



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**MODIFIKASI FEEDER DAN STUDI KARAKTERISTIK  
PEMBAKARAN BIOMASSA RANTING POHON  
PADA FLUIDIZED BED COMBUSTOR UI  
DENGAN KAPASITAS UMPAN MAKSIMUM**

**SKRIPSI**

**ANTON ATMAJA**

**0606072950**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

**DEPOK**

**DESEMBER 2010**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**MODIFIKASI FEEDER DAN STUDI KARAKTERISTIK  
PEMBAKARAN BIOMASSA RANTING POHON  
PADA FLUIDIZED BED COMBUSTOR UI  
DENGAN KAPASITAS UMPAN MAKSIMUM**

**SKRIPSI**

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

**ANTON ATMAJA**

**0606072950**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

**DEPOK**

**DESEMBER 2010**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

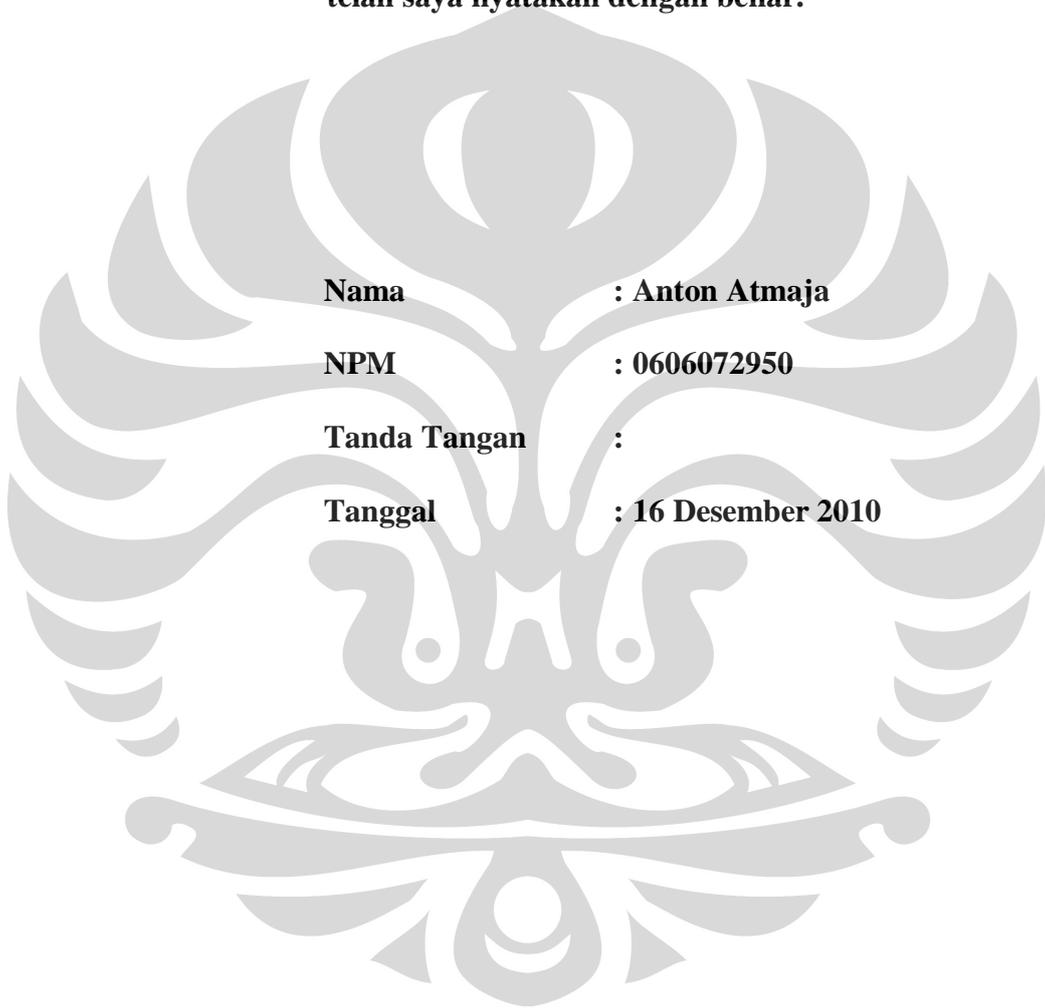
**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Anton Atmaja**

**NPM : 0606072950**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 16 Desember 2010**



## HALAMAN PENGESAHAN

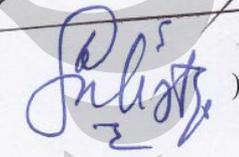
Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Anton Atmaja  
NPM : 0606072950  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : MODIFIKASI FEEDER DAN STUDI  
KARAKTERISTIK PEMBAKARAN  
BIOMASSA RANTING POHON PADA  
FLUIDIZED BED COMBUSTOR UI DENGAN  
KAPASITAS UMPAN MAKSIMUM

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian 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 N., M.Sc., Ph.D (  )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 28 Desember 2010

## KATA PENGANTAR / UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah Rabbil ‘alamin, segala puji serta syukur terpanjatkan kepada Allah SWT atas segala limpahan karunia nikmatnya. Sholawat serta salam turunkan kepada junjungan Nabi Muhammad SAW beserta para sahabat dan pengikutnya serta akhir zaman.

Alhamdulillah Rabbil ‘alamin, penyusunan skripsi yang berjudul “Modifikasi Feeder dan Studi Karakteristik Pembakaran Biomassa Ranting Pohon pada Fluidized Bed Combustor UI dengan Kapasitas Umpan Maksimum” telah selesai disusun. Skripsi ini berisi tentang aktifitas tugas akhir mengenai modifikasi unit feeder yang bertujuan mengatasi aliran panas yang mengakibatkan pemuaian pada screw feeder. Pemuaian ini menyebabkan terhambatnya putaran screw feeder tersebut. Selain itu, pada skripsi ini juga dilakukan studi tentang karakteristik pembakaran ranting pohon pada FBC-UI.

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada :

1. Ibu dan ayah saya, Rabiatur Nur’ainy dan M. Arsyad Saleh (alm.) yang telah mendidik dan membesarkan saya.
2. Dosen pembimbing saya, Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M.Eng yang telah memberikan bimbingan dalam tugas akhir yang saya emban. Terima kasih juga saya sampaikan atas sharing beliau yang kaya pengalaman akan permasalahan energi di Indonesia.
3. Teman-teman satu objek skripsi tentang *Fluidized Bed Combustor*, Reynaldo BTY, R. Arya Tri Sutrisno, dan Irvandi Permana Argadi. Terima kasih atas kebersamaannya.
4. Pihak-pihak yang terlibat langsung membantu dalam tugas akhir saya, Mas Syarif, Mas Yasin, Mas Udiono, Pak Wasis, dan lain-lain.
5. Dan orang-orang dan pihak-pihak lain yang tidak bisa disebutkan satu per satu di sini, tanpa mengurangi terima kasih saya.

Akhir kata, semoga skripsi ini dapat mendatangkan manfaat bagi saya pribadi dan pihak lain. Saran dan kritik yang membangun terhadap skripsi ini

dapat disampaikan kepada penyusun. Semoga Allah SWT memberikan balasan baik untuk kita. Amin ya Rabbal 'alamin.

Depok, 16 Desember 2010

Anton Atmaja



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

---

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

Nama : Anton Atmaja  
NPM : 0606072950  
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 :

**MODIFIKASI FEEDER DAN STUDI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN  
BIOMASSA RANTING POHON PADA FLUIDIZED BED COMBUSTOR UI  
DENGAN KAPASITAS UMPAN MAKSIMUM**

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 2010

Yang menyatakan

(Anton Atmaja)

## ABSTRAK

Nama : Anton Atmaja  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul : Modifikasi Feeder dan Studi Karakteristik Pembakaran Biomassa Ranting Pohon pada Fluidized Bed Combustor UI dengan Kapasitas Umpan Maksimum

Indonesia memiliki potensi biomassa yang cukup besar karena sebagian besar wilayah Indonesia merupakan kawasan hutan yang luas. Limbah-limbah padat seperti ranting pohon yang berasal dari hutan dapat dimanfaatkan sebagai energi alternatif. *Fluidized Bed Combustor* merupakan alat yang dapat digunakan untuk memanfaatkan energi biomassa menjadi energi panas.

*Fluidized Bed Combustor* yang terdapat di Universitas Indonesia masih memiliki berbagai kendala dalam pengoperasiannya. Modifikasi diperlukan untuk perbaikan sistem kerja *Fluidized Bed Combustor*. Sistem feeder dimodifikasi dengan adanya jalur pipa yang memiliki dua pintu. Dengan ini, kendala system feeder dapat teratasi. Skripsi ini juga mempelajari tentang karakteristik pembakaran ranting pohon pada *Fluidized Bed Combustor* UI.

Kata kunci

*Fluidized bed combustor*, Energi Biomassa, Modifikasi Feeder, Pembakaran Ranting Pohon

## ABSTRACT

Name : Anton Atmaja  
Study Program : Mechanical Engineering  
Title : Feeder Modification and Combustion Characteristic Study  
of Tree Branch Biomass in Fluidized Bed Combustor UI  
with Maximum Feeding Capacity

Indonesia has great potential energy of biomass due to its area which commonly forests. Waste from forest like tree branch can be used for alternative energy. Fluidized Bed Combustor is technology that can be used to convert biomass energy to heat energy.

Fluidized Bed Combustor that belong to University of Indonesia still have much problem in operational. Modification is needed for the better works of Fluidized Bed Combustor. Feeder system is modified which there is the pipe line that has two doors. With this, the system problem can be solved. This script also studies about combustion characteristic of tree branch in Fluidized Bed Combustor UI.

### Keywords

Fluidized bed combustor, Biomass Energy, Feeder Modification, Tree Branch Combustion

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	vi
ABSTRAK .....	vii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL .....	xv
<b>1. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Judul Penelitian .....	1
1.2 Latar Belakang Masalah .....	1
1.3 Pokok Permasalahan .....	6
1.4 Tujuan Penulisan .....	6
1.5 Batasan Masalah .....	7
1.6 Metodologi Penelitian .....	7
1.7 Sistematika Penulisan .....	8
<b>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 <i>Liquid Biofuel</i> .....	11
2.1.2 Teknologi Pengkonversian Energi Biomassa .....	11
2.1.2.1 Proses Thermal .....	12
2.1.2.2 Proses Biologis .....	13
2.1.3 Kelebihan dan Kekurangan .....	16
2.2 Karakteristik Biomassa .....	16
2.3 Sistem Reaksi Pembakaran .....	20
2.3.1 Hal-Hal Yang Harus Diperhatikan Dalam Proses Pembakaran .....	21
2.3.2 Komponen-Komponen Utama Reaksi Pembakaran .....	22
2.4 Fluidized Bed Combustor .....	25
2.4.1 Jenis-Jenis <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	29
2.4.2 Pinsip Kerja <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	30

2.4.3 Bagian-Bagian <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	31
2.4.3.1 <i>Fluidization Vessel</i> .....	32
2.4.3.2 <i>Solid Feeder</i> .....	34
2.4.3.3 Burner .....	36
2.4.3.4 <i>Bed Material</i> .....	37
2.4.3.5 <i>Cyclone separator</i> .....	38
2.4.3.6 <i>Blower</i> .....	39
2.4.3.7 <i>Instrumentation</i> .....	40
2.5 Fenomena Fluidisasi .....	42
2.5.1 Proses Fluidisasi .....	42
2.5.2 Kondisi Fluidisasi .....	42
2.5.3 Jenis-Jenis Fluidisasi .....	44
2.5.3.1 <i>Fluidisasi Partikulat (Particulate Fluidization)</i> .....	44
2.5.3.2 <i>Fluidisasi Gelembung (Bubbling Fluidization)</i> .....	45
2.5.4 Parameter-Parameter Fluidisasi .....	46
2.5.4.1 Ukuran partikel .....	46
2.5.4.2 Massa Jenis Padatan .....	46
2.5.4.3 <i>Sphericity</i> .....	47
2.5.4.4 <i>Bed voidage</i> .....	47
2.5.4.5 Kecepatan Fluidisasi Minimum .....	47
2.5.4.6 Penurunan Tekanan Melintas Hamparan .....	48
2.5.4.7 Penurunan Tekanan Melintas Distributor .....	49
2.5.4.8 Klasifikasi Pasir .....	51
2.5.4.9 Daerah Batas Fluidisasi ( <i>Fluidization Regimes</i> ) .....	55
<b>3. MODIFIKASI FEEDER FLUIDIZED BED COMBUSTOR</b> .....	<b>57</b>
3.1 Identifikasi Masalah .....	57
3.2 Desain Modifikasi Feeder .....	58
3.3 Permodelan Feeder FBC .....	59
3.4 Hasil Modifikasi Feeder FBC .....	62
<b>4. PERSIAPAN DAN PROSEDUR PENGUJIAN</b> .....	<b>64</b>
4.1 Persiapan Pengujian .....	64
4.1.1 Bahan Bakar Biomassa .....	64
4.1.1.1 Ranting Pohon .....	65
4.1.2 Pasir .....	65
4.1.3 Perlengkapan dan Peralatan .....	69
4.2 Standar Operasi Alar Pengujian .....	74
4.2.1 Sistem Feeder .....	74
4.2.2 Blower .....	76
4.2.3 Sistem Burner .....	77
4.2.4 Perlengkapan Keselamatan Kerja / <i>Personal Protective Equipment (PPE)</i> .....	81
4.3 Prosedur Pengujian Pembakaran .....	82

4.3.1 Rangkaian Alat Pengujian .....	83
4.3.2 Prosedur Pengambilan Data Pembakaran .....	84
4.3.2.1 Prosedur Pemanasan Awal Pembakaran .....	84
4.3.2.2 Prosedur Pengambilan Data .....	85
4.3.3 Prosedur Pengambilan Data Karakteristik Blower .....	86
4.3.4 Prosedur Pengambilan Data Karakteristik Feeder .....	86
<b>5. HASIL DAN ANALISA .....</b>	<b>88</b>
5.1 Hasil .....	88
5.1.1 Karakteristik Feeder .....	88
5.1.2 Karakteristik Blower .....	90
5.1.3 Karakteristik Pembakaran Ranting dengan FBC .....	92
5.1.3.1 Pembakaran dengan Feeding Sejumlah Bahan Bakar Konstan 0,25 kg .....	92
5.1.3.2 Pembakaran dengan Feeding Sejumlah Bahan Bakar Konstan 0,5 kg .....	98
5.1.3.3 Pembakaran dengan Feeding Sejumlah Bahan Bakar Bertahap Naik ke-1 .....	104
5.1.3.4 Pembakaran dengan Feeding Sejumlah Bahan Bakar Bertahap Naik ke-2 .....	109
5.2 Analisa .....	111
5.2.1 Analisa Karakteristik Feeder dan Blower .....	111
5.2.2 Analisa Karakteristik Pembakaran Ranting dengan FBC .....	112
<b>6. KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>119</b>
6.1 Kesimpulan .....	119
6.2 Saran .....	120
<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>	<b>122</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>124</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	<i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	5
Gambar 2.1	Chart Teknologi Konversi Biomassa .....	11
Gambar 2.2	Proses Gasifikasi .....	12
Gambar 2.3	<i>Anaerobic Digester</i> .....	14
Gambar 2.4	<i>Rangkaian Instalasi Biogas</i> .....	15
Gambar 2.5	Analisis Proximat untuk Beberapa Jenis Bahan Bakar Padat	18
Gambar 2.6	Definisi Analisis Ultimat dan Proximat .....	19
Gambar 2.7	Skematis <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	27
Gambar 2.8	Diagram Proses Pencampuran ( <i>mixing</i> ) dalam <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	28
Gambar 2.9	Tahapan Proses Kerja <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	31
Gambar 2.10	Ruang Bakar Utama <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI .....	32
Gambar 2.11	Perilaku Gelembung Setiap Jenis Distributor .....	33
Gambar 2.12	Distributor yang Sebelumnya Digunakan pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI .....	34
Gambar 2.13	Jenis-Jenis <i>Solid Flow Control</i> .....	35
Gambar 2.14	<i>Screw Feeder</i> .....	36
Gambar 2.15	Burner yang Digunakan pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI	37
Gambar 2.16	<i>Cyclone Separator Fluidized Bed Combustor</i> UI .....	39
Gambar 2.17	Blower Sentrifugal yang Digunakan pada FBC .....	40
Gambar 2.18	<i>Control Panel</i> .....	41
Gambar 2.19	<i>Data Logger</i> .....	41
Gambar 2.20	Skematik Fluidisasi .....	42
Gambar 2.21	Hubungan Tinggi Hampan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hampan Zat Padat .....	43
Gambar 2.22	Hubungan Penurunan Tekanan Terhadap	

	Kecepatan Superfisial di Dalam Hampanan Zat Padat .....	44
Gambar 2.23	Diagram Klasifikasi Jenis-Jenis Pasir .....	51
Gambar 2.24	Daerah Batas Fluidisasi .....	56
Gambar 3.1	Sistem feeder yang digunakan sebelumnya .....	57
Gambar 3.2	Peralatan yang Digunakan untuk Permodelan Feeder .....	60
Gambar 3.3	Posisi Permodelan dengan Kemiringan 45 dan 60 Derajat ..	60
Gambar 3.4	Kedudukan Ranting saat di Dalam Pipa Model Feeder .....	61
Gambar 3.5	Kedudukan Ranting saat Jatuh dengan Kemiringan 45 dan 60 Derajat .....	61
Gambar 3.6	Feeder Hasil Modifikasi .....	62
Gambar. 4.1	Ranting setelah Dipotong Kecil .....	65
Gambar 4.2	Pasir Silika Mesh 30-50 yang Digunakan pada FBC UI .....	68
Gambar 4.3	Generator Set yang Digunakan .....	69
Gambar 4.4.	Posisi Termokopel .....	71
Gambar 4.5	<i>Temperature Data Logger</i> .....	72
Gambar 4.6	Timbangan untuk skala besar dan kecil .....	73
Gambar 4.7	<i>Control panel</i> yang Digunakan untuk Feeder dan Blower ...	73
Gambar 4.8	Sistem Feeder pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI .....	74
Gambar 4.9	<i>Ring Blower</i> pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI .....	76
Gambar 4.10	Bagian-bagian <i>Hi-Temp Premixed Burner</i> .....	80
Gambar. 4.11	Perlengkapan Pelindung Kerja .....	82
Gambar 4.12	Rangkaian Seluruh Alat untuk Melakukan Pengujian Pembakaran .....	84
Gambar 5.1	Grafik <i>Feed Rate</i> vs Putaran Feeder FBC .....	89
Gambar 5.2	Grafik <i>Feed Rate</i> vs Putaran Feeder FBC .....	89
Gambar 5.3	Grafik Q Blower FBC dalam m <sup>3</sup> /s .....	91
Gambar 5.4	Grafik Q Blower FBC dalam m <sup>3</sup> /menit .....	91
Gambar 5.5	Grafik Distribusi Temperatur Feeding Konstan 0,25 kg .....	97

Gambar 5.6	Grafik Distribusi Temperatur Rata-Rata Feeding Konstan 0,25 kg .....	98
Gambar 5.7	Grafik Distribusi temperatur Feeding Konstan 0,5 kg .....	103
Gambar 5.8	Grafik Distribusi Temperatur Rata-Rata Feeding Konstan 0,5 kg .....	104
Gambar 5.9	Grafik Distribusi Temperatur Jumlah Feeding Bertahap Naik ke-1 .....	108
Gambar 5.10	Grafik Distribusi Temperatur Rata-Rata Jumlah Feeding Bertahap Naik ke-1 .....	109
Gambar 5.11	Grafik Distribusi Temperatur Jumlah Feeding Bertahap Naik ke-2 .....	110
Gambar 5.12	Grafik Distribusi Temperatur Rata-Rata Jumlah Feeding Bertahap Naik ke-2 .....	111
Gambar 5.13	Grafik Perbandingan Temperatur <i>Fluidized Bed Area</i> (T2) Variasi Feeding Konstan .....	113
Gambar 5.14	Grafik Perbandingan Temperatur <i>Free Board Area</i> (T3) Variasi Feeding Konstan .....	114
Gambar 5.15	Grafik Temperatur <i>Fluidized Bed Area</i> Jumlah Feeding Bertahap Naik ke-1 .....	115
Gambar 5.16	Grafik Temperatur <i>Free Board Area</i> Jumlah Feeding Bertahap Naik ke-1 .....	116
Gambar 5.17	Grafik Temperatur <i>Fluidized Bed Area</i> Jumlah Feeding Bertahap Naik ke-2 .....	117
Gambar 5.18	Grafik Temperatur <i>Free Board Area</i> Jumlah Feeding Bertahap Naik ke-2 .....	118

## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Energi fosil Indonesia .....	1
Tabel 1.2	Potensi energi terbarukan Indonesia .....	2
Tabel 2.1	<i>Ultimate Anaysis</i> Beberapa Jenis Biomassa .....	19
Tabel 2.2	<i>Proximate Analysis</i> Beberapa Jenis Biomassa .....	19
Tabel 2.3	Nilai LHV Beberapa Jenis Biomassa .....	20
Tabel 2.4	Jenis-Jenis Bahan Bakar .....	23
Tabel 2.5	<i>Increasing Size and Density</i> .....	55
Tabel 4.1	<i>Specific Heat</i> Berbagai Substansi .....	66
Tabel 4.2	Sifat Fisik, Termal, dan Mekanik Pasir Silika .....	67
Tabel 4.3	Distribusi Ukuran Pengayakan Pasir Silika .....	68
Tabel 4.4	Spesifikasi Motor Feeder .....	75
Tabel 4.5.	Spesifikasi Teknis <i>Ring Blower</i> .....	76
Tabel 4.6	Spesifikasi Teknis <i>Hi-Temp Premixed Burner</i> .....	81
Tabel 5.1	Karakteristik Feeder .....	88
Tabel 5.2	Karakteristik Blower .....	90
Tabel 5.3	Pembakaran Konstan 0,25 kg .....	92
Tabel 5.4	Temperatur Rata-Rata Feeding Konstan 0,25 kg .....	98
Tabel 5.5	Pembakaran Konstan 0,5 kg .....	99
Tabel 5.6	Temperatur Rata-Rata Feeding Konstan 0,5 kg .....	103
Tabel 5.7	Pembakaran Bertahap Naik ke-1 .....	104
Tabel 5.8	Temperatur Rata-Rata Feeding Bertahap Naik ke-1 .....	108
Tabel 5.9	Pembakaran Bertahap Naik ke-2 .....	109
Tabel 5.10	Temperatur rata-rata Feeding Bertahap Naik ke-2 .....	111

## BAB 1

### PENDAHULUAN

#### 1.1 Judul Penelitian

Modifikasi Feeder dan Studi Karakteristik Pembakaran Biomassa Ranting Pohon pada Fluidized Bed Combustor UI dengan Kapasitas Umpan Maksimum.

#### 1.2 Latar Belakang Masalah

Kehidupan manusia tidak terlepas dengan penggunaan energi. 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\\_energy.cfm](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 penambahan 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

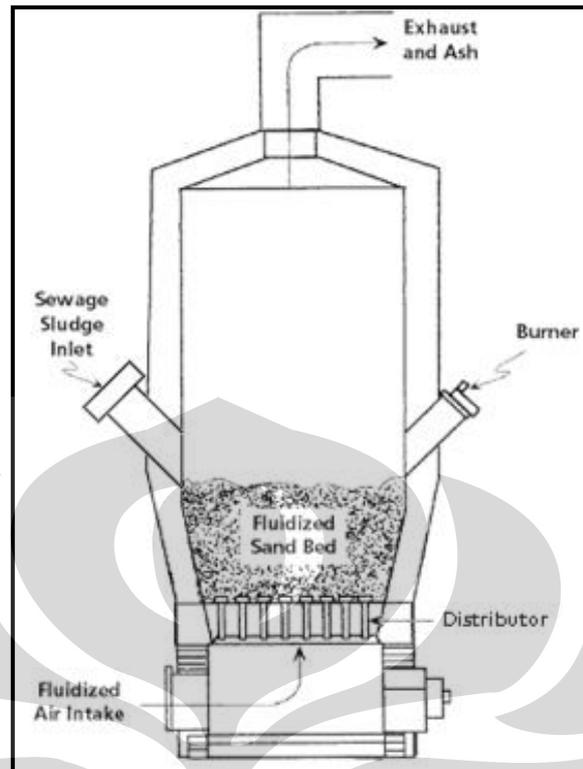
Sumber: Presentasi Menteri ESDM, 11 April 2008  
([http://www.wwf.or.id/about\\_wwf/whatwedo/climate/oursolution/mitigation222/renewable\\_energy.cfm](http://www.wwf.or.id/about_wwf/whatwedo/climate/oursolution/mitigation222/renewable_energy.cfm))

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 dibandingkan 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

*Fluidized Bed Combustor* yang saat ini dalam pengembangan masih meluapkan pemodifikasian agar alat tersebut dapat berjalan dengan optimal dan tanpa mengalami hambatan. Salah satu modifikasi yang akan dilakukan adalah modifikasi pada bagian sistem feeder. Pada saat pengoperasian alat ini, permasalahan yang ada pada sistem feeder tersebut adalah keluarnya asap hasil pembakaran yang melalui feeder. Hal ini terjadi dikarenakan tidak ada penutup pada bagian antara ujung feeder dan ruang pembakaran. Oleh karena itu, akan dibuat dibuat untuk menanggulangi hal ini.

Dalam penelitian ini juga akan dilakukan pengujian dengan melakukan pembakaran berbahan bakar ranting. Diharapkan kita dapat mengetahui karakteristik pembakaran dan distribusi temperature yang diperoleh dari pembakaran ranting ini menggunakan FBC.

### 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. Modifikasi feeder *Fluidized Bed Combustor*
2. Mengetahui karakteristik pembakaran bahan bakar ranting dengan menggunakan *Fluidized Bed Combustor* yang ada di Universitas Indonesia.
3. Mengetahui temperatur maksimal pembakaran dan distribusi temperatur pada *Fluidized Bed Combustor* dengan menggunakan bahan bakar ranting.

## 1.5 Batasan Masalah

Penelitian pada skripsi ini dibatasi permasalahannya agar dapat fokus pada tujuan yang diharapkan. Pembatasan masalah pada penelitian ini meliputi :

- a. Modifikasi feeder dilakukan untuk dapat mengurangi panas yang dapat mengalir ke system feeding yang berakibat pada terhambatnya putaran *screw* pada feeder.
- b. Penelitian yang dilakukan hanya mencakup eksperimental pembakaran yang tujuannya untuk mengetahui karakteristik pembakaran dengan bahan bakar ranting yang dimasukkan secara bertahap.
- c. Dari pengujian ini hanya diambil satu variasi laju aliran udara blower yakni pada putaran 3400 rpm.
- d. Pencatatan temperatur dilakukan secara manual.

## 1.6 Metodologi Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penyusunan skripsi ini terbagi menjadi 2 bagian, yaitu modifikasi feeder FBC dan uji pembakaran dengan bahan bakar ranting. Adapun tahap-tahapannya sebagai berikut :

### A. Modifikasi Feeder

#### 1. Design

- 1.1 Identifikasi masalah
- 1.2 Diskusi dan penelusuran literature
- 1.3 Gambar design

#### 2. Pabrikasi dan Instalasi

- 2.1 Pabrikasi modifikasi feeder
- 2.2 Instalasi produk hasil modifikasi feeder

### B. Uji pembakaran dengan bahan bakar ranting

#### 1. Persiapan

- 1.1. Identifikasi masalah yang akan dibahas

- 1.2. Penelusuran literatur
- 1.3. Pemilihan bahan bakar yang akan digunakan
2. Set Up Preparation
  - 2.1. Pengecekan peralatan FBC seperti blower, feeder, sistem termokopel, dan burner
  - 2.2. Persiapan bahan bakar
  - 2.3. Instalasi Instrumentasi laboratorium
3. Pengujian dan Pengambilan Data
  - 3.1. Pengoperasian FBC untuk mengetahui karakteristik sistematis prosedur operasional FBC.
  - 3.2. Pengukuran temperatur – temperatur di dalam sistem FBC dengan menggunakan bahan bakar ranting.
4. Pengolahan Data dan Grafik
  - 4.1. Perhitungan hasil pengetesan unit-unit FBC untuk penerapan pada kondisi operasi
  - 4.3. Interpretasi grafik perbandingan dari berbagai kondisi dari hasil pengolahan data
5. Analisa dan Kesimpulan
  - 5.1. Menganalisa karakteristik sistematis prosedur operasional FBC
  - 5.2. Menganalisa hasil yang diperoleh dari pengujian pembakaran bahan bakar ranting.
  - 5.3. Menarik kesimpulan dari keseluruhan proses penelitian yang dilakukan

## **1.7 Sistematis Penulisan**

Penulisan skripsi ini akan dibagi menjadi enam bab, yaitu :

### Bab I Pendahuluan

Bab ini berisi judul, latar belakang, pokok permasalahan, tujuan, pembatasan masalah, metodologi pengerjaan, serta sistematis penulisan.

### Bab II Landasan Teori

Bab ini berisi dasar-dasar teori yang digunakan mengenai combuator khususnya untuk tipe *Fluidized Bed*, fenomena fluidisasi, reaksi pembakaran, dan karakteristik sampah yang digunakan sebagai bahan bakar.

### Bab III Modifikasi Feeder *Fluidized Bed Combustor*

Bab ini berisi tentang pertimbangan, permodelan, perancangan, dan produk jadi dari modifikasi feeder *Fluidized Bed Combustor*.

### Bab IV Persiapan dan Prosedur Pengujian

Bab ini berisi pembahasan tentang persiapan yang dilakukan sebelum dilakukan pengujian.

### Bab V Hasil & Analisa

Bab ini membahas hasil-hasil yang didapat ketika melakukan pengujian dan analisa-analisa yang dapat diambil dari hasil-hasil tersebut.

### Bab VI Kesimpulan & Saran

Bab ini membahas mengenai kesimpulan dan saran dari pengerjaan modifikasi feeder dan pengujian *Fluidized Bed Combustor*.

## BAB 2

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Energi Biomassa

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

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

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

##### 2.1.1 Jenis-Jenis Biomassa

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

###### 2.1.1.1 Solid Biomassa

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

a) *Temperate Regions* (wilayah beriklim sedang)

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

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

Menghasilkan sedikit vegetasi untuk sumber energi.

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

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

#### 2.1.1.2 Biogas

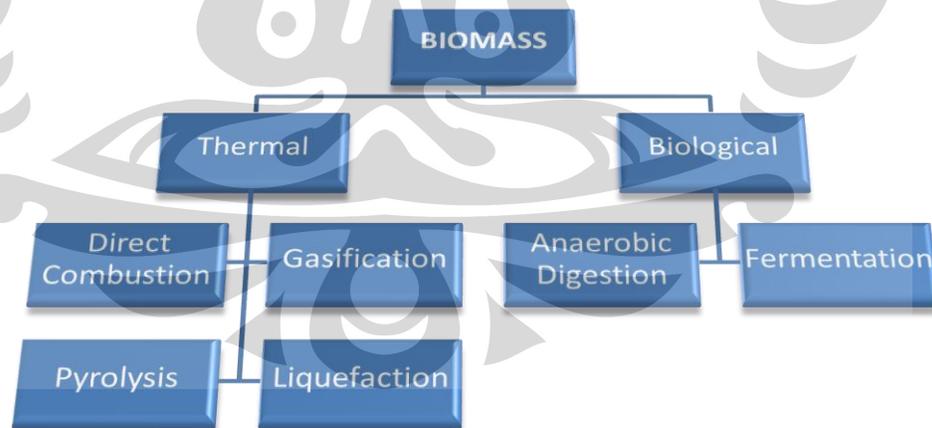
Biogas berasal dari material organik yang telah melewati proses fermentasi atau anaerob digesting oleh bakteri pada koindisi udara kekurangan oksigen yang kemudian menghasilkan gas yang dapat terbakar (*combustible gas*).

#### 2.1.1.3 Liquid Biofuel

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

#### 2.1.2 Teknologi Pengkonversian Energi Biomassa

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



Gambar 2.1 Chart Teknologi Konversi Biomassa

### 2.1.2.1 Proses Thermal

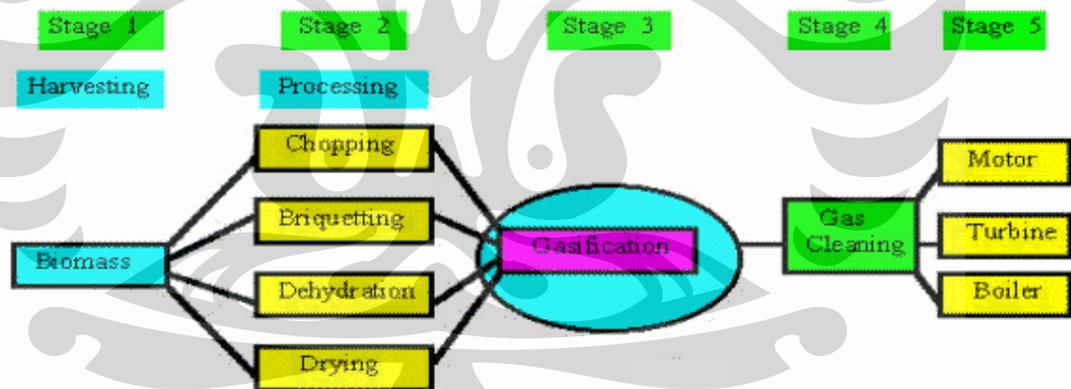
Ada 3 proses pemanasan dalam menghasilkan energi biomassa, yaitu:

#### 1. *Direct Combustor*

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

#### 2. *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 terbakar seperti  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $N_2$ , dan gas-gas lain yang tak dapat terbakar.



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

Secara umum ada 3 sesi proses gasifikasi biomassa:

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

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

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

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

### 3. *Pyrolysis*

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

Produk dari *pyrolysis* tergantung dari temperatur, tekanan, dan lain lain. Pada suhu  $200^{\circ}\text{C}$ , 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*

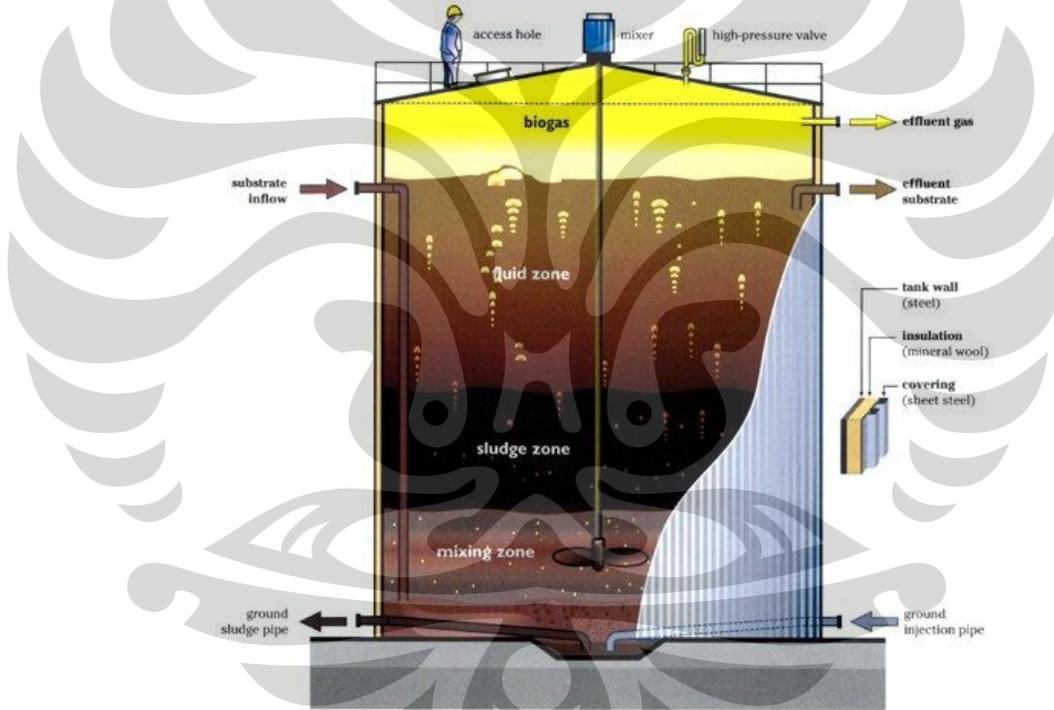
#### 2.1.2.2 Proses Biologis

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*

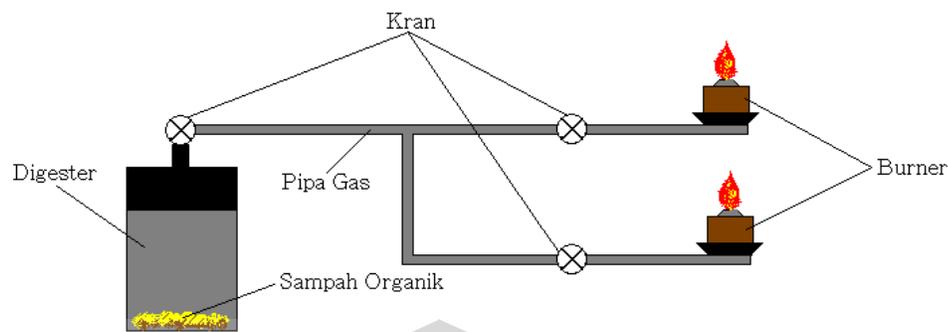
Proses ini adalah proses yang mengikutsertakan mikroorganisme untuk menguraikan material dengan kondisi tanpa oksigen. Proses ini dapat digunakan pada sampah organik dan juga kotoran hewan. *Anaerobic digestion* merupakan proses yang kompleks. Pertama-tama, mikro organisme mengubah material organik kedalam 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 carbon dioxide and other greenhouse gases
2. Membutuhkan energi yang lebih banyak untuk memproduksi biomassa dan mengumpulkannya dari pada energi yang dapat dihasilkan
3. Masih merupakan sumber energi yang mahal dalam memproduksi, mengumpulkan, dan mengubahnya kedalam bentuk energi yang lain

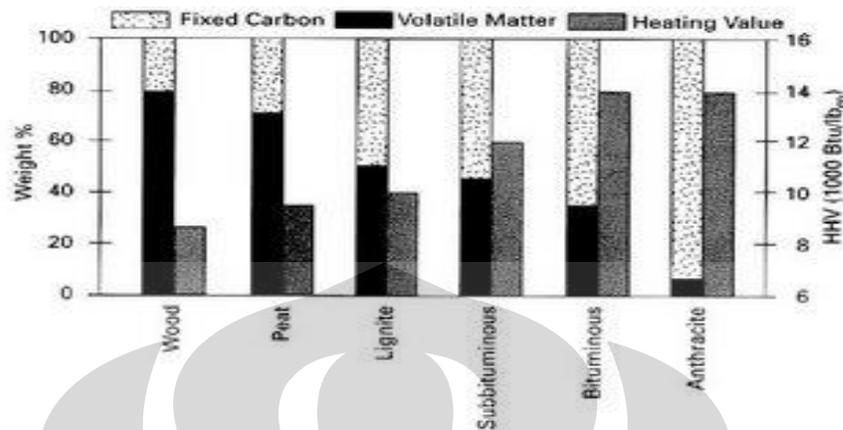
## 2.2 Karakteristik Biomassa

Potensi biomassa yang melimpah merupakan solusi energi masa depan karena dapat dikategorikan sebagai “*green and sustainable energi*” yaitu pemanfaatannya yang bersifat ramah lingkungan dan keberadaannya melimpah di dunia khususnya di Indonesia. Untuk pemanfaatan dengan cara *indirect combustor*, biomassa dikenal sebagai *zero 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) biomass (15-20 MJ/kg) lebih rendah dibanding nilai kalor batubara (25-33 kJ/kg) dan bahan bakar minyak (gasoline, 42,5 MJ/kg). Artinya untuk setiap kg biomassa hanya mampu menghasilkan energi 2/3 dari energi 1 kg batubara dan 1/2 dari energi 1 kg gasoline. Nilai kalor berhubungan langsung dengan kadar C dan H yang dikandung oleh bahan bakar padat. Semakin besar kadar keduanya akan semakin besar nilai kalor yang dikandung. Menariknya dengan proses charring (pembuatan arang), nilai kalor arang yang dihasilkan akan meningkat cukup tajam. Sebagai gambaran, dari hasil proses pembuatan arang batok kelapa pada temperatur 750°C dapat dihasilkan arang dengan nilai kalor atas (HHV) 31 MJ/kg. Nilai ini setara dengan nilai kalor batubara kelas menengah ke atas.

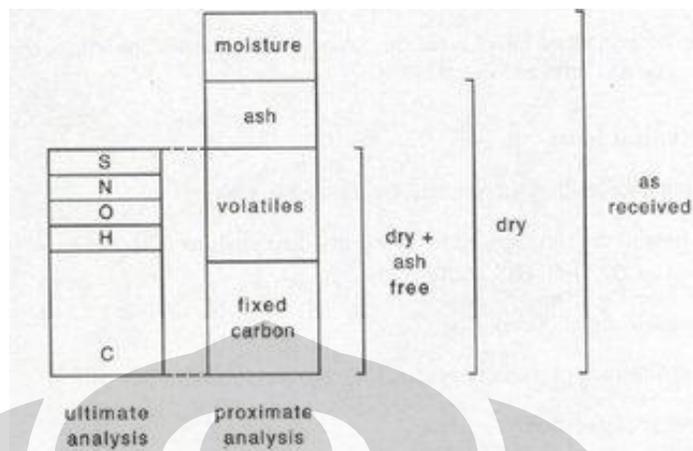
Nilai kalor rendah (LHV, *lower heating value*) adalah jumlah energi yang dilepaskan dari proses pembakaran suatu bahan bakar dimana kalor laten dari uap air tidak diperhitungkan, atau setelah terbakar, temperatur gas pembakaran dibuat 150°C. Pada temperatur ini, air berada dalam kondisi fasa uap. Jika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

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



Gambar 2.5 Analisis Proximat untuk Beberapa Jenis Bahan Bakar Padat

Pada analisis proximat biomassa juga mengandung abu dan air (lihat Gambar di bawah). Massa biomassa awal umumnya diistilahkan sebagai *as received* (mengandung air, abu, volatil, dan karbon). Kadar abu dari 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 oxida keras (silica dan alumina) yang lebih rendah.



Gambar 2.6 Definisi Analisis Ultimat dan Proximat

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

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

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

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

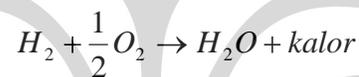
<i>Solid Waste</i>	<i>Moisture</i>	<i>Volatile</i>	<i>Fixed Carbon</i>	<i>Non Comb.</i>
Daun	9.97	66.92	19.29	3.82
Cangkang Kelapa	7,8	80,8	18,8	0,4
Ranting Pohon	20	67.89	11.31	0.8
Kertas	10.24	75.94	8.44	5.38

Tabel 2.3 Nilai LHV Beberapa Jenis Biomassa

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

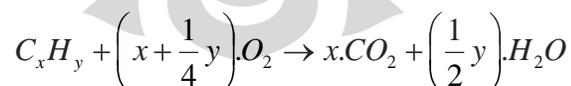
### 2.3 Sistem Reaksi Pembakaran

Pembakaran adalah sebuah reaksi antara oksigen dan bahan bakar yang menghasilkan panas. Oksigen diambil dari udara yang berkomposisi 21 % oksigen serta 79 % nitrogen (persentase volume), atau 77 % oksigen serta 23 % nitrogen (persentase massa). Unsur terbanyak yang terkandung dalam bahan bakar adalah karbon, hidrogen, dan sedikit sulfur. Pembakaran pada umumnya terdiri dari tiga proses, yaitu:



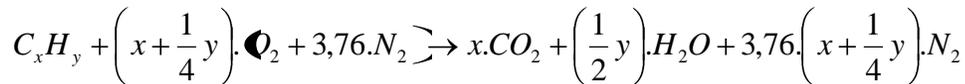
Tiga senyawa dan panas yang dihasilkan tersebut disebut juga sebagai hasil pembakaran.

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



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

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



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

- Proses pembakaran-kaya



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

- Proses pembakaran-miskin



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

### 2.3.1 Hal-Hal Yang Harus Diperhatikan Dalam Proses Pembakaran

Sebelumnya telah dibahas reaksi kimia pembakaran secara teoritis. Namun pada kenyataannya, proses pembakaran ini akan menghasilkan gas-gas atau sisa-sisa hasil pembakaran lainnya yang tidak disebutkan pada reaksi tersebut. Untuk memperoleh hasil pembakaran yang baik, maka proses pembakaran harus memperhatikan parameter-parameter seperti *mixing* (pencampuran), udara,

temperatur, waktu, dan kerapatan. Berikut ini merupakan hal-hal yang harus diperhatikan dalam proses pembakaran, yaitu :

1. *Mixing*

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

2. Udara

Dalam proses pembakaran, udara pembakaran harus diperhatikan, karena dapat menentukan apakah pembakaran tersebut berlangsung dengan sempurna atau tidak sempurna. Pemberian udara yang cukup akan dapat mencegah pembakaran yang tidak sempurna, sehingga  $CO$  dapat bereaksi lagi dengan  $O_2$  untuk membentuk  $CO_2$ .

3. Temperatur

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

4. Waktu

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

5. Kerapatan

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

### 2.3.2 Komponen-Komponen Utama Reaksi Pembakaran

Suatu reaksi pembakaran memiliki 3 komponen utama, yaitu :

1. Zat yang dibakar

Unsur-unsur kimia pada bahan bakar yang berpotensi memberikan energi kalor adalah karbon, oksigen, hidrogen, dan sulfur. Setiap bahan bakar memiliki

kandungan energi kalor yang dinyatakan dalam jumlah karbon. Jenis bahan bakar dibedakan menjadi tiga bentuk, seperti pada tabel 2.1.

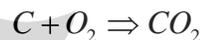
Tabel 2.4 Jenis-Jenis Bahan Bakar

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

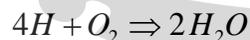
## 2. Zat yang membakar

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

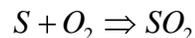
- Karbon terbakar sempurna akan membentuk  $CO_2$  menurut persamaan :



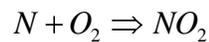
- Hidrogen terbakar sempurna akan membentuk  $H_2O$  menurut persamaan :



- Belerang terbakar akan membentuk  $SO_2$  menurut persamaan :



- Nitrogen terbakar membentuk  $NO_2$  menurut persamaan :



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

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

Kebutuhan udara dalam proses pembakaran dapat diklasifikasikan menjadi sebagai berikut :

- Udara primer

Udara yang bercampur dengan bahan bakar dalam ruang bakar.

- Udara sekunder

Udara yang masuk dari sekeliling ruang bakar.

- Udara tersier

Udara yang menembus celah pada ruang bakar.

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

Nilai *excess air* ini dapat ditulis sebagai berikut :

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

keterangan :  $m = excess\ air$

$A_o =$  jumlah udara teoritis

$A =$  jumlah udara aktual

### 3. Zat yang dihasilkan dari pembakaran

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

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

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

#### 2.4 Fluidized Bed Combustor

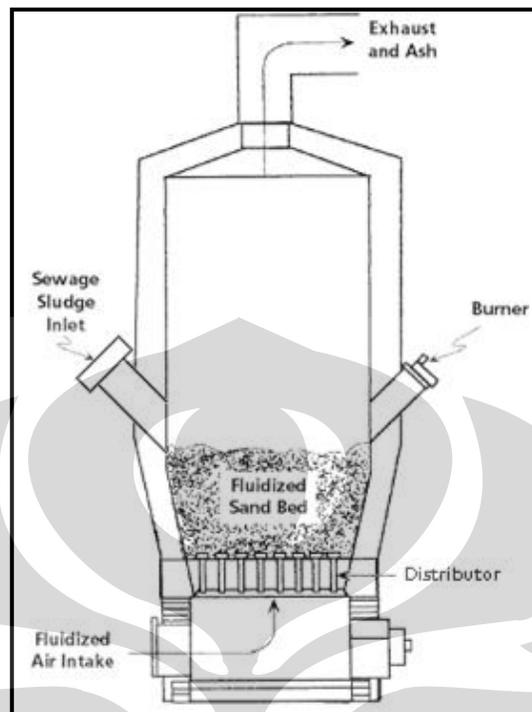
*Fluidized bed combustor* adalah sebuah tungku pembakar yang menggunakan media pengaduk berupa pasir seperti pasir kuarsa dan silika, tujuannya agar terjadi pencampuran (*mixing*) yang homogen antara udara dengan butiran-butiran pasir tersebut. *Mixing* yang konstan antara partikel-partikel mendorong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

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

sehingga pembakaran dapat terjaga pada temperatur konstan. Dalam beberapa instalasi, suatu sistem water spray digunakan untuk mengendalikan suhu ruang bakar.

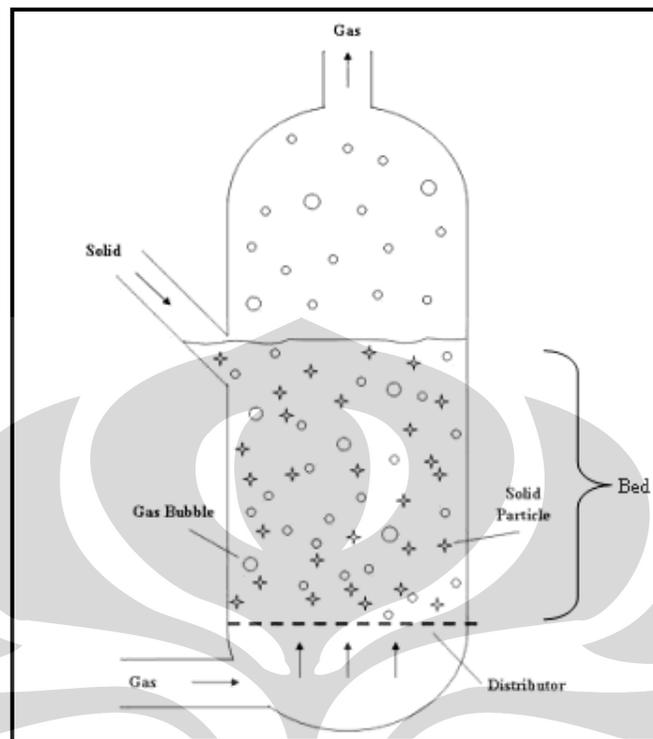
Reaktor unggun atau hampanan fluidisasi (*fluidized bed*) berfungsi meningkatkan penyebaran umpan bahan bakar yang datang dengan pemanasan yang cepat sampai temperatur pengapiannya (*ignition*) serta meningkatkan waktu kontak yang cukup dan juga kondisi pencampuran yang hebat untuk pembakaran sempurna.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

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



Gambar 2.7 Skematis *Fluidized Bed Combustor*

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



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

Pencampuran dalam *fluidized bed* terdistribusi secara cepat dan seragam antara bahan bakar dan udara atau gas seperti yang diperlihatkan pada gambar, sehingga mengakibatkan perpindahan kalor dan pembakaran yang baik. Hampan pasir itu sendiri memiliki kapasitas panas yang besar, yang membantu mengurangi terjadinya fluktuasi temperatur sesaat yang dapat diakibatkan oleh nilai kalor bahan bakar (sampah) yang bervariasi. Kapasitas penyimpanan panas ini juga memungkinkan untuk proses startup yang lebih cepat, jika waktu shutdown sebelumnya belum terlalu lama. Proses pembakaran dengan teknologi ini telah berkembang relatif cepat sejak tahun 1960-an, dan sampai saat ini metode ini masih terus dikembangkan lebih lanjut di kawasan Eropa, Amerika, Jepang, Australia, dan negara-negara maju lainnya.

#### 2.4.1 Jenis-Jenis *Fluidized Bed Combustor*

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

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

Selanjutnya udara pembakaran pada CFB disuplai dalam dua tahap yaitu udara primer (fluidisasi) dan udara sekunder, dan sehingga beban daya dari blower dapat dikurangi. Pembakaran dua tahap ini juga dilakukan untuk mengurangi efek buruk terhadap lingkungan seperti polutan yang dihasilkan. BFB memiliki kekurangan pada proses *agitation* (pergolakan) dan pencampuran dalam ruang bakar terganggu jika ukuran ruang bakar diperbesar. Sebaliknya, CFB berukuran besar pun dapat menjaga pembakaran dengan baik sekali karena terjadinya proses *agitation* yang cukup dan pencampuran dipengaruhi oleh fluidisasi berkecepatan tinggi. Dalam pembakaran CFB, bagian dari material *bed* dan *unburned char* yang terbawa keluar dari atas *riser* ditangkap oleh siklon dan disirkulasikan kembali ke dalam sistem, dan terbakar dengan sempurna.

#### 2.4.2 Pinsip Kerja *Fluidized Bed Combustor*

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

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

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

##### 1. Kondisi awal

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

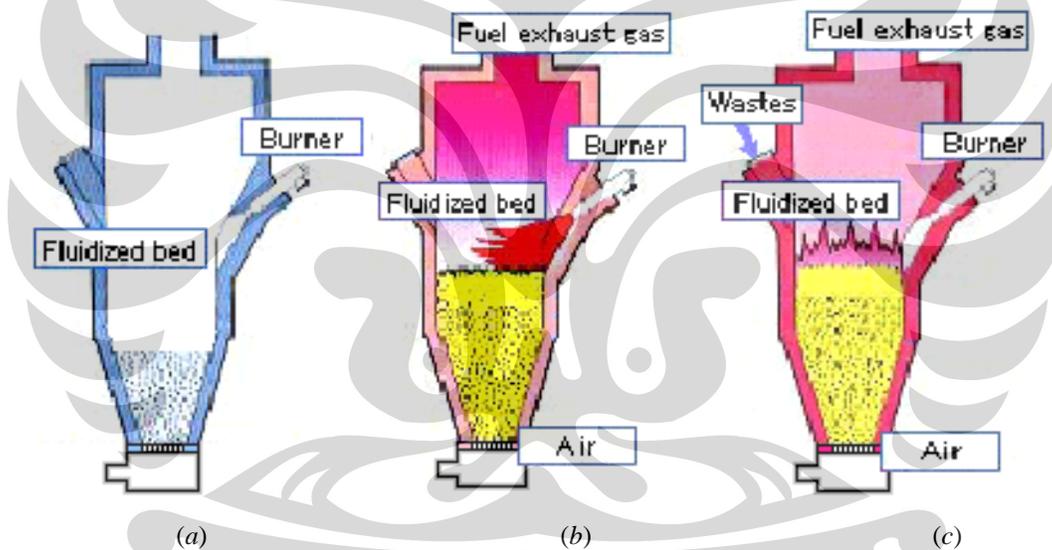
##### 2. Proses pemanasan

Pada tahapan proses pemanasan, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.5b, pasir tersebut mulai dipanaskan. Udara bertekanan mulai dialirkan dari blower ke dalam ruang bakar dari bagian bawah insinerator untuk menfluidisasi pasir. Pada kondisi ini sudah terjadi fluidisasi pada kecepatan fluidisasi minimum. Proses pemanasan dilakukan dengan bahan bakar bantu dari burner. Burner memanaskan pasir sampai temperatur operasi (750 – 900 °C). Untuk mempercepat pemanasan dapat ditambahkan bahan bakar ke dalam reaktor berupa kayu bakar atau pun batu bara.

### 3. Kondisi operasi

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

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



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

#### 2.4.3 Bagian-Bagian *Fluidized Bed Combustor*

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

#### 2.4.3.1 *Fluidization Vessel*

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

##### 1. Ruang Bakar

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



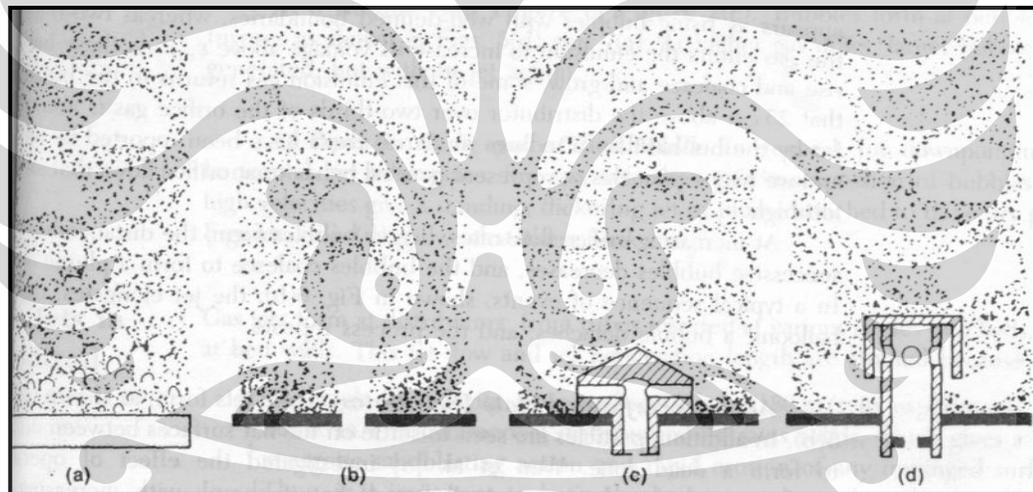
Gambar 2.10 Ruang Bakar Utama *Fluidized Bed Combustor* UI

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

berfungsi sebagai tempat penyimpanan. Volume yang besar dari ruang bakar ini membantu dalam proses pirolisa terhadap bahan bakar padat, dan juga dapat membantu peningkatan stabilitas termal di dalam ruang bakar.

## 2. Distributor

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



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



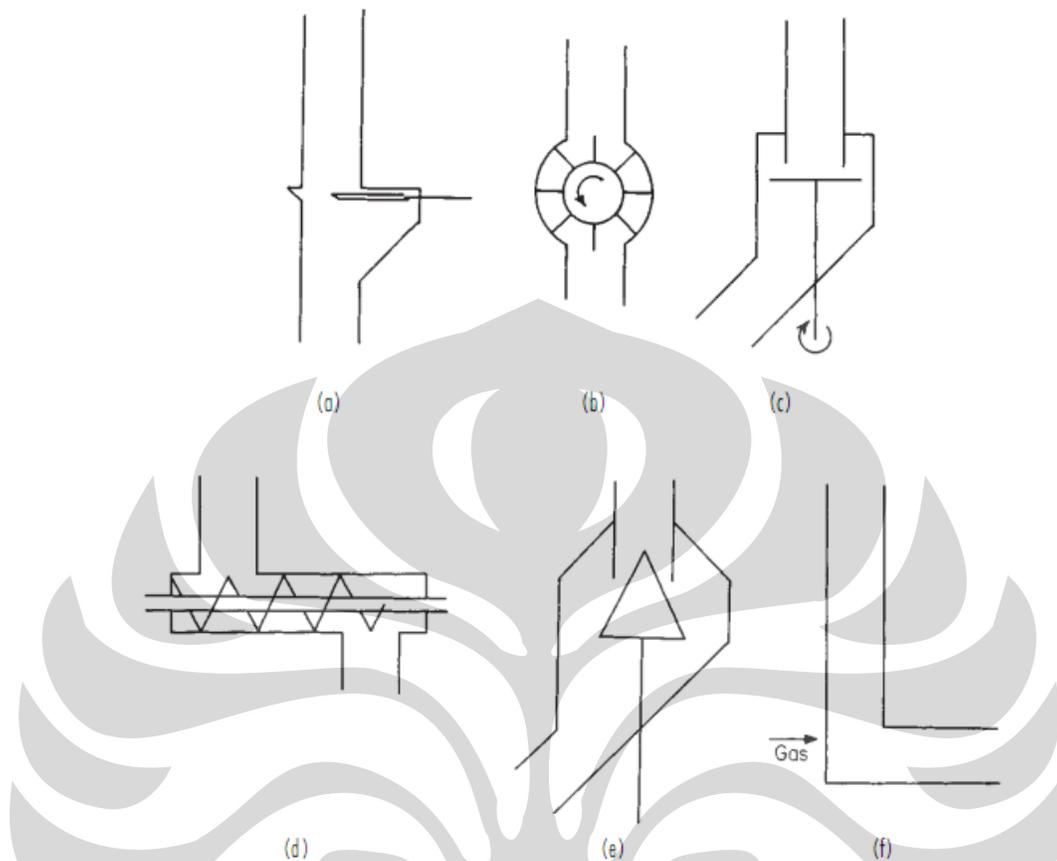
Gambar 2.12 Distributor yang Sebelumnya Digunakan pada *Fluidized Bed Combustor* UI

### 3. *Plenum*

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

#### 2.4.3.2 *Solid Feeder*

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



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

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

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



Gambar 2.14 *Screw Feeder*

#### 2.4.3.3 Burner

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

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

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



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

#### 2.4.3.4 *Bed Material*

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

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

- *Group A*

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

- *Group B*

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

- *Group C*

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

- *Group D*

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

Untuk tujuan fluidisasi yang baik, sebaiknya menggunakan pasir silika atau pasir kuarsa dengan ukuran diameter  $400 - 600 \mu m$ . Pasir jenis ini diklasifikasikan diantara grup B. Pasir kuarsa dan pasir silika tidak jauh berbeda kandungannya, keduanya sama-sama memiliki kandungan  $\text{SiO}_2$ . Kedua pasir tersebut berasal dari batuan yang sangat keras sehingga sangat cocok digunakan untuk penggunaan pada temperature tinggi dan sebagai media pentansfer panas.

#### 2.4.3.5 Cyclone separator

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

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

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



Gambar 2.16 *Cyclone Separator Fluidized Bed Combustor UI*

#### 2.4.3.6 *Blower*

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

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



Gambar 2.17 Blower Sentrifugal yang Digunakan pada FBC

#### 2.4.3.7 Instrumentation

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

1. *Control Panel*

Berfungsi untuk mengontrol putaran feeder dan putaran blower.



Gambar 2.18 *Control Panel*

2. *Termokopel*

Berfungsi untuk mengukur temperatur di dalam ruang bakar.

3. *Data logger*

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

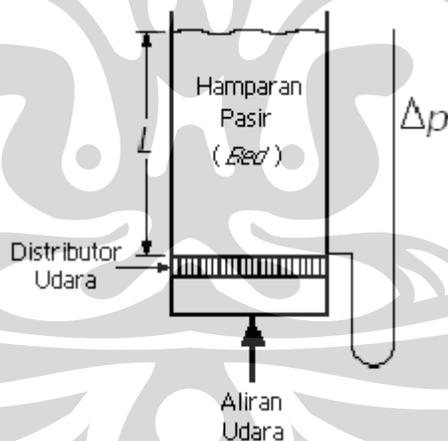


Gambar 2.19 *Data Logger*

## 2.5 Fenomena Fluidisasi

### 2.5.1 Proses Fluidisasi

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



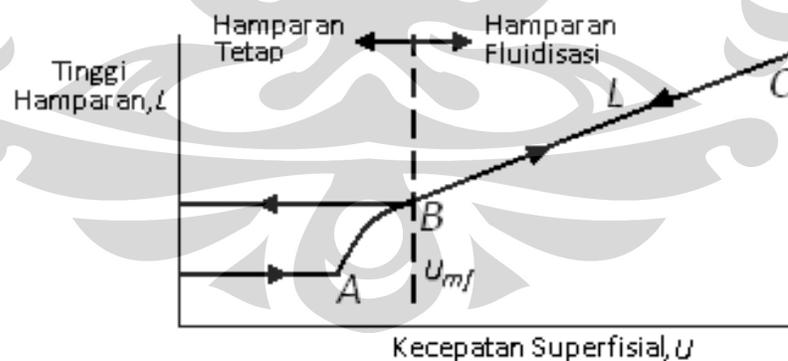
Gambar 2.20 Skematik Fluidisasi

### 2.5.2 Kondisi Fluidisasi

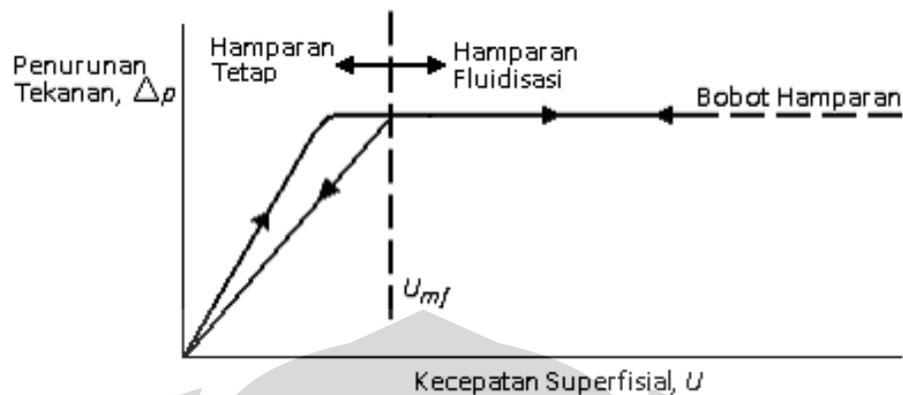
Perhatikan suatu tabung vertikal yang sebagian berisi dengan bahan butiran, sebagaimana terlihat dalam skema gambar. Tabung itu turbulen pada bagian atas, dan mempunyai plat berpori pada bagian bawah untuk menopang pasir di atasnya serta

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

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



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



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

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

### 2.5.3 Jenis-Jenis Fluidisasi

#### 2.5.3.1 Fluidisasi Partikulat (*Particulate Fluidization*)

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

#### 2.5.3.2 Fluidisasi Gelembung (*Bubbling Fluidization*)

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

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

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

#### 2.5.4 Parameter-Parameter Fluidisasi

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

##### 2.5.4.1 Ukuran partikel

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

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

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

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

##### 2.5.4.2 Massa Jenis Padatan

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

porositasnya nol. Dalam perhitungan hamparan fluidisasi (*fluidized bed*) biasanya menggunakan massa jenis partikel ( $\rho_p$ ), 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.

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

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 ( $\rho_b$ ).

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

#### 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.

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

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

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

bilangan *Archimedes* ( $Ar$ ):

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

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

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

$\rho_f$  = 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 Hambaran

Suatu hambaran 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 hambaran 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:

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

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:

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

Sehingga persamaan penurunan tekanan melalui distributor adalah:

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

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

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

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

Keterangan :  $\Delta P_d$  = 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 (  $kg/m^3$  )

$C_D$  = *Orifice discharge coefficient*

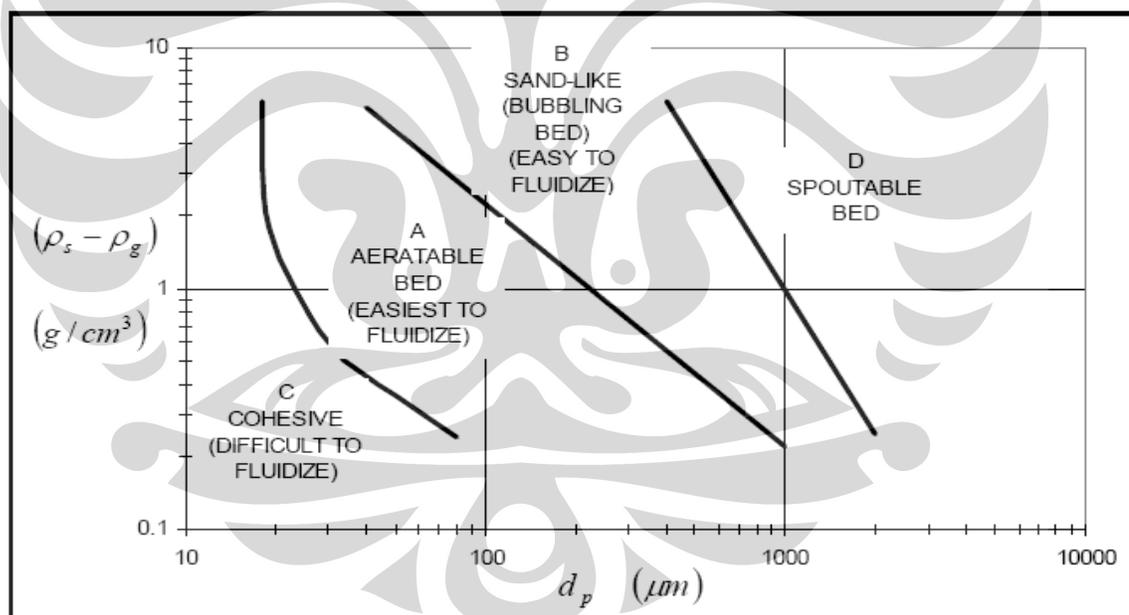
$t$  = tebal plat distributor (  $m$  )

$d_{or}$  = diameter orifis pada distributor (  $m$  )

#### 2.5.4.8 Klasifikasi Pasir

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

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



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

Klasifikasi jenis-jenis pasir menurut Geldart, yaitu :

a) *Group A*

Pasir yang dikategorikan dalam *group A* menurut Geldart biasanya memiliki massa jenis kurang dari  $1400 \text{ kg/m}^3$  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. Hampan pasir pada kelompok ini sangat mengembang pada kecepatan udara antara  $U_{mf}$  dan kecepatan yang mana gelembung mulai terjadi,  $U_{mb}$ , karena pasir seperti itu sedikit kohesif. Pasir jenis ini memperlihatkan suatu peningkatan hampan (*bed*) nyata yang mengembang stabil ketika kecepatan fluidisasi minimum terlampaui dahulu, dan fluidisasi dapat terjaga seragam atau fluidisasi partikulat seperti itu bahkan sampai kecepatan fluidisasi minimum telah terlampaui dua sampai tiga kalinya. Tetapi, dengan memperbesar lagi kecepatan udara sampai pada suatu titik yang mana terjadinya hampan mengempis kembali sehingga pada keadaan kurang mengembang yang kira-kira pada tingkat mengembangnya hampan di bawah kondisi fluidisasi minimum dan kebanyakan udara berlebih akan mengalir melalui hampan seperti fase gelembung, yakni yang sering disebut dengan fluidisasi agregativ. Kecepatan udara pada saat yang mana hampan mengempis terjadi merupakan kecepatan minimum gelembung (*minimum bubbling velocity*,  $U_{mb}$ ).

b) *Group B*

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

c) *Group C*

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

d) *Group D*

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

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

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

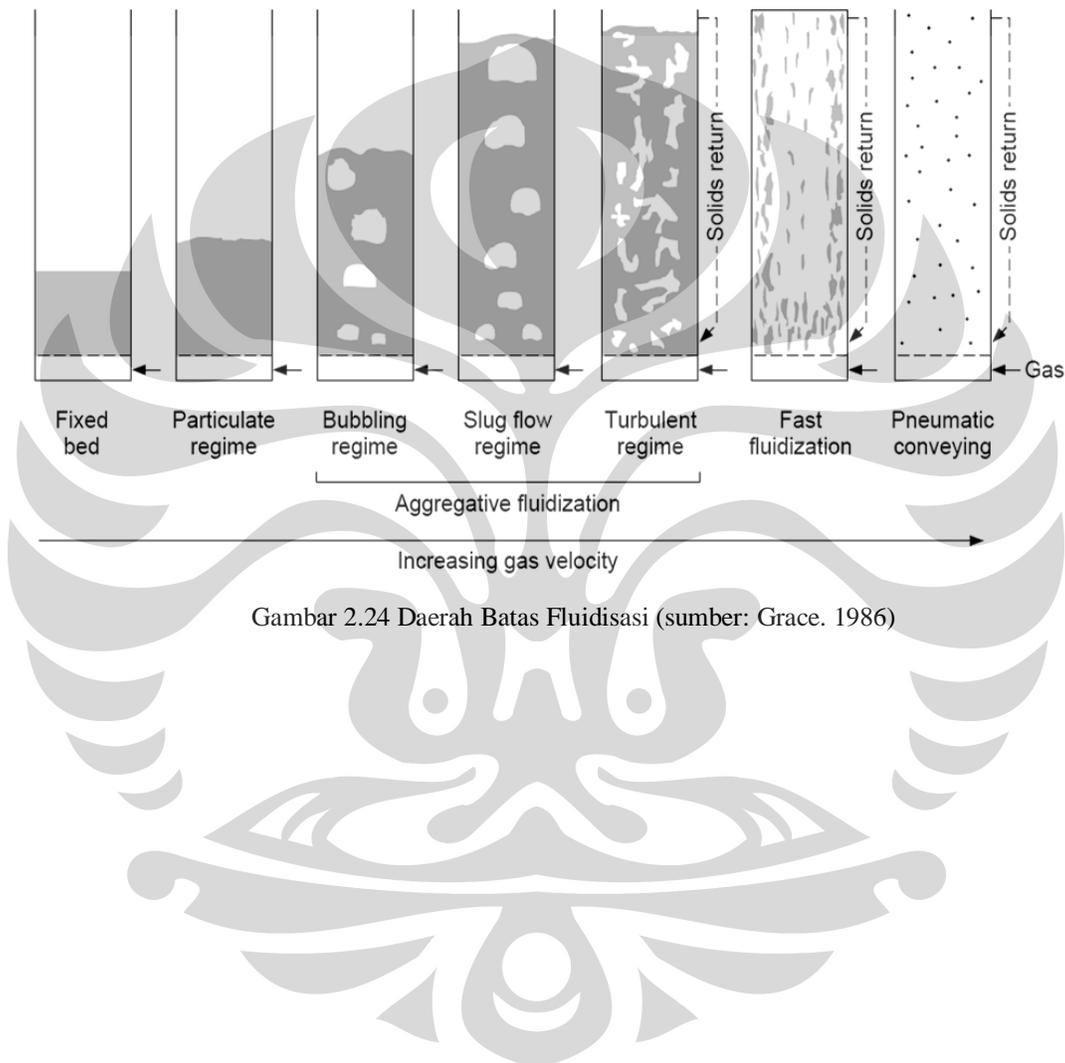
<sup>a</sup> At equal  $U-U_{mf}$ .

<sup>b</sup> At equal  $d_p$ .

#### 2.5.4.9 Daerah Batas Fluidisasi (*Fluidization Regimes*)

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

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



Gambar 2.24 Daerah Batas Fluidisasi (sumber: Grace. 1986)

## BAB 3

### MODIFIKASI FEEDER FLUIDIZED BED COMBUSTOR

#### 3.1 Identifikasi Masalah

Feeder pada system *Fluidized Bed Combustor* merupakan salah satu unit yang memiliki fungsi untuk memasukkan bahan bakar ke dalam ruang bakar. Feeder yang saat ini digunakan menggunakan tipe *screw feeder*. Dengan menggunakan feeder dengan tipe ini memungkinkan pemasukan bahan bakar dapat dilangsungkan dengan *feed rate* yang relative konstan. Feeder juga dihubungkan dengan control panel yang dapat mengatur kecepatan putar motor, sehingga kita juga dapat mengatur *feed rate* yang diinginkan.



Gambar 3.1 Sistem Feeder yang Digunakan Sebelumnya

Namun akibat dari tingginya temperatur pengoperasian dari *Fluidized Bed Combustion* ini, maka ada beberapa permasalahan yang timbul berhubungan dengan penggunaan feeder jenis *screw conveyor* ini. Permasalahan yang ada antara lain :

- Ketika proses pengoperasian berjalan maka timbul aliran panas yang mengalir secara konduksi dan konveksi melalui jalur feeder. Hal tersebut mengakibatkan terjadinya perpindahan panas ke bagian screw sehingga screw menjadi memuai akibat proses pemanasan dan hal ini berdampak macetnya jalur masukan bahan bakar.
- Ketika screw tidak berfungsi maka satu-satunya jalan untuk memasukkan bahan bakar hanya melalui pintu pada reaktor dan hal ini sangat berbahaya karena saat pengoperasian reaktor bisa mengeluarkan pasir panas beserta gas pembakaran.

oleh sebab itulah, modifikasi feeder diperlukan untuk mengurangi permasalahan tersebut.

### **3.2 Desain Modifikasi Feeder**

Desain modifikasi dilakukan untuk dapat mengurangi permasalahan yang terjadi seperti yang telah disebutkan sebelumnya. Selain yang telah disebutkan sebelumnya, modifikasi dilakukan agar feeder yang akan dibuat memiliki fungsi pemasukan bahan bakar dengan system batch dan tanpa menambah kembali permasalahan aliran panas yang mengalir ke feeder pada saat operasional pembakaran. Oleh karena itu, modifikasi yang dilakukan adalah dengan memberikan system dua pintu dan diantara dua pintu tersebut terdapat sebuah ruang yang dipersiapkan untuk sejumlah bahan bakar, dimana bahan bakar tersebut yang nantinya akan masuk ke dalam ruang bakar. Sehingga sistem dua pintu ini dapat menanggulangi permasalahan aliran panas sekaligus menambah fungsi sistem batch pada pemasukan bahan bakar.

Dimensi modifikasi juga mempertimbangkan aspek ruang pada laboratorium *Fluidized Bed Combustor*. Dengan adanya penambahan ruang diantara dua pintu seperti yang telah dijelaskan, maka ini akan menambah panjang secara horizontal dan panjang secara vertikal dimensi hasil modifikasi ini. Sehingga modifikasi yang dilakukan adalah dengan membelokkan jalur perjalanan bahan bakar masuk ke dalam ruang bakar. Maka hasil yang diperoleh adalah bahan bakar akan masuk ke dalam ruang dimana screw feeder berada dimana jalur ini memiliki lintasan horizontal, kemudian membelok ke bawah

dengan sudut  $45^\circ$  dimana bahan bakar akan melewati sistem dua pintu yang berhubungan langsung dengan ruang bakar. Panjang vertikal corong yang digunakan untuk memasukkan bahan bakar juga dikurangi agar dapat memberi peluang lebih untuk penambahan panjang secara vertikal. Pemotongan ini dilakukan tanpa meniadakan fungsi corong pada system feeder.

Modifikasi juga dilakukan dengan menambah 2 pintu maintenance pada sistem feeder. Pintu maintenance yang pertama ditempatkan di atas belokan jalur feeder saat mulai mengarah ke bawah masuk ke ruang bakar. Sedangkan pintu maintenance yang kedua ditempatkan di atas ruang diantara dua pintu yang telah dijelaskan sebelumnya. Pintu maintenance ini berfungsi agar kita dapat melakukan pembersihan di dalam sistem feeder dan jugaantisipasi jika terjadi kemacetan pada perjalanan bahan bakar masuk ke ruang bakar.

### 3.3 Permodelan Feeder FBC

Konsep design yang telah dibuat dimodelkan terlebih dahulu sebelum dilakukannya pabarikasi. Hal ini untuk memastikan modifikasi yang akan dibuat akan sesuai yang diharapkan. Pada permodelan ini akan menunjukkan tentang :

1. Keoptimalan kemiringan pada jalur yang mengarah langsung dengan ruang bakar
2. Memodelkan system 2 pintu
3. Dan memodelkan karakteristik jatuh bahan bakar ke ruang bakar.

Permodelan menggunakan dua bagaian besar peralatan sederhana yaitu, drum oli dan pipa besi berukuran 8 inch. Drum oli dan pipa besi dilakuakn proses *machining* sehingga mendekati konsep design yang telah dijelaskan sebelumnya



Gambar 3.2 Peralatan yang Digunakan untuk Permodelan Feeder

Permodelan dilakukan dengan dua variasi kemiringan jalur masuk bahan bakar yaitu  $45^\circ$  dan  $60^\circ$ . jenis bahan bakar yang digunakan dalam permodelan ini adalah ranting yang telah dipotong kecil-kecil.



Gambar 3.3 Posisi Permodelan dengan Kemiringan 45 dan 60 Derajat

Dari hasil permodelan yang dilakukan, diperoleh hasil pengamatan sebagai berikut :

1. Karakteristik perjalanan ranting melaui pipa lebih terkonsentrasi mengalir pada bagian bawah pipa.



Gambar 3.4 Kedudukan Ranting saat di Dalam Pipa Model Feeder

2. Baik pada permodelan  $45^\circ$  maupun  $60^\circ$ , keduanya memiliki hasil jatuh yang relatif di tengah dasar drum. Tetapi dari hasil yang diperoleh,  $45^\circ$  lebih mengarah ke tengah dasar drum



Gambar 3.5 Kedudukan Ranting saat Jatuh dengan Kemiringan 45 dan 60 Derajat

3. Bahan bakar pada pipa tidak mengalami hambatan ketika mengalir di dalam pipa.

Dari hasil permodelan ini kemudian diambil keputusan untuk menerapkan design kemiringan  $45^\circ$  pada modifikasi feeder FBC. Keputusan ini juga memberi keuntungan dengan tidak harusnya melakukan perombakan pada ruang bakar yang sudah didesign dengan kemiringan  $45^\circ$  seperti sebelumnya ada.

### 3.4 Hasil Modifikasi Feeder FBC

Pabrikasi dilakukan oleh salah satu perusahaan manufaktur yang berlokasi di Cibitung, Jawa Barat. Setelah melakukan proses instalasi di Laboratorium FBC, unit feeder siap untuk digunakan kembali sebagai sistem feeding.





Gambar 3.6 Feeder Hasil Modifikasi

Tata cara sistem batch pemasukan bahan bakar dapat dilakukan dengan prosedur sebagai berikut :

1. Memasukkan bahan bakar yang disiapkan ke dalam sistem feeder melalui corong. Pada tahap awal ini pintu 2 dalam kondisi terbuka sedangkan pintu 1 dalam kondisi tertutup. Pada tahap ini memungkinkan bahan bakar akan tertampung terlebih dahulu sebelum memasuki ruang bakar karena tertahan oleh pintu 1.
2. Tutup pintu 2.
3. Buka pintu 1 untuk memasukkan bahan bakar masuk ke dalam ruang bakar.

Dengan melakukan tahap tersebut, diharapkan akan mengurangi aliran panas yang dapat masuk ke dalam sistem feeder yang dapat mengakibatkan terhentinya putaran screw feeder akibat pemuaiian. Dalam beberapa pengujian yang dilakukan setelah modifikasi ini, terhentinya putaran screw feeder akibat pemuaiian tidak terjadi.

## BAB 4

### 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).

#### 4.1 Persiapan Pengujian

##### 4.1.1 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.

#### 4.1.1.1 Ranting Pohon

Ranting pohon 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) yang lebih kecil. Hal ini dilakukan karena ranting yang diperoleh dari sumbernya masih berukuran panjang dan sebagian berdiameter besar. Pemotongan ranting menjadi kecil juga berguna untuk mempermudah ranting tersebut terbakar saat pengujian pembakaran. Dimensi ranting yang diperoleh setelah dihancurkan adalah sebagai berikut :



Gambar. 4.1 Ranting setelah Dipotong Kecil

Untuk mendapatkan partikel ranting pohon tersebut juga dilakukan beberapa tahap persiapan, yaitu pengumpulan dari kawasan hutan UI dan juga pemotongan menjadi panjang yang diinginkan, karena ranting awal yang didapat masih sangat panjang untuk digunakan dalam percobaan.

#### 4.1.2 Pasir

Pasir yang digunakan akan sangat berpengaruh terhadap berhasil tidaknya proses fluidisasi dan pembakaran yang akan dilakukan. Dalam menentukan jenis

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

Sebagai perbandingan nilai *specific heat* untuk substansi- substansi yang lain dapat dilihat pada tabel 4.1. Pasir silika memiliki titik lebur yang tinggi sampai mencapai temperatur sekitar  $1800 \text{ }^\circ\text{C}$  sehingga sangat cocok digunakan untuk aplikasi *fluidized bed combustor* yang *range* operasinya berada pada temperatur tinggi. Sifat fisik, termal dan mekanik pasir silika dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.1 *Specific Heat* Berbagai Substansi

<i>Substansi</i>	<i>Specific Heat</i> ( <i>cal/gram.°C</i> )	<i>Specific Heat</i> ( <i>J/kg.°C</i> )
air (murni)	1,00	4186
lumpur basah	0,60	2512
es ( $0 \text{ }^\circ\text{C}$ )	0,50	2093
lempung berpasir	0,33	1381
udara kering (permukaan laut)	0,24	1005
pasir silika	0,20	838
pasir kuarsa	0,19	795
Granit	0,19	794

(Sumber : <http://apollo.lsc.vsc.edu/Desember> 2009)

Tabel 4.2 Sifat Fisik, Termal, dan Mekanik Pasir Silika

<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>

(sumber: <http://www.azom.com/> Desember 2009)

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 4.3 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 4.3 Distribusi Ukuran Pengayakan Pasir Silika

Sieve Size		Individual Percent Retained				
US	$\mu\text{m}$	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 (Desember 2009)

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 4.2 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*) =  $8 \text{ cm} = 0,08 \text{ m}$

#### 4.1.3 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 4.3 Generator Set yang Digunakan

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

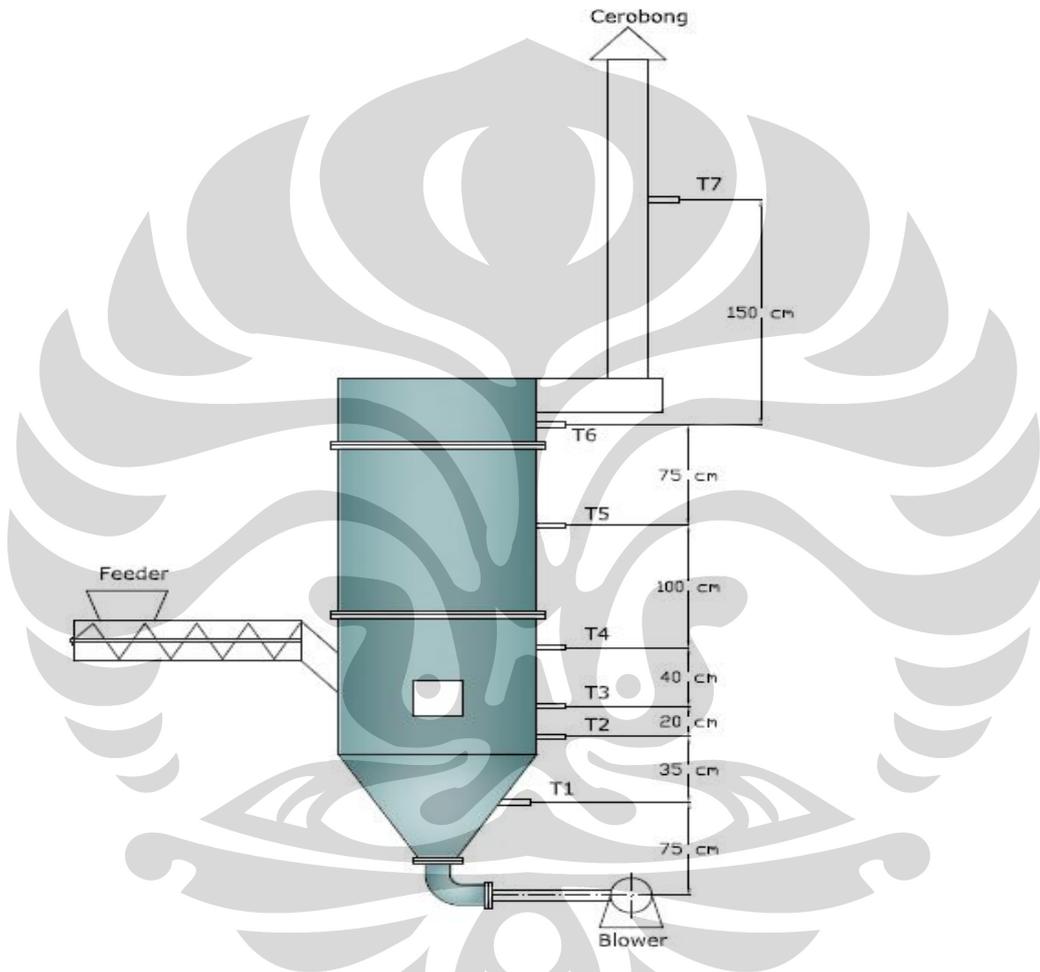
- *rated voltage* : 220 V
- *rated frequency* : 50 Hz

- *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 4.4. Posisi Termokopel

### 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 4.5 *Temperature Data Logger*

### 4. *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 4.6 Timbangan untuk skala besar dan kecil

### 5. 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 4.7 Control panel yang Digunakan untuk Feeder dan Blower

## 4.2 Standar Operasi Alat Pengujian

### 4.2.1 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 4.8 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 4.4 Spesifikasi Motor Feeder

HP	kW	V	A	Frequency
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.

#### 4.2.2 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 4.9 Ring Blower pada Fluidized Bed Combustor UI

Spesifikasi dari blower yang ada dapat dilihat berikut ini :

Tabel 4.5. Spesifikasi Teknis Ring Blower

<i>Phase</i>	3 Ø
<i>Frequency ( Hz )</i>	50 / 60
<i>Power ( kW )</i>	2,2
<i>Voltage ( V )</i>	220 - 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.

#### 4.2.3 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.

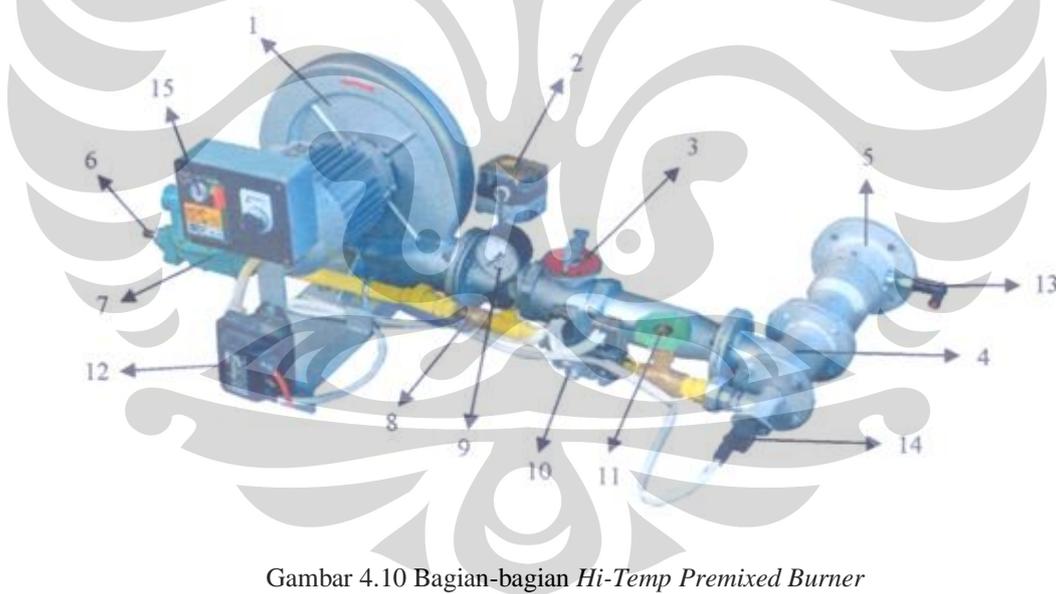
Penyetelan *hi-temp premixed burner* juga perlu dilakukan untuk dapat mengatur mutu nyala api dan panjang nyala api yang diinginkan. Mekanisme penyetelan burner adalah seperti berikut ini :

- *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 stel *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 4.10 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 4.6 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>

#### 4.2.4 Perlengkapan Keselamatan Kerja / *Personal Protective Equipment (PPE)*

Mengingat kondisi lingkungan kerja memiliki temperature yang tinggi dan berdebu akibat sisa hasil pembakaran maka dalam melaksanakan percobaan perlu diperhatikan juga kesehatan dan keselamatan kerja. Untuk itu penggunaan *personal protective equipments (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 kulit ( Hand Gloves )
- Masker
- Kaca Mata ( Safety Goggles )
- Helmet
- Baju kerja (Coverall)



Gambar. 4.11 Perlengkapan Pelindung Kerja

### 4.3 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.

#### 4.3.1 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 4.12 Rangkaian Seluruh Alat untuk Melakukan Pengujian Pembakaran

#### 4.3.2 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.

##### 4.3.2.1 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 kedalam 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 kedalam ruang bakar untuk menaikkan temperatur dan ditunggu hingga suhunya stabil 600-650 °C.

#### 4.3.2.2 Prosedur Pengambilan Data

1. Setelah temperatur stabil, bahan bakar yang sudah disiapkan yaitu ranting dengan sejumlah massa tertentu (0,25 kg, 0,5 kg, 0,75 kg, 1 kg, 1,25 kg, 1,5 kg, 1,75 kg, 2 kg) dimasukkan ke dalam ruang bakar melalui system feeder.
2. Dimulai dari sejumlah massa yang kecil (<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 sejumlah massa berikutnya, perubahan temperatur setiap menitnya juga dicatat. Dan seterusnya seperti itu hingga data yang diperoleh dari masing-masing sejumlah bahan bakar cukup.
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.

#### 4.3.3 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 :

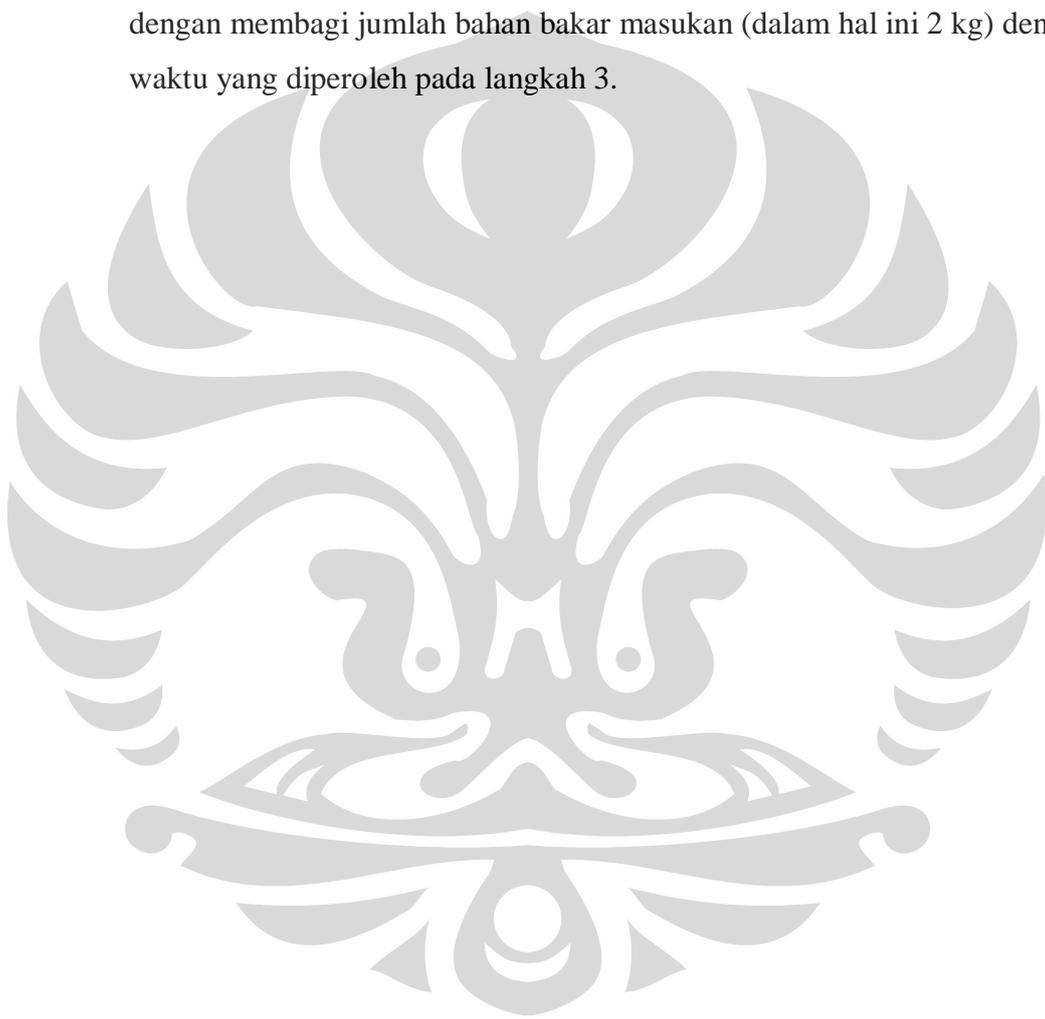
1. Pastikan bahwa blower sudah terhubung dengan panel kontrol dan juga ke genset.
2. Blower dinyalakan mulai dari putaran 2000 rpm, dan secara bertahap naik ke 200 rpm, 300 rpm, dan seterusnya sampai 3000 rpm (putaran maksimumnya adalah 3600 rpm).
3. Keluaran hembusan udara dari blower kemudian dihubungkan dengan peralatan manometer yang dibuat. Jenis manometer yang digunakan adalah jenis manometer air. Pada setiap besar putaran yang berbeda akan ada perbedaan ketinggian air. Catat perbedaan ketinggian air yang terjadi pada manometer air. Hal ini dilakukan untuk setiap putaran blower yang disebutkan pada langkah 2.
4. Perbedaan ketinggian air inilah yang kemudian digunakan untuk mengukur flow rate udara menggunakan rumus yang ada.
5. Data yang masih berupa satuan  $m^3/s$  dikonversi lagi menjadi satuan kg/s.

#### 4.3.4 Prosedur Pengambilan Data Karakteristik Feeder

Pengambilan data untuk karakteristik feeder ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan antara besarnya motor feeder dengan *feed rate* bahan bakar yang dapat dimasukkan pada putaran tersebut. Langkah-langkahnya disebutkan berikut ini :

1. Mempersiapkan sejumlah ranting yang akan digunakan sebagai bahan bakar masukan dalam pengambilan data karakteristik ini. Pada pengambilan data ini digunakan sejumlah bahan bakar sebanyak 2 kg.

2. Motor feeder dinyalakan mulai dari putaran 5 Hz dan secara bertahap naik ke 10 Hz, 15 Hz dan seterusnya sampai 50 Hz (putaran maksimum).
3. Masukkan bahan bakar yang telah dipersiapkan sebelumnya ke dalam feeder, kemudian catat waktu mulai jatuhnya bahan bakar ke dalam ruang bakar sampai waktu bahan bakar terakhir jatuh. Hal ini dilakukan untuk setiap putaran feeder yang disebutkan pada langkah 2.
4. Dari data yang diperoleh kemudian diperoleh data karakteristik *feed rate* dengan membagi jumlah bahan bakar masukan (dalam hal ini 2 kg) dengan waktu yang diperoleh pada langkah 3.



## BAB 5

### HASIL DAN ANALISA

#### 5.1 Hasil

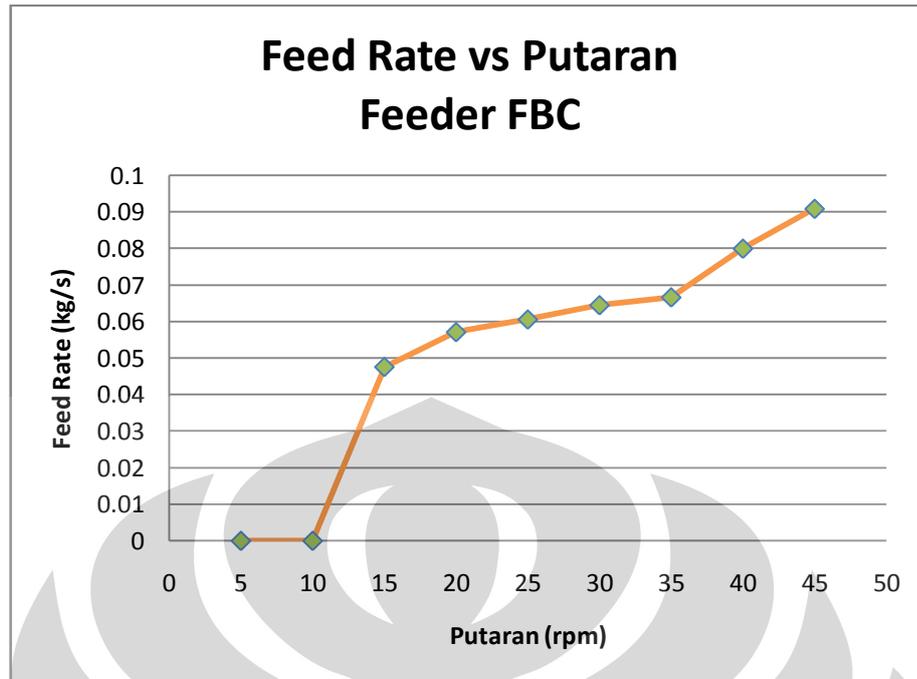
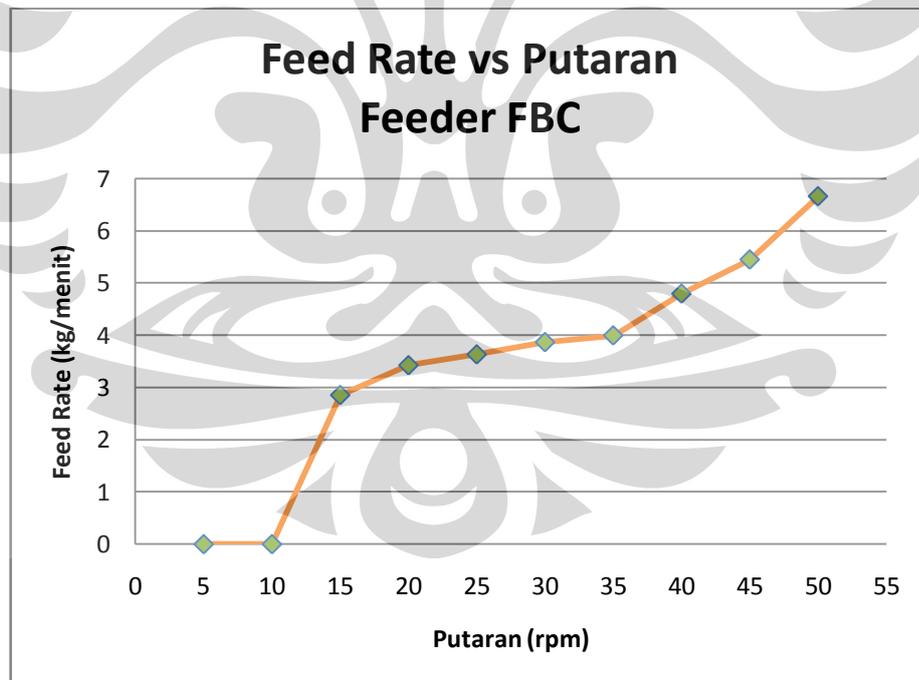
Pengujian yang telah dilakukan menghasilkan data-data yang lebih lanjut akan diolah dan dianalisa. Pengolahan dan analisa ini kita akan memperoleh karakteristik-karakteristik dari apa yang kita ujikan pada bab ini akan ditunjukkan data hasil pengujian beserta hasil pengolahannya. Data yang diperoleh akan diplot dalam bentuk grafik dan kemudian akan dianalisa lebih lanjut.

##### 5.1.1 Karakteristik Feeder

Pengujian feeder dilakukan untuk mengetahui hubungan kecepatan putar motor feeder dengan *feed rate* bahan bakar yang dapat dimasukkan ke dalam ruang bakar oleh feeder.

Tabel 5.1 Karakteristik Feeder

Putaran (rpm)	Waktu Awal Keluar	Waktu Terakhir Keluar	Delta t (s)	Feed Rate (kg/s)	Feed Rate (kg/menit)
5	-	-	-	0	0
10	-	-	-	0	0
15	19	61	42	0.047619048	2.857142857
20	13	48	35	0.057142857	3.428571429
25	12	45	33	0.060606061	3.636363636
30	12	43	31	0.064516129	3.870967742
35	10	40	30	0.066666667	4
40	10	35	25	0.08	4.8
45	9	31	22	0.090909091	5.454545455
50	9	27	18	0.111111111	6.666666667

Gambar 5.1 Grafik *Feed Rate* vs Putaran Feeder FBCGambar 5.2 Grafik *Feed Rate* vs Putaran Feeder FBC

### 5.1.2 Karakteristik Blower

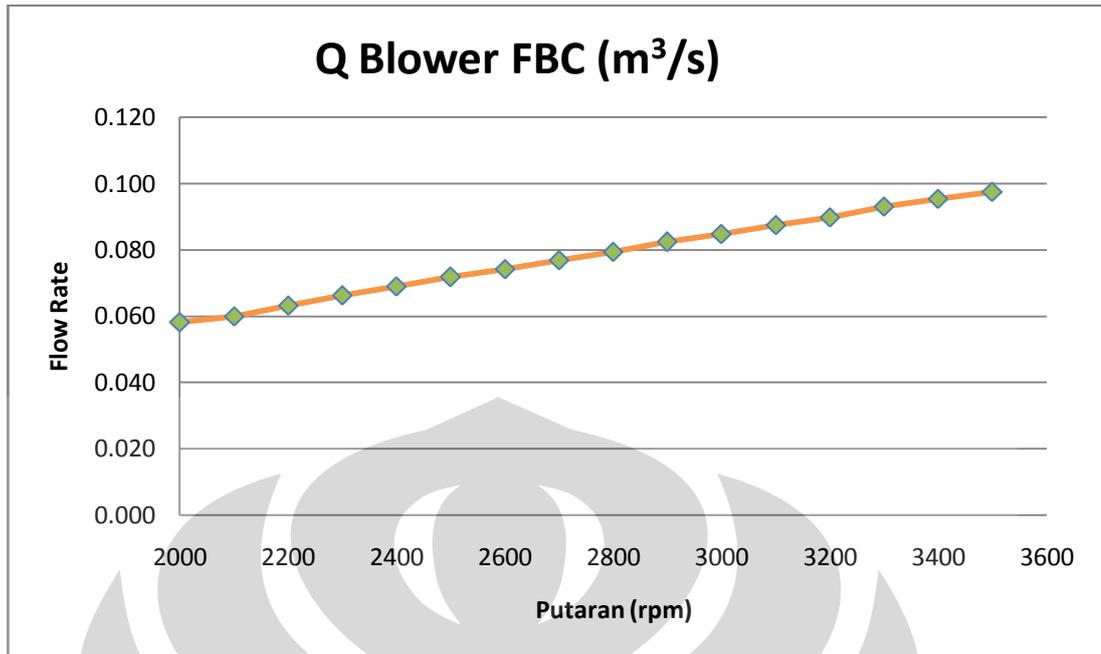
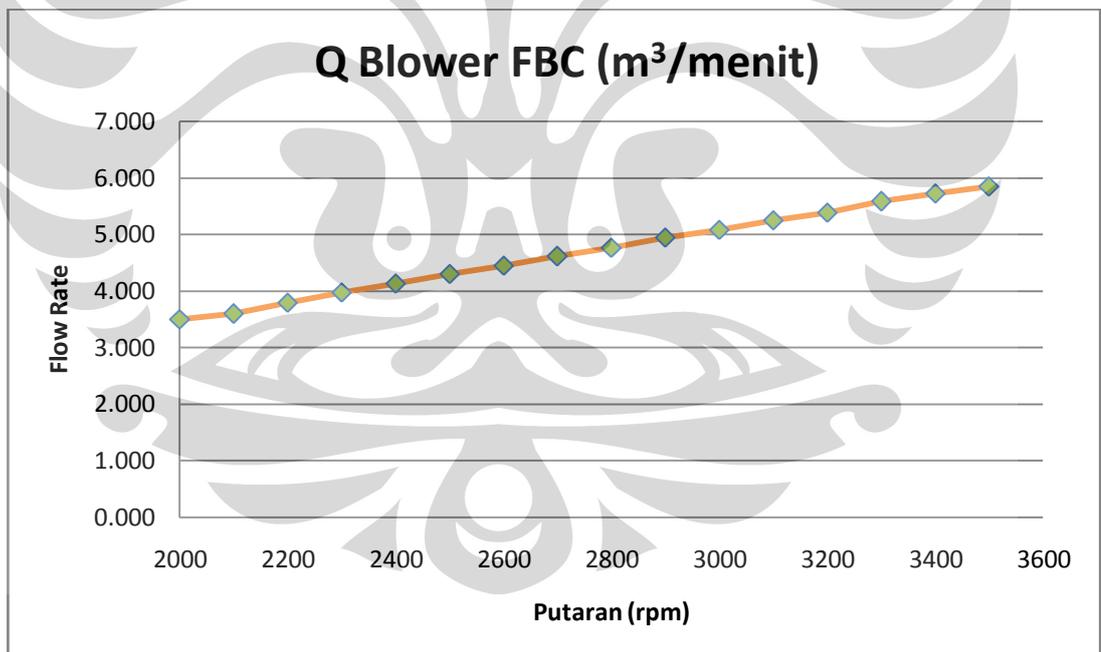
Pengujian yang dilakukan pada blower ini bertujuan untuk mengetahui hubungan antara putaran pada blower dengan debit aliran udaranya serta untuk mengetahui performa dari blower itu sendiri. Blower yang diuji ini adalah jenis ring blower. Pengujian dilakukan dengan menggunakan manometer air. Pada *fluidized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

Massa jenis air : 11,61 n/m<sup>3</sup>

Massa jenis udara : 9789 n/m<sup>3</sup>

Tabel 5.2 Karakteristik Blower

No	rpm	$\Delta h$ (mm)	$\gamma$ air	$\gamma$ udara	$\Delta P$	d/D	$\rho$ udara	Q (m <sup>3</sup> /s)	Q(m <sup>3</sup> /min)
1	2000	85	9789	11,61	831,07815	0,660714	1,165	0,058218	3,49305266
2	2100	90	9789	11,61	879,9651	0,660714	1,165	0,059905	3,59432154
3	2200	100	9789	11,61	977,739	0,660714	1,165	0,063146	3,78874756
4	2300	110	9789	11,61	1075,5129	0,660714	1,165	0,066228	3,97367197
5	2400	119	9789	11,61	1163,5094	0,660714	1,165	0,068884	4,13303565
6	2500	129	9789	11,61	1261,2833	0,660714	1,165	0,07172	4,30319003
7	2600	138	9789	11,61	1349,2798	0,660714	1,165	0,07418	4,45077063
8	2700	148	9789	11,61	1447,0537	0,660714	1,165	0,07682	4,60921034
9	2800	158	9789	11,61	1544,8276	0,660714	1,165	0,079373	4,76238184
10	2900	170	9789	11,61	1662,1563	0,660714	1,165	0,082332	4,93992245
11	3000	180	9789	11,61	1759,9302	0,660714	1,165	0,084719	5,08313826
12	3100	192	9789	11,61	1877,2589	0,660714	1,165	0,087497	5,24984262
13	3200	202	9789	11,61	1975,0328	0,660714	1,165	0,089747	5,38482204
14	3300	217	9789	11,61	2121,6936	0,660714	1,165	0,09302	5,58117368
15	3400	228	9789	11,61	2229,2449	0,660714	1,165	0,095348	5,72088337
16	3500	238	9789	11,61	2327,0188	0,660714	1,165	0,097417	5,84499506

Gambar 5.3 Grafik Q Blower FBC dalam  $\text{m}^3/\text{s}$ Gambar 5.4 Grafik Q Blower FBC dalam  $\text{m}^3/\text{menit}$

### 5.1.3 Karakteristik Pembakaran Ranting dengan FBC

Untuk mengetahui karakteristik pembakaran ranting, dilakukan empat kali pengujian dengan berbagai variasi. Pengujian-pengujian tersebut meliputi :

- Pembakaran dengan feeding sejumlah bahan bakar konstan 0,25 kg
- Pembakaran dengan feeding sejumlah bahan bakar konstan 0,5 kg
- Pembakaran dengan feeding sejumlah bahan bakar bertahap naik ke-1
- Pembakaran dengan feeding sejumlah bahan bakar bertahap naik ke-2

#### 5.1.3.1 Pembakaran dengan Feeding Sejumlah Bahan Bakar Konstan 0,25 kg

Pada pengujian ini blower dinyalakan konstan pada putaran 3400 rpm. Keluaran gas LPG dari regulator disetting 1 kg/cm<sup>2</sup> dan *Gas needle valve* dibuka 5,75 putaran (putaran penuh).

Tabel 5.3 Pembakaran Konstan 0,25 kg

Menit Ke	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Keterangan
0	37	35	35	35	34	31	32	Burner Menyala
1	38	51	385	179	166	130	60	
2	38	62	475	206	181	158	72	
3	38	71	492	210	185	165	78	
4	38	76	498	220	187	168	82	
5	38	81	490	224	189	172	83	
6	38	83	500	217	190	172	85	
7	39	85	498	226	191	175	86	
8	39	88	510	225	192	174	88	
9	39	91	506	222	194	175	88	
10	39	93	508	224	196	176	89	
11	39	95	509	230	196	177	90	
12	39	98	510	233	197	179	91	
13	39	101	501	240	198	179	91	
14	39	98	500	234	195	179	91	
15	39	98	501	231	197	180	92	
16	39	99	499	233	195	178	94	
17	39	100	498	235	197	179	93	

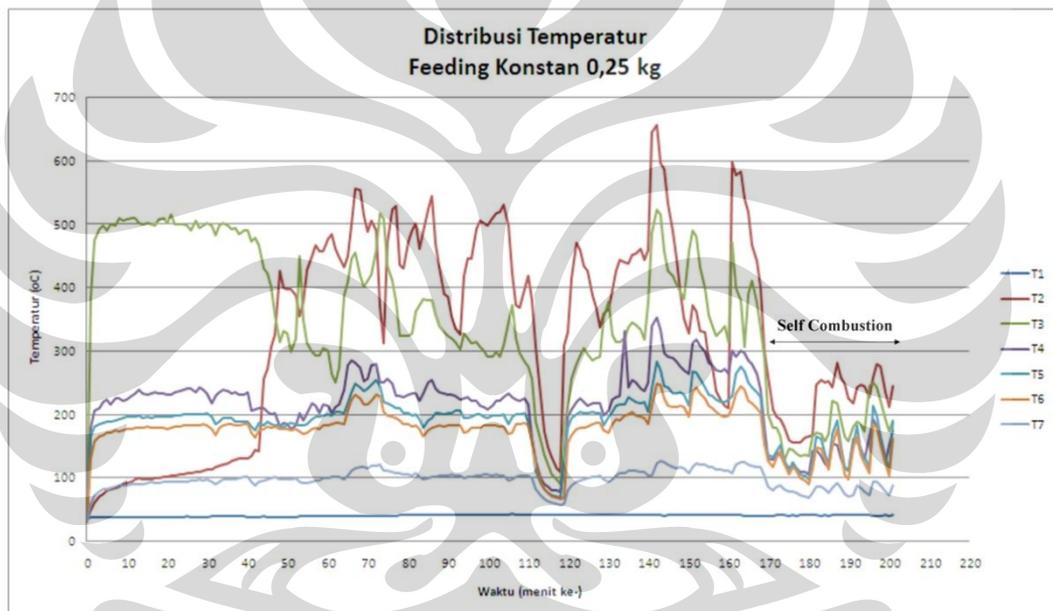
18	39	101	508	233	197	179	93	
19	39	102	509	234	197	179	94	
20	39	103	501	232	197	177	94	
21	39	105	516	231	196	178	94	
22	39	105	500	235	199	181	95	
23	39	106	500	237	199	181	95	
24	39	107	499	239	200	182	95	
25	40	109	497	242	200	183	95	
26	39	109	491	242	201	182	96	
27	39	110	505	236	201	183	96	
28	39	111	495	244	201	183	97	
29	39	113	497	239	201	184	96	
30	39	115	502	233	202	183	97	
31	40	115	498	219	196	177	95	0.25 kg ranting
32	40	118	483	229	186	168	90	
33	40	119	498	236	189	179	94	
34	40	121	502	239	195	183	97	
35	40	123	497	237	195	184	97	
36	40	128	493	234	195	185	98	
37	40	130	495	235	189	183	98	
38	40	131	485	231	189	183	100	
39	40	132	490	232	189	184	102	
40	39	132	490	236	189	184	102	
41	39	136	472	207	181	172	95	0.25 kg ranting
42	39	145	479	209	176	163	89	
43	39	143	468	210	187	175	95	
44	40	257	430	211	184	177	96	
45	39	272	423	205	189	180	98	
46	39	306	402	201	185	179	100	
47	39	326	358	202	184	180	101	
48	38	427	314	182	183	176	97	
49	38	399	333	187	180	176	97	
50	39	397	329	186	185	177	98	
51	39	397	300	177	187	175	97	
52	39	388	320	183	186	176	99	
53	40	355	449	202	183	174	94	0.25 kg ranting
54	40	379	350	192	184	170	92	
55	40	429	313	202	185	171	93	
56	40	449	299	218	192	176	95	
57	40	467	294	214	197	178	96	
58	40	458	294	202	196	177	96	
59	40	457	306	217	199	182	99	
60	40	477	301	215	200	182	99	

61	40	485	265	202	198	184	101	
62	40	462	251	212	205	186	101	
63	40	447	274	216	205	187	102	
64	40	432	388	240	202	184	98	0.25 kg ranting
65	40	449	410	278	218	206	104	
66	40	500	446	286	236	223	112	
67	40	556	455	282	250	230	115	
68	40	553	418	274	244	225	117	
69	40	513	401	252	237	215	118	
70	40	488	411	257	242	215	116	
71	40	505	420	278	247	222	119	
72	40	490	459	279	255	231	120	
73	40	370	518	250	246	229	121	0.25 kg ranting
74	40	312	509	250	220	203	111	
75	40	470	435	256	219	199	111	
76	40	522	411	249	214	196	110	
77	40	528	378	229	211	195	108	
78	41	436	324	229	210	191	107	
79	41	430	324	227	203	184	105	
80	41	472	324	231	202	185	106	
81	41	490	328	234	199	181	104	
82	41	501	363	234	201	182	107	
83	41	462	372	221	193	177	101	0.25 kg ranting
84	41	488	383	233	180	165	97	
85	41	523	381	251	191	175	99	
86	41	544	380	254	195	178	102	
87	41	469	357	241	202	180	102	
88	41	432	339	236	203	182	104	
89	41	390	330	234	200	181	104	
90	41	386	324	231	202	183	104	
91	41	356	321	231	203	183	105	
92	41	336	315	230	206	183	104	
93	41	326	303	224	206	182	103	
94	41	418	329	225	194	172	99	0.25 kg ranting
95	41	445	321	227	195	174	102	
96	41	445	312	221	197	178	102	
97	41	492	315	221	200	179	104	
98	41	506	307	215	200	179	103	
99	41	502	301	212	197	182	105	
100	41	498	292	209	195	183	105	
101	41	510	291	214	198	182	104	
102	41	518	300	221	198	182	105	
103	41	519	292	222	199	180	104	

104	41	531	308	227	200	180	103	
105	41	497	346	233	186	170	96	0.25 kg ranting
106	43	422	373	227	197	172	97	
107	42	373	320	223	200	184	102	
108	42	369	298	221	201	185	103	Penurunan Valve Burner (4 Put.)
109	42	397	284	225	203	187	104	Penurunan Valve Burner (3 Put.)
110	42	419	277	216	190	182	103	Penurunan Valve Burner (2 Put.)
111	42	380	257	162	158	158	99	Burner Mati
112	41	307	189	128	111	122	82	
113	41	230	160	100	93	96	73	
114	41	173	138	90	83	83	67	
115	41	148	121	87	76	77	63	
116	41	134	106	82	72	72	61	
117	42	116	99	81	70	70	59	
118	41	110	91	80	69	67	58	
119	42	308	175	124	126	70	60	Burner Menyala
120	42	330	211	197	180	155	80	
121	42	414	257	209	195	168	89	
122	41	470	280	220	201	176	95	
123	42	459	294	225	204	178	96	
124	41	434	305	220	203	179	98	
125	41	427	296	214	203	181	99	
126	41	388	285	218	204	185	101	
127	41	368	290	219	203	186	102	
128	41	337	291	218	203	186	104	
129	41	359	353	199	184	175	97	0.25 kg ranting
130	41	367	378	206	197	172	94	
131	41	395	327	223	205	185	98	
132	41	427	314	228	215	193	104	
133	41	443	314	229	217	191	107	
134	41	440	320	332	216	198	107	
135	41	439	337	244	228	200	111	
136	41	451	345	254	224	204	112	
137	41	454	341	251	220	199	111	
138	41	461	334	241	218	197	109	
139	41	444	318	238	220	195	109	
140	41	460	376	250	204	185	103	0.25 kg ranting
141	41	645	486	339	242	213	103	
142	41	656	523	353	284	248	124	
143	41	597	515	334	270	246	127	
144	40	586	457	297	245	225	126	
145	41	532	426	291	243	214	121	
146	41	488	419	290	233	211	117	

147	41	446	405	284	234	211	116	
148	41	394	393	276	235	213	117	
149	41	352	383	270	231	212	115	
150	41	329	458	265	215	196	108	0.25 kg ranting
151	41	372	491	312	268	234	118	
152	41	362	480	318	267	243	124	
153	41	332	432	309	256	232	122	
154	41	330	399	299	244	224	122	
155	41	287	357	281	232	213	118	
156	41	276	340	277	229	209	117	
157	41	237	325	270	224	203	113	
158	41	222	332	269	220	199	113	
159	41	215	339	273	220	197	112	
160	41	210	315	265	223	199	111	0.25 kg ranting
161	41	599	470	301	230	212	108	
162	41	577	400	292	265	233	122	
163	41	583	380	301	276	245	126	
164	40	540	307	298	269	238	125	
165	40	519	389	286	251	222	122	
166	40	467	412	280	243	217	119	Penurunan Valve Burner (4 Put.)
167	40	442	376	265	236	210	118	Penurunan Valve Burner (3 Put.)
168	40	400	336	240	227	202	117	Penurunan Valve Burner (2 Put.)
169	40	301	291	181	157	154	104	Burner Mati
170	40	261	200	132	137	127	87	0.25 kg ranting
171	40	208	179	130	133	117	81	
172	41	197	179	141	143	133	87	
173	41	193	166	137	152	142	89	
174	41	182	128	125	128	123	83	
175	40	160	146	116	111	105	78	0.25 kg ranting
176	41	157	145	121	125	117	78	
177	40	156	140	115	116	111	77	
178	41	156	135	111	105	101	73	
179	41	164	137	110	103	97	71	
180	41	166	135	106	97	90	69	0.25 kg ranting
181	41	168	167	142	125	114	76	
182	41	247	172	144	166	149	86	
183	40	254	170	136	161	147	87	
184	41	251	159	124	139	130	82	
185	40	252	170	117	121	114	76	0.25 kg ranting
186	41	244	223	154	170	152	85	
187	41	282	218	152	191	177	93	
188	41	258	192	131	151	140	85	
189	41	250	166	115	117	105	74	

190	41	226	158	112	112	98	70	0.25 kg ranting
191	41	219	182	163	153	148	72	
192	41	243	189	158	184	166	88	
193	41	248	186	146	141	137	85	
194	41	245	173	130	134	124	79	
195	41	227	246	167	115	107	73	0.25 kg ranting
196	40	259	251	194	215	185	94	
197	40	280	244	182	198	178	94	
198	40	277	222	160	166	152	88	
199	41	236	194	126	133	123	79	
200	40	213	173	152	112	104	72	0.25 kg ranting
201	41	245	192	176	189	162	88	

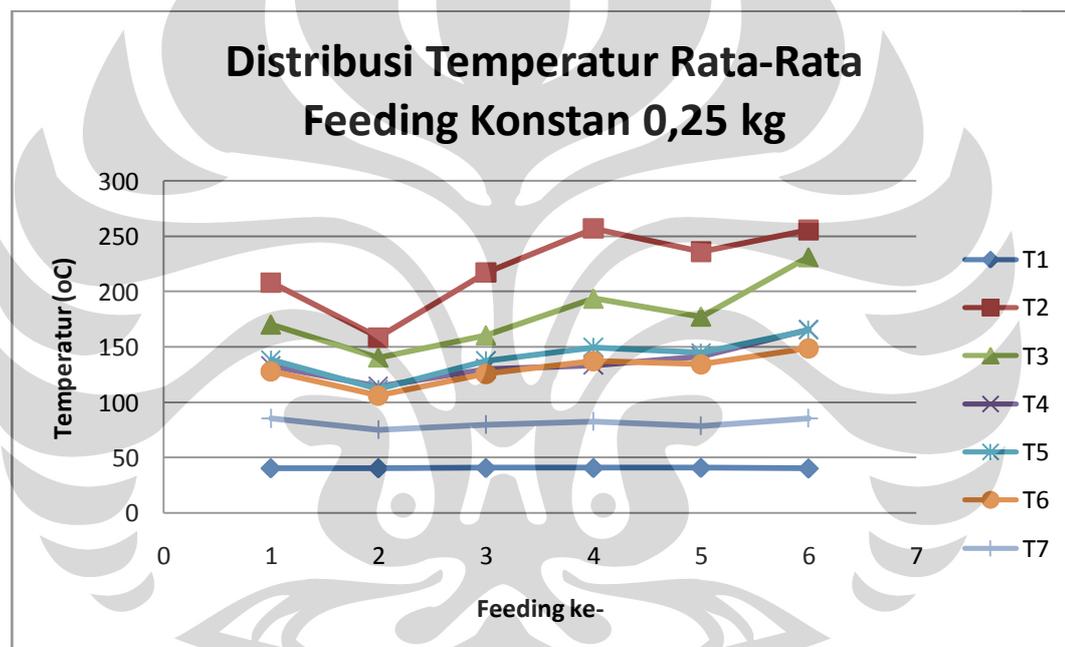


Gambar 5.5 Grafik Distribusi Temperatur Feeding Konstan 0,25 kg

Saat sudah mencapai kondisi *self combustion*, temperatur dirata-ratakan dan menghasilkan data dan grafik pada setiap termokopel sebagai berikut.

Tabel 5.4 Temperatur Rata-Rata Feeding Konstan 0,25 kg

Termokopel	Ketinggian Termokopel (cm)	Feeding 1	Feeding 2	Feeding 3	Feeding 4	Feeding 5	Feeding 6
T1	75	40.6	40.6	40.8	40.8	41	40.4
T2	110	208.2	158.6	217.2	257.2	236.2	255.8
T3	130	170.4	140.6	160.6	193.8	177.6	231.4
T4	170	133	114.6	130.4	133.8	141.8	165.8
T5	270	138.6	112	137.6	150	144.8	165.4
T6	345	128.4	106.2	126	137.6	134.6	149
T7	495	85.4	75.4	80	82.6	78.8	85.6



Gambar 5.6 Grafik Distribusi Temperatur Rata-Rata Feeding Konstan 0,25 kg

### 5.1.3.2 Pembakaran dengan Feeding Sejumlah Bahan Bakar Konstan 0,5 kg

Pada pengujian ini blower dinyalakan konstan pada putaran 3400 rpm. Keluaran gas LPG dari regulator disetting 1 kg/cm<sup>2</sup> dan *Gas needle valve* dibuka 5,75 putaran (putaran penuh).

Tabel 5.5 Pembakaran Konstan 0,5 kg

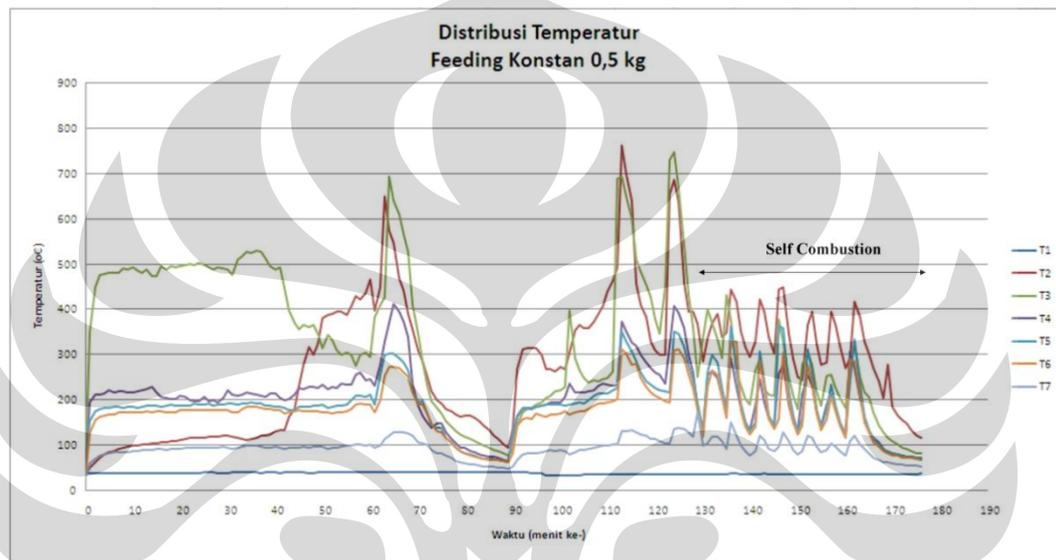
Menit ke	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Keterangan
0	37	34	34	33	33	28	30	Burner Menyala
1	37	50	350	194	153	126	59	
2	37	63	450	211	175	155	70	
3	38	73	477	210	179	163	77	
4	37	80	479	214	181	165	80	
5	37	85	480	222	183	168	83	
6	37	89	482	216	184	167	84	
7	37	92	481	219	184	171	85	
8	38	94	490	219	181	171	85	
9	37	97	487	216	184	171	85	
10	38	99	494	216	185	171	87	
11	38	101	485	219	182	172	86	
12	38	102	480	222	184	171	88	
13	38	103	488	224	188	174	88	
14	38	104	473	228	186	172	89	
15	38	104	473	216	187	175	91	
16	38	107	496	206	185	174	91	
17	38	108	489	203	186	173	90	
18	38	110	495	202	189	172	91	
19	38	111	493	202	187	173	91	
20	38	113	496	208	188	178	92	
21	38	115	498	207	188	178	93	
22	38	117	501	198	188	176	95	
23	38	116	498	197	191	177	94	
24	38	117	502	197	189	178	95	
25	39	118	498	206	190	178	95	
26	39	119	493	196	191	177	95	
27	39	119	488	200	188	177	95	
28	38	120	493	195	190	177	95	
29	38	122	490	204	190	178	96	
30	38	121	488	222	193	178	95	
31	39	120	477	211	191	173	92	0,5 kg ranting
32	39	118	510	208	189	173	93	
33	39	115	518	210	191	180	97	
34	39	113	528	215	192	183	98	
35	39	114	525	214	194	184	98	
36	39	116	529	212	193	184	98	
37	38	121	527	208	191	181	97	
38	39	123	513	205	187	180	95	
39	39	125	496	214	187	179	95	

40	39	132	488	213	185	178	96	
41	38	135	493	203	185	178	95	0,5 kg ranting
42	39	134	447	198	181	170	91	
43	39	163	398	201	178	172	93	
44	39	182	372	210	178	174	94	
45	39	232	357	225	184	176	95	
46	39	278	367	224	185	175	96	
47	38	317	360	228	184	174	95	
48	38	301	365	228	186	174	97	
49	39	326	346	225	186	174	97	
50	39	382	315	234	189	173	96	
51	39	388	343	223	183	171	92	0,5 kg ranting
52	39	391	333	229	184	169	93	
53	39	396	309	226	187	172	95	
54	39	397	299	235	188	173	96	
55	39	388	304	233	190	175	98	
56	39	408	301	232	200	179	99	
57	39	431	276	255	209	188	101	
58	40	424	299	260	208	192	101	
59	39	438	304	242	206	189	100	
60	39	468	296	244	212	190	101	
61	39	399	383	230	190	173	94	0,5 kg ranting
62	39	450	411	276	255	198	100	
63	39	651	426	327	299	252	114	
64	39	575	693	369	303	273	120	
65	39	548	639	411	302	272	128	
66	39	469	610	395	292	269	129	Penurunan Valve Burner (4 put.)
67	39	442	567	373	283	259	129	Penurunan Valve Burner (3 put.)
68	39	392	527	338	264	251	127	Penurunan Valve Burner (2 put.)
69	39	358	410	235	218	215	120	Burner Mati
70	39	310	347	187	195	189	106	
71	39	287	286	165	197	188	104	
72	39	253	235	150	172	170	101	
73	39	220	198	139	144	147	90	
74	39	200	183	147	138	130	82	
75	39	192	170	148	137	129	81	
76	39	181	153	128	117	116	76	
77	39	177	141	114	106	103	71	
78	39	168	131	104	94	94	65	
79	39	164	124	95	87	87	62	
80	39	166	120	93	83	81	60	
81	39	166	115	87	79	78	57	
82	39	162	110	83	76	75	57	

83	39	153	105	80	73	72	54	
84	39	144	100	76	70	69	52	
85	39	134	96	74	69	67	51	
86	39	123	91	74	70	66	51	
87	39	114	87	72	68	67	50	
88	39	102	83	68	65	64	50	
89	39	95	78	65	63	62	47	
90	39	136	93	119	125	82	53	Burner Nyala
91	39	268	147	162	166	142	67	
92	39	312	174	179	181	158	80	
93	39	316	180	181	182	160	81	
94	38	315	182	180	182	158	81	
95	38	316	190	185	185	170	83	
96	38	300	196	187	188	165	85	
97	33	269	204	189	189	162	87	
98	33	268	211	194	190	168	88	
99	33	264	219	195	189	166	87	
100	33	273	221	193	189	170	88	
101	33	270	229	206	188	174	87	
102	34	305	397	236	190	168	80	0,5 kg ranting
103	34	354	292	217	193	173	84	
104	34	367	265	215	195	174	88	
105	35	360	248	215	193	174	89	
106	35	359	238	218	200	179	92	
107	35	374	243	220	209	186	95	
108	35	391	241	230	213	191	96	
109	35	409	246	235	215	192	98	
110	35	439	250	234	214	195	99	
111	36	465	264	230	221	197	101	
112	36	495	688	233	226	202	102	0,5 kg ranting
113	36	763	694	373	352	312	132	
114	36	700	650	350	330	300	130	
115	36	640	600	326	306	277	133	
116	36	458	509	318	286	280	128	
117	36	410	484	299	260	247	124	
118	36	385	453	281	240	227	120	
119	36	329	428	270	233	216	115	
120	36	311	378	260	225	208	113	
121	36	301	347	256	222	203	109	
122	36	300	452	235	218	196	105	0,5 kg ranting
123	36	656	729	320	217	194	105	
124	36	688	747	406	351	309	136	
125	36	638	667	391	346	310	138	

126	36	460	540	357	317	291	137	Penurunan Valve Burner (4 put.)
127	36	395	433	299	275	254	129	Penurunan Valve Burner (3 put.)
128	36	395	362	260	244	225	119	Penurunan Valve Burner (2 put.)
129	36	370	252	184	194	176	173	Burner Mati
130	36	286	340	135	129	119	98	0,5 kg ranting
131	36	338	401	254	261	228	105	
132	36	369	371	263	300	265	118	
133	36	390	335	247	283	255	119	
134	36	341	292	205	226	207	108	
135	36	350	432	191	174	160	91	0,5 kg ranting
136	37	445	377	292	363	325	152	
137	37	417	260	227	267	328	120	
138	36	352	231	181	191	177	99	
139	36	318	202	149	151	141	86	
140	36	295	191	132	132	122	78	0,5 kg ranting
141	36	330	267	186	150	140	87	
142	36	424	291	245	306	287	122	
143	37	396	225	193	241	230	111	
144	36	339	213	160	164	157	92	
145	36	303	211	145	143	135	87	0,5 kg ranting
146	36	445	379	257	363	157	96	
147	36	451	327	276	357	303	129	
148	36	347	251	190	222	198	108	
149	36	291	209	151	165	149	90	
150	36	251	181	132	131	123	80	0,5 kg ranting
151	36	244	278	210	159	142	87	
152	36	367	304	256	311	277	122	
153	36	396	277	231	260	237	117	
154	36	325	220	171	180	170	97	
155	36	278	187	143	140	132	84	0,5 kg ranting
156	36	283	253	190	178	158	90	
157	36	396	257	210	233	207	104	
158	36	367	228	178	187	174	97	
159	36	320	205	147	151	142	87	
160	36	272	183	120	124	117	77	0,5 kg ranting
161	36	293	284	305	240	289	109	
162	36	417	322	270	333	285	122	
163	36	384	252	203	233	212	102	
164	36	330	217	157	162	151	91	
165	36	302	208	130	134	127	82	
166	36	271	172	116	113	107	73	
167	36	243	145	105	101	96	67	
168	36	206	129	91	90	86	63	

169	36	279	117	85	87	82	61	
170	36	185	110	82	81	78	59	
171	36	165	102	80	79	76	57	
172	36	157	94	77	77	73	56	
173	36	148	92	75	75	72	55	
174	36	134	87	74	74	71	55	
175	36	123	84	71	72	69	54	
176	37	116	82	70	72	68	53	



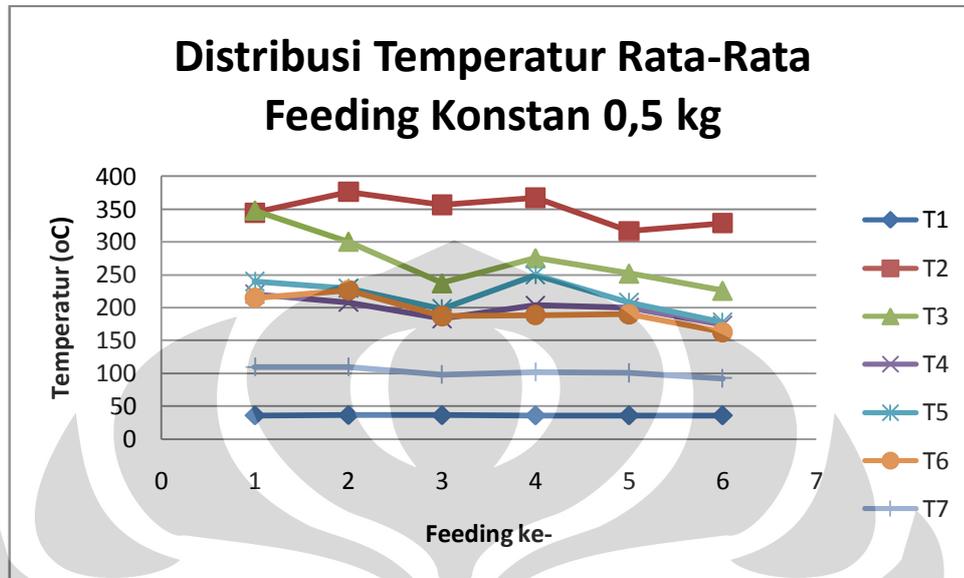
Gambar 5.7 Grafik Distribusi Temperatur Feeding Konstan 0,5 kg

Saat sudah mencapai kondisi *self combustion*, temperatur dirata-ratakan dan menghasilkan data dan grafik pada setiap termokopel sebagai berikut.

Tabel 5.6 Temperatur Rata-Rata Feeding Konstan 0,5 kg

Termokopel	Ketinggian Termokopel (cm)	Feeding 1	Feeding 2	Feeding 3	Feeding 4	Feeding 5	Feeding 6
T1	75	36	36.4	36.2	36	36	36
T2	110	344.8	376.4	356.8	367.4	316.6	328.8
T3	130	347.8	300.4	237.4	275.4	252	226
T4	170	220.8	208	183.2	203.8	200	173.6
T5	270	239.8	229.2	198.6	250	208.2	177.8

T6	345	214.8	226.2	187.2	188.4	189.8	162.6
T7	495	109.6	109.6	98	102	100.6	92.4



Gambar 5.8 Grafik Distribusi Temperatur Rata-Rata Feeding Konstan 0,5 kg

### 5.1.3.3 Pembakaran dengan Feeding Sejumlah Bahan Bakar Bertahap Naik ke-1

Pada pengujian ini blower dinyalakan konstan pada putaran 3400 rpm. Keluaran gas LPG dari regulator disetting 1 kg/cm<sup>2</sup> dan *Gas needle valve* dibuka 5,75 putaran (putaran penuh).

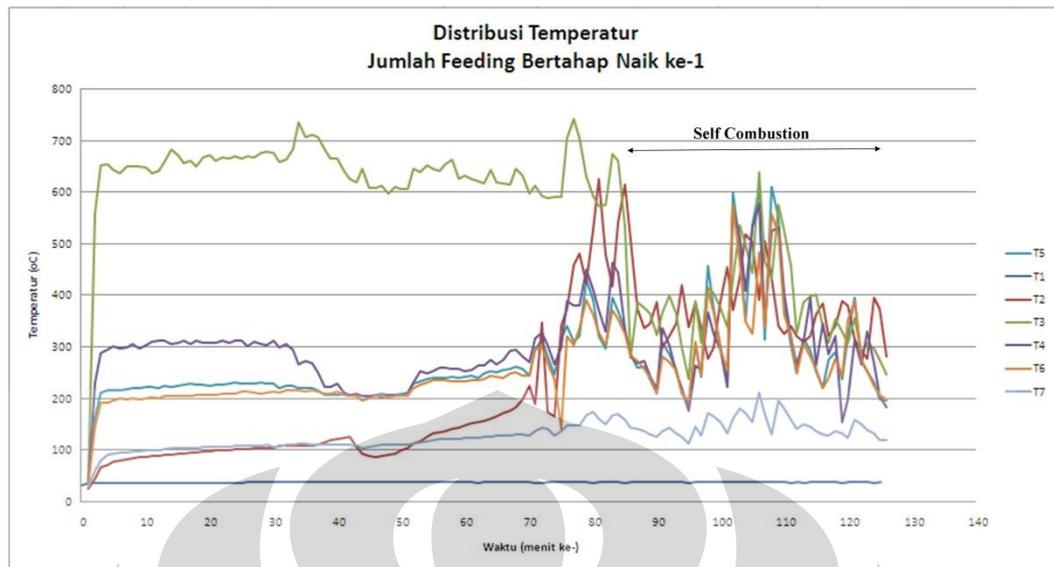
Tabel 5.7 Pembakaran Bertahap Naik ke-1

Menit ke-	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Keterangan
0	31	25	33	33	33	30	28	Burner Menyala
1	35	45	560	230	162	145	59	
2	36	67	651	288	210	190	78	
3	36	72	653	295	214	191	91	
4	36	77	643	301	214	196	93	
5	36	79	636	297	216	199	94	
6	36	81	648	299	217	198	95	
7	36	84	649	306	220	199	97	
8	36	86	649	296	220	198	97	
9	36	87	647	303	222	200	98	

10	35	88	636	309	222	202	99	
11	36	89	641	312	219	200	99	
12	36	90	658	311	223	203	101	
13	36	91	681	305	222	205	103	
14	36	94	671	308	223	204	103	
15	36	94	655	311	226	204	103	
16	36	95	660	305	228	203	103	
17	36	96	650	312	226	206	104	
18	36	97	666	307	225	207	105	
19	36	98	670	308	224	206	106	
20	36	99	660	308	227	207	105	
21	36	99	666	311	227	208	105	
22	36	99	664	308	228	208	106	
23	36	101	669	311	230	208	108	
24	36	101	665	311	228	213	107	
25	36	102	668	301	229	213	108	
26	37	103	667	310	228	211	108	
27	37	104	676	306	230	209	108	
28	37	104	678	304	229	210	109	
29	37	105	676	311	229	213	105	
30	37	108	658	299	219	211	105	
31	37	108	663	305	223	214	109	0,25 kg cangkang
32	37	108	682	295	224	214	110	
33	37	108	735	265	220	216	112	
34	37	109	706	273	220	213	112	0,5 kg cangkang
35	37	109	710	269	220	214	109	
36	37	111	706	251	215	213	110	
37	37	114	681	221	206	209	109	
38	37	120	665	222	207	208	109	
39	37	122	665	228	207	212	110	
40	37	124	640	210	208	207	110	
41	37	126	625	206	205	205	110	0,75 kg cangkang
42	37	107	618	208	204	203	108	
43	37	94	644	204	196	196	103	
44	37	88	607	205	205	199	106	
45	37	87	607	205	206	203	107	
46	37	88	612	203	209	204	109	
47	37	91	597	206	207	202	109	
48	37	94	609	206	207	203	109	
49	37	99	605	204	208	203	109	
50	37	105	606	212	210	204	110	
51	37	113	645	231	229	219	112	
52	37	118	638	253	232	225	115	

53	37	125	651	248	238	230	117	
54	37	132	645	253	240	235	119	
55	37	135	640	260	240	234	121	
56	37	137	654	260	240	234	121	
57	37	141	661	258	241	232	122	
58	37	144	625	258	240	232	122	
59	37	148	632	253	241	233	123	
60	37	152	624	254	243	234	123	
61	37	154	620	264	240	234	123	
62	36	157	617	264	247	238	125	
63	37	160	643	275	253	244	126	
64	37	166	618	265	250	241	127	
65	37	171	615	274	254	240	127	
66	37	177	614	293	257	247	127	
67	37	183	644	294	261	250	129	
68	37	198	631	281	256	243	129	
69	37	225	596	270	243	243	127	0,5 kg cangkang
70	37	189	612	317	297	295	136	
71	36	347	593	327	312	299	143	
72	36	174	587	303	282	267	141	
73	37	165	590	266	246	237	128	0,75 kg cangkang
74	37	341	590	299	315	140	137	
75	37	374	704	388	341	320	148	
76	37	459	741	380	310	303	147	
77	37	482	704	380	320	335	147	0,75 kg cangkang + Penurunan Valve Burner (4 put.)
78	37	424	630	450	430	392	167	
79	37	528	593	410	390	363	175	Penurunan Valve Burner (3 put.)
80	36	626	572	371	320	328	162	1 kg cangkang + Penurunan Valve Burner (2 put.)
81	37	480	575	330	296	302	151	
82	37	418	673	463	394	371	168	
83	37	543	660	443	368	354	170	
84	37	615	533	334	332	326	158	Burner Mati
85	36	508	278	282	285	284	144	0,5 kg ranting
86	37	373	385	269	259	273	140	
87	37	336	376	272	262	257	137	
88	37	345	364	245	237	242	131	
89	37	387	323	218	208	211	125	0,75 kg ranting
90	37	299	366	336	308	280	136	
91	37	321	398	304	285	271	143	
92	37	345	365	250	257	255	133	
93	37	420	298	219	208	209	125	
94	37	338	236	176	192	195	112	1 kg ranting
95	36	387	389	263	303	310	145	

96	37	336	307	254	241	246	128	1,25 kg ranting
97	37	277	414	366	457	410	172	
98	37	299	404	326	374	366	166	
99	37	390	375	295	300	295	155	
100	37	456	338	223	229	255	133	
101	37	371	432	570	600	576	161	1,5 kg ranting
102	37	436	535	515	497	463	182	
103	37	518	497	408	350	349	171	
104	37	503	443	531	535	324	155	1,75 kg ranting
105	37	391	637	578	606	484	212	
106	37	506	465	345	314	336	170	
107	37	434	432	525	610	559	129	2 kg ranting
108	37	340	574	532	550	518	196	
109	37	326	525	405	384	363	181	
110	37	340	455	319	302	320	158	
111	36	321	325	265	247	249	140	0,5 kg ranting
112	37	311	386	310	315	306	149	
113	36	322	397	396	291	281	146	
114	37	363	402	263	252	257	137	
115	37	385	337	345	220	220	129	
116	37	321	308	286	275	239	127	0,25 kg ranting
117	37	341	354	320	290	276	137	
118	37	390	330	154	238	243	132	
119	36	381	306	197	320	352	123	1,5 kg ranting
120	37	315	355	314	395	389	158	
121	37	292	285	267	270	274	149	
122	37	278	308	329	252	252	138	
123	37	395	295	269	230	224	132	
124	36	374	274	204	198	207	119	0,25 kg ranting
125	37	282	246	183	196	198	118	

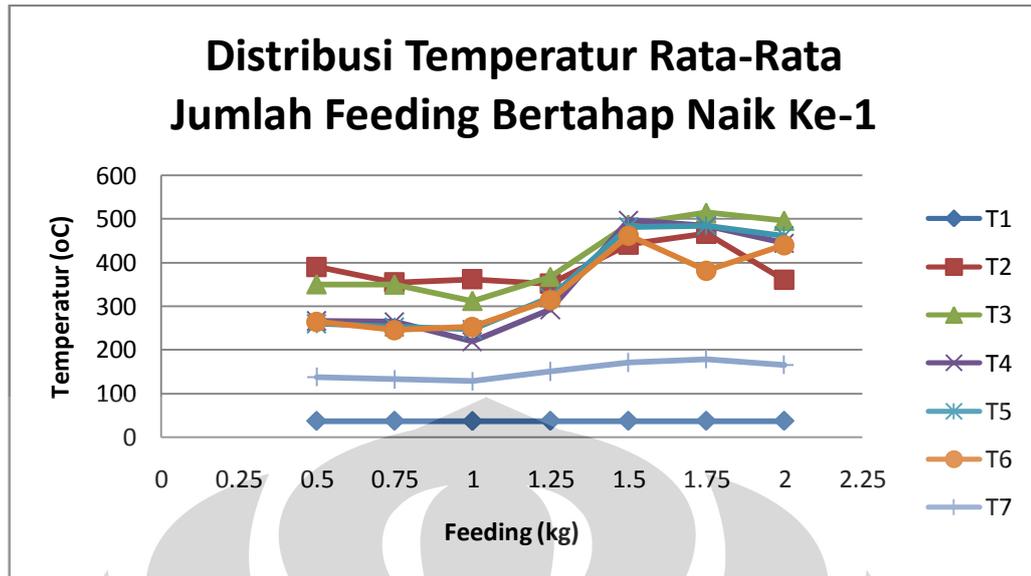


Gambar 5.9 Grafik Distribusi Temperatur Jumlah Feeding Bertahap Naik ke-1

Saat sudah mencapai kondisi *self combustion*, temperatur dirata-ratakan dan menghasilkan data dan grafik pada setiap termokopel sebagai berikut.

Tabel 5.8 Temperatur Rata-Rata Feeding Bertahap Naik ke-1

Termokopel	Ketinggian Termokopel (cm)	Feeding (cm)						
		0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2
T1	75	36.75	37	36.5	37	37	37	37
T2	110	390.5	354.4	362.5	351.6	441.67	466.67	360
T3	130	350.75	350	312.5	367.6	488	515	496.5
T4	170	267	265.4	219.5	292.8	497.67	484.67	445.25
T5	270	260.75	253.2	247.5	320.2	482.33	485	461.5
T6	345	264	245.2	252.5	314.4	462.67	381.33	440
T7	495	138	132.4	128.5	150.8	171.33	179	166



Gambar 5.10 Grafik Distribusi Temperatur Rata-Rata Jumlah Feeding Bertahap Naik ke-1

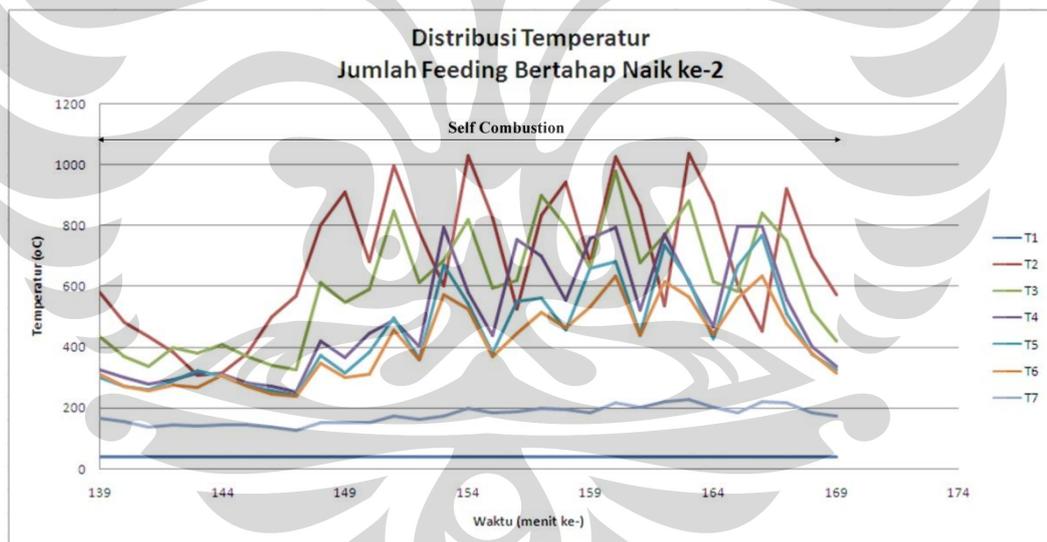
#### 5.1.3.4 Pembakaran dengan Feeding Sejumlah Bahan Bakar Bertahap Naik ke-2

Pada pengujian ini blower dinyalakan konstan pada putaran 3400 rpm. Keluaran gas LPG dari regulator disetting 1 kg/cm<sup>2</sup> dan *Gas needle valve* dibuka 5,75 putaran (putaran penuh).

Tabel 5.9 Pembakaran Bertahap Naik ke-2

Menit ke-	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Keterangan
139	39	580	433	325	300	310	168	
140	39	482	369	302	270	272	155	
141	39	435	336	280	260	258	139	0,25 kg ranting
142	40	384	400	294	288	276	144	
143	40	308	382	315	322	269	141	0,5 kg ranting
144	40	316	410	310	305	307	145	
145	39	380	369	282	276	273	143	
146	40	500	340	272	257	245	137	
147	40	568	325	255	243	238	128	
148	40	800	611	420	373	349	153	0,75 kg ranting
149	39	909	548	366	314	300	153	
150	40	681	589	445	385	311	153	1 kg ranting
151	40	998	847	490	496	455	174	
152	39	779	612	401	360	360	163	1,25 kg ranting

153	39	603	686	792	669	573	175	
154	40	1029	820	580	545	525	200	
155	40	825	596	439	380	368	186	1,5 kg ranting
156	39	524	619	753	550	445	189	
157	40	835	897	698	560	514	200	
158	40	943	797	556	455	463	197	
159	39	679	660	756	658	534	185	1,75 kg ranting
160	40	1027	978	793	680	633	217	
161	39	861	676	521	442	439	203	2 kg ranting
162	39	535	769	771	735	616	220	
163	40	1035	881	613	618	564	228	
164	40	873	616	469	428	443	204	
165	39	606	583	798	666	562	186	2,25 kg ranting
166	40	452	840	796	770	634	220	
167	40	920	751	558	512	477	217	
168	40	698	517	401	375	379	185	
169	39	571	419	338	327	314	172	

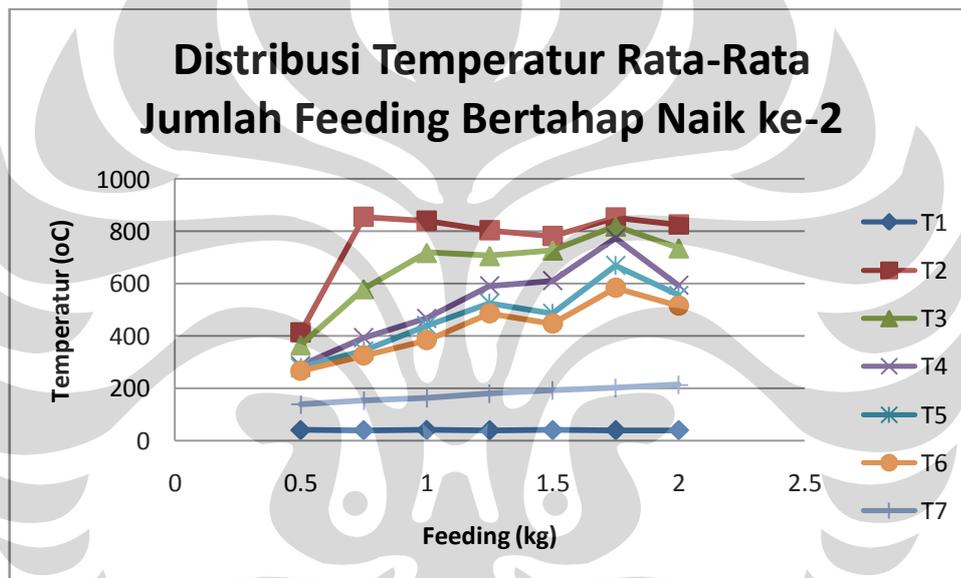


Gambar 5.11 Grafik Distribusi Temperatur Jumlah Feeding Bertahap Naik ke-2

Saat sudah mencapai kondisi *self combustion*, temperatur dirata-ratakan dan menghasilkan data dan grafik pada setiap termokopel sebagai berikut.

Tabel 5.10 Temperatur rata-rata Feeding bertahap naik ke-2

Termokopel	Ketinggian Termokopel (cm)	Feeding (cm)						
		0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2
T1	75	39.8	39.5	40	39.33333	39.75	39.5	39.5
T2	110	414.4	854.5	839.5	803.6667	781.75	853	826
T3	130	365.2	579.5	718	706	727.25	819	735.5
T4	170	286.8	393	467.5	591	611.5	774.5	593.5
T5	270	280.6	343.5	440.5	524.6667	486.25	669	555.75
T6	345	266.4	324.5	383	486	447.5	583.5	515.5
T7	495	138.8	153	163.5	179.3333	193	201	213.75



Gambar 5.12 Grafik Distribusi Temperatur Rata-Rata Jumlah Feeding Bertahap Naik ke-2

## 5.2 Analisa

### 5.2.1 Analisa Karakteristik Feeder dan Blower

Feeder digunakan untuk memasukkan bahan bakar ke dalam ruang bakar. Pengujian-pengujian yang dilakukan di atas, menggunakan feeder dengan kecepatan putar motor 50 Hz. Ini merupakan kecepatan putar motor feeder maksimal yang bisa dioperasikan. Pada saat operasi pembakaran dilaksanakan, feeder dibiarkan terus beroperasi. Ini dimaksudkan untuk menguji hasil modifikasi

dapat mengatasi permasalahan yang ada sebelumnya. Dan dari hasil pengamatan yang dilakukan, feeder tidak mengalami hambatan dikarenakan pemuaiian akibat panas yang mengalir dari ruang bakar.

Data karakteristik feeder menunjukkan tidak ada nilai *feed rate* pada putaran 5 dan 10 Hz. Hal ini disebabkan pada putaran motor tersebut, screw feeder tidak dapat bergerak karena tidak cukup kuat mengatasi hambatan bahan bakar yang ada di ruang feeder. Feeder berfungsi baik ketika dioperasikan pada putaran 15 Hz. Semakin tinggi kecepatan putar motor, semakin cepat bahan bakar yang bisa dimasukkan ke dalam ruang bakar.

Pada masing-masing pengujian kondisi blower dioperasikan konstan pada putaran 3400 rpm. Blower yang ada pada laboratorium FBC memiliki spesifikasi maksimum operasi pada putaran 3500 rpm. Pengoperasian blower pada putaran 3400 rpm adalah untuk memastikan fluidisasi tetap berjalan dengan baik tetapi juga turut mempertimbangkan kemampuan maksimal blower. Yang lebih penting lagi yaitu bahwa dengan putaran blower tersebut lebih meyakinkan FBC dapat terus beroperasi di atas kecepatan minimum fluidisasi.

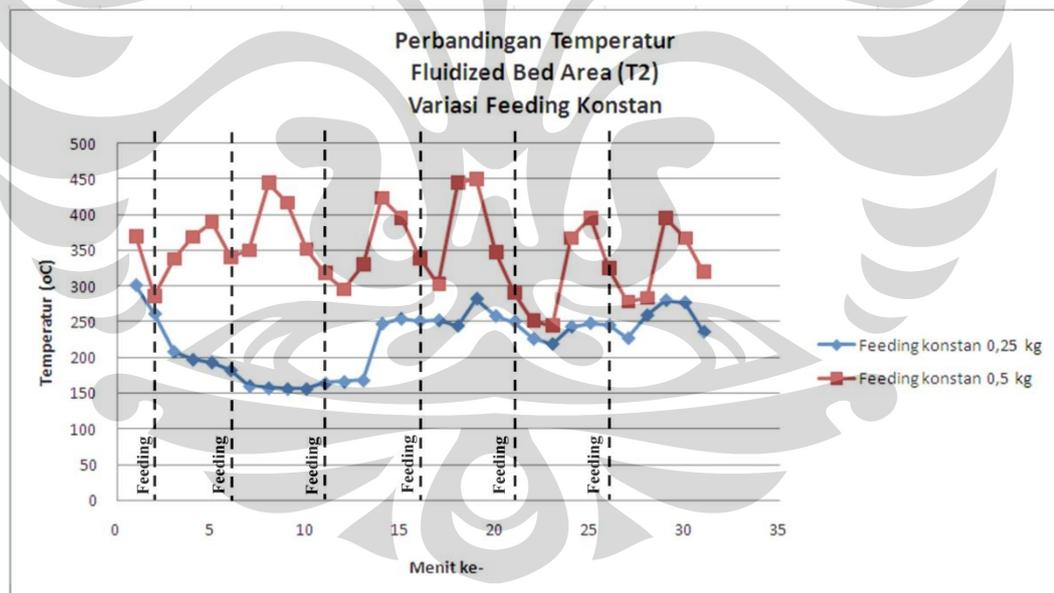
Data karakteristik blower yang diperoleh menggunakan alat monometer air yang dibuat sedemikian rupa dengan mengikuti ketentuan rumus yang ada. Dengan melakukan pengukuran ini, kita dapat memperoleh data karakteristik blower yang aktual. Data diolah selanjutnya dengan menggunakan rumus yang sudah ada.

### 5.2.2 Analisa Karakteristik Pembakaran Ranting dengan FBC

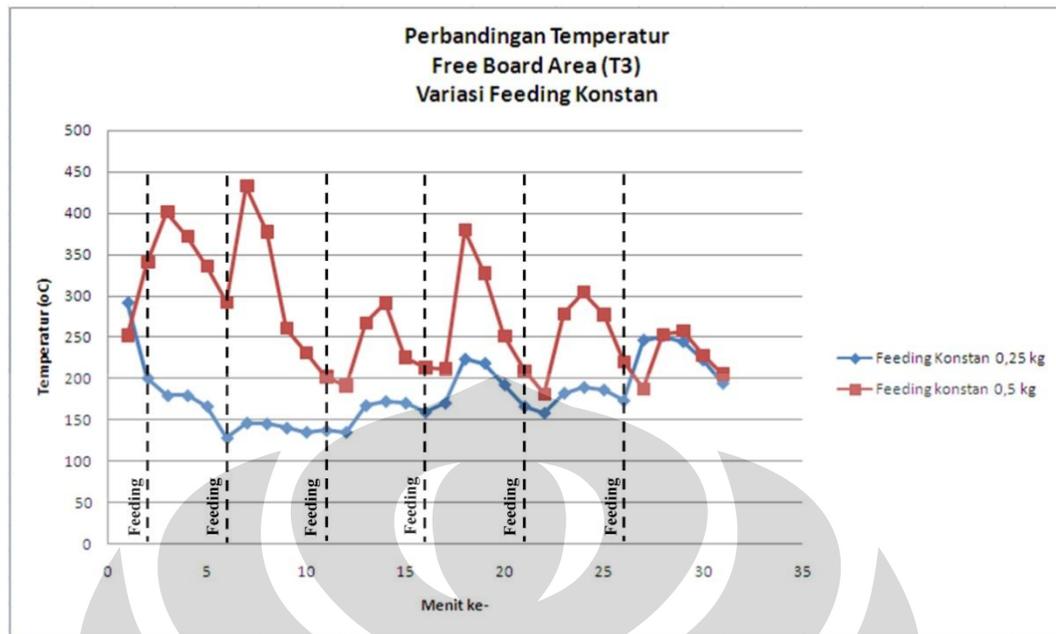
Pengujian karakteristik pembakaran ranting dengan FBC ini dilakukan empat kali pengujian. Pengujian pertama dan kedua memiliki perbedaan pada jumlah bahan bakar yang dimasukkan ke dalam ruang bakar. Kedua pengujian ini dilakukan dengan memasukkan bahan bakar secara konstan. Pengujian pertama dilakukan dengan memasukkan bahan bakar secara konstan sebanyak 0,25 kg dan pengujian yang kedua dilakukan dengan memasukkan bahan bakar secara konstan sebanyak 0,5 kg. Pengujian ketiga dan keempat dilakukan dengan memasukkan bahan bakar dengan jumlah meningkat bertahap. Diharapkan dengan keempat pengujian ini kita dapat mengetahui karakteristik pembakaran ranting pada FBC.

Pada FBC terdapat tujuh termokopel yang terpasang dengan ketinggian yang berbeda-beda. Dari ketujuh termokopel yang ada, kita lebih memfokuskan perhatian pada termokopel kedua dan termokopel ketiga. Hal ini disebabkan termokopel dua dapat mewakili temperature pada *Fluidized Bed area*. Sedangkan termokopel tiga dapat mewakili temperature pada *Free Board area*.

Analisa kita mulai dengan memperhatikan pengujian pertama dan kedua. Saat FBC beroperasi pada kondisi *self-combustion*, terdapat perbedaan temperatur yang dapat dicapai oleh masing-masing pengujian. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, pengujian pertama dan kedua memiliki persamaan pada diperlakukannya masukan bahan bakar ranting yang konstan, tetapi dengan jumlah yang berbeda. Pada pengujian pertama menggunakan jumlah bahan bakar sebanyak 0,25 kg dan pada pengujian kedua menggunakan jumlah bahan bakar sebanyak 0,5 kg. Perbandingan temperatur yang diperoleh dari kedua pengujian ini dapat dilihat dari grafik yang disajikan di bawah ini.



Gambar 5.13 Grafik Perbandingan Temperatur *Fluidized Bed Area* (T2) Variasi Feeding Konstan

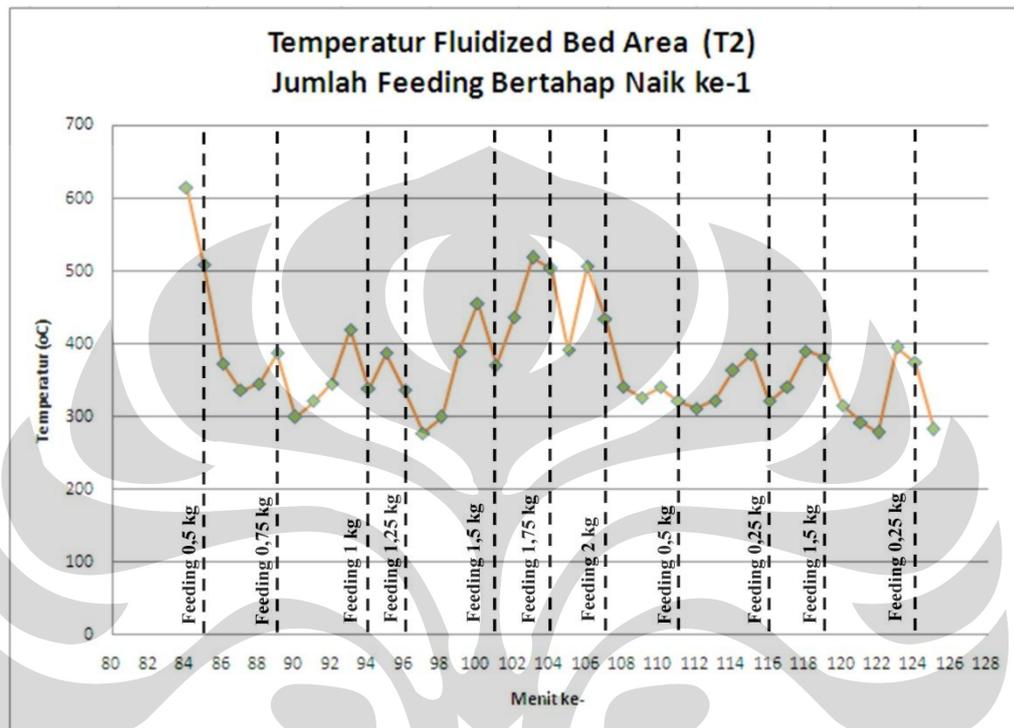


Gambar 5.14 Grafik Perbandingan Temperatur *Free Board Area* (T3) Variasi Feeding Konstan

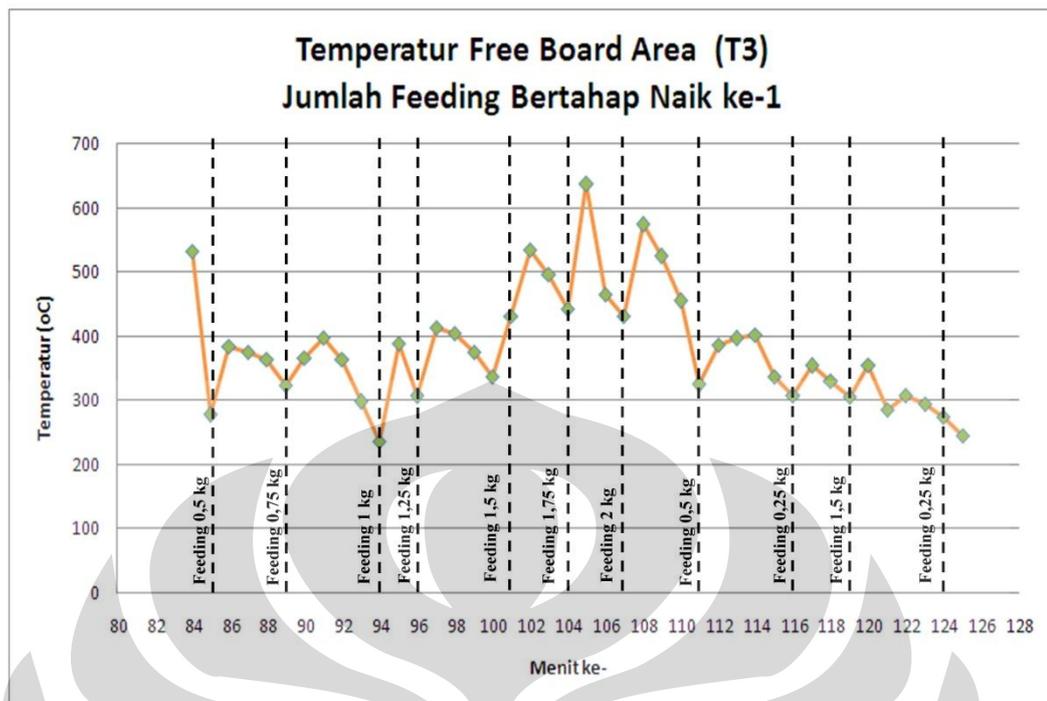
Kedua grafik di atas menunjukkan bahwa setiap feeding memiliki pengaruh masing-masing terhadap kenaikan temperature, baik temperature di *Fluidized Bed area* maupun temperature di *Free Board area*. Hal yang menarik pada kedua grafik tersebut adalah bahwa grafik pemasukan bahan bakar ranting dengan jumlah 0,5 kg berada di atas grafik pemasukan bahan bakar ranting dengan jumlah 0,25 kg. dari sini kita dapat menyimpulkan bahwa pemasukan bahan bakar ranting yang lebih banyak akan menambah kenaikan temperature yang lebih tinggi.

Dari grafik juga dapat kita amati bahwa bagaimana perubahan temperature pada setiap pemasukan bahan bakar. Setiap dilakukan pemasukan bahan bakar, temperatur biasa akan turun terlebih dahulu sebelum naik temperaturnya. Disini kita dapat memperkirakan bahwa proses pembakaran tengah terjadi. Dimana saat bahan bakar masuk ke dalam ruang bakar, maka kalor dimanfaatkan terlebih dahulu untuk dapat membakar bahan bakar yang akhirnya proses pembakaran pun terjadi, dan mengakibatkan temperatur menjadi naik.

Analisa kemudian dilanjutkan dengan mengamati hasil yang diperoleh pada pengujian yang kedua. Dimana pemasukan bahan bakar dimasukkan bertahap meningkat. Grafik yang menunjukkan temperature *Fluidized Bed area* dan *Free Board area* ditunjukkan pada grafik di bawah ini.



Gambar 5. 15 Grafik Temperatur *Fluidized Bed Area* Jumlah Feeding Bertahap Naik ke-1

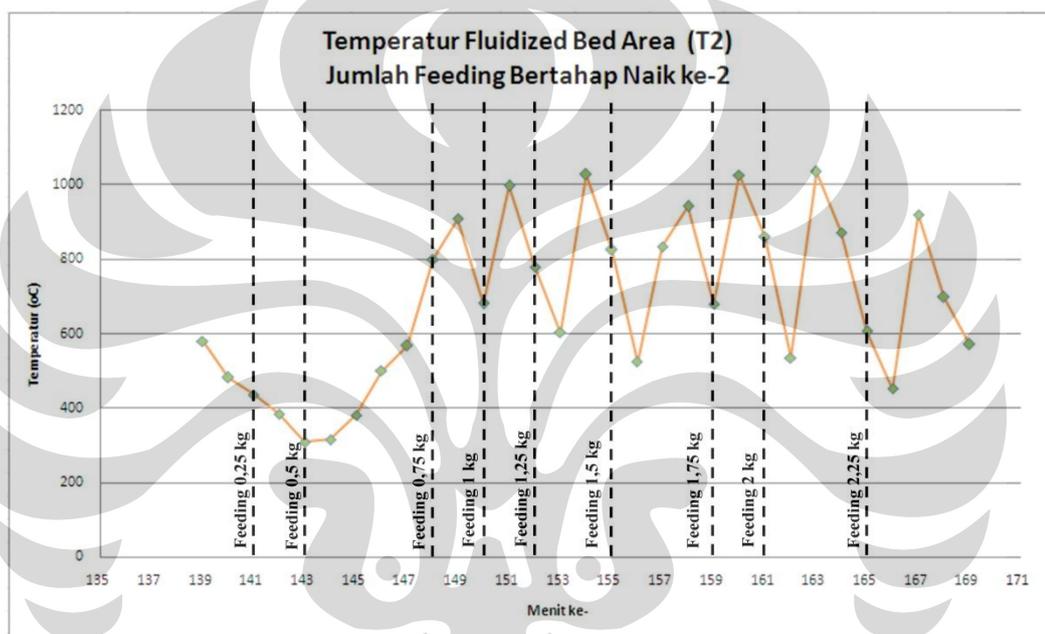


Gambar 5.16 Grafik Temperatur *Free Board Area* Jumlah Feeding Bertahap Naik ke-1

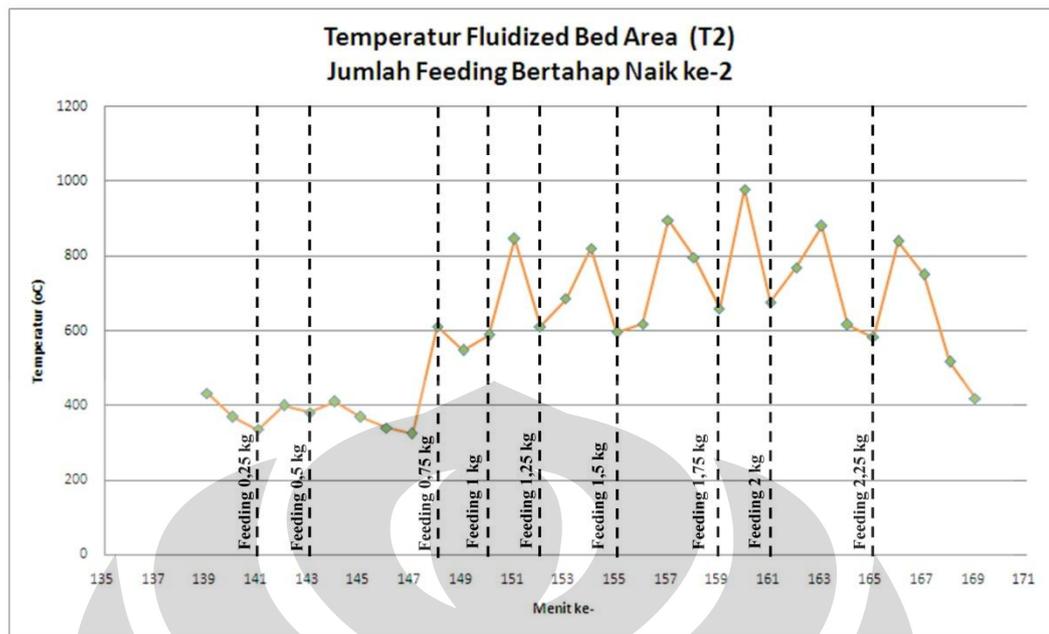
Pengujian dilakukan dimulai dengan memasukkan bahan bakar awal sebanyak 0,5 kg, kemudian 0,75 kg, kemudian 1 kg dan seterusnya naik 0,25 kg. karakteristik perubahan temperature yang terjadi adalah terus meningkat ketika bahan bakar ranting terus ditambahkan. Akan tetapi yang perlu diperhatikan disini adalah ketika penambahan bahan bakar sebanyak 2 kg. Pada pemasukan bahan bakar sebanyak 2 kg, temperature yang terjadi mengalami penurunan dari yang sebelumnya. Bahkan jika kita memperhatikan termokopel 2, mulai penambahan bahan bakar sebanyak 1,75 kg temperatur yang terjadi tidak mencapai sebesar pada saat penambahan bahan bakar sebanyak 1,5 kg. Hal ini diperkirakan karena pada saat penambahan bahan bakar sebanyak 2 kg, kalor yang ada sudah tidak mampu lagi membakar bahan bakar sebanyak 2 kg tersebut. Bahan bakar yang masuk bisa menghambat fluidisasi yang terjadi karena bahan bakar tersebut tidak terbakar. Hal ini dapat mengakibatkan tumpukan bahan bakar yang tidak terbakar pada ruang bakar. Dari grafik berikutnya juga dapat diperlihatkan dengan penambahan bahan bakar setelah 2 kg tersebut, terjadi penurunan temperatur walaupun bahan bakar yang dimasukkan jumlahnya lebih sedikit. Ini dikarenakan

penambahan bahan bakar sebanyak 2 kg yang sebelumnya akibat tidak terbakar. Dari sini kita dapat menyimpulkan kapasitas maksimum yang dapat diberikan pada kondisi operasi yang dilakukan adalah sebesar 1,75 kg dan dapat menghasilkan temperatur sekitar 500°C.

Pada pengujian yang keempat dilakukan hal yang sama seperti percobaan yang ketiga. Data yang diperoleh dari pengujian ini dapat disajikan pada grafik temperature *Fluidized Bed area* dan temperature *Free Board area* seperti di bawah ini.



Gambar 5.17 Grafik Temperatur *Fluidized Bed Area* Jumlah Feeding Bertahap Naik ke-2



Gambar 5.18 Grafik Temperatur *Free Board Area* Jumlah Feeding Bertahap Naik ke-2

Dari grafik yang ada kita dapat memperhatikan perubahan temperatur yang meningkat pada penambahan bahan bakar yang juga bertahap ditingkatkan. Hanya saja temperature yang terjadi sangat tinggi, yaitu mencapai 1000 °C. Temperatur ini jauh lebih besar dibanding pada pengujian yang ketiga. Diperkirakan hal ini terjadi dikarenakan proses fluidisasi yang terjadi tidak baik. Sehingga pembakaran yang terjadi adalah pembakaran biasa tanpa adanya proses fluidisasi. Proses pembakaran ini kurang menguntungkan karena pemasukan bahan bakar juga harus cepat dilakukan. Selain itu bahan bakar yang tidak terbakar diperkirakan akan banyak ada dan menghasilkan tumpukan bahan bakar tidak terbakar pada ruang bakar. Sehingga dari pengujian keempat ini, dapat diambil kesimpulan proses pembakaran yang terjadi tidak efisien.

## BAB 6

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 6.1 Kesimpulan

*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.

Pada tugas akhir ini dilakukan modifikasi pada unit feeder. Dimana modifikasi yang dilakukan adalah untuk mencegar aliran panas menuju feeder yang dapat mengakibatkan pemuaian pada screw feeder. Pemuaian ini selanjutnya berdampak pada terhambatnya putaran feeder akibat bergesekan dengan bagaian selubung feeder sehingga tidak dapat berputar. Selain itu modifikasi juga memungkinkan sistem pemasukan bahan bakar secara batch dan fungsi penghambat panas tetap dapat berjalan. Hal ini dikarenakan sistem 2 pintu yang ada pada modifikasi ini.

Pengujian karakteristik pembakaran bahan bakar ranting dilakukan sebanyak 4 pengujian. Pengujian pertama dan kedua memiliki perbedaan pada jumlah bahan bakar yang dimasukkan ke dalam ruang bakar. Kedua pengujian ini dilakukan dengan memasukkan bahan bakar secara konstan. Pengujian pertama dilakukan dengan memasukkan bahan bakar secara konstan sebanyak 0,25 kg dan pengujian yang kedua dilakukan dengan memasukkan bahan bakar secara konstan sebanyak 0,5 kg. Pengujian ketiga dan keempat dilakukan dengan memasukkan bahan bakar dengan jumlah meningkat bertahap. Beberapa kesimpulan dari pengujian-pengujian ini adalah sebagai berikut :

1. Pemasukan bahan bakar yang lebih banyak menghasilkan kenaikan temperature. Hal ini dapat dilihat dari temperature *Fluidized Bed area* dan *Free Board area*.
2. Dengan pengoperasian blower pada putaran 3400 rpm, FBC dapat beroperasi dengan baik dengan kapasitas maksimal pemasukan bahan bakar sebanyak 1,75 kg dengan temperatur yang dapat dicapai sekitar 500°C.
3. Penilaian terhadap pembakaran dikarenakan fluidisasi yang kurang baik, akan menghasilkan pembakaran yang kurang efisien.

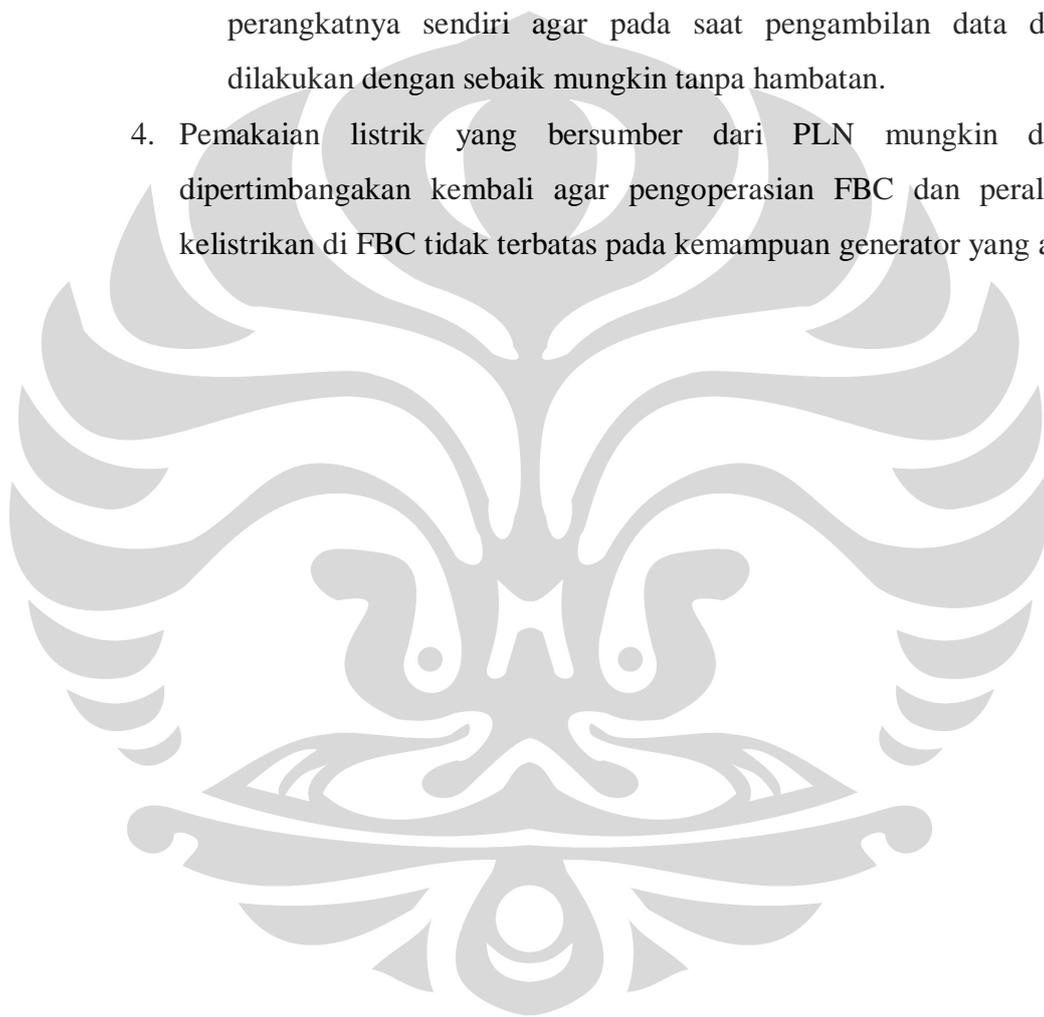
## 6.2 Saran

Saran yang dapat diajukan untuk penelitian selanjutnya diantaranya adalah:

1. Jadwal penelitian harus dibuat sedemikian rupa agar penelitian dapat berjalan sesuai dengan yang diharapkan. Pembuatan jadwal dapat hendaknya diberikan waktu toleransi agar dapat mengantisipasi hal-hal yang di luar perkiraan.
2. Pengujian dari tulisan ini dapat dikembangkan lagi dengan menggunakan variasi yang lain. Sehingga karakteristik pembakaran khususnya dengan menggunakan ranting pohon ini benar-benar dapat diketahui.
3. Beberapa unit pada FBC memerlukan maintenance untuk mencegah dari kerusakan dan tetap dapat bekerja dengan maksimal. Beberapa diantaranya adalah :
  - a. Generator. Unit ini mungkin perlu di servis dan dilakukan penggantian oli
  - b. Burner. Unit ini memerlukan pembersihan pada sensor UV, tetapi diperlukan kehati-hatian dalam melakukannya. Bahkan mungkin diperlukan sistem penutup pada burner sehingga pada saat operasi pembakaran, hasil pembakaran tidak masuk ke dalam sistem

burner. Selain itu, penggantian dan perbaikan bagian busi sebagai ignitor juga perlu dilakukan.

- c. Blower. Pada unit ini perlu dicek jika terjadi penurunan kemampuan. Pengecekan dapat dilakukan dengan membuka bagian dalam blower dan membersihkan kotoran yang menghambat jika terdapat di dalamnya.
  - d. Data logger. Unit ini perlu diperbaiki sistem kelistrikan dan perangkatnya sendiri agar pada saat pengambilan data dapat dilakukan dengan sebaik mungkin tanpa hambatan.
4. Pemakaian listrik yang bersumber dari PLN mungkin dapat dipertimbangkan kembali agar pengoperasian FBC dan peralatan kelistrikan di FBC tidak terbatas pada kemampuan generator yang ada.



## 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. Darma, A.A Gde. "Pengujian Eksperimental Karakteristik Pembakaran Pada Fluidized Bed Combustor UI Menggunakan Bahan Bakar Ranting Pohon". Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2009.
12. Lintang, Arsyah. "Perbandingan Eksperimental Pembakaran Cangkang Kelapa Dan Ranting Pohon Dengan Menggunakan Fluidized Bed Combustor". Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2009.
13. Hartono, Rudi. "Distribusi Temperatur Pembakaran Campuran Ranting Pohon dan Cangkang Kelapa pada Fluidized Bed Combustor UI". Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2009.

14. Kurnia, Reza. “Optimalisasi Operasional Fluidized Bed Combustion untuk Pembakaran Limbah Organik Pada”. Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2010.
15. Septian. “Optimalisasi Operasional Fluidized Bed Combustion untuk Pembakaran Limbah Organik Pada”. Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2010.



## **Lampiran 1**

### **Uji Absorpsi untuk Mengetahui Kadar Air**





## STRUCTURE AND MATERIAL LABORATORY

Department of Civil Engineering – Faculty of Engineering  
University of Indonesia

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

### TEST OF ABSORPTION

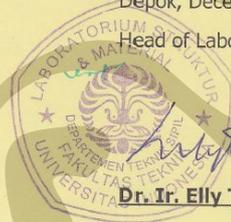
**30861**

No. : /H/LBS/FTUI/AC/XII/2010.  
Sample : RANTING  
Size : -  
Source : -  
Date Tested : DES' 23, 2010  
Tested by : SH  
Checked by :  
Research Activit : DEPARTEMEN TEKNIK MESIN DAN PERKAPALAN  
: PENELITIAN  
: KAMPUS BARU UI DEPOK

A) Weight of Oven-Dry Specimen in Air (gram)	224
B) Weight of SSD Specimen in Air (gram)	247
$B - A$	
Absorption (%) = $\frac{\text{-----}}{A} \times 100\%$	10.268
Average of Above (%)	10.268

Depok, December 23 ,2010

Head of Laboratory,



*[Signature]*  
**Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA**

**Lampiran 2**

**Standar Uji Absorsi**





## Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation C 642; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

### 1. Scope\*

1.1 This test method covers the determinations of density, percent absorption, and percent voids in hardened concrete.

1.2 The text of this test method references notes and footnotes which provide explanatory information. These notes and footnotes (excluding those in tables and figures) shall not be considered as requirements of this standard.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

### 2. Significance and Use

2.1 This test method is useful in developing the data required for conversions between mass and volume for concrete. It can be used to determine conformance with specifications for concrete and to show differences from place to place within a mass of concrete.

### 3. Apparatus

3.1 *Balance*, sensitive to 0.025 % of the mass of the specimen.

3.2 *Container*, suitable for immersing the specimen and suitable wire for suspending the specimen in water.

### 4. Test Specimen

4.1 Whenever possible, the sample shall consist of several individual portions of concrete, each to be tested separately. The individual portions may be pieces of cylinders, cores, or beams of any desired shape or size, except that the volume of each portion shall be not less than 350 cm<sup>3</sup> (or for normal weight concrete, approximately 800 g); and each portion shall be free from observable cracks, fissures, or shattered edges.

### 5. Procedure

5.1 *Oven-Dry Mass*—Determine the mass of the portions, and dry in an oven at a temperature of 100 to 110 °C for not less than 24 h. After removing each specimen from the oven, allow it to cool in dry air (preferably in a desiccator) to a

temperature of 20 to 25 °C and determine the mass. If the specimen was comparatively dry when its mass was first determined, and the second mass closely agrees with the first, consider it dry. If the specimen was wet when its mass was first determined, place it in the oven for a second drying treatment of 24 h and again determine the mass. If the third value checks the second, consider the specimen dry. In case of any doubt, redry the specimen for 24-h periods until check values of mass are obtained. If the difference between values obtained from two successive values of mass exceeds 0.5 % of the lesser value, return the specimens to the oven for an additional 24-h drying period, and repeat the procedure until the difference between any two successive values is less than 0.5 % of the lowest value obtained. Designate this last value *A*.

5.2 *Saturated Mass After Immersion*—Immerse the specimen, after final drying, cooling, and determination of mass, in water at approximately 21 °C for not less than 48 h and until two successive values of mass of the surface-dried sample at intervals of 24 h show an increase in mass of less than 0.5 % of the larger value. Surface-dry the specimen by removing surface moisture with a towel, and determine the mass. Designate the final surface-dry mass after immersion *B*.

5.3 *Saturated Mass After Boiling*—Place the specimen, processed as described in 5.2, in a suitable receptacle, covered with tap water, and boil for 5 h. Allow it to cool by natural loss of heat for not less than 14 h to a final temperature of 20 to 25 °C. Remove the surface moisture with a towel and determine the mass of the specimen. Designate the soaked, boiled, surface-dried mass *C*.

5.4 *Immersed Apparent Mass*—Suspend the specimen, after immersion and boiling, by a wire and determine the apparent mass in water. Designate this apparent mass *D*.

### 6. Calculation

6.1 By using the values for mass determined in accordance with the procedures described in Section 5, make the following calculations:

$$\text{Absorption after immersion, \%} = [(B - A)/A] \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Absorption after immersion and boiling, \%} = [(C - A)/A] \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Bulk density, dry} = [A/(C - D)]\rho = g_1 \quad (3)$$

$$\text{Bulk density after immersion} = [B/(C - D)]\rho \quad (4)$$

<sup>1</sup>This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.09 on Miscellaneous Tests.

Current edition approved July 1, 2006. Published August 2006. Originally approved in 1969. Last previous edition approved in 1997 as C 642 – 97.

\*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

$$\text{Bulk density after immersion and boiling} = [C/(C - D)]\rho \quad (5)$$

$$\text{Apparent density} = [A/(A - D)]\rho = g_2 \quad (6)$$

$$\text{Volume of permeable pore space (voids), \%} = (g_2 - g_1)/g_2 \times 100 \quad (7)$$

$$\text{or } (C - A)/(C - D) \times 100$$

where:

- A = mass of oven-dried sample in air, g
- B = mass of surface-dry sample in air after immersion, g
- C = mass of surface-dry sample in air after immersion and boiling, g
- D = apparent mass of sample in water after immersion and boiling, g
- g<sub>1</sub> = bulk density, dry, Mg/m<sup>3</sup> and
- g<sub>2</sub> = apparent density, Mg/m<sup>3</sup>
- ρ = density of water = 1 Mg/m<sup>3</sup> = 1 g/cm<sup>3</sup>.

### 7. Example

7.1 Assume a sample having the following characteristics:

7.1.1 Mass of the solid part of the specimen = 1000 g.

7.1.2 Total volume of specimen (including solids, "permeable" voids, and "impermeable" voids) = 600 cm<sup>3</sup>.

7.1.3 Absolute density of solid part of specimen = 2.0 Mg/m<sup>3</sup>.

7.1.4 Void space in specimen contains initially only air (no water).

7.2 Then, it follows that there are 500 cm<sup>3</sup> of solids and 100 cm<sup>3</sup> of voids making up the specimen, and the void content is 16.67 %.

7.3 Assume that on immersion 90 mL of water is absorbed.

7.4 Assume that after immersion and boiling 95 mL of water is absorbed.

7.5 Based on the assumptions given in 7.1-7.4 above, the data that would be developed from the procedures given in Section 5 would be as follows:

7.5.1 Oven-dry mass, A = 1000 g.

7.5.2 Mass in air after immersion, B = 1090 g.

7.5.3 Mass in air after immersion and boiling, C = 1095 g.

7.5.4 Apparent mass in water after immersion and boiling, D = 495 g.

NOTE 1—Since loss of mass in water is equal to mass of displaced water, and volume of specimen = 600 cm<sup>3</sup>, mass of specimen in water after immersion and boiling is 1095 - 600 = 495 g.

7.6 By using the data given above to perform the calculations described in Section 6, the following results will be obtained (Note 2):

$$\begin{aligned} \text{Absorption after immersion, \%} &= [(B - A)/A] \times 100 \\ &= [(1090 - 1000)/1000] \times 100 \\ &= 9.0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{Absorption after immersion and boiling, \%} &= [(C - A)/A] \times 100 \\ &= [(1095 - 1000)/1000] \times 100 \\ &= 9.5 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{Bulk density, dry} &= [A/(C - D)]\rho \\ &= [1000/(1095 - 495)] \times 1 \\ &= 1.67 \text{ Mg/m}^3 \\ &= g_1 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{Bulk density after immersion} &= [B/(C - D)]\rho \\ &= [1090/(1095 - 495)] \times 1 \\ &= 1.82 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{Bulk density after immersion and boiling} &= [C/(C - D)]\rho \\ &= [1095/(1095 - 495)] \times 1 \\ &= 1.83 \text{ Mg/m}^3 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{Apparent density} &= [A/(A - D)]\rho \\ &= [1000/(1000 - 495)] \times 1 \\ &= 1.98 \text{ Mg/m}^3 \\ &= g_2 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{Volume of permeable voids, \%} &= [(g_2 - g_1)/g_2] \times 100 = [(1.98 - 1.67)/1.98] \times 100 \\ &= 15.8, \text{ or } [(C - A)/(C - D)] \times 100 \\ &= [(1095 - 1000)/(1095 - 495)] \times 100 = 15.7 \end{aligned} \quad (14)$$

NOTE 2—This test method does not involve a determination of absolute density. Hence, such pore space as may be present in the specimen that is not emptied during the specified drying or is not filled with water during the specified immersion and boiling or both is considered "impermeable" and is not differentiated from the solid portion of the specimen for the calculations, especially those for percent voids. In the example discussed it was assumed that the absolute density of the solid portion of the specimen was 2.0 Mg/m<sup>3</sup>, the total void space was 16.67 %, and the impermeable void space was 5 cm<sup>3</sup>. The operations, if performed, and the calculations, if performed as described, have the effect of assuming that there are 95 cm<sup>3</sup> of pore space and 505 cm<sup>3</sup> of solids, and indicate that the solid material, therefore, has an apparent density of 1.98 rather than the absolute density of 2.00 Mg/m<sup>3</sup> and the specimen has a percentage of voids of 15.8 rather than 16.67.

Depending on the pore size distribution and the pore entry radii of the concrete and on the purposes for which the test results are desired, the procedures of this test method may be adequate, or they may be insufficiently rigorous. In the event that it is desired to fill more of the pores than will be filled by immersion and boiling, various techniques involving the use of vacuum treatment or increased pressures may be used. If a rigorous measure of total pore space is desired, this can only be obtained by determining absolute density by first reducing the sample to discrete particles, each of which is sufficiently small so that no impermeable pore space can exist within any of the particles. If the absolute density were determined and designated g<sub>3</sub>, then:

$$\begin{aligned} \text{Total void volume, \%} &= (g_3 - g_1)/g_3 \times 100 \\ &= (2.00 - 1.67)/2.00 \times 100 = 16.5 \end{aligned} \quad (15)$$

### 8. Precision and Bias

8.1 *Precision*—At present there are insufficient data available to justify attempting to develop a precision statement for this test method.

8.2 *Bias*—Bias for this test method cannot be determined since there is no reference standard available for comparison.

### 9. Keywords

9.1 absorption; concrete-hardened; density; voids

### **Lampiran 3**

#### **Pengukuran Pasir yang Digunakan pada FBC-UI**





# STRUCTURE AND MATERIAL LABORATORY

Department of Civil Engineering – Faculty of Engineering  
University of Indonesia

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

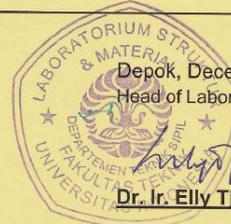
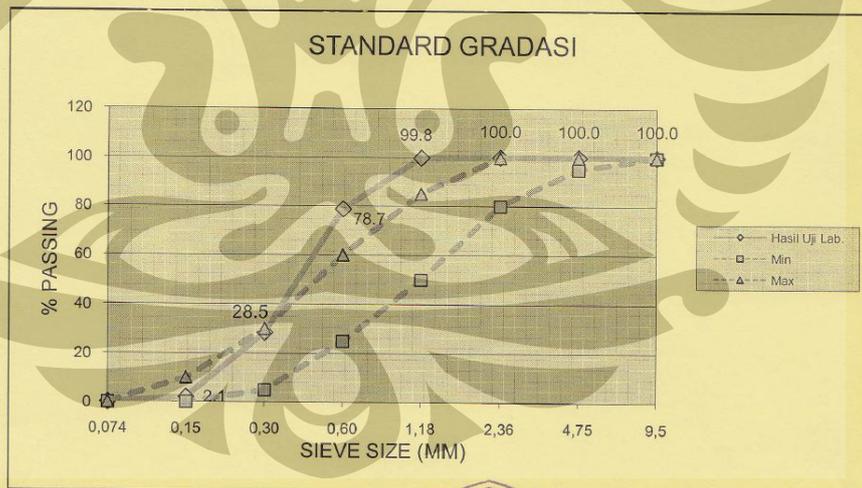
## SIEVE ANALYSIS OF FINE AGGREGATE ASTM C.33/C.33M-08

**30862**

/C/LBS/FTUI/SAF/XII/2010.

No. :  
 Sample : SAND Date Tested : DECEMBER 27, 2010  
 Size : 0-5 MM Tested by : IDS  
 Source : EX. SILIKA Checked by :  
 Research Activity : DEPARTEMEN TEKNIK MESIN DAN PERKAPALAN  
 : PENELITIAN  
 : KAMPUS BARU UI DEPOK

Sieve Size		Sample No. 1			Sample No. 2			Average		
mm	No.	Weight Ret. Grams	Ind. % Ret.	Cum. % Ret.	Weight Ret. Grams	Ind. % Ret.	Cum. % Ret.	Ind. % Ret.	Cum. % Ret.	Total % Passing
9,5	3/8"	0	0	0	0	0	0	0	0	100
4,75	No. 4	0	0	0	0	0	0	0	0	100
2,36	No. 8	0	0	0	0	0	0	0	0	100
1,18	No. 16	1	0.2	0.2	1	0.2	0.2	0.2	0.2	99.8
0,60	No. 30	106	21.2	21.4	105	21.0	21.2	21.1	21.3	78.7
0,30	No. 50	255	51.0	72.4	247	49.4	70.6	50.2	71.5	28.5
0,15	No. 100	129	25.8	98.2	135	27.0	97.6	26.4	97.9	2.1
0,074	No. 200	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PAN		9	1.8	100	12	2.4	100	2.1	100	0
TOTAL		500	100		500	100		100		
FM		1.909								



Depok, December 27, 2010.  
Head of Laboratory,

*Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA*

## Lampiran 4

### Standar Pengukuran Pasir



Designation: C 136 – 04

#### Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation C 136; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

*This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.*

##### 1. Scope\*

1.1 This test method covers the determination of the particle size distribution of fine and coarse aggregates by sieving.

1.2 Some specifications for aggregates which reference this method contain grading requirements including both coarse and fine fractions. Instructions are included for sieve analysis of such aggregates.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values in parentheses are provided for information purposes only. Specification E 11 designates the size of sieve frames with inch units as standard, but in this test method the frame size is designated in SI units exactly equivalent to the inch units.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

##### 2. Referenced Documents

###### 2.1 ASTM Standards:<sup>2</sup>

- C 117 Test Method for Materials Finer Than 75- $\mu$ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing
- C 125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates
- C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials
- C 702 Practice for Reducing Field Samples of Aggregate to Testing Size
- D 75 Practice for Sampling Aggregates
- E 11 Specification for Wire-Cloth and Sieves for Testing Purposes

###### 2.2 AASHTO Standard:

AASHTO No. T 27 Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates<sup>3</sup>

##### 3. Terminology

3.1 *Definitions*—For definitions of terms used in this standard, refer to Terminology C 125.

##### 4. Summary of Test Method

4.1 A sample of dry aggregate of known mass is separated through a series of sieves of progressively smaller openings for determination of particle size distribution.

##### 5. Significance and Use

5.1 This test method is used primarily to determine the grading of materials proposed for use as aggregates or being used as aggregates. The results are used to determine compliance of the particle size distribution with applicable specification requirements and to provide necessary data for control of the production of various aggregate products and mixtures containing aggregates. The data may also be useful in developing relationships concerning porosity and packing.

5.2 Accurate determination of material finer than the 75- $\mu$ m (No. 200) sieve cannot be achieved by use of this method alone. Test Method C 117 for material finer than 75- $\mu$ m sieve by washing should be employed.

##### 6. Apparatus

6.1 *Balances*—Balances or scales used in testing fine and coarse aggregate shall have readability and accuracy as follows:

6.1.1 For fine aggregate, readable to 0.1 g and accurate to 0.1 g or 0.1 % of the test load, whichever is greater, at any point within the range of use.

6.1.2 For coarse aggregate, or mixtures of fine and coarse aggregate, readable and accurate to 0.5 g or 0.1 % of the test load, whichever is greater, at any point within the range of use.

6.2 *Sieves*—The sieve cloth shall be mounted on substantial frames constructed in a manner that will prevent loss of material during sieving. The sieve cloth and standard sieve

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.20 on Normal Weight Aggregates.

Current edition approved Aug. 1, 2004. Published August 2004. Originally approved in 1938. Last previous edition approved in 2001 as C 136 – 01.

<sup>2</sup> For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, [www.astm.org](http://www.astm.org), or contact ASTM Customer Service at [service@astm.org](mailto:service@astm.org). For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

<sup>3</sup> Available from American Association of State Highway and Transportation Officials, 444 North Capitol St. N.W., Suite 225, Washington, DC 20001.

\*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

frames shall conform to the requirements of Specification E 11. Nonstandard sieve frames shall conform to the requirements of Specification E 11 as applicable.

NOTE 1—It is recommended that sieves mounted in frames larger than standard 203.2-mm (8 in.) diameter be used for testing coarse aggregate to reduce the possibility of overloading the sieves. See 8.3.

**6.3 Mechanical Sieve Shaker**—A mechanical sieving device, if used, shall create motion of the sieves to cause the particles to bounce, tumble, or otherwise turn so as to present different orientations to the sieving surface. The sieving action shall be such that the criterion for adequacy of sieving described in 8.4 is met in a reasonable time period.

NOTE 2—Use of a mechanical sieve shaker is recommended when the size of the sample is 20 kg or greater, and may be used for smaller samples, including fine aggregate. Excessive time (more than approximately 10 min) to achieve adequate sieving may result in degradation of the sample. The same mechanical sieve shaker may not be practical for all sizes of samples, since the large sieving area needed for practical sieving of a large nominal size coarse aggregate very likely could result in loss of a portion of the sample if used for a small sample of coarse aggregate or fine aggregate.

**6.4 Oven**—An oven of appropriate size capable of maintaining a uniform temperature of  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  ( $230 \pm 9^\circ\text{F}$ ).

**7. Sampling**

**7.1** Sample the aggregate in accordance with Practice D 75. The size of the field sample shall be the quantity shown in Practice D 75 or four times the quantity required in 7.4 and 7.5 (except as modified in 7.6), whichever is greater.

**7.2** Thoroughly mix the sample and reduce it to an amount suitable for testing using the applicable procedures described in Practice C 702. The sample for test shall be approximately the quantity desired when dry and shall be the end result of the reduction. Reduction to an exact predetermined quantity shall not be permitted.

NOTE 3—Where sieve analysis, including determination of material finer than the 75- $\mu\text{m}$  sieve, is the only testing proposed, the size of the sample may be reduced in the field to avoid shipping excessive quantities of extra material to the laboratory.

**7.3 Fine Aggregate**—The size of the test sample, after drying, shall be 300 g minimum.

**7.4 Coarse Aggregate**—The size of the test sample of coarse aggregate shall conform with the following:

Nominal Maximum Size, Square Openings, mm (in.)	Test Sample Size, min, kg (lb)
9.5 (3/8)	1 (2)
12.5 (1/2)	2 (4)
19.0 (3/4)	5 (11)
25.0 (1)	10 (22)
37.5 (1 1/2)	15 (33)
50 (2)	20 (44)
63 (2 1/2)	35 (77)
75 (3)	60 (130)
90 (3 1/2)	100 (220)
100 (4)	150 (330)
125 (5)	300 (660)

**7.5 Coarse and Fine Aggregate Mixtures**—The size of the test sample of coarse and fine aggregate mixtures shall be the same as for coarse aggregate in 7.4.

**7.6 Samples of Large Size Coarse Aggregate**—The size of sample required for aggregate with 50-mm nominal maximum

size or larger is such as to preclude convenient sample reduction and testing as a unit except with large mechanical splitters and sieve shakers. As an option when such equipment is not available, instead of combining and mixing sample increments and then reducing the field sample to testing size, conduct the sieve analysis on a number of approximately equal sample increments such that the total mass tested conforms to the requirement of 7.4.

**7.7** In the event that the amount of material finer than the 75- $\mu\text{m}$  (No. 200) sieve is to be determined by Test Method C 117, proceed as follows:

**7.7.1** For aggregates with a nominal maximum size of 12.5 mm (1/2 in.) or less, use the same test sample for testing by Test Method C 117 and this method. First test the sample in accordance with Test Method C 117 through the final drying operation, then dry sieve the sample as stipulated in 8.2-8.7 of this method.

**7.7.2** For aggregates with a nominal maximum size greater than 12.5 mm (1/2 in.), a single test sample may be used as described in 7.7.1, or separate test samples may be used for Test Method C 117 and this method.

**7.7.3** Where the specifications require determination of the total amount of material finer than the 75- $\mu\text{m}$  sieve by washing and dry sieving, use the procedure described in 7.7.1.

**8. Procedure**

**8.1** Dry the sample to constant mass at a temperature of  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  ( $230 \pm 9^\circ\text{F}$ ).

NOTE 4—For control purposes, particularly where rapid results are desired, it is generally not necessary to dry coarse aggregate for the sieve analysis test. The results are little affected by the moisture content unless: (1) the nominal maximum size is smaller than about 12.5 mm (1/2 in.); (2) the coarse aggregate contains appreciable material finer than 4.75 mm (No. 4); or (3) the coarse aggregate is highly absorptive (a lightweight aggregate, for example). Also, samples may be dried at the higher temperatures associated with the use of hot plates without affecting results, provided steam escapes without generating pressures sufficient to fracture the particles, and temperatures are not so great as to cause chemical breakdown of the aggregate.

**8.2** Select sieves with suitable openings to furnish the information required by the specifications covering the material to be tested. Use additional sieves as desired or necessary to provide other information, such as fineness modulus, or to regulate the amount of material on a sieve. Nest the sieves in order of decreasing size of opening from top to bottom and place the sample on the top sieve. Agitate the sieves by hand or by mechanical apparatus for a sufficient period, established by trial or checked by measurement on the actual test sample, to meet the criterion for adequacy or sieving described in 8.4.

**8.3** Limit the quantity of material on a given sieve so that all particles have opportunity to reach sieve openings a number of times during the sieving operation. For sieves with openings smaller than 4.75-mm (No. 4), the quantity retained on any sieve at the completion of the sieving operation shall not exceed 7 kg/m<sup>2</sup> of sieving surface area (Note 5). For sieves with openings 4.75 mm (No. 4) and larger, the quantity retained in kg shall not exceed the product of 2.5  $\times$  (sieve opening, mm  $\times$  (effective sieving area, m<sup>2</sup>)). This quantity is shown in Table 1 for five sieve-frame dimensions in common

**TABLE 1 Maximum Allowable Quantity of Material Retained on a Sieve, kg**

Sieve Opening Size, mm	Nominal Dimensions of Sieve <sup>a</sup>				
	203.2-mm dia <sup>b</sup>	254-mm dia <sup>b</sup>	304.8-mm dia <sup>b</sup>	350 by 350 mm	372 by 580 mm
	Sieving Area, m <sup>2</sup>				
	0.0285	0.0457	0.0670	0.1225	0.2158
125	c	c	c	c	67.4
100	c	c	c	30.6	53.9
90	c	c	15.1	27.6	48.5
75	c	8.6	12.6	23.0	40.5
63	c	7.2	10.6	19.3	34.0
50	3.6	5.7	8.4	15.3	27.0
37.5	2.7	4.3	6.3	11.5	20.2
25.0	1.8	2.9	4.2	7.7	13.5
19.0	1.4	2.2	3.2	5.8	10.2
12.5	0.89	1.4	2.1	3.8	6.7
9.5	0.67	1.1	1.6	2.9	5.1
4.75	0.33	0.54	0.80	1.5	2.6

<sup>a</sup> Sieve frame dimensions in inch units: 8.0-in. diameter; 10.0-in. diameter; 12.0-in. diameter; 13.8 by 13.8 in. (14 by 14 in. nominal); 14.6 by 22.8 in. (16 by 24 in. nominal).

<sup>b</sup> The sieve area for round sieve frames is based on an effective diameter 12.7 mm (½ in.) less than the nominal frame diameter, because Specification E 11 permits the sealer between the sieve cloth and the frame to extend 6.35 mm (¼ in.) over the sieve cloth. Thus the effective sieving diameter for a 203.2-mm (8.0-in.) diameter sieve frame is 190.5 mm (7.5 in.). Sieves produced by some manufacturers do not infringe on the sieve cloth by the full 6.35 mm (¼ in.).

<sup>c</sup> Sieves indicated have less than five full openings and should not be used for sieve testing except as provided in 8.6.

use. In no case shall the quantity retained be so great as to cause permanent deformation of the sieve cloth.

8.3.1 Prevent an overload of material on an individual sieve by one of the following methods:

8.3.1.1 Insert an additional sieve with opening size intermediate between the sieve that may be overloaded and the sieve immediately above that sieve in the original set of sieves.

8.3.1.2 Split the sample into two or more portions, sieving each portion individually. Combine the masses of the several portions retained on a specific sieve before calculating the percentage of the sample on the sieve.

8.3.1.3 Use sieves having a larger frame size and providing greater sieving area.

NOTE 5—The 7 kg/m<sup>2</sup> amounts to 200 g for the usual 203.2-mm (8-in.) diameter sieve (with effective sieving surface diameter of 190.5 mm (7.5 in.)).

8.4 Continue sieving for a sufficient period and in such manner that, after completion, not more than 1 % by mass of the material retained on any individual sieve will pass that sieve during 1 min of continuous hand sieving performed as follows: Hold the individual sieve, provided with a snug-fitting pan and cover, in a slightly inclined position in one hand. Strike the side of the sieve sharply and with an upward motion against the heel of the other hand at the rate of about 150 times per minute, turn the sieve about one sixth of a revolution at intervals of about 25 strokes. In determining sufficiency of sieving for sizes larger than the 4.75-mm (No. 4) sieve, limit the material on the sieve to a single layer of particles. If the size of the mounted testing sieves makes the described sieving motion impractical, use 203-mm (8 in.) diameter sieves to verify the sufficiency of sieving.

8.5 In the case of coarse and fine aggregate mixtures, the portion of the sample finer than the 4.75-mm (No. 4) sieve may be distributed among two or more sets of sieves to prevent overloading of individual sieves.

8.5.1 Alternatively, the portion finer than the 4.75-mm (No. 4) sieve may be reduced in size using a mechanical splitter according to Practice C 702. If this procedure is followed, compute the mass of each size increment of the original sample as follows:

$$A = \frac{W_1}{W_2} \times B \quad (1)$$

where:

$A$  = mass of size increment on total sample basis.

$W_1$  = mass of fraction finer than 4.75-mm (No. 4) sieve in total sample.

$W_2$  = mass of reduced portion of material finer than 4.75-mm (No. 4) sieve actually sieved, and

$B$  = mass of size increment in reduced portion sieved.

8.6 Unless a mechanical sieve shaker is used, hand sieve particles larger than 75 mm (3 in.) by determining the smallest sieve opening through which each particle will pass. Start the test on the smallest sieve to be used. Rotate the particles, if necessary, in order to determine whether they will pass through a particular opening; however, do not force particles to pass through an opening.

8.7 Determine the mass of each size increment on a scale or balance conforming to the requirements specified in 5.1 to the nearest 0.1 % of the total original dry sample mass. The total mass of the material after sieving should check closely with original mass of sample placed on the sieves. If the amounts differ by more than 0.3 %, based on the original dry sample mass, the results should not be used for acceptance purposes.

8.8 If the sample has previously been tested by Test Method C 117, add the mass finer than the 75-µm (No. 200) sieve determined by that method to the mass passing the 75-µm (No. 200) sieve by dry sieving of the same sample in this method.

## 9. Calculation

9.1 Calculate percentages passing, total percentages retained, or percentages in various size fractions to the nearest 0.1 % on the basis of the total mass of the initial dry sample. If the same test sample was first tested by Test Method C 117, include the mass of material finer than the 75-µm (No. 200) size by washing in the sieve analysis calculation; and use the total dry sample mass prior to washing in Test Method C 117 as the basis for calculating all the percentages.

9.1.1 When sample increments are tested as provided in 7.6, total the masses of the portion of the increments retained on each sieve, and use these masses to calculate the percentages as in 9.1.

9.2 Calculate the fineness modulus, when required, by adding the total percentages of material in the sample that is coarser than each of the following sieves (cumulative percentages retained), and dividing the sum by 100: 150-µm (No. 100), 300-µm (No. 50), 600-µm (No. 30), 1.18-mm (No. 16), 2.36-mm (No. 8), 4.75-mm (No. 4), 9.5-mm (¾-in.), 19.0-mm (¾-in.), 37.5-mm (1½-in.), and larger, increasing in the ratio of 2 to 1.

10. Report

10.1 Depending upon the form of the specifications for use of the material under test, the report shall include the following:

- 10.1.1 Total percentage of material passing each sieve, or
- 10.1.2 Total percentage of material retained on each sieve, or

10.1.3 Percentage of material retained between consecutive sieves.

10.2 Report percentages to the nearest whole number, except if the percentage passing the 75-µm (No. 200) sieve is less than 10 %, it shall be reported to the nearest 0.1 %.

10.3 Report the fineness modulus, when required, to the nearest 0.01.

11. Precision and Bias

11.1 *Precision*—The estimates of precision for this test method are listed in Table 2. The estimates are based on the results from the AASHTO Materials Reference Laboratory Proficiency Sample Program, with testing conducted by Test Method C 136 and AASHTO Test Method T 27. The data are based on the analyses of the test results from 65 to 233 laboratories that tested 18 pairs of coarse aggregate proficiency test samples and test results from 74 to 222 laboratories that tested 17 pairs of fine aggregate proficiency test samples (Samples No. 21 through 90). The values in the table are given for different ranges of total percentage of aggregate passing a sieve.

11.1.1 The precision values for fine aggregate in Table 2 are based on nominal 500-g test samples. Revision of this test method in 1994 permits the fine aggregate test sample size to be 300 g minimum. Analysis of results of testing of 300-g and 500-g test samples from Aggregate Proficiency Test Samples 99 and 100 (Samples 99 and 100 were essentially identical) produced the precision values in Table 3, which indicate only minor differences due to test sample size.

NOTE 6—The values for fine aggregate in Table 2 will be revised to reflect the 300-g test sample size when a sufficient number of Aggregate Proficiency Tests have been conducted using that sample size to provide reliable data.

TABLE 2 Precision

	Total Percentage of Material Passing	Standard Deviation % <sup>A</sup>	Acceptable Range of Two Results (d2s), % <sup>A</sup>	
<b>Coarse Aggregate<sup>B</sup></b>				
Single-operator precision	<100	≥95	0.32	
	<95	≥85	0.81	
	<85	≥80	1.34	
	<80	≥60	2.25	
	<60	≥20	1.32	
	<20	≥15	0.96	
	<15	≥10	1.00	
	<10	≥5	0.75	
	<5	≥2	0.53	
	<2	>0	0.27	
Multilaboratory precision	<100	≥95	0.35	
	<95	≥85	1.37	
	<85	≥80	1.92	
	<80	≥60	2.82	
	<60	≥20	1.97	
	<20	≥15	1.60	
	<15	≥10	1.48	
	<10	≥5	1.22	
	<5	≥2	1.04	
	<2	>0	0.45	
<b>Fine Aggregate:</b>				
Single-operator precision	<100	≥95	0.26	
	<95	≥60	0.55	
	<60	≥20	0.83	
	<20	≥15	0.54	
	<15	≥10	0.36	
	<10	≥2	0.37	
	<2	>0	0.14	
	Multilaboratory precision	<100	≥95	0.23
		<95	≥60	0.77
		<60	≥20	1.41
<20		≥15	1.10	
<15		≥10	0.73	
<10		≥2	0.65	
<2		>0	0.31	

<sup>A</sup> These numbers represent, respectively, the (1s) and (d2s) limits described in Practice C 670.

<sup>B</sup> The precision estimates are based on aggregates with nominal maximum size of 19.0 mm (¾ in.).

11.2 *Bias*—Since there is no accepted reference material suitable for determining the bias in this test method, no statement on bias is made.

12. Keywords

12.1 aggregate; coarse aggregate; fine aggregate; gradation; grading; sieve analysis; size analysis

**TABLE 3 Precision Data for 300-g and 500-g Test Samples**

Test Result	Fine Aggregate Proficiency Sample		Average	Within Laboratory		Between Laboratory	
	Sample Size	Number Labs		1s	d2s	1s	d2s
ASTM C136/AASHTO T27							
Total material passing the No. 4 sieve (%)	500 g	285	99.992	0.027	0.066	0.037	0.104
	300 g	276	99.990	0.021	0.060	0.042	0.117
Total material passing the No. 8 sieve (%)	500 g	281	84.10	0.43	1.21	0.63	1.76
	300 g	274	84.32	0.39	1.09	0.69	1.92
Total material passing the No. 16 sieve (%)	500 g	286	70.11	0.53	1.49	0.75	2.10
	300 g	272	70.00	0.62	1.74	0.76	2.12
Total material passing the No. 30 sieve (%)	500 g	287	48.54	0.75	2.10	1.33	3.73
	300 g	276	48.44	0.87	2.44	1.36	3.79
Total material passing the No. 50 sieve (%)	500 g	286	13.52	0.42	1.17	0.98	2.73
	300 g	275	13.51	0.45	1.25	0.99	2.76
Total material passing the No. 100 sieve (%)	500 g	287	2.55	0.15	0.42	0.37	1.03
	300 g	270	2.52	0.18	0.52	0.32	0.89
Total Material passing the No. 200 sieve (%)	500 g	278	1.32	0.11	0.32	0.31	0.85
	300 g	266	1.30	0.14	0.39	0.31	0.85

### SUMMARY OF CHANGES

Committee C09 has identified the location of selected changes to this test method since the last issue, C 136 – 01, that may impact the use of this test method. (Approved August 1, 2004)

(I) Revised the last sentence of Footnote B in Table 1.

*ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.*

*This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).*



Designation: C 33 – 03

## Standard Specification for Concrete Aggregates<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation C 33; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

*This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.*

### 1. Scope\*

1.1 This specification defines the requirements for grading and quality of fine and coarse aggregate (other than lightweight or heavyweight aggregate) for use in concrete.<sup>2</sup>

1.2 This specification is for use by a contractor, concrete supplier, or other purchaser as part of the purchase document describing the material to be furnished.

NOTE 1—This specification is regarded as adequate to ensure satisfactory materials for most concrete. It is recognized that, for certain work or in certain regions, it may be either more or less restrictive than needed. For example, where aesthetics are important, more restrictive limits may be considered regarding impurities that would stain the concrete surface. The specifier should ascertain that aggregates specified are or can be made available in the area of the work, with regard to grading, physical, or chemical properties, or combination thereof.

1.3 This specification is also for use in project specifications to define the quality of aggregate, the nominal maximum size of the aggregate, and other specific grading requirements. Those responsible for selecting the proportions for the concrete mixture shall have the responsibility of determining the proportions of fine and coarse aggregate and the addition of blending aggregate sizes if required or approved.

1.4 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only.

1.5 The text of this standard references notes and footnotes which provide explanatory material. These notes and footnotes (excluding those in tables and figures) shall not be considered as requirements of this standard.

### 2. Referenced Documents

- 2.1 *ASTM Standards:*  
C 29/C 29M Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate<sup>3</sup>

C 40 Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete<sup>3</sup>

C 87 Test Method for Effect of Organic Impurities in Fine Aggregate on Strength of Mortar<sup>3</sup>

C 88 Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate<sup>3</sup>

C 117 Test Method for Material Finer than 75- $\mu$ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing<sup>3</sup>

C 123 Test Method for Lightweight Particles in Aggregate<sup>3</sup>

C 125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates<sup>3</sup>

C 131 Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine<sup>3</sup>

C 136 Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates<sup>3</sup>

C 142 Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates<sup>3</sup>

C 150 Specification for Portland Cement<sup>4</sup>

C 227 Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method)<sup>3</sup>

C 289 Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method)<sup>3</sup>

C 294 Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates<sup>3</sup>

C 295 Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete<sup>3</sup>

C 311 Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete<sup>3</sup>

C 330 Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete<sup>3</sup>

C 331 Specification for Lightweight Aggregates for Concrete Masonry Units<sup>3</sup>

C 332 Specification for Lightweight Aggregates for Insulating Concrete<sup>3</sup>

C 342 Test Method for Potential Volume Change of Cement-Aggregate Combinations<sup>5</sup>

C 441 Test Method for Effectiveness of Mineral Admixtures or Ground Blast-Furnace Slag in Preventing Excessive

<sup>1</sup> This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.20 on Normal Weight Aggregates.

Current edition approved June 10, 2003. Published July 2003. Originally approved in 1921. Last previous edition approved in 2002 as C 33–02a.

<sup>2</sup> For lightweight aggregates, see Specifications C 331, C 332, and C 330; for heavyweight aggregates see Specification C 637 and Descriptive Nomenclature C 638.

<sup>3</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.02.

<sup>4</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.01.

<sup>5</sup> Discontinued; see 2001 *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.02.

\*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

- Expansion of Concrete Due to the Alkali-Silica Reaction<sup>3</sup>
- C 535 Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine<sup>3</sup>
- C 586 Test Method for Potential Alkali Reactivity of Carbonate Rocks for Concrete Aggregates (Rock Cylinder Method)<sup>3</sup>
- C 595 Specification for Blended Hydraulic Cements<sup>4</sup>
- C 618 Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete<sup>3</sup>
- C 637 Specification for Aggregates for Radiation-Shielding Concrete<sup>3</sup>
- C 638 Descriptive Nomenclature of Constituents of Aggregates for Radiation-Shielding Concrete<sup>3</sup>
- C 666 Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing<sup>3</sup>
- C 989 Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars<sup>3</sup>
- C 1105 Test Method for Length Change of Concrete Due to Alkali-Carbonate Rock Reaction<sup>3</sup>
- C 1157 Performance Specification for Hydraulic Cement<sup>4</sup>
- C 1240 Specification for Use of Silica Fume as a Mineral Admixture in Hydraulic-Cement Concrete, Mortar, and Grout<sup>7</sup>
- C 1260 Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)<sup>3</sup>
- C 1293 Test Method for Concrete Aggregates by Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction<sup>3</sup>
- D 75 Practice for Sampling Aggregates<sup>6</sup>
- D 3665 Practice for Random Sampling of Construction Materials<sup>6</sup>
- E 11 Specification for Wire-Cloth and Sieves for Testing Purposes<sup>7</sup>

**TABLE 1 Limits for Deleterious Substances in Fine Aggregate for Concrete**

Item	Mass Percent of Total Sample, max
Clay lumps and friable particles	3.0
Material finer than 75- $\mu$ m (No. 200) sieve:	
Concrete subject to abrasion	3.0 <sup>A</sup>
All other concrete	5.0 <sup>A</sup>
Coal and lignite:	
Where surface appearance of concrete is of importance	0.5
All other concrete	1.0

<sup>A</sup>In the case of manufactured sand, if the material finer than the 75- $\mu$ m (No. 200) sieve consists of the dust of fracture, essentially free of clay or shale, these limits are permitted to be increased to 5 and 7 %, respectively.

**3. Terminology**

3.1 For definitions of terms used in this standard, refer to Terminology C 125.

<sup>6</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.03.  
<sup>7</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

**4. Ordering and Specifying Information**

4.1 The direct purchaser of aggregates shall include the information in 4.2 in the purchase order as applicable. A project specifier shall include in the project documents information to describe the aggregate to be used in the project from the applicable items in 4.3.

4.2 Include in the purchase order for aggregates the following information, as applicable:

- 4.2.1 Reference to this specification, as C 33 \_\_\_\_.
- 4.2.2 Whether the order is for fine aggregate or for coarse aggregate.
- 4.2.3 Quantity, in metric tons or tons.
- 4.2.4 When the order is for fine aggregate:
  - 4.2.4.1 Whether the restriction on reactive materials in 7.3 applies.
  - 4.2.4.2 In the case of the sulfate soundness test (see 8.1) which salt is to be used. If none is stated, either sodium sulfate or magnesium sulfate shall be used.
  - 4.2.4.3 The appropriate limit for material finer than 75- $\mu$ m (No. 200) sieve (see Table 1). If not stated, the 3.0 % limit shall apply.
  - 4.2.4.4 The appropriate limit for coal and lignite (see Table 1). If not stated, the 1.0 % limit shall apply.
- 4.2.5 When the order is for coarse aggregate:
  - 4.2.5.1 The grading (size number) (see 10.1 and Table 2), or alternate grading as agreed between the purchaser and aggregate supplier.
  - 4.2.5.2 The class designation (see 11.1 and Table 3).
  - 4.2.5.3 Whether the restriction on reactive materials in 11.2 applies.
  - 4.2.5.4 In the case of the sulfate soundness test (see Table 3), which salt is to be used. If none is stated, either sodium sulfate or magnesium sulfate shall be used.
- 4.2.6 Any exceptions or additions to this specification (see Note 1).

4.3 Include in project specifications for aggregates the following information, as applicable:

- 4.3.1 Reference to this specification, as C 33 \_\_\_\_.
- 4.3.2 When the aggregate being described is fine aggregate:
  - 4.3.2.1 Whether the restriction on reactive materials in 7.3 applies.
  - 4.3.2.2 In the case of the sulfate soundness test (see 8.1) which salt is to be used. If none is stated, either sodium sulfate or magnesium sulfate shall be used.
  - 4.3.2.3 The appropriate limit for material finer than the 75- $\mu$ m (No. 200) sieve (see Table 1). If not stated, the 3.0 % limit shall apply, and
  - 4.3.2.4 The limit that applies with regard to coal and lignite (Table 1). If not stated, the 1.0 % limit shall apply.
- 4.3.3 When the aggregate being described is coarse aggregate, include:
  - 4.3.3.1 The nominal maximum size or sizes permitted, based on thickness of section or spacing of reinforcing bars or other criteria. In lieu of stating the nominal maximum size, the specifier shall designate an appropriate size number or numbers (see 10.1 and Table 2). Designation of a size number to indicate a nominal size shall not restrict the person responsible for selecting proportions from combining two or more gradings of

TABLE 2 Grading Requirements for Coarse Aggregates

Size Number	Nominal Size (Sieves with Square Openings)	Amounts Finer than Each Laboratory Sieve (Square-Openings), Mass Percent													
		100 mm (4 in.)	90 mm (3½ in.)	75 mm (3 in.)	63 mm (2½ in.)	50 mm (2 in.)	37.5 mm (1½ in.)	25.0 mm (1 in.)	19.0 mm (¾ in.)	12.5 mm (½ in.)	9.5 mm (¾ in.)	4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 16)	1.18 mm (No. 16)	300 µm (No. 50)
1	90 to 37.5 mm (3½ to 1½ in.)	100	90 to 100	...	25 to 60	...	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...	...
2	63 to 37.5 mm (2½ to 1½ in.)	...	...	100	90 to 100	35 to 70	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...	...
3	50 to 25.0 mm (2 to 1 in.)	...	...	...	100	90 to 100	35 to 70	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...
357	50 to 4.75 mm (2 in. to No. 4)	...	...	...	100	95 to 100	...	...	...	10 to 30	0 to 5	...	...	...	...
4	37.5 to 19.0 mm (1½ to ¾ in.)	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...
467	37.5 to 4.75 mm (1½ in. to No. 4)	...	...	...	...	100	95 to 100	...	35 to 70	10 to 30	0 to 5	...	...	...	...
5	25.0 to 12.5 mm (1 to ½ in.)	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 10	...	...	...	...	...
56	25.0 to 9.5 mm (1 to ¾ in.)	...	...	...	...	...	100	90 to 100	40 to 85	10 to 40	0 to 5	...	...	...	...
57	25.0 to 4.75 mm (1 to ¾ in.)	...	...	...	...	...	100	95 to 100	...	25 to 60	0 to 10	0 to 5	...	...	...
6	19.0 to 9.5 mm (¾ to ¾ in.)	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 15	0 to 5	...	...	...
67	19.0 to 4.75 mm (¾ in. to No. 4)	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 15	0 to 5	...	...	...
7	12.5 to 4.75 mm (½ in. to No. 4)	...	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	40 to 70	0 to 15	0 to 5	...	...
8	9.5 to 2.36 mm (¾ in. to No. 8)	...	...	...	...	...	...	...	...	85 to 100	10 to 30	0 to 10	0 to 5	...	...
89	9.5 to 1.18 mm (¾ in. to No. 16)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	20 to 55	5 to 30	0 to 10	0 to 5	...
9 <sup>A</sup>	4.75 to 1.18 mm (No. 4 to No. 16)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 to 100	10 to 40	0 to 10	0 to 5	...

<sup>A</sup> Size number 9 aggregate is defined in Terminology C 125 as a fine aggregate. It is included as a coarse aggregate when it is combined with a size number 8 material to create a size number 89, which is a coarse aggregate as defined by Terminology C 125.

TABLE 3. Limits for Deleterious Substances and Physical Property Requirements of Coarse Aggregate for Concrete

NOTE 1—See Fig. 1 for the location of the weathering regions and Note 9 for guidance in using the map. The weathering regions are defined as follows:  
 (S) Severe Weathering Region—A cold climate where concrete is exposed to deicing chemicals or other aggressive agents, or where concrete may become saturated by continued contact with moisture or free water prior to repeated freezing and thawing.  
 (M) Moderate Weathering Region—A climate where occasional freezing is expected, but where concrete in outdoor service will not be continually exposed to freezing and thawing in the presence of moisture or to deicing chemicals.  
 (N) Negligible Weathering Region—A climate where concrete is rarely exposed to freezing in the presence of moisture.

Class Designation	Type or Location of Concrete Construction	Clay Lumps and Friable Particles	Chert Than 2.40 sp gr SSD	Sum of Clay Lumps, Friable Particles, and Chert (Less Than 2.40 sp gr SSD)	Maximum Allowable, %		
					Material Finer Than 75-µm (No. 200) Sieve	Coal and Lignite	Abrasion <sup>a</sup>
1S	Footings, foundations, columns and beams not exposed to the weather, interior floor slabs to be given coverings	10.0	...	...	1.0	50	...
2S	Interior floors without coverings	5.0	...	...	0.5	50	...
3S	Foundation walls above grade, retaining walls, abutments, piers, girders, and beams exposed to the weather	5.0	5.0	7.0	0.5	50	18
4S	Pavements, bridge decks, driveways and curbs, walks, patios, garage floors, exposed floors and porches, or water-front structures, subject to frequent wetting	3.0	5.0	5.0	0.5	50	18
5S	Exposed architectural concrete	2.0	3.0	3.0	0.5	50	18
1M	Footings, foundations, columns, and beams not exposed to the weather, interior floor slabs to be given coverings	10.0	...	...	1.0 <sup>c</sup>	50	...
2M	Interior floors without coverings	5.0	...	...	0.5	50	...
3M	Foundation walls above grade, retaining walls, abutments, piers, girders, and beams exposed to the weather	5.0	8.0	10.0	0.5	50	18
4M	Pavements, bridge decks, driveways and curbs, walks, patios, garage floors, exposed floors and porches, or water-front structures subject to frequent wetting	5.0	5.0	7.0	0.5	50	18
5M	Exposed architectural concrete	3.0	3.0	5.0	0.5	50	18
1N	Slabs subject to traffic, abrasion, bridge decks, floors, sidewalks, pavements	5.0	...	...	0.5	50	...
2N	All other classes of concrete	10.0	...	...	1.0	50	...

<sup>a</sup> Crushed air-cooled blast-furnace slag is excluded from the abrasion requirements. The rounded or jagged bulk density (unit weight) of crushed air-cooled blast-furnace slag shall be not less than 1120 kg/m<sup>3</sup> (70 lb/ft<sup>3</sup>). The grading of slag used in the bulk density (unit weight) test shall conform to the grading to be used in the concrete. Abrasion loss of gravel, crushed gravel, or crushed stone shall be determined on the test size or sizes immediately corresponding to the grading requirements to be used in the concrete. When more than one grading is to be used, the limit on abrasion loss shall apply to each.  
<sup>b</sup> This percentage under either of the following conditions: (1) is permitted to be increased to 1.5 if the material is essentially free of clay or shale; or (2) if the source of the fine aggregate to be used in the concrete is known to contain less than the specified maximum amount passing the 75-µm (No. 200) sieve. (Table 1) the percentage limit (L) on the amount in the coarse aggregate is permitted to be increased to L = 1 + [(PW)(100 - P)] / (T - A), where P = percentage of sand in the concrete as a percent of total aggregate, T = the Table 1 limit for the amount permitted in the fine aggregate, and A = the actual amount in the fine aggregate. (This provides a weighted calculation designed to limit the maximum mass of material passing the 75-µm (No. 200) sieve in the concrete to that which would be obtained if both the fine and coarse aggregate were supplied at the maximum tabulated percentage for each of these ingredients.)

aggregate to obtain a desired grading, provided that the gradings are not otherwise restricted by the project specifier and the nominal maximum size indicated by the size number is not exceeded.

4.3.3.2 The class designation (see 11.1 and Table 3).

4.3.3.3 Whether the restriction on reactive materials in 11.2 applies.

4.3.3.4 In the case of the sulfate soundness test (see Table 3), which salt is to be used. If none is stated, either sodium sulfate or magnesium sulfate shall be used, and

4.3.4 The person responsible for selecting the concrete proportions if other than the concrete producer.

4.3.5 Any exceptions or additions to this specification (see Note 1).

## FINE AGGREGATE

### 5. General Characteristics

5.1 Fine aggregate shall consist of natural sand, manufactured sand, or a combination thereof.

### 6. Grading

6.1 *Sieve Analysis*—Fine aggregate, except as provided in 6.2 and 6.3 shall be graded within the following limits:

Sieve (Specification E 11)	Percent Passing
9.5-mm (¾-in.)	100
4.75-mm (No. 4)	95 to 100
2.36-mm (No. 8)	80 to 100
1.18-mm (No. 16)	50 to 85
600-µm (No. 30)	25 to 60
300-µm (No. 50)	5 to 30
150-µm (No. 100)	0 to 10

NOTE 2—Concrete with fine aggregate gradings near the minimums for percent passing the 300 µm (No. 50) and 150 µm (No. 100) sometimes have difficulties with workability, pumping or excessive bleeding. The addition of entrained air, additional cement, or the addition of an approved mineral admixture to supply the deficient fines, are methods used to alleviate such difficulties.

6.2 The fine aggregate shall have not more than 45 % passing any sieve and retained on the next consecutive sieve of those shown in 6.1, and its fineness modulus shall be not less than 2.3 nor more than 3.1.

6.3 Fine aggregate failing to meet these grading requirements shall meet the requirements of this section provided that the supplier can demonstrate to the purchaser or specifier that concrete of the class specified, made with fine aggregate under consideration, will have relevant properties (see Note 4) at least equal to those of concrete made with the same ingredients, with the exception that the reference fine aggregate shall be selected from a source having an acceptable performance record in similar concrete construction.

NOTE 3—Fine aggregate that conforms to the grading requirements of a specification, prepared by another organization such as a state transportation agency, which is in general use in the area, should be considered as having a satisfactory service record with regard to those concrete properties affected by grading.

NOTE 4—Relevant properties are those properties of the concrete that are important to the particular application being considered. STP 169C<sup>8</sup> provides a discussion of important concrete properties.

6.4 For continuing shipments of fine aggregate from a given source, the fineness modulus shall not vary more than 0.20 from the base fineness modulus. The base fineness modulus shall be that value that is typical of the source. The purchaser or specifier has the authority to approve a change in the base fineness modulus.

NOTE 5—The base fineness modulus should be determined from previous tests, or if no previous tests exist, from the average of the fineness modulus values for the first ten samples (or all preceding samples if less than ten) on the order. The proportioning of a concrete mixture may be dependent on the base fineness modulus of the fine aggregate to be used. Therefore, when it appears that the base fineness modulus is considerably different from the value used in the concrete mixture, a suitable adjustment in the mixture may be necessary.

### 7. Deleterious Substances

7.1 The amount of deleterious substances in fine aggregate shall not exceed the limits prescribed in Table 1.

#### 7.2 Organic Impurities:

7.2.1 Fine aggregate shall be free of injurious amounts of organic impurities. Except as herein provided, aggregates subjected to the test for organic impurities and producing a color darker than the standard shall be rejected.

7.2.2 Use of a fine aggregate failing in the test is not prohibited, provided that the discoloration is due principally to the presence of small quantities of coal, lignite, or similar discrete particles.

7.2.3 Use of a fine aggregate failing in the test is not prohibited, provided that, when tested for the effect of organic impurities on strength of mortar, the relative strength at 7 days, calculated in accordance with Test Method C 87, is not less than 95 %.

7.3 Fine aggregate for use in concrete that will be subject to wetting, extended exposure to humid atmosphere, or contact with moist ground shall not contain any materials that are deleteriously reactive with the alkalis in the cement in an amount sufficient to cause excessive expansion of mortar or concrete, except that if such materials are present in injurious amounts, use of the fine aggregate is not prohibited when used with a cement containing less than 0.60 % alkalis calculated as sodium oxide equivalent (Na<sub>2</sub>O + 0.658K<sub>2</sub>O) or with the addition of a material that has been shown to prevent harmful expansion due to the alkali-aggregate reaction. (See Appendix XI.)

### 8. Soundness

8.1 Except as provided in 8.2 and 8.3, fine aggregate subjected to five cycles of the soundness test shall have a weighted average loss not greater than 10 % when sodium sulfate is used or 15 % when magnesium sulfate is used.

8.2 Fine aggregate failing to meet the requirements of 8.1 shall be regarded as meeting the requirements of this section provided that the supplier demonstrates to the purchaser or

<sup>8</sup> Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials, STP 169C, ASTM, 1994.

specifier that concrete of comparable properties, made from similar aggregate from the same source, has given satisfactory service when exposed to weathering similar to that to be encountered.

8.3 Fine aggregate not having a demonstrable service record and failing to meet the requirements of 8.1 shall be regarded as meeting the requirements of this section provided that the supplier demonstrates to the purchaser or specifier it gives satisfactory results in concrete subjected to freezing and thawing tests (see Test Method C 666).

**COARSE AGGREGATE**

**9. General Characteristics**

9.1 Coarse aggregate shall consist of gravel, crushed gravel, crushed stone, air-cooled blast furnace slag, or crushed hydraulic-cement concrete (see Note 6), or a combination thereof, conforming to the requirements of this specification.

NOTE 6—Although crushed hydraulic-cement concrete has been used as an aggregate with reported satisfactory results, its use may require some additional precautions. Mixing water requirements may be increased because of the harshness of the aggregate. Partially deteriorated concrete, used as aggregate, may reduce freeze-thaw resistance, affect air void properties or degrade during handling, mixing, or placing. Crushed concrete may have constituents that would be susceptible to alkali-aggregate reactivity or sulfate attack in the new concrete or may bring sulfates, chlorides, or organic material to the new concrete in its pore structure.

**10. Grading**

10.1 Coarse aggregates shall conform to the requirements prescribed in Table 2 for the size number specified.

NOTE 7—The ranges shown in Table 2 are by necessity very wide in order to accommodate nationwide conditions. For quality control of any specific operation, a producer should develop an average grading for the particular source and production facilities, and should control the production gradings within reasonable tolerances from this average. Where coarse aggregate size numbers 357 or 467 are used, the aggregate should be furnished in at least two separate sizes.

**11. Deleterious Substances**

11.1 Except for the provisions of 11.3, the limits given in Table 3 shall apply for the class of coarse aggregate designated in the purchase order or other document (see Note 8 and Note 9). If the class is not specified, the requirements for Class 3S, 3M, or 1N shall apply in the severe, moderate, and negligible weathering regions, respectively (see Table 3 and Fig. 1).

NOTE 8—The specifier of the aggregate should designate the class of coarse aggregate to be used in the work, based on weathering severity, abrasion, and other factors of exposure. (See Table 3 and Fig. 1.) The limits for coarse aggregate corresponding to each class designation are expected to ensure satisfactory performance in concrete for the respective type and location of construction. Selecting a class with unduly restrictive limits may result in unnecessary cost if materials meeting those requirements are not locally available. Selecting a class with lenient limits may result in unsatisfactory performance and premature deterioration of the concrete. While concrete in different parts of a single structure may be

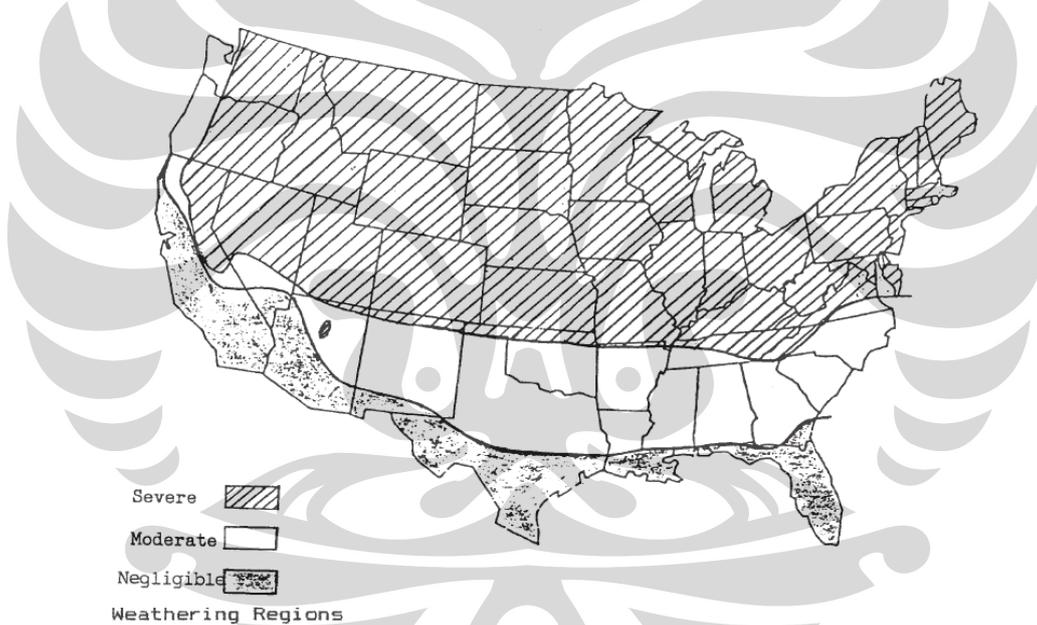


FIG. 1 Location of Weathering Regions

adequately made with different classes of coarse aggregate, the specifier may wish to require the coarse aggregate for all concrete to conform to the same more restrictive class to reduce the chance of furnishing concrete with the wrong class of aggregate, especially on smaller projects.

NOTE 9—For coarse aggregate in concrete exposed to weathering, the map with the weathering regions shown in Fig. 1 is intended to serve only as a guide to probable weathering severity. Those undertaking construction, especially near the boundaries of weathering regions, should consult local weather bureau records for amount of winter precipitation and number of freeze-thaw cycles to be expected, for determining the weathering severity for establishing test requirements of the coarse aggregate. For construction at altitudes exceeding 1520 m (5000 ft) above sea level, the likelihood of more severe weathering than indicated by the map should be considered. In arid areas, severity of weathering may be less than that indicated. In either case, the definitions of weathering severity in Table 3 would govern. If there is doubt in choosing between two regions, select the more severe weathering region.

11.2 Coarse aggregate for use in concrete that will be subject to wetting, extended exposure to humid atmosphere, or contact with moist ground shall not contain any materials that are deleteriously reactive with the alkalis in the cement in an amount sufficient to cause excessive expansion of mortar or concrete except that if such materials are present in injurious amounts, the coarse aggregate is not prohibited when used with a cement containing less than 0.60 % alkalis calculated as sodium oxide equivalent ( $\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$ ) or with the addition of a material that has been shown to prevent harmful expansion due to the alkali-aggregate reaction. (See Appendix X1.)

11.3 Coarse aggregate having test results exceeding the limits specified in Table 3 shall be regarded as meeting the requirements of this section provided the supplier demonstrates to the purchaser or specifier that concrete made with similar aggregate from the same source has given satisfactory service when exposed in a similar manner to that to be encountered; or, in the absence of a demonstrable service record, provided that the aggregate produces concrete having satisfactory relevant properties (see Note 4).

#### METHODS OF SAMPLING AND TESTING

##### 12. Methods of Sampling and Testing

12.1 Sample and test the aggregates in accordance with the following methods, except as otherwise provided in this specification. Make the required tests on test specimens that comply with requirements of the designated test methods. It is

not prohibited to use the same test specimen for sieve analysis and for determination of material finer than the 75- $\mu\text{m}$  (No. 200) sieve. The use of separated sizes from the sieve analysis is acceptable for soundness or abrasion tests, however, additional test specimen preparation is required (see Note 10). For other test procedures and the evaluation of potential alkali reactivity, when required, use independent test specimens.

NOTE 10—The material used for the soundness test requires resieving to allow proper test specimen preparation as specified in Test Method C 88.

12.1.1 *Sampling*—Practice D 75 and Practice D 3665.

12.1.2 *Grading and Fineness Modulus*—Test Method C 136.

12.1.3 *Amount of Material Finer than 75- $\mu\text{m}$  (No. 200) Sieve*—Test Method C 117.

12.1.4 *Organic Impurities*—Test Method C 40.

12.1.5 *Effect of Organic Impurities on Strength*—Test Method C 87.

12.1.6 *Soundness*—Test Method C 88.

12.1.7 *Clay Lumps and Friable Particles*—Test Method C 142.

12.1.8 *Coal and Lignite*—Test Method C 123, using a liquid of 2.0 specific gravity to remove the particles of coal and lignite. Only material that is brownish-black, or black, shall be considered coal or lignite. Coke shall not be classed as coal or lignite.

12.1.9 *Bulk Density (Unit Weight) of Slag*—Test Method C 29/C 29M.

12.1.10 *Abrasion of Coarse Aggregate*—Test Method C 131 or Test Method C 535.

12.1.11 *Reactive Aggregates*—See Appendix X1.

12.1.12 *Freezing and Thawing*—Procedures for making freezing and thawing tests of concrete are described in Test Method C 666.

12.1.13 *Chert*—Test Method C 123 is used to identify particles in a sample of coarse aggregate lighter than 2.40 specific gravity, and Guide C 295 to identify which of the particles in the light fraction are chert.

##### 13. Keywords

13.1 aggregates; coarse aggregate; concrete aggregates; fine aggregate

## XI. METHODS FOR EVALUATING POTENTIAL FOR DELETERIOUS EXPANSION DUE TO ALKALI REACTIVITY OF AN AGGREGATE

## XI.1 Introduction

X1.1.1 *Laboratory Methods*—Many test methods for evaluating the potential for deleterious expansion due to alkali reactivity of an aggregate have been proposed and some have been adopted as ASTM standards. However, there is no general agreement on the relation between the results of these tests and the amount of expansion to be expected or tolerated in service. Therefore, evaluation of the suitability of an aggregate should be based upon judgment, interpretation of test data, and results of examinations of concrete structures containing the same aggregates and similar cementitious materials having similar levels of alkalis. Results of the tests referred to in this appendix may assist in making the evaluation. When interpreting expansion of laboratory specimens, consideration should be given not only to expansion values at specific ages, but also to the shape of the expansion curve, which may indicate whether the expansion is leveling off or continuing at a constant or accelerating rate.

X1.1.2 *Service Record Evaluation*—Valid, comparable concrete service record data, if available, should take precedence over laboratory test results in most cases. To be considered valid, a record of satisfactory service should be available for at least 10 years for aggregates, cementitious materials, and exposures sufficiently similar to those in which an aggregate is being considered for future use. Longer periods of documented service may be required for proposed work designed for a particularly long service life in moist conditions, or if laboratory test results show that the aggregate may be deleteriously reactive.

X1.1.3 *Mitigation of Alkali-Aggregate Reaction*—If an aggregate has been judged to be potentially deleteriously reactive in concrete either through laboratory or service record evaluation, use of the aggregate should be considered with measures known to prevent excessive expansion due to alkali-aggregate reaction. See the mitigation sections in this appendix under X1.3 Alkali-Silica Reaction and X1.4 Alkali-Carbonate Rock Reaction and References cited for discussion of prevention strategies for new concrete.

## XI.2 Background

X1.2.1 Background information on alkali-aggregate reaction can be found in Ref (1)<sup>9</sup>, Descriptive Nomenclature C 294, and Guide C 295 as discussed as follows. Additional discussion is included in Refs (2) (3). These references address both alkali-silica reaction and alkali-carbonate rock reaction.

X1.2.1.1 *Descriptive Nomenclature C 294 for Constituents of Concrete Aggregates*—This nomenclature provides descriptions of constituents of mineral aggregates and includes dis-

ussion of which have been associated with deleterious expansion due to alkali reaction.

X1.2.1.2 *Guide C 295 (Petrographic Examination of Aggregates)*—This guide outlines the procedures for examining an aggregate sample or a sample from a potential aggregate source to determine whether substances that are potentially deleteriously reactive are present; and, if so, in what amounts.

X1.2.1.3 *Alkali-Silica Reaction*—Certain materials are known to be potentially deleteriously alkali-silica reactive. These include forms of silica such as opal, chalcedony, tridymite, and cristobalite; cryptocrystalline and microcrystalline, strained, or highly fractured quartz; and intermediate to acid (silica-rich) volcanic glass such as is likely to occur in rhyolite, andesite, or dacite. Determination of the presence and quantities of these materials by petrographic examination is helpful in evaluating potential alkali reactivity. An aggregate can be potentially deleteriously reactive when some of these materials, such as opal, are present in very small quantities (for example, 1 %).

X1.2.1.4 *Alkali-Carbonate Rock Reaction*—The reaction of dolomite in certain carbonate rocks with alkalis has been associated with deleterious expansion of concrete containing such rocks as coarse aggregate. The most rapidly reactive carbonate rocks possess a characteristic texture in which relatively large crystals of dolomite are scattered in a finer-grained matrix of calcite and clay. These rocks also have a composition in which the carbonate portion consists of substantial amounts of both dolomite and calcite, and the acid-insoluble residue contains a significant amount of clay. Certain purely dolomitic rocks also may produce slow expansion in concrete.

## XI.3 Alkali-Silica Reaction

X1.3.1 *Test Method C 289 (Chemical Method)*—The results of the test are values for the quantities of dissolved silica ( $S_c$ ) and reduction in alkalinity ( $R_c$ ) for each of the three test portions from the prepared aggregate test sample. Aggregates represented by plotted points ( $S_c$ ,  $R_c$ ), which lie on the deleterious side of the solid curve of Fig. X1.1 of Test Method C 289 usually should be considered potentially reactive. Three regions are delineated in the figure: (1) aggregates considered innocuous; (2) aggregates considered potentially deleterious; and (3) aggregates considered deleterious. Aggregates represented by points lying in the potentially deleterious region above the dashed line in Fig. X1.1 of Test Method C 289 may give relatively low expansions in mortar or concrete even though they are extremely reactive with alkalis. The test can be made quickly and can provide helpful information, except for slowly reactive rocks such as some granitic gneiss and quartzite. Also, as pointed out in the appendix to Test Method C 289, the results may not be correct for aggregates containing

<sup>9</sup> The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this standard.

carbonates or magnesium silicates, such as antigorite (serpentine), or constituents producing late-slow reactivity. See the appendix to Test Method C 289 for a discussion of the interpretation of results and applicable references. If test results indicate deleterious or potentially deleterious character, the aggregates should be tested in accordance with Test Methods C 227 or C 1293 to verify the potential for expansion in concrete.

**X1.3.2 Test Method C 227 (Mortar-Bar Method for Cement-Aggregate Combinations)**—The results of this test method, when a high-alkali cement is used, furnish information on the likelihood of potentially deleterious expansion occurring. The alkali content of the portland cement should be at least 0.8 %, expressed as percent sodium oxide equivalent ( $\%Na_2O + 0.658 \times \%K_2O$ ). Combinations of aggregate and cementitious materials that have produced excessive expansions in this test method should be considered potentially reactive. While the line of demarcation between innocuous and potentially deleterious combinations is not clearly defined, expansion is generally considered to be excessive if it exceeds 0.05 % at 3 months or 0.10 % at 6 months. Expansions greater than 0.05 % at 3 months should not be considered excessive when the 6-month expansion remains below 0.10 %. Data for the 3-month tests should be considered only when 6-month results are not available. The limits may not be conservative for slowly reactive aggregates. Test Method C 227 is not suitable for slowly reactive aggregates, and its use for this purpose is not advised (1, 2). Aggregates suspected of being slowly reactive should be evaluated using Test Method C 1260 or Test Method C 1293. Test Method C 227 is also used with a specific reactive glass aggregate to verify the mitigation effectiveness of blended cements meeting Specification C 595, with the Table 2 optional mortar expansion requirement, and meeting Performance Specification C 1157 with Option R. These procedures are similar to the provisions of Test Method C 441 discussed as follows for mineral admixtures and ground slag.

**X1.3.3 Test Method C 342 (Mortar Bars Subjected to Changes in Moisture and Temperature)**—This withdrawn test method was intended for research concerning the potential expansion of cement-aggregate combinations involving selected aggregates found in parts of Oklahoma, Kansas, Nebraska, and Iowa. Due to the specimen conditioning procedures, the expansion of mortar bars in this test method may not be related to alkali-silica reaction under normal-temperature conditioning. Data on the use of this test method are given in the references cited in a footnote in the test method. It is indicated that cement-aggregate combinations tested by this procedure in which expansion equals or exceeds 0.20 % at an age of 1 year may be considered unsatisfactory for use in concrete exposed to wide variations of temperature and degree of saturation with water. This test method is not recommended for use in regions other than previously cited.

**X1.3.4 Test Method C 1260 (Mortar-Bar Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregate)**—This test method is an accelerated screening technique developed for the detection of materials that develop deleterious expansions slowly over a long period of time. Some aggregates that perform well in the field have been shown to fail this test (4, 5). Results of this test

method should not be used for rejection of aggregates unless it has been established using the sources of supplementary information cited in the test method that the detected expansion is actually due to alkali-silica reaction. There is good agreement in the published literature cited in the test method for the expansion limits: (1) expansions of less than 0.10 % at 16 days after casting are indicative of innocuous behavior in most cases; (2) expansions of more than 0.20 % at 16 days are indicative of potentially deleterious expansion; and (3) expansions between 0.10 and 0.20 % at 16 days include both aggregates that are known to be innocuous and deleterious in field performance. If test results indicate expansion greater than 0.10 % at 16 days, the aggregate should be tested in accordance with Test Method C 1293 unless appropriate field experience demonstrates that it does not cause deleterious expansion in concrete. (See X1.3.7.)

**X1.3.5 Test Method C 1293 (Concrete Prism Method for Alkali-Silica Reactivity)**—The test method evaluates the aggregates for potential alkali-silica reaction expansion using concrete prisms. The test method is accelerated by using an elevated alkali content and Test Method C 227 exposure conditions. The appendix to Test Method C 1293 provides guidance on interpretation of the results. Aggregates with expansions equal to or greater than 0.04 % at one year are considered potentially deleteriously reactive. This test method is considered to be the most reliable procedure among ASTM Test Methods for the evaluation of aggregates for alkali-silica reaction.

**X1.3.6 Test Method C 441 (Mortar-Bar Method for Effectiveness of Mineral Admixtures or Ground Blast-Furnace Slag in Preventing Excessive Expansion of Concrete Due to the Alkali-Silica Reaction)**—In general, the potential for expansion due to alkali-silica reactivity can be controlled by using a sufficient amount of an effective pozzolan or ground granulated blast-furnace slag as a portion of the cementitious material component in concrete, or by using a cement of a low alkali content. In the case of pozzolan, it is necessary to establish its effectiveness using a standard test; and the only ASTM test method that evaluates the effectiveness of pozzolan or slag is Test Method C 441. This test method uses mortar bars as in Test Method C 227. Specification C 618 provides a criterion for its use as applied to fly ash and raw or calcined natural pozzolans when sampled and tested in accordance with Test Methods C 311. Specification C 1240 provides criteria for the use of Test Method C 441 to evaluate silica fume for controlling expansion. Appendix X3 to Specification C 989 describes its use for ground granulated blast-furnace slag.

**X1.3.7 Mitigation of Alkali-Silica Reaction**—Normally if an aggregate is shown to be nonreactive or innocuous by producing little or no expansion in Test Method C 1260 or Test Method C 1293, no mitigation is necessary. Similarly, if the aggregate has a long satisfactory service record with similar cementitious materials having similar or higher alkali levels, no mitigation is necessary. On the other hand, use of aggregates judged to be potentially deleteriously alkali-silica reactive should be considered with the use of measures known to prevent excessive expansion. These include measures such as: low-alkali cement (Specification C 150 with the low-alkali

option); blended cements (Specification C 595 with the Table 2 optional mortar expansion requirement or Performance Specification C 1157 with Option R); pozzolanic materials (meeting the optional physical requirement on effectiveness in controlling alkali-silica reaction in Specification C 618 or reactivity with cement alkalis in Specification C 1240 for silica fume); or ground slag (shown to be effective in preventing excessive expansion of concrete due to alkali-aggregate reaction as discussed in Appendix X3 of Specification C 989). The effectiveness of the cementitious materials or admixtures, or both, chosen to mitigate a potentially reactive aggregate should be demonstrated through tests of the individual materials, or tests of the proposed combination in concrete.

#### X1.4 Alkali-Carbonate Rock Reaction

X1.4.1 *Test Method C 586 (Rock Cylinders Method for Alkali-Carbonate Rock Reaction)*—Rocks that are capable of potentially deleterious carbonate rock reaction are relatively infrequent and seldom constitute a significant proportion of a deposit of rock being considered for use in making aggregate for concrete. Test Method C 586 has been successfully used in research and in preliminary screening of aggregate sources to indicate the presence of material with a potential for deleterious expansions when used in concrete.

X1.4.2 *Test Method C 1105 (Concrete-Prism Method for Alkali-Carbonate Rock Reaction)*—This test method is intended to evaluate specific combinations of materials in con-

crete when the aggregate is regarded as susceptible to deleterious expansion in service due to the alkali-carbonate rock reaction. The appendix to Test Method C 1105 provides general information and references concerning the interpretation of results. A cement-aggregate combination might reasonably be classified as potentially deleteriously reactive if the average expansion of six concrete specimens is equal to or greater than: 0.015 % at 3 months; 0.025 % at 6 months; or 0.030 % at 1 year. Data for later ages are preferred.

X1.4.3 *Mitigation of Alkali-Carbonate Rock Reaction*—Normally, if a carbonate rock does not show the characteristic texture and composition associated with this type of reaction, or if it does not produce expansion in rock cylinders (Test Method C 586) or concrete prisms (Test Method C 1105), no mitigation is necessary for alkali-carbonate rock reaction. Similarly, if the aggregate has a long satisfactory service record with similar materials and conditions, no mitigation is necessary. On the other hand, use of aggregates judged to be potentially deleteriously alkali-carbonate reactive in concrete is not recommended unless it can be shown that mitigation methods will be effective. Pozzolans generally have not been found to control alkali-carbonate rock reaction. Measures suggested for mitigation includes: avoiding reactive carbonate rocks; selective quarrying; diluting reactive rock to less than 20 % of the aggregate in the concrete; use of smaller maximum size; and the use of very low alkali cement.

#### REFERENCES

- (1) *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, Klieger, Paul and Lamond, Joseph F., Eds, *ASTM STP 169C*, 1994, 623 pages. See Chapter 31 on "Petrographic Evaluation of Concrete Aggregates," by Richard C. Mielenz, Chapter 32 on "Alkali-Silica Reactions in Concrete" by David Stark, and Chapter 33 on "Alkali-Carbonate Rock Reaction" by Michael A. Ozol.
- (2) "State-of-the-Art Report on Alkali-Aggregate Reactivity" by ACI Committee 221 on Aggregates, ACI 221.1R-98, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1998, 31 pages.
- (3) *Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Berube, M. A., Fournier, B., and Durand, Eds, *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference*, Quebec City, Canada, June 2000, 1402 pages. (Note—This conference and proceedings includes information on ASR and ACR in concrete by

researchers and experts from all over the world. Copies of the volume can be obtained from the International Centre for Sustainable Development of Cement and Concrete, 405 Rochester Street, Ottawa, Ontario, Canada, K1A 0G1.)

- (4) Hooton, R.D., and Rogers, C.A., "Evaluation of Rapid Test Methods for Detecting Alkali-Reactive Aggregates," *Proceedings of Eighth International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Kyoto, 1989, pp. 439-444.
- (5) Fournier, B., and Berube, M.A., "Application of the NBRI Accelerated Mortar Bar Test to Siliceous Carbonate Aggregates Produced in the St. Lawrence Lowlands, Part 2: Proposed Limits, Rates of Expansion, and Microstructure of Reaction Products," *Cement and Concrete Research*, Vol 21, 1991, pp. 1069-1082.

SUMMARY OF CHANGES

Committee C09 has identified the location of selected changes to this standard since the last issue (C 33 – 02a) that may impact the use of this standard. (Approved June 10, 2003.)

(1) Revised Appendix X1.3.6 to clarify the term pozzolans and to include Specification C 1240 in references to Test Method C 441.

Committee C09 has identified the location of selected changes to this standard since the last issue (C 33 – 02) that may impact the use of this standard. (Approved July 10, 2002.)

(1) Revised paragraph 12.1.9.

(2) Revised Footnote A of Table 3.

*ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.*

*This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9565 (phone), 610-832-9555 (fax), or [service@astm.org](mailto:service@astm.org) (e-mail), or through the ASTM website ([www.astm.org](http://www.astm.org)).*

**Lampiran 5**

**Gambar Modifikasi Feeder FBC**







**Lampiran 6**

**Uji Perbandingan Fluidisasi**





Gambar 1 Alat Tes Fluidized Bed

### 1. Pasir yang Digunakan



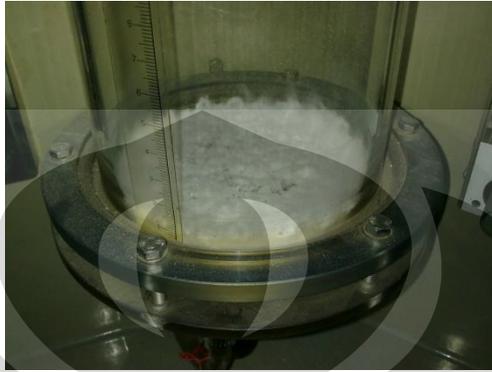
Gambar 2 Pasir yang Lebih Kecil



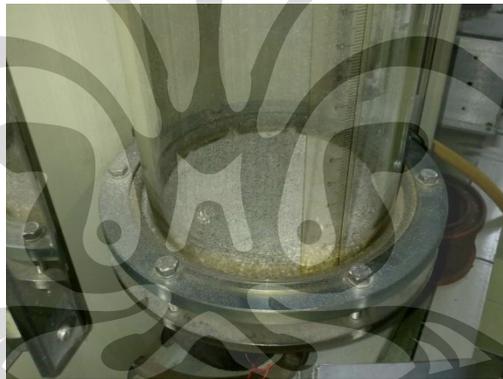
Gambar 3 Pasir yang Lebih Besar

## 2. Fluidisasi yang Dihasilkan

Pengoperasian alat tes Fluidized Bed Dilakukan dengan hembusan udara yang sama dan ketinggian pasir awal yang sama pula.



Gambar 4 Fluidisasi Pasir yang Lebih Kecil



Gambar 5 Fluidisasi Pasir yang Lebih Besar