2). Sehingga reaksi stoikiometrinya juga sedikit berbeda dari dasar reaksi pembakaran sempurna.



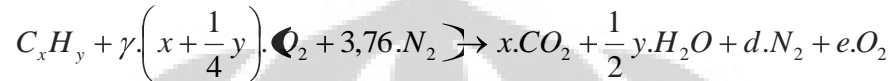
Namun, ada kalanya juga proses pembakaran tidak terjadi pada komposisi ideal antara bahan bakar dengan udara. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, proses yang tidak pada kondisi ideal ini bisa terbagi menjadi dua, yaitu pembakaran kaya dan pembakaran miskin.

- Proses pembakaran-kaya



Dari reaksi di atas dapat dilihat bahwa proses pembakaran kaya menghasilkan senyawa lain yaitu karbon monoksida (CO) dan hidrogen (H_2). Untuk reaksi pembakaran kaya, memiliki satu kriteria, yaitu nilai $\gamma < 1$.

- Proses pembakaran-miskin



Gas yang dihasilkan dari pembakaran kaya berbeda dari gas yang dihasilkan dari pembakaran miskin. Pada pembakaran miskin hanya menghasilkan gas oksigen (O_2). Untuk pembakaran miskin juga memiliki satu kriteria, yaitu nilai $\gamma < 1$.

2.3.1 Hal-Hal Yang Harus Diperhatikan Dalam Proses Pembakaran

Sebelumnya telah dibahas reaksi kimia pembakaran secara teoritis. Namun pada kenyataannya, proses pembakaran ini akan menghasilkan gas-gas atau sisa-sisa hasil pembakaran lainnya yang tidak disebutkan pada reaksi tersebut. Untuk memperoleh hasil pembakaran yang baik, maka proses pembakaran harus memperhatikan parameter-parameter seperti *mixing* (pencampuran), udara, temperatur, waktu, dan kerapatan. Berikut ini merupakan hal-hal yang harus diperhatikan dalam proses pembakaran, yaitu :

1. Mixing

Agar pembakaran dapat berlangsung dengan baik, maka diperlukan proses pencampuran antara bahan bakar yang digunakan dengan udara pembakaran. Pencampuran yang baik dapat mengkondisikan proses pembakaran berlangsung dengan sempurna.

2. Udara

Dalam proses pembakaran, udara pembakaran harus diperhatikan, karena dapat menentukan apakah pembakaran tersebut berlangsung dengan sempurna atau tidak sempurna. Pemberian udara yang cukup akan dapat mencegah pembakaran

yang tidak sempurna, sehingga CO dapat bereaksi lagi dengan O_2 untuk membentuk CO_2 .

3. Temperatur

Bila temperatur tidak mencapai atau tidak bisa dipertahankan pada temperatur nyala dari bahan bakar, maka pembakaran tidak akan berlangsung atau berhenti.

4. Waktu

Sebelum terbakar, bahan bakar akan mengeluarkan *volatile meter* agar dapat terbakar. Waktu pada saat bahan bakar melepas *volatile meter* itulah yang dinamakan sebagai waktu pembakaran, atau *time delay*.

5. Kerapatan

Kerapatan yang cukup (untuk pembuatan api) diperlukan guna menjaga kelangsungan pembakaran.

2.3.2 Komponen-Komponen Utama Reaksi Pembakaran

Suatu reaksi pembakaran memiliki 3 komponen utama, yaitu :

1. Zat yang dibakar

Unsur-unsur kimia pada bahan bakar yang berpotensi memberikan energi kalor adalah karbon, oksigen, hidrogen, dan sulfur. Setiap bahan bakar memiliki kandungan energi kalor yang dinyatakan dalam jumlah karbon. Jenis bahan bakar dibedakan menjadi tiga bentuk, seperti pada tabel 2.1.

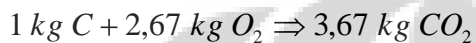
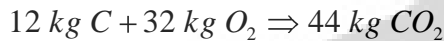
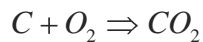
Tabel 2.4 Jenis-Jenis Bahan Bakar

Padat	Cair	Gas
Kayu + Ranting	Solar	LNG
Ampas Tebu	Minyak Tanah	LPG
Cangkang + Sabut Kelapa	Bensin, dll.	dll.
Batu bara, dll.		

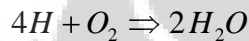
2. Zat yang membakar

Jika komposisi bahan bakar diketahui, maka dapat dihitung pula jumlah kebutuhan udara yang proporsional dengan jumlah bahan bakar, agar dapat mencapai pembakaran yang sempurna.

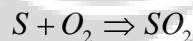
- Karbon terbakar sempurna akan membentuk CO_2 menurut persamaan :



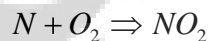
- Hidrogen terbakar sempurna akan membentuk H_2O menurut persamaan :



- Belerang terbakar akan membentuk SO_2 menurut persamaan :



- Nitrogen terbakar membentuk NO_2 menurut persamaan :



Sedangkan, 1 kg udara mengandung 0,23 kg O_2 , sehingga kebutuhan udara teoritisnya (A_o) adalah :

$$A_o = \frac{2,67 C + 8 H - O + S + 2,29 N}{0,23} \text{ kg udara} / \text{kg bahan bakar}$$

Kebutuhan udara dalam proses pembakaran dapat diklasifikasikan menjadi sebagai berikut :

- Udara primer

Udara yang bercampur dengan bahan bakar dalam ruang bakar.

- Udara sekunder

Udara yang masuk dari sekeliling ruang bakar.

- Udara tersier

Udara yang menembus celah pada ruang bakar.

Kebutuhan udara yang sebenarnya dalam proses pembakaran harus melebihi kebutuhan udara teoritisnya. Hal ini diperlukan untuk mengantisipasi proses pembakaran yang tidak sempurna. Selisih antara jumlah udara aktual dan udara teoritis ini disebut juga sebagai *excess air*. Nilai *excess air* ini selalu merupakan persentase antara selisih jumlah udara aktual dengan udara teoritis, yang berbanding dengan jumlah udara aktual.

Nilai *excess air* ini dapat ditulis sebagai berikut :

$$m = \frac{A - A_o}{A} \cdot 100 \%$$

keterangan : $m = excess\ air$

$A_o =$ jumlah udara teoritis

$A =$ jumlah udara aktual

3. Zat yang dihasilkan dari pembakaran

Berat gas asap yang terbentuk dari hasil pembakaran 1 kg air bahan bakar adalah sama dengan jumlah berat udara yang dibutuhkan, ditambah dengan berat bahan bakar yang berubah menjadi gas asap kecuali abunya.

$$m_{gb} = m_{bb} + A - m_{abu}$$

Gas asap terbentuk dari hasil pembakaran antara gas-gas sisa pembakaran. Pada pembakaran yang sempurna, gas asap terdiri dari komponen-komponen seperti CO_2 , H_2O , SO_2 , N_2 , dan O_2 . Komponen-komponen tersebut disebut juga sebagai hasil pembakaran (*combustor product*), atau biasa disebut juga sebagai gas buang.

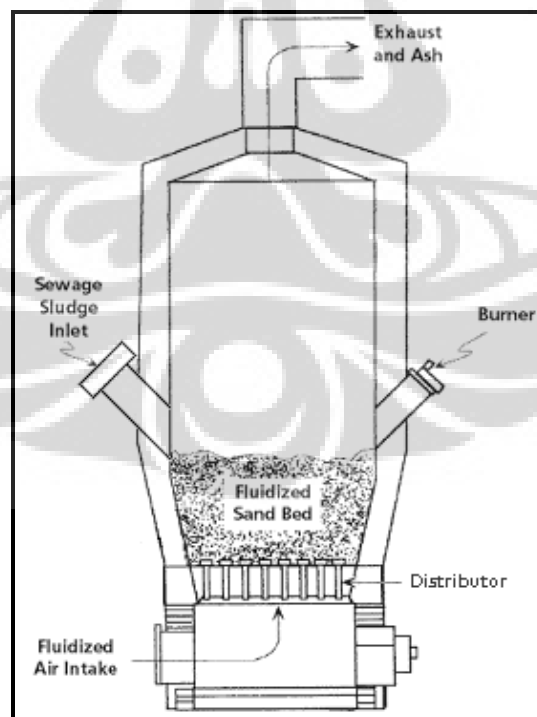
2.4 FLUIDIZED BED COMBUSTOR

Fluidized bed combustor adalah sebuah tungku pembakar yang menggunakan media pengaduk berupa pasir seperti pasir kuarsa dan silika, tujuannya agar terjadi pencampuran (*mixing*) yang homogen antara udara dengan butiran-butiran pasir tersebut. *Mixing* yang konstan antara partikel-partikel mendorong terjadinya perpindahan panas yang cepat serta pembakaran sempurna. *Fluidized bed combustor* umumnya berbentuk silindris tegak dengan kerangka baja yang dilapisi bahan tahan api, berisi hampan pasir (*sand bed*) dan distributor untuk fluidisasi udara. *Fluidized bed combustor* normalnya tersedia dalam ukuran berdiameter dari 9 sampai 34 ft.

Hampan pasir yang menjadi media pengaduk diletakkan di atas *distributor* yang berupa grid logam dengan dilapisi bahan tahan api. Grid ini berisi suatu pelat berpori berisi nosel-nosel injeksi udara atau *tuyere* di mana udara dialirkan ke dalam ruang bakar untuk menfluidisasi hampan (*bed*) tersebut. Aliran udara melalui nosel menfluidisasi hampan sehingga berkembang menjadi dua kali volume sebelumnya. Fluidisasi meningkatkan pencampuran dan turbulensi serta laju perpindahan panas yang terjadi. Bahan bakar bantu digunakan selama pemanasan awal untuk memanaskan hampan sampai temperatur operasi sekitar 600 sampai 900 °C sehingga pembakaran dapat terjaga pada temperatur konstan. Dalam beberapa instalasi, suatu sistem water spray digunakan untuk mengendalikan suhu ruang bakar.

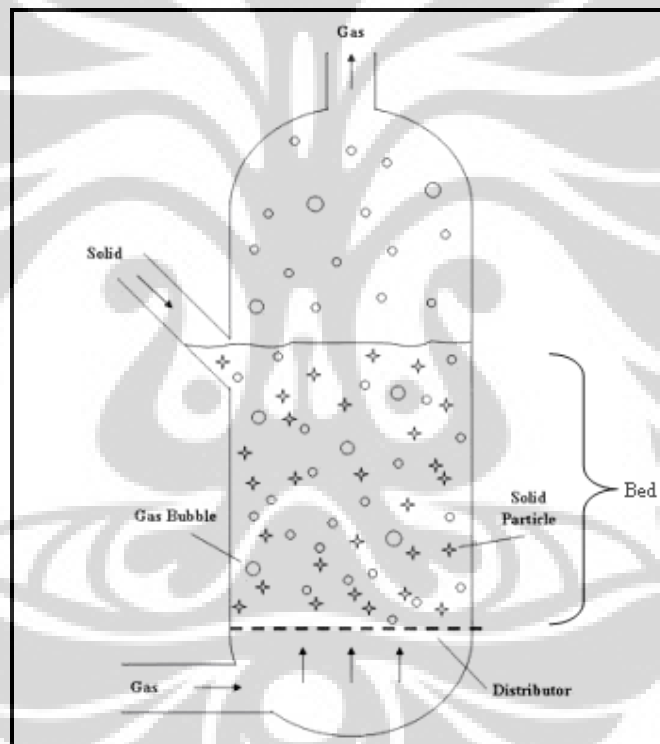
Reaktor unggul atau hampan fluidisasi (*fluidized bed*) berfungsi meningkatkan penyebaran umpan bahan bakar yang datang dengan pemanasan yang cepat sampai temperatur pengapiannya (*ignition*) serta meningkatkan waktu kontak yang cukup dan juga kondisi pencampuran yang hebat untuk pembakaran sempurna. Pembakaran normalnya terjadi sendiri, sehingga bahan bakar hancur dengan cepat, kering dan terbakar di dalam *hampan*. Laju pembakaran akan meningkat seiring dengan meningkatnya laju pirolisis dari bahan bakar padat karena kontak langsung dengan partikel hampan yang panas. Aliran udara fluidisasi meniup abu halus dari hampan. Gas-gas pembakaran biasanya diproses lagi di *wet scrubber* dan abunya dibuang secara *landfill*.

Pembakaran dengan teknologi *fluidized bed* merupakan satu rancangan alternatif untuk pembakaran limbah padat. Teknologi ini telah diaplikasikan untuk berbagai macam bahan bakar padat seperti biofuel, batu bara, serta limbah, baik itu limbah organik maupun anorganik. Bahan bakar padat yang sudah dalam bentuk tercacah atau dipotong-potong menjadi kecil-kecil, dimasukkan ke dalam ruang bakar dengan kapasitas yang konstan dan diletakkan tepat di atas pasir-pasir tersebut. Udara untuk proses pembakaran diberikan dari *blower* yang melewati *plenum* yaitu bagian *fluidized bed combustor* yang letaknya terdapat di bawah ruang bakar dan berfungsi sebagai saluran udara. Kemudian udara tersebut akan melewati *distributor* sehingga aliran udara yang akan masuk ke dalam ruang bakar akan bergerak secara seragam menuju timbunan pasir yang ada di atasnya [Basu : 1994; Howard : 1994]. Kemudian ruang kosong yang ada di ruang bakar, dan tepat di atasnya timbunan pasir, disebut juga sebagai *freeboard* atau juga *riser*. Pada bagian inilah terjadi perubahan partikel padat menjadi gas. Gas-gas yang dihasilkan akan terbang ke udara setelah melewati alat kontrol polusi udara.



Gambar 2.7 Skematis *Fluidized Bed Combustor*

Suatu pandangan potongan *fluidized bed combustor* dipertunjukkan seperti gambar 2.3. Terlihat pada gambar tersebut bahwa *fluidized bed combustor* memiliki satu ruangan dimana pengeringan dan pembakaran terjadi di hamparan pasir terfluidisasi. Waktu kontak di dalam daerah pembakaran hanyalah beberapa detik pada temperatur 750 sampai 900 °C. Abu terbawa keluar dari puncak ruang bakar dan dibersihkan dengan alat kontrol polusi udara. Pasir yang terbawa dengan abu harus diganti. Pasir yang terbuang pada umumnya 5 persen dari volume hamparan untuk setiap 300 jam operasi. Pengumpanan (*feed*) pada ruang bakar itu dimasukkan baik dari atas atau secara langsung ke dalam hamparan.



Gambar 2.8 Diagram Proses Pencampuran (*mixing*) dalam *Fluidized Bed Combustor*

Pencampuran dalam *fluidized bed* terdistribusi secara cepat dan seragam antara bahan bakar dan udara atau gas seperti yang diperlihatkan pada gambar, sehingga mengakibatkan perpindahan kalor dan pembakaran yang baik. Hamparan pasir itu sendiri memiliki kapasitas panas yang besar, yang membantu mengurangi

terjadinya fluktuasi temperatur sesaat yang dapat diakibatkan oleh nilai kalor bahan bakar (sampah) yang bervariasi. Kapasitas penyimpanan panas ini juga memungkinkan untuk proses startup yang lebih cepat, jika waktu shutdown sebelumnya belum terlalu lama. Proses pembakaran dengan teknologi ini telah berkembang relatif cepat sejak tahun 1960-an, dan sampai saat ini metode ini masih terus dikembangkan lebih lanjut di kawasan Eropa, Amerika, Jepang, Australia, dan negara-negara maju lainnya.

2.4.1 Jenis-Jenis *Fluidized Bed Combustor*

Fluidized bed combustor dapat beroperasi dalam dua jenis sistem, yaitu *bubbling* dan *circulating*, tergantung pada kecepatan udara yang masuk ke dalam ruang bakar. *Fluidized bed combustor* dengan sistem *bubbling* biasa disebut dengan insinerator *Bubling Fluidized Bed* (BFB) sedangkan jenis lainnya adalah insinerator *Circulating Fluidized Bed* (CFB), yang mana kecepatan udara yang lebih tinggi menyebabkan laju perpindahan partikel yang tinggi.

Bubling Fluidized Bed beroperasi ketika kecepatan aliran udara tidak cukup tinggi untuk membawa partikel hamparan yaitu pasir untuk keluar dari *riser* menuju siklon. Sistem *bubbling* pada *fluidized bed combustor* terjadi pada kecepatan udara yang relatif rendah antara 0,1 – 3 m/s, bergantung pada ukuran dari partikel pasir yang digunakan. Pada kondisi ini, hamparan harus dibersihkan dari partikel abu secara manual. Sedangkan pada CFB memiliki kecepatan gas atau udara yang lebih tinggi, biasanya 4 -6 m/s. Ketinggian *freeboard* untuk *combustor zone* pun lebih tinggi dibandingkan dengan BFB. Material yang berpindah terbawa keluar sistem diperoleh kembali dengan mensirkulasikan partikel tersebut ke dalam sistem.

Selanjutnya udara pembakaran pada CFB disuplai dalam dua tahap yaitu udara primer (fluidisasi) dan udara sekunder, dan sehingga beban daya dari blower dapat dikurangi. Pembakaran dua tahap ini juga dilakukan untuk mengurangi efek buruk terhadap lingkungan seperti polutan yang dihasilkan. BFB memiliki kekurangan pada proses *agitation* (pergolakan) dan pencampuran dalam ruang bakar terganggu jika ukuran ruang bakar diperbesar. Sebaliknya, CFB berukuran besar pun

dapat menjaga pembakaran dengan baik sekali karena terjadinya proses *agitation* yang cukup dan pencampuran dipengaruhi oleh fluidisasi berkecepatan tinggi. Dalam pembakaran CFB, bagian dari material *bed* dan *unburned char* yang terbawa keluar dari atas *riser* ditangkap oleh siklon dan disirkulasikan kembali ke dalam sistem, dan terbakar dengan sempurna.

2.4.2 Pinsip Kerja *Fluidized Bed Combustor*

Teknologi pembakaran dengan menggunakan metode *fluidized bed* telah memperkenalkan beberapa konsep penting dalam pembakaran sampah atau bahan padat [Tillman, 1991], yaitu :

- Turbulensi partikel padatan, dengan meningkatkan kontak fisik antara partikel padat (pasir) dengan bahan bakar (sampah), yang menghasilkan panas dan perpindahan panas yang lebih baik, dan juga menunjukkan panas yang seragam di sekitar pasir, dan juga di sekitar ruang bakar secara umumnya.
- Temperatur sebagai kontrol variabel yang independen dapat meningkatkan kontrol polusi yang dapat dihasilkan oleh penempatan bahan bakar dan sistem distribusi udara, serta penempatan tabung *heat recovery* dalam reaktor.
- Penggunaan pasir sebagai *inert material* dapat mengurangi dampak sisa hasil pembakaran dengan menggunakan bahan bakar yang basah atau kotor.

Proses kerja *fluidized bed combustor* terutama terdiri dari tiga tahapan. Dari kondisi awal, pemanasan dan kondisi operasi.

1. Kondisi awal

Pada kondisi awal, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.5a, ruang bakar masih pada temperatur ruang. Pasir sebagai media pengaduk sekaligus pertukaran kalor dituang ke dalam ruang bakar.

2. Proses pemanasan

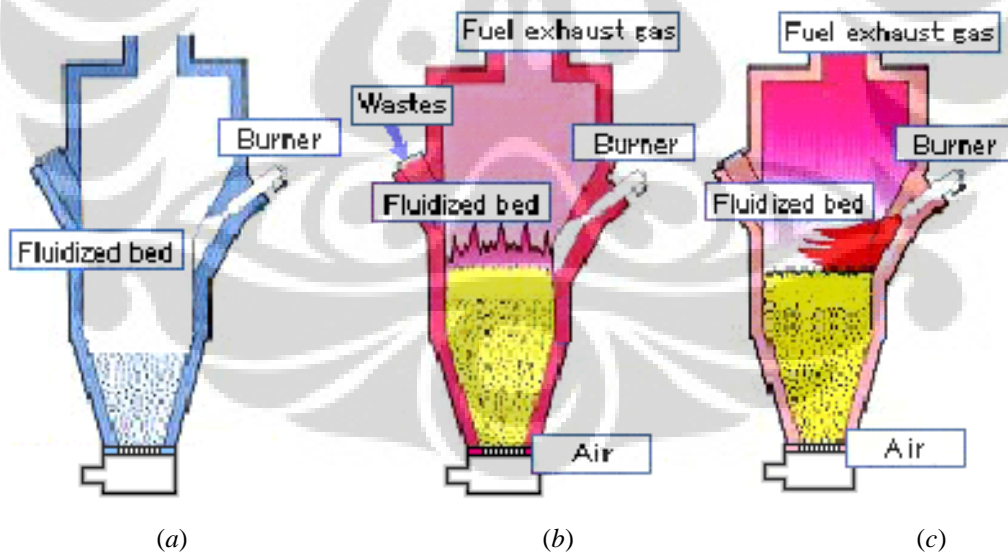
Pada tahapan proses pemanasan, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.5b, pasir tersebut mulai dipanaskan. Udara bertekanan mulai dialirkan dari blower ke dalam ruang bakar dari bagian bawah insinerator untuk menfluidisasi pasir.

