



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**TINJAUAN TENTANG KINERJA DARI  
PERKEMBANGAN DAN MODIFIKASI FLUIDIZED BED  
COMBUSTOR UNIVERSITAS INDONESIA**

**SKRIPSI**

**A. NURLATIF**

**0706266752**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

**DEPOK**

**JULI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**TINJAUAN TENTANG KINERJA DARI  
PERKEMBANGAN DAN MODIFIKASI FLUIDIZED BED  
COMBUSTOR UNIVERSITAS INDONESIA**

**SKRIPSI**

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

**A. NURLATIF**

**0706266752**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

**DEPOK**

**JULI 2011**

## PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

### TINJAUAN TENTANG KINERJA KINERJA DARI PERKEMBANGAN DAN MODIFIKASI FLUIDIZED BED COMBUSTOR UNIVERSITAS INDONESIA

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi sarjana teknik pada program studi Teknik Mesin, Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia. Sejah yang saya ketahui skripsi ini bukan tiruan atau duplikasi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di perguruan tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 4 Juli 2011



**A. Nurlatif**

NPM : 0706266752

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : A.Nurlatif  
NPM : 0706266752  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : TINJAUAN TENTANG KINERJA DARI  
PERKEMBANGAN DAN MODIFIKASI  
FLUIDIZED BED COMBUSTOR UNIVERSITAS  
INDONESIA

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M.Eng

Penguji : Prof. Dr. I Made K Dhiputra Dipl.-Ing

Penguji : Prof.Ir. Yulianto Sulistyono, M.Sc., Ph.D

Penguji : Dr. Ir. H. R. Danardono.A.S, DEA .PE

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 4 Juli 2011

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada ALLAH SWT, karena atas berkat rahmat dan karunia-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan, bimbingan serta motivasi dari berbagai pihak maka sangatlah sulit bagi saya untuk dapat menyelesaikan skripsi ini. Oleh Karena itu, saya ingin mengucapkan terima kasih kepada :

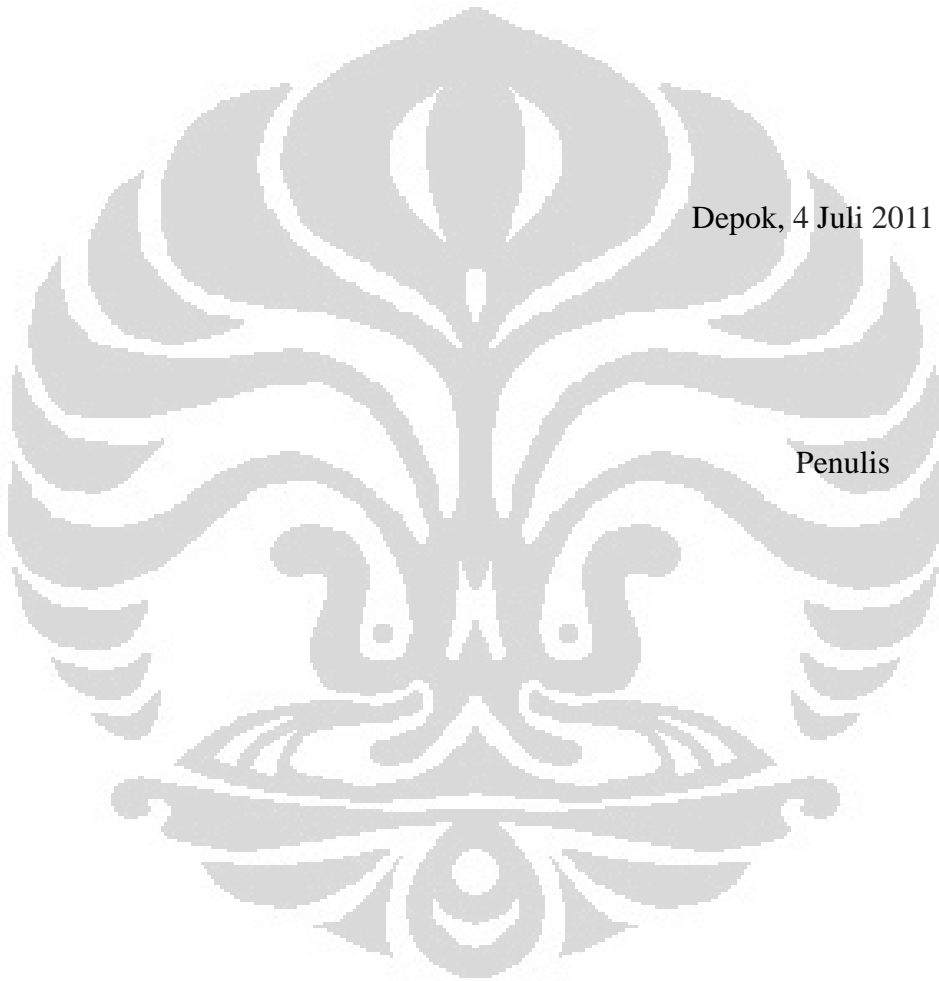
1. Ayah dan Ibu tercinta, H. Mursid dan H.Romlah yang telah memberikan pengertian, perhatian serta kasih sayangnya yang begitu besar kepada saya. Saya sangat beruntung karena hal yang paling indah di dunia ini adalah memiliki kedua orang tua seperti ayah dan ibu saya.
2. Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M.Eng, selaku dosen pembimbing yang telah bersedia untuk meluangkan waktu, tenaga, pikiran dan segala perhatiannya kepada saya sehingga saya selalu termotivasi dan mendapatkan semangat baru untuk dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Saya pribadi ingin meminta maaf jika selama ini saya ada kesalahan selama masa bimbingan ini. Bapak adalah sosok yang menjadi panutan bagi saya.
3. Seluruh dosen, staf pengajar dan karyawan Departemen Teknik Mesin FTUI yang secara langsung atau tidak langsung memberikan pelajaran, wawasan dan informasi.
4. Untuk Zahra Amalia yang selalu mendukung dan memberi semangat kepada saya sehingga skripsi ini berjalan dengan baik dan lancar.
5. Seluruh teman seperjuangan skripsi saya (Adhika A. Tama, Alwin Nurman, Satriawan Wiguna) yang telah bercanda tawa, suka duka, senang dan sedih bersama selama pengerjaan skripsi. Terima kasih untuk kalian semua yang sudah banyak membantu dalam pengerjaan skripsi ini.
6. Seluruh teman-teman Mesin Angkatan 2007 yang banyak sekali mendukung saya baik secara langsung maupun tidak langsung. Sabdo waluyo, Gilang, Iman, Fariz, Hamdalah, Kossa, Rian, Bimo, Tasya, Ruth, Dika. Terima kasih untuk semuanya.

7. Seluruh pihak yang tidak dapat saya ucapkan satu persatu. Saya ucapkan terima kasih banyak atas segala hal yang begitu berarti dalam setiap perjalanan hidup saya.

Akhir kata, saya berharap ALLAH SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini bisa membawa manfaat bagi kita semua pada khususnya dan pengembangan ilmu pengetahuan pada umumnya.

Depok, 4 Juli 2011

Penulis



## HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

### TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : A.Nurlatif  
NPM : 0706266752  
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 :

#### TINJAUAN TENTANG KINERJA DARI PERKEMBANGAN DAN MODIFIKASI FLUIDIZED BED COMBUSTOR UNIVERSITAS INDONESIA

berserta 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 : 4 Juli 2011

Yang menyatakan,



(A. Nurlatif)

vi

Universitas Indonesia

## ABSTRAK

Nama : A.Nurlatif

Npm : 0706266752

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : Tinjauan Tentang Kinerja dari Perkembangan dan Modifikasi  
*Fluidized Bed Combustor* Universitas Indonesia

Indonesia memiliki potensi energi biomassa yang besar. Akan tetapi, potensi tersebut belum dimanfaatkan secara optimal. Dari 49,81 GW hanya 0,3 GW saja yang sudah dimanfaatkan atau sekitar 0,6% dari seluruh potensi yang ada. Fluidized bed combustor merupakan salah satu alat pengkonversi energi biomassa menjadi energi panas. Teknologi ini dapat membakar 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. Fluidized bed combustor (FBC) di Universitas Indonesia merupakan unit pemanfaatan limbah yang masih dalam pengembangan. Tinjauan ulang setiap perubahan yang terjadi dari perkembangan dan modifikasi pada alat FBC UI menjadi aspek yang harus diperhatikan sehingga dapat mengetahui masalah yang terjadi pada beberapa sistem dan mengetahui kekurangan dari beberapa perkembangan dan modifikasi hingga sekarang. Pada pengujian terakhir dengan perkembangan modifikasi yang ada sekarang pada FBC UI, membutuhkan waktu 93 menit untuk pemanasan awal dengan suhu 466<sup>0</sup>C dan untuk mencapai kondisi kerja dan terjadi fluidisasi dibutuhkan 8,5 kg cangkang kelapa dalam waktu 149 menit dan pada suhu 590<sup>0</sup>C.

Kata kunci : Energi Biomassa , *Fluidized Bed Combustor*, Modifikasi, Cangkang Kelapa



## ABSTRACT

Name : A. Nurlatif

NPM : 0706266752

Study Program : Mechanical Engineering

Title : Performance Review of Fluidized Bed Combustor  
Development and Modification in University Of Indonesia

Indonesia have great potential of biomass energy. However, this potential has not been optimally used. From 49,81 GW only 0.3 GW are already used or about 0.6% of all the potential that exists. Fluidized bed combustor is one of the energy converter tools that converts biomass into heat energy. This technology can combust waste or solid particles in relatively large quantities in quick time. The resulting combustion emissions are also relatively small so the use of this technology will decrease the air pollution that may arise due to imperfect combustion. Fluidized bed combustor (FBC) in University of Indonesia is waste utilization unit still development. Review at each happened changing of FBC UI development and modification must be attention, with result that can know happened problems for many system and know lacking of many development and modification until now. The present experiment of FBC UI Development and modification is know to need 93 minute for preheating process at temperature  $466^{\circ}\text{C}$  and attain to working condition and good fluidization is needed 8,5 kg coconut shell with 149 minute at temperature  $590^{\circ}\text{C}$ .

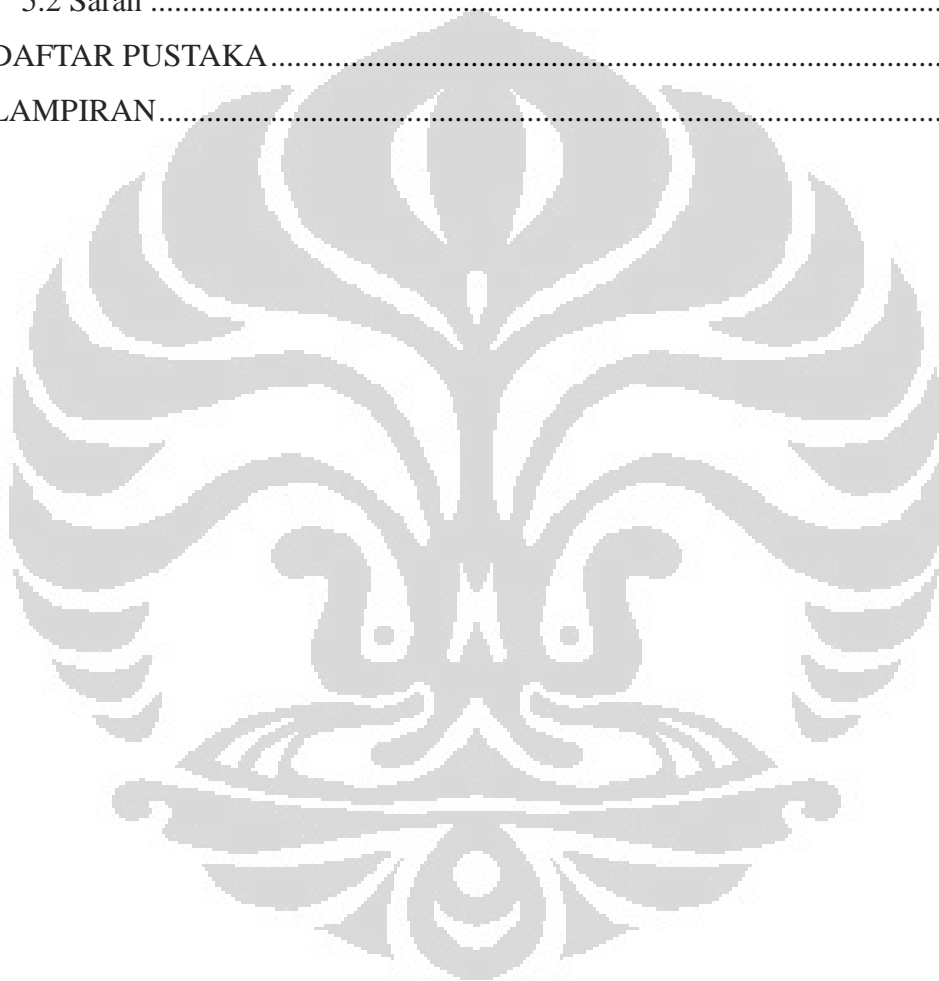
Key word : Biomass Energy, Fluidized Bed Combustor, Modification, Coconut Shell.

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL .....	xii
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
<b>BAB 1 .....</b>	<b>1</b>
1.1 Judul Penelitian.....	1
1.2 Latar Belakang .....	1
1.3 Perumusan Masalah .....	5
1.4 Tujuan Penelitian .....	6
1.5 Batasan Masalah .....	6
1.6 Metodologi Penulisan .....	7
1.7 Sistematika Penulisan .....	7
<b>BAB 2 DASAR TEORI.....</b>	<b>9</b>
2.1 Energi Biomassa.....	9
2.1.1 Jenis-Jenis Biomassa.....	9
2.1.2 Teknologi Pengkonversian Energi Biomassa.....	10
2.1.3 Kelebihan dan Kekurangan.....	15
2.2 Karakteristik Biomassa .....	16
2.3 Sistem Reaksi Pembakaran .....	19
2.3.1 Hal-Hal Yang Harus Diperhatikan Dalam Proses Pembakaran .....	21
2.3.2 Komponen-Komponen Utama Reaksi Pembakaran .....	22
2.4 Fluidized Bed Combustor .....	24
2.4.1 Jenis-Jenis Fluidized Bed Combustor .....	28
2.4.2 Pinsip Kerja Fluidized Bed Combustor .....	29

2.4.3 Bagian-Bagian Fluidized Bed Combustor .....	30
2.5 Fenomena Fluidisasi.....	41
2.5.1 Proses Fluidisasi.....	41
2.5.2 Kondisi Fluidisasi .....	41
2.5.3 Jenis-Jenis Fluidisasi.....	43
2.5.4 Parameter-Parameter Fluidisasi .....	45
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>55</b>
3.1 Diagram Aliran Penelitian.....	55
3.2 <i>Review</i> Sejarah Perkembangan dan Modifikasi FBC UI .....	56
3.2.1 Sistem <i>Feeding</i> .....	56
3.2.2 Sistem Suplai Udara.....	67
3.2.3 Sistem Pemanasan.....	69
3.3 Persiapan dan Prosedur Pengujian .....	74
3.3.1 Persiapan Pengujian .....	74
3.3.1.1 Bahan Bakar Biomassa .....	74
3.3.1.2 Pasir.....	77
3.3.1.3 Perlengkapan dan Peralatan .....	80
3.4 Standar Operasi Alat Pengujian .....	83
3.4.1 Sistem Feeder.....	83
3.4.2 Blower.....	85
3.4.3 Sistem Burner.....	87
3.5 Prosedur Pengujian Pembakaran.....	90
3.5.1 Rangkaian Alat Pengujian.....	90
3.5.2 Prosedur Pengambilan Data Pembakaran .....	92
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>93</b>
4.1 <i>Review</i> Kinerja Dari Perkembangan dan Modifikasi FBC UI .....	93
4.1.1 Sistem <i>Feeding</i> .....	93
4.1.2 Sistem Suplai Udara.....	98
4.1.3 Sistem Pemanasan.....	100
4.2 Pengujian Bahan Bakar Biomassa FBC UI .....	107

4.2.1 Pemanasan Awal Sebelum Bahan Bakar Dimasukkan .....	108
4.2.2 Pemanasan Awal dan Self Combustion.....	111
4.2.3 Pembakaran Menuju Kondisi Kerja.....	114
4.2.4 Pembakaran Saat Kondisi Kerja .....	118
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....	122
5.1 Kesimpulan .....	122
5.2 Saran .....	123
DAFTAR PUSTAKA.....	125
LAMPIRAN.....	127



## DAFTAR TABEL

tabel 1. 1 Komposisi Energi Primer Indonesia.....	1
tabel 1. 2 Potensi Energi Terbarukan yang Ada di Indonesia.....	3
tabel 2. 1 <i>Ultimate Anaysis</i> Beberapa Jenis Biomassa.....	18
tabel 2. 2 <i>Proximate Analysis</i> Beberapa Jenis Biomassa .....	19
tabel 2. 3 Nilai LHV Beberapa Jenis Biomassa .....	19
tabel 2. 4 Jenis-Jenis Bahan Bakar .....	22
tabel 2. 5 Increasing Size and Density .....	53
tabel 3. 1 Spesifikasi Teknis Ring Blower .....	69
tabel 3. 2 Spesifikasi <i>Hi-Temp Premixed Burner</i> .....	71
tabel 3. 3 Potensi biomassa di Indonesia.....	76
tabel 3. 4 <i>Specific Heat</i> berbagai substansi .....	77
tabel 3. 5 Sifat fisik, termal, dan mekanik pasir silika .....	78
tabel 3. 6 Distribusi ukuran pengayakan pasir silika.....	79
tabel 3. 7 Spesifikasi motor feeder .....	84
tabel 3. 8 Spesifikasi teknis ring blower .....	86
tabel 3. 9 Spesifikasi teknis <i>Hi-Temp Premixed Burner</i> .....	90
tabel 4. 1 Spesifikasi Teknis Ring Blower .....	99
tabel 4. 2 Temperatur rata-rata pemanasan 30 menit pertama .....	111
tabel 4. 3 Temperatur rata-rata saat pemanasan awal.....	112
tabel 4. 4 Temperatur maksimal pada setiap termokopel .....	112
tabel 4. 5 Temperatur rata-rata <i>self combustion</i> .....	113
tabel 4. 6 Temperatur maksimal pada setiap termokopel .....	114
tabel 4. 7 Temperatur rata-rata menuju kondisi kerja.....	115
tabel 4. 8 Temperatur rata-rata Saat kondisi kerja.....	119

