



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**DISTRIBUSI TEMPERATUR PEMBAKARAN CANGKANG  
KELAPA DAN RANTING POHON PADA FLUIDIZED BED  
COMBUSTOR UI**

**SKRIPSI**

**FRINSES DAYAN HUTAJULU  
07 06 19 85 11**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
DESEMBER 2009**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**DISTRIBUSI TEMPERATUR PEMBAKARAN CANGKANG  
KELAPA DAN RANTING POHON PADA FLUIDIZED BED  
COMBUSTOR UI**

**SKRIPSI**

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

**FRINSES DAYAN HUTAJULU  
07 06 19 85 11**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
DESEMBER 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 : Frinses Dayan Hutajulu**

**NPM : 07 06 19 85 11**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 16 Desember 2009**



## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Frinses Dayan Hutajulu  
NPM : 07 06 19 85 11  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : DISTRIBUSI TEMPERATUR PEMBAKARAN  
CANGKANG KELAPA DAN RANTING POHON  
PADA FLUIDIZED BED COMBUSTOR UI

**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. Ir. Yulianto Sulistyono, M.Sc., Ph.D ( )  
Penguji : Ir. Imansyah Ibnu Hakim M.Eng ( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal :

## 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, 16 Desember 2009

Penulis

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

---

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

Nama : Frinses Dayan Hutajulu

NPM : 07 06 19 85 11

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 :

**DISTRIBUSI TEMPERATUR PEMBAKARAN CANGKANG  
KELAPA DAN RANTING POHON PADA FLUIDIZED BED  
COMBUSTOR UI**

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 : 16 Desember 2009

Yang menyatakan

(FRINSES DAYAN HUTAJULU)

## ABSTRAK

Nama : Frinses Dayan Hutajulu  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul : Distribusi Temperatur Pembakaran Cangkang Kelapa dan Ranting Pohon pada Fluidized Bed Combustor UI

Indonesia memiliki potensi energy biomassa yang cukup besar. Cangkang kelapa dan limbah hutan seperti ranting dapat dengan mudah diperoleh. Saat ini pemanfaatan limbah tersebut sebagai energi alternatif masih sedikit. Teknologi *fluidized bed combustor* merupakan salah satu teknologi yang tepat untuk mengkonversi energi biomassa menjadi energi panas.

Pengujian pembakaran biomassa ini dilakukan pada FBC UI jenis *bubbling* untuk mengetahui distribusi temperatur hasil pembakaran kedua bahan bakar tersebut dengan laju udara 4,89 m<sup>3</sup>/min. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pembakaran dengan menggunakan cangkang kelapa menghasilkan panas yang lebih tinggi daripada ranting. Temperatur bed pada pembakaran cangkang kelapa dapat mencapai 742°C. Hal ini menunjukkan perlu mencampur cangkang kelapa dengan ranting untuk membantu menaikkan temperatur pembakaran ranting pohon.

Kata kunci,

*Fluidized bed combustion*, Energi alternatif, Cangkang kelapa, Ranting pohon, Maksimum Temperatur

## ABSTRACT

Name : Frinses Dayan Hutajulu  
Study Program : Mechanical Engineering  
Title : Temperature Distribution of Coconut shell and Tree Branches  
Combustion in Fluidized Bed Combustor UI

Indonesia has great potential of biomass energy. Coconut shell and forestry waste such as tree branch are easy to find. Today, the exploiting of waste as an alternative energy is still not much. Fluidized bed combustor technology is one of the suitable technology to convert biomass energy to heat energy. The objective of biomass combustion experiment that is done in bubbling type of fluidized bed combustor is to learn the temperature distribution of both biomass combustion by supplying 4.89 m<sup>3</sup>/min air flow rate. The result of the test shows that coconut shell combustion has a higher temperature than tree branch. Bed temperature can reach 742°C in coconut shell combustion. That's why the tree branch need to mix with the coconut shell to increase the combustion temperature of tree branch.

### Keyword

Fluidized bed combustion, alternative energi, coconut shell, tree branch, Maximum Temperature.

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH .....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	v
ABSTRAK .....	vi
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiv
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Judul Penelitian .....	1
1.2 Latar Belakang Masalah .....	1
1.3 Pokok Permasalahan .....	5
1.4 Tujuan Penulisan .....	6
1.5 Batasan Masalah .....	6
1.6 Metodologi Penelitian .....	7
1.7 Sistematika Penulisan .....	8
<b>BAB 2 LANDASAN TEORI .....</b>	<b>10</b>
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 Energi Biomassa .....	11
2.1.2.1 Proses Thermal .....	11
2.1.2.2 Proses Biologis .....	13
2.1.3 Kelebihan dan Kekurangan Biomassa .....	15
2.2 Karakteristik Biomassa .....	16
2.3 Sistem Reaksi Pembakaran .....	18
2.3.1 Hal-Hal yang Harus Diperhatikan dalam Proses Pembakaran .....	19
2.3.2 Komponen-Komponen Utama Reaksi Pembakaran .....	20
2.4 Fluidized Bed Combustor .....	23
2.4.1 Jenis-Jenis <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	26
2.4.2 Pinsip Kerja <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	27
2.4.3 Bagian-Bagian <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	28
2.4.3.1 <i>Fluidization Vessel</i> .....	29
2.4.3.2 <i>Solid Feeder</i> .....	31
2.4.3.3 <i>Burner</i> .....	32
2.4.3.4 <i>Bed Material</i> .....	33
2.4.3.5 <i>Cyclone Separator</i> .....	34
2.4.3.6 <i>Blower</i> .....	35
2.4.3.7 <i>Instrumentation</i> .....	36

2.5 Fenomena Fluidisasi .....	36
2.5.1 Proses Fluidisasi.....	36
2.5.2 Kondisi Fluidisasi.....	37
2.5.3 Jenis-Jenis Fluidisasi.....	39
2.5.3.1 Fluidisasi Partikulat ( <i>Particulate Fluidization</i> ) .....	39
2.5.3.2 Fluidisasi Gelembung ( <i>Bubbling Fluidization</i> ).....	39
2.5.4 Parameter-Parameter Fluidisasi.....	40
2.5.4.1 Ukuran Partikel .....	40
2.5.4.2 Massa Jenis Padatan.....	40
2.5.4.3 <i>Sphericity</i> .....	41
2.5.4.4 <i>Bed voidage</i> .....	41
2.5.4.5 Kecepatan Fluidisasi Minimum .....	41
2.5.4.6 Penurunan Tekanan Melintas Hamparan .....	42
2.5.4.7 Penurunan Tekanan Melintas <i>Distributor</i> .....	43
2.5.4.8 Klasifikasi Pasir .....	44
2.5.4.9 Daerah Batas Fluidisasi ( <i>fluidization regimes</i> ) .....	49
<b>BAB 3 PERSIAPAN DAN PROSEDUR PENGUJIAN</b> .....	50
3.1 Persiapan Pengujian .....	50
3.1.1 Bahan Bakar Biomassa .....	50
3.1.1.1 Cangkang Kelapa.....	50
3.1.1.2 Ranting Pohon.....	51
3.1.2 Pasir .....	52
3.1.3 Perlengkapan dan Peralatan .....	56
3.2 Standar Operasi Alat Pengujian .....	61
3.2.1 Sistem Feeder.....	61
3.2.2 Blower.....	63
3.2.3 Sistem Burner.....	65
3.2.4 Perlengkapan Keselamatan Kerja.....	69
3.3 Prosedur Pengujian Pembakaran.....	70
3.3.1 Rangkaian Alat Pengujian .....	70
3.3.2 Prosedur Pengambilan Data Pembakaran .....	71
3.3.2.1 Prosedur Pemanasan Awal Pembakaran.....	71
3.3.2.2 Prosedur Pengambilan Data Pembakaran .....	72
3.3.3 Prosedur Pengambilan Data Karakteristik Blower.....	73
<b>BAB 4 HASIL DAN ANALISA</b> .....	74
4.1 Hasil .....	74
4.1.1 Karakteristik Blower .....	74
4.1.2 Karakteristik Pembakaran Biomassa.....	76
4.2 Analisa.....	81
4.2.1 Analisa Karakteristik Ring Blower.....	81
4.2.2 Analisa Distribusi Temperatur Terhadap Ketinggian Termokopel dan Jumlah Massa Bahan Bakar.....	82
4.2.3 Analisa Distribusi Temperatur Terhadap waktu.....	83
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	86

5.1 Kesimpulan .....	86
5.2 Saran .....	87
<b>REFERENSI</b> .....	<b>88</b>
<b>LAMPIRAN</b> .....	<b>89</b>



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	<i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	4
Gambar 2.1.	Chart Teknologi Konversi Biomassa .....	11
Gambar 2.2.	Proses Gasifikasi .....	12
Gambar 2.3.	Anaerobic Digester .....	14
Gambar 2.4.	Rangkaian Instalasi Biogas .....	14
Gambar 2.5.	Skematis <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	24
Gambar 2.6.	Proses Pencampuran ( <i>mixing</i> ) dalam <i>Fluidized Bed Combustor</i> ..	25
Gambar 2.7.	Tahapan Proses Kerja <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	28
Gambar 2.8.	Ruang Bakar Utama <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI .....	29
Gambar 2.9.	Perilaku Gelembung Setiap Jenis Distributor .....	30
Gambar 2.10.	Distributor yang Sebelumnya Digunakan pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI .....	30
Gambar 2.11.	Jenis-Jenis <i>Solid Flow Control</i> .....	31
Gambar 2.12.	Burner yang Digunakan pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI .....	33
Gambar 2.13.	<i>Cyclone Separator Fluidized Bed Combustor</i> UI .....	35
Gambar 2.14.	Skematik Fluidisasi .....	37
Gambar 2.15.	Hubungan Tinggi Hampan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hampan Zat Padat .....	38
Gambar 2.16.	Hubungan Penurunan Tekanan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hampan Zat Padat .....	38
Gambar 2.17.	Diagram Klasifikasi Jenis-Jenis Pasir .....	45
Gambar 2.18.	Daerah Batas Fluidisasi .....	49
Gambar 3.1.	Cangkang Kelapa setelah dihancurkan.....	51
Gambar 3.2.	Ranting setelah dipotong kecil.....	52
Gambar 3.3.	Pasir silica Mesh 30-50 yang digunakan pada FBC UI.....	55
Gambar 3.4.	Generator Set yang digunakan.....	56
Gambar 3.5.	Ketinggian termokopel.....	58
Gambar 3.6.	Konfigurasi termokopel.....	58
Gambar 3.7.	<i>Temperatur Data Logger</i> .....	59
Gambar 3.8.	Tachometer Digital.....	59
Gambar 3.9.	Timbangan untuk skala besar & kecil.....	60

Gambar 3.10. <i>Control Panel</i> yang Digunakan untuk Feeder dan Blower .....	60
Gambar 3.11. Anemometer .....	61
Gambar 3.12. Sistem Feeder pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI .....	61
Gambar 3.13. Ring Blower pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI .....	63
Gambar 3.14. Bagian-bagian <i>Hi-temp Premixed Burner</i> .....	67
Gambar 3.15. Perlengkapan Pelindung Kerja.....	69
Gambar 3.16. Rangkaian Seluruh Alat untuk Melakukan Pengujian Pembakaran .....	71
Gambar 4.1. Grafik Putaran Blower terhadap <i>Flow Rate</i> Udara .....	75
Gambar 4.2. Grafik Distribusi Temperatur terhadap waktu.....	78
Gambar 4.3. Grafik Hubungan Ketinggian Terhadap Temperatur pada Pembakaran Cangkang Kelapa.....	79
Gambar 4.4. Grafik Hubungan Ketinggian Terhadap Temperatur pada Pembakaran Ranting Pohon.....	80
Gambar 4.5. Grafik Hubungan temperatur Cangkang Terhadap Variasi Massa.....	80
Gambar 4.6. Grafik Hubungan Temperatur Ranting Pohon Terhadap Variasi Massa.....	80

## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1.	Energi fosil Indonesia .....	1
Tabel 1.2.	Potensi Energi Terbaharukan di Indonesia .....	2
Tabel 2.1.	<i>Ultimate Anaysis</i> Beberapa Jenis Biomassa .....	17
Tabel 2.2.	<i>Proximate Analysis</i> Beberapa Jenis Biomassa .....	17
Tabel 2.3.	Nilai LHV Beberapa Jenis Biomassa .....	18
Tabel 2.4.	Jenis-Jenis Bahan Bakar .....	21
Tabel 2.5.	Increasing Size and Density .....	48
Tabel 3.1.	<i>Specific Heat</i> Berbagai Substansi .....	53
Tabel 3.2.	Sifat Fisik, Termal, dan Mekanik Pasir Silika .....	53
Tabel 3.3.	Distribusi Ukuran Pengayakan Pasir Silika .....	55
Tabel 3.4.	Spesifikasi motor feeder .....	62
Tabel 3.5.	Spesifikasi Teknis Ring Blower .....	63
Tabel 3.6.	Spesifikasi Teknis <i>Hi-Temp Premixed Burner</i> .....	68
Tabel 4.1.	Hubungan Putaran Blower dengan Laju Aliran Udara .....	74
Tabel 4.2.	Data Hubungan Temperatur Termokopel dengan Waktu.....	76
Tabel 4.3.	Hubungan Distribusi Temperatur cangkang terhadap Ketinggian Termokopel .....	79
Tabel 4.4.	Hubungan Distribusi Temperatur Ranting terhadap Ketinggian Termokopel .....	79

## DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Hasil Penelitian Sebelumnya untuk Karakteristik FBC
- 1.1. Tabel Pengujian *Cold Flow*
  - 1.2. Grafik Kecepatan Superfisial Terhadap Penurunan Tekanan
- Lampiran 2 Perhitungan Kecepatan Fluidisasi Minimum dan Debit Udara Minimum.
- Lampiran 3 Foto Hasil Percobaan di Laboratorium Fluidized Bed Combustor UI
- 3.1. Penyalaaan *Support Fuel*
  - 3.2. Api yang terbentuk saat pemanasan awal dengan gas burner
  - 3.3. Api yang terbentuk saat pemanasan awal tanpa burner
  - 3.4. Proses Fluidisasi Pasir
  - 3.5. Kondisi bed pada temperatur operasi
  - 3.6. Sisa bahan bakar yang tidak menjadi abu

## BAB 1 PENDAHULUAN

### 1.1 JUDUL PENELITIAN

Distribusi Temperatur Pembakaran Cangkang Kelapa dan Ranting Pohon pada FBC UI

### 1.2 LATAR BELAKANG MASALAH

Energi berkaitan sangat erat dengan sendi-sendi kehidupan suatu manusia dari cakupan manusia sebagai individu maupun dunia secara keseluruhan. 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. Dari data Departemen ESDM bahwa pasokan terbesar untuk kebutuhan energi Indonesia diperoleh dari energi fosil. Sementara cadangan energi fosil Indonesia menurut data dari ESDM adalah seperti tabel di bawah,

Tabel 1.1 Energi fosil Indonesia

Energi Fosil	Sumber Daya	Cadangan	Produksi per tahun	Rasio Cadangan / Produksi *
Minyak bumi	56,6 Milyar Barel	8,4 Milyar Barel **	348 Juta Barel	24 tahun
Gas bumi	334,5 TSCF	165 TSCF	2,79 TSCF	59 tahun
Batubara	90,5 Milyar Ton	18,7 MilyarTon	201 Juta Ton	93 tahun
CBM (Gas)	453 TSCF	-	-	-

\* Tidak ada temuan cadangan baru; \*\* Termasuk blok Cepu

Sumber: Presentasi Menteri ESDM, 11 April 2008

([http://www.wwf.or.id/about\\_wwf/whatwedo/climate/oursolution/mitigation222/renewable\\_energycfm](http://www.wwf.or.id/about_wwf/whatwedo/climate/oursolution/mitigation222/renewable_energy.cfm))

Dari data diatas maka diperkirakan minyak bumi dengan produksi 348 juta barel per tahun akan habis dalam 24 tahun, gas bumi dengan produksi 2,79 TSCF per tahun akan habis dalam 59 tahun dan batubara dengan produksi 201 juta ton per tahun akan habis dalam 93 tahun. Sementara menurut data BPS tahun 2006, konsumsi energi mengalami peningkatan sebesar 1,59 % dan persediaan energi di Indonesia mengalami pertumbuhan mundur -3,53 %. Artinya dengan kebutuhan energi yang terus meningkat seiring dengan pertumbuhan ekonomi dan pertambahan penduduk maka akan mempercepat kelangkaan energi. Kondisi ini akan menyebabkan krisis energi dan perlu dicari solusi untuk mengatasinya. 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.

Menurut data dari ESDM Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang besar.

Tabel 1.2 Potensi energi terbarukan Indonesia

<b>Energi Non Fosil</b>	<b>Sumber Daya</b>	<b>Setara</b>	<b>Kapasitas Terpasang</b>
Tenaga Air	845 Juta SBM	75,67 GW	4,2000 GW
Panas Bumi	219 Juta SBM	27,00 GW	1,0400 GW
Mini/Mikro Hidro	0,45 GW	0,450 GW	0,0840 GW
Biomassa	49,81 GW	49,81 GW	0,3000 GW
Tenaga Surya	-	4,80 kWh/m <sup>2</sup> /day	0,0080 GW
Tenaga Angin	9,29 GW	9,290 GW	0,0005 GW

Sumber: Presentasi Menteri ESDM, 11 April 2008

([http://www.wwf.or.id/about\\_wwf/whatwedo/climate/oursolution/mitigation222/renewable\\_energy.cfm](http://www.wwf.or.id/about_wwf/whatwedo/climate/oursolution/mitigation222/renewable_energy.cfm))

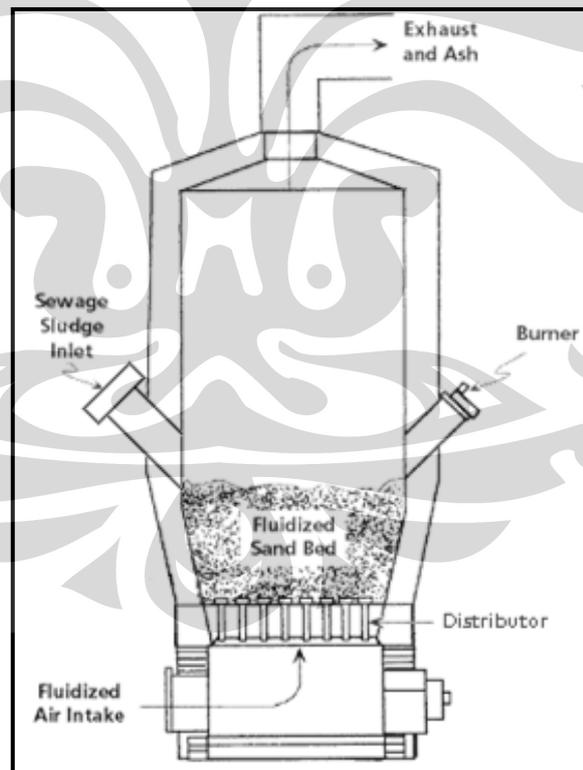
Dari data tersebut, biomassa memiliki potensi terbesar setelah tenaga air. Namun dari potensi tersebut hanya sebagian saja yang sudah dimanfaatkan. Hal ini dikarenakan jumlah instalasi dan kapasitas terpasang masih kurang. Bila kita

memaksimalkan 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. Disamping itu pengurangan pemakaian energi fosil berarti kita juga telah ikut berpartisipasi mengurangi dampak pemanasan global akibat pembakaran bahan bakar fosil. Energi biomassa menjadi penting bila dibandingkan dengan energi terbarukan karena proses konversi menjadi energi listrik memiliki investasi yang lebih murah bila di bandingkan dengan jenis sumber energi terbarukan 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.

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. Hutan di Universitas Indonesia juga memiliki potensi penghasil biomassa yaitu berupa limbah kayu seperti ranting dan dedaunan. Biomassa ini juga tersedia secara gratis. Sebagian besar tanaman yang ada di hutan UI adalah akasia dan meranti. Limbah tersebut apabila dibiarkan saja akan menumpuk dan 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. 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 kedupuluh 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 Pokok Permasalahan**

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 perlu pemasangan termokopel di cerobong dan juga di ruang plenum untuk mengetahui distribusi temperatur di bagian tersebut. Selain itu juga perlu dipelajari pengoperasian FBC yang sudah ada untuk mendapatkan suatu prosedur standar untuk pengoperasian awal dalam pemanasan pasir yang akan digunakan pada operasional FBC UI. Ranting maupun dedaunan dari hutan Universitas Indonesia tersedia cukup banyak dan gratis. Sedangkan cangkang kelapa, untuk memperolehnya harus dibeli.

Hasil pengujian terakhir pada *Fluidized Bed Combustor* Universitas Indonesia adalah dengan menggunakan bahan bakar ranting dan cangkang kelapa. Dari hasil pengujian, diketahui bahwa bahan bakar ranting menghasilkan temperatur yang lebih rendah dibandingkan dengan cangkang kelapa. Pada dasarnya bahan bakar biomassa yang dipakai pada *Fluidized Bed Combustor* Universitas Indonesia bisa terdiri dari campuran berbagai jenis biomassa, misalnya ranting, daun, dan cangkang. Oleh karena itu diperlukan pengujian untuk mengetahui nilai optimal pembakaran, kualitas dan karaktersistik pembakaran serta distribusi temperatur dengan mencampur bahan bakar cangkang kelapa dengan ranting sehingga dapat diketahui perbandingan campuran yang sesuai untuk memperoleh temperatur yang dikehendaki.

#### **1.4 Tujuan Penulisan**

Penulisan ini dimaksudkan sebagai salah satu syarat untuk kelulusan Sarjana Strata 1 Teknik Mesin Universitas Indonesia. Selain itu sesuai perumusan masalah yang telah diuraikan di atas, maka tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui distribusi temperatur pembakaran bahan bakar ranting dan cangkang kelapa dengan menggunakan *fluidized bed combustor* yang ada di Universitas Indonesia.
2. Mengetahui pengaruh jumlah masukan bahan bakar terhadap nilai kalor yang dihasilkan.
3. Mengetahui temperatur maksimal pembakaran pada *Fluidized Bed Combustor* dengan menggunakan bahan bakar ranting dan cangkang kelapa.

#### **1.5 BATASAN MASALAH**

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

1. Penelitian yang dilakukan hanya mencakup eksperimental pembakaran yang tujuannya untuk mengetahui distribusi pembakaran dengan bahan

bakar ranting dan cangkang kelapa. Sedangkan penghitungan nilai *heat rate output* dari proses pembakaran, perhitungan perpindahan panas diantara partikel serta emisi gas buang yang dihasilkan tidak akan dibahas secara mendalam dalam tulisan ini.

2. Bahan bakar biomassa yang digunakan adalah ranting pohon akasia dengan massa 1, 2, 3 kg dan cangkang kelapa dengan massa 1, 2, 3, 4 kg.
3. Dari pengujian ini hanya diambil satu variasi laju aliran udara blower yakni 4,89 m<sup>3</sup>/min.
4. Pencatatan temperatur dilakukan secara manual.

## 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 bahan bakar yang akan digunakan serta menentukan ukurannya
2. Set Up Preparation
  - 2.1. Instalasi Laboratorium
  - 2.2. Penentuan dimensi bahan bakar
  - 2.3. Kalibrasi Instrumentasi
  - 2.4. Instalasi Instrumentasi laboratorium
3. Pengujian dan Pengambilan Data
  - 3.1. Pengukuran variasi putaran pada blower
  - 3.2. 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 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*.



## BAB 2 LANDASAN TEORI

### 2.1 ENERGI BIOMASSA

Biomassa adalah sumber energi yang berasal dari material organik, seperti 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

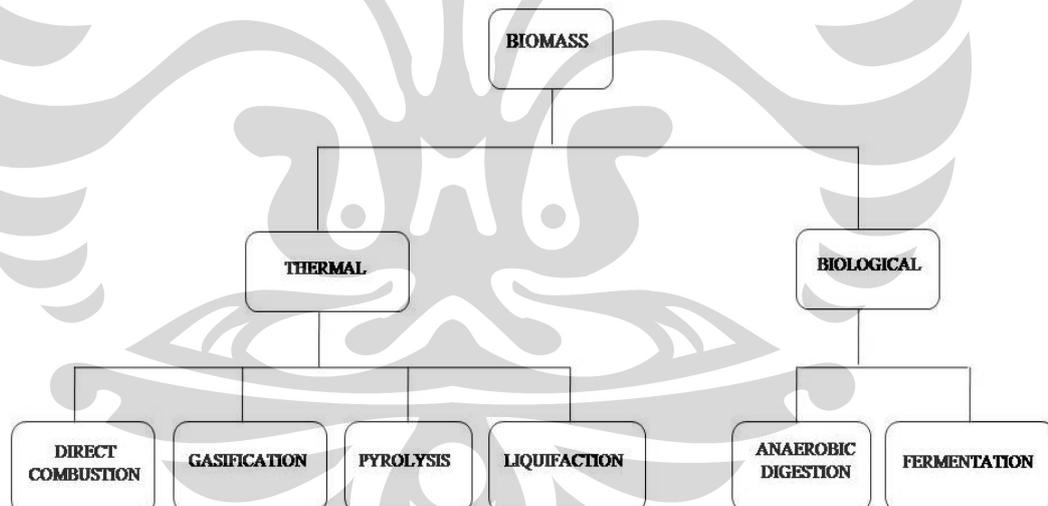
Biogas berasal dari material organik yang telah melewati proses fermentasi atau anaerob digesting oleh bakteri pada koindisi udara kekurangan oksigen yang kemudian menghasilkan gas yang dapat terbakar (combustible gas).

### 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

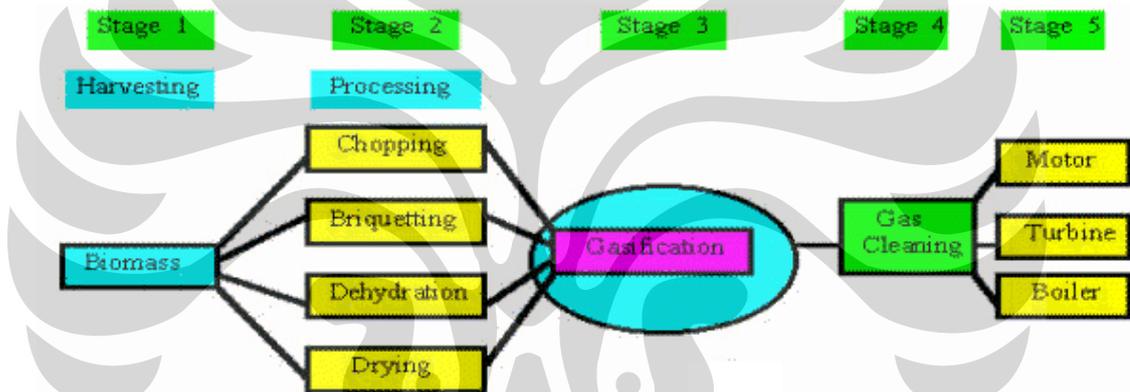
Ada 4 proses pemanasan dalam menghasilkan energi biomassa, yaitu:

#### 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. *Gasification*

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 dibakar seperti H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, N<sub>2</sub>, 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.

### 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  $200^{\circ}\text{C}$ , air akan terpisah dan dibuang, pyrolysis sesungguhnya terjadi pada suhu antara  $280$  sampai  $500^{\circ}\text{C}$ , pyrolysis menghasilkan banyak karbon dioksida, tar, dan sedikit metil alkohol. Antara  $500$  sampai  $700^{\circ}\text{C}$  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

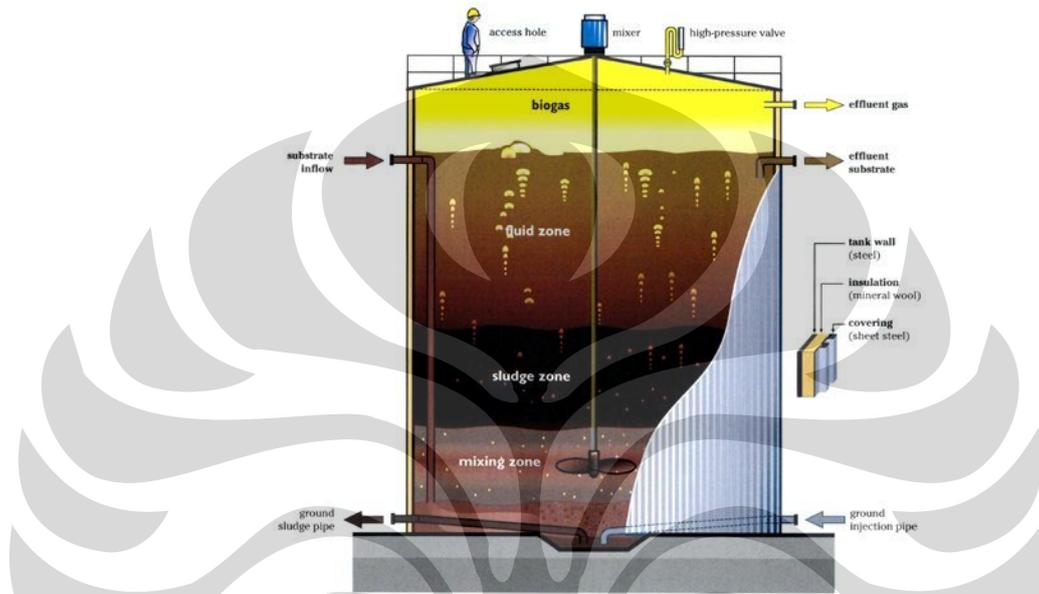
Proses ini bertujuan untuk menghasilkan gas yang dapat terbakar melalui proses yang mengikutsertakan komponen biologi, yaitu bakteri. Proses ini akan menghasilkan gas dari sampah organik seperti kotoran ternak dan sisa-sisa makanan.

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

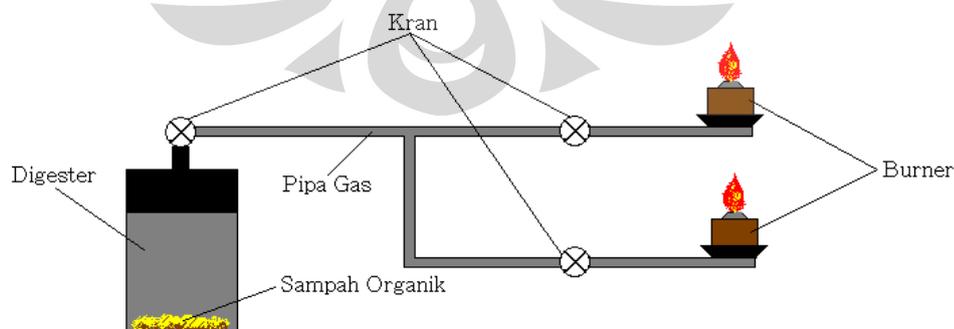
pada sampah organik dan juga kotoran hewan. Anaerobic digestion merupakan proses yang kompleks. Pertama-tama, mikro organisme mengubah material organik kedalam bentuk asam organik. Bakteri anaerob (methanogenic) akan mengubah asam ini dan menyelesaikan proses dekomposisi dengan menghasilkan metana.



Gambar 2.3 Anaerobic Digester

(sumber: [http://www.daviddarling.info/encyclopedia/A/AE\\_anaerobic\\_bacteria.html](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.
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 energy*” yaitu pemanfaatannya yang bersifat ramah lingkungan dan keberadaannya melimpah di dunia khususnya di Indonesia. Untuk pemanfaatan dengan cara *indirect combustor*, biomassa dikenal sebagai *zero CO<sub>2</sub> emission*, dengan kata lain tidak menyebabkan akumulasi CO<sub>2</sub> di atmosfer, dan biomassa juga mengandung lebih sedikit sulfur jika dibandingkan dengan batubara.

Nilai kalor rendah (LHV) biomassa (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.

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

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

Tabel 2.1 *Ultimate Analysis* Beberapa Jenis Biomassa

<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 kayu	50.46	5.97	42.37	0.15	0.05	1
Kertas	43.41	5.82	44.32	0.25	0.20	6.00

Sumber: Walter R. Niesse

Tabel 2.2 *Proximate Analysis* Beberapa Jenis Biomassa

<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 kayu	20	67.89	11.31	0.8
Kertas	10.24	75.94	8.44	5.38

Sumber: Walter R. Niesse

Tabel 2.3 Nilai LHV Beberapa Jenis Biomassa

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

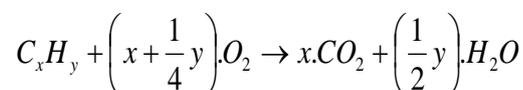
### 2.3 SISTEM REAKSI PEMBAKARAN

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:



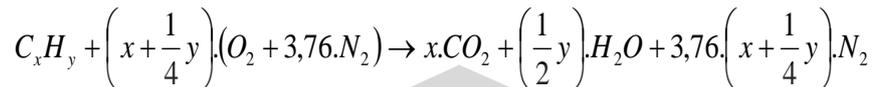
Tiga senyawa dan panas yang dihasilkan tersebut disebut juga sebagai hasil pembakaran.

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 miskin. Begitu juga sebaliknya, apabila bahan bakar yang digunakan lebih banyak dari pada oksigen, maka campurannya disebut campuran kaya. Reaksi untuk pembakaran sempurna adalah :



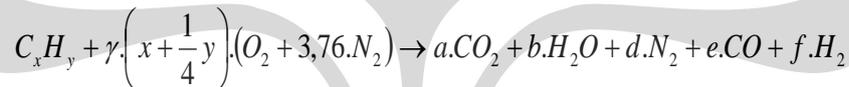
Nilai dari  $x$  dan  $y$  di atas bergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan. Nilai  $x$  adalah fraksi massa untuk kandungan *Carbon*, dan  $y$  fraksi massa untuk kandungan *Hidrogen* dalam bahan bakar.

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.



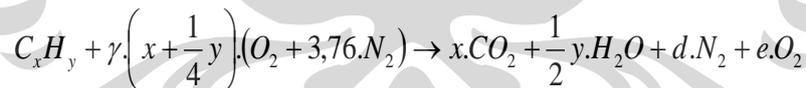
Namun, ada kalanya juga proses pembakaran tidak terjadi pada komposisi ideal antara bahan bakar dengan udara. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, proses yang tidak pada kondisi ideal ini bisa terbagi menjadi dua, yaitu pembakaran kaya dan pembakaran miskin.

- 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 :
 
$$C + O_2 \Rightarrow CO_2$$

$$12 \text{ kg } C + 32 \text{ kg } O_2 \Rightarrow 44 \text{ kg } CO_2$$

$$1 \text{ kg } C + 2,67 \text{ kg } O_2 \Rightarrow 3,67 \text{ kg } CO_2$$
- Hidrogen terbakar sempurna akan membentuk  $H_2O$  menurut persamaan :
 
$$4H + O_2 \Rightarrow 2H_2O$$

$$4 \text{ kg } H + 32 \text{ kg } O_2 \Rightarrow 36 \text{ kg } H_2O$$

$$1 \text{ kg } H + 8 \text{ kg } O_2 \Rightarrow 9 \text{ kg } H_2O$$
- Belerang terbakar akan membentuk  $SO_2$  menurut persamaan :
 
$$S + O_2 \Rightarrow SO_2$$

$$32 \text{ kg } S + 32 \text{ kg } O_2 \Rightarrow 64 \text{ kg } SO_2$$

$$1 \text{ kg } S + 1 \text{ kg } O_2 \Rightarrow 2 \text{ kg } SO_2$$
- Nitrogen terbakar membentuk  $NO_2$  menurut persamaan :
 
$$N + O_2 \Rightarrow NO_2$$

$$14 \text{ kg } N + 32 \text{ kg } O_2 \Rightarrow 46 \text{ kg } NO_2$$

$$1 \text{ kg } N + 2,29 \text{ kg } O_2 \Rightarrow 3,29 \text{ kg } NO_2$$

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

$$A_o = \frac{2,67C + 8H - O + S + 2,29N}{0,23} \text{ kg udara / kg bahan bakar} \quad (2.1)$$

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 :

$$m = \frac{A - A_o}{A} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

keterangan :  $m = \text{excess air } (\%)$

$A_o = \text{jumlah udara teoritis (kg}_{\text{udara}} / \text{kg}_{\text{bahan bakar}})$

$A = \text{jumlah udara aktual (kg}_{\text{udara}} / \text{kg}_{\text{bahan bakar}})$

### 3. Zat yang dihasilkan dari pembakaran

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

$$m_{gb} (kg) = m_{bb} + A - m_{abu} \quad (2.3)$$

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

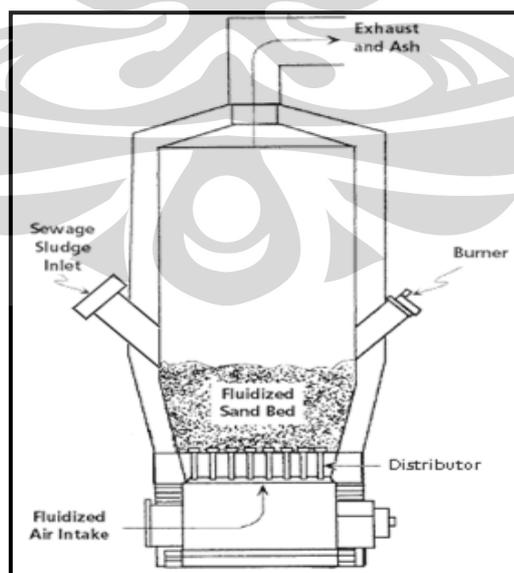
*Fluidized bed combustor* adalah sebuah tungku pembakar yang menggunakan media pengaduk berupa pasir seperti pasir kuarsa dan silika, tujuannya agar terjadi pencampuran (*mixing*) yang homogen antara udara dengan butiran-butiran pasir tersebut. *Mixing* yang konstan antara partikel-partikel mendorong 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.

Hamparan 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 unggun 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

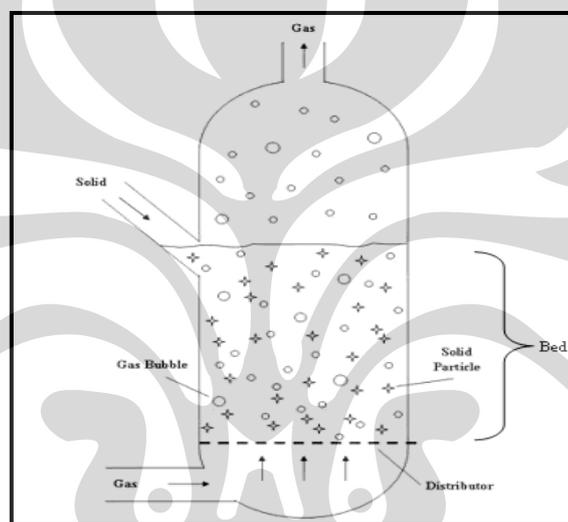
meningkat seiring dengan meningkatnya laju pirolisis dari bahan bakar padat karena kontak langsung dengan partikel hamparan yang panas. Aliran udara fluidisasi meniup abu halus dari hamparan. Gas-gas pembakaran biasanya diproses lagi di *wet scrubber* dan abunya dibuang secara *landfill*.

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 2.5 Skematis *Fluidized Bed Combustor*

Suatu pandangan potongan *fluidized bed combustor* dipertunjukkan seperti gambar 2.5. 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 terbang 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 2.6 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 *Bubbling 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.

*Bubbling Fluidized Bed* beroperasi ketika kecepatan aliran udara tidak cukup tinggi untuk membawa partikel hampan 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, hampan 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 2.7a, ruang bakar masih pada temperatur ruang. Pasir sebagai media pengaduk sekaligus pertukaran kalor dituang ke dalam ruang bakar.

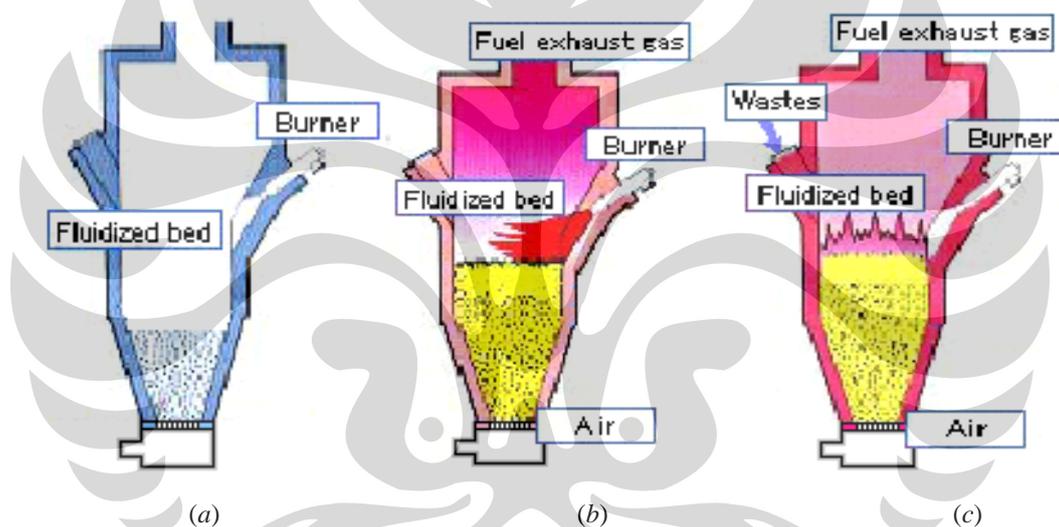
#### 2. Proses pemanasan

Pada tahapan proses pemanasan, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.7b, 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 °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 2.7c, 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 2.7 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.

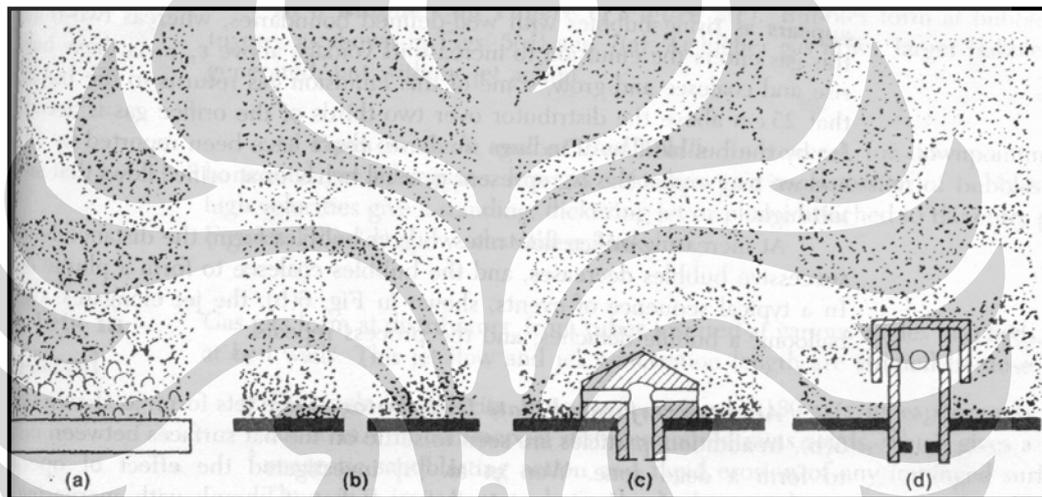


Gambar 2.8 Ruang Bakar Utama *Fluidized Bed Combustor* UI

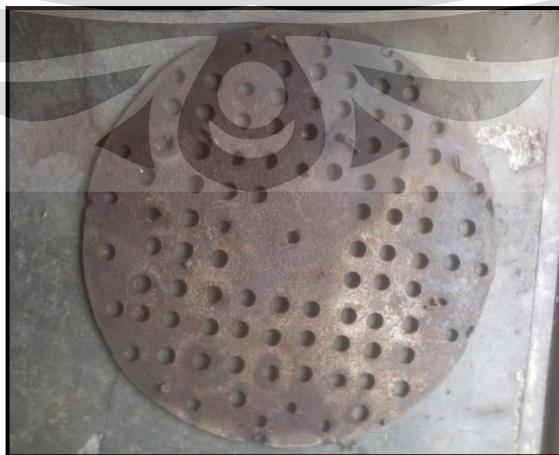
Ketika sistem bekerja dalam fluidisasi dengan kecepatan tinggi, bahan bakar akan terbakar setelah fase *bubbling*. Di dalam ruang bakar akan terjadi urutan-urutan reaksi, yaitu: pengeringan (*drying*), pemanasan (*heating*), pirolisa partikel solid, dan oksidasi. Ruang bakar utama ini merupakan area 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 2.9.



Gambar 2.9 Perilaku Gelembung Setiap Jenis Distributor; (a) *Porous Plate*; (b) *Perforated Plate*; (c) *Nozzle-type Tuyere*; (d) *Bubble Cap Tuyere*.



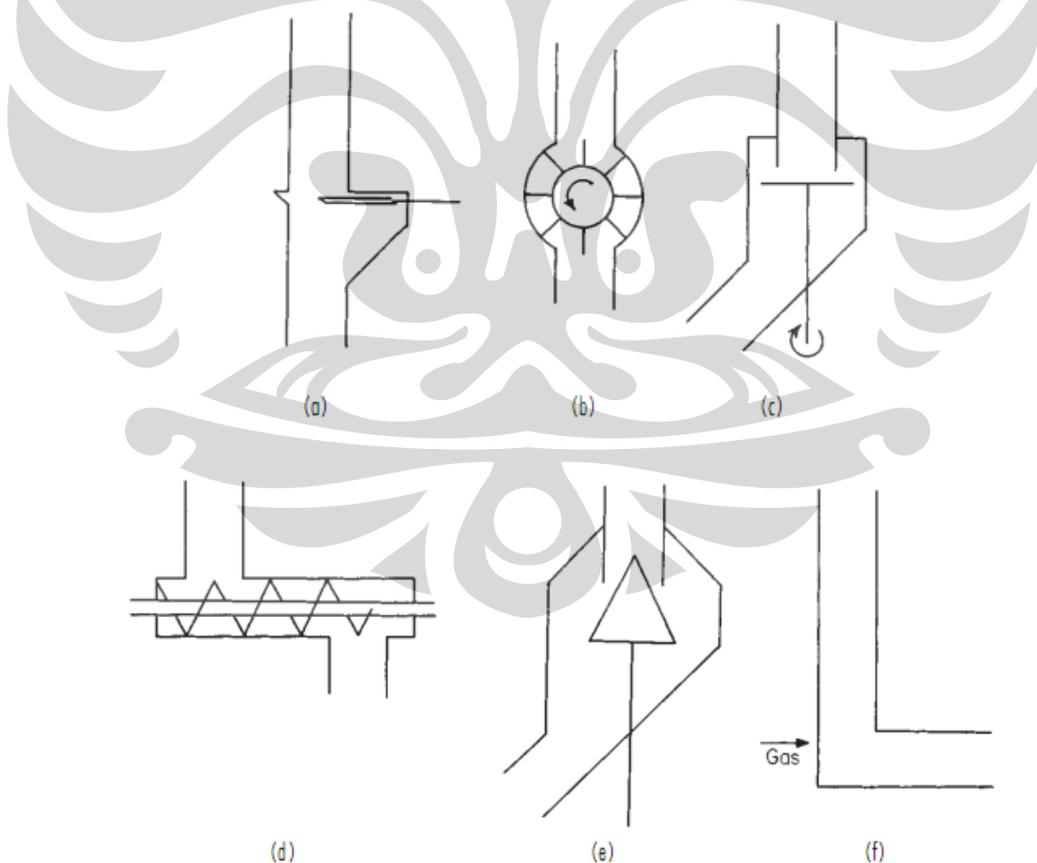
Gambar 2.10 Distributor yang digunakan pada *Fluidized Bed Combustor* UI

### 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 2.11 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.

#### 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 2.12 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  $\mu\text{m}$  sampai 100  $\mu\text{m}$  dan densitas partikel kurang dari 1400  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Material ini paling mudah terfluidisasi dibandingkan kelompok yang lain.

- *Group B*

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

- *Group C*

Kelompok ini memiliki ukuran rata-rata diameter partikel yang lebih kecil ( $<30 \mu\text{m}$ ) 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  $600 \mu\text{m}$  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  $400 - 600 \mu\text{m}$ . Pasir jenis ini diklasifikasikan diantara grup B. Pasir kuarsa dan pasir silika tidak jauh berbeda kandungannya, keduanya sama-sama memiliki kandungan  $\text{SiO}_2$ . Kedua pasir tersebut berasal dari batuan yang sangat keras sehingga sangat cocok digunakan untuk penggunaan pada temperatur 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* dan *elektrostatik precipitator (EP)*.



Gambar 2.13 *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.

#### 2.4.3.7 Instrumentasi

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.

2. *Termokopel*

Berfungsi untuk mengukur temperatur di dalam ruang bakar.

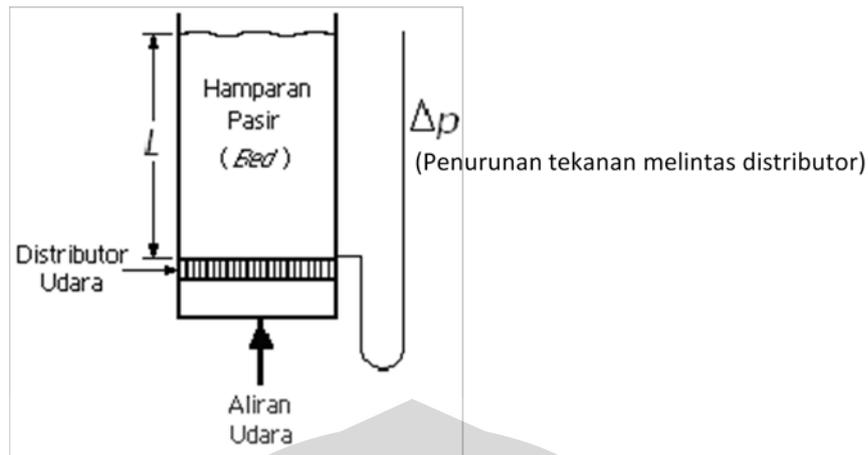
3. *Data logger*

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

## 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.

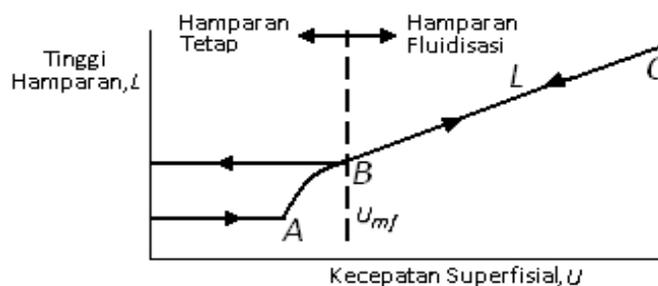


Gambar 2.14 Skematik Fluidisasi

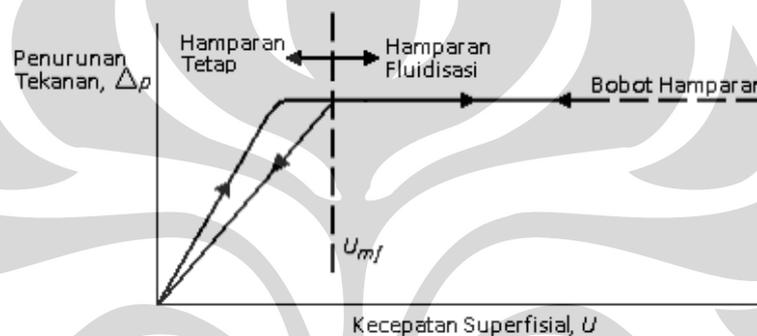
### 2.5.2 Kondisi Fluidisasi

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 hampanan tanpa menyebabkan terjadinya gerakan pada partikel. Jika partikel itu cukup kecil, aliran di dalam saluran-saluran di antara partikel-partikel dalam hampanan 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 hampanan pun tidak berubah.

Pada kecepatan tertentu, penurunan tekanan melintas hampanan itu akan mengimbangi gaya gravitasi yang dialaminya; dengan kata lain, mengimbangi bobot hampanan, dan jika kecepatan masih dinaikkan lagi, partikel itu akan mulai bergerak. Titik ini digambarkan oleh titik A pada grafik gambar 2.21. Jika kecepatan itu terus ditingkatkan lagi, partikel-partikel itu akan memisah dan menjadi cukup berjauhan satu sama lain sehingga dapat berpindah-pindah di dalam hampanan itu, dan fluidisasi yang sebenarnya pun mulailah terjadi (titik B). Jika hampanan itu sudah terfluidisasi, penurunan tekanan melintas hampanan tetap konstan (gambar 2.19 dan 2.20), akan tetapi tinggi hampanan bertambah terus jika aliran ditingkatkan lagi.



Gambar 2.15 Hubungan Tinggi Hamparan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hamparan Zat Padat



Gambar 2.16 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 menjauh 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 padatannya berupa kaca, gerakan dari partikel saat fluidisasi terjadi dalam ruang sempit dalam hamparan. Seiring dengan bertambahnya kecepatan fluida dan penurunan tekanan, maka hamparan akan tereksansi 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 agregativ 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 “hampan didih” (*boiling bed*).

Perilaku hampan 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 hampan. Gelembung-gelembung cenderung bersatu, dan menjadi besar pada waktu naik melalui hampan 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 hampan, 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*)  $d_p$ :

$$d_p = \frac{1}{\sum x / d_{pi}} \quad (2.1)$$

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 ( $\rho_p$ ), yang merupakan berat dari suatu partikel dibagi volumenya dan menyertakan lubang atau pori-pori.

#### 2.5.4.3 Sphericity

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

$$\psi = \frac{d_{sv}}{d_v} \quad (2.2)$$

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

#### 2.5.4.4 Bed voidage

*Bed voidage* ( $\epsilon$ ) 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 ( $\rho_p$ ) dan massa jenis borongan pada hamparan ( $\rho_b$ ).

$$\epsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (2.3)$$

#### 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.

$$Re_{mf} = (1135,7 + 0,0408 \cdot Ar)^{1/2} - 33,7 \quad (2.4)$$

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

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

bilangan *Archimedes* ( $Ar$ ):

$$Ar = \frac{\bar{d}_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu_f^2} \quad (2.5)$$

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

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

$\rho_f$  = densitas fluida gas (  $kg/m^3$  )

$\rho_p$  = densitas partikel pasir (  $kg/m^3$  )

$\mu_f$  = 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 ( $\Delta P_b$ ) akan kurang lebih sama dengan berat hamparan per satuan luas.

Persamaan penurunan tekanan melalui distributor melintas hamparan pasir adalah:

$$\Delta P_b = h(\rho_p - \rho_f)(1 - \epsilon)g \quad (2.6)$$

keterangan :

- $\Delta P_b$  = penurunan tekanan melewati hamparan ( $N/m^2$ )
- $h$  = tinggi hamparan pasir ( $kg$ )
- $\rho_p$  = massa jenis partikel pasir ( $kg/m^3$ )
- $\rho_f$  = massa jenis fluida udara ( $kg/m^3$ )
- $\epsilon$  = *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,  $\Delta P_D$ . 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:

$$U_{or} = \frac{U_o}{f_{oa}} \quad (2.7)$$

Sehingga persamaan penurunan tekanan melalui distributor adalah:

$$\Delta P_D = \frac{\rho_f}{2} \left\{ \left( \frac{U_{or}}{C_d} \right)^2 - U_o^2 \right\} \quad (2.8)$$

yang mana  $\rho_f$  merupakan massa jenis udara dan  $C_d$  merupakan *orrifice discharge coefficient*.

*Orrifice 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:

$$C_d = 0.82 \left( \frac{t}{d_{or}} \right)^{0.13} \quad (2.9)$$

Keterangan :

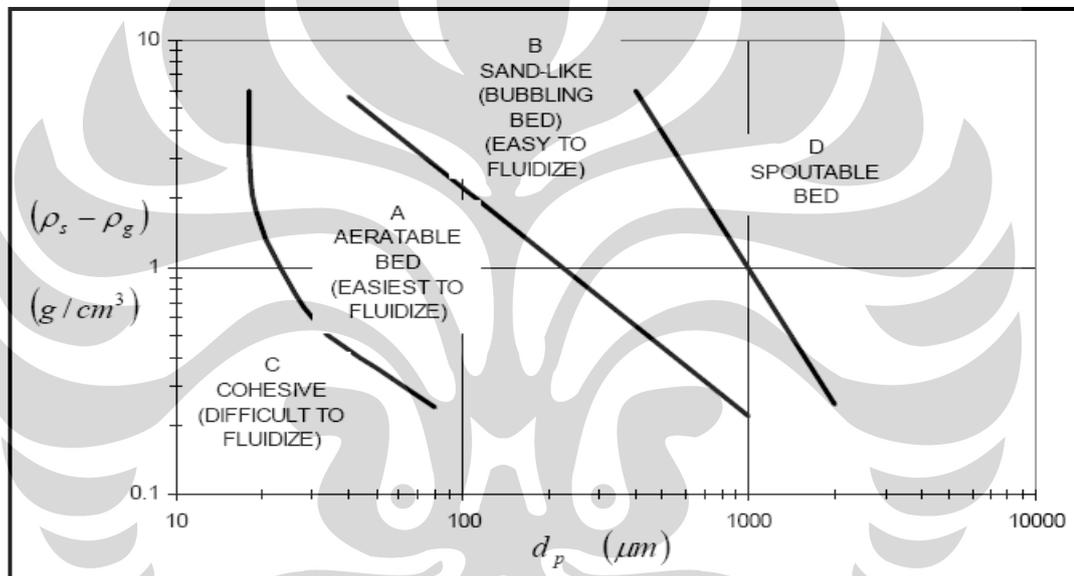
- $\Delta P_d$  = penurunan tekanan melewati distributor (  $N/m^2$  )
- $U_o$  = kecepatan udara superfisial (  $m/s$  )
- $U_{or}$  = kecepatan udara rata-rata melewati orifis (  $m/s$  )
- $f_{or}$  = *fractional open area* (  $m^2$  )
- $\rho_f$  = massa jenis fluida udara (  $kg/m^3$  )
- $C_D$  = *Orrifice 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 mengategorikan 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 2.17 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  $1400 \text{ kg/m}^3$  dan memiliki ukuran berkisar antara 20 sampai  $100 \mu\text{m}$ . Para peneliti telah menunjukkan dengan meyakinkan bahwa terdapat gaya antar partikel bahkan pada pasir seperti *cracking catalyst* yang menunjukkan pada kelompok ini. Hamparan 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 hamparan (*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 hamparan mengempis kembali sehingga pada keadaan kurang mengembang yang kira kira pada tingkat mengembangnya hamparan di bawah kondisi fluidisasi minimum dan kebanyakan udara berlebih akan mengalir melalui hamparan seperti fase gelembung, yakni yang sering disebut dengan fluidisasi agregativ. Kecepatan udara pada saat yang mana hamparan 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  $\mu m$  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 hamparan kecil dan hamparan 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 hamparan dan kecepatan udara berlebih ( $U - U_{mf}$ ). Pasir jenis ini memperlihatkan pengembangan hamparan yang kurang stabil; gelembung (fluidisasi agregativ) terjadi pada kecepatan fluidisasi minimum atau sedikit lebih di atasnya. Gelembung cenderung berkembang sampai diameter gelembungnya terbatas oleh ukuran dari hamparan (*bed*) pasir *group B*.

c) *Group C*

Pasir *group C* merupakan pasir yang ukuran rata-ratanya lebih kecil dibandingkan yang lainnya ( $<30 \mu m$ ) 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

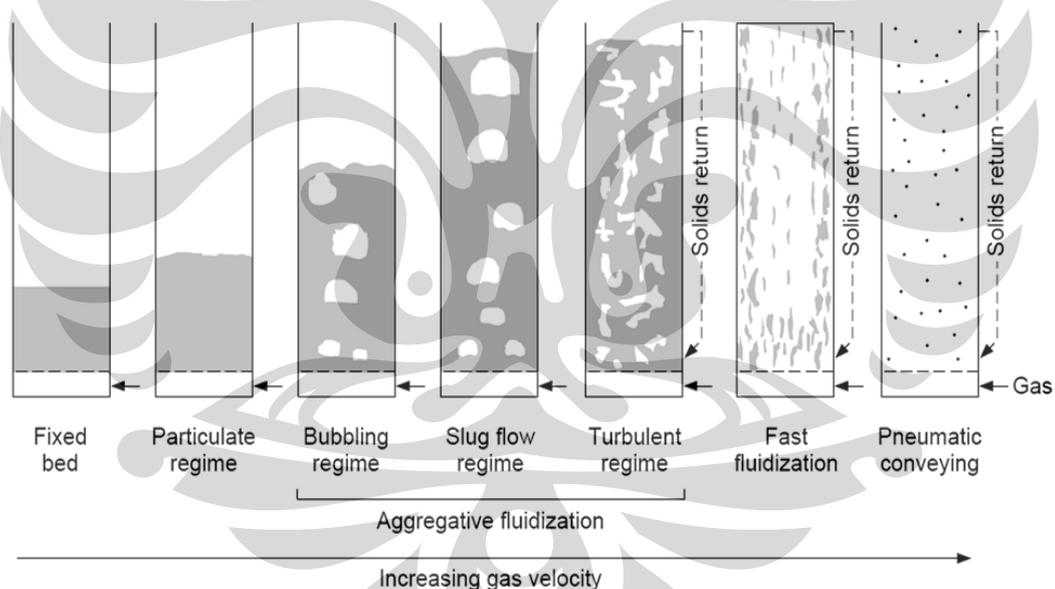
(Sumber: Geldart, 1991)

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	Typical solids 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 <sup>a</sup>	Very low	High	Moderate	Low	
5. Gas backmixing <sup>a</sup>	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	
	Mean particle size within group	Cohesiveness increases as $d_p$ decreases	Properties improve as size decreases	Properties improve as size decreases	Not known
Effect on properties 1 to 7 of:	Particle size distribution <sup>b</sup>	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

<sup>a</sup> At equal  $U-U_{mf}$ .<sup>b</sup> At equal  $d_p$ .

#### 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 turbulents 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 2.18 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 (cangkang kelapa dan ranting pohon).

### **3.1 PERSIAPAN PENGUJIAN**

#### **3.1.1 Bahan Bakar Biomassa**

Di Indonesia sekarang ini mempunyai potensi yang cukup luas pada sumber energi biomassa nya, 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 dua jenis, yaitu cangkang kelapa dan ranting pohon. Alasan menggunakan kedua 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 Cangkang Kelapa**

Cangkang kelapa (*coconut shell*) yang digunakan disini ialah dari jenis buah kelapa pada umumnya yang biasa dipakai olah masyarakat dan bukan jenis kelapa sawit. Untuk melakukan pengujian pada sistem feeder, cangkang kelapa ini dihancurkan terlebih dahulu untuk mendapatkan ukuran atau dimensi partikelnya ( $d_p$ ) yang lebih kecil. Hal ini dilakukan karena cangkang kelapa yang diperoleh dari sumbernya masih berukuran besar atau setengah bulat. Penghancuran cangkang kelapa ini menjadi kecil juga berguna untuk mempermudah cangkang tersebut terbakar saat pengujian pembakaran. Dimensi cangkang yang diperoleh setelah dihancurkan adalah sebagai berikut :

- Partikel cangkang ( $d_p$  cangkang) :
  - panjang = 5 – 25 mm
  - lebar = 5 – 25 mm
  - tebal = 4 – 5 mm



Gambar 3.1 Cangkang kelapa setelah dihancurkan

#### 3.1.1.2 Ranting

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 ini dipotong-potong terlebih dahulu untuk mendapatkan ukuran atau dimensi partikelnya ( $d_p$ ) yang lebih kecil. Hal ini dilakukan karena ranting yang diperoleh dari sumbernya masih berukuran



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 °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

<i>Substansi</i>	<i>Specific Heat</i> ( cal/gram.°C )	<i>Specific Heat</i> ( J/kg.°C )
air (murni)	1,00	4186
lumpur basah	0,60	2512
es (0 °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

(Sumber : [http://apollo.lsc.vsc.edu/classes/met130/notes/chapter2/spec\\_heats.html](http://apollo.lsc.vsc.edu/classes/met130/notes/chapter2/spec_heats.html))

Tabel 3.2 Sifat Fisik, Termal, dan Mekanik Pasir

<i>Properties</i>	<i>Silica Sand</i>
<i>Particle density ( kg/m<sup>3</sup> )</i>	2600

<i>Bulk density ( kg/m<sup>3</sup> )</i>	1300
<i>Thermal conductivity ( Wm<sup>-1</sup>K )</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>

Silika (sumber: [http://www.azom.com/Details.asp?ArticleID=1114#\\_Sand](http://www.azom.com/Details.asp?ArticleID=1114#_Sand))

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  $\mu\text{m}$  sampai 500  $\mu\text{m}$ . Perlu diperhatikan juga bahwa pasir yang digunakan harus benar-benar kering untuk memperoleh fluidisasi yang baik.

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  $\mu\text{m}$  sampai 500  $\mu\text{m}$  adalah partikel pasir dengan ukuran diameter partikel pasir antara *mesh 35* sampai *mesh 50*.

Tabel 3.3 Distribusi Ukuran Pengayakan Pasir Silika

Sieve Size		Individual Percent Retained				
US	$\mu m$	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

(sumber: AGSCO silica sand technical data sheet)

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 hamparan pasirnya, yaitu :

- massa jenis partikel pasir ( $\rho_p$ ) =  $2600 \text{ kg/m}^3$
- massa jenis borongan pasir ( $\rho_b$ ) =  $1300 \text{ kg/m}^3$
- diameter hamparan pasir ( $d_b$ ) =  $63,5 \text{ cm} = 0,635 \text{ m}$
- tinggi hamparan pasir (*bed height*) =  $8 \text{ cm} = 0,08 \text{ m}$

### 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 :

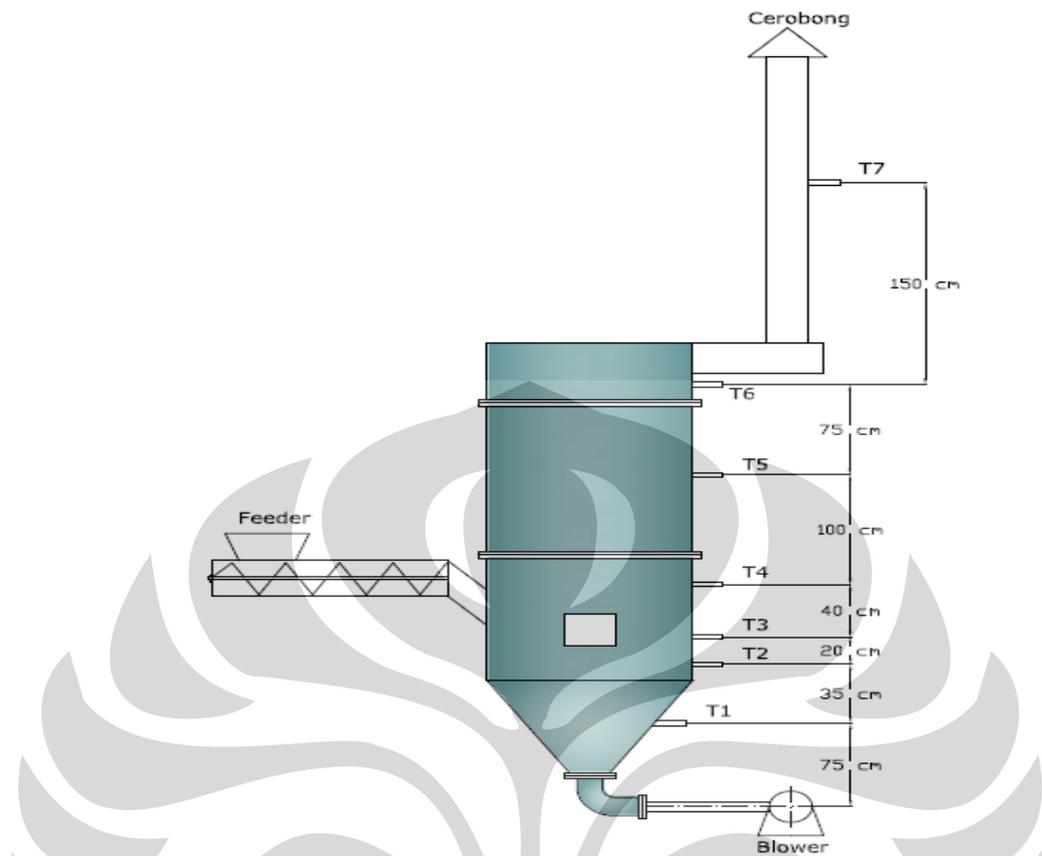
- *rated voltage* : 220 V
- *rated frequency* : 50 Hz
- *peak power* : 4 kVA

- *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. Tujuh 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 titik sumbu saluran udara FBC yang ada (T1 berada dalam plenum, T2 berada dalam bed berada paling dekat dengan hampan pasir serta T6 berada paling jauh dari hampan pasir. Sedangkan T7 berada di dalam cerobong), yaitu :

- T1 = 75 cm = 0,75 m
- T2 = 110 cm = 1,10 m
- T3 = 130 cm = 1,30 m
- T4 = 170 cm = 1,70 m
- T5 = 270 cm = 2,70 m
- T6 = 345 cm = 3,45 m
- T7 = 495 cm = 4,95 m



Gambar 3.5 Ketinggian Termokopel



Gambar 3.6 Konfigurasi Termokopel Dari kiri ke Kanan T1-T7

### 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. Selain itu digunakan juga untuk menimbang pasir yang akan dimasukkan kedalam

bed. Timbangan yang kecil digunakan untuk menimbang massa yang berat tidak lebih dari 5 kg, sedangkan timbangan besar digunakan untuk menimbang massa yang lebih berat misalnya untuk menimbang pasir yang dimasukkan ke dalam bed.



Gambar 3.9 Timbangan untuk skala besar dan kecil

#### 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. Diantara *screw feeder* dan ruang bakar terdapat *sliding door* yang berguna untuk membuka ataupun menutup akses ke ruang bakar, sehingga pada saat tidak ada pemasukan bahan bakar ke ruang bakar akses ke ruang bakar dapat ditutup. 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 $\emptyset$
<i>Frequency ( Hz )</i>	50 / 60
<i>Power ( kW )</i>	2,2

<i>Voltage ( V )</i>	220 - 230 / 380 - 400
<i>Current ( A )</i>	8 / 4.6
<i>Pressure (max) ( mm H<sub>2</sub>O )</i>	2500 / 2800
<i>Air Flow (max) ( m<sup>3</sup>/min )</i>	5.0 / 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 di inverter untuk mencari set untuk putaran (rpm), lalu tekan tombol *enter* di tengah.
6. Tekan tombol di 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. Sebaiknya putaran blower dinaikkan secara bertahap dan perlahan untuk mencegah trip karena beban naik tinggi secara tiba-tiba.
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. Dan setelah mencapai suhu yang cukup tinggi di ruang bakar, maka burner dapat dimatikan. Akan tetapi, setelah melakukan beberapa kali percobaan, burner tidak dapat menaikkan temperatur pasir secara efektif dan hanya bisa mencapai kisaran 200 °C – 250 °C dari temperatur yang diinginkan 500 °C – 550 °C. Hal ini disebabkan oleh karena penempatan burner yang kurang tepat sehingga nyala api burner tidak mengenai hamparan pasir dalam bed. Dari pengamatan di lapangan posisi burner terlalu tinggi di atas hamparan pasir. Meskipun pada saat percobaan pemanasan awal dilakukan dengan membakar *support fuel* di luar bed, disini penulis tetap menjelaskan tahapan pengoperasian burner. 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 dan pastikan tidak ada kebocoran di selang saluran gas.
2. Pastikan posisi *gas main valve* dan *gas needle valve* yang ada di burner sudah terbuka.
3. Cek tekanan kerja gas adalah 20~30 mbar (200 ~ 300 mm H<sub>2</sub>O).
4. 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.
5. 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.

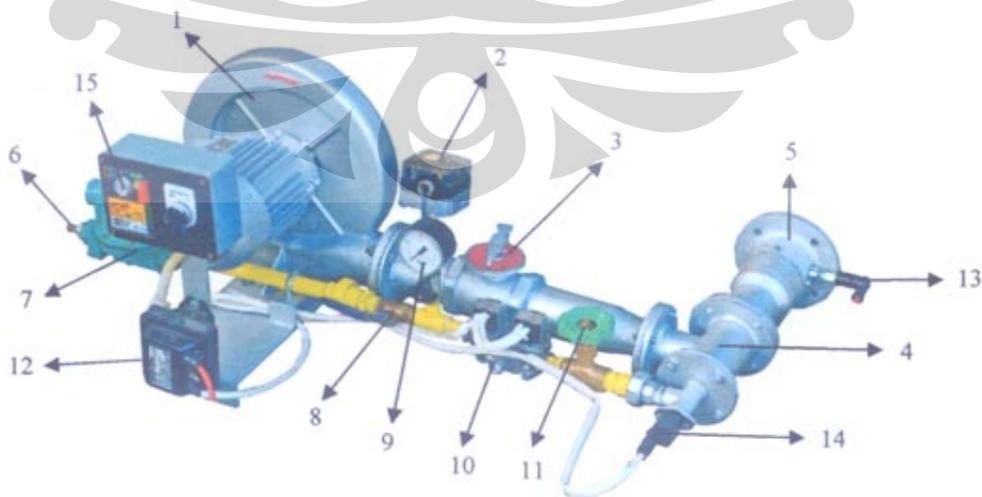
6. Setelah 10 detik proses *pre-purge*, yang berguna untuk mengusir gas yang terperangkap (bila ada), maka *solenoid valve* untuk gas akan membuka. Pada saat bersamaan *ignition trafo* bekerja untuk membentuk spark listrik pada elektroda busi. Pertemuan campuran udara dan gas dengan percikan listrik akan menghasilkan nyala api. Stel besarnya volume gas untuk api pilot dengan memutar *needle valve* sampai api menyala konsisten.
7. *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*. Sebaiknya *UV sensor* dibersihkan setelah melakukan percobaan karena dari pengalaman, terdapat kotoran yang menempel di *UV sensor* akibat asap pembakaran. Kotoran ini akan menghambat *UV sensor* mendeteksi nyala api akibatnya *solenoid valve* akan menutup aliran gas sehingga burner tidak bisa menyala.
8. Setelah nyala api terbentuk dapat dilakukan penyetelan untuk mendapat mutu nyala api yang bagus dan panjang api yang diinginkan.
9. Jika ingin mematikan burner, putar saklar burner ke posisi *off* dan pastikan bahwa api burner sudah mati semua.
10. 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 yaitu skala nomor 4 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 stelan *damper* tidak berubah.
- *Penyetelan panjang api* :
    - a. Stel *gas regulator* sehingga tekanan kerja antara 20~30 *mbar* (200~300 *mmH<sub>2</sub>O*).
    - 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 <i>kW</i>

### 3.2.4 Perlengkapan keselamatan kerja / *Personal Protective Equipment (PPE)*

Mengingat kondisi lingkungan kerja memiliki temperatur yang tinggi dan berdebu akibat sisa hasil pembakaran maka dalam melaksanakan percobaan perlu diperhatikan juga kesehatan dan keselamatan kerja. Untuk itu penggunaan *personal protective equipment (PPE)* sangat dianjurkan setiap melakukan percobaan sehingga hal-hal yang mengganggu kesehatan seperti mata iritasi karena debu, luka bakar dan lain-lain dapat dihindari.

Beberapa perlengkapan keselamatan kerja / *personal protective equipment (PPE)* yang digunakan di laboratorium Fluidized Bed Combustor UI adalah :

- Sarung Tangan ( Hand Gloves )
- Masker
- Kaca Mata ( Safety Goggles )
- Helmet
- Baju kerja (Coverall)



Gbr. 3.15 Perlengkapan pelindung kerja

### 3.3 PROSEDUR PENGUJIAN PEMBAKARAN

Pengujian pembakaran dengan bahan bakar biomassa (cangkang kelapa dan ranting pohon) 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 ketinggian termokopel tiap satuan waktu dengan *flow rate* udara konstan dari blower, variasi *feed rate duration*, serta lamanya waktu yang dibutuhkan untuk melakukan sebuah pengujian ini sampai selesai. Pengujian ini keseluruhan meliputi pengujian variasi *feed rate duration* 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 tujuh titik ketinggian pada ruang bakar, *freeboard area* (area di atas pasir) dan cerobong asap 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 3.16 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. Nyalakan support fuel di luar FBC sampai membara yang akan dimasukkan ke dalam bed.
3. Menyalakan blower sebagai penyedia udara saat proses pembakaran berlangsung, selain itu juga untuk proses fluidisasi pasir agar panasnya tersebar merata di seluruh pasir. Putaran blower yang digunakan adalah 3000 RPM.
4. Menyalakan burner untuk memanaskan *bed* (pasir) hingga *bed temperature* mencapai suhu sekitar 200 °C, kemudian burner dimatikan.
5. Setelah itu memasukkan support *fuel* yang dapat berupa cangkang kelapa ataupun ranting pohon yang sudah membara ke dalam ruang bakar dengan *feed rate* 1 kg per menit melalui pintu utama dan menambahkan daun ke dalam ruang bakar untuk membantu mempercepat pembakaran *support fuel* sehingga temperatur dapat ditingkatkan dengan cepat sampai mencapai suhu sekitar 500 – 550 °C. Rata-rata waktu yang dibutuhkan sekitar 30 – 35 menit dan temperatur pada *data logger* dicatat setiap menitnya. Pada temperatur ini bahan bakar biomassa (ranting dan cangkang) sudah dapat terbakar dengan sendirinya (*self-sustained combustion*). Support fuel ditambahkan ke dalam ruang bakar untuk menaikkan temperatur dan ditunggu hingga suhunya stabil 600-650 °C.

#### 3.3.2.2 Prosedur pengambilan data pembakaran

1. Setelah temperatur stabil, bahan bakar yang sudah disiapkan yaitu cangkang, ranting maupun campuran ranting dan cangkang dengan perbandingan 1:1, 2:1, 3:1, dan 4:1 dengan sejumlah massa tertentu (1 kg, 2 kg, 3 kg, dan 4 kg) dimasukkan ke dalam ruang bakar melalui pintu utama. Bahan bakar tidak dimasukkan melalui *screw feeder* karena saat percobaan *screw feeder* mengalami pemuaian akibat temperatur yang tinggi sehingga tidak bisa berputar dengan baik.
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

yang bisa diketahui dari penurunan temperatur, selanjutnya dimasukkan massa yang 2 kg melalui pintu utama, 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 400 – 450 °C, maka tidak dicatat lagi perubahannya.

### 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 3000 rpm (putaran maksimum).
3. Saat blower dinyalakan dengan berbagai putaran tersebut, maka anemometer yang ada didekatkan ke bagian keluaran dari pipa *output* blower agar dapat terbaca angka laju alirannya dalam satuan meter kubik per menit ( $m^3$ /menit) di tiap putaran blower. Untuk dapat mengetahui laju udaranya, maka diketahui dahulu luas area penampang pipa keluarannya dan kemudian dikalikan dengan kecepatannya. Luas penampang areanya adalah  $0,00237 m^2$ .
4. Data yang terbaca masih berupa satuan m/detik 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 karakteristik temperatur pembakaran ranting dan cangkang kelapa pada *fluidized bed combustor* UI dengan perbedaan laju aliran massa 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 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 supplier* yang mengalirkan udara ke dalam ruang bakar.

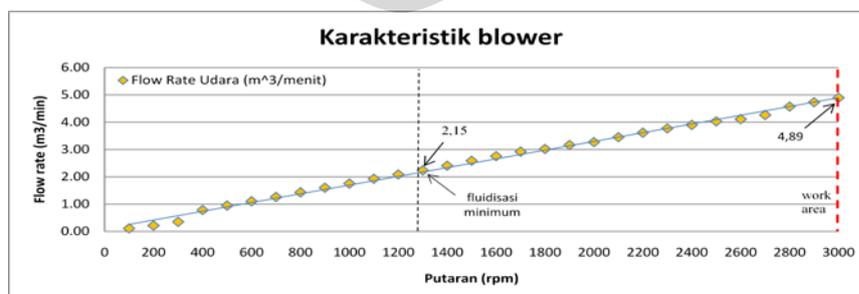
Tabel 4.1 Hubungan Putaran Blower dengan Laju Aliran Udara

Putaran (rpm)	Kecepatan (m/s)	Flow rate (m <sup>3</sup> /min)	Flow rate (lpm)
100	0.78	0.11	110.92
200	1.51	0.21	214.72
300	2.45	0.35	348.39
400	5.51	0.78	783.52
500	6.63	0.94	942.79
600	7.73	1.10	1099.21
700	8.84	1.26	1257.05
800	10.03	1.43	1426.27
900	11.24	1.60	1598.33
1000	12.3	1.75	1749.06
1100	13.56	1.93	1928.23
1200	14.66	2.08	2084.65

Tabel 4.1 Hubungan Putaran Blower dengan Laju Aliran Udara (sambungan)

Putaran (rpm)	Kecepatan (m/s)	Flow rate (m <sup>3</sup> /min)	Flow rate (lpm)
1300	15.7	2.23	2232.54
1400	16.92	2.41	2406.02
1500	18.18	2.59	2585.20
1600	19.38	2.76	2755.84
1700	20.52	2.92	2917.94
1800	21.23	3.02	3018.91
1900	22.26	3.17	3165.37
2000	23.01	3.27	3272.02
2100	24.26	3.45	3449.77
2200	25.4	3.61	3611.88
2300	26.52	3.77	3771.14
2400	27.41	3.90	3897.70
2500	28.33	4.03	4028.53
2600	28.9	4.11	4109.58
2700	29.96	4.26	4260.31
2800	32.15	4.57	4571.73
2900	33.27	4.73	4730.99
3000	34.4	4.89	4891.68

Di dalam tabel tersebut terdapat data mengenai kecepatan udara laju aliran udara dengan satuan m<sup>3</sup>/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* (m<sup>3</sup>/min). Area kerja yang dipakai untuk pengujian pembakaran ialah pada putaran 3000 rpm yang juga merupakan putaran maksimum blower tersebut.

Gambar 4.1 Grafik Putaran Blower terhadap *Flow Rate* Udara

#### 4.1.2 Karakteristik Pembakaran Biomassa

Eksperimental pembakaran biomassa dengan menggunakan *fluidized bed combustor* UI ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik pembakaran biomassa dengan aliran udara ke dalam ruang bakar sebesar  $4.89 \text{ m}^3/\text{menit}$  atau dengan putaran blower 3000 rpm. Dalam hal ini pengujian dilakukan untuk dua jenis bahan bakar yaitu cangkang kelapa dan ranting pohon.

Beberapa parameter yang menjadi pertimbangan antara lain sebagai berikut :

- Laju aliran udara ke ruang bakar  $4.89 \text{ m}^3/\text{menit}$
- Massa bahan bakar cangkang (1 kg, 2 kg, 3 kg, dan 4 kg)
- Massa bahan bakar ranting (1 kg, 2 kg, 3 kg)
- Ketinggian termokopel (75 cm; 110 cm; 130 cm; 170 cm; 270 cm; 345 cm; 495 cm)
- LHV bahan bakar cangkang (17000 kJ/kg)
- LHV bahan bakar ranting (15099 kJ/kg)

Tabel 4.2 Data Hubungan Temperatur Termokopel dengan Waktu

Menit	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Kondisi	Massa	Keterangan
0	24	26	23	26	28	31	31			
1	24	41	178	200	170	150	58	Burner ON		
2	36	113	495	355	290	250	63			Daun & Support Fuel (SF) masuk*
3	36	300	630	402	340	291	105			
4	37	431	613	473	365	320	121			Daun & SF masuk*
5	37	553	632	375	312	286	115			SF masuk*
6	37	661	625	420	331	293	117			
7	37	575	571	495	416	332	125			Daun masuk
8	37	674	665	483	428	375	135			SF masuk*
9	37	501	525	385	312	276	115	Burner OFF		Daun masuk
10	37	461	437	346	305	293	117			SF masuk*
11	37	523	513	547	537	453	146			
12	38	530	495	540	490	411	149			SF masuk
13	38	403	390	340	325	303	132			
14	38	380	300	370	360	320	135			
15	38	432	457	540	550	471	150			SF masuk*
16	38	496	547	667	608	495	161			Daun & SF*

Tabel 4.2 Data Hubungan Temperatur Termokopel dengan Waktu (sambungan)

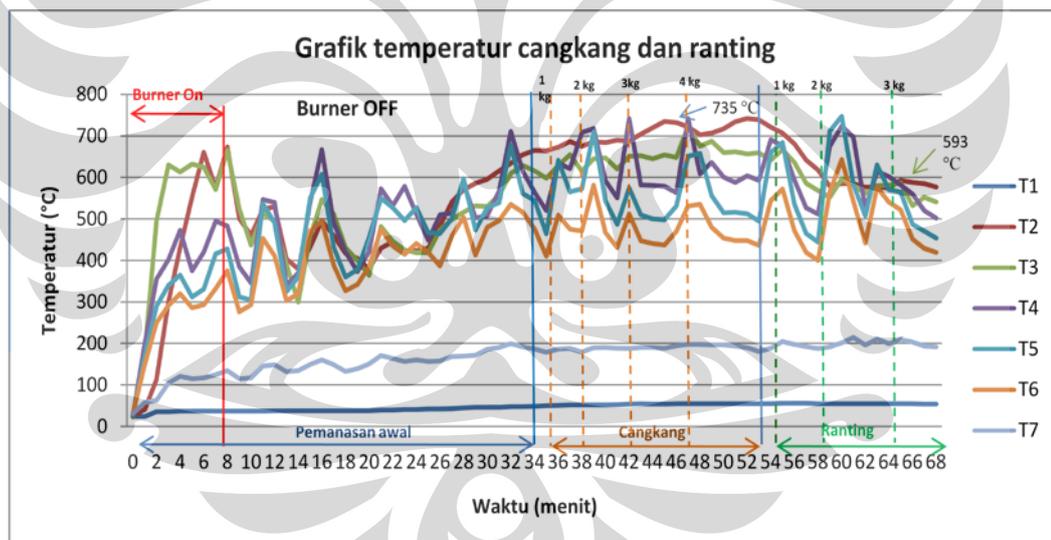
17	38	460	511	491	432	388	149			
18	38	417	431	421	360	327	133			
19	38	405	400	373	378	342	139			Daun & SF*
20	38	379	364	421	455	385	151			Daun & SF*
21	40	430	482	573	550	475	171			Daun
22	40	445	447	532	527	435	164			Daun & SF*
23	41	424	425	579	496	415	157			
24	41	424	419	512	527	441	161			Daun & SF*
25	42	430	419	449	467	419	157			Daun
26	42	484	474	510	465	387	158			Daun & SF*
27	43	541	499	514	501	459	169			SF masuk*
28	45	570	516	586	597	504	170			SF masuk*
29	46	586	532	503	473	413	172			SF masuk*
30	46	596	530	508	527	480	186			Daun & SF*
31	46	616	557	568	539	496	191			SF masuk
32	48	634	610	711	678	535	200			SF masuk
33	48	655	629	615	561	516	192			SF masuk
34	49	665	616	564	544	475	187			
35	50	664	598	520	464	410	179	Steady		
36	51	673	629	635	641	509	187	<b>DATA</b>	1 kg	Cangkang
37	52	687	655	621	565	475	188			
38	52	675	615	708	573	471	180		2 kg	Cangkang
39	52	686	645	718	709	581	190			
40	52	684	647	592	543	467	191			
41	53	690	620	551	487	431	189			
42	54	688	651	742	575	512	188		3 kg	Cangkang
43	55	704	652	582	510	447	191			
44	54	720	645	581	500	441	191			
45	54	735	654	579	498	437	189			
46	55	732	648	563	531	470	195			
47	55	722	723	742	651	531	198		4 kg	Cangkang
48	55	703	675	609	658	535	198			
49	55	707	687	636	556	480	197			
50	55	717	660	601	515	454	197			
51	55	734	662	588	516	448	194			
52	55	742	657	604	512	448	190			
53	55	739	659	593	495	436	181			<i>Door Open</i>
54	55	721	642	691	660	544	189		1 kg	Ranting
55	56	707	667	675	684	572	205			
56	56	681	636	594	535	471	198			
57	56	642	586	527	465	419	193			<i>Door Open</i>

Tabel 4.2 Data Hubungan Temperatur Termokopel dengan Waktu (sambungan)

58	55	618	568	512	444	400	188		2 kg	Ranting
59	55	579	552	675	711	565	192			
60	55	585	596	724	747	643	202			
61	55	585	581	697	583	542	215			
62	55	576	562	525	507	442	197			
63	55	577	580	614	630	576	211			
64	55	574	581	602	570	540	200	3 kg	Ranting	
65	55	593	587	582	565	522	210			
66	55	588	532	560	487	451	204			
67	54	585	552	520	471	429	194			
68	54	577	541	502	454	419	192			

\* *Support fuel* dibakar di luar bed

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



Gambar 4.2 Grafik Distribusi Temperatur terhadap Waktu

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. Perlu diketahui bahwa tinggi *bed* statik adalah 8 cm atau 94 cm ditinjau dari titik sumbu pipa saluran udara.

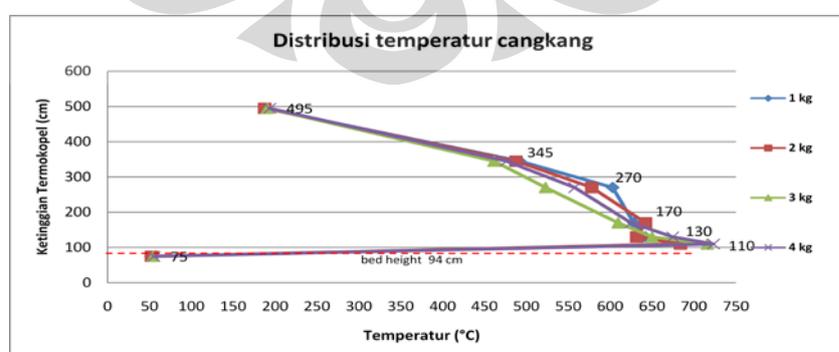
Tabel 4.3 Hubungan Distribusi Temperatur cangkang terhadap Ketinggian Termokopel

Distribusi temperatur cangkang					
No. Termokopel	Ketinggian Termokopel	Massa 1 kg	Massa 2 kg	Massa 3 kg	Massa 4 kg
T1	75	51.5	52.25	54.4	55
T2	110	680	683.75	715.8	723.43
T3	130	642	631.75	650	674.71
T4	170	628	642.25	609.4	624.71
T5	270	603	578	522.8	557.57
T6	345	492	487.5	461.4	476
T7	495	187.5	187.5	190.8	193.57

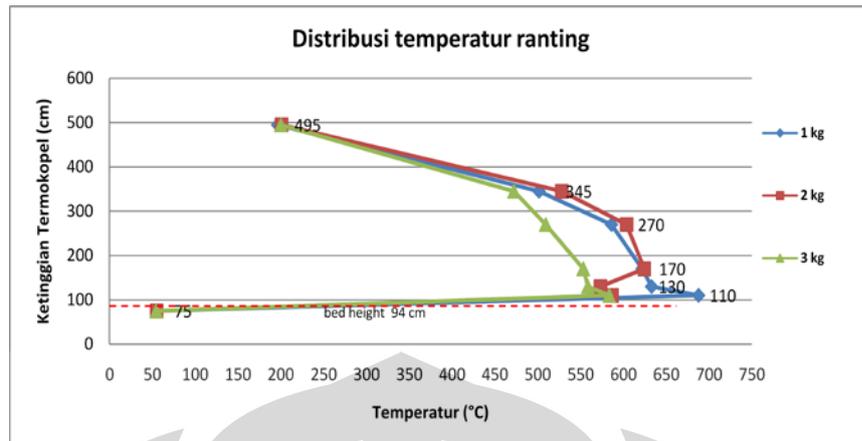
Tabel 4.4 Hubungan Distribusi Temperatur Ranting terhadap Ketinggian Termokopel

Distribusi temperatur ranting				
No. Termokopel	Ketinggian termokopel	Massa 1 kg	Massa 2 kg	Massa 3 kg
T1	75	55.75	55	54.6
T2	110	687.75	586.67	583.4
T3	130	632.75	573.17	558.6
T4	170	621.75	624.5	553.2
T5	270	586	603.67	509.4
T6	345	501.5	528	472.2
T7	495	196.25	200.83	200

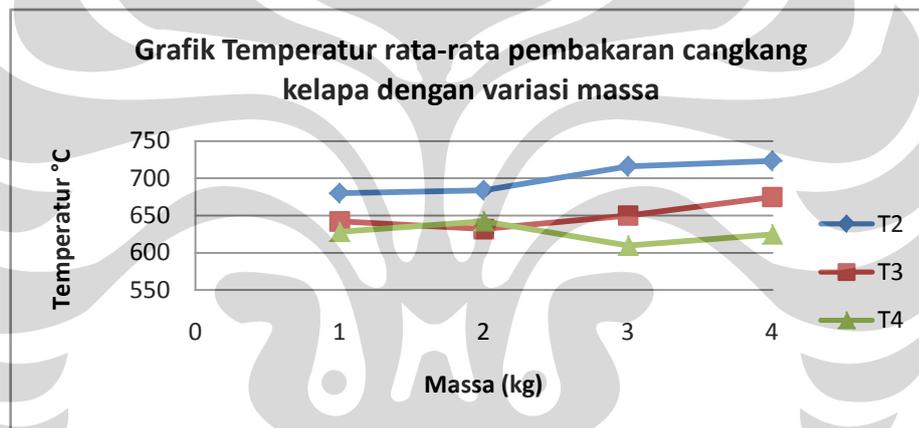
Data tersebut jika diplot ke dalam bentuk grafik akan terlihat karakteristik temperatur di setiap termokopelnya pada *feed rate* yang berbeda seperti berikut :



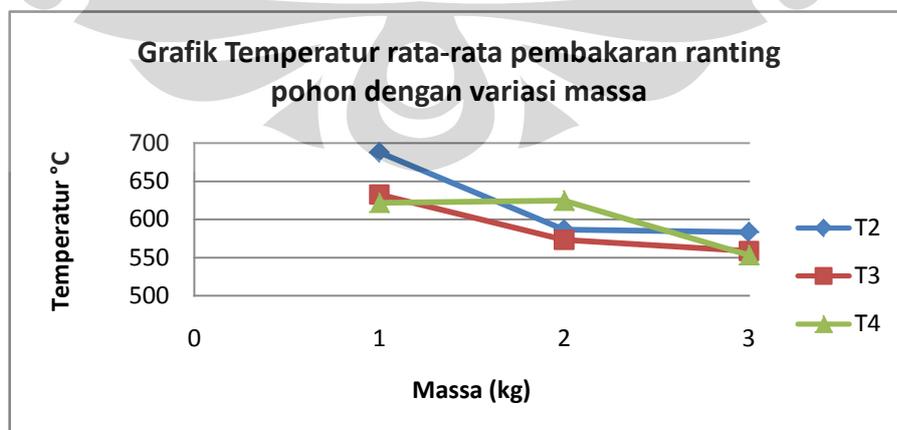
Gambar 4.3 Grafik Hubungan Ketinggian Termokopel terhadap Distribusi Temperatur Cangkang



Gambar 4.4 Grafik Hubungan Ketinggian Termokopel terhadap Distribusi Temperatur Ranting



Gambar 4.5 Grafik Hubungan Temperatur Cangkang Kelapa terhadap Variasi Massa



Gambar. 4.6 Grafik Hubungan Temperatur Ranting Pohon dengan variasi massa

## 4.2 ANALISA

Setelah melakukan beberapa pengujian dan pengambilan data pada Fluidized Bed Combustor pada lingkungan Universitas Indonesia mulai dari karakteristik ring blower, maupun karakteristik pembakaran biomassa, yakni cangkang kelapa dan ranting pohon selanjutnya data ini diolah kemudian diinterpretasikan dalam bentuk grafik. Grafik yang dihasilkan antara lain: grafik putaran blower vs laju aliran udara yang dihasilkan, grafik temperatur pembakaran pada berbagai termokopel terhadap waktu dengan laju aliran udara tetap, pengaruh distribusi temperatur pada tiap ketinggian termokopel di ruang bakar dan freeboard area.

### 4.2.1 Analisa Karakteristik Kerja Ring Blower

Laju aliran udara yang dihasilkan blower berbanding lurus dengan putaran blower. Artinya semakin tinggi putaran blower maka akan semakin besar pula laju udara yang dihasilkan oleh blower tersebut. Pengukuran *flow rate* udara yang dihasilkan blower dilakukan dengan menggunakan *anemometer* dimulai dengan putaran 100 rpm sampai maksimum 3000 rpm dengan kenaikan 100 rpm setiap data. Hasil yang didapat adalah kecepatan (m/s) udara yang melewati sisi *discharge ring blower*. Kemudian nilai kecepatan yang diperoleh dikalikan dengan luas penampang sisi *discharge ring blower*  $0,00237 \text{ m}^2$  sehingga diketahui besarnya nilai *flow rate* udara pada putaran tersebut.

Dari hasil data tersebut laju udara pada putaran maksimum adalah  $4,89 \text{ m}^3/\text{min}$ , mendekati nilai pada spesifikasi blower tersebut. Selain nilai laju udara maksimum, pada grafik terdapat juga nilai fluidisasi minimum yang diperoleh dari hasil penelitian sebelumnya dan juga percobaan yang dilakukan, yaitu di putaran 1300 rpm dengan laju udara  $2,15 \text{ m}^3/\text{min}$ . Nilai ini tentunya masih di bawah nilai untuk pengambilan data yaitu 3000 rpm, sehingga dapat dipastikan pasir sebagai *bed material* dapat terfluidisasi dengan baik dan juga dapat menyuplai udara yang cukup saat proses pembakaran berlangsung.

#### 4.2.2 Analisa Distribusi Temperatur Terhadap Ketinggian Termokopel dan Jumlah Massa bahan bakar.

Termokopel yang digunakan pada pengujian ini adalah termokopel jenis K. Termokopel pada Fluidized Bed Combustor diposisikan bertingkat dengan ketinggian tertentu dari material bed (pasir silika).  $T_1$  merupakan termokopel pertama terletak di bawah bed yang berada di dalam plenum, selanjutnya  $T_2$  terletak didalam ruang bakar dan merupakan termokopel yang paling dekat dengan permukaan material bed (pasir silica). Selanjutnya diikuti oleh  $T_3$ ,  $T_4$ ,  $T_5$  dan  $T_6$ . Sedangkan  $T_7$  berada di dalam cerobong dan berada pada posisi terjauh dari bed.

Pengambilan data dibagi menjadi tujuh bagian sesuai dengan tujuh ketinggian termokopel. Data yang diambil merupakan temperatur rata rata dari beberapa menit dimulai dari pemasukan bahan bakar sampai sebelum pemasukan bahan bakar untuk data berikutnya sehingga dapat divariasikan berdasarkan jumlah massa yang masuk ruang bakar dengan laju aliran udara yang tetap. Penggunaan temperatur rata-rata menunjukkan nilai rata-rata distribusi temperatur selama beberapa menit.

Pada grafik distribusi temperatur cangkang terlihat bahwa termokopel yang paling dekat dengan permukaan *bed material* yaitu  $T_2$  merupakan termokopel dengan temperatur yang tertinggi dari antara ketujuh termokopel untuk setiap jumlah massa yang dimasukkan ke dalam ruang bakar. Temperatur yang terlihat di tiap termokopel yang lain berkurang sebanding dengan bertambah tingginya termokopel tersebut dari permukaan *bed material*. Temperatur  $T_7$  adalah yang terendah dari antar semua termokopel yang berada diatas permukaan bed karena jaraknya yang paling jauh dari termokopel lainnya. Temperatur  $T_1$  yang berada di bawah plenum juga rendah bila dibandingkan dengan semua termokopel. Hal ini wajar saja karena  $T_1$  yang berada di plenum adalah untuk mengukur temperatur udara yang masuk ruang bakar. Pada grafik hubungan temperatur cangkang dengan variasi massa terlihat bahwa bertambahnya massa cangkang yang dimasukkan kedalam ruang bakar membuat temperatur juga naik. Semakin banyak jumlah massa yang dimasukkan maka temperatur juga akan

semakin tinggi. Pada massa 4 kg temperatur rata-rata pembakaran cangkang bisa mencapai 723°C.

Pada grafik distribusi temperatur ranting terlihat bahwa temperatur tertinggi yang terbaca adalah pada T2 dengan jumlah masukan massa 1 kg. Ada perbedaan yang mencolok dengan T2 pada masukan massa 2 kg dan 3 kg. Secara logika seharusnya temperatur T2 dengan jumlah masukan bahan bakar 2 kg dan 3 kg lebih tinggi dari masukan bahan bakar 1 kg. Perbedaan ini dapat dijelaskan dengan melihat grafik distribusi temperatur terhadap waktu. Pada saat pemasukan ranting 1 kg temperatur T2 adalah 721°C. Temperatur ini merupakan temperatur *steady* atau temperatur setelah melewati temperatur maksimal hasil dari pembakaran 4 kg cangkang. Ternyata saat ranting 1 kg dimasukkan ke dalam ruang bakar temperatur dalam bed tidak naik tetapi malah turun. Karena data pada grafik ini adalah temperatur rata-rata dari beberapa menit dimulai dari menit pemasukan bahan bakar sampai menit sebelum pemasukan bahan bakar untuk data berikutnya maka terlihat temperatur T2 pada massa 1 kg lebih tinggi dari massa 2 kg dan 3 kg. Tetapi bertambahnya bahan bakar ranting yang dimasukkan ke dalam bed dapat menaikkan temperatur. Hal ini terlihat dari grafik hubungan temperatur ranting pohon dengan variasi massa, dimana saat pemasukan ranting 2 kg dan 3 kg grafik temperatur tidak turun lagi tapi cenderung stabil dan naik. Itu artinya kalau bahan bakar ranting yang dimasukkan semakin banyak (lebih dari 3 kg) maka temperatur juga akan ikut naik. Dari semua grafik terlihat bahwa bahan bakar cangkang menghasilkan temperatur yang lebih tinggi dibandingkan ranting dengan jumlah massa yang sama.

#### 4.2.3 Analisa Distribusi Temperatur Terhadap Waktu

Pengujian dengan bahan bakar cangkang dimulai setelah melakukan proses pemanasan awal pada pasir silika hingga temperatur T2 mencapai 650°C. Pemanasan awal diperlukan untuk mencapai temperatur *self sustained combustion* sehingga bahan bakar biomassa yang dimasukkan ke dalam ruang bakar dapat terbakar dengan sendirinya. Waktu yang diperlukan untuk mencapai kondisi ini adalah 34 menit dan total *support fuel* yang digunakan adalah sebanyak 19,8 kg meliputi 6,65 kg cangkang kelapa, 9,5 kg ranting dan 3,65 kg

daun kering. Kemudian setelah tercapai temperatur T2 600°C-650°C, suplai *support fuel* ke dalam bed dihentikan. Temperatur T2 dijadikan acuan karena termokopel inilah yang paling dekat dengan permukaan pasir silika. Penghentian pemasukan *support fuel* ke dalam bed akan menahan kenaikan temperatur dan setelah mencapai titik maksimalnya perlahan temperatur akan turun. Pada kondisi inilah dianggap temperatur sudah *steady condition*. Pada temperatur *steady condition*, pengambilan data untuk bahan bakar cangkang 1 kg dapat dimulai. Kemudian dicatat perubahan temperatur per menitnya di setiap termokopel. Karena temperatur dalam bed sudah tinggi maka cangkang akan langsung terbakar yang diiringi dengan keluarnya asap dari siklon dan cerobong. Dari grafik terlihat kenaikan temperatur di semua titik termokopel. Hal seperti ini juga terjadi dengan menggunakan massa 2 kg dan 3 kg. Tetapi ada perbedaan untuk massa bahan bakar cangkang 4 kg. Dari grafik terlihat bahwa dengan massa 4 kg temperatur awalnya cenderung turun, kemudian akan naik. Pada saat temperatur turun inilah terjadi perubahan AFR (*air fuel ratio*) di dalam bed akibat jumlah bahan bakar yang masuk bed sudah semakin banyak. Adanya kenaikan temperatur setelah penurunan sebelumnya menunjukkan cangkang kelapa mulai terbakar, sebagai reaksi pembakaran awal terlepasnya *volatile matter* terlihat asap agak kuning kecoklatan secara kasat mata, hal ini terjadi sesaat, kemudian temperatur mulai naik, yang mengindikasikan cangkang kelapa telah terbakar. Dari analisis proximat cangkang kelapa memiliki *volatile matter* 70,5 %, hal ini menunjukkan begitu mudahnya cangkang kelapa sebagai bahan bakar biomassa untuk terbakar, sehingga dari grafik yang dihasilkan temperatur yang dicapai cukup tinggi.

Metode untuk pengujian bahan bakar ranting juga sama seperti sebelumnya. Bahan bakar ranting 1 kg dimasukkan ke dalam bed setelah terlebih dulu temperatur bed sudah pada *steady condition*. Pada kondisi ini temperatur T2 adalah 721°C. Dari grafik distribusi temperatur terhadap waktu dapat dilihat bahwa setelah pemasukan bahan bakar ranting 1 kg tidak ada kenaikan temperatur pada T2 sementara temperatur pada termokopel lainnya (T3, T4, T5, T6, T7) terlihat ada kenaikan yang cukup tinggi. Hal demikian mungkin disebabkan oleh kurangnya massa yang dimasukkan ke dalam bed sehingga energi yang terkandung dalam 1 kg ranting tidak cukup untuk mempertahankan suhu awal 721°C atau

bahkan menaikkan temperatur pasir dalam hal ini T2. Sedangkan kenaikan temperatur T3, T4, T5, T6 dan T7 adalah disebabkan oleh tingginya *volatile matter* ranting (65-70 %) sehingga saat dimasukkan ke dalam ruang bakar ranting langsung terbakar sebelum mencapai bed dan akibat adanya aliran udara dari plenum, panas yang dihasilkan langsung terbawa keatas menuju keluar cerobong. Kemudian bahan bakar 2 kg ranting dimasukkan ke dalam bed dan dilihat perubahan temperatur di setiap termokopel. Dari grafik terlihat T3, T4, T5, T6 dan T7 mengalami kenaikan temperatur. Sedangkan pada T2 terlihat temperaturnya awalnya turun kemudian naik lagi tapi tidak melebihi atau bahkan mencapai temperatur pada saat dimasukkan bahan bakar yaitu 618°C. Temperatur maksimal T2 dengan massa 2 kg ranting adalah 585°C dan kemudian perlahan temperatur akan turun lagi. Hal ini semakin menguatkan bahwa energi yang dikandung 1 kg dan 2 kg ranting tidak cukup untuk mempertahankan temperatur awal sebelum tiap massa tersebut dimasukkan ke dalam bed. Selanjutnya ranting dengan massa 3 kg dimasukkan ke dalam bed dan dari grafik dapat diketahui bahwa temperatur T2, T3 dan T7 mengalami kenaikan. Sedangkan T4, T5, T6 tidak ada kenaikan. Dengan naiknya temperatur T2 dari 574°C ke 593°C berarti jumlah massa 3 kg ranting yang dimasukkan ke dalam bed mempunyai energi yang cukup untuk menaikkan temperatur awal bed (574°C). Termokopel T4, T5 dan T6 tidak mengalami kenaikan temperatur mungkin disebabkan karena banyaknya ranting yang dimasukkan ke dalam bed sehingga terjadi perubahan AFR (*air fuel ratio*) yang mempengaruhi pelepasan *volatile matter* ranting sehingga mengurangi besarnya lidah api dalam bed.

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

*Fluidized bed combustor* UI termasuk jenis *bubbling fluidized bed* (BFB) yang mana saat beroperasi kecepatan aliran udara tidak cukup tinggi untuk membawa partikel hamparan yaitu pasir untuk terbawa keluar dari reaktor melewati *riser* menuju siklon. Walau begitu teknologi ini telah mampu mengkonversi energy biomassa menjadi energy panas. Teknologi ini pun dinilai sebagai teknologi yang ramah lingkungan karena emisi yang rendah.

Dari 75800 gram total biomassa yang dibakar (termasuk campuran cangkang dengan ranting pohon) hanya 25 gram yang tidak habis terbakar. Dari sini diketahui bahwa efisiensi pembakaran FBC UI ini adalah 95,9 % .Dari sini dapat disimpulkan bahwa proses pembakaran biomassa yang dilakukan dengan menggunakan *fluidized bed combustor* UI sudah cukup bagus. Untuk pembakaran dengan menggunakan bahan bakar 3 kg cangkang kelapa, temperatur yang dihasilkan dapat mencapai 735 °C. Temperatur meningkat seiring dengan penambahan suplai bahan bakar cangkang ke dalam bed. Sedangkan untuk pembakaran dengan menggunakan 3 kg bahan bakar ranting akasia, temperatur yang dihasilkan sekitar 593 °C. Penambahan suplai ranting ke dalam bed juga meningkatkan temperatur dalam bed. Panas yang dihasilkan dari pembakaran kedua jenis bahan bakar tersebut dirasa cukup untuk dimanfaatkan pada *heat exchanger*.

Cangkang kelapa memiliki karakteristik yang berbeda dengan ranting pohon ketika dibakar dengan menggunakan *fluidized bed combustor*. Temperatur yang dihasilkan dari pembakaran cangkang kelapa lebih tinggi dibandingkan hasil pembakaran ranting pohon. Hal tersebut dikarenakan cangkang kelapa memiliki nilai kalor yang lebih besar dari pada ranting. Selain itu distribusi temperatur yang dihasilkan cenderung lebih stabil jika dibandingkan dengan distribusi temperatur hasil pembakaran ranting.

## 5.2 Saran

*Fluidized Bed Combustor* merupakan solusi di masa yang akan datang, sehingga diharapkan *performance* dari *Fluidized Bed Combustor UI* dapat meningkat untuk keperluan penelitian lebih tinggi. Untuk itu ada beberapa rekomendasi yang saya ajukan untuk kepentingan penelitian lebih jauh, yakni:

1. Perlunya peningkatan kapasitas dan kualitas instrumentasi alat ukur, seperti penggunaan data akusisi sehingga perubahan temperatur setiap waktu dalam ruang bakar dapat diketahui dengan jelas.
2. Perbaiki sistem feeder yang ada, membuat tambahan ruang antara feeder dengan ruang bakar yang dilengkapi dengan batu tahan api dan dua *sliding door* sehingga panas dari ruang bakar tidak menyebar ke *screw feeder*.
3. Modifikasi cyclone dan cerobong agar gas masuk dapat berputar dengan baik dan keluar melalui cerobong.
4. Perlunya pengadaan instalasi jaringan listrik dan air bersih pada laboratorium pengujian FBC, karena hal ini sangat dibutuhkan untuk praktikan laboratorium di masa mendatang.
5. *Warning sign* penggunaan PPE yang diperlukan di pintu masuk
6. Penyediaan peralatan P3K di area kerja serta penyediaan lemari untuk tempat penyimpanan peralatan P3K, *Personal Protective Equipment (PPE)* dan lain-lain.
7. Pemasangan Instalasi *fire hydrant* dan atau penyediaan *portable fire extinguisher*.
8. Atap perlu di tinggikan dan penyokongnya harus terbuat dari bahan yang tidak mudah terbakar.
9. Perbaiki *lay-out* peralatan, generator, power panel dan penempatan kabel
10. Pemasangan sight glass di Main hole, sangat perlu untuk memudahkan monitoring kondisi di dalam ruang bakar tersebut.

## REFERENSI

1. Basu, Prabir. "Combustion and Gasification in Fluidized Beds" (Taylor & Francis Group 2006).
2. Oka, Simeon N. "Fluidized Bed Combustion" (Marcel Dekker, Inc. 2004)
3. Bruce R. Munson, Donald F. Young, *Mekanika Fluida*, terj. Harinaldi, Budiarmo (Jakarta: Erlangga, 2003).
4. Christian, Hans. "Modifikasi Sistem Burner dan Pengujian Aliran Dingin *Fluidized Bed Incinerator UI*." Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2008.
5. Surjosatyo, Adi. "Fluidized Bed Incineration of Palm Shell & Oil Sludge Waste." Tesis, Program Magister Engineering Universiti Teknologi Malaysia, 1998.
6. "Experimental Operating & Maintenance Manual – Fluidisation and Fluid Bed Heat Transfer Unit H692," P. A. Hilton Ltd.
7. Geldart, D., *Gas Fluidization Technology*, (New York: John Wiley & Sons, 1986).
8. Howard, J. R., *Fluidized Beds – Combustion and Applications*, (London: Applied Science Publishers, 1983).
9. Kunii, Daizo & Octave Levenspiel, *Fluidization Engineering*, (New York: Butterworth-Heinemann, 1991).
10. Robert H. Perry, Don W. Green, *Perry's Chemical Engineers' Handbook 7<sup>th</sup> Ed.*, (Singapore: McGraw-Hill Int., 1997).
11. Warren L. McCabe, Julian C. Smith, Peter Harriott, *Unit Operasi Teknik Kimia*, terj. E. Jasjfi (Jakarta: Erlangga, 1987).
12. [http://agsco.thomasnet.com/Asset/AGSCO\\_Technical\\_Data\\_Sheet.pdf](http://agsco.thomasnet.com/Asset/AGSCO_Technical_Data_Sheet.pdf)
13. [http://www.azom.com/Details.asp?ArticleID=1114#\\_Sand](http://www.azom.com/Details.asp?ArticleID=1114#_Sand)
14. [http://users.wpi.edu/~ierardi/FireTools/air\\_prop.html](http://users.wpi.edu/~ierardi/FireTools/air_prop.html)
15. [http://www.wwf.or.id/about\\_wwf/whatwedo/climate/oursolution/mitigation22/renewable\\_energy.cfm](http://www.wwf.or.id/about_wwf/whatwedo/climate/oursolution/mitigation22/renewable_energy.cfm)
16. [http://www.wwf.or.id/about\\_wwf/whatwedo/climate/oursolution/mitigation22/renewable\\_energy.cfm](http://www.wwf.or.id/about_wwf/whatwedo/climate/oursolution/mitigation22/renewable_energy.cfm)

## LAMPIRAN

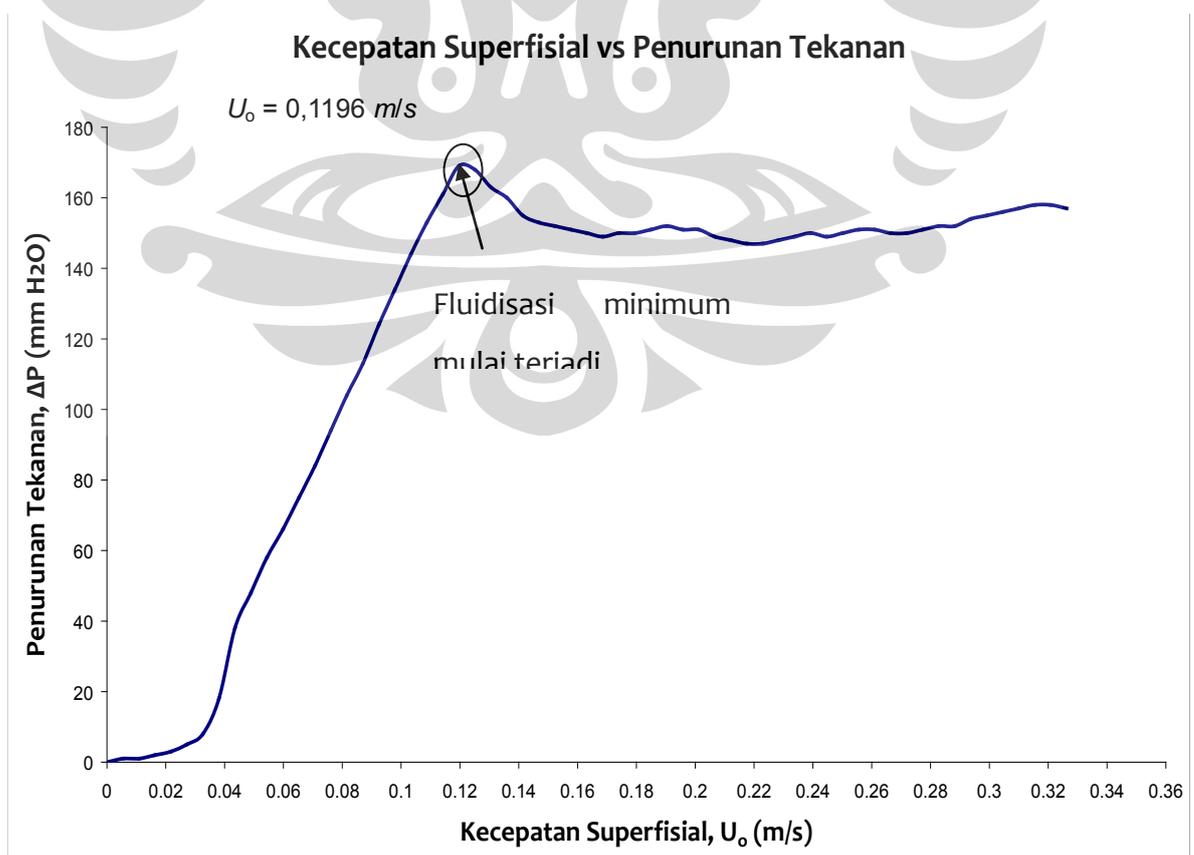
### Lampiran 1 Hasil Penelitian Sebelumnya untuk Karakteristik FBC

#### 1.1. Tabel Pengujian *Cold Flow* (Hubungan Antara Kecepatan Superfisial dengan Penurunan Tekanan Melintas Hampanan)

<b>Putaran</b>	<b>Kecepatan Superfisial, <math>U_o</math></b>	<b>Penurunan Tekanan, <math>\Delta P</math></b>
<i>rpm</i>	<i>m/s</i>	<i>mm H<sub>2</sub>O</i>
0	0	0
47	0.005438	1
93	0.010876	1
140	0.016314	2
187	0.021753	3
233	0.027191	5
280	0.032629	8
327	0.038067	18
373	0.043505	38
420	0.048943	48
467	0.054382	58
513	0.05982	66
560	0.065258	75
607	0.070696	84
653	0.076134	94
700	0.081572	104
747	0.087011	113
793	0.092449	124
840	0.097887	134
887	0.103325	144
933	0.108763	153
980	0.114201	161
1027	0.119639	169
1073	0.125078	167
1120	0.130516	163
1167	0.135954	160
1213	0.141392	155
1260	0.14683	153
1307	0.152268	152
1353	0.157707	151
1400	0.163145	150
1447	0.168583	149
1493	0.174021	150
1540	0.179459	150
1587	0.184897	151
1633	0.190336	152
1680	0.195774	151
1727	0.201212	151

1773	0.20665	149
1820	0.212088	148
1867	0.217526	147
1913	0.222964	147
1960	0.228403	148
2007	0.233841	149
2053	0.239279	150
2100	0.244717	149
2147	0.250155	150
2193	0.255593	151
2240	0.261032	151
2287	0.26647	150
2333	0.271908	150
2380	0.277346	151
2427	0.282784	152
2473	0.288222	152
2520	0.293661	154
2567	0.299099	155
2613	0.304537	156
2660	0.309975	157
2707	0.315413	158
2753	0.320851	158
2800	0.32629	157

### 1.2. Grafik Kecepatan Superfisial Terhadap Penurunan Tekanan



Lampiran 2. Perhitungan Kecepatan Fluidisasi Minimum dan Debit Udara Minimum.

$$U_{mf} = \frac{Re_{mf} \cdot \mu_f}{d_p \cdot \rho_f}$$

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

$$d_p = \frac{1}{\frac{2.3}{0.725} + \frac{10.4}{0.6} + \frac{17.1}{0.5} + \frac{31.9}{0.425} + \frac{29.2}{0.3} + \frac{4.7}{0.25} + \frac{2.3}{0.212} + \frac{2.1}{0.18}} = 372,56 \mu m$$

$$Re_{mf} = (33.7^2 + 0.0408 \times Ar)^{0.5} - 33.7^2$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \cdot \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu_f^2} = \frac{(372 \times 10^{-6}) \cdot (1,1797) (2600 - 1,1797) (9,81)}{(1,8199 \times 10^{-5})^2} =$$

$$4696 \text{ (T udara } 27^\circ\text{C)} \text{ atau } 259 \text{ (pada T udara } 800^\circ\text{C)}$$

$$Re_{mf} = 2,732 \text{ (pada T udara } 27^\circ\text{C)} \text{ atau } 0,16 \text{ (pada T udara } 800^\circ\text{C)}$$

$$\text{Maka : } U_{mf} \text{ (pada T udara } 27^\circ\text{C)} = \frac{(2,732) \cdot (1,8199 \times 10^{-5})}{(372 \times 10^{-6}) \cdot (1,1797)} = \mathbf{0,113 \text{ m/s}}$$

$$\text{Maka : } U_{mf} \text{ (pada T udara } 800^\circ\text{C)} = \frac{(0,16) \cdot (4,0906 \times 10^{-5})}{(372 \times 10^{-6}) \cdot (0,3284)} = \mathbf{0,052 \text{ m/s}}$$

$$\text{Maka } q = U_{mf} \times A = 0,113 \times \left(\frac{\pi}{4} \cdot 0,635^2\right) = 0,035 \text{ m}^3/\text{s} = \mathbf{2,15 \text{ m}^3/\text{min}}$$

Keterangan :

$U_{mf}$  = Kecepatan Fluidisasi Minimum (m/s)

$d_p$  = diameter partikel rata-rata pasir ( m )

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

$\rho_p$  = densitas partikel pasir ( 2000 kg/m<sup>3</sup> )

$\mu_f$  = viskositas dinamik fluida gas ( kg/ms )

$g$  = percepatan gravitasi ( m/s<sup>2</sup> )

$Ar$  = Bilangan Archimedes

$Re$  = Bilangan Reynold

$X$  = fraksi berat partikel pada masing-masing ukuran partikel

$d_{pi}$  = distribusi ukuran partikel

$q$  = debit udara minimum (m<sup>3</sup>/min)

$A$  = Luar area hamparan pasir (m<sup>2</sup>)

Air Properties		Temperature	
		300 K	1073 K
Density	$kg/m^3$	1,179766	0,328441
Viscosity	$kg/ms$	$1,8199 \cdot 10^{-5}$	$4,0906 \cdot 10^{-5}$
Kinematic viscosity	$m^2/s$	$1,6136 \cdot 10^{-5}$	$1,3284 \cdot 10^{-4}$
Specific heat	$Ns/m^2$	1005,459	1157,054
Thermal conductivity	$W/mK$	0,026198	0,071743

Sumber: [http://users.wpi.edu/~ierardi/FireTools/air\\_prop.html](http://users.wpi.edu/~ierardi/FireTools/air_prop.html)

Lampiran 3. Foto Hasil Percobaan di Laboratorium Fluidized Bed Combustor UI



3.1 Penyalaan *support fuel*



3.2 Api yang Terbentuk Saat Pemanasan Awal dengan Gas Burner



3.3 Api yang Terbentuk Saat Pemanasan Awal tanpa nyala Burner



3.4 Proses Fluidisasi Pasir Baik.



3.5 Kondisi bed pada temperatur operasi



3.6 Sisa bahan bakar yang tidak menjadi abu (25 gr)