Pada kondisi ini sudah terjadi fluidisasi pada kecepatan fluidisasi minimum. Proses pemanasan dilakukan dengan bahan bakar bantu dari burner. Burner memanaskan pasir sampai temperatur operasi ($750 - 900\text{ }^{\circ}\text{C}$). Untuk mempercepat pemanasan dapat ditambahkan bahan bakar ke dalam reaktor berupa kayu bakar atau pun batu bara.

3. Kondisi operasi

Pada kondisi operasi, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.5c, temperatur ruang bakar pada hamparan sudah mencapai temperatur operasi. Pada kondisi ini bahan bakar bantu tidak dipakai lagi, burner dimatikan. Temperatur ruang bakar terjaga konstan dengan laju pengumpanan sampah yang tetap. Kecepatan udara dari blower dinaikkan sampai pada kecepatan pengoperasian maksimum. Sampah akan terbakar sendiri pada kondisi ini karena panas yang diberikan oleh pasir sudah melewati temperatur nyala dari sampah.

Secara umum tahapan-tahapan proses kerja dari *fluidized bed combustor* dapat dilihat pada ilustrasi gambar-gambar di bawah ini.



Gambar 2.9 Tahapan Proses Kerja *Fluidized Bed Combustor*; (a) Tahapan pada Kondisi Awal; (b) Tahapan Proses Pemanasan; (c) Tahapan pada Kondisi Operasi.

2.4.3 Bagian-Bagian *Fluidized Bed Combustor*

Fluidized bed combustor memiliki banyak bagian-bagian penting yang harus diperhatikan dalam pengoperasiannya. Bagian-bagian penting tersebut di antaranya terdiri dari *fluidization vessel*, *solid feeder*, *burner*, *bed material*, *cyclone separator*, *blower*, dan *instrumentation*.

2.4.3.1 *Fluidization Vessel*

Fluidization vessel sebagian besar terbuat dari rangka baja yang dilapisi material tahan panas. Biasanya berbentuk silinder tegak dengan diameter 9 – 34ft. Secara umum *fluidization vessel* terdiri dari 3 bagian utama yaitu :

1. Ruang Bakar

Ruang bakar ini merupakan ruang tempat meletakkan pasir dan umpan sampah yang akan dibakar, sehingga proses pembakaran terjadi di sini. Pasir difluidisasi di ruang bakar ini dengan suplai udara dari blower. Ruang bakar dalam *fluidized bed combustor* juga harus dapat menjaga temperatur pasir yang dapat mencapai 800 – 900 °C.

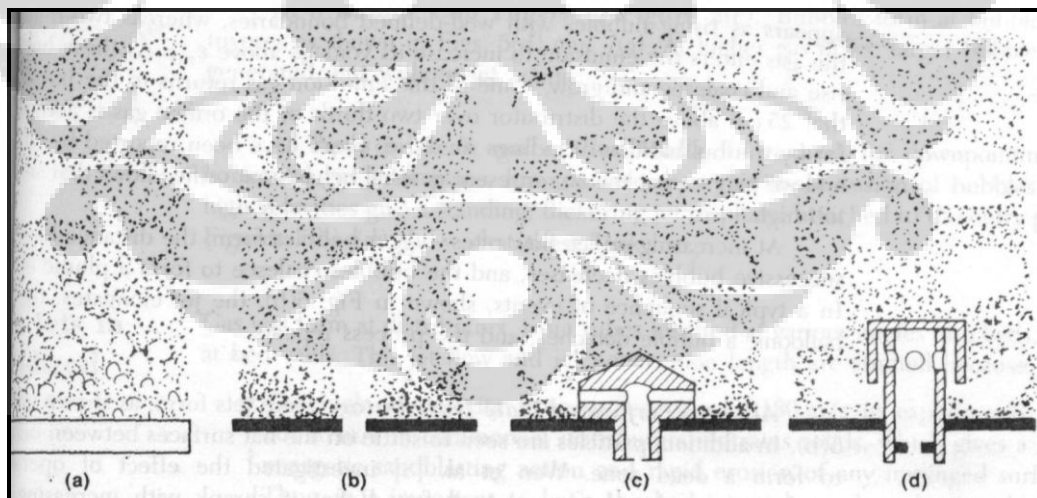


Gambar 2.10 Ruang Bakar Utama *Fluidized Bed Combustor* UI

Ketika sistem bekerja dalam fluidisasi dengan kecepatan tinggi, bahan bakar akan terbakar setelah fase *bubbling*. Di dalam ruang bakar akan terjadi urutan-urutan reaksi, yaitu: pengeringan (*drying*), pemanasan (*heating*), pirolisa partikel solid, dan oksidasi. Ruang bakar utama ini merupakan area yang paling penting dalam proses pembakaran, selain sebagai tempat terjadinya proses pembakaran, area ini juga berfungsi sebagai tempat penyimpanan. Volume yang besar dari ruang bakar ini membantu dalam proses pirolisa terhadap bahan bakar padat, dan juga dapat membantu peningkatan stabilitas termal di dalam ruang bakar.

2. Distributor

Distributor digunakan untuk untuk mendistribusikan aliran udara dari blower secara seragam pada keseluruhan penampang reaktor sehingga hamparan pasir yang ditopang oleh distributor tersebut terjadi fluidisasi. Distributor ini juga memiliki pengaruh terhadap ukuran dan jumlah *bubble* yang dihasilkan. Terdapat beberapa jenis distributor yang sering digunakan, yaitu *porous plate*, *perforated plate*, *nozzle-type tuyere*, dan *bubble cap tuyere*. Masing-masing jenis distributor tersebut dapat menghasilkan perilaku gelembung yang berbeda-beda seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.8.



Gambar 2.11 Perilaku Gelembung Setiap Jenis Distributor; (a) *Porous Plate*; (b) *Perforated Plate*; (c) *Nozzle-type Tuyere*; (d) *Bubble Cap Tuyere*.



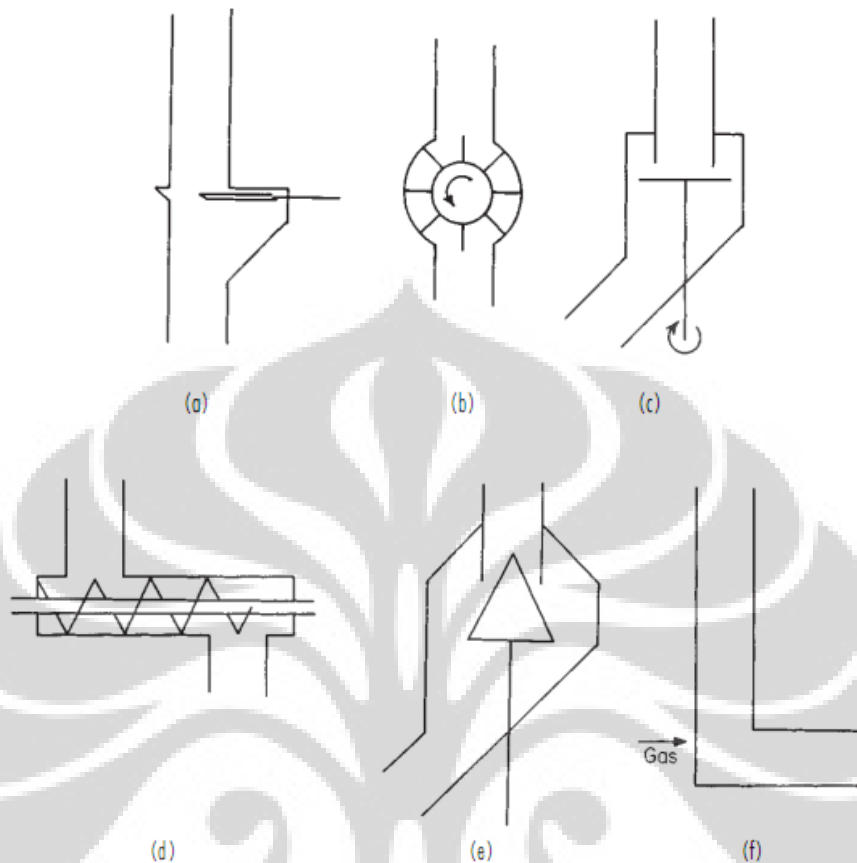
Gambar 2.12 Distributor yang Sebelumnya Digunakan pada *Fluidized Bed Combustor* UI

3. *Plenum*

Plenum merupakan bagian fluidized vessel yang berfungsi sebagai saluran udara menuju distributor. *Plenum* umumnya berbentuk kerucut dan terletak di bawah distributor. Udara yang dialirkan oleh gas supply (pada FBC UI menggunakan blower) akan diteruskan melewati pipa saluran udara. Kemudian udara tersebut akan melewati plenum. Di *plenum* ini akan terjadi perubahan kecepatan aliran udara. Hal ini disebabkan adanya perbesaran ukuran penampang saluran pada *plenum*.

2.4.3.2 *Solid Feeder*

Solid feeder merupakan bagian dari *fluidized bed combustor* yang berfungsi mengalirkan sejumlah bahan bakar menuju ruang bakar. Ada beberapa jenis dari *solid flow control* yang sering digunakan yaitu jenis *slide valve*, *rotary valve*, *table feeder*, *screw feeder*, *cone valve*, dan *L valve*.



Gambar 2.13 Jenis-Jenis *Solid Flow Control*; (a) *Slide Valve* (b) *Rotary Valve*; (c) *Table Feeder*; (d) *Screw Feeder*; (e) *Cone Valve*; (f) *L Valve*

Jenis-jenis tersebut mempunyai kemampuan mengontrol laju aliran yang berbeda-beda. Ukuran partikel yang akan dipindahkan sangat menentukan tipe feeder apa yang akan digunakan. Selain itu masih banyak parameter yang perlu diperhitungkan dalam mendesign sebuah feeder, seperti kapasitas material yang ingin dipindahkan, massa jenis material, tingkat abrasifitas material, kecepatan aliran, dan lain-lain.

Fluidized bed combustor di UI menggunakan tipe screw feeder untuk mengalirkan bahan bakar ke dalam ruang bakar. Screw feeder tersebut digerakkan oleh rantai yang dihubungkan ke sebuah motor listrik.



Gambar 2.14 *Screw Feeder*

2.4.3.3 Burner

Burner merupakan komponen penting pada *fluidized bed combustor*. Burner digunakan sebagai alat untuk proses pemanasan awal. Burner berfungsi untuk memanaskan pasir sampai pasir tersebut mencapai temperatur 750-800 °C. Dalam pengoperasiannya, burner hanyalah digunakan sementara. Burner tidak digunakan selamanya selama pengoperasian alat berlangsung seperti halnya blower, namun burner hanya digunakan pada proses awal saat proses pemanasan pasir dilakukan sampai temperatur operasi. Ketika hamparan pasir sudah mencapai temperatur yang diinginkan, maka burner ini akan berhenti bekerja.

Burner yang digunakan pada alat *fluidized bed combustor* UI merupakan burner gas dengan bahan bakar gas LPG. Burner yang digunakan tersebut diharapkan dapat memanaskan pasir secepat mungkin. Hal ini berhubungan dengan nilai efisiensi dan efektifitas pengoperasian alat *fluidized bed combustor* UI secara keseluruhan. Parameter yang digunakan dalam penggunaan burner adalah besar kapasitas kalor yang dapat dihasilkan burner setiap satu waktu. Semakin besar nilai kapasitas kalor yang dimiliki burner maka semakin baik dan efektiflah burner tersebut. Namun ada

beberapa faktor lain yang dipertimbangkan dalam penggunaan burner seperti keamanan dalam penggunaan (*safety*), dan ketahanan burner (*endurance*).



Gambar 2.15 Burner yang Digunakan pada *Fluidized Bed Combustor* UI

2.4.3.4 *Bed Material*

Material hamparan (*Bed Material*) yang digunakan pada *fluidized bed combustor* adalah pasir. Pasir ini digunakan sebagai media pentransfer panas terhadap bahan bakar yang akan dibakar. Salah satu persyaratan yang harus dimiliki oleh pasir adalah nilai konduktifitas termal yang baik dan kalor jenis yang rendah. Fungsi partikel dalam *fluidized bed combustor* ialah untuk membantu pembakaran di dalam ruang bakar dan membantu mempertahankan temperatur ruang bakar. Partikel-partikel tersebut harus mampu menjadi penahan thermal shock (lonjakan suhu). Partikel yang umumnya digunakan adalah pasir silika atau kuarsa, dengan ukuran partikel 20 *mesh* sampai 50 *mesh*. Pasir yang digunakan sebagai media harus memenuhi persyaratan teknik diantaranya yaitu konduktifitas termal yang tinggi, kalor jenis yang rendah, titik lebur yang tinggi, serta tahan terhadap temperature tinggi dalam waktu yang lama.

Partikel pasir yang digunakan, diklasifikasikan dalam beberapa kelompok [Geldart. 1991]. Kelompok-kelompok pasir tersebut yaitu:

- *Group A*

Material pasir dikategorikan ke dalam kelompok ini memiliki diameter partikel (d_p) berkisar antara $20 \mu m$ sampai $100 \mu m$ dan densitas partikel kurang dari 1400 kg/m^3 . Material ini paling mudah terfluidisasi dibandingkan kelompok yang lain.

- *Group B*

Material kelompok ini cenderung memiliki ukuran rata-rata diameter partikel berkisar antara $40 \mu m$ sampai $500 \mu m$ dan densitasnya berkisar antara 1400 sampai 4000 kg/m^3 .

- *Group C*

Kelompok ini memiliki ukuran rata-rata diameter partikel yang lebih kecil ($<30 \mu m$) dengan densitas yang kecil. Partikelnya sangat halus seperti tepung. Fluidisasi sangat sulit terjadi karena gaya interstitial antara partikel mempunyai efek yang lebih besar dibandingkan gaya gravitasi.

- *Group D*

Material kelompok ini biasanya memiliki ukuran rata-rata diameter partikel lebih besar dari $600 \mu m$ dan paling besar di antara kelompok lainnya. Kelompok ini membutuhkan kecepatan fluidisasi yang besar sehingga sangat sulit untuk pencampuran yang baik dibandingkan kelompok A dan B.

Untuk tujuan fluidisasi yang baik, sebaiknya menggunakan pasir silika atau pasir kuarsa dengan ukuran diameter $400 - 600 \mu m$. Pasir jenis ini diklasifikasikan diantara grup B. Pasir kuarsa dan pasir silika tidak jauh berbeda kandungannya, keduanya sama-sama memiliki kandungan SiO_2 . Kedua pasir tersebut berasal dari batuan yang sangat keras sehingga sangat cocok digunakan untuk penggunaan pada temperature tinggi dan sebagai media pentansfer panas.

2.4.3.5 Cyclone separator

Cyclone separator merupakan salah satu komponen penting sebagai *gas cleaning system* dari hasil proses pembakaran yang terjadi. *Cyclone separator* berfungsi sebagai alat pemisah partikel padat dengan gas. Pada komponen ini, yang

dipisahkan adalah partikel-partikel hasil dari proses pembakaran. Akibat yang dihasilkan dari proses pembakaran yang terjadi, terutama pembakaran dengan *fluidized bed combustor*, akan menghasilkan partikel-partikel padat besar dan partikel-partikel padat kecil beserta dengan partikel gas.

Partikel yang memiliki nilai kerapatan lebih besar, dalam hal ini adalah partikel padat, akan jatuh turun ke bawah dan kemudian ditampung. Biasanya, partikel tersebut adalah abu-abu hasil sisa pembakaran. Begitu juga sebaliknya, partikel-partikel yang memiliki kerapatan lebih kecil, akan terbang terangkat ke atas. Biasanya, partikel-partikel tersebut adalah gas-gas hasil pembakaran, seperti CO_2 , CO , SO_x , NO_x dan lain-lain. *Cyclone separator* ini sendiri belum memadai sebagai *gas cleaning system*, seharusnya terdapat komponen lainnya seperti *scrubber*.



Gambar 2.16 *Cyclone Separator Fluidized Bed Combustor UI*

2.4.3.6 *Blower*

Blower merupakan salah satu komponen vital yang digunakan untuk aplikasi teknologi *fluidized bed*. *Blower* tersebut berfungsi untuk mengalirkan udara ke reaktor dengan debit tertentu sehingga pasir silika yang ditopang dengan plat

distributor tersebut terfluidisasi. *Blower* harus dapat memberikan aliran udara dengan kecepatan aliran yang mencukupi sehingga terjadi fluidisasi, dan sebagai tolok ukurnya dapat dilihat dari kecepatan fluidisasi minimum. Selain harus dapat mengalirkan udara dengan kecepatan udara setidaknya sebesar kecepatan fluidisasi minimumnya, blower harus juga dapat memberikan cukup tekanan yang lebih besar dari pada nilai *pressure drop* (penurunan tekanan) yang melewati hamparan pasir. Pada saat proses pemilihan blower yang akan digunakan pada *fluidized bed combustor* UI, parameter-parameter yang digunakan dalam pemilihan tersebut adalah besar debit aliran maksimum blower, besar tekanan maksimum blower, dan besar daya yang dibutuhkan blower.



Gambar 2.17 Blower Sentrifugal yang Digunakan pada FBC

2.4.3.7 Instrumentation

Instrumentasi merupakan peralatan pendukung yang digunakan pada saat pengoperasian *fluidized bed combustor*. Peralatan tersebut juga sangat penting saat pengoperasian berlangsung. Adapun beberapa instrument yang digunakan pada *fluidized bed combustor* UI yaitu sebagai berikut :

1. Control Panel

Berfungsi untuk mengontrol putaran feeder dan putaran blower.



Gambar 2.18 *Control Panel*

2. *Termokopel*

Berfungsi untuk mengukur temperatur di dalam ruang bakar.

3. *Data logger*

Berfungsi membaca temperatur yang disensing oleh termokopel dan menampilkannya secara digital.

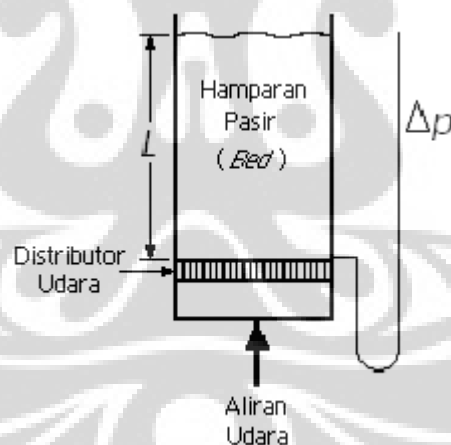


Gambar 2.19 *Data Logger*

2.5 FENOMENA FLUIDISASI

2.5.1 Proses Fluidisasi

Bila suatu zat cair atau gas dilewatkan melalui lapisan hamparan partikel padat pada kecepatan rendah, partikel-partikel itu tidak bergerak. Jika kecepatan fluida berangsur-angsur dinaikkan, partikel-partikel itu akhirnya akan mulai bergerak dan melayang di dalam fluida. Istilah “fluidisasi” (*fluidization*) dan “hamparan fluidisasi” (*fluidized bed*) biasa digunakan untuk memeriksa keadaan partikel yang seluruhnya dalam keadaan melayang (suspensi), karena suspensi ini berperilaku seakan-akan fluida rapat. Jika hamparan itu dimiringkan, permukaan atasnya akan tetap horisontal, dan benda-benda besar akan mengapung atau tenggelam di dalam hamparan itu bergantung pada perbandingan densitasnya terhadap suspensi. Zat padat yang terfluidisasi dapat dikosongkan dari hamparannya melalui pipa dan katup sebagaimana halnya suatu zat cair, dan sifat fluiditas ini merupakan keuntungan utama dari penggunaan fluidisasi untuk menangani zat padat.



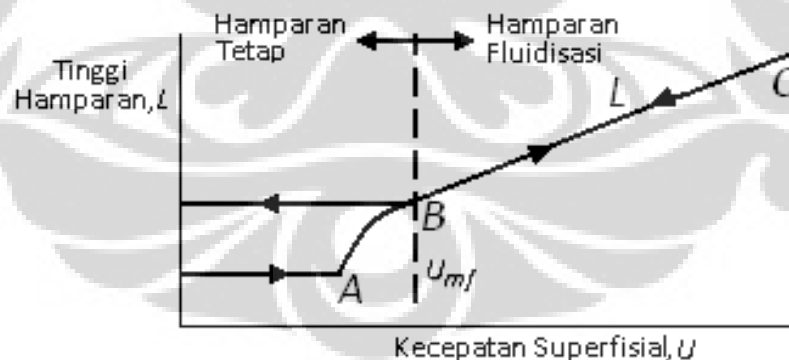
Gambar 2.20 Skematik Fluidisasi

2.5.2 Kondisi Fluidisasi

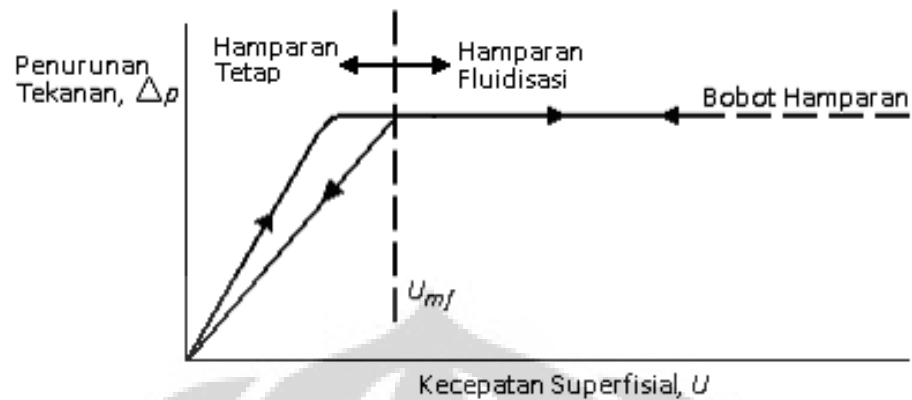
Perhatikan suatu tabung vertikal yang sebagian berisi dengan bahan butiran, sebagaimana terlihat dalam skema gambar. Tabung itu turbulen pada bagian atas, dan mempunyai plat berpori pada bagian bawah untuk menopang pasir di atasnya serta

untuk menyebarkan aliran secara seragam pada keseluruhan penampang. Udara dimasukkan di bawah plat distribusi atau distributor (penyebar udara) dengan laju lambat, dan naik ke atas melalui hamparan tanpa menyebabkan terjadinya gerakan pada partikel. Jika partikel itu cukup kecil, aliran di dalam saluran-saluran di antara partikel-partikel dalam hamparan itu akan bersifat laminar. Jika kecepatan itu berangsur-angsur dinaikkan, penurunan tekanan (*pressure drop*) akan meningkat, tetapi partikel-partikel itu masih tetap tidak bergerak dan tinggi hamparan pun tidak berubah.

Pada kecepatan tertentu, penurunan tekanan melintas hamparan itu akan mengimbangi gaya gravitasi yang dialaminya; dengan kata lain, mengimbangi bobot hamparan, dan jika kecepatan masih dinaikkan lagi, partikel itu akan mulai bergerak. Titik ini digambarkan oleh titik *A* pada grafik gambar 2.10. Jika kecepatan itu terus ditingkatkan lagi, partikel-partikel itu akan memisah dan menjadi cukup berjauhan satu sama lain sehingga dapat berpindah-pindah di dalam hamparan itu, dan fluidisasi yang sebenarnya pun mulailah terjadi (titik *B*). Jika hamparan itu sudah terfluidisasi, penurunan tekanan melintas hamparan tetap konstan (gambar 3.2 dan 3.3), akan tetapi tinggi hamparan bertambah terus jika aliran ditingkatkan lagi.



Gambar 2.21 Hubungan Tinggi Hamparan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hamparan Zat Padat



Gambar 2.22 Hubungan Penurunan Tekanan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hamparan Zat Padat

Jika laju aliran ke hamparan fluidisasi (*fluidized bed*) itu perlahan-lahan diturunkan, penurunan tekanan tetap sama, tetapi tinggi hamparan berkurang, mengikuti garis *BC* yang diamati pada waktu penambahan kecepatan. Akan tetapi, tinggi-akhir hamparan itu mungkin lebih besar dari nilainya pada hamparan diam semula, karena zat padat yang dicurahkan ke dalam tabung itu menetal lebih rapat dari zat padat yang mengendap perlahan-lahan dari keadaan fluidisasi. Penurunan tekanan pada kecepatan rendah lebih kecil dari pada hamparan-diam semula. Jika fluidisasi dimulai kembali, penurunan tekanan akan mengimbangi bobot hamparan pada titik *B*, titik inilah yang harus kita anggap sebagai kecepatan fluidisasi minimum U_{mf} , dan bukan titik *A*. Untuk mengukur U_{mf} , hamparan itu harus difluidisasikan dengan kuat terlebih dahulu, dibiarkan mengendap dengan mematikan aliran udara, dan laju aliran dinaikkan lagi perlahan-lahan sampai hamparan itu mengembang.

2.5.3 Jenis-Jenis Fluidisasi

2.5.3.1 Fluidisasi partikulat (*particulate fluidization*)

Dalam fluidisasi padatan pasir dan air, partikel-partikel itu bergerak menjauhi satu sama lain, dan gerakannya bertambah hebat dengan bertambahnya kecepatan, tetapi densitas hamparan rata-rata pada suatu kecepatan tertentu sama di segala arah hamparan. Proses ini disebut “fluidisasi partikulat” (*particulate fluidization*) yang

bercirikan ekspansi hamparan yang cukup besar tetapi seragam pada kecepatan yang tinggi.

Ketika fluida cairan seperti air dan padatnya berupa kaca, gerakan dari partikel saat fluidisasi terjadi dalam ruang sempit dalam hamparan. Seiring dengan bertambahnya kecepatan fluida dan penurunan tekanan, maka hamparan akan terekspansi dan pergerakan partikel semakin cepat. Jalan bebas rata-rata suatu partikel di antara tubrukan-tubrukan dengan partikel lainnya akan bertambah besar dengan meningkatnya kecepatan fluida, dan akibatnya porositas hamparan akan meningkat pula. Ekspansi dari hamparan ini akan diikuti dengan meningkatnya kecepatan fluida sampai setiap partikel bertindak sebagai suatu individu. Proses ini dikenal sebagai fluidisasi partikulat.

2.5.3.2 Fluidisasi gelembung (*bubbling fluidization*)

Hamparan zat padat yang terfluidisasi di dalam udara biasanya menunjukkan fluidisasi yang dikenal sebagai fluidisasi agregatif atau fluidisasi gelembung. Fluidisasi ini terjadi jika kecepatan superfisial gas di atas kecepatan fluidisasi minimum. Bila kecepatan superfisial jauh lebih besar dari U_{mf} , kebanyakan gas itu mengalir melalui hamparan dalam bentuk gelembung atau rongga-rongga kosong yang tidak berisikan zat padat, dan hanya sebagian kecil gas itu mengalir dalam saluran-saluran yang terbentuk di antara partikel. Partikel itu bergerak tanpa aturan dan didukung oleh fluida, tetapi dalam ruang-ruang di antara gelembung fraksi kosong kira-kira sama dengan pada kondisi awal fluidisasi. Gelembung yang terbentuk berperilaku hampir seperti gelembung udara di dalam air atau gelembung uap di dalam zat cair yang mendidih, dan karena itu fluida jenis ini kadang-kadang dinamai dengan istilah "hamparan didih" (*boiling bed*).

Perilaku hamparan fluidisasi gelembung sangat bergantung pada banyaknya dan besarnya gelembung gas dan ini tidak mudah meramalkannya. Ukuran rata-rata gelembung itu bergantung pada jenis dan ukuran partikel, jenis plat distributor, kecepatan superfisial, dan tebalnya hamparan. Gelembung-gelembung cenderung bersatu, dan menjadi besar pada waktu naik melalui hamparan fluidisasi (*fluidized*

bed) itu dan ukuran maksimum gelembung stabil berkisar antara beberapa inci sampai beberapa kaki diameternya. Gelembung-gelembung yang beriringan lalu bergerak ke puncak terpisah oleh zat padat yang seakan-akan sumbat. Peristiwa ini disebut “penyumbatan” (*slugging*) dan biasanya hal ini tidak dikehendaki karena mengakibatkan adanya fluktuasi tekanan di dalam hamparan, meningkatkan zat padat yang terbawa ikut, dan menimbulkan kesulitan jika kita ingin memperbesar skalanya (*scale up*) ke unit-unit yang lebih besar.

2.5.4 Parameter-Parameter Fluidisasi

Banyak faktor yang mempengaruhi bagaimana terjadinya fluidisasi, sifat-sifat dan karakteristiknya. Berikut ini parameter-parameter yang mempengaruhi terjadinya fluidisasi.

2.5.4.1 Ukuran partikel

Jika suatu pasir dengan menggunakan proses pengayakan (*sieving*) memiliki ukuran partikel yang terdistribusi dari beberapa ukuran partikel d_{pi} , maka ukuran partikel pengayakan rata-rata (*mean sieve size*) d_p :

$$d_p = \frac{1}{\sum x / d_{pi}}$$

yang mana x adalah fraksi berat partikel pada masing-masing ukuran partikel.

Definisi ukuran partikel rata-rata memberikan penekanan yang sebenarnya terhadap pentingnya pengaruh ukuran kehalusan suatu partikel pasir. Sebaiknya jangan dibingungkan dengan metode penggolongan pasir yang lain, median d_{pm} .

2.5.4.2 Massa jenis padatan

Massa jenis padatan dapat dibedakan dalam tiga jenis, yaitu *bulk*, *skeletal*, dan *particle density*. Massa jenis borongan (*bulk density*) merupakan pengukuran berat dari keseluruhan partikel dibagi dengan volume partikel. Pengukuran ini menyertakan faktor kekosongan di antara partikel dan kekosongan dalam pori-pori partikel. Massa jenis padatan (*skeletal density*) sesungguhnya adalah densitas dari suatu padatan jika

porositasnya nol. Dalam perhitungan hamparan fluidisasi (*fluidized bed*) biasanya menggunakan massa jenis partikel (ρ_p), yang merupakan berat dari suatu partikel dibagi volumenya dan menyertakan lubang atau pori-pori.

2.5.4.3 Sphericity

Sphericity (ψ) merupakan faktor bentuk yang dinyatakan sebagai rasio dari area permukaan volume partikel bulat yang sama dengan partikel itu dibagi dengan area permukaan partikel.

$$\psi = \frac{d_{sv}}{d_v}$$

Material yang melingkar seperti katalis dan pasir bulat memiliki nilai *sphericity* sebesar 0,9 atau lebih.

2.5.4.4 Bed voidage

Bed voidage (ϵ) merupakan faktor kekosongan di antara partikel di dalam hamparan pasir. *Bed voidage* didefinisikan sebagai perbandingan antara selisih volume hamparan dan volume partikel dibagi dengan volume hamparannya. Pada partikel yang tidak memiliki porositas internal, *bed voidage* dapat ditentukan dari massa jenis partikel (ρ_p) dan massa jenis borongan pada hamparan (ρ_b).

$$\epsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p}$$

2.5.4.5 Kecepatan fluidisasi minimum

Bila gas dilewatkan melalui lapisan hamparan partikel padat pasir pada kecepatan rendah, partikel-partikel itu tidak bergerak. Jika kecepatan fluida berangsur-angsur dinaikkan, partikel-partikel pasir itu akhirnya akan mulai bergerak dan melayang di dalam fluida, dan gesekan (*friction*) menyebabkan terjadinya penurunan tekanan (*pressure drop*). Ketika kecepatan gas dinaikkan, penurunan tekanan meningkat sampai besar penurunan tekanan tersebut sama dengan berat hamparannya dibagi dengan luas penampangnya. Kecepatan gas ini disebut kecepatan

fluidisasi minimum, U_{mf} . Kecepatan fluidisasi minimum adalah kecepatan superfisial terendah yang dibutuhkan untuk terjadinya fluidisasi. Jika U_{mf} tidak dapat ditentukan secara eksperimental, maka gunakan persamaan di bawah ini.

$$Re_{mf} = 135,7 + 0,0408 \cdot Ar^{1/2} - 33,7$$

bilangan Reynold terjadinya fluidisasi minimum (Re_{mf}) :

$$Re_{mf} = \frac{\bar{d}_p \rho_f U_{mf}}{\mu_f}$$

bilangan Archimedes (Ar):

$$Ar = \frac{\bar{d}_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu_f^2}$$

keterangan : U_{mf} = kecepatan fluidisasi minimum (m/s)

\bar{d}_p = diameter partikel rata-rata pasir (m)

ρ_f = densitas fluida gas (kg/m^3)

ρ_p = densitas partikel pasir (kg/m^3)

μ_f = viskositas dinamik fluida gas ($N.s/m^2$)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

Pengukuran kecepatan fluidisasi minimum dapat juga diukur berdasarkan data eksperimental dari grafik penurunan tekanan vs kecepatan superfisial berdasarkan data eksperimental dari titik potong antara bagian kurva yang naik dan bagian kurva yang datar seperti pada gambar 3.2.

2.5.4.6 Penurunan tekanan melintas hamparan

Suatu hamparan partikel-partikel pasir memberikan resistansi terhadap aliran fluida yang melaluinya. Jika kecepatan aliran tersebut dinaikkan, maka gaya seret (*drag force*) yang terjadi pada partikel-partikel tersebut meningkat. Dengan aliran ke atas melalui hamparan yang tidak tenang, partikel-partikel tersebut menyusun kembali sendiri untuk memberikan lebih sedikit resistansi terhadap aliran fluida dan

hamparan akan cenderung untuk mengembang. Dengan menaikkan lagi kecepatan aliran ke atas, berkembangnya hamparan akan terus berlanjut sampai suatu kondisi tercapai yang mana gaya seret yang terjadi pada partikel-partikel cukup untuk menopang berat partikel-partikel dalam hamparan. Sehingga penurunan tekanan melintas hamparan (ΔP_b) akan kurang lebih sama dengan berat hamparan per satuan luas.

Persamaan penurunan tekanan melalui distributor melintas hamparan pasir adalah:

$$\Delta P_b = h (\rho_p - \rho_f) \epsilon g$$

keterangan :

- ΔP_b = penurunan tekanan melewati hamparan (N/m^2)
- h = tinggi hamparan pasir (kg)
- ρ_p = massa jenis partikel pasir (kg/m^3)
- ρ_f = massa jenis fluida udara (kg/m^3)
- ϵ = *bed voidage*
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)

2.5.4.7 Penurunan tekanan melintas distributor

Bila dilihat dari sudut pandang bagaimana udara didistribusikan, maka kebutuhan mendasar adalah merancang suatu distributor sedemikian rupa sehingga udara yang mengalir melewati distributor tersebut mengalami penurunan tekanan yang secukupnya, ΔP_D . Jumlah orifis, nozzle, dan sebagainya yang dibutuhkan pada distributor untuk mencapai besar nilai penurunan tekanan ini harus ditentukan dahulu. Kita pertimbangkan dahulu contoh kasus paling sederhana dari sebuah distributor *perforated plate*. Jika kecepatan udara superfisial dalam *windbox* atau ruang plenum adalah U_o dan *fractional open area* dari distributor (yaitu fraksi dari jumlah total luas bukaan pada aliran udara yang melewati distributor) adalah f_{oa} , maka kecepatan udara rata-rata melewati orifis adalah:

$$U_{or} = \frac{U_o}{f_{oa}}$$

Sehingga persamaan penurunan tekanan melalui distributor adalah:

$$\Delta P_D = \frac{\rho_f}{2} \left\{ \left(\frac{U_{or}}{C_d} \right)^2 - U_o^2 \right\}$$

yang mana ρ_f merupakan massa jenis udara dan C_d merupakan *orifice discharge coefficient*.

Orifice discharge coefficient bergantung pada bentuk dari orifis. Terdapat kemungkinan bahwa udara yang melewati orifis menuju hamparan terfluidisasi (*fluidized bed*) mengalami penurunan tekanan yang lebih sedikit daripada yang tanpa ada partikel atau kosong. Untuk orifis bundar bertepi-persegi dengan diameter d_{or} jauh lebih besar daripada ketebalan plat distributor t , C_d dapat ditentukan sebesar 0,6. Untuk $t/d_{or} > 0,09$, C_d dapat diperkirakan menurut korelasi yang diberikan oleh Qureshi dan Creasy:

$$C_d = 0.82 \left(\frac{t}{d_{or}} \right)^{0.13}$$

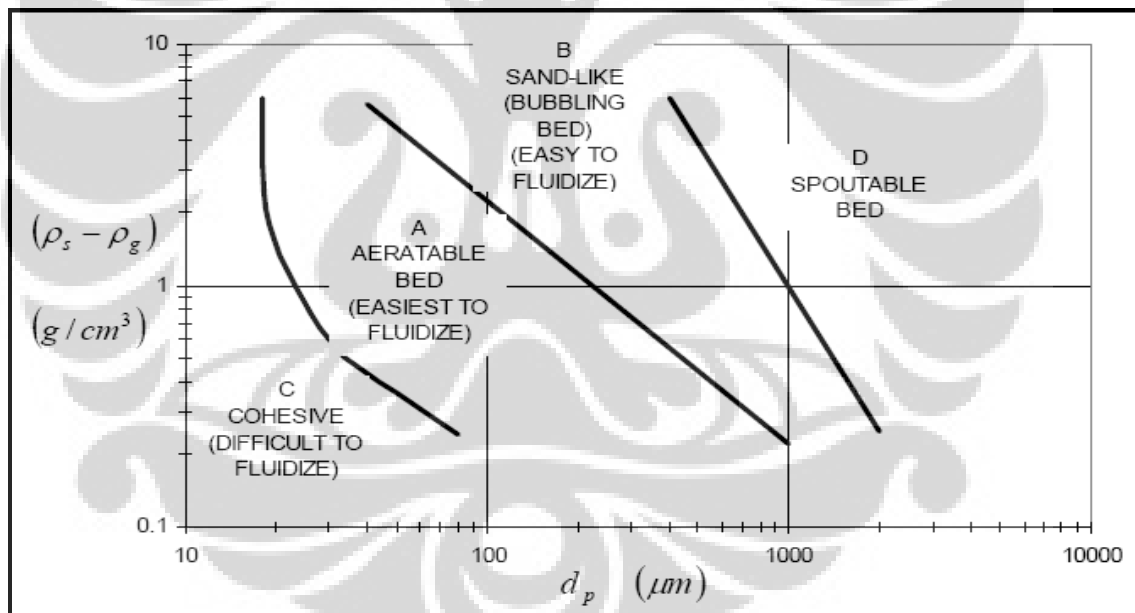
Keterangan :

- ΔP_d = penurunan tekanan melewati distributor (N/m^2)
- U_o = kecepatan udara superfisial (m/s)
- U_{or} = kecepatan udara rata-rata melewati orifis (m/s)
- f_{or} = *fractional open area* (m^2)
- ρ_f = massa jenis fluida udara (kg/m^3)
- C_D = *Orifice discharge coefficient*
- t = tebal plat distributor (m)
- d_{or} = diameter orifis pada distributor (m)

2.5.4.8 Klasifikasi pasir

Pasir diklasifikasikan berdasarkan bagaimana pasir tersebut terfluidisasi saat dialirkan aliran udara pada kecepatan udara tertentu. Setiap masing-masing kelompok pasir memiliki karakteristik yang berbeda-beda seperti bagaimana terbentuknya gelembung, solid mixing yang terjadi, tingkat mengembangnya pasir dan besarnya nilai penurunan tekanan yang semuanya dipengaruhi oleh diameter partikel pasir dan massa jenis pasir tersebut.

Geldart meneliti perilaku tiap-tiap kelompok pasir ketika mengalami fluidisasi. Dia mengkategorikan klasifikasi ini dengan cara membuat plot grafik diameter partikel pasir terhadap selisih antara massa jenis partikel pasir dengan massa jenis udara. Diagram klasifikasi jenis-jenis pasir yang dikelompokkan oleh Geldart dapat dilihat pada gambar.



Gambar 2.23 Diagram Klasifikasi Jenis-Jenis Pasir. (sumber : Geldart. 1991)

Klasifikasi jenis-jenis pasir menurut Geldart, yaitu :

a) *Group A*

Pasir yang dikategorikan dalam *group A* menurut Geldart biasanya memiliki massa jenis kurang dari $1400 kg/m^3$ dan memiliki ukuran berkisar antara 20 sampai

100 μm . Para peneliti telah menunjukkan dengan meyakinkan bahwa terdapat gaya antar partikel bahkan pada pasir seperti *cracking catalyst* yang menunjukkan pada kelompok ini. Hampan pasir pada kelompok ini sangat mengembang pada kecepatan udara antara U_{mf} dan kecepatan yang mana gelembung mulai terjadi, U_{mb} , karena pasir seperti itu sedikit kohesif. Pasir jenis ini memperlihatkan suatu peningkatan hampan (*bed*) nyata yang mengembang stabil ketika kecepatan fluidisasi minimum terlampaui dahulu, dan fluidisasi dapat terjaga seragam atau fluidisasi partikulat seperti itu bahkan sampai kecepatan fluidisasi minimum telah terlampaui dua sampai tiga kalinya. Tetapi, dengan memperbesar lagi kecepatan udara sampai pada suatu titik yang mana terjadinya hampan mengempis kembali sehingga pada keadaan kurang mengembang yang kira-kira pada tingkat mengembangnya hampan di bawah kondisi fluidisasi minimum dan kebanyakan udara berlebih akan mengalir melalui hampan seperti fase gelembung, yakni yang sering disebut dengan fluidisasi agregatif. Kecepatan udara pada saat yang mana hampan mengempis terjadi merupakan kecepatan minimum gelembung (*minimum bubbling velocity*, U_{mb}).

b) *Group B*

Pasir *group B* menurut Geldart cenderung untuk memiliki ukuran berkisar antara 40 sampai 500 μm dan massa jenis berkisar antara 1400 sampai 4000 kg/m^3 . Berkebalikan dengan pasir *group A*, gaya antar partikel diabaikan dan gelembung-gelembung mulai terbentuk pada kecepatan fluidisasi minimum atau sedikit lebih di atasnya. Berkembangnya hampan kecil dan hampan tersebut mengempis dengan sangat cepat ketika suplai udara dihentikan. Kebanyakan gelembung naik lebih cepat daripada kecepatan udara interstitial dan ukuran gelembung meningkat dengan keduanya yakni tinggi hampan dan kecepatan udara berlebih ($U - U_{mf}$). Pasir jenis ini memperlihatkan pengembangan hampan yang kurang stabil; gelembung (fluidisasi agregatif) terjadi pada kecepatan fluidisasi minimum atau sedikit lebih di atasnya. Gelembung cenderung berkembang sampai diameter gelembungnya terbatas oleh ukuran dari hampan (*bed*) pasir *group B*.

c) *Group C*

Pasir *group C* merupakan pasir yang ukuran rata-ratanya lebih kecil dibandingkan yang lainnya ($<30 \mu\text{m}$) dan atau massa jenis yang lebih kecil juga sehingga gaya-gaya antar partikel mempunyai pengaruh yang lebih besar daripada gaya gravitasi. Pasir jenis ini sangat sulit untuk terfluidisasi. Tidak mungkin terjadi pada pasir jenis ini yang mana besar penurunan tekanan sama dengan berat per unit luas. Hal ini menunjukkan bahwa peranan dari berat, bahkan jika hamparan menunjukkan sifat-sifat tampaknya seperti fluida, disokong oleh gaya antar partikel dan persinggungan permukaan partikel. Pada pasir jenis ini, *channelling* sangat mudah terjadi. Sekali hal ini terjadi, maka cenderung memperbesar jalurnya ketika meningkatkan kecepatan udara sehingga udara tidak terdistribusi dengan baik yang mana tidak pernah terjadi benar-benar fluidisasi.

d) *Group D*

Pasir *group D* biasanya memiliki ukuran lebih besar dari pada $600 \mu\text{m}$ dan atau massa jenis yang besar. Walaupun suatu hamparan fluidisasi gelembung (*bubbling fluidized bed*) terlihat sangat turbulen dan dapat digambarkan sebagai fluidisasi secara turbulen pada saat kecepatan fluidisasi yang lebih tinggi, kondisi aliran udara di dalam celah-celah pasir cenderung menjadi laminar. Pada pasir jenis ini, laju aliran udara interstitial yang diperlukan untuk fluidisasi lebih besar daripada kecepatan naiknya gelembung, sehingga aliran udara mengalir ke dasar gelembung dan keluar dari atasnya, yang memberikan suatu cara terjadinya perpindahan udara yang mana hal ini berbeda dengan yang diamati pada pasir *group A* atau *group B*. Kecepatan udara untuk fluidisasi pada pasir yang bermassa jenis besar itu tinggi dan proses *solid mixing* cenderung kurang baik.

Bila gas dilewatkan melalui lapisan hamparan partikel *group A*, *B*, atau *D*, gesekan (*friction*) menyebabkan terjadinya penurunan tekanan (*pressure drop*). Ketika kecepatan gas dinaikkan, penurunan tekanan meningkat sampai besar penurunan tekanan tersebut sama dengan berat hamparan (*bed*) dibagi dengan luas penampangnya. Kecepatan gas ini disebut kecepatan fluidisasi minimum, U_{mf} . Ketika

batas ini tercapai, hamparan partikel *group A* akan mengembang secara seragam sampai pada kecepatan gas yang lebih tinggi lagi akan terbentuk gelembung-gelembung (*bubbles*); kecepatan ini disebut kecepatan minimum gelembung, U_{mb} . Untuk partikel *group B* dan *group D* besar U_{mf} dan U_{mb} pada dasarnya sama. Partikel *group C* cenderung lebih kohesif dan ketika kecepatan gas dinaikkan lagi maka akan terbentuk semacam saluran atau rongga pada hamparan (*channelling*) dari distributor sampai permukaan hamparan. Jika *channelling* tidak terbentuk, maka seluruh hamparan akan terangkat seperti piston. Semua kelompok partikel pasir ini (*group A*, *B*, *C*, dan *D*) ketika kecepatan gas dinaikkan lagi, densitas hamparan akan berkurang dan tubulensi meningkat.

Pada pasir yang lebih halus dan kurang padat (*group A*), ukuran gelembung stabil maksimum jauh lebih kecil daripada pasir yang lebih kasar dan lebih padat (*group B*) sehingga distribusi ukuran gelembung yang stabil dapat dicapai pada hamparan (*bed*) berdiameter yang lebih kecil dengan pasir *group A* daripada *group B*. Karena gelembung yang lebih besar naik lebih cepat daripada gelembung yang lebih kecil, maka udara yang digunakan untuk proses penggelembungan akan lepas dari hamparan dengan lebih cepat saat ukuran gelembung rata-rata lebih besar, sehingga terdapat banyak variasi dalam pengembangan hamparan secara keseluruhan.

Tabel 2.5 *Increasing Size and Density*
(Sumber: Geldart, 1991)

Group	C	A	B	D	
Most obvious characteristic	Cohesive, difficult to fluidize	Bubble-free range of fluidization	Starts bubbling at U_{mf}	Coarse solids	
Property	Flour, cement	Cracking catalyst	Building sand, table salt	Crushed limestone coffee beans	
1. Bed expansion	Low when bed channel, can be high when fluidized	High	Moderate	Low	
2. Deaeration rate	Initially fast, exponential	Slow, linear	Fast	Fast	
3. Bubble Properties	No bubbles. Channels, and cracks	Splitting/recoalescence predominate; maximum size exist; large wake	No limit on size	No known upper size; small wake	
4. Solids mixing ^a	Very low	High	Moderate	Low	
5. Gas backmixing ^a	Very low	High	Moderate	Low	
6. Slug properties	Solids slug	Axisymmetric	Axisymmetric, asymmetric	Horizontal voids, solids slugs, wall slugs	
7. Spouting	No	No, except in very shallow beds	Shallow beds only	Yes, even in deep beds	
Effect on properties 1 to 7 of:	Mean particle size within group	Cohesiveness increases as ϕ_p decreases	Properties improve as size decreases	Properties improve as size decreases	Not known
	Particle size distribution ^b	Not known	Increasing $<45 \mu\text{m}$ fraction improves properties	None	Increases segregation
	Increasing pressure, temperature, viscosity, density of gas	Probably improves	Definitely improves	Uncertain, some possibly	Uncertain, some possibly

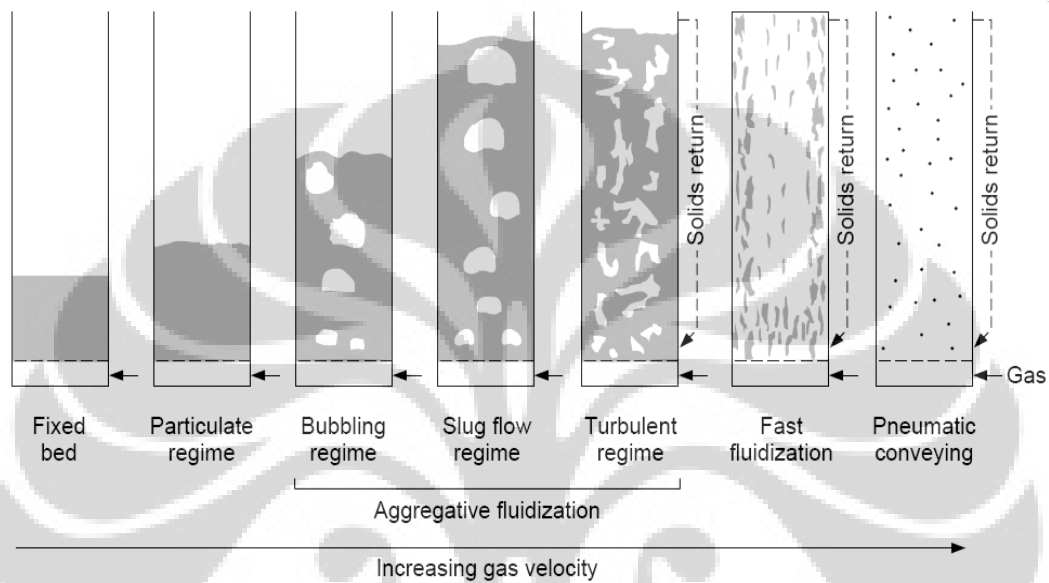
^a At equal $U-U_{mf}$.

^b At equal ϕ_p .

2.5.4.9 Daerah batas fluidisasi (fluidization regimes)

Pada kecepatan gas rendah, suatu padatan dalam tabung hamparan fluidisasi akan berada dalam keadaan konstan atau tetap. Seiring dengan bertambahnya kecepatan gas, gaya seret mengimbangi berat hamparannya sehingga hamparan secara menyeluruh ditopang oleh aliran gas tersebut. Pada fluidisasi minimum, hamparan memperlihatkan pergerakan yang minimal dan hamparan tersebut akan sedikit mengembang. Begitu seterusnya hamparan akan mengembang saat kecepatan aliran gas dinaikkan pula dan mengalami daerah batas fluidisasi dari *fixed bed* sampai *pneumatic conveying*. Untuk daerah batas fluidisasi turbulenta dan di atasnya

beroperasi di atas kecepatan terminal dari beberapa atau bahkan semua partikel, maka pengembalian kembali partikel (*solids return*) adalah perlu untuk mempertahankan hamparan. Cara setiap daerah batas fluidisasi tampil berbeda-beda menurut kecepatan aliran gas (gambar 3.5).



Gambar 2.24 Daerah batas fluidisasi (sumber: Grace, 1986)

BAB 3

PERSIAPAN DAN PROSEDUR PENGUJIAN

Sebelum dilakukan pengoperasian pada *fluidized bed combustor* UI tersebut secara baik dan benar, maka perlu dilakukan pengujian alat ini secara keseluruhan. Dalam melakukan suatu pengujian pada alat, maka diperlukan persiapan dan prosedur pengujian yang sesuai dengan kondisi dari alat tersebut. Hal ini dimaksudkan agar dalam melakukan proses operasional saat pengujian menjadi lebih efektif, efisien, dan mendapatkan hasil yang semaksimal mungkin.

Demikian juga dengan persiapan yang harus dilakukan sebelum dilakukan pengujian alat FBC yang ada di Universitas Indonesia ini. Agar persiapan dan proses operasi pengambilan data berlangsung dengan baik dan benar, maka diberikan juga SOP (*standard operational procedure*) pada setiap alat, komponen, dan instrumen yang ada di FBC UI. Sedangkan untuk pengujian yang dilakukan meliputi pengujian karakteristik sistem feeder yang sudah ada dan juga karakteristik pembakaran terfluidisasi menggunakan bahan bakar biomassa (ranting pohon).

3.1 PERSIAPAN PENGUJIAN

3.1.1 Bahan Bakar Biomassa

Di Indonesia sekarang ini mempunyai potensi yang cukup luas pada sumber energi biomasanya, antara lain seperti kayu, dedaunan, pepohonan, biji-bijian, sekam padi, cangkang kelapa, kapas, dan ranting. Untuk pengujian saat ini, jenis bahan bakar biomassa yang digunakan ialah ranting pohon. Alasan menggunakan biomassa jenis ini ialah karena selain mudah didapat dan banyak sumbernya, tetapi juga lokasi untuk mengumpulkannya lebih banyak dan lebih dekat di kawasan UI, seperti di daerah hutan dekat lab FBC.

3.1.1.1 Ranting Pohon

Ranting pohon yang digunakan disini ialah jenis ranting pohon akasia (*acacia auriculiformis*). Jenis ranting pohon ini cukup banyak terdapat di kawasan hutan Universitas Indonesia terutama di area hutan dekat lab FBC itu sendiri. Untuk melakukan pengujian pada sistem feeder, ranting pohon ini juga dibedakan menjadi dua jenis berdasarkan dimensi partikelnya atau yang disebut juga d_p . Pembagiannya yaitu :

- Partikel kecil (d_{p1}) : panjang = 10 – 20 mm
diameter = 3 – 5 mm
- Partikel besar (d_{p2}) : panjang = 10 – 20 mm
diameter = 10 – 12 mm



Gambar 3.1 Perbandingan Ranting Pohon Partikel Besar dan Kecil

Untuk mendapatkan dua variasi partikel ranting pohon tersebut juga dilakukan beberapa tahap persiapan, yaitu pengumpulan dari kawasan hutan UI dan juga pemotongan menjadi panjang yang diinginkan, karena ranting awal yang didapat masih sangat panjang untuk digunakan dalam percobaan. Pemisahan ranting juga dilakukan pada saat pemotongan sehingga didapat sejumlah ranting pohon partikel kecil dan besar. Akan tetapi, untuk pengujian pembakaran setelahnya, yang digunakan ialah yang partikel kecil, karena lebih mudah terbakar dan persediaannya lebih banyak dari yang besar.



Gambar 3.2 Ranting Pohon Sebelum Dilakukan Pemotongan

Untuk pengujian pembakaran jenis bahan bakar tersebut, telah dipersiapkan sejumlah massa yang akan dijadikan sebagai variasi dari *feed rate* bahan bakar yang akan dimasukkan ke dalam reaktor, yaitu : 1 kg, 2 kg, 3 kg, dan 4 kg ranting pohon.

3.1.2 Pasir

Pasir yang digunakan akan sangat berpengaruh terhadap berhasil tidaknya proses fluidisasi dan pembakaran yang akan dilakukan. Dalam menentukan jenis pasir yang akan digunakan pada alat FBC UI ini sebaiknya menggunakan pasir silika atau pasir kuarsa untuk tujuan mendapatkan fluidisasi yang baik dengan densitas partikelnya sebesar 2600 kg/m^3 . Pasir silika dan pasir kuarsa juga memiliki nilai *specific heat* (kalor jenis) yang kecil sehingga sangat baik dalam menyimpan kalor. Karena semakin kecil nilai *specific heat* suatu material maka akan semakin mudah untuk menaikkan temperatur material tersebut. Dengan massa dan besar kenaikan temperatur yang sama, dua material yang berbeda dengan nilai kalor jenis yang jauh berbeda akan memiliki besar jumlah kalor yang jauh berbeda pula yang dibutuhkan untuk menaikkan temperaturnya.

Sebagai perbandingan nilai *specific heat* untuk substansi- substansi yang lain dapat dilihat pada tabel 3.1. Pasir silika memiliki titik lebur yang tinggi sampai mencapai temperatur sekitar $1800 \text{ }^\circ\text{C}$ sehingga sangat cocok digunakan untuk aplikasi *fluidized bed combustor* yang *range* operasinya berada pada temperatur tinggi. Sifat fisik, termal dan mekanik pasir silika dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.1 *Specific Heat* Berbagai Substansi (Sumber : <http://apollo.lsc.vsc.edu/>)

<i>Substansi</i>	<i>Specific Heat</i> (<i>cal/gram.°C</i>)	<i>Specific Heat</i> (<i>J/kg.°C</i>)
air (murni)	1,00	4186
lumpur basah	0,60	2512
es ($0 \text{ }^\circ\text{C}$)	0,50	2093

lempung berpasir	0,33	1381
udara kering (permukaan laut)	0,24	1005
pasir silika	0,20	838
pasir kuarsa	0,19	795
granit	0,19	794

Tabel 3.2 Sifat Fisik, Termal, dan Mekanik Pasir Silika (sumber: <http://www.azom.com/>)

<i>Properties</i>	<i>Silica Sand</i>
<i>Particle density (kg/m³)</i>	2600
<i>Bulk density (kg/m³)</i>	1300
<i>Thermal conductivity (Wm⁻¹K)</i>	1.3
<i>Tensile strength (MPa)</i>	55
<i>Compressive strength (MPa)</i>	2070
<i>Melting point (°C)</i>	1830
<i>Modulus of elasticity (GPa)</i>	70
<i>Thermal shock resistance</i>	<i>Excellent</i>

Kemudian setelah memilih jenis pasir yang digunakan, maka ditentukan ukuran diameter partikel pasir yang digunakan pada FBC UI. Jenis pasir yang digunakan sudah pasti antara pasir silika dan pasir kuarsa. Menurut pengklasifikasian

partikel pasir oleh *Geldart* seperti yang telah dijelaskan pada bab dua, maka jenis partikel pasir tersebut terkelompok dalam *group B* dan *group D*. Namun partikel pasir dalam *group D* membutuhkan kecepatan fluidisasi yang besar sehingga sangat sulit untuk pencampuran yang baik dibandingkan *group A* dan *group B*. Dengan demikian partikel pasir yang paling baik digunakan untuk aplikasi *fluidized bed combustor* ini adalah partikel pasir *group B* dengan ukuran diameter partikel pasir yang paling baik untuk tujuan fluidisasi berkisar antara 300 μm sampai 500 μm .

Pasir yang terpilih tersebut kemudian diperoleh dengan melakukan pengayakan bertingkat. Ayakan (*sieve*) bertingkat digunakan untuk melakukan pengamatan terhadap nomor kehalusan butiran (*grain fineness number*), dan dapat dilihat seperti pada tabel 3.3 yang mana terdapat ukuran lubang ayakan (*mesh*) menurut standar di Amerika. Berdasarkan tabel tersebut maka partikel pasir yang berkisar antara 300 μm sampai 500 μm adalah partikel pasir dengan ukuran diameter partikel pasir antara *mesh 35* sampai *mesh 50*.

Tabel 3.3 Distribusi Ukuran Pengayakan Pasir Silika
(sumber: AGSCO silica sand technical data sheet)

Sieve Size		Individual Percent Retained				
US	μm	16-30	20-40	30-50	40-70	50-80
16	1180	1.4				
20	850	35.7	2.3			
25	725	58	19.7	2.3		
30	600	4.7	28	10.4	0.3	
35	500	0.2	30.3	17.1	5.2	

40	425		15.8	31.9	16.5	2.7
50	300		3.6	29.2	37	39.3
60	250		0.3	4.7	14.2	23.8
70	212			2.3	9.3	16.2
80	180			2.1	5.5	9.1
100	150				7.2	5.4
120	125				4.8	3.5

Oleh karena itu, digunakanlah pasir silika dengan ukuran mesh 30-50, karena bila menggunakan pasir silika dengan ukuran mesh 20-40 masih terlalu besar dari yang diinginkan dan bila menggunakan pasir silika dengan ukuran mesh 40-70 akan terlalu halus.



Gambar 3.3 Pasir Silika Mesh 30-50 yang Digunakan pada FBC UI

Beberapa keterangan yang harus diperhatikan ialah spesifikasi kondisi dari hampan pasirnya, yaitu :

- massa jenis partikel pasir (ρ_p) = 2600 kg/m^3
- massa jenis borongan pasir (ρ_b) = 1300 kg/m^3
- diameter hampan pasir (d_b) = $63,5 \text{ cm} = 0,635 \text{ m}$
- tinggi hampan pasir (*bed height*) = $15 \text{ cm} = 0,15 \text{ m}$

3.1.3 Perlengkapan dan Peralatan

Selain bahan bakar biomassa dan juga pasir, ada beberapa perlengkapan dan peralatan yang digunakan untuk berlangsungnya pengujian dan pengambilan data yang baik dan benar, yaitu :

1. *Generator Set*

Generator set (genset) ini digunakan sebagai satu-satunya sumber tegangan untuk pengoperasian seluruh alat FBC ini, dan dapat memberikan daya listrik sebesar 4 kVA.



Gambar 3.4 Generator Set yang Digunakan

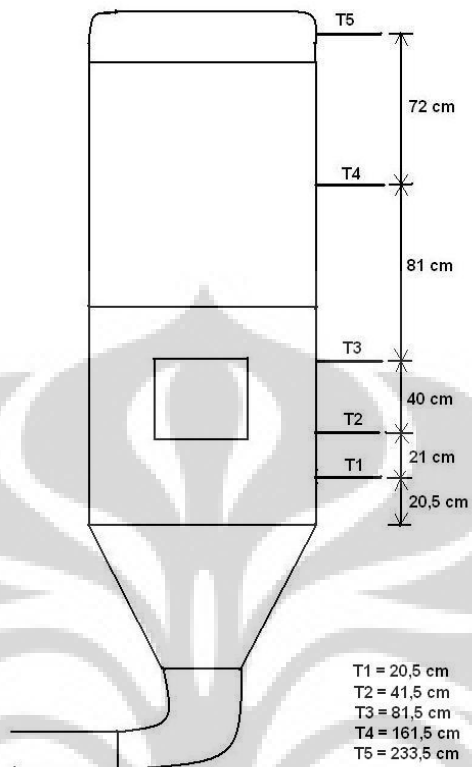
Berikut ini spesifikasi dari genset dengan merk Starke GFH 6900 LXE tersebut :

- *rated voltage* : 220 V
- *rated frequency* : 50 Hz
- *peak power* : 4 kVA
- *rated power* : 3,5 kVA
- *power factor* : 1,0
- *fuel consumption* : 2 litre / hour (bensin)

2. Termokopel

Jenis termokopel yang digunakan disini ialah termokopel tipe K. Lima termokopel yang ada sebelumnya sudah dikalibrasi oleh mahasiswa peneliti untuk keperluan skripsi di lab gasifikasi. Termokopel itu dimasukkan satu persatu pada reaktor FBC dengan konfigurasi ketinggian yang berbeda-beda diukur dari batas tengah distributor FBC yang ada (T1 paling dekat dengan hamparan pasir dan T5 paling jauh dari hamparan pasir), yaitu :

- T1 = 20,5 cm = 0,205 m
- T2 = 41,5 cm = 0,415 m
- T3 = 80,5 cm = 0,805 m
- T4 = 161,5 cm = 1,615 m
- T5 = 233,5 cm = 2,335 m



Gambar 3.5 Ketinggian Termokopel



Gambar 3.6 Konfigurasi Termokopel (a). T1 - T3, dan (b). T4 - T5

3. *Temperature Data Logger*

Untuk mendapatkan data-data keluaran dari distribusi temperaturnya digunakan *temperature data logger* sebagai pengkonversi suhu dari analog ke digital yang kemudian akan ditampilkan pada *display* yang ada.



Gambar 3.7 *Temperature Data Logger*

4. *Digital Tachometer*

Pada saat pengambilan data putaran *screw feeder* yang ada ataupun juga saat pengambilan data putaran dari *blower*, meskipun sudah dapat dilihat berapa putarannya pada *display* atau tampilan pada *control panel* yang ada, tetapi harus dilakukan pengukuran juga menggunakan *tachometer* digital agar putaran sebenarnya dapat diketahui (dilakukan kalibrasi).



Gambar 3.8 Tachometer Digital

5. Timbangan (*weight scale*)

Timbangan disini digunakan untuk mengukur massa dari bahan bakar baik cangkang kelapa ataupun ranting pohon yang keluar dari feeder saat pengambilan data dan untuk mengukur massa bahan bakar yang akan masuk ke ruang bakar.



Gambar 3.9 Timbangan dengan Skala Maksimum 2 kg

6. Control Panel

Panel kontrol ini berfungsi sebagai pengontrol dan pengatur dari putaran motor feeder dan putaran blower yang akan dioperasikan. Pada panel kontrol ini terdapat dua *inverter* yang memiliki *switch* masing-masing. *Inverter* atau yang dikenal juga sebagai *variable-frequency drives* merupakan alat untuk pengontrol kecepatan yang akurat dan pengontrol putaran dari motor tiga fase. *Inverter* bekerja dengan merubah sumber tegangan menjadi DC dan merubah DC menjadi sumber listrik tiga fase yang sesuai untuk motor. *Inverter* yang digunakan bermerk Toshiba dan LG. Spesifikasinya untuk listrik AC 200 – 230 V dan untuk daya motor sampai 5,4 hp.



Gambar 3.10 *Control panel* yang Digunakan untuk Feeder dan Blower

7. Anemometer

Alat *anemometer* ini berfungsi untuk mengetahui jumlah debit atau laju aliran udara yang dihasilkan oleh blower per satuan waktu, karena tampilan di panel kontrol

yang ada tidak dapat melakukan pembacaan, sehingga digunakan alat ini untuk mengetahui hubungan putaran dengan laju alirannya untuk dibuat grafik karakteristik blowernya.



Gambar 3.11 Anemometer

3.2 STANDAR OPERASI ALAT PENGUJIAN

3.2.1 Sistem Feeder

Sistem feeder ini berfungsi untuk memasukkan bahan bakar ke dalam ruang bakar secara konstan dan terus-menerus. Mekanisme yang digunakan ialah jenis *screw feeder* yang digerakkan oleh sebuah motor listrik yang menggunakan *gear reducer* dan dua buah *sprocket* yang dihubungkan dengan rantai. Feeder ini memiliki *hopper* dan konfigurasi yang horizontal dan kemudian ada kemiringan ke bawah agar bahan bakar dapat turun masuk ke dalam reaktor.



Gambar 3.12 Sistem Feeder pada *Fluidized Bed Combustor* UI

Berikut ini beberapa spesifikasi pada sistem feeder tersebut :

- CHENTA 3 *phase induction motor type* CT 80-4B5 :

Tabel 3.4 Spesifikasi Motor Feeder

HP	kW	V	A	Freq.
1	0,75	220	3,18	50

- CHENTA *gear speed reducer type* MHFI :
 - *Size* : 37
 - *Ratio* : 30
- *Rasio sprocket* :
 - jumlah gigi pada motor = 16
 - jumlah gigi pada *screw feeder* = 24

Untuk dapat mengoperasikan sistem feeder dengan baik dan benar, maka harus diketahui urutan tahap-tahap yang harus dilakukan, yaitu :

1. Pastikan bahwa kabel motor feeder sudah terhubung dengan tepat ke panel kontrol untuk feeder, sambungkan setiap kabel sesuai dengan warnanya.
2. Sambungkan konektor dari panel kontrol ke generator set untuk mendapatkan sumber tegangan, kemudian nyalakan genset.
3. Lalu aktifkan *switch* utama dan *circuit breaker* nya dengan menekan ke arah atas, lampu di pintu panel akan menyala.
4. Tekan *switch* berwarna hitam sebelah kiri ke arah bawah agar *inverter* motor feeder menyala.
5. Putar pengendali putaran motor feeder sesuai yang diinginkan (rpm maksimum 50 rpm).
6. Jika sudah selesai dan ingin mematikan feeder, maka putar kembali pengendalinya ke nol lagi, dan matikan semua *switch* pada panel kontrol.

3.2.2 Blower

Blower digunakan sebagai alat untuk mensuplai udara yang dibutuhkan agar terjadi proses fluidisasi dan juga terjadinya reaksi pembakaran secara terus menerus selama pengoperasian alat berlangsung. Blower tersebut berfungsi untuk mengalirkan udara ke reaktor dengan debit tertentu sehingga pasir silika yang ditopang dengan plat distributor tersebut terfluidisasi. Blower harus dapat memberikan aliran udara dengan kecepatan aliran yang mencukupi sehingga terjadi fluidisasi, dan sebagai tolok ukurnya dapat dilihat dari kecepatan fluidisasi minimum. Selain harus dapat mengalirkan udara dengan kecepatan udara setidaknya sebesar kecepatan fluidisasi minimumnya, blower harus juga dapat memberikan cukup tekanan yang lebih besar dari pada nilai *pressure drop* (penurunan tekanan) yang melewati hamparan pasir.



Gambar 3.13 Ring Blower pada Fluidized Bed Combustor UI

Spesifikasi dari blower yang ada dapat dilihat berikut ini :

Tabel 3.5. Spesifikasi Teknis Ring Blower

<i>Phase</i>	3 Ø
<i>Frequency (Hz)</i>	50 / 60
<i>Power (kW)</i>	2,2
<i>Voltage (V)</i>	220
<i>Current (A)</i>	8
<i>Pressure (max) (mm H₂O)</i>	2800
<i>Air Flow (max) (m³/min)</i>	6,2
<i>Inlet / Outlet Pipe</i>	2"
<i>Weight (kg)</i>	35

Untuk prosedur penggunaan *ring blower* tersebut, dapat dilakukan dengan mengikuti tahap-tahap berikut ini :

1. Pastikan bahwa kabel dari blower sudah terhubung dengan tepat ke panel kontrol untuk blower, sambungkan setiap kabel sesuai dengan warnanya.
2. Sambungkan konektor dari panel kontrol ke generator set untuk mendapatkan sumber tegangan, kemudian nyalakan genset.
3. Lalu aktifkan *switch* utama dan *circuit breaker* nya dengan menekan ke arah atas, lampu di pintu panel akan menyala.
4. Tekan *switch* berwarna hitam sebelah kanan ke arah bawah agar *inverter* blower menyala.
5. Tekan tombol atas ataupun bawah untuk mencari set untuk putaran (rpm), lalu tekan tombol *enter* di tengah.
6. Tekan tombol di pintu panel sebelah kanan agar menyala hijau, kemudian atur besarnya rpm yang diinginkan dengan memutar-mutar pengendali blower yang ada di pintu panel di atas tombol berwarna hijau tersebut.
7. Jika sudah selesai dan ingin mematikan blower, putar pengendali ke nol lagi dan matikan semua *switch* pada panel kontrol.

3.2.3 Sistem Burner

Burner yang dipakai di *fluidized bed combustor* UI saat ini ialah jenis *hi-temp premixed burner* yang berfungsi sebagai alat pemberi kalor atau pemanas untuk menaikkan temperatur pasir saat melakukan *start up* awal pengujian pembakaran. Akan tetapi, setelah mencapai suhu yang cukup tinggi di ruang bakar, maka burner dapat dimatikan. Untuk dapat melakukan pengoperasian burner ini dengan baik maka perlu diketahui urutan langkah-langkah yang dilakukan dalam penyalaan dan mematikan *hi-temp premixed burner* ini. Prosedur mengoperasikan burner ini adalah sebagai berikut :

1. Buka *ball valve* utama gas masuk.
2. Cek tekanan kerja gas adalah 20~30 mbar (200 ~ 300 mm H₂O).
3. Putar saklar *burner control* ke posisi on untuk mengaktifkan *burner control* untuk bekerja. Pada tahap awal *burner control* melakukan pengecekan status awal apakah ada tekanan udara palsu dan apakah ada api yang terdeteksi *UV sensor*. Bila ada gejala ini maka indikator burner *misfire* dan lampu merah reset akan menyala.
4. Kemudian blower akan berputar untuk menghasilkan tekanan yang stabil. Apabila tekanan blower di bawah nilai setting dari *air pressure switch* maka sistem akan di *cut-off* dan indikator *cut-off* akan menyala.
5. Setelah 10 detik proses *pre-purge*, yang berguna untuk mengusir gas yang terperangkap (bila ada), maka *solenoid valve* untuk gas akan membuka. Pada saat bersamaan *ignition trafo* bekerja untuk membentuk spark listrik pada elektroda busi. Pertemuan campuran udara dan gas dengan percikan listrik akan menghasilkan nyala api. Stel besarnya volume gas untuk api pilot dengan memutar *needle valve* sampai api menyala konsisten.
6. *UV sensor* akan mendeteksi nyala api dan mengirim sinyal ke *burner control*. *Burner control* akan tetap membuka *solenoid valve* sehingga api tetap menyala. Tapi bila pembacaan *UV sensor* kurang maka sistem akan di *cut-off* menjadi *misfire*. Perhatikan pada lampu indikator *cut-off*, apa penyebabnya segera ditangani. Ulangi urutan proses (*sequence*) dari awal dengan menekan tombol reset atau memutar saklar *burner control* ke posisi *off*.
7. Setelah nyala api terbentuk dapat dilakukan penyetelan untuk mendapat mutu nyala api yang bagus dan panjang api yang diinginkan.
8. Jika ingin mematikan burner, putar saklar burner ke posisi *off* dan pastikan bahwa api burner sudah mati semua.
9. Tutup *ball valve* utama gas masuk dan tutup katup utama pada tabung gas LPG.

Penyetelan *hi-temp premixed burner* juga perlu dilakukan untuk dapat mengatur mutu nyala api dan panjang nyala api yang diinginkan. Mekanisme penyetelan burner adalah seperti berikut ini :

- *Penyetelan mutu api :*

- a. Stel volume gas yang mengalir:

Putar bagian knop *needle valve*:

- Searah jarum jam : *flow* gas berkurang (-), api berubah menjadi lebih merah.
- Berlawanan jarum jam : *flow* gas bertambah (+), api menjadi lebih ke biru.

- b. Stel manual *air damper* pada posisi buka setengah yaitu skala nomor 3 pada *damper*. Posisi ini bisa diatur lebih lanjut, untuk mendapatkan komposisi udara dan gas yang tepat untuk membentuk mutu nyala api yang bagus. Kencangkan baut pengunci supaya posisi stel *damper* tidak berubah.

- *Penyetelan panjang api :*

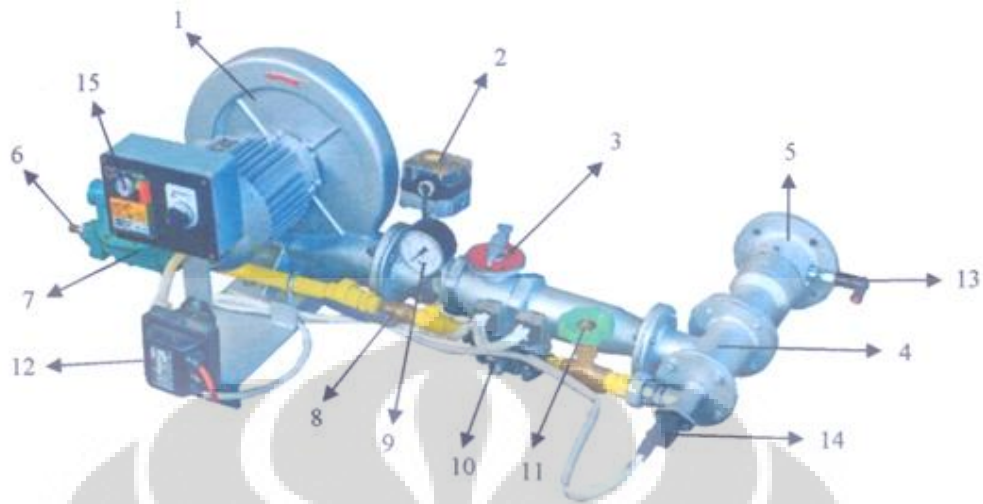
- a. Stel *gas regulator* sehingga tekanan kerja antara 20~30 *mbar* (200~300 *mmH₂O*).

- b. Buka tutup dan putar penyetel :

- Searah jarum jam : tekanan gas bertambah (+), panjang api berubah menjadi lebih panjang.
- Berlawanan jarum jam : tekanan gs berkurang (-), api menjadi lebih pendek.

- c. Selanjutnya stel kembali *damper* udara untuk mendapatkan mutu nyala api yang bagus.

Berikut ini diperlihatkan komponen-komponen dari burner dan spesifikasi teknisnya :



Gambar 3.14 Bagian-bagian *Hi-Temp Premixed Burner*

- Keterangan :
- | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| 1. <i>Blower</i> | 9. <i>Gas pressure gauge</i> |
| 2. <i>Air pressure switch</i> | 10. <i>Combination solenoid valve</i> |
| 3. <i>Air damper</i> | 11. <i>Gas needle valve</i> |
| 4. <i>Premixer</i> | 12. <i>Ignition trafo</i> |
| 5. <i>Head burner</i> | 13. <i>Spark plug</i> |
| 6. <i>Gas inlet</i> | 14. <i>UV sensor</i> |
| 7. <i>Gas second regulator</i> | 15. <i>Burner control</i> |
| 8. <i>Gas main valve</i> | |

Tabel 3.6 Spesifikasi Teknis *Hi-Temp Premixed Burner*

Burner	Kapasitas	75000 <i>kcal/jam</i>
	Bahan Bakar	LPG atau LNG
Tekanan Gas Masuk	LPG	0,69 <i>bar</i> maks
	LNG	1 <i>bar</i> maks
Konsumsi Bahan Bakar	LPG	3,5 m^3/jam maks
	LNG	8 m^3/jam maks
Blower	Tekanan Statik	200-300 mmH_2O
	Debit Aliran	2,5 m^3/min
Sumber Daya	Sistem Burner	220 V; 0,75 kW

3.3 PROSEDUR PENGUJIAN PEMBAKARAN

Pengujian pembakaran dengan bahan bakar biomassa (ranting pohon akasia) yang dilakukan ini bertujuan untuk mendapatkan karakteristik distribusi panas serta daya panas yang dihasilkan pada alat *fluidized bed combustor* UI ini dengan melihat hubungan-hubungan antara temperatur di setiap titik termokopel tiap satuan waktu, ketinggian termokopel, variasi *feed rate* dari feeder, variasi *flow rate* udara dari blower, serta lamanya waktu yang dibutuhkan untuk melakukan sebuah pengujian ini sampai selesai. Pengujian ini keseluruhan meliputi pengujian *feed rate*, pengujian karakteristik blower, dan pengujian pembakaran biomassa. Pengujian pembakaran ini membutuhkan metode yang optimal untuk mendapatkan hasil yang baik.

3.3.1 Rangkaian Alat Pengujian

Untuk dapat melakukan pengujian dengan baik dan benar, maka harus diperhatikan juga bagaimana rangkaian alat eksperimen tersebut disusun secara keseluruhan (*Overall setup*). Penjelasannya adalah sebagai berikut :

- Panel kontrol dihubungkan ke generator set untuk mendapatkan sumber tegangan yang cukup.
- Sistem feeder terhubung ke panel kontrol agar dapat diatur putarannya.
- Blower juga terhubung ke panel kontrol agar dapat diatur putarannya.
- Burner terhubung ke generator set agar dapat memutar blower burner dan menyalakan busi.
- Blower dihubungkan ke area di bawah distributor dan pasir (area *plenum*) menggunakan selang besar untuk mengalirkan udara.
- Termokopel terletak di lima titik ketinggian pada ruang bakar dan *freeboard area* (area di atas pasir) dengan ketinggian yang sudah disebutkan di sub bab persiapan sebelumnya.
- Termokopel terhubung ke *temperature data logger*, dan *data logger* juga terhubung ke generator set untuk dapat membaca nilai suhunya di setiap termokopel.
- Untuk posisi masing-masing alat diletakkan dengan sebaik mungkin, sehingga tidak ada kabel yang tertekan, terikat, ataupun tertarik. Dan juga panel kontrol diletakkan dengan sebaik mungkin agar dapat dengan mudah melakukan pengaturan.



Gambar 3.15 Rangkaian Seluruh Alat untuk Melakukan Pengujian Pembakaran

3.3.2 Prosedur Pengambilan Data Pembakaran

Dalam melakukan pengujian pembakaran dan pengambilan data untuk *fluidized bed combustor* UI ini harus dilakukan dengan metode yang optimal, sehingga hasil atau data-data yang didapat menjadi lebih akurat dan benar. Keseluruhan langkah-langkah yang dilakukan dari awal setelah persiapan dan sebelum pengambilan data sampai setelah pengambilan data akan dijelaskan berikut ini.

3.3.2.1 Prosedur pemanasan awal pembakaran

1. Pastikan semua persiapan, rangkaian dan posisi alat sudah dilakukan dengan benar sesuai dengan yang sudah disebutkan sebelumnya.

2. Menyalakan blower sebagai penyedia udara saat menyalakan burner dan saat proses pembakaran berlangsung, selain itu juga untuk proses fluidisasi pasir agar panasnya tersebar merata di seluruh pasir. Digunakan dua *flow rate* udara yang berbeda (jika dilihat putarannya, yang pertama ialah 3000 rpm).
3. Menyalakan burner untuk memanaskan *bed* (pasir) hingga *bed temperature* mencapai suhu sekitar 380 – 430 °C.
4. Setelah itu memasukkan *solid fuel* yang dapat berupa cangkang kelapa ataupun ranting pohon tetapi yang partikel besar saja ke dalam ruang bakar dengan *feed rate* 1 kg per menit sampai *bed temperature* mencapai suhu sekitar 750 – 800 °C. Rata-rata waktu yang dibutuhkan sekitar 8 – 10 menit dan temperatur pada *data logger* dicatat setiap menitnya.
5. Kemudian burner dimatikan secara perlahan dan temperatur bed akan perlahan menurun dan ditunggu hingga suhunya stabil (kondisi *steady*) berada diantara 700 – 750 °C. Pada temperatur ini bahan bakar cangkang kelapa maupun ranting pohon sudah dapat terbakar dengan sendirinya (*self-sustained combustion*). Rata-rata waktu yang dibutuhkan sekitar 7 – 8 menit dan temperatur juga dicatat setiap menitnya.

3.3.2.2 Prosedur pengambilan data pembakaran

1. Setelah mencapai temperatur stabil tersebut, bahan bakar yang sudah disiapkan dengan sejumlah massa tertentu (1 kg, 2 kg, 3 kg, dan 4 kg) dimasukkan ke dalam feeder melalui *hopper* dan feeder dijalankan dengan putaran yang tidak terlalu rendah dan tidak terlalu tinggi.
2. Dimulai dari massa 1 kg, lalu mengamati perubahan temperatur yang terjadi dan dicatat setiap menitnya. Pada awalnya temperatur akan menurun kemudian naik lagi dan akhirnya saat bahan bakar habis terbakar, dimasukkan massa yang 2 kg melalui feeder dengan putaran yang sama, perubahan

temperatur setiap menitnya juga dicatat, dan begitu seterusnya sampai massa 4 kg.

3. Setelah semua bahan bakar tersebut dimasukkan, perubahan temperaturnya terus dicatat setiap menitnya sampai pada akhirnya suhu di ruang bakar turun terus-menerus secara perlahan karena sudah tidak dimasukkan bahan bakar lagi. Saat temperatur sudah cukup rendah sekitar 500 – 550 °C, maka tidak dicatat lagi perubahannya.
4. Kemudian, setelah suhu ruang bakar mencapai suhu ambien, langkah pemanasan awal 1-5 dan pengambilan data 1-3 diatas diulang kembali tetapi dengan *flow rate* udara yang berbeda (jika dilihat putarannya, yang kedua ialah 3250 rpm).

3.3.2 Prosedur Pengambilan Data Feed Rate

Untuk pengambilan data *feed rate* atau laju aliran massa bahan bakar dari sistem feeder yang ada pada *fluidized bed combustor* UI ini, alat-alat yang dibutuhkan antara lain generator set, feeder, panel kontrol, *stopwatch*, dan timbangan. Langkah-langkah pengambilan data karakteristik feeder ini dijelaskan sebagai berikut:

1. Pastikan bahwa bahan bakar ranting pohon sudah disiapkan semuanya dan feeder sudah terhubung dengan panel kontrol yang terhubung ke genset yang ada. Bagian keluaran dari feeder juga harus dibuka agar bahan bakar nanti dapat keluar kebawah dan tidak masuk ke dalam reaktor karena ingin diukur massanya.
2. Masukkan bahan bakar biomassa tersebut (mulai dari partikel kecil) ke dalam feeder melalui *hopper* sampai memenuhi seluruh isi *hopper*, tetapi tidak terlalu penuh. Karena dengan demikian, semua ruangan pada *screw feeder* akan terisi dengan bahan bakar tanpa ada ruang yang kosong.
3. Jalankan *screw feeder* dengan memutar pengendalinya pada panel kontrol. Untuk pertama kali, harus diputar pelan-pelan sampai *motor feeder* itu dapat

berputar dan mampu mendorong bahan bakar sampai keluar feeder. Putaran saat itu disebut sebagai putaran awal dari partikel kecil ranting pohon. Feeder dijalankan selama satu menit lalu dihentikan.

4. Selanjutnya ukur massanya menggunakan timbangan yang tersedia dan kemudian dijumlahkan. Sehingga didapat *feed rate* berapa kilogram per satu menit dan dapat dirubah menjadi satuan kg/s.
5. Setelah itu, semua bahan bakar dimasukkan lagi ke dalam feeder melalui *hopper* untuk mengulangi langkah 1-4, tetapi dengan putaran yang berbeda, yaitu ditambah 2 rpm untuk setiap satu menit pengambilan datanya. Sehingga akan diperoleh nilai *feed rate* di setiap putarannya. Data yang diambil sekitar 10 putaran feeder dan untuk ukuran partikel kecil akan lebih dari 10 putaran karena putaran awalnya lebih kecil dari partikel besar.
6. Ulangi lagi langkah 1-5 untuk ukuran partikel yang berbeda.

3.3.3 Prosedur Pengambilan Data Karakteristik Blower

Pengambilan data untuk karakteristik blower ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan antara besarnya putaran blower dengan laju aliran udara yang dihasilkan oleh blower pada putaran tersebut. Alat-alat yang diperlukan antara lain blower, panel kontrol, generator set, dan sebuah anemometer. Langkah-langkahnya disebutkan berikut ini :

1. Pastikan bahwa blower sudah terhubung dengan panel kontrol dan juga ke genset.
2. Blower dinyalakan mulai dari putaran 100 rpm, dan secara bertahap naik ke 200 rpm, 300 rpm, dan seterusnya sampai 3600 rpm (putaran maksimum).
3. Saat blower dinyalakan dengan berbagai putaran tersebut, maka anemometer yang ada didekatkan ke bagian keluaran dari pipa *output* blower agar kipasnya berputar dan dapat terbaca angka laju alirannya dalam satuan meter kubik per menit (m^3 /menit) di tiap putaran blower. Untuk dapat terbaca langsung laju

udaranya, maka diketahui dahulu luas area penampang pipa keluaranya dan kemudian dikalikan dengan kecepatannya. Luas penampang areanya adalah $0,00237 \text{ m}^2$.

4. Data yang terbaca masih berupa satuan m^3/menit pada anemometer sehingga harus dikonversi lagi menjadi satuan liter per menit.



BAB 4

HASIL DAN ANALISA

4.1 HASIL

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah untuk mengetahui sifat dan karakteristik pada berbagai jenis sistem yang terdapat pada *fluidized bed combustor* UI, seperti karakteristik sistem feeder, karakteristik blower, dan juga uji karakteristik pembakaran dengan menggunakan dua macam bahan bakar biomassa, yaitu cangkang kelapa dan ranting pohon. Mengenai prosedur persiapan, perlengkapan alat-alat maupun tahapan pengambilan datanya sudah dibahas pada bab tiga. Sedangkan pada bab ini akan diperlihatkan data hasil pengujian beserta hasil pengolahannya. Data yang didapat akan di plot dalam bentuk grafik yang kemudian akan dianalisa dan dibahas lebih lanjut.

4.1.1 Karakteristik Sistem Feeder

Pengujian yang dilakukan pada sistem *feeder* di *fluidized bed combustor* UI ini bertujuan untuk mengetahui hubungan antara besar putaran dari *screw feeder* dengan besarnya laju aliran massa bahan bakar biomassa yang digunakan. Dalam hal ini pengujian dilakukan untuk satu jenis bahan bakar yaitu ranting pohon akasia.

4.1.1.1 Hasil Pengujian untuk Bahan Bakar Ranting Pohon

Beberapa parameter yang menjadi pertimbangan antara lain sebagai berikut :

- a. Ukuran partikel ranting pohon, yaitu :
 - Ukuran kecil ($p = 10 - 20 \text{ mm}$, $d = 3 - 6 \text{ mm}$)
 - Ukuran besar ($p = 10 - 20 \text{ mm}$, $d = 7 - 12 \text{ mm}$)
- b. Kecepatan putar motor (5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25, 27 rpm)

Tabel 4.1 Hubungan Kecepatan Putar Motor dengan *Feed Rate* untuk Ranting Pohon Partikel Kecil

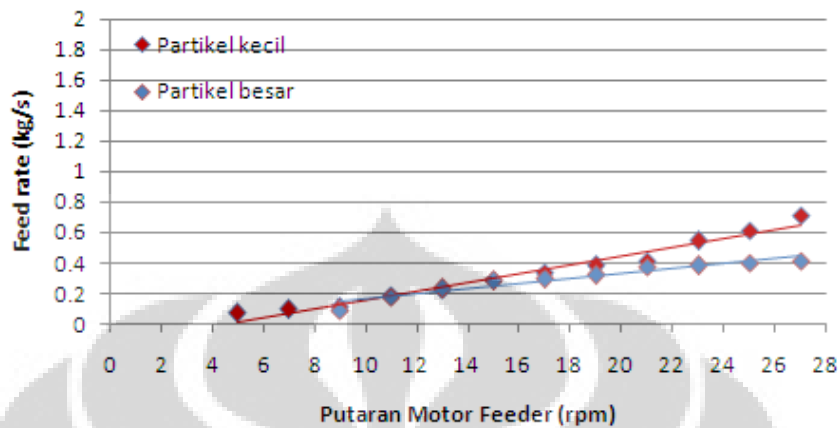
No	Kecepatan Putar Motor (rpm)	Kecepatan Putar Screw Feeder (rpm)	Feed rate (kg/s)
1	5	3.33	0.069
2	7	4.67	0.097
3	9	6.00	0.106
4	11	7.33	0.190
5	13	8.67	0.229
6	15	10.00	0.291
7	17	11.33	0.335
8	19	12.67	0.382
9	21	14.00	0.414
10	23	15.33	0.543
11	25	16.67	0.61
12	27	18.00	0.71

Tabel 4.2 Hubungan Kecepatan Putar Motor dengan *Feed Rate* untuk Ranting Pohon Partikel Besar

No	Kecepatan Putar Motor (rpm)	Kecepatan Putar Screw Feeder (rpm)	Feed rate (kg/s)
1	9	6.00	0.087
2	11	7.33	0.180
3	13	8.67	0.230
4	15	10.00	0.283
5	17	11.33	0.294
6	19	12.67	0.318
7	21	14.00	0.376
8	23	15.33	0.381
9	25	16.67	0.399
10	27	18.00	0.416

Data-data tersebut kemudian diplot menjadi bentuk grafik. Dengan menetapkan kecepatan putaran motor sebagai absis dan *feed rate* sebagai ordinat, maka didapatkan grafik seperti pada gambar.

Ranting Pohon



Gambar 4.1 Grafik Putaran Motor *Feeder* terhadap *Feed Rate* Ranting Pohon

4.1.2 Karakteristik Blower

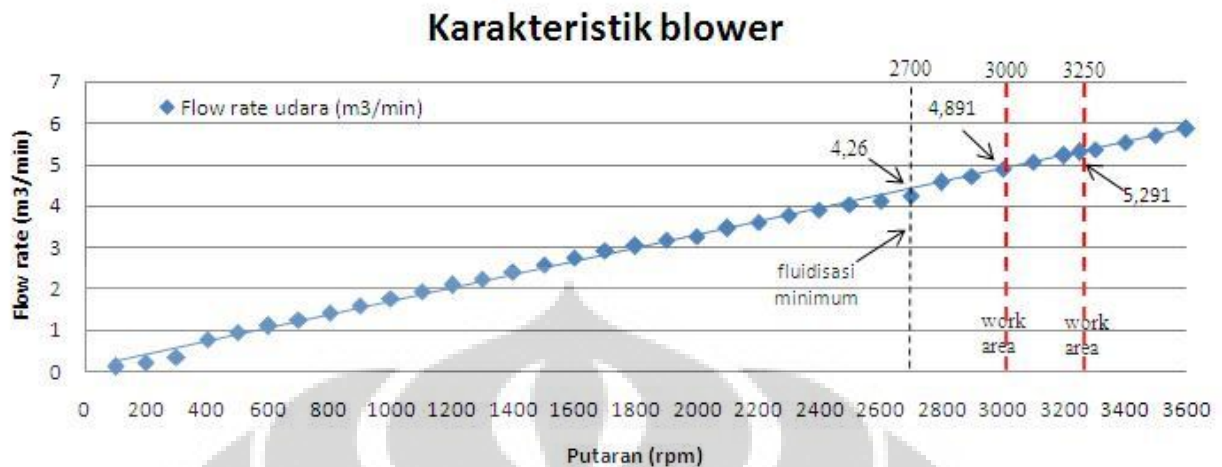
Pengujian yang dilakukan pada blower ini bertujuan untuk mengetahui hubungan antara putaran pada blower dengan debit aliran udaranya serta untuk mengetahui performa dari blower itu sendiri. Blower yang diuji ini adalah jenis ring blower. Pada *fluidized bed combustor* UI, *ring blower* ini berfungsi sebagai *gas supplyer* yang mengalirkan udara ke dalam ruang bakar.

Tabel 4.3 Hubungan Putaran Blower dengan Laju Aliran Udara

Putaran (rpm)	Kecepatan Aliran Udara (m/s)	Flow rate (m ³ /min)	Flow rate (lpm)
100	0.78	0.110916	110.916
200	1.51	0.214722	214.722
300	2.45	0.34839	348.39
400	5.51	0.783522	783.522
500	6.63	0.942786	942.786
600	7.73	1.099206	1099.206
700	8.84	1.257048	1257.048
800	10.03	1.426266	1426.266
900	11.24	1.598328	1598.328
1000	12.3	1.74906	1749.06
1100	13.56	1.928232	1928.232
1200	14.66	2.084652	2084.652

1300	15.7	2.23254	2232.54
1400	16.92	2.406024	2406.024
1500	18.18	2.585196	2585.196
1600	19.38	2.755836	2755.836
1700	20.52	2.917944	2917.944
1800	21.23	3.018906	3018.906
1900	22.26	3.165372	3165.372
2000	23.01	3.272022	3272.022
2100	24.26	3.449772	3449.772
2200	25.4	3.61188	3611.88
2300	26.52	3.771144	3771.144
2400	27.41	3.897702	3897.702
2500	28.33	4.028526	4028.526
2600	28.9	4.10958	4109.58
2700	29.96	4.260312	4260.312
2800	32.15	4.57173	4571.73
2900	33.27	4.730994	4730.994
3000	34.4	4.89168	4891.68
3100	35.52	5.050944	5050.944
3200	36.65	5.21163	5211.63
3300	37.77	5.370894	5370.894
3400	38.9	5.53158	5531.58
3500	40.02	5.690844	5690.844
3600	41.14	5.850108	5850.108

Di dalam tabel tersebut terdapat data mengenai kecepatan udara (tetapi bukan kecepatan superfisial), laju aliran udara dengan satuan m^3/min , serta laju aliran udara dengan satuan liter per menit (lpm). Jika data pada tabel diatas tersebut dibuat dalam bentuk grafik, maka akan terlihat karakteristik blower yang digunakan pada *fluidized bed combustor* UI. Grafik yang dibuat adalah grafik putaran (rpm) terhadap *flow rate* (lpm). Area kerja yang dipakai untuk pengujian pembakaran ialah pada putaran 3000 rpm dan 3250 rpm.



Gambar 4.2 Grafik Putaran Blower terhadap *Flow Rate* Udara

4.1.3 Karakteristik Pembakaran Biomassa

Eksperimental pembakaran biomassa dengan menggunakan *fluidized bed combustor* UI ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik pembakaran biomassa dengan dua variasi laju aliran udara ke dalam ruang bakar. Dalam hal ini pengujian dilakukan untuk satu jenis bahan bakar yaitu ranting pohon.

4.1.3.1 Karakteristik Ranting Pohon

Beberapa parameter yang menjadi pertimbangan antara lain sebagai berikut :

- Laju aliran udara ke ruang bakar ($4,9 \text{ m}^2/\text{s}$ dan $5,3 \text{ m}^2/\text{s}$)
- Feed rate* bahan bakar (1 kg/min, 2 kg/min, 3 kg/min, dan 4 kg/min)
- Ketinggian termokopel (20,5 cm; 41,5 cm; 80,5 cm; 161,5 cm; 233,5 cm)
- LHV bahan bakar (19740 kJ/kg) dan efisiensi FBC (85%)

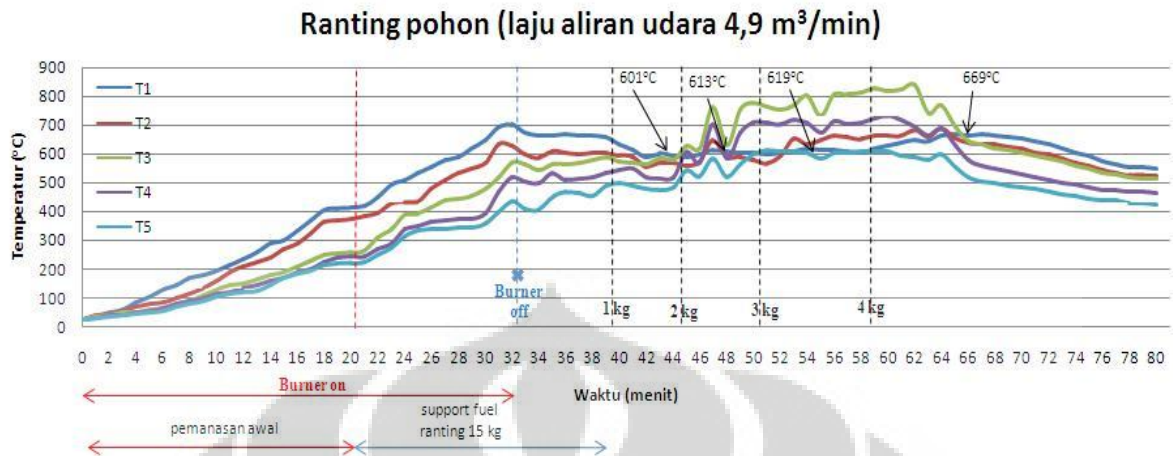
Tabel 4.4 Hubungan Temperatur Termokopel dengan Waktu pada Laju Aliran Udara $4,9 \text{ m}^3/\text{menit}$

Menit	T1	T2	T3	T4	T5	Kondisi	Massa
1	27	27	27	26	26	Burner menyala	
2	36	38	34	31	31		
3	48	45	42	38	37		
4	57	56	49	40	40		
5	82	71	51	49	47		

6	104	80	57	55	50		
7	128	84	65	63	56		
8	142	97	79	78	69		
9	167	116	91	90	81		
10	181	134	110	99	88		
11	196	158	128	112	105		
12	215	187	143	121	116		
13	233	209	150	132	119		
14	257	222	165	144	122		
15	289	241	178	158	145		
16	300	267	187	169	167		
17	335	289	208	188	183		
18	367	325	228	201	195		
19	406	362	250	222	213		
20	411	370	255	240	221		
21	412	373	257	245	222		Support
22	419	383	264	244	226		fuel
23	447	396	311	271	248		
24	496	427	337	290	273		
25	511	433	387	337	315		
26	532	436	392	351	334		
27	556	479	412	364	339		
28	577	511	438	369	341		
29	590	532	444	374	344		
30	617	547	453	376	346		
31	649	570	478	396	357		
32	694	635	518	467	398		
33	702	628	571	520	435	Burner dimatikan	Support
34	675	599	564	503	411		Fuel
35	664	587	546	498	407		
36	664	610	565	532	451		
37	669	605	565	511	467		
38	664	601	571	515	462		
39	661	605	579	521	455	Steady	
40	656	602	588	536	487	Pengambilan data	1 kg
41	635	595	576	546	498		
42	612	590	571	551	491		
43	590	556	565	521	477		
44	601	568	584	517	473		
45	592	568	581	521	485		2 kg

46	589	557	629	607	542		
47	601	573	621	569	523		
48	613	646	761	703	585		
49	609	590	631	584	521		
50	605	591	755	673	566		
51	602	579	777	710	600		3 kg
52	597	567	764	706	614		
53	606	593	755	701	611		
54	611	651	768	719	609		
55	619	632	802	707	604		
56	615	646	731	674	585		
57	613	662	808	715	602		
58	607	656	806	703	603		
59	604	652	812	710	607		4 kg
60	621	664	826	725	608		
61	628	662	818	732	609		
62	640	661	823	718	596		
63	646	681	839	693	587		
64	643	657	742	663	580		
65	665	687	769	687	597		
66	669	655	694	630	554		
67	662	639	643	577	518		
68	666	635	631	559	506		
69	664	631	620	547	497		
70	659	625	613	537	489		
71	653	619	605	528	483		
72	642	606	593	521	477		
73	633	599	586	511	467		
74	619	585	572	501	461		
75	605	570	560	493	453		
76	594	559	551	484	446		
77	575	543	534	476	438		
78	564	535	528	472	437		
79	555	526	520	468	430		
80	555	526	516	468	430		
81	551	523	512	465	426		

Data diatas diplot ke dalam grafik sehingga dapat dilihat pola kurva karakteristik pembakarannya berdasarkan *feed rate* yang berbeda dan debit udara dari blower yang berbeda juga.



Gambar 4.3 Grafik Distribusi Temperatur terhadap Waktu dengan Laju Aliran Udara 4,9 m³/menit

Untuk data pada laju aliran udara 5,3 m³/menit dapat dilihat pada tabel berikut

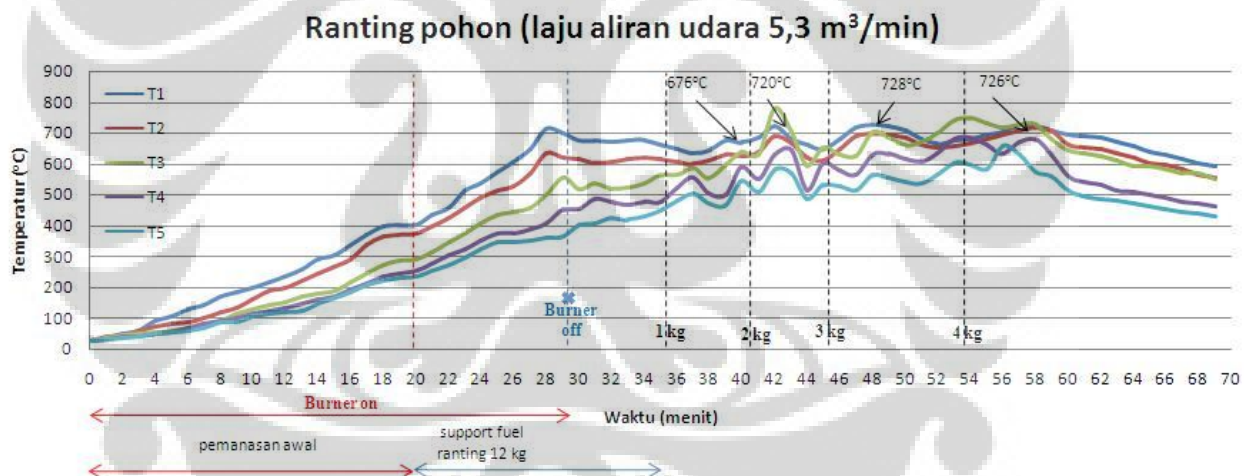
Tabel 4.5 Hubungan Temperatur Termokopel dengan Waktu pada Laju Aliran Udara 5,3 m³/menit

Menit	T1	T2	T3	T4	T5	Kondisi	Massa
1	28	28	28	27	27	Burner menyala	
2	37	38	35	32	31		
3	50	46	43	39	37		
4	58	57	51	42	40		
5	90	73	54	50	47		
6	105	82	58	56	53		
7	130	86	67	66	58		
8	143	98	80	80	69		
9	169	117	93	91	85		
10	182	134	113	101	88		
11	197	159	130	115	105		
12	217	189	144	122	116		
13	235	197	151	134	119		
14	258	223	168	147	122		
15	290	243	179	159	145		
16	302	268	188	171	167		
17	337	291	215	191	183		
18	369	336	243	211	206		
19	397	363	274	233	220		
20	402	371	287	245	229		

21	404	374	291	255	233		Support
22	435	397	312	276	253		fuel
23	459	423	344	303	273		
24	512	456	372	321	297		
25	537	491	407	349	321		
26	573	512	434	374	344		
27	607	527	443	376	346		
28	649	570	458	386	352		
29	713	635	498	407	361		
30	697	622	557	451	364	Burner dimatikan	Support
31	675	617	518	455	401		Fuel
32	674	603	536	486	408		
33	669	604	519	475	424		
34	675	615	521	465	418		
35	676	621	534	477	428	Steady	
36	663	613	563	475	447	Pengambilan data	1 kg
37	648	604	565	523	479		
38	635	600	587	554	504		
39	643	611	553	504	470		
40	676	630	597	501	465		
41	669	625	637	590	545		2 kg
42	683	637	630	552	508		
43	720	689	779	627	580		
44	681	667	702	644	567		
45	661	620	594	515	487		
46	646	612	652	600	530		3 kg
47	681	648	628	576	527		
48	718	688	625	565	513		
49	728	699	701	631	564		
50	722	695	683	632	553		
51	706	683	660	615	541		
52	682	662	671	608	537		
53	664	654	697	635	563		
54	675	657	742	681	603		4 kg
55	682	668	748	685	598		
56	693	678	730	660	582		
57	702	695	717	633	659		
58	726	709	725	673	629		
59	721	719	727	679	574		
60	708	706	681	631	560		

61	693	661	645	559	512	
62	688	653	634	542	494	
63	684	647	625	533	487	
64	671	632	609	512	482	
65	656	619	593	508	469	
66	640	602	591	498	461	
67	631	595	584	488	451	
68	617	581	570	478	445	
69	603	566	568	470	437	
70	592	555	549	461	430	

Jika data dari distribusi temperatur pada setiap termokopel terhadap waktu diatas dimasukkan ke dalam bentuk grafik, maka akan terlihat karakteristik kurva dengan laju aliran udara yang berbeda dengan sebelumnya, yaitu $5,3 \text{ m}^3/\text{menit}$ seperti berikut ini :



Gambar 4.4 Grafik Distribusi Temperatur terhadap Waktu dengan Laju Aliran Udara $5,3 \text{ m}^3/\text{menit}$

Sedangkan untuk data berikutnya adalah hubungan antara ketinggian termokopel dengan distribusi temperatur. Temperatur yang diambil pada setiap posisi termokopel adalah temperatur rata-rata saat memasukkan tiap *feed rate* bahan bakar.

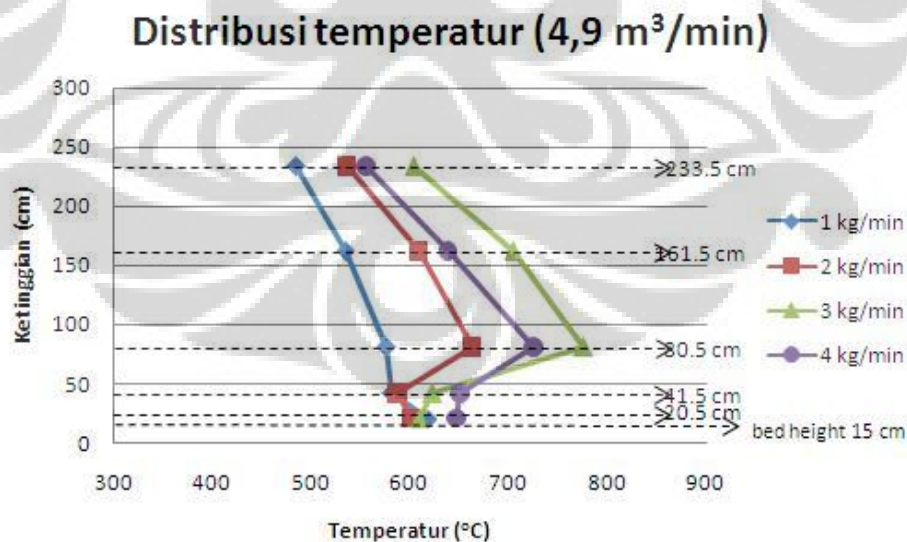
Tabel 4.6 Hubungan Distribusi Temperatur terhadap Ketinggian Termokopel pada Laju Aliran Udara $4,9 \text{ m}^3/\text{menit}$

No. termokopel	Tinggi termokopel (cm)	Feed rate 1 kg/min	Feed rate 2 kg/min	Feed rate 3 kg/min	Feed rate 4 kg/min
1	20.5	618.8	601.5	608.75	647.69
2	41.5	582.2	587.5	623.25	651.38
3	80.5	576.8	663	776.38	725.77
4	161.5	534.2	609.5	704.38	638.92
5	233.5	485.2	537	603.5	556.23

Tabel 4.7 Hubungan Distribusi Temperatur terhadap Ketinggian Termokopel pada Laju Aliran Udara $5,3 \text{ m}^3/\text{menit}$

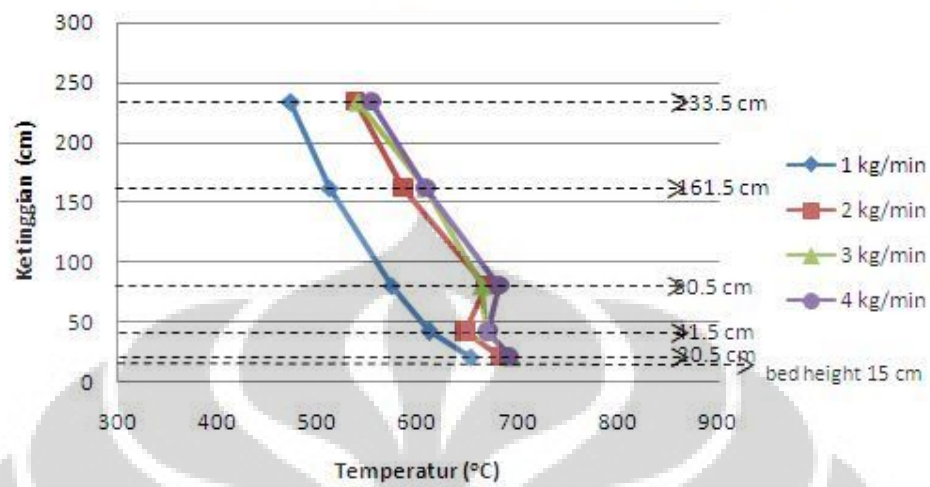
No. termokopel	Tinggi termokopel (cm)	Feed rate 1 kg/min	Feed rate 2 kg/min	Feed rate 3 kg/min	Feed rate 4 kg/min
1	20.5	653	682.8	693.38	691.58
2	41.5	611.6	647.6	667.63	670.33
3	80.5	573	668.4	664.36	681.33
4	161.5	511.4	585.6	607.75	608
5	233.5	473	537.4	541	554.08

Data tersebut jika diplot ke dalam bentuk grafik akan terlihat karakteristik temperatur di setiap termokopelnya pada *feed rate* yang berbeda seperti berikut :



Gambar 4.5 Grafik Hubungan Ketinggian Termokopel terhadap Distribusi Temperatur pada Laju Aliran Udara $4,9 \text{ m}^3/\text{menit}$

Distribusi temperatur (5,3 m³/min)



Gambar 4.6 Grafik Hubungan Ketinggian Termokopel terhadap Distribusi Temperatur pada Laju Aliran Udara 5,3 m³/menit

Perhitungan terhadap daya panas yang dihasilkan oleh *fluidized bed combustor* ini juga dilakukan dengan mengalikan besarnya efisiensi yang diasumsikan, variasi *feed rate* bahan bakar, serta nilai LHV bahan bakar.

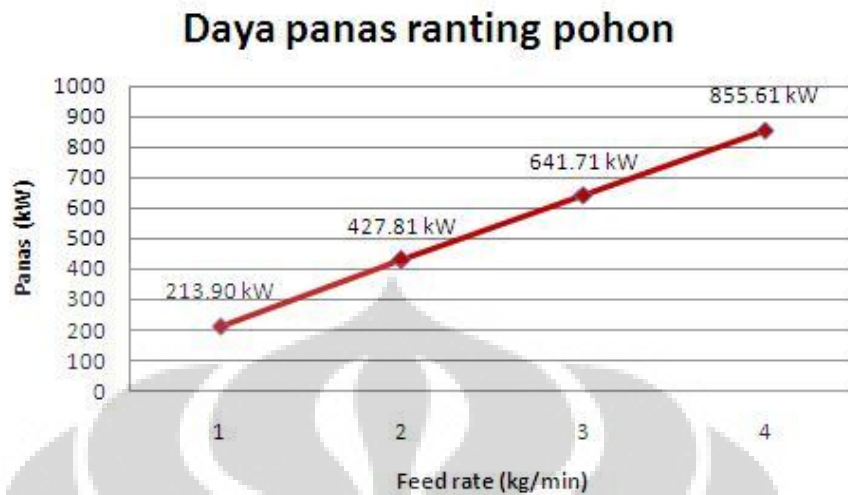
$$\text{daya panas} = \eta_{FBC} \times \text{feed rate} \times \text{LHV}$$

Sehingga tabel hasil perhitungannya adalah sebagai berikut :

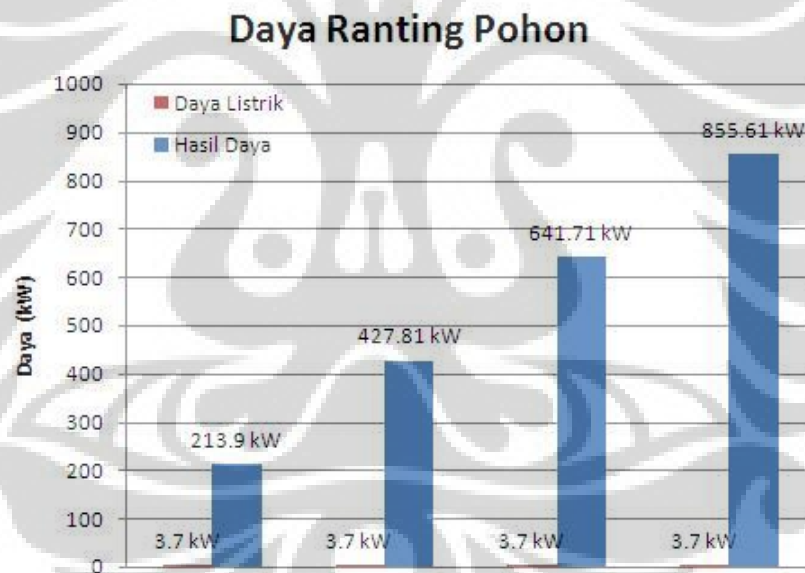
Tabel 4.8 Hubungan *Feed Rate* Bahan Bakar dengan Daya Panas yang Dihasilkan

Feed rate (kg/min)	Daya panas (kJ/min)	Daya panas (kW)
1	12834.15	213.90
2	25668.3	427.81
3	38502.45	641.71
4	51336.6	855.61

Jika dimasukkan dalam bentuk grafik akan terlihat pola garis linear di setiap kenaikan laju aliran massa bahan bakarnya.



Gambar 4.7 Grafik Daya Panas yang Dihasilkan terhadap Variasi *Feed Rate* Bahan Bakar



Gambar 4.8 Grafik Hasil Daya Terhadap Daya Listrik yang Digunakan

4.2 ANALISA

Setelah dilakukan pengujian dan pengambilan data pada *fluidized bed combustor* UI mengenai berbagai karakteristik pada blower, feeder, dan juga pembakaran biomassa, dalam hal ini ialah ranting pohon akasia, maka selanjutnya dilakukan pemasukkan dan pengolahan data yang ada, sehingga dengan demikian

akan dapat dibentuk ke dalam grafik. Grafik yang dibuat dalam pengujian ini ialah diantaranya grafik *feed rate* vs variasi putaran feeder, grafik hubungan dari putaran dan laju aliran udara pada blower, grafik temperatur di tiap termokopel vs waktu yang diambil dengan dua laju aliran udara yang berbeda, grafik distribusi temperatur pada tiap ketinggian termokopel di ruang bakar dan *freeboard area*, serta juga terdapat grafik dari daya panas yang dihasilkan oleh *fluidized bed combustor* dengan efisiensi yang diasumsikan sebesar 85%.

4.2.1 Analisa Karakteristik Blower

Jika dilihat pada grafik putaran blower vs laju aliran udara yang dihasilkan, maka hubungannya cenderung membentuk pola linear karena saling berbanding lurus antara keduanya. Hal ini menunjukkan semakin besar putaran blower maka semakin besar laju udaranya. Pengambilan data dilakukan pada sisi *discharge ring blower* menggunakan *anemometer* dan putaran blower dimulai dari 100 rpm sampai putaran maksimum 3600 rpm dengan kenaikan 100 setiap datanya, sedangkan laju aliran udaranya menggunakan satuan m^3/menit .

Pada grafik ini terdapat laju udara maksimum yang memiliki nilai $5,85 \text{ m}^3/\text{menit}$, juga terdapat nilai fluidisasi minimum yang diperoleh dari perhitungan penelitian sebelumnya, yaitu di putaran 2700 rpm dengan laju $2,6 \text{ m}^3/\text{menit}$. Nilai ini masih berada di bawah nilai dari dua variasi data yang diambil datanya, yaitu pada 3000 rpm ($4,891 \text{ m}^3/\text{min}$) dan 3250 rpm ($5,291 \text{ m}^3/\text{min}$).

Area kerja (*work area*) yang digunakan adalah pada kedua nilai tersebut karena berada di atas nilai fluidisasi minimum maka dipastikan pasir sebagai *bed material* akan dapat terfluidisasi dengan baik dan dapat memberikan sejumlah udara yang cukup untuk penyalaan burner dan pada saat proses pembakaran berlangsung.

4.2.2 Analisa Karakteristik Sistem Feeder

Pengambilan data dilakukan dengan menggunakan sejumlah massa ranting pohon akasia (sekitar 70 kg ranting) dengan variasi putaran motor feeder yang berbeda-beda pada setiap partikelnya (kecil dan besar). Data awal ditentukan dengan putaran minimum dari *screw feeder* untuk dapat membawa/mendorong ranting tersebut dengan keadaan seluruh ruangan feeder terpenuhi yang dimasukkan melalui *hopper* secara terus-menerus. Putaran pada sistem ini sudah dilakukan kalibrasi menggunakan *tachometer* digital, dan diketahui bahwa putaran yang terlihat di panel kontrol (pada *motor feeder*) tidak sama dengan putaran yang sesungguhnya di *screw feeder*, karena selain terdapat *gear reducer* pada motornya, rasio dari *sprocket* rantai juga berbeda, yaitu 2 berbanding 3. Sehingga ada dua jenis putaran, motor feeder dan *screw feeder*.

Putaran awal motor feeder berbeda di tiap ukuran partikelnya. Pada ranting partikel kecil, feeder baru dapat berputar dengan baik tanpa mengalami kemacetan pada 5 rpm sedangkan pada ranting partikel besar dapat terdorong dengan baik di 9 rpm, hal ini dikarenakan pengaruh dari ukuran partikelnya. Semakin besar ukuran partikel yang dimasukkan, maka akan memerlukan putaran feeder yang besar juga. Data yang diambil sebanyak 10 data untuk partikel besar dan sebanyak 12 data untuk partikel kecil karena besar putaran akhirnya disamakan antara keduanya.

Pola dari *feed rate* yang dihasilkan dan dilihat pada grafik maka terdapat kecenderungan untuk naik secara linear jika dibuat garis regresinya. Untuk partikel kecil, kenaikan *feed rate* nya akan lebih tinggi di setiap kenaikan putaran motor feeder, tetapi untuk partikel besar kenaikan *feed rate* nya lebih landai dari partikel yang kecil. Pada putaran feeder yang sama, *feed rate* partikel kecil akan lebih besar dari partikel besar, karena massa jenis dan kerapatan borongan (*bulk density*) partikel yang kecil relatif lebih rapat dari yang besar, maka massa yang terbawa oleh *screw feeder* akan lebih banyak. *Feed rate* minimum yang dihasilkan pada partikel kecil adalah 0,069 kg/s pada 5 rpm dan pada partikel besar adalah 0,087 kg/s tetapi pada 9

rpm. Nilai kekasaran suatu material juga berpengaruh terhadap kelancaran dari feedernya.

4.2.3 Analisa Daya Panas yang Dihasilkan

Untuk mengetahui berapa jumlah daya panas yang dapat dihasilkan oleh *fluidized bed combustor* tersebut, maka dilakukan beberapa perhitungan. Data-data yang diperlukan ialah nilai efisiensi FBC UI, laju aliran massa bahan bakar biomassa ranting pohon yang digunakan, serta nilai LHV (*lower heating value*) dari ranting pohon tersebut.

Efisiensi pada *fluidized bed combustor* UI ini diasumsikan sebesar 85%, karena jika dibandingkan dengan efisiensi dari *circulating fluidized bed combustor* yang ada di industri-industri besar yang berkisar antara 92 sampai 95% dan juga pada referensi untuk *fluidized bed combustor* lainnya antara 88 sampai 90%, alat FBC ini masih relatif lebih kecil dan masih perlu disempurnakan lagi agar kinerja operasinya menjadi lebih baik lagi, baik dari sistem yang ada maupun prosedur didalam pengoperasian *fluidized bed combustor* UI tersebut. Sedangkan, mengenai laju aliran massa (*feed rate*) yang digunakan disini ialah sebesar 1 sampai 4 kg per menit yang bertujuan untuk melihat bagaimana karakteristik penyebaran temperatur yang terjadi di setiap variasi laju bahan bakarnya.

Kemudian selain itu, ada satu parameter lagi yang diperlukan, yaitu nilai LHV untuk ranting pohon. Nilai LHV yang sudah didapat dari berbagai sumber, kisaran nilai LHV untuk ranting pohon adalah dari 15000 kJ/kg sampai dengan 20000 kJ/kg, dan nilai LHV pada ranting pohon khususnya jenis akasia adalah 15099 kJ/kg. Daya panas didapatkan dari perkalian antara efisiensi, laju aliran massa bahan bakar, dan nilai LHV bahan bakar yang digunakan (dalam hal ini ranting pohon akasia).

Grafik yang dibuat ialah hubungan antara laju aliran massa (*feed rate*) ranting pohon dengan daya panas yang dapat dihasilkan (kJ/menit). Untuk laju pemasukkan bahan bakar 1 kg didapat daya panas yang dihasilkan sebesar 213,9 kW, hal ini

dikarenakan adanya efisiensi 85% pada FBC, akan tetapi jika efisiensi alatnya 100% maka panas yang dihasilkan akan sama dengan nilai LHV dari ranting pohon tersebut, yaitu 15099 kJ/menit. Lalu untuk laju pemasukkan bahan bakar selanjutnya seperti 2 kg, 3 kg, dan 4 kg, besar daya panasnya akan meningkat sesuai dengan kelipatan jumlah bahan bakar yang diberikan, yaitu sebesar 427,81 kW; 641,71 kW; dan 855,61 kW. Jika *feed rate* bahan bakarnya ditingkatkan lagi tentu nilai kalor atau daya panasnya akan bertambah, tetapi ada batasan dari pemasukkan bahan bakar ranting pohon tersebut, karena agar rasio dari udara dan bahan bakarnya menjadi seimbang dan tidak kelebihan bahan bakar. Selain itu juga mengingat dimensi dari *fluidized bed combustor* UI itu sendiri yang tidak terlalu besar ukurannya jika dibandingkan dengan skala industri.

Untuk grafik daya panas yang dihasilkan terhadap daya listrik yang dibutuhkan, dapat dilihat bahwa daya listrik yang diperlukan masih relatif cukup rendah jika dibandingkan dengan daya panas yang dihasilkan pada proses pembakaran ranting pohon ini. Daya listrik yang dipakai hanya sebesar 3,7 kW, sedangkan *heat utilization* yang didapat cukup jauh lebih besar dari pemakaian daya listrik untuk instrumennya (213,9 kW - 855,61 kW). Sehingga, dapat dikatakan bahwa pembakaran ranting pohon akasia ini sudah cukup berhasil dan memberikan sumber panas yang bisa digunakan lagi untuk aplikasi selanjutnya seperti pada *heat exchanger* ataupun boiler.

4.2.4 Analisa Distribusi Temperatur Terhadap Ketinggian Termokopel

Termokopel yang digunakan pada *fluidized bed combustor* UI ini diposisikan secara bertingkat dengan ketinggian yang berbeda-beda, mulai dari T1 ialah yang paling dekat dengan *bed* atau pasir, sampai pada T5 yang paling terjauh dari *bed* tetapi dekat dengan *cyclone*. Masing-masing ketinggian punya karakteristiknya sendiri yang diperoleh dari proses pengujian pembakaran menggunakan bahan bakar ranting pohon yang sudah dilakukan.

Pada grafik yang dibuat dibagi menjadi 5 ketinggian, dan temperatur yang diambil pada setiap ketinggian termokopel tersebut adalah temperatur rata-rata dari beberapa menit pemasukkan laju bahan bakar, sehingga divariasikan berdasarkan *feed rate* nya untuk dua laju aliran udara yang berbeda. Penggunaan temperatur rata-rata ditujukan agar temperatur yang terlihat adalah nilai rata-rata suhu yang terjadi selama beberapa menit setelah bahan bakar dimasukkan, dan tidak mengambil temperatur maksimum, karena ada beberapa temperatur termokopel yang tidak berada di titik maksimum saat temperatur *bed* maksimum.

Dari grafik ketinggian termokopel vs temperatur rata-rata yang sudah dibuat, dapat dilihat bahwa pada *feed rate* 1 kg/menit temperatur akan menurun seiring dengan semakin tingginya termokopel, hal ini karena letak termokopel yang jaraknya bervariasi terhadap burner dan *bed*, sehingga yang paling jauh akan memiliki suhu terendah. Akan tetapi, ada beberapa fenomena yang tidak biasa, yaitu pada saat pemasukkan bahan bakar 3 kg dan 4 kg khususnya pada laju aliran udara 4,891 m³/menit. Temperatur pada T3 (776,38°C dan 725,77°C) dan T4 (704,38°C dan 638,92°C) lebih tinggi dari temperatur T1 atau *bed* temperatur (608,75°C dan 647,69°C), tetapi temperatur pada T5 kembali menjadi rendah lagi. Hal ini dilihat berdasarkan kejadian yang ada disaat pengujian ialah dikarenakan terdapatnya api pada dinding di sekitar termokopel 3 dan 4 yang menyebabkan temperaturnya cukup signifikan yang mungkin saja disebabkan oleh sifat dan karakteristik ranting pohon itu sendiri.

Diketahui bahwa analisis proximat untuk ranting pohon menggambarkan bahwa kandungan *volatile matter* pada ranting berkisar antara 65 sampai 70%. Jumlah ini sangat tinggi bila dibandingkan dengan batu bara atau biomassa yang lainnya. Sehingga, saat dimasukkan ranting 3 kg, maka semuanya akan cepat terbakar atau menguap secara *self-combustion* dan api yang dihasilkan di awal pembakaran akan sangat dekat dengan termokopel 3 dan 4 yang menjadikan suhunya meningkat secara tiba-tiba dan signifikan, kemudian setelah apinya sudah hilang suhunya akan turun kembali. Akan tetapi pada pengujian dengan laju aliran udara dari blower 5,291

m³/menit, fenomena tersebut tidak terjadi lagi saat dilakukan pemasukkan bahan bakar yang sama dengan debit udara sebelumnya, hal ini mungkin saja karena adanya penambahan laju aliran udara yang dapat segera membawa *volatile matter* tersebut keluar sehingga tidak memungkinkan terbentuk lagi api pada dinding-dinding yang dekat dengan termokopel yang berada diatas.

4.2.5 Analisa Distribusi Temperatur Terhadap Waktu

Pada proses pengujian pembakaran yang dilakukan menggunakan ranting pohon akasia, data-data temperatur di setiap termokopel dicatat per menitnya dari pertama dimulai proses fluidisasi dan penyalaan awal burner sampai akhir dari pengambilan data bahan bakar 4 kg/menit dan sampai temperatur di tiap titik menurun dengan perlahan membentuk pola yang mendekati linear karena telah mengalami *self-combustion*, tetapi tidak sampai ke suhu normal udara / suhu ambien 27-28°C lagi karena akan membutuhkan waktu yang cukup lama.

Dapat dilihat pada grafik temperatur vs waktu yang pertama, yaitu dengan *flow rate* udara dari blower 4,891 m³/menit, proses pengujiannya berlangsung selama 81 menit. Awalnya, sebelum bahan bakar ranting pohon dimasukkan ke dalam ruang bakar (*combustion chamber*), *bed material* atau pasirnya dipanaskan terlebih dahulu menggunakan *gas burner* jenis *Hi-Temp Premixed Burner* (proses pemanasan awal), tentu saja pasir sudah dalam kondisi terfluidisasi dengan cukup baik. Temperatur semua termokopel sangat penting untuk dilihat disini, akan tetapi penjelasan dan analisisnya akan lebih ditekankan pada termokopel 1 karena merepresentasikan temperatur dari *bed* dan termokopel 5 yang merepresentasikan temperatur keluaran ruang bakar untuk selanjutnya menuju *cyclone* dan dimanfaatkan untuk proses selanjutnya. *Gas burner* disini memanaskan pasir hingga mencapai temperatur 412°C selama 20 menit. Suhu pada *bed* kemudian akan terus stabil antara 380-450°C pada menit 17-20 meskipun burner terus dinyalakan. Dapat dilihat kurva temperatur awalnya membentuk pola yang perlahan-lahan meningkat seperti eksponensial, disini

menggambarkan proses perpindahan panas dan massa yang terjadi diantara partikel *bed* tersebut (pasir silika) sebagai media transfer.

Kemudian, untuk meningkatkan suhunya lagi menjadi yang diharapkan (suhu yang melebihi suhu *self-combustion* ranting pohon sekitar 700°C), sejumlah bahan bakar pendukung (*solid support fuel*) yang berupa ranting juga dimasukkan ke dalam ruang bakar melalui pintu reaktor sebanyak 1 kg setiap menitnya dan terus dicatat perubahan temperaturnya. Pada grafik disini dibutuhkan waktu selama 12 menit untuk menaikkan suhu *bed* ke 702°C , setelah itu burner dimatikan. Hal ini menyebabkan temperatur menurun tetapi sudah mencapai suhu *self-sustained combustion* untuk ranting pohon, *support fuel* dikurangi perlahan 0,5 kg per menitnya sampai kondisi stabil (*steady*) yang memerlukan waktu 7 menit (661°C).

Lalu pengambilan data mulai dilakukan dimulai dari memasukkan ranting 1 kg melalui feeder yang dijalankan selama 1 menit. Sesaat setelah bahan bakar masuk ke ruang bakar, temperatur *bed* menurun karena ada perubahan AFR (*air fuel ratio*), dan kemudian proses *self-combustion* terjadi sehingga suhu meningkat lagi sampai 601°C sebelum mengalami penurunan kembali, setelah itu dimasukkan lagi sebanyak 2 kg. Pola perubahan temperatur akan sama, yaitu mengalami penurunan sesaat setelah ranting dimasukkan kemudian naik lagi sampai mengalami penurunan dan dimasukkan bahan bakar selanjutnya, 3 kg dan 4 kg. Temperatur *bed* maksimum yang dicapai ialah 669°C saat memasukkan 4 kg. Setelah temperatur maksimum tersebut dan seluruh bahan bakar ranting sudah terbakar habis, maka temperatur akan secara perlahan turun terus sampai akhirnya kembali ke suhu normal lagi, tetapi data yang diambil hanya sampai temperatur *bed* 551°C .

Akan tetapi, ada fenomena yang terjadi saat memasukkan bahan bakar 2 kg, 3 kg, dan 4 kg, yaitu temperatur di T2, T3, dan T4 melebihi T1. Berdasarkan pengamatan di lapangan saat pengujian, terdapat api yang menempel di dinding sekitar T2, T3, dan T4 yang menyebabkan temperatur termokopelnya mengalami kenaikan yang cukup signifikan. Hal ini mungkin saja dikarenakan oleh karakteristik

ranting pohon itu sendiri, karena dari data analisis proximat untuk ranting akasia nilai *volatile matter* nya cukup tinggi dibandingkan biomassa lainnya, sekitar 67-70%. Nilai tersebut menyebabkan cepat terbakarnya zat yang terkandung sehingga api yang terbentuk akibat pembakaran akan berada diatas dinding didalam ruang bakar, karena rantingnya belum sempat jatuh sampai ke pasir tetapi sudah terbakar dengan cepat.

Kemudian pada pengambilan data yang kedua, masih dengan *feed rate* yang sama, tetapi dengan *flow rate* udara dari blower dinaikkan menjadi 5,291 m³/menit, dan proses pengujiannya berlangsung selama 70 menit. Prosedur yang dilakukan sama dengan yang sebelumnya, hanya saja terdapat beberapa perbedaan yang cukup terlihat pada grafik.

Gas burner disini memanaskan pasir hingga mencapai temperatur 404°C selama 20 menit, sedikit lebih rendah dari yang pertama. Kemudian suhunya akan kembali stabil pada menit 17-20. Pada grafik disini dibutuhkan waktu selama 8 menit untuk menaikkan suhu *bed* ke 713°C, setelah itu burner dimatikan dan untuk sampai ke kondisi stabil (*steady*) memerlukan waktu 6 menit (676°C). Perbedaan yang terlihat disini ialah temperatur yang dicapai relatif lebih tinggi jika dibandingkan dengan pengambilan data yang pertama. Hal ini mungkin saja dikarenakan adanya kenaikan debit udara dari blower yang mengakibatkan pembakaran menjadi lebih cepat dan lebih baik.

Temperatur *bed* maksimum yang dicapai ialah 676°C untuk 1 kg, 720°C untuk 2 kg, 728°C untuk 3 kg, dan 726°C untuk bahan bakar 4 kg. Perolehan temperatur yang lebih tinggi ini juga disebabkan oleh naiknya laju aliran udara dari blower. Tetapi, fenomena yang terjadi pada pengambilan data yang pertama tidak terjadi secara signifikan seperti sebelumnya, kenaikan temperatur yang melebihi suhu *bed* hanya pada terjadi pada laju bahan bakar 2 kg/menit. penyebabnya mungkin saja karena aliran udaranya lebih cepat dari yang pertama sehingga api tidak terbentuk lagi pada dinding di sekitar termokopel atas.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Fluidized bed combustor UI termasuk jenis *bubbling fluidized bed* (BFB) karena pada saat beroperasi menggunakan kecepatan aliran udara yang tidak cukup tinggi untuk dapat membawa partikel hamparan (pasir) untuk terbawa keluar dari reaktor melewati *riser/freeboard* menuju siklon. Meskipun begitu, teknologi FBC ini sudah mampu mengkonversi energi biomassa menjadi sumber energi panas. Teknologi ini juga dinilai sebagai teknologi yang ramah lingkungan karena kadar emisinya yang rendah.

Proses pembakaran menggunakan bahan bakar biomassa khususnya ranting pohon akasia yang banyak terdapat di UI, dapat dikatakan sudah cukup baik dan sesuai dengan yang diharapkan. Ranting pohon akasia ini akan dapat mengalami *self-sustained combustion* jika temperturnya sudah stabil mencapai 650-700°C. Temperatur maksimum yang dihasilkan mencapai sekitar 700-750°C, dan daya panas yang dihasilkan juga sudah dirasa cukup untuk dimanfaatkan kembali pada *heat exchanger* atau *boiler* pada proses selanjutnya.

Distribusi temperatur pada pembakaran sudah cukup baik, hanya saja terdapat beberapa temperatur yang kurang stabil. Ketidakstabilan tersebut dikarenakan ranting pohon memiliki kandungan *volatile matter* yang sangat besar yaitu sekitar 65-70%. Sehingga dapat dikatakan bahwa karakteristik yang melemahkan bahan bakar ranting pohon untuk dijadikan energi ialah tingginya kandungan zat yang mudah menguap sehingga akan berdampak pada performa sistem seperti tidak meratanya temperatur pada ruang bakar.

5.2 SARAN

Studi mengenai *Fluidized Bed Combuster* merupakan solusi di masa yang akan datang, sehingga diharapkan *performance* dari *Fluidized Bed Combustor* UI

dapat meningkat untuk keperluan penelitian lebih jauh lagi. Oleh karena itu ada beberapa rekomendasi yang saya ajukan untuk kepentingan penelitian lebih lanjut, yaitu :

1. Persiapan bahan bakar sebelum melakukan pengujian harus dilakukan dengan baik, mulai dari dimensi partikel, ketersediaan dalam *volume* yang memadai dalam pengujian eksperimental pembakaran.
2. Perlunya peningkatan kapasitas dan kualitas instrumentasi dan alat ukur, seperti timbangan, instrumentasi listrik pada laboratorium FBC, untuk kepentingan penelitian yang lebih baik.
3. Perlunya pengadaan instalasi jaringan listrik dan air bersih pada laboratorium pengujian FBC, karena hal ini sangat dibutuhkan untuk praktikan laboratorium di masa mendatang.
4. Perbaiki sistem *feeder* yang ada, untuk menghasilkan laju *feed rate* yang lebih rendah, agar didapatkan laju pemasukkan bahan bakar dengan optimal.
5. Modifikasi *cyclone* agar gas masuk dapat berputar dengan baik.

REFERENSI

1. Bruce R. Munson, Donald F. Young, *Mekanika Fluida*, terj. Harinaldi, Budiarmo (Jakarta: Erlangga, 2003).
2. Christian, Hans. “Modifikasi Sistem Burner dan Pengujian Aliran Dingin *Fluidized Bed Incinerator* UI.” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2008.
3. “Experimental Operating & Maintenance Manual – Fluidisation and Fluid Bed Heat Transfer Unit H692,” P. A. Hilton Ltd.
4. Geldart, D., *Gas Fluidization Technology*, (New York: John Wiley & Sons, 1986).
5. Howard, J. R., *Fluidized Beds – Combustion and Applications*, (London: Applied Science Publishers, 1983).
6. Kunii, Daizo & Octave Levenspiel, *Fluidization Engineering*, (New York: Butterworth-Heinemann, 1991).
7. Robert H. Perry, Don W. Green, *Perry’s Chemical Engineers’ Handbook* 7th Ed., (Singapore: McGraw-Hill Int., 1997).
8. Surjosatyo, Adi. “Fluidized Bed Incineration of Palm Shell & Oil Sludge Waste.” Tesis, Program Magister Engineering Universiti Teknologi Malaysia, 1998.
9. Warren L. McCabe, Julian C. Smith, Peter Harriott, *Unit Operasi Teknik Kimia*, terj. E. Jasjfi (Jakarta: Erlangga, 1987).
10. http://agsco.thomasnet.com/Asset/AGSCO_Technical_Data_Sheet.pdf
11. <http://www.azom.com/silica.asp?ArticleID=1114.htm>
12. http://users.wpi.edu/~ierardi/FireTools/air_prop.html
13. <http://www.ecen.com/>