## DAFTAR GAMBAR

gambar 2. 1 Chart Teknologi Konversi Biomassa.....	10
gambar 2. 2 <i>Direct Combustion</i> .....	11
gambar 2. 3 Proses Gasifikasi .....	12
gambar 2. 4 <i>Anaerobic Digester</i> .....	14
gambar 2. 5 Rangkaian Instalasi Biogas .....	14
gambar 2. 6 Analisis Proximat untuk Beberapa Jenis Bahan Bakar Padat. ....	17
gambar 2. 7 Definisi Analisis Ultimat dan Proximat. ....	18
gambar 2. 8 Skematis <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	26
gambar 2.9 Diagram Proses Pencampuran ( <i>mixing</i> ) dalam <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	27
gambar 2. 10 Tahapan Proses Kerja <i>Fluidized Bed Combustor</i> ; (a) Tahapan pada Kondisi Awal.....	30
gambar 2. 11 Ruang Bakar Utama <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI.....	31
gambar 2. 12 Perilaku Gelembung Setiap Jenis Distributor; (a) <i>Porous Plate</i> ; (b) <i>Perforated Plate</i> ;	32
gambar 2. 13 Distributor yang digunakan pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI.....	33
gambar 2. 14 Jenis-Jenis <i>Solid Flow Control</i> ; (a) <i>Slide Valve</i> (b) <i>Rotary Valve</i> ;..	34
gambar 2. 15 <i>Screw Feeder</i> .....	35
gambar 2. 16 Burner yang Digunakan pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI .....	36
gambar 2. 17 <i>Cyclone Separator Fluidized Bed Combustor</i> UI .....	38
gambar 2. 18 Blower Sentrifugal yang Digunakan pada FBC.....	39
gambar 2. 19 <i>Control Panel</i> .....	40
gambar 2. 20 <i>Data Logger</i> .....	40
gambar 2. 21 Skematik Fluidisasi .....	41
gambar 2. 22 Hubungan Tinggi Hampan Terhadap Kecepatan Superfisial .....	42
gambar 2. 23 Hubungan Penurunan Tekanan Terhadap Kecepatan Superfisial....	43
gambar 2. 24 Diagram Klasifikasi Jenis-Jenis Pasir .....	50
gambar 2. 25 Daerah batas fluidisasi [sumber: Grace. 1986] .....	53

gambar 3. 1 Alat Fluidized Bed Combustion UI.....	56
gambar 3. 2 <i>Feeding Port</i> .....	57
gambar 3. 3 Skematis <i>Rotary hopper</i> .....	58
gambar 3. 4 Skematis <i>Screw Conveyor Feeder</i> .....	59
gambar 3. 5 Letak Lubang Burner .....	60
gambar 3. 6 Screw conveyor.....	61
gambar 3. 7 <i>Feeding Chute</i> .....	61
gambar 3. 8 <i>Sliding Gate</i> .....	62
gambar 3. 9 Screw conveyor.....	63
gambar 3.10 <i>Screw Feeding</i> .....	63
gambar 3. 11 Peralatan yang digunakan untuk permodelan feeder.....	64
gambar 3. 12 Posisi Permodelan .....	65
gambar 3. 13 Kedudukan ranting saat di dalam pipamodel feeder.....	65
gambar 3. 14 Kedudukan ranting saat jatuh dengan kemiringan $45^0$ dan $60^0$ .....	66
gambar 3. 15 Feeder hasil modifikasi .....	66
gambar 3.16 Skema aliran udara dari Blower.....	68
gambar 3.17 Blower I.....	68
gambar 3.18 Blower II .....	68
gambar 3.19 Ring Blower pada FBC UI.....	69
gambar 3.20 Skematis Burner.....	70
gambar 3.21 <i>Stick Burner</i> .....	71
gambar 3.22 Spesifikasi <i>Hi-Temp Premixed Burner</i> .....	71
gambar 3.23 <i>Distibusi Lama</i> .....	72
gambar 3.24 Desain distributor baru.....	73
gambar 3.25 <i>Distibusi baru hasil pabrikan</i> .....	74
gambar 3.26 Tempurung kelapa .....	75
gambar 3.27 Tempurung Kelapa partikel kecil .....	76
gambar 3.28 Pasir Silika yang Digunakan pada FBC UI.....	79
gambar 3.29 Generator set yang digunakan.....	80
gambar 3.30 Konfigurasi Termokopel .....	81
gambar 3.31 <i>Temperature data logger</i> .....	82
gambar 3.32 Timbangan dengan skala maksimum 5 kg .....	82

gambar 3.33 <i>Control panel</i> yang digunakan untuk feeder dan blower .....	83
gambar 3.34 Sistem feeder pada <i>fluidized bed combustor</i> UI.....	84
gambar 3.35 Ring blower pada <i>fluidized bed combustor</i> UI.....	86
gambar 3.36 Bagian-bagian <i>hi-tem premixed burner</i> .....	89
gambar 3.37 Rangkaian seluruh alat untuk melakukan pengujian pembakar .....	91
gambar 4. 1 <i>Gravity Chute</i> .....	93
gambar 4. 2 Sampah yang terbakar sebelum masuk ke ruang bakar .....	94
gambar 4. 3 Screw conveyor jenis auger .....	95
gambar 4. 4 <i>Screw Feeding</i> yang sudah terpasang.....	95
gambar 4. 5 Sekat pada jalur aliran <i>feeder</i> .....	95
gambar 4. 6 <i>Feeder</i> hasil modifikasi.....	97
gambar 4. 7 Blower I.....	98
gambar 4. 8 Blower II .....	98
gambar 4. 9 <i>Ring Blower</i> pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI.....	99
gambar 4.10 <i>Stick Burner</i> .....	100
gambar 4. 11 <i>Hi-Temp Premixed Burner</i> .....	101
gambar 4. 12 Posisi flame pada saat burner nyala .....	102
gambar 4. 13 Distributor I.....	103
gambar 4. 14 Distributor II .....	104
gambar 4. 15 Posisi termokopel T2 dengan distributor lama.....	104
gambar 4.16 Desain distributor baru yang digunakan sekarang di FBC UI .....	105
gambar 4.17 Distributor baru hasil pabrikasi .....	106
gambar 4.18 Posisi termokopel T2 dengan distributor baru .....	106
gambar 4.19 Kurva pembakaran cangkang kelapa dengan suplai udara 0,095 m <sup>3</sup> /s .....	107
gambar 4.20 Perbandingan T2 pengujian terakhir dengan pengujian sebelumnya .....	108
gambar 4.21 Posisi termokopel T2 dengan distributor lama.....	109
gambar 4.22 Posisi termokopel T2 dengan distributor baru .....	109
gambar 4.23 Posisi flame pada saat burner nyala (kondisi sekarang).....	110
gambar 4.24 Grafik distribusi temperatur pemanasan awal cangkang kelapa.....	112



gambar 4.25 Kondisi Flme pada Temperatur maksimal di T2.....	112
gambar 4.26 Grafik distribusi temperatur self combustion cangkang kelapa.....	113
gambar 4.27 Grafik distribusi temperatur menuju kondisi kerja pada bulan desember 2010 .....	114
gambar 4.28 Grafik distribusi temperatur menuju kondisi kerja dengan suplai udara 0,095m <sup>3</sup> /s pada bulan mei 2011 .....	115
gambar 4.29 kondisi kerja pada pada percobaan sebelumnya .....	116
gambar 4.30 Kondisi kerja untuk mencapai fluidisasi pada 0,095m <sup>3</sup> /s.....	116
gambar 4.31 Posisi termokopel T2 dengan distributor baru .....	117
gambar 4.32 Grafik distribusi temperatur saat kondisi kerja pada pengujian terakhir .....	118
gambar 4.33 Grafik distribusi temperatur saat kondisi kerja dengan pengujian sebelumnya.....	119
gambar 4.34 Bahan bakar yang tertahan di lubang <i>feder</i> .....	120
gambar 4.35 Ilustrasi kondidi <i>fuel</i> tersangkut.....	120

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Judul Penelitian

Tinjauan Tentang Kinerja dari Perkembangan dan Modifikasi *Fluidized Bed Combustor (FBC)* Universitas Indonesia.

### 1.2 Latar Belakang

Setiap manusia sangat membutuhkan adanya energi dalam kehidupan sehari-hari. Untuk memenuhi kebutuhannya akan energi manusia masih sangat tergantung dari sumber energi yang tidak dapat diperbaharui yang berupa sumber energi fosil. Kebutuhan akan sumber energi ini semakin meningkat setiap tahunnya yang disebabkan oleh semakin meningkatnya jumlah populasi manusia dan juga semakin berkembangnya teknologi manusia. Akan tetapi, meningkatnya kebutuhan manusia akan energi ini tidak diimbangi dengan meningkatnya jumlah sumber energi fosil yang tersedia karena sumber energi ini tidak dapat diperbaharui dan jumlahnya akan semakin menipis apabila dipergunakan secara terus-menerus.

Berdasarkan dari laporan *International Energy Annual 2006* yang dikeluarkan oleh *Energy Information Administration – Amerika Serikat*, komposisi energi primer Indonesia adalah :

Tabel 1.1 Komposisi energi primer Indonesia

Sumber: *Energy Information Administration (EIA) - US, International Energy Annual 2006*

Sumber Energi (x 10 <sup>15</sup> BTU)	Tahun 1998		Tahun 2006	
	Volume	Porsi	Volume	Porsi
a. Minyak bumi	1.89	53.20%	2.49	60%
b. Gas Bumi	1.07	30.10%	0.87	21.10%
c. Batubara	0.41	11.50%	0.56	13.50%
d. Nuklir	-	-	-	-
e. Tenaga Air ( <i>Hydro Power</i> )	0.11	3.00%	0.09	2.30%
f. Panas Bumi ( <i>Geothermal</i> )	0.08	2.20%	0.13	3.20%
Energi Tak Terbarukan (a + b + c)	3.37	<b>94.80%</b>	3.92	<b>94.50%</b>
Energi Terbarukan (e + f)	0.18	<b>5.20%</b>	0.23	<b>5.50%</b>

Dari data tersebut terlihat *bahwa* konsumsi energi primer Indonesia masih mengandalkan semua jenis energi fosil yaitu 94.80% pada tahun 1998 dan 94.50% pada tahun 2006. Masih besarnya konsumsi energi tidak terbarukan di Indonesia juga dapat dilihat dari ketergantungan pada minyak bumi pada tahun 2006 sebesar 60.0%, 21.1% gas bumi, dan batubara sebesar 13.5%. 5.5% dari energi terbarukan berasal dari 2.3% pembangkit listrik tenaga air (PLTA) dan 3.2% dari pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTB). Secara jelas, dapat disimpulkan bahwa ketergantungan energi primer Indonesia pada energi tidak terbarukan sangatlah besar. Setelah delapan tahun berjalannya reformasi (1998-2006), belum begitu banyak perubahan yang dicapai. Harus disadari bahwa energi fosil cepat atau lambat pasti akan segera habis dan sangat berbahaya jika Indonesia masih belum bisa melepaskan ketergantungan pada energi tak terbarukan. Ketahanan energi yang merupakan suatu jaminan keamanan pasokan energi untuk mendukung pembangunan yang berkelanjutan semestinya sudah menjadi masalah yang serius.

Perlu juga dicatat, berdasarkan data yang dikeluarkan oleh *British Petroleum, 2009 [1]*, diketahui bahwa sampai akhir tahun 2008 cadangan energi fosil Indonesia akan habis dalam jangka waktu 10.2 tahun untuk minyak bumi, 45.7 tahun untuk gas bumi, dan 19 tahun untuk batubara. Tentunya ini dengan asumsi tidak ada penemuan cadangan baru dengan tingkat produksi tetap. Dari data tersebut disimpulkan bahwa cepat atau lambat energi fosil akan habis sedangkan permintaan semakin bertambah. Kondisi seperti ini akan menyebabkan negara mengalami krisis energi.

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. Peraturan tersebut juga menjelaskan sasaran komposisi energi primer Indonesia pada tahun 2025. Sasaran itu meliputi; 17%, terdiri dari 5% biofuel, 5% tenaga panas bumi, 2% biomassa, nuklir, hidro, dan angin, dan juga batubara cair. Oleh sebab itu, Pemerintah akan

mengambil tindakan untuk menambah kapasitas pembangkit listrik Mikro Hidro menjadi 2.846 MW pada tahun 2025, kapasitas terpasang biomassa 180 MW pada tahun 2020, tenaga angin 0,97 GW pada tahun 2025, tenaga surya 0,87 GW pada tahun 2024, dan tenaga nuklir 4,2 GW pada tahun 2024. Total investasi yang dibutuhkan untuk pengembangan sumber energi baru dan terbarukan sampai dengan tahun 2025 diproyeksikan mencapai US \$ 13.197 juta[2].

Krisis energi yang dirasakan pada saat sekarang ini merupakan masalah yang fundamental di Indonesia. Oleh karena itu, pengurangan pemakaian, ketergantungan pada bahan bakar fosil, dan pemanfaatan potensi energi yang terbarukan secara optimal menjadi solusi mengatasi masalah ini. Indonesia sebenarnya memiliki beberapa sumber energi terbarukan yang berpotensi besar, antara lain energi hidro dan mikrohidro, energi geotermal, energi biomassa, energi surya dan energi angin. Kelebihan energi terbarukan dibandingkan dengan energi fosil, selain memang sifatnya yang dapat diperbaharui secara terus menerus, juga lebih ramah terhadap lingkungan. Emisi yang dikeluarkan lebih rendah, terutama gas karbondioksida sehingga mampu mengurangi efek rumah kaca yang menyebabkan pemanasan global. Menurut data dari Departemen ESDM, Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang cukup besar yaitu :

Tabel 1.2 Potensi energi terbarukan yang ada di Indonesia

Sumber: Departemen ESDM (2008)

Energi Non Fosil	Sumber Daya	Setara	Kapasitas Terpasang
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

Dari data tersebut bersumber dari departemen ESDM , dapat dilihat bahwa potensi energi biomassa di Indonesia memiliki potensi kedua terbesar setelah tenaga air yaitu sebesar 49,81 GW. Akan tetapi, potensi tersebut belum

dimanfaatkan secara optimal hanya 0,3 GW saja yang sudah dimanfaatkan atau sekitar 0.6% dari seluruh potensi yang ada. Oleh karena itu, pengembangan bioenergi merupakan salah satu agenda utama pengembangan energi baru dan energi terbarukan di Indonesia, melalui pemanfaatan teknologi bioenergi, Indonesia tidak hanya dapat meningkatkan ketahanan energinya, tetapi juga mempunyai kesempatan yang besar di dalam memberikan kontribusi terhadap penyediaan energi bersih kepada masyarakat dunia.

Energi biomassa menjadi penting bila dibandingkan dengan energi terbarukan karena proses konversi menjadi energi listrik memiliki investasi yang lebih murah bila di bandingkan dengan jenis sumber energi terbarukan lainnya. Hal inilah yang menjadi kelebihan biomassa dibandingkan dengan energi lainnya. Bila kita maksimalkan potensi yang ada dengan menambah jumlah kapasitas terpasang, maka akan membantu bahan bakar fosil yang selama ini menjadi tumpuan dari penggunaan energi. Hal ini akan membantu perekonomian yang selama ini menjadi boros akibat dari anggaran subsidi bahan bakar minyak yang jumlahnya melebihi anggaran sektor lainnya.

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, ranting dan lain-lain. 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 seperti ranting pohon dan tempurung kelapa merupakan potensi energi biomassa yang cukup besar. Biomassa ini juga tersedia secara gratis. Limbah tersebut apabila didiamkan 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.

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

### **1.3 Perumusan masalah**

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

*Fluidized bed combustor* di Universitas Indonesia merupakan unit pemanfaatan limbah yang masih dalam pengembangan. Masih banyak kekurangan

yang perlu diperbaiki seperti pada sistem feeder, efek pemanasan, distributor, dan lain-lain. Oleh karena itu diperlukan satu suatu analisis untuk membandingkan performa perkembangan dari perubahan modifikasi yang terjadi sampai sekarang pada FBC UI.

#### 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. Membandingkan performa dari perkembangan modifikasi desain yang terjadi sampai sekarang pada *fluidized bed combustor* UI.
2. Mengidentifikasi masalah yang terjadi pada modifikasi *fluidized bed combustor* UI.
3. Mengetahui kinerja *fluidized bed combustor* yang ada sekarang.
4. Mengetahui fenomena mengenai kemajuan yang terjadi dari perkembangan dan modifikasi FBC UI dengan melakukan pengujian terkahir dan membandingkan penelitian sebelumnya.

#### 1.5 Batasan Masalah

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

1. Mengetahui keoptimalan FBC UI yang ada sekarang dengan membandingkan modifikasi yang telah ada sebelumnya.
2. Mengetahui dan membandingkan modifikasi FBC UI yang telah ada seperti sistem pemanasan, *feeder* dan lain-lain.
3. Data-data yang diperoleh berdasarkan pengujian yang pernah dilakukan sebelumnya.

#### 1.6 Metodologi Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penyusunan skripsi ini adalah :

1. Studi Pustaka

Melakukan peneluran literatur dan diskusi berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya mengenai *fluidized bed combustor* yang sudah ada di UI, dan jurnal-jurnal penelitian mengenai sistem tersebut.

## 2. Tinjauan Ulang

Mengetahui sejarah perkembangan dan modifikasi pada alat *fluidized bed combustor* UI.

## 3. Studi Lapangan

Melakukan pengamatan dan pengujian pada alat *fluidized bed combustor* pada kondisi sekarang untuk melihat kemajuan dari perkembangan dan modifikasi alat *fluidized bed combustor*.

## 4. Analisis

Dari sumber, referensi, dan data yang telah ada, selanjutnya dilakukan ulasan dan analisis terhadap sumber dan data-data tersebut.

### 1.7 Sistematika Penulisan

Penulisan skripsi ini akan dibagi menjadi enam bab, yaitu :

#### Bab I Pendahuluan

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

#### Bab II Landasan Teori

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

#### Bab III Metodologi Penelitian

Bab ini berisi tentang diagram alir penelitian, sejarah perkembangan dan modifikasi *Fluidized Bed Combustor* UI dari sebelumnya hingga sekarang dan juga berisi pembahasan tentang persiapan yang dilakukan sebelum dilakukan pengujian.

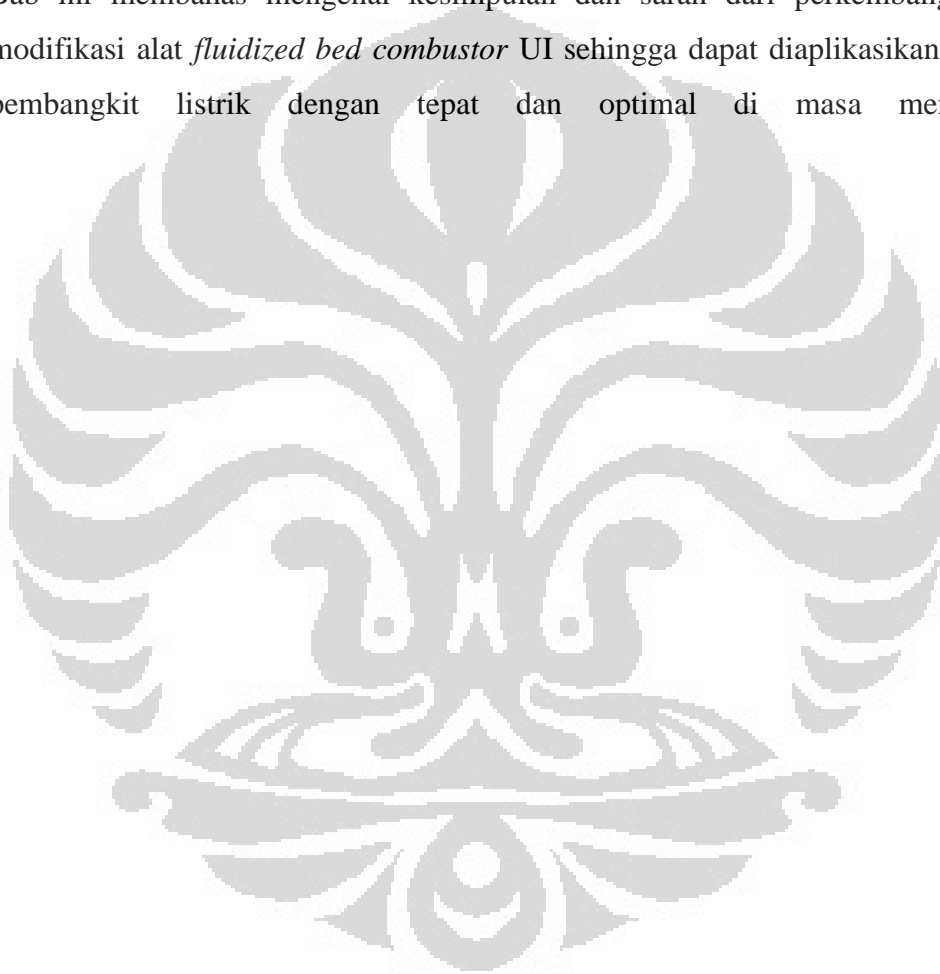
#### Bab V Hasil & Pembahasan



Bab ini membahas masalah-masalah yang terjadi pada FBC UI dan mengetahui kinerja FBC UI dan juga membahas hasil-hasil yang didapat ketika melakukan pengujian dan analisa-analisa yang dapat diambil dari hasil-hasil tersebut pada pengujian terkini di FBC UI sehingga bisa melihat perkembangan terakhir di FBC UI

#### Bab VI Kesimpulan & Saran

Bab ini membahas mengenai kesimpulan dan saran dari perkembangan dan modifikasi alat *fluidized bed combustor* UI sehingga dapat diaplikasikan sebagai pembangkit listrik dengan tepat dan optimal di masa mendatang.



## **BAB 2**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Energi Biomassa**

Energi Biomassa adalah 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.

Energi 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

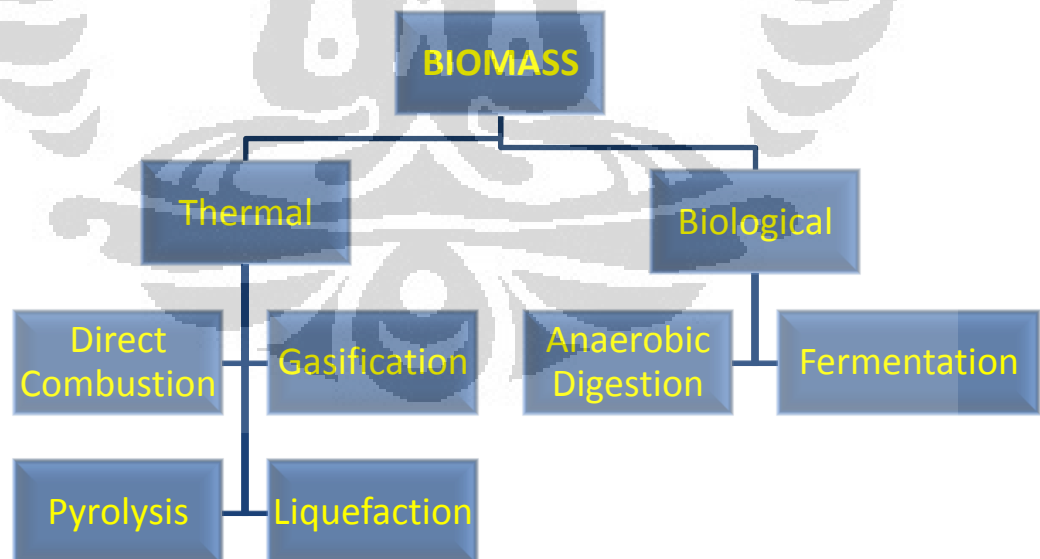
Biogas berasal dari material organik yang telah melewati proses fermentasi atau anaerob digesting oleh bakteri pada koindisi udara kekurangan oksigen yang kemudian menghasilkan gas yang dapat terbakar (combustible gas).

### 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*

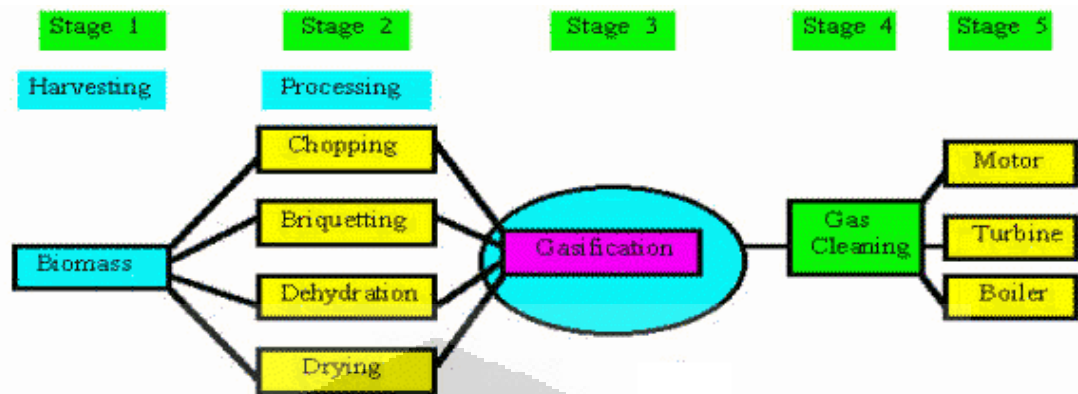
Pada proses ini material organik (biomassa) dilakukan pembakaran secara langsung. Agar efisiensi pembakaran baik, dilakukan pengeringan (drying) untuk menghilangkan kadar air pada material organik. Salah satu aplikasi dari direct combustor adalah kompor masak yang menggunakan kayu bakar.



Gambar 2.2 *Direct Combustor*

#### 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  $\frac{1}{3}$  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 2.3 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

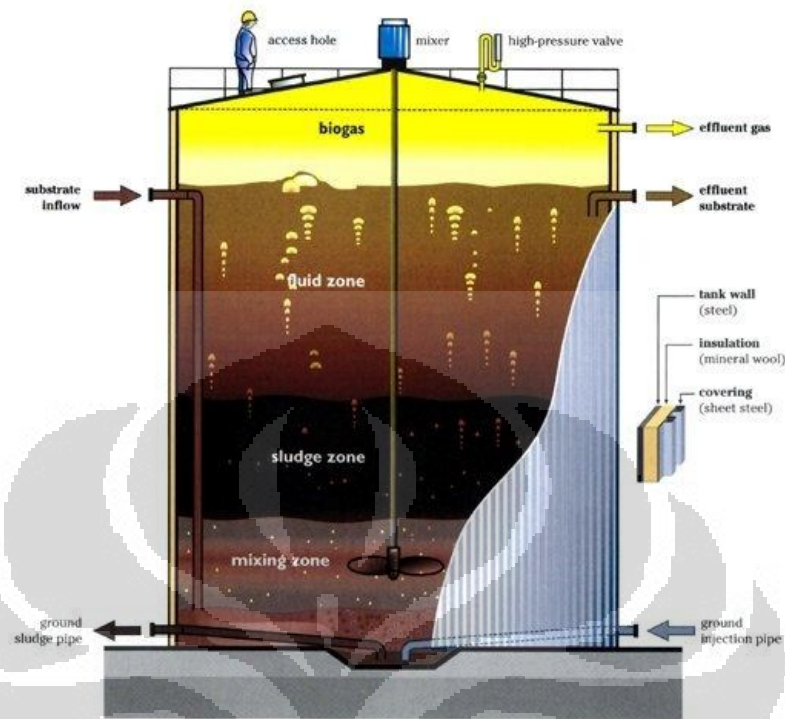
#### 2.1.2.2 Proses Biologis

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*

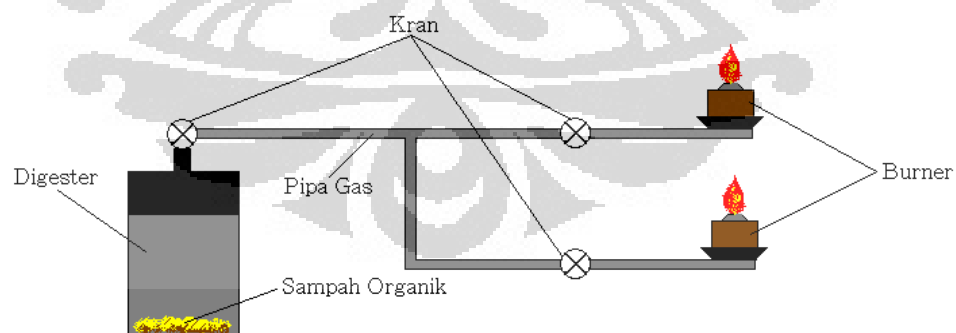
Proses ini adalah proses yang mengikutsertakan mikroorganisme untuk menguraikan material dengan kondisi tanpa oksigen. Proses ini dapat digunakan pada sampah organik dan juga kotoran hewan. Anaerobic digestion merupakan proses yang kompleks. Pertama-tama, mikro organisme mengubah material organik kedalam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



Gambar 2.4 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 2.5 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. *Hydrolysis*

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

### 3. *Fermentasi*

Zat yang telah dirombak pada proses hydrolysis, 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

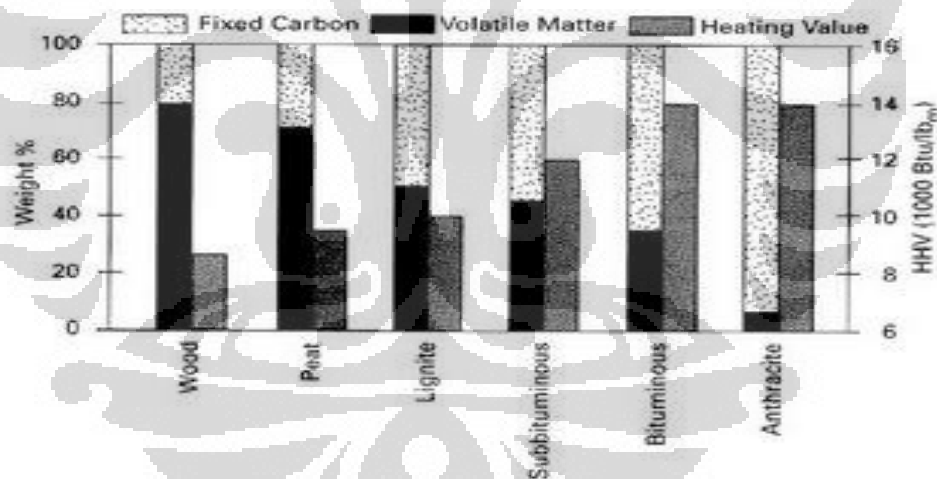
## 2.2 Karakteristik Biomassa

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 charing (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  $150^{\circ}\text{C}$ . Pada temperatur ini, air berada dalam kondisi fasa uap. Jika jumlah kalor laten uap air diperhitungkan atau setelah terbakar, temperatur gas pembakaran dibuat  $25^{\circ}\text{C}$ , maka akan diperoleh nilai kalor atas (HHV, *higher heating value*). Pada temperatur ini, air akan berada dalam kondisi fasa cair.

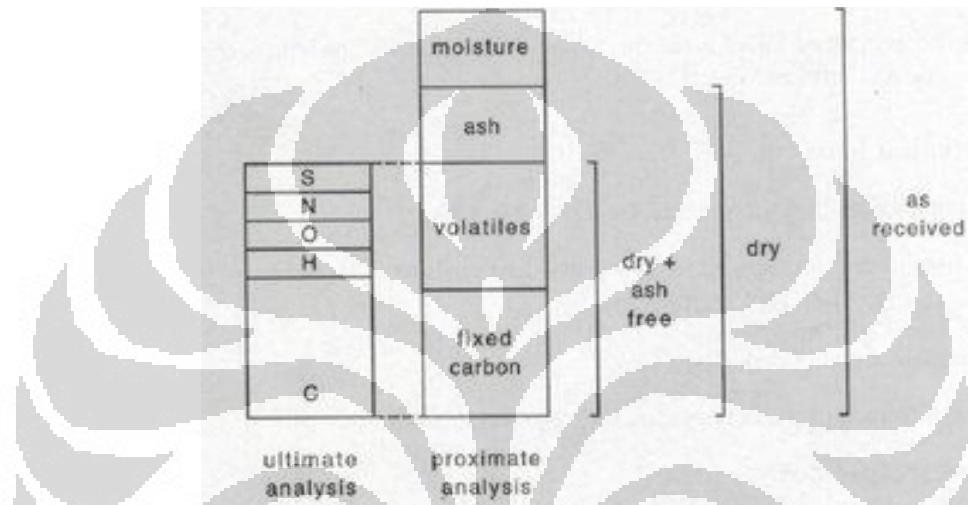
Biomassa mempunyai kadar *volatile* yang tinggi (sekitar 60-80%) dibanding kadar *volatile* pada batubara, maka biomas lebih reaktif dibanding batubara. Perbandingan bahan bakar (FR) dinyatakan sebagai perbandingan kadar karbon dengan kadar volatil. Untuk batubara,  $\text{FR} \sim 1 - 10$ . Untuk gambut,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



Gambar 2.6 Analisis Proximat untuk Beberapa Jenis Bahan Bakar Padat.

Pada analisis proximat biomassa juga mengandung abu dan air (lihat Gambar di bawah). Massa biomassa awal umumnya diistilahkan sebagai *as received* (mengandung air, abu, volatil, dan karbon). Kadar abu dari biomassa berkisar dari 1% sampai 12% untuk kebanyakan jerami-jeramian dan bagas. Abu dari biomassa lebih ramah dibandingkan abu dari batubara karena banyak mengandung mineral seperti

fosfat dan potassium. Pada saat pembakaran maupun gasifikasi, abu dari biomas juga lebih aman dibandingkan abu dari batubara. Dengan temperatur operasi tidak lebih dari 950°C atau 1000°C, abu dari biomass tidak menimbulkan terak. Abu biomas mempunyai jumlah oksida keras (silica dan alumina) yang lebih rendah.



Gambar 2.7 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)

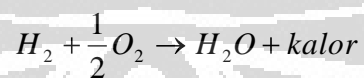
<i>Solid Waste</i>	<i>Moisture</i>	<i>Volatile</i>	<i>Fixed Carbon</i>	<i>Non Comb.</i>
Daun	9.97	66.92	19.29	3.82
Cangkang Kelapa	7,8	80,8	18,8	0,4
Ranting Pohon	20	67.89	11.31	0.8
Kertas	10.24	75.94	8.44	5.38

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

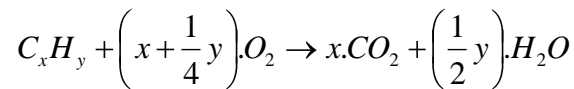
Pembakaran adalah sebuah reaksi antara oksigen dan bahan bakar yang menghasilkan panas. Oksigen diambil dari udara yang berkomposisi 21 % oksigen serta 79 % nitrogen (persentase volume), atau 77 % oksigen serta 23 % nitrogen (persentase massa). Unsur terbanyak yang terkandung dalam bahan bakar adalah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

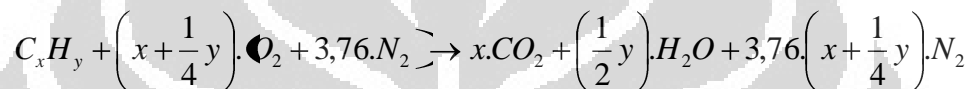
Pembakaran sempurna adalah pembakaran dengan proporsi yang sesuai antara bahan bakar dengan oksigen. Pada pembakaran yang lebih banyak oksigen dari pada bahan bakar, campuran tersebut dinamakan sebagai campuran kaya. Begitu juga sebaliknya, apabila bahan bakar yang digunakan lebih banyak dari pada oksigen,

maka campurannya disebut campuran miskin. Reaksi untuk pembakaran sempurna adalah :



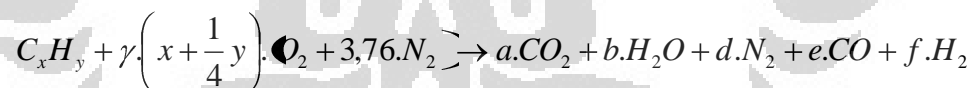
Nilai dari x dan y di atas bergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan. Nilai x adalah fraksi massa untuk kandungan *Carbon*, dan y fraksi massa untuk kandungan *Hidrogen* dalam bahan bakar.

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.



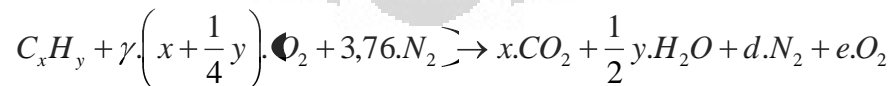
Namun, ada kalanya juga proses pembakaran tidak terjadi pada komposisi ideal antara bahan bakar dengan udara. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, proses yang tidak pada kondisi ideal ini bisa terbagi menjadi dua, yaitu pembakaran kaya dan pembakaran miskin.

- 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.

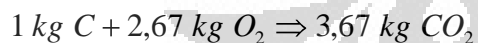
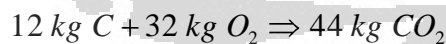
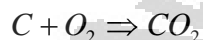
Tabel 2.4 Jenis-Jenis Bahan Bakar

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

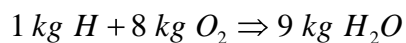
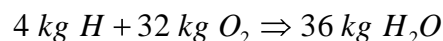
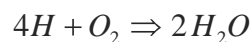
#### 2. Zat yang membakar

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

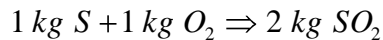
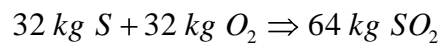
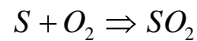
- Karbon terbakar sempurna akan membentuk  $CO_2$  menurut persamaan :



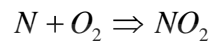
- Hidrogen terbakar sempurna akan membentuk  $H_2O$  menurut persamaan :



- 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 :

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

Kebutuhan udara dalam proses pembakaran dapat diklasifikasikan menjadi sebagai berikut :

- Udara primer  
Udara yang bercampur dengan bahan bakar dalam ruang bakar.
- Udara sekunder  
Udara yang masuk dari sekeliling ruang bakar.
- Udara tersier  
Udara yang menembus celah pada ruang bakar.

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



Nilai *excess air* ini dapat ditulis sebagai berikut :

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

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 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.

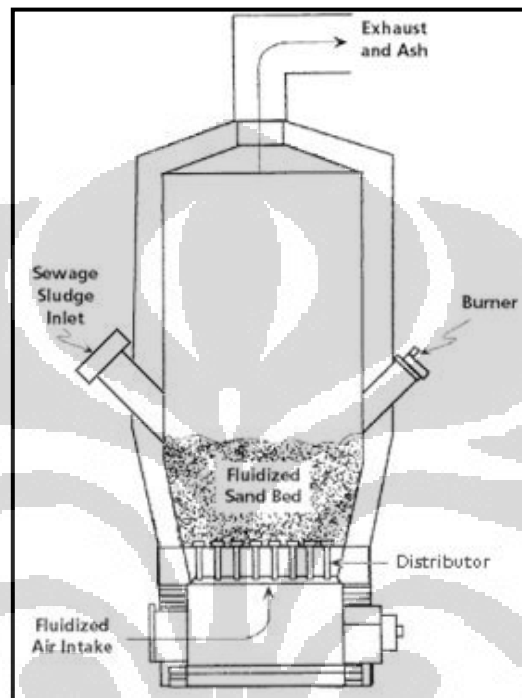
Hampan pasir yang menjadi media pengaduk diletakkan di atas *distributor* yang berupa grid logam dengan dilapisi bahan tahan api. Grid ini berisi suatu pelat

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

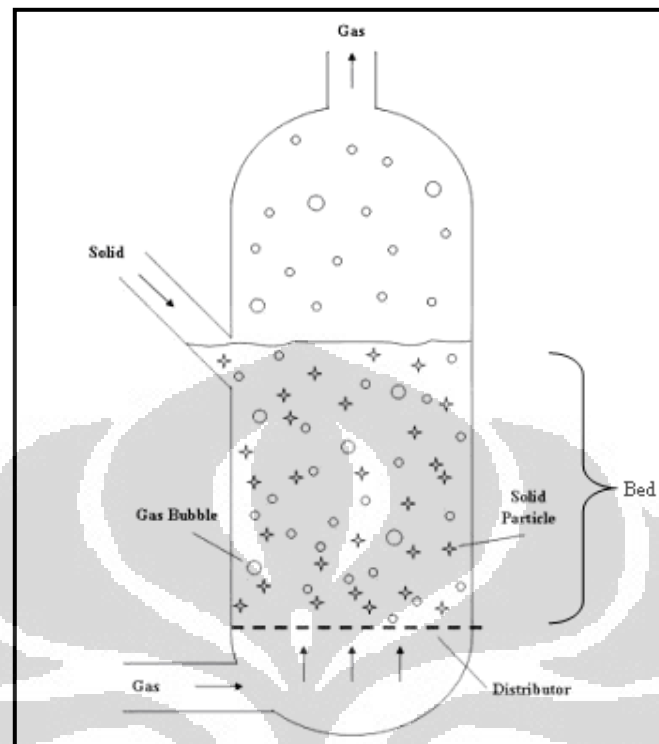
Pembakaran dengan teknologi *fluidized bed* merupakan satu rancangan alternatif untuk pembakaran limbah padat. Teknologi ini telah diaplikasikan untuk berbagai macam bahan bakar padat seperti biofuel, batu bara, serta limbah, baik itu limbah organik maupun anorganik. Bahan bakar padat yang sudah dalam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

juga sebagai *freeboard* atau juga *riser*. Pada bagian inilah terjadi perubahan partikel padat menjadi gas. Gas-gas yang dihasilkan akan terbang ke udara setelah melewati alat kontrol polusi udara.



Gambar 2.8 Skematis *Fluidized Bed Combustor*

Suatu pandangan potongan *fluidized bed combustor* dipertunjukkan seperti gambar 2.8. Terlihat pada gambar tersebut bahwa *fluidized bed combustor* memiliki satu ruangan dimana pengeringan dan pembakaran terjadi di hamparan pasir terfluidisasi. Waktu kontak di dalam daerah pembakaran hanyalah beberapa detik pada temperatur 750 sampai 900 °C. Abu terbawa keluar dari puncak ruang bakar dan dibersihkan dengan alat kontrol polusi udara. Pasir yang terbawa dengan abu harus diganti. Pasir yang terbuang pada umumnya 5 persen dari volume hamparan untuk setiap 300 jam operasi. Pengumpanan (*feed*) pada ruang bakar itu dimasukkan baik dari atas atau secara langsung ke dalam hamparan.



Gambar 2.9 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.

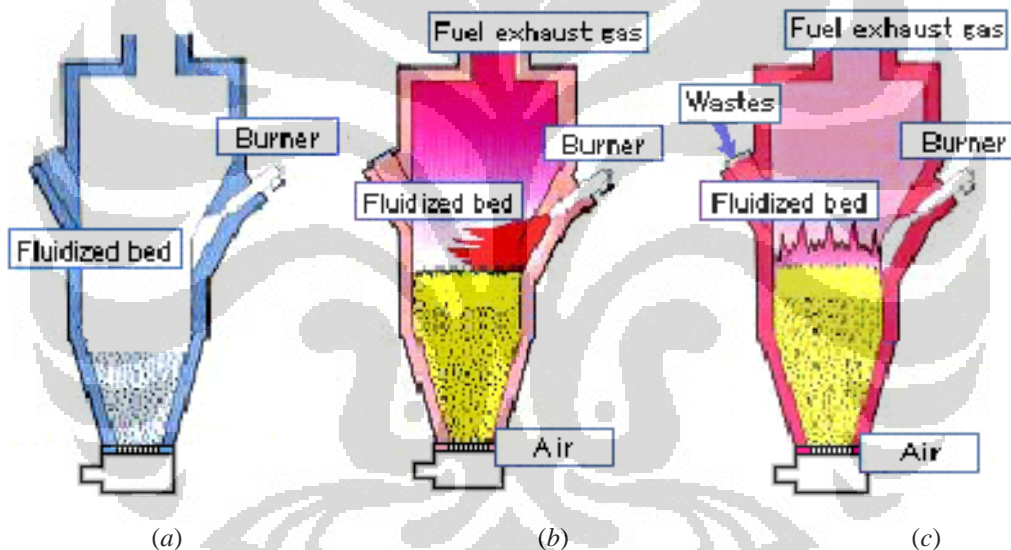
#### 2. Proses pemanasan

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 hampan 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 2.10 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 2.11 Ruang Bakar Utama *Fluidized Bed Combustor* UI

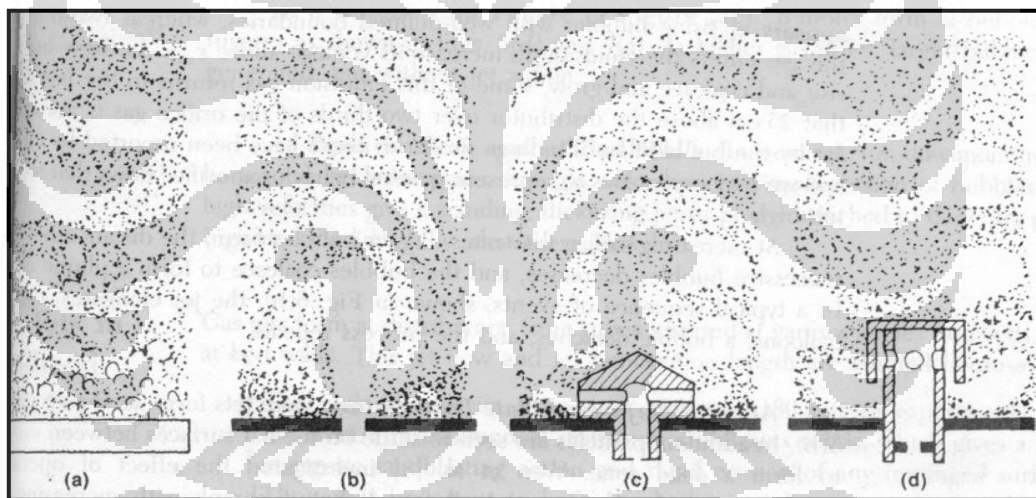
Ketika sistem bekerja dalam fluidisasi dengan kecepatan tinggi, bahan bakar akan terbakar setelah fase *bubbling*. Di dalam ruang bakar akan terjadi urutan-urutan reaksi, yaitu: pengeringan (*drying*), pemanasan (*heating*), pirolisa partikel solid, dan oksidasi. Ruang bakar utama ini merupakan area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



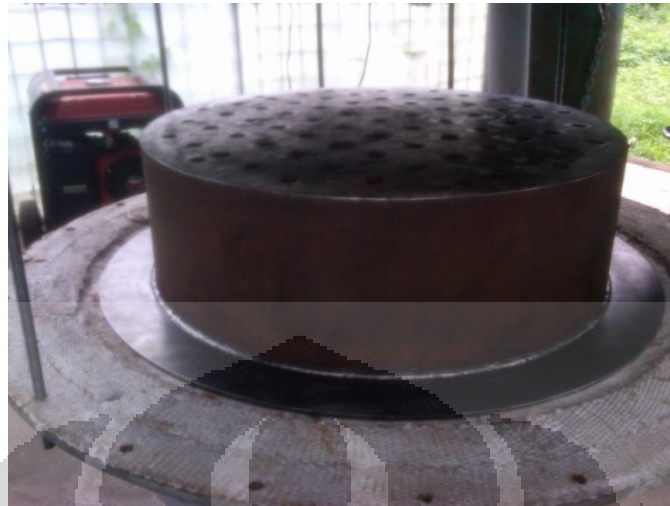
membantu dalam proses pirolisa terhadap bahan bakar padat, dan juga dapat membantu peningkatan stabilitas termal di dalam ruang bakar.

## 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 2.12:



Gambar 2.12 Perilaku Gelembung Setiap Jenis Distributor; (a) *Porous Plate*; (b) *Perforated Plate*; (c) *Nozzle-type Tuyere*; (d) *Bubble Cap Tuyere*.



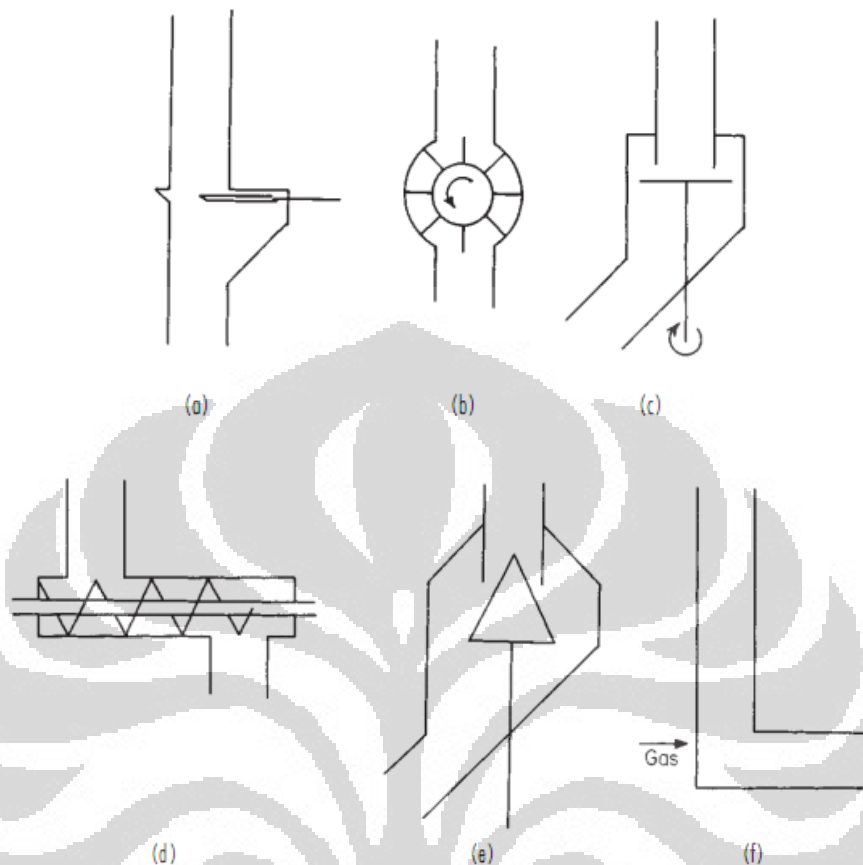
Gambar 2.13 Distributor yang Digunakan pada *Fluidized Bed Combustor* UI

### 3. *Plenum*

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

#### 2.4.3.2 *Solid Feeder*

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



Gambar 2.14 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 2.15 *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 2.16 Burner yang Digunakan pada *Fluidized Bed Combustor* UI

#### 2.4.3.4 *Bed Material*

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

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

- *Group A*  
Material pasir dikategorikan ke dalam kelompok ini memiliki diameter partikel ( $d_p$ ) berkisar antara 20  $\mu m$  sampai 100  $\mu m$  dan densitas partikel kurang dari 1400  $kg/m^3$ . Material ini paling mudah terfluidisasi dibandingkan kelompok yang lain.
- *Group B*  
Material kelompok ini cenderung memiliki ukuran rata-rata diameter partikel berkisar antara 40  $\mu m$  sampai 500  $\mu m$  dan densitasnya berkisar antara 1400 sampai 4000  $kg/m^3$ .
- *Group C*  
Kelompok ini memiliki ukuran rata-rata diameter partikel yang lebih kecil (<30  $\mu m$ ) dengan densitas yang kecil. Partikelnya sangat halus seperti tepung. Fluidisasi sangat sulit terjadi karena gaya interstitial antara partikel mempunyai efek yang lebih besar dibandingkan gaya gravitasi.
- *Group D*  
Material kelompok ini biasanya memiliki ukuran rata-rata diameter partikel lebih besar dari 600  $\mu m$  dan paling besar di antara kelompok lainnya. Kelompok ini membutuhkan kecepatan fluidisasi yang besar sehingga sangat sulit untuk pencampuran yang baik dibandingkan kelompok A dan B.

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

#### 2.4.3.5 Cyclone separator

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

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

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



Gambar 2.17 *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 2.18 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 2.19 *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.

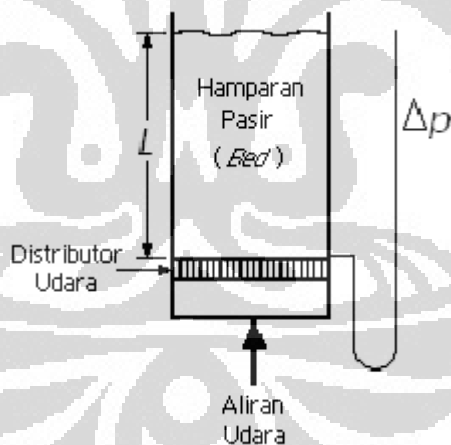


Gambar 2.20 *Data Logger*

## 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.



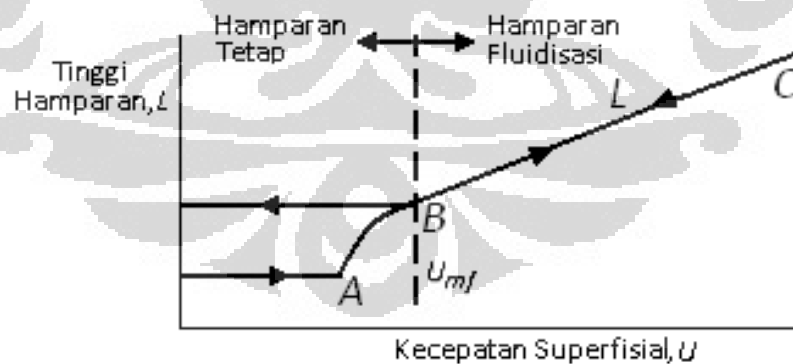
Gambar 2.21 Skematik Fluidisasi

### 2.5.2 Kondisi Fluidisasi

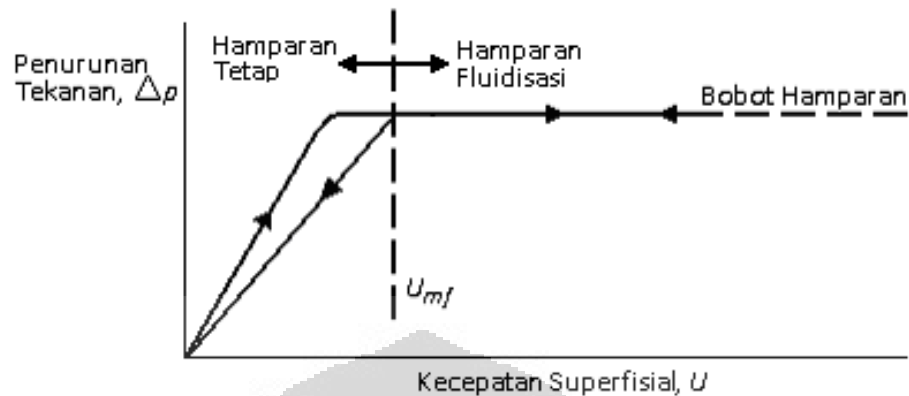
Perhatikan suatu tabung vertikal yang sebagian berisi dengan bahan butiran, sebagaimana terlihat dalam skema gambar. Tabung itu turbulen pada bagian atas, dan mempunyai plat berpori pada bagian bawah untuk menopang pasir di atasnya serta

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 2.22 Hubungan Tinggi Hamparan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hamparan Zat Padat



Gambar 2.23 Hubungan Penurunan Tekanan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hambaran Zat Padat

Jika laju aliran ke hambaran fluidisasi (*fluidized bed*) itu perlahan-lahan diturunkan, penurunan tekanan tetap sama, tetapi tinggi hambaran berkurang, mengikuti garis *BC* yang diamati pada waktu penambahan kecepatan. Akan tetapi, tinggi-akhir hambaran itu mungkin lebih besar dari nilainya pada hambaran 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 hambaran-diam semula. Jika fluidisasi dimulai kembali, penurunan tekanan akan mengimbangi bobot hambaran pada titik *B*, titik inilah yang harus kita anggap sebagai kecepatan fluidisasi minimum  $U_{mf}$ ; dan bukan titik *A*. Untuk mengukur  $U_{mf}$ , hambaran itu harus difluidisasikan dengan kuat terlebih dahulu, dibiarkan mengendap dengan mematikan aliran udara, dan laju aliran dinaikkan lagi perlahan-lahan sampai hambaran 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 hambaran rata-rata pada suatu kecepatan tertentu sama di segala arah hambaran. 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 agregativ atau fluidisasi gelembung. Fluidisasi ini terjadi jika kecepatan superfisial gas di atas kecepatan fluidisasi minimum. Bila kecepatan superfisial jauh lebih besar dari  $U_{mf}$ , kebanyakan gas itu mengalir melalui hamparan dalam bentuk gelembung atau rongga-rongga kosong yang tidak berisikan zat padat, dan hanya sebagian kecil gas itu mengalir dalam saluran-saluran yang terbentuk di antara partikel. Partikel itu bergerak tanpa aturan dan didukung oleh fluida, tetapi dalam ruang-ruang di antara gelembung fraksi kosong kira-kira sama dengan pada kondisi awal fluidisasi. Gelembung yang terbentuk berperilaku hampir seperti gelembung udara di dalam air atau gelembung uap di dalam zat cair yang mendidih, dan karena itu fluida jenis ini kadang-kadang dinamai dengan istilah “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 superficial 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 superficial berdasarkan data eksperimental dari titik potong antara bagian kurva yang naik dan bagian kurva yang datar seperti pada gambar 3.2.

#### 2.5.4.6 Penurunan tekanan melintas hamparan

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



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

Persamaan penurunan tekanan melalui distributor melintas hamparan pasir adalah:

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

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*.

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

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

Keterangan :

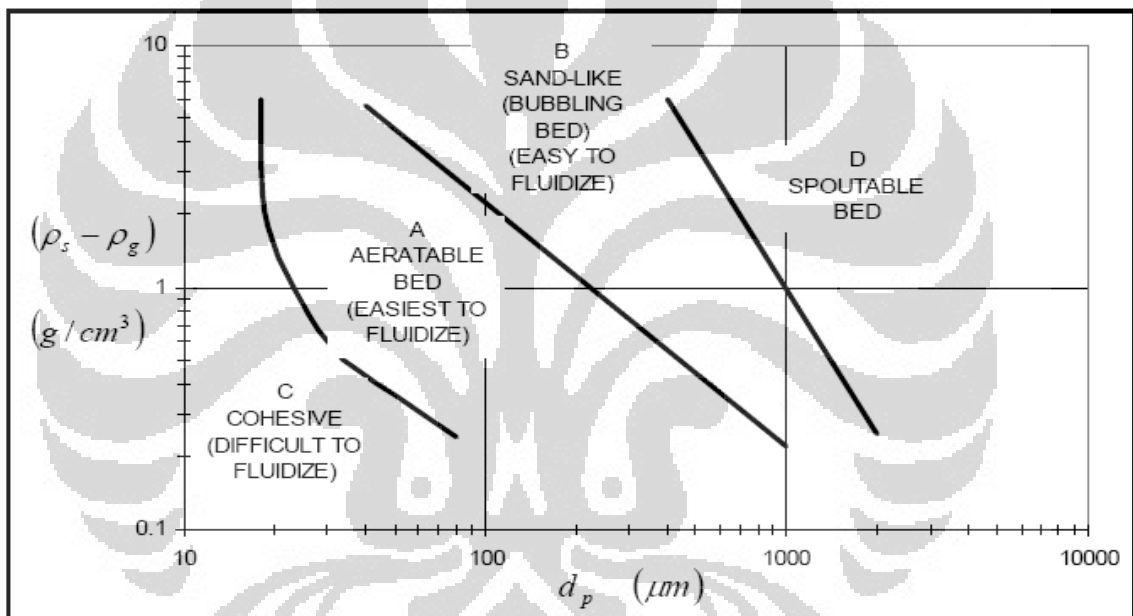
- $\Delta P_d$  = penurunan tekanan melewati distributor (  $N/m^2$  )
- $U_o$  = kecepatan udara superfisial (  $m/s$  )
- $U_{or}$  = kecepatan udara rata-rata melewati orifis (  $m/s$  )
- $f_{or}$  = *fractional open area* (  $m^2$  )
- $\rho_f$  = massa jenis fluida udara (  $kg/m^3$  )
- $C_D$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

#### 2.5.4.8 Klasifikasi pasir

Pasir diklasifikasikan berdasarkan bagaimana pasir tersebut terfluidisasi saat dialirkan aliran udara pada kecepatan udara tertentu. Setiap masing-masing kelompok pasir memiliki karakteristik yang berbeda-beda seperti bagaimana terbentuknya

gelembung, solid mixing yang terjadi, tingkat mengembangnya pasir dan besarnya nilai penurunan tekanan yang semuanya dipengaruhi oleh diameter partikel pasir dan massa jenis pasir tersebut.

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



Gambar 2.24 Diagram Klasifikasi Jenis-Jenis Pasir. (sumber : Geldart. 1991)

Klasifikasi jenis-jenis pasir menurut Geldart, yaitu :

a) *Group A*

Pasir yang dikategorikan dalam *group A* menurut Geldart biasanya memiliki massa jenis kurang dari  $1400 kg/m^3$  dan memiliki ukuran berkisar antara 20 sampai  $100 \mu m$ . Para peneliti telah menunjukkan dengan meyakinkan bahwa terdapat gaya antar partikel bahkan pada pasir seperti *cracking catalyst* yang menunjukkan pada kelompok ini. Hamparan pasir pada kelompok ini sangat mengembang pada kecepatan udara antara  $U_{mf}$  dan kecepatan yang mana gelembung mulai terjadi,  $U_{mb}$ ,

karena pasir seperti itu sedikit kohesif. Pasir jenis ini memperlihatkan suatu peningkatan hamparan (*bed*) nyata yang mengembang stabil ketika kecepatan fluidisasi minimum terlampaui dahulu, dan fluidisasi dapat terjaga seragam atau fluidisasi partikulat seperti itu bahkan sampai kecepatan fluidisasi minimum telah terlampaui dua sampai tiga kalinya. Tetapi, dengan memperbesar lagi kecepatan udara sampai pada suatu titik yang mana terjadinya hamparan mengempis kembali sehingga pada keadaan kurang mengembang yang kira-kira pada tingkat mengembangnya hamparan di bawah kondisi fluidisasi minimum dan kebanyakan udara berlebih akan mengalir melalui hamparan seperti fase gelembung, yakni yang sering disebut dengan fluidisasi agregativ. Kecepatan udara pada saat yang mana hamparan mengempis terjadi merupakan kecepatan minimum gelembung (*minimum bubbling velocity*,  $U_{mb}$ ).

b) *Group B*

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

c) *Group C*

Pasir *group C* merupakan pasir yang ukuran rata-ratanya lebih kecil dibandingkan yang lainnya ( $<30 \mu m$ ) dan atau massa jenis yang lebih kecil juga sehingga gaya-gaya antar partikel mempunyai pengaruh yang lebih besar daripada

gaya gravitasi. Pasir jenis ini sangat sulit untuk terfluidisasi. Tidak mungkin terjadi pada pasir jenis ini yang mana besar penurunan tekanan sama dengan berat per unit luas. Hal ini menunjukkan bahwa peranan dari berat, bahkan jika hamparan menunjukkan sifat-sifat tampaknya seperti fluida, disokong oleh gaya antar partikel dan persinggungan permukaan partikel. Pada pasir jenis ini, *channelling* sangat mudah terjadi. Sekali hal ini terjadi, maka cenderung memperbesar jalurnya ketika meningkatkan kecepatan udara sehingga udara tidak terdistribusi dengan baik yang mana tidak pernah terjadi benar-benar fluidisasi.

d) *Group D*

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

Bila gas dilewatkan melalui lapisan hamparan partikel *group A*, *B*, atau *D*, gesekan (*friction*) menyebabkan terjadinya penurunan tekanan (*pressure drop*). Ketika kecepatan gas dinaikkan, penurunan tekanan meningkat sampai besar penurunan tekanan tersebut sama dengan berat hamparan (*bed*) dibagi dengan luas penampangnya. Kecepatan gas ini disebut kecepatan fluidisasi minimum,  $U_{mf}$ . Ketika batas ini tercapai, hamparan partikel *group A* akan mengembang secara seragam sampai pada kecepatan gas yang lebih tinggi lagi akan terbentuk gelembung-gelembung (*bubbles*); kecepatan ini disebut kecepatan minimum gelembung,  $U_{mb}$ . Untuk partikel *group B* dan *group D* besar  $U_{mf}$  dan  $U_{mb}$  pada dasarnya sama. Partikel *group C* cenderung lebih kohesif dan ketika kecepatan gas dinaikkan lagi maka akan

terbentuk semacam saluran atau rongga pada hampan (*channelling*) dari distributor sampai permukaan hampan. Jika *channelling* tidak terbentuk, maka seluruh hampan akan terangkat seperti piston. Semua kelompok partikel pasir ini (*group A, B, C, dan D*) ketika kecepatan gas dinaikkan lagi, densitas hampan akan berkurang dan tubulensi meningkat.

Pada pasir yang lebih halus dan kurang padat (*group A*), ukuran gelembung stabil maksimum jauh lebih kecil daripada pasir yang lebih kasar dan lebih padat (*group B*) sehingga distribusi ukuran gelembung yang stabil dapat dicapai pada hampan (*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 pengelembungan akan lepas dari hampan dengan lebih cepat saat ukuran gelembung rata-rata lebih besar, sehingga terdapat banyak variasi dalam pengembangan hampan secara keseluruhan.

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

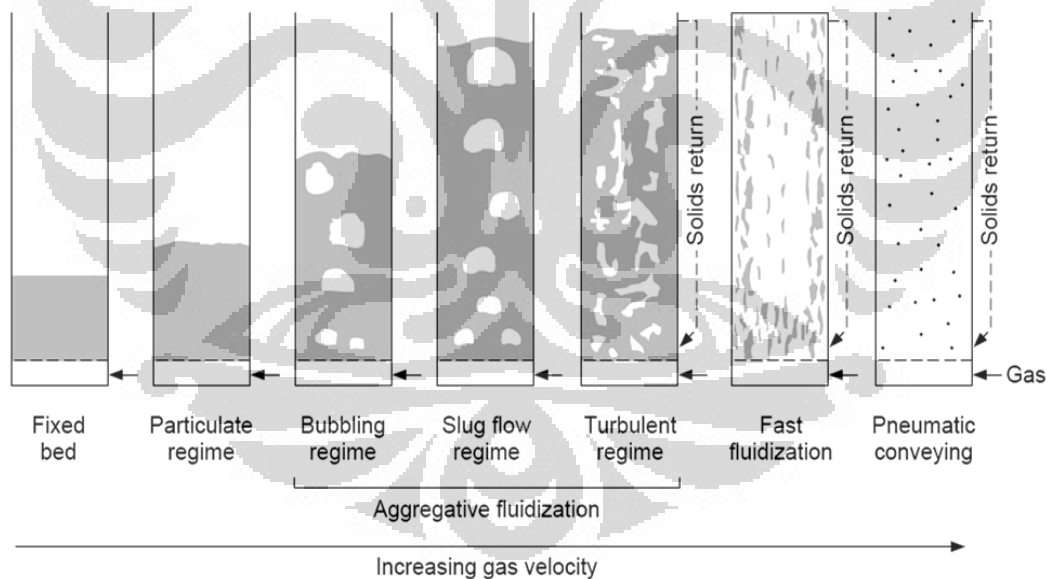
Group	C	A	B	D	
Most obvious characteristic	Cohesive, difficult to fluidize	Bubble-free range of fluidization	Starts bubbling at $U_{mf}$	Coarse solids	
Property	Typical solids				
	Flour, cement	Cracking catalyst	Building sand, table salt	Crushed limestone coffee beans	
1. Bed expansion	Low when bed 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	
Effect on properties 1 to 7 of:	Mean particle size within group	Cohesiveness increases as $d_p$ decreases	Properties improve as size decreases	Properties improve as size decreases	Not known
	Particle size distribution <sup>b</sup>	Not known	Increasing <45 $\mu m$ fraction improves properties	None	Increases segregation
	Increasing pressure, temperature, viscosity, density of gas	Probably improves	Definitely improves	Uncertain, some possibly	Uncertain, some possibly

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

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

#### 2.5.4.9 Daerah batas fluidisasi (*fluidization regimes*)

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



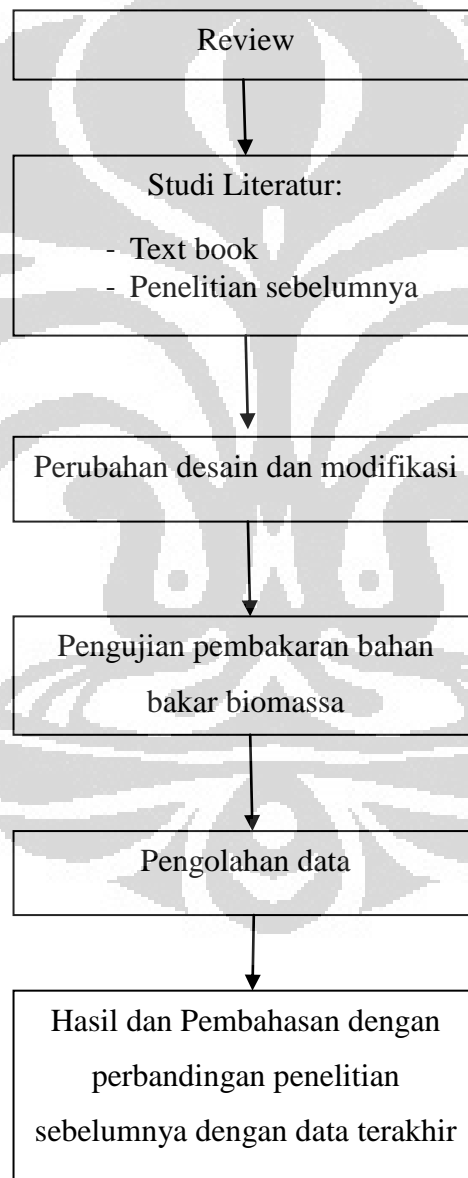
Gambar 2.25 Daerah batas fluidisasi (sumber: Grace. 1986)

## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Diagram Aliran Penelitian

Berikut merupakan uraian proses kegiatan yang dilakukan dalam penelitian ini.





### 3.2 Review Sejarah Perkembangan dan Modifikasi Fluidized Bed Combustor Universitas Indonesia

*Fluidized bed combustor (FBC)* merupakan proyek dari Universitas Indonesia yang dibuat sekitar tahun 2004 untuk pengolahan sampah organik yang ada di lingkungan Universitas Indonesia. Saat ini *Fluidized bed combustor (FBC)* ini terdapat di Hutan Kota UI dekat Wisma Makara Universitas Indonesia. *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 keduaapuluh dan telah diaplikasikan dalam banyak sektor industri dan pada tahun-tahun belakangan ini telah diaplikasikan untuk mengkonversi biomassa menjadi energi. *Fluidized bed combustor (FBC)* UI ini dapat dilihat seperti pada gambar di bawah ini :



Gambar 3. 1 Alat *Fluidized Bed Combustion* UI

#### 3.2.1 Sistem Feeding

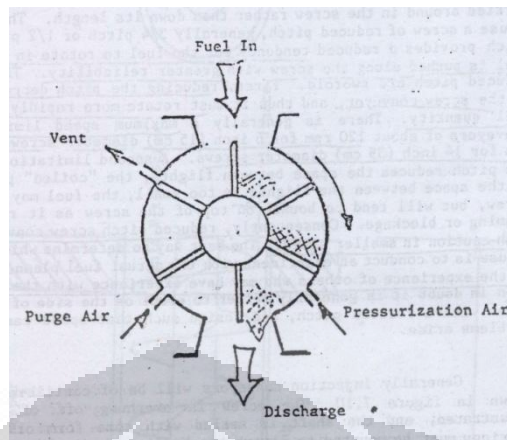
*Feeder* merupakan tempat saluran untuk memasukkan umpan masuk bahan bakar dalam hal ini adalah sampah ke dalam reaktor. Oleh karena itu laju umpan masuk (*feeding rate*) bahan bakar harus dapat di jaga stabil pada nilai tertentu agar

temperatur pada reaktor utama tidak mengalami penurunan temperatur. Pada sistem feeding, desain awal *feeder* yang digunakan adalah jenis *Gravity Chute*. *Feeder* berfungsi sebagai jalur untuk memasukkan sampah ke dalam ruang bakar utama. Desain awal *feeder* yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.5. *Feeder* tersebut memiliki dua lubang, yaitu lubang atas yang digunakan sebagai tempat masuknya sampah, memiliki diameter 49,4 cm, sedangkan lubang bawah memiliki diameter 8,9 cm, digunakan untuk menyalurkan sampah ke dalam ruang bakar.



Gambar 3.2 *Gravity Chute*

Dalam saluran menuju ruang bakar, diberikan satu alat tambahan yang disebut dengan *rotary hopper*. Mekanisme ini menggunakan alat yang berbentuk sudu-sudu yang berfungsi untuk membatasi jumlah bahan bakar yang akan masuk ke dalam ruang bakar, serta membatasi agar sampah yang masuk ke dalam ruang bakar memiliki ukuran—ukuran tertentu.



Gambar 3.3 Skematis *Rotary hopper*  
pada Saluran *Feeder*

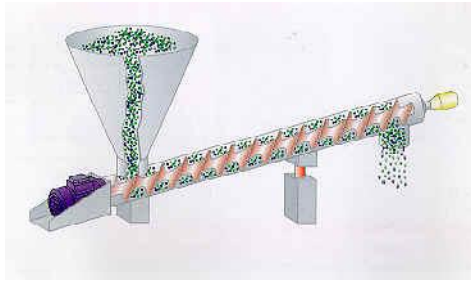
Selain jenis *Gravity Chute*, masih terdapat beberapa jenis sistem feeding yang lain. Pada dasarnya, ada 4 (empat) cara untuk memasukkan bahan bakar ke dalam ruang bakar pada *Fluidized Bed Incinerator*. Keempat sistem tersebut adalah :

- *Gravity Chute*

Sistem ini tidak menggunakan sistem tambahan. Sistem ini hanya menggunakan gaya gravitasi sebagai mekanismenya. Sehingga, yang diperlukan adalah membuat suatu alat atau suatu bagian yang menurun, yang searah dengan gaya gravitasi.

- *Screw Conveyor*

Sistem ini menggunakan sistem ulir, untuk mendorong bahan bakar yang akan masuk ke dalam ruang bakar. Dengan menggunakan sistem ini dapat memungkinkan pencegahan keluarnya volatile meter dari suatu bahan bakar ke luar. Skematis dari *feeder* jenis ini dapat dilihat dari gambar yang ada dibawah ini.



Gambar 3.4 Skematis *Screw Conveyor Feeder*

- *Pneumatic Injection*

*Feeder* jenis ini menggunakan sistem *pneumatic* untuk mendorong bahan bakar yang akan digunakan, ke dalam ruang bakar.

- *Spreader Stoker*

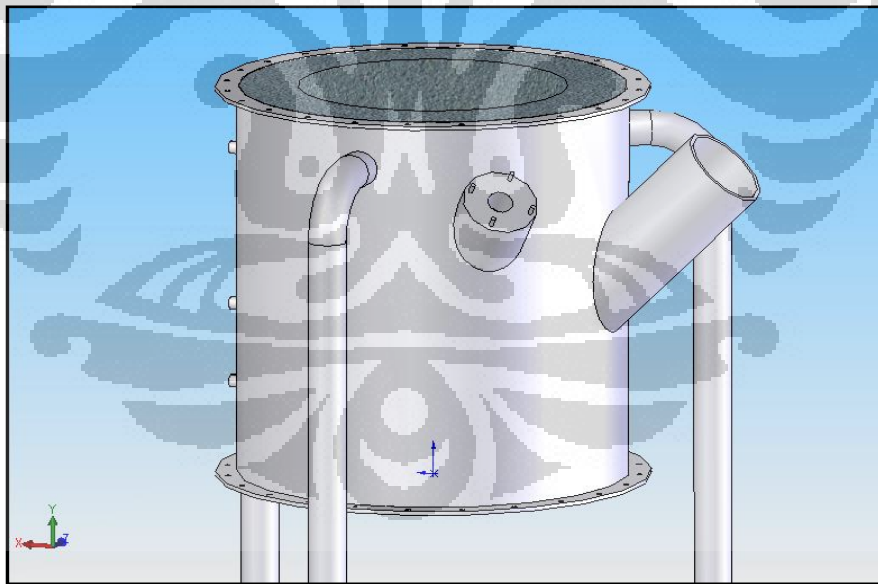
Sistem yang terakhir ini adalah sistem yang digunakan seperti pada boiler-boiler konvensional. Sistem ini merupakan alternatif terakhir yang dapat digunakan pada FBC, apabila sistem-sistem yang telah disebutkan sebelumnya tidak dapat bekerja dengan baik.

Pada tahun 2008 *gravity chute* terjadi perkembangan desain dan modifikasi diganti dengan menggunakan sistem berbeda, mekanisme yang digunakan pada sistem ini menggunakan jenis screw feeding yang diletakkan pada tempat/saluran yang sama dengan sistem feeding sebelumnya dengan fungsi memberikan suplai bahan bakar berupa sampah yang dijaga pada kecepatan tertentu agar temperatur pada ruang bakar bisa tetap stabil. Desain screw feeding ini menggunakan motor 0,75 Kw, 1450 rpm. Sistem screw feeding ini menggunakan reduction gear dengan perbandingan 1 : 30, sehingga output nya menjadi sekitar 48 rpm saja. Selain itu sistem feeding ini juga menggunakan *Inverter* yang berfungsi untuk mengatur putaran screw, dengan menggunakan *Inverter* ini, output yang dikeluarkan dapat kita atur sesuai dengan keinginan kita.

*Screw Feeder* ini terdiri dari komponen – komponen berikut ini :

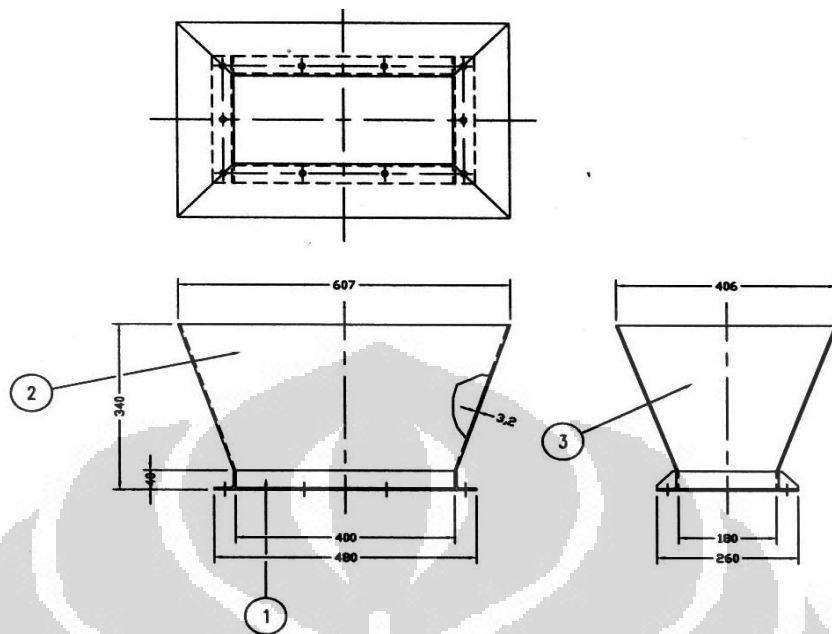
- Shaft screw
- Reduction gear
- Rantai
- Sliding gate
- Screw housing
- Hopper
- Motor listrik 3 fase 0.75 Kw

*Screw feeding* ini akan diletakkan disamping ruang bakar utama, diantara main hole dan tempat gas burner. *Screw feeding* ini akan dipasang secara horizontal, dan dikarenakan posisinya yang cukup tinggi, di sebelah *screw feeding* ini juga ditambah tangga, agar operator dapat memasukkan sampah ke dalam feeding.

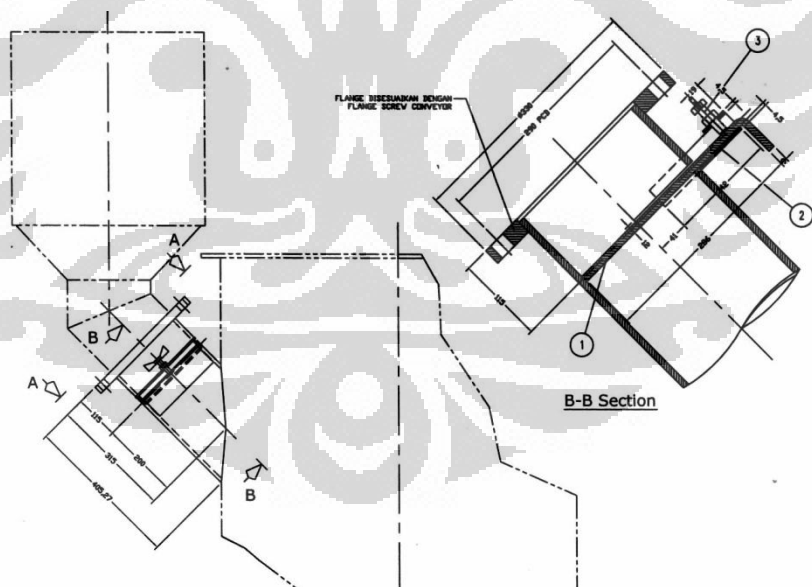


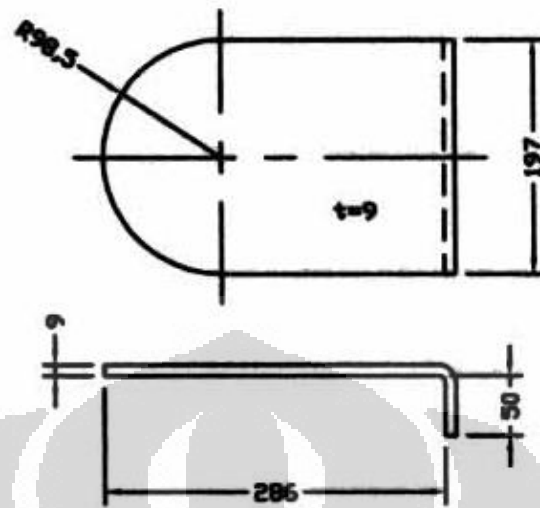
Gambar 3.5. Letak lubang feeding berada disamping lubang burner pada ruang bakar utama





Gambar 3.7 Feeding Chute / Hopper





Gambar 3.8 .*Sliding Gate detail*

*Sliding gate* ini dibuat dengan tujuan agar sampah-sampah, gas hasil pembakaran dan bara-bara pasir yang beterbangan di dalam ruang bakar utama tidak masuk kembali ke dalam ruang feeding.

Proses fabrikasi *screw feeding* ini tidak memakan waktu lama dan tidak terlalu sulit. Yang dilakukan pertama adalah pemilihan material yang sesuai untuk desain yang ada. Yaitu material-material seperti pelat besi, pipa besi, rantai, gear dan mempersiapkan motor. Proses pembuatan screw-nya sendiri juga tidak terlalu sulit. Dengan menggunakan suatu alat khusus, bentuk *screw* yang diinginkan dapat dibuat. Yang dilakukan adalah pelat besi ditahan pada salah satu ujungnya dan ujung yang lain ditarik dengan menggunakan alat tersebut, sehingga bentuknya berubah menjadi bentuk screw. Lalu *screw* itupun di-las ke shaft screw-nya. Sedangkan proses-proses yang lain adalah proses-proses fabrikasi yang biasa dilakukan seperti *cutting*, *welding* dan sedikit dilakukan proses *machining*. Dibawah ini adalah gambar *screw* yang sudah jadi.





Gambar 3.9 *Screw conveyer*

Dan gambar di bawah ini adalah gambar sistem *screw feeding* yang sudah jadi dan sudah terpasang pada FBC UI



Gambar 3.10 *Screw Feeding* yang sudah terpasang

Setelah itu, modifikasi feeder selanjutnya pada *feeder fluidized bed combustion* pada tahun 2010 dibuat modifikasi pada tugas akhir Anton atmaja dan Reynaldo. konsep desain 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 dilakukann proses machining sehingga mendekati konsep design yang telah dijelaskan sebelumnya



Gambar 3.11 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 3.12 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 3.13 Kedudukan ranting saat di dalam pipa model feeder

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



Gambar 3.14 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 member keuntungan dengan tidak harusnya melakukan perombakan pada ruang bakar yang sudah didesign dengan kemiringan  $45^\circ$  seperti sebelumnya ada. 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 system feeding

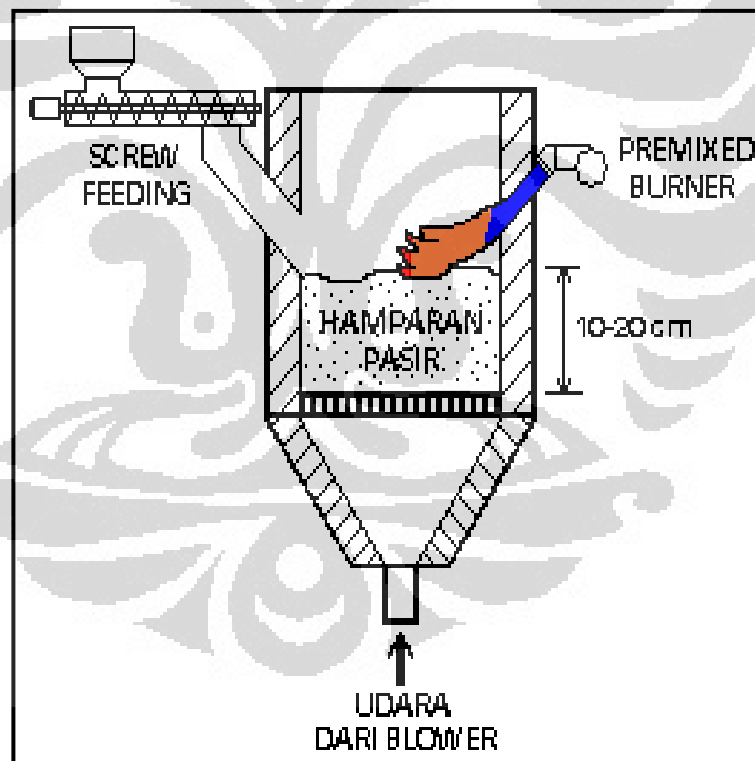


Gambar 3.15 Feeder hasil modifikasi

### 3.2.2 Sistem Suplai Udara

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 3.16 Skema aliran udara dari blower

Fluidized bed combustor UI, pertama kali menggunakan blower yang model lama (blower keong), karena dari data dari skripsi sebelumnya terjadi fluidisasi kurang

baik, maka kemudian digantikan dengan model baru, dimana blowernya digerakkan oleh motor yang memiliki daya sebesar 1,5 HP.



Gambar 3.17 Blower I



Gambar 3.18 Blower II

Setelah itu, tahun 2008 blower diganti hingga masih di gunakan sampai sekarang spesifikasi dari blower yang ada dapat dilihat berikut ini :

Tabel 3.1 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



Gambar 3.19 Ring Blower pada *Fluidized Bed Combustor* UI

### 3.2.3 Sistem Pemanasan

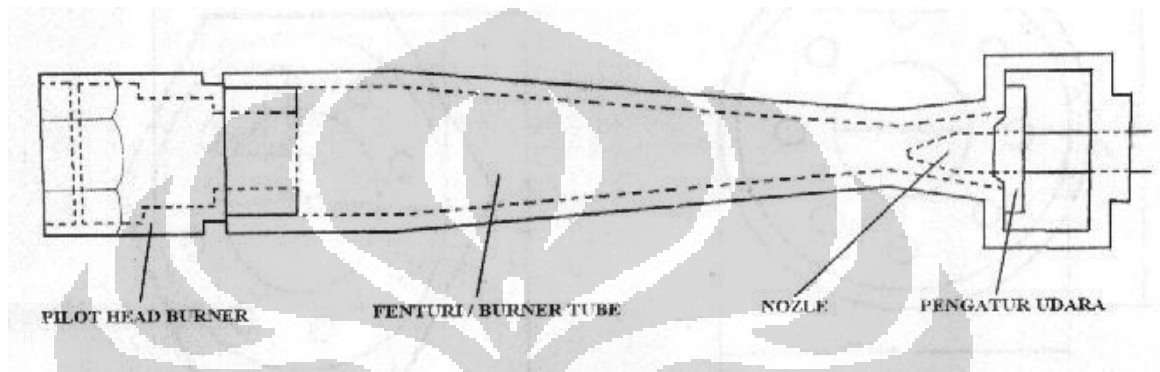
#### 3. 2.3.1 Burner

Desain awal gas *burner* pada alat *Fluidized Bed Incinerator* ini menggunakan *stick burner*. *Burner* digunakan sebagai pemanas udara yang akan mengalir ke dalam ruang bakar utama, untuk kemudian dapat memanaskan pasir sampai temperatur tertentu. Pada satu burner ini terdiri dari bermacam-macam bagian, yaitu :

- *Pilot Head*  
*Pilot head* merupakan bagian terdepan dari *burner*. Fungsi utama dari *pilot head* ini adalah menentukan model bunga api yang keluar.
- *Venturi / Burner Tube*  
*Venturi/Burner Tube* merupakan bagian dari *burner* yang berbentuk venturi. Fungsi bagian ini adalah mengalirkan dan mengumpulkan gas sebelum dialirkan ke *pilot head*, serta sebagai penahan agar api tidak langsung terbakar pada *nozzle*.
- *Nozzle*  
*Nozzle* memiliki fungsi sebagai tempat keluarnya aliran gas, serta meningkatkan tekanan pada aliran.

- Pengatur Udara

Pengatur udara berfungsi sebagai kendali masuknya udara sebelum bercampur dengan bahan bakar (gas), dan juga dapat menentukan jenis dan panjang api yang dihasilkan.



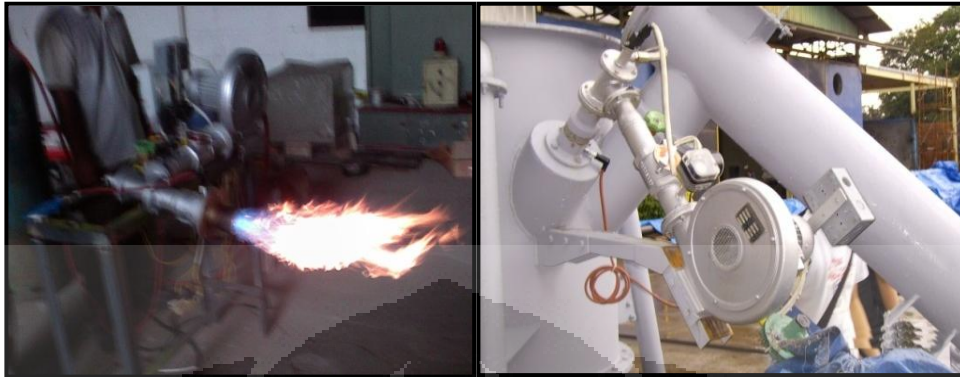
Gambar 3.20 Skematis *Burner*



Gambar 3.21 *Stick Burner*

Pada tahun 2008 maka burner diubah jenis *hi-temp premixed burner* yang berfungsi sebagai alat pemberi kalor atau pemanas untuk menaikkan temperatur pasir saat melakukan *start up* awal pengujian pembakaran. Akan tetapi, setelah mencapai suhu yang cukup tinggi di ruang bakar, maka burner dapat dimatikan.





Gambar 3.22 *Hi-Temp Premixed Burner*

Adapaun spesifikasi burner baru yang hingga sekarang masih dipakai FBC UI adalah

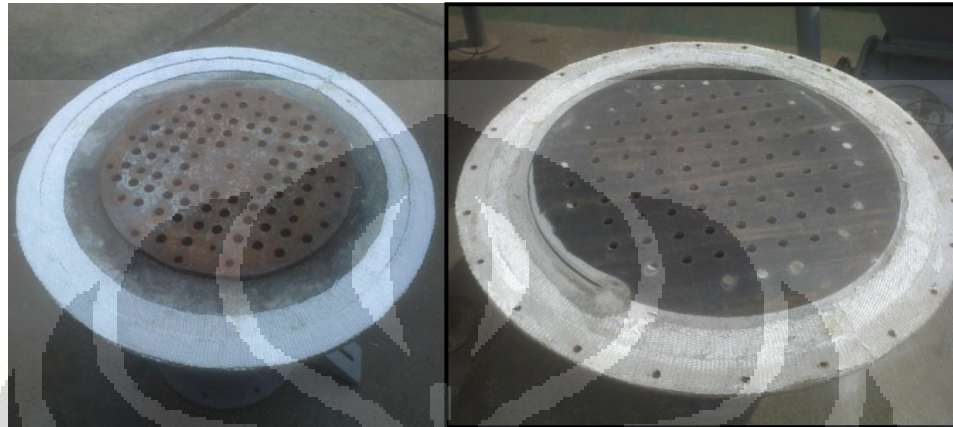
Tabel 3.2 Spesifikasi *Hi-Temp Premixed Burner*

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

### 3.2.3.2 Distributor

Distributor digunakan untuk untuk mendistribusikan aliran udara dari blower secara seragam pada keseluruhan penampang reaktor sehingga hamparan pasir yang

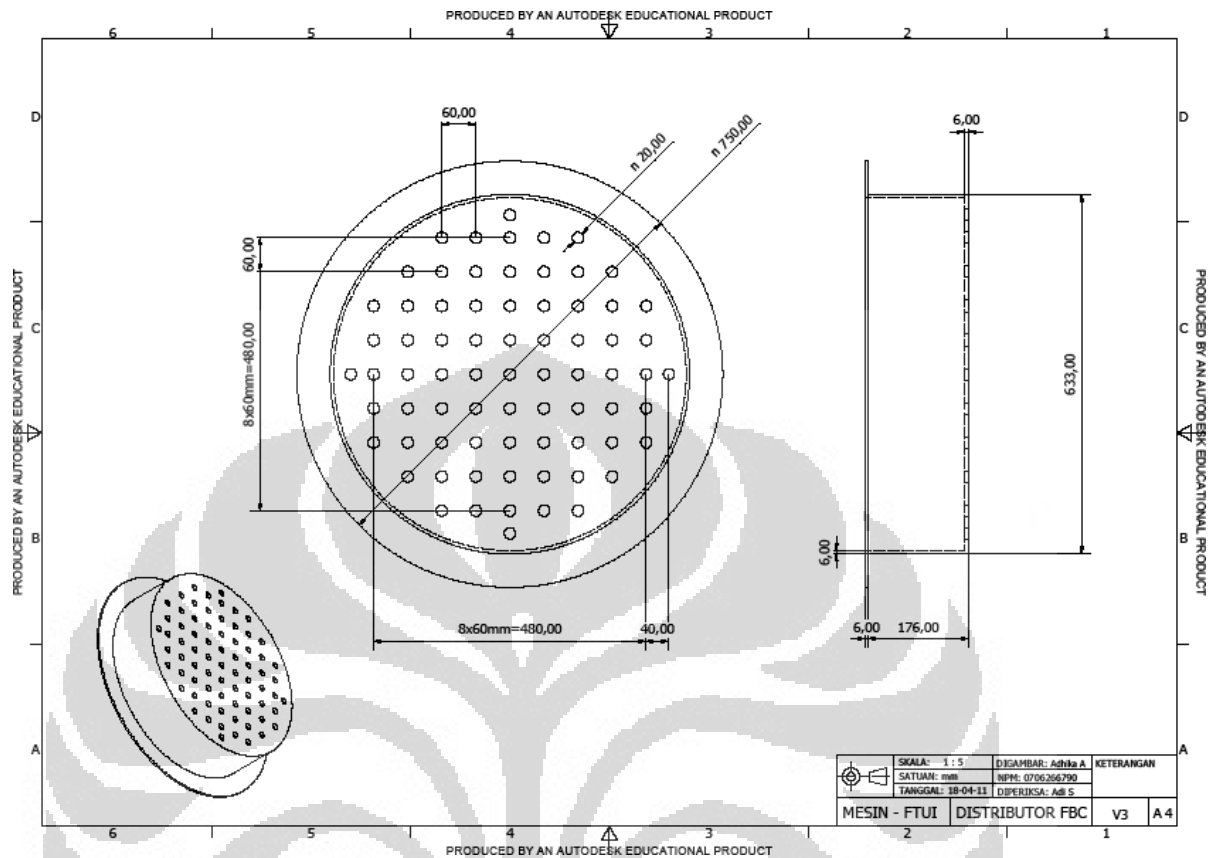
ditopang oleh distributor tersebut terjadi fluidisasi. Pada awalnya distributor *fluidized bed combustor* UI adalah seperti gambar dibawah ini :



Gambar 3.23 Distributor Lama

Pada tahun 2011 modifikasi kembali terjadi dengan menaikkan dudukan distributor sebesar 17 cm tanpa mengubah desain lama.





Gambar 3.24 Desain distributor baru yang digunakan sekarang di FBC UI

Pabrikan dilakukan oleh salah satu perusahaan manufaktur yang berlokasi di Tambun, Jawa Barat. Setelah melakukan proses instalasi di Laboratorium FBC, unit distributor siap untuk digunakan kembali sebagai dudukan hamparan pasir.



Gambar 3.25 Distributor baru hasil pabrikasi

### 3.3 Persiapan dan Prosedur Pengujian

Sebelum melakukan 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 pengujian agar lebih efektif, efisien, dan mendapatkan hasil yang semaksimal mungkin. Demikian juga dengan persiapan yang harus dilakukan sebelum melakukan pengujian pada FBC yang ada di Universitas Indonesia. 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. Pengujian yang dilakukan adalah karakteristik pembakaran terfluidisasi menggunakan bahan bakar biomassa (cangkang kelapa).

#### 3.3.1 Persiapan Pengujian

##### 3.3.1.1 Bahan Bakar Biomassa

Energi biomassa adalah energi yang didapatkan dari sinar matahari yang kemudian ditangkap oleh materi organik seperti tumbuhan ataupun hewan. Sumber dari biomassa terdiri dari :

1. Residu dari perhutanan (sampah hijau dari limbah penggergajian kayu, dan juga limbah *vegetative* dan kayu).
2. Tumbuhan pertanian yang khusus ditujukan untuk kepentingan energi dan juga limbah agrikultur.
3. Konstruksi kayu dan limbah reruntuhan kayu.
4. Kotoran binatang
5. Limbah etanol
6. Limbah perkotaan dalam bentuk limbah padat (sampah lumpur atau materi organik)
7. Gas dari dalam tanah

8. Limbah industri yang lainnya (sampah kertas dari proses daur ulang)

Cangkang atau tempurung kelapa merupakan salah satu contoh biomassa. Cangkang kelapa adalah bagian buah kelapa yang memiliki fungsi biologis sebagai pelindung inti buah dan terletak di bagian sebelah dalam sabut kelapa dengan ketebalan 3-6 mm.



Gambar 3.26 Tempurung kelapa

Cangkang kelapa merupakan salah satu biomassa yang mudah didapatkan di Indonesia. Dalam satu tahun, Indonesia dapat menghasilkan 1,1 juta ton tempurung kelapa

Tabel 3. 3 Potensi biomassa di Indonesia

Sumber/jenis limbah	Produksi	Potensi Kalor (juta GJ/tahun)
Peremajaan kebun karet	31,0 juta ton/tahun	496,0
Sisa logging	1,15 juta ton/tahun	11,0
Limbah industri penggergajian kayu	1,1 juta ton/tahun	10,6
Tandan kosong kelapa sawit	3,5 juta ton/tahun	15,4
Sabut sisa buah sawit	3,7 juta ton/tahun	35,3
Cangkang buah sawit	1,3 juta ton/tahun	17,2
Bagas tebu	6,5 juta ton/tahun	78,0
Sekam padi	14,3 juta ton/tahun	179,0
Tempurung kelapa	1,1 juta ton/tahun	18,7
Sabut kelapa	2,0 juta ton/tahun	24,0

Proses pengolahan Cangkang kelapa yang masih merupakan bahan baku menjadi tempurung kelapa yang siap menjadi bahan bakar diperlukan dua proses, yakni pelepasan sabut dan pencacahan tempurung kelapa tersebut menjadi bagian-bagian kecil untuk memudahkannya menjadi bahan bakar dalam proses FBC

Cangkang kelapa (*coconut shell*) yang digunakan disini ialah dari jenis buah kelapa pada umumnya yang biasa dipakai olah masyarakat dan bukan jenis kelapa sawit. Untuk melakukan pengujian pembakaran, tempurung kelapa yang digunakan memiliki ukuran sebagai berikut :

Partikel kecil : panjang = 5 – 10 mm  
lebar = 5 – 10 mm  
tebal = 3 – 5 mm



Gambar 3.27 Cangkang kelapa partikel kecil

### 3.3.1.2 Pasir

Pasir yang digunakan akan sangat berpengaruh terhadap berhasil tidaknya proses fluidisasi dan pembakaran yang akan dilakukan. Dalam menentukan jenis pasir yang akan digunakan pada alat FBC UI ini sebaiknya menggunakan pasir silika atau pasir kuarsa untuk tujuan mendapatkan fluidisasi yang baik dengan densitas partikelnya kurang lebih 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 untuk menaikkan temperaturnya.

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

Tabel 3.4 *Specific Heat* berbagai substansi

Sumber : <http://apollo.lsc.vsc.edu/>

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

pasir silika	0,20	838
pasir kuarsa	0,19	795
granit	0,19	794

Tabel 3.5 Sifat fisik, termal, dan mekanik pasir silika

Sumber: <http://www.azom.com/>

<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>

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 mendapatkan pencampuran yang baik bila dibandingkan dengan pasir *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  $\mu\text{m}$ .

Pasir yang terpilih tersebut kemudian diperoleh dengan melakukan pengayakan bertingkat. Ayakan (*sieve*) bertingkat digunakan untuk melakukan pengamatan terhadap nomor kehalusan butiran (*grain fineness number*), dan dapat



dilihat seperti pada tabel 3.3 yang mana terdapat ukuran lubang ayakan (*mesh*) menurut standar di Amerika. Berdasarkan tabel tersebut maka partikel pasir yang berkisar antara 300  $\mu\text{m}$  sampai 500  $\mu\text{m}$  adalah partikel pasir dengan ukuran diameter partikel pasir antara *mesh* 35 sampai *mesh* 50.

Tabel 3.6 Distribusi ukuran pengayakan pasir silika

Sumber: AGSCO silica sand technical data sheet

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

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



Gambar 3.28 Pasir silika mesh 40-50 yang digunakan pada FBC UI

Beberapa keterangan yang harus diperhatikan ialah spesifikasi kondisi dari hambaran 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 hambaran pasir ( $d_b$ ) =  $63,5 \text{ cm} = 0,635 \text{ m}$
- tinggi hambaran pasir (*bed height*) =  $7,5 \text{ cm} = 0,075 \text{ m}$

### 3.3.1.3 Perlengkapan dan Peralatan

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

#### 1. *Generator Set*

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



Gambar 3.29 Generator set yang digunakan

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

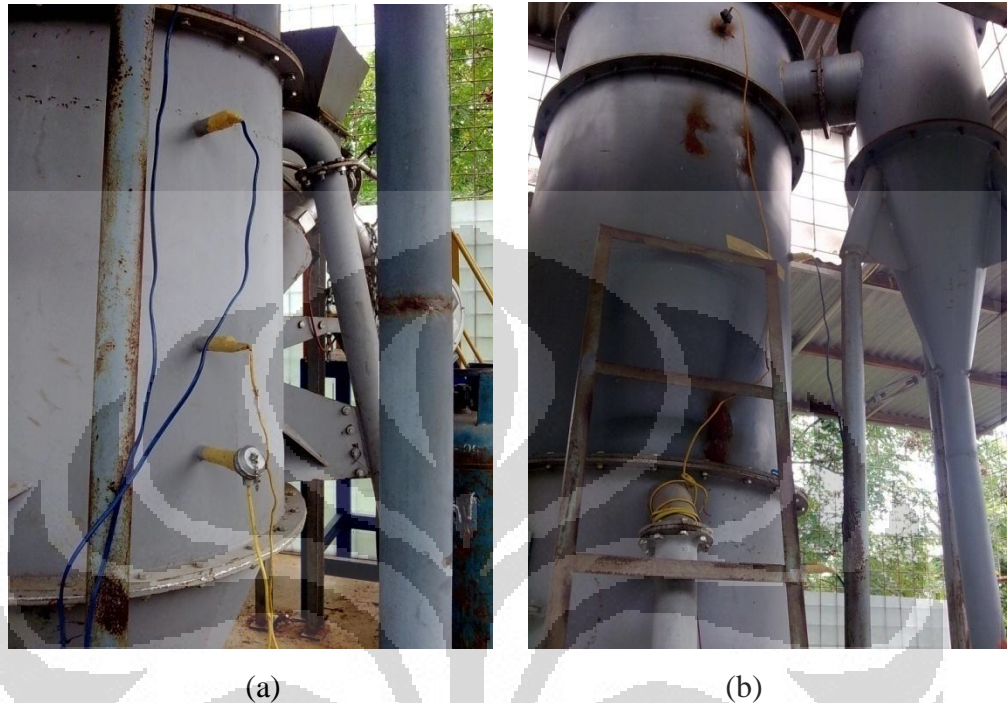
- *rated voltage* : 220 V
- *rated frequency* : 50 Hz
- *peak power* : 4 kVA
- *rated power* : 3,5 kVA
- *power factor* : 1,0
- *fuel consumption* : 2 litre / hour (bensin)

## 2. Termokopel

Jenis termokopel yang digunakan di sini adalah termokopel tipe K. Lima termokopel yang ada sebelumnya sudah dikalibrasi oleh mahasiswa peneliti untuk keperluan skripsi di lab gasifikasi. Termokopel itu dimasukkan satu persatu pada reaktor FBC dengan konfigurasi ketinggian yang berbeda-beda diukur dari batas tengah distributor FBC yang ada (T2 paling dekat dengan hamparan pasir dan T5 paling jauh dari hamparan pasir. Ketinggian Termokopel :

- T1= (dibawah distributor) 31,5 cm;
- T2= 3,5 cm;
- T3=24,5 cm;
- T4=63,5cm;

T5=144,5cm)



Gambar 3.30 Konfigurasi termokopel (a). T1 - T3, dan (b). T4 – T5

### 3. *Temperature Data Logger*

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



Gambar 3.31 *Temperature data logger*

#### 4. Timbangan (*weight scale*)

Timbangan digunakan untuk mengukur massa dari bahan bakar baik cangkang kelapa ataupun ranting pohon yang digunakan untuk pembakaran dan untuk mengukur massa hamparan pasir yang akan digunakan.



Gambar 3.32 Timbangan dengan skala maksimum 5 kg

#### 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 3.33 *Control panel* yang digunakan untuk feeder dan blower

### 3.4 Standar Operasi Alat pengujian

#### 3.4.1 Sistem Feeder

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



Gambar 3.34 Sistem feeder pada *fluidized bed combustor* UI

Berikut ini beberapa spesifikasi pada sistem feeder tersebut :

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

Tabel 3.7 Spesifikasi motor feeder

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

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

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

1. Pastikan bahwa kabel motor feeder sudah terhubung dengan tepat ke panel kontrol untuk feeder, sambungkan setiap kabel sesuai dengan warnanya.
2. Sambungkan konektor dari panel kontrol ke generator set yang sudah menyala untuk mendapatkan sumber tegangan. Gunakan *test pen* untuk memastikan sisi konektor terhubung dengan sisi *generato set* yang benar.

3. Aktifkan *switch* utama dan *circuit breaker* 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.

Namun pada percobaan ini sistem *feeder* tidak digunakan. Hal ini dikarenakan listrik yang tersedia dari *generator set* tidak mencukupi untuk menyuplai kebutuhan listrik untuk seluruh sistem *fluidized bed combustor* UI. Untuk mengatasi hal ini, bahan bakar dimasukkan melalui pintu pada bagian *feeder* yang mengarah ke ruang bakar, sehingga bahan bakar langsung turun ke dalam ruang bakar.

#### 3.4.2 Blower

Blower digunakan sebagai alat untuk menyuplai udara yang dibutuhkan agar terjadi proses fluidisasi dan juga terjadi 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 tekanan yang lebih besar dari pada nilai *pressure drop* (penurunan tekanan) saat melewati distributor dan hamparan pasir.





Gambar 3.35 Ring blower pada *fluidized bed combustor* UI

Spesifikasi dari blower yang digunakan adalah sebagai berikut ini :

Tabel 3.8 Spesifikasi teknis ring blower

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

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

1. Pastikan bahwa kabel dari blower sudah terhubung dengan tepat ke panel kontrol untuk blower, sambungkan setiap kabel sesuai dengan warnanya.

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

#### 3.4.3 Sistem Burner

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

1. Buka *ball valve* utama gas masuk.
2. Atur tekanan kerja gas pada 20~30 mbar (200 ~ 300 mm  $H_2O$ ).
3. Putar saklar *burner control* ke posisi *on* untuk mengaktifkan *burner control*. Pada tahap awal, *burner control* melakukan pengecekan status awal apakah ada tekanan udara palsu dan apakah ada api yang terdeteksi *UV sensor*. Bila

gejala ini ditemukan, maka indikator burner *misfire* dan lampu merah reset akan menyala.

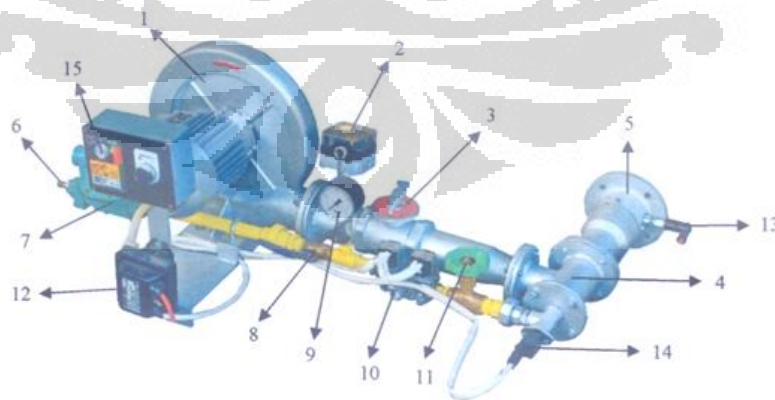
4. Blower akan berputar untuk menghasilkan tekanan yang stabil. Apabila tekanan blower di bawah nilai setting dari *air pressure switch* maka sistem akan di *cut-off* dan indikator *cut-off* akan menyala.
5. Setelah 10 detik proses *pre-purge* yang berguna untuk mengusir gas yang terperangkap (bila ada), maka *solenoid valve* untuk gas akan membuka. Pada saat bersamaan *ignition trafo* bekerja untuk membentuk *spark* listrik pada elektroda busi. Pertemuan campuran udara dan gas dengan percikan listrik akan menghasilkan nyala api. Atur besarnya volume gas untuk api pilot dengan memutar *needle valve* sampai api menyala konsisten.
6. *UV sensor* akan mendeteksi nyala api dan mengirim sinyal ke *burner control*. *Burner control* akan tetap membuka *solenoid valve* sehingga api tetap menyala. Tapi bila pembacaan *UV sensor* kurang maka sistem akan di *cut-off* menjadi *misfire*. Bila hal ini terjadi, segera cari tahu apa penyebabnya dan segera tangani. Ulangi urutan proses (*sequence*) dari awal dengan menekan tombol reset atau memutar saklar *burner control* ke posisi *off* lalu nyalakan lagi dari awal.
7. Setelah nyala api terbentuk dapat dilakukan penyetelan untuk mendapat mutu nyala api yang bagus dan panjang api yang diinginkan.
8. Jika ingin mematikan burner, putar saklar burner ke posisi *off* dan pastikan bahwa api burner sudah mati semua.
9. Tutup *ball valve* utama gas masuk dan tutup katup utama pada tabung gas LPG.

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

- Penyetelan mutu api :
  - a. Atur 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. Atur manual *air damper* pada posisi buka setengah yaitu skala nomor 5. 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 *damper* tidak berubah.
- Penyetelan panjang api :
    - a. Atur *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 atur kembali *damper* udara untuk mendapatkan mutu nyala api yang bagus.

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



Gambar 3.36 Bagian-bagian *hi-temp premixed burner*

Keterangan : 1. Blower

9. Gas pressure gauge

2. Air pressure switch
3. Air damper
4. Premixer
5. Head burner
6. Gas inlet
7. Gas second regulator
8. Gas main valve
10. Combination solenoid valve
11. Gas needle valve
12. Ignition trafo
13. Spark plug
14. UV sensor
15. Burner control

Tabel 3.9 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 <i>m<sup>3</sup>/jam</i> maks
	LNG	8 <i>m<sup>3</sup>/jam</i> maks
Blower	Tekanan Statik	200-300 <i>mmH<sub>2</sub>O</i>
	Debit Aliran	2,5 <i>m<sup>3</sup>/min</i>
Sumber Daya	Sistem Burner	220 V; 0,75 <i>kW</i>

### 3.5 Prosedur Pengujian Pembakaran

Pengujian pembakaran dengan bahan bakar biomassa (cangkang kelapa) yang dilakukan bertujuan untuk mendapatkan karakteristik distribusi panas serta daya panas yang dihasilkan pada alat *fluidized bed combustor* UI dengan melihat hubungan-hubungan antara temperatur di setiap titik termokopel tiap satuan waktu, ketinggian termokopel, ukuran partikel pasir, ketinggian distributor serta lamanya waktu yang dibutuhkan untuk melakukan sebuah pengujian ini sampai selesai.

#### 3.5.1 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*). Penjelasan nya 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 untuk mengalirkan udara.
- Termokopel terletak di lima titik ketinggian pada ruang bakar dan *freeboard area* (area di atas pasir) dengan ketinggian yang sudah disebutkan di sub bab persiapan sebelumnya.
- Termokopel terhubung ke *temperature data logger*, dan *data logger* juga terhubung ke generator set untuk dapat membaca nilai suhunya di setiap termokopel.
- Untuk posisi masing-masing alat diletakkan dengan sebaik mungkin, sehingga tidak ada kabel yang tertekan, terikat, ataupun tertarik. panel kontrol diletakkan dengan sebaik mungkin agar dapat dengan mudah melakukan pengaturan.



Gambar 3.37 Rangkaian seluruh alat untuk melakukan pengujian pembakaran

### 3.5.2 Prosedur Pengambilan Data Pembakaran

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

#### 3.5.2.1 Prosedur pemanasan awal pembakaran

1. Pastikan semua persiapan, rangkaian dan posisi alat sudah dilakukan dengan benar sesuai dengan yang sudah disebutkan sebelumnya.
2. Menyalakan blower sebagai penyedia udara saat menyalakan burner dan saat proses pembakaran berlangsung, serta untuk proses fluidisasi pasir agar panasnya tersebar merata di seluruh pasir. Digunakan flow rate udara yang 3400 rpm~0,095 m<sup>3</sup>/min.
3. Menyalakan *burner* untuk memanaskan *bed* (pasir) hingga *bed temperature* mencapai suhu sekitar 400 °C.

4. Setelah itu memasukkan solid fuel berupa cangkang kelapa ke dalam ruang bakar sampai temperatur *bed* mencapai suhu sekitar 750 – 800 °C. Temperatur pada *data logger* dicatat setiap menitnya.
5. Kemudian burner dimatikan secara perlahan dan temperatur bed akan perlahan menurun dan ditunggu hingga suhunya stabil (kondisi steady) berada diantara 700 – 750 °C. Pada temperatur ini bahan bakar cangkang kelapa maupun ranting pohon sudah dapat terbakar dengan sendirinya (self-sustained combustion). Temperatur dicatat setiap menitnya.

#### 3.5.2.2 Prosedur pengambilan data pembakaran

1. Setelah mencapai temperatur stabil tersebut, bahan bakar yang sudah disiapkan dengan sejumlah massa tertentu (0,25 kg, 0,5 kg, 0,75 hingga 2 kg) dimasukkan ke dalam ruang bakar.
2. Dimulai dari massa 0,25 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 masukkan bahan bakar dengan massa 0,5 kg. Perubahan temperatur setiap menitnya dicatat dan lakukan proses yang sama hingga bahan bakar massa 2 kg.
3. Setelah semua bahan bakar tersebut dimasukkan, perubahan temperaturnya terus dicatat setiap menitnya sampai pada akhirnya suhu di ruang bakar turun terus-menerus secara perlahan karena sudah tidak dimasukkan bahan bakar lagi. Saat temperatur *bed* sudah cukup rendah sekitar 500 – 550 °C, perubahan temperatur tidak dicatat lagi.



## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

*Fluidized bed combustor (FBC)* di Universitas Indonesia merupakan unit pemanfaatan limbah yang masih dalam pengembangan. Pengidentifikasi masalah – masalah setiap perubahan yang terjadi pada alat FBC UI menjadi aspek yang harus diperhatikan sehingga dengan begitu dapat mengetahui masalah yang terjadi pada beberapa sistem dengan mengetahui kelemahan dan kekurangan dari beberapa desain yang sudah jadi dan dipakai sampai sekarang sehingga di masa akan datang dapat disempurnakan menjadi alat yang efektif dan menuju perubahan desain yang optimal sehingga akhirnya dapat dijadikan pembangkit listrik yang diharapkan. Selain itu dengan mengetahui dataa pengujian terakhir dengan begitu dapat melihat perkembangan dari kemajuan alat *fluidized bed combustor* universitas Indonesia

#### 4.1 Review Kinerja dari Perkembangan dan Modifikasi FBC UI

##### 4.1.1 Sistem *Feeding*



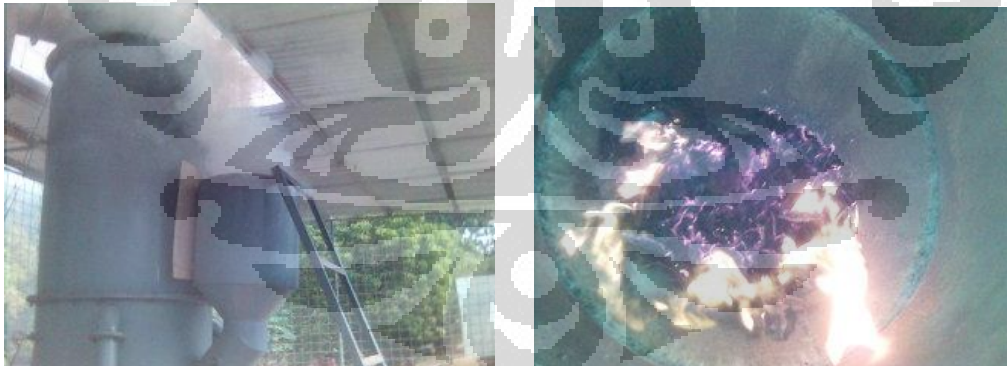
Gambar 4.1 *Gravity Chute*

Desain awal *feeder* yang digunakan adalah jenis *Gravity Chute*. Kelebihan *feeder* jenis ini adalah objek yang akan dibakar adalah sampah, sehingga tidak perlu tenaga berlebih, karena berat yang dimiliki sampah tersebut tidak terlalu besar.

Selain itu, *feeder* jenis ini lebih murah dibandingkan *feeder* jenis lain, karena tidak adanya sistem tambahan dalam proses kerjanya. Akan tetapi pada pelaksanaannya terdapat beberapa permasalahan yang timbul pada sistem feeding jenis ini, karena pemutar yang digunakan pada *rotary valve* adalah menggunakan mekanisme manual dengan tangan manusia sehingga membuat kecepatan putaran yang dihasilkan tidak konstan.

Permasalahan yang ada antara lain :

- Sampah sering kali tersangkut pada *feeder*. Ketika dimasukkan, sampah-sampah dengan bentuk panjang seperti ranting sering kali tersangkut pada rotary valve-nya sehingga rotary valve tersebut tidak dapat diputar.
- Sampah terbakar terlebih dahulu pada *feeder*. Karena tersangkut seperti yang dijelaskan pada poin di atas sehingga bara-bara pasir silika yang beterbangan membakar sampah yang tersangkut pada *feeder*.
- Laju umpan masuk (*feeding rate*) tidak konstan. Pada *feeder* jenis rotary valve, sampah dimasukkan ke dalam reaktor secara manual sehingga *feeding rate* tidak konstan yang dapat menyebabkan temperatur reaktor tidak stabil



Gambar 4.2 Sampah yang terbakar sebelum masuk ke ruang bakar

Setelah *feeder* bertipe *Gravity Chute* mengalami banyak masalah, maka desain diubah secara total dengan menggunakan *screw feeding* berbentuk screw conveyor dengan tipe auger. Dengan tipe *feeder* seperti ini maka dimungkinkan laju aliran bahan bakar akan tetap stabil dengan jumlah muatan masukan bahan bakar

yang konstan. Dengan *feeder* jenis ini tidak ada kendala mengenai macetnya jalur masukan *feeder* akibat tersangkutnya bahan bakar. Karena pada jenis screw conveyor itu jarak antara selubung dan screw cukup presisi sehingga tidak adanya bagian yang akan tersangkut. Dan juga dengan jenis *feeder* seperti ini permasalahan seperti terbakarnya bahan bakar di ruang *feeder* tidak terjadi, karena tidak terjadinya kontak langsung antara hamparan pasir panas dengan bahan bakar di ruang *feeder*.



Gambar 4.3 Screw conveyor jenis auger



Gambar 4.4 *Screw Feeding* yang sudah terpasang

Pada desain tersebut terdapat, sekat terdapat sebuah plat besi yang di beri ruang agar bisa digerakkan membuka dan menutup. Namun pada kenyataannya saat alat mulai beroperasi maka terjadi berbagai macam masalah, yaitu :



Gambar 4.5 Sekat pada jalur aliran *feeder*.

- Akibat adanya aliran panas secara konduksi dan konveksi yang berasal dari reactor, sekat yang terbuat dari plat besi ini mengalami pemuaihan, permukaan plat menjadi panas sehingga sulit untuk di buka dan di tutup sesuai dengan harapan yang diinginkan.
- Karena sulitnya proses buka tutup pada sekat di jalur masukan *feeder* ini maka pada saat pengoperasian, sekat ini di buka dan tidak di tutup sehingga yang seharusnya sekat ini berfungsi untuk menghalangi keluarnya gas buangan hasil pembakaran tidak dapat berfungsi.

Selain itu, pada desain ini 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 masukan bahan bakar macet maka satu-satunya jalan untuk memasukkan bahan bakar hanya melalui pintu pada reactor dan hal ini sangat berbahaya karena saat pengoperasian reactor bisa mengeluarkan pasir panas beserta gas pembakaran.

Oleh karena ada masalah yang telah disebutkan maka terjadi modifikasi *feeder fluidized bed combustion* pada tahun 2010 dibuat modifikasi pada tugas akhir Anton atmaja dan Reynaldo. Desain modifikasi dilakukan untuk dapat mengurangi permasalahan yang terjadi seperti yang telah disebutkan sebelumnya.



Gambar 4.6 *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 modifikasi ini ternyata dapat 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.

Akan tetapi, dalam pengujian terakhir masih ada masalah yang terjadi, jumlah bahan bakar yang dimasukkan ke dalam screw feeding akan berkurang dikarenakan tersangkutnya screw feeding. Tahanannya laju bakar yang terjadi akibat aliran panas ketika suhu keluaran bahan bakar mencapai kondisi optimum. Selain itu feeder yang digunakan terhenti ketika berjalannya pengujian dikarenakan suplai daya yang dibutuhkan terlalu besar melebihi kapasitas diberikan oleh daya genset. Oleh karena itu, diperlukan jaringan listrik yang memenuhi daya yang dibutuhkan ketika pengujian alat.

#### 4.1.2 Sistem Suplai Udara

Fluidized bed combustor UI, pertama kali menggunakan blower yang model lama (blower keong), karena dari data dari skripsi sebelumnya terjadi fluidisasi kurang baik, maka kemudian digantikan dengan model baru, dimana blowernya digerakkan oleh motor yang memiliki daya sebesar 1,5 HP.



Gambar 4.7 Blower I



Gambar 4.8 Blower II

Karena data dari skripsi sebelumnya belum sempurna fluidisasinya maka untuk blower diganti dengan spesifikasi dari blower yang ada dapat dilihat berikut ini:

Tabel 4.1 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



Gambar 4.9 Ring Blower pada *Fluidized Bed Combustor* UI

Dari skripsi sebelumnya dengan blower ini, maka blower pada saat operasi pada suhu 800<sup>0</sup> C

▪ pada kondisi operasi

$$Q = 0.017 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 0.99 \text{ m}^3/\text{min}$$

Terlihat dari data maka ring blower yang dipakai sampai sekarang ini sudah mencapai fluidisasi yang baik karena untuk terjadi fluidisasi debit aliran minimum untuk melakukan operasi adalah  $0,99 \text{ m}^3/\text{min}$  sedangkan di spesifikasi adalah  $6,2 \text{ m}^3/\text{min}$  maka blower yang sekarang sudah memenuhi standar sehingga terlihat dari eksperimen terakhir fluidisasi baik.

### 4.1.3 Sistem Pemanasan

#### 4.1.3.1 Burner

Desain awal gas burner pada alat *Fluidized bed combustor (FBC)* ini menggunakan *stick burner*. Burner digunakan sebagai pemanas udara yang akan mengalir ke dalam ruang bakar utama, untuk kemudian dapat memanaskan pasir sampai temperatur tertentu.



Gambar 4.10 *Stick Burner*

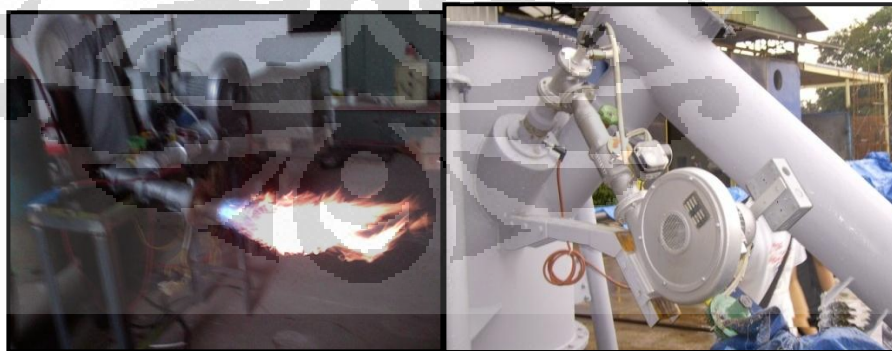
Dalam pengoperasian alat *Fluidized bed combustion* burner tidak akan beroperasi sepenuhnya, karena hanya berfungsi sebagai pemanas awal pasir untuk mencapai temperatur pembakaran. Setelah mencapai temperatur tersebut, *burner* ini tidak akan bekerja lagi. Tapi, apabila temperatur menunjukkan penurunan temperatur, maka *burner* akan dinyalakan kembali

Proses pemanasan dengan menggunakan *stick burner* ini mempunyai beberapa kelemahan dan memiliki beberapa masalah dalam proses pengoperasiannya. Permasalahan yang timbul antara lain :



1. Metode penyalaan tidak aman, proses yang berbahaya ketika menyalakan burner, yaitu dengan menggunakan korek gas. Sedangkan proses penyalaan dengan menggunakan busi tidak berhasil, karena api yang dihasilkan terlalu kecil.
2. Suply udara ke burner tidak terkontrol sehingga nyala api kurang stabil
3. Ketika sampah sudah mulai terbakar di ruang bakar, burner sering mati karena kurangnya pasokan oksigen.
4. Mekanisme pemanasan awal tidak efisien, gas burner masih belum optimal bekerjanya, karena pemanasan pasir dilakukan melalui pintu utama ruang bakar. Sehingga ada sebagian panas keluar dari pintu tersebut selama proses pembakaran awal dengan gas LPG.

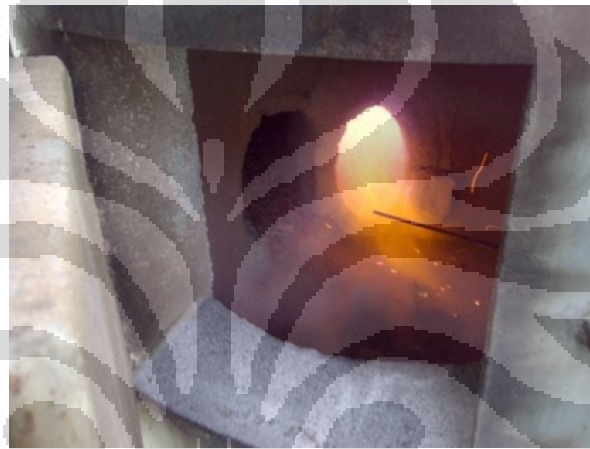
Setelah stick burner mempunyai banyak permasalahan maka pada tahun 2008 maka desain burner diubah untuk menghasilkan pemanasan awal pasir dan bahan bakar menjadi efisien dan efektif pada tugas akhir asep dan hans mahasiswa angkatan 2004. Burner yang dipakai di *fluidized bed combustion* UI saat ini ialah jenis *hi-temp premixed burner* yang berfungsi sebagai alat pemberi kalor atau pemanas untuk menaikkan temperatur pasir saat melakukan *start up* awal pengujian pembakaran. Akan tetapi, setelah mencapai suhu yang cukup tinggi di ruang bakar, maka burner dapat dimatikan.



Gambar 4.11 *Hi-Temp Premixed Burner*

Dengan burner yang baru terlihat pada skripsi sebelumnya eksperimen pengujian pembakaran didapatkan temperatur yang lebih baik . Pemanasan awal yang

efektif, nyala api menjadi stabil dan metode penyalaan pun menjadi aman. Namun masih terdapat kekurangan di desain ini yaitu posisi peletakkan burner yang kurang sempurna, bisa dilihat digambar terkadang flame tidak dapat menyentuh pasir yang terfluidisasi akibatnya distribusi panas pada pasir tidak merata akhirnya menyebabkan bahan bakar tidak terbakar secara sempurna. Oleh karena itu, diharapkan pada desain yang akan datang diharapkan posisi burner menjadi lebih akurat sehingga diharapkan pemanasan pasir yang baik dan pembakaran menjadi lebih sempurna.



Gambar 4.12 Posisi flame pada saat burner nyala

#### 4.1.3.2 Distributor

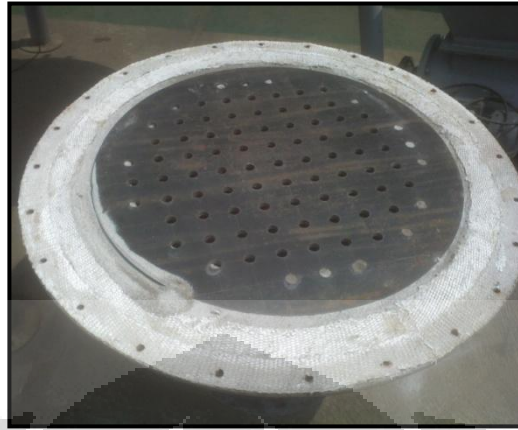
Distributor digunakan untuk untuk mendistribusikan aliran udara dari blower secara seragam pada keseluruhan penampang reaktor sehingga hamparan pasir yang ditopang oleh distributor tersebut terjadi fluidisasi. Pada awalnya distributor *fluidized bed combustor* UI adalah seperti gambar dibawah ini :



Gambar 4.13 Distributor I

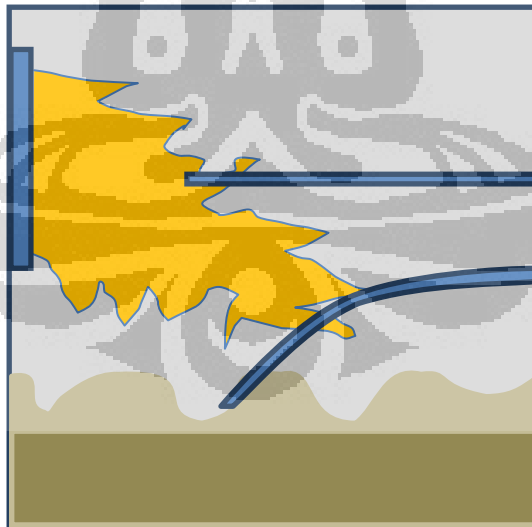
Distributor selain untuk fluidisasi, digunakan juga sebagai indikator pemanasan awal pasir. Ketika aliran udara yang masuk melewati distributor ke dalam ruang bakar menimbulkan distribusi panas pasir merata maka akan terjadi fluidisasi yang bagus, akan tetapi jika distribusi panas pasir tidak merata maka fluidisasi menjadi tidak baik. Pada distributor pertama dibuat ada masalah yang terjadi yaitu pemanasan awal yang kurang baik akibatnya distribusi panas kurang merata dikarenakan ada kecenderungan aliran udara melewati celah antara distributor melewati tepi penampang distributor. Dan juga pada lubang tengah distributor tidak adanya celah lubang orifis sehingga mengakibatkan fluidisasi dan pemanasan pasir kurang baik.

Untuk mengantisipasi kecenderungan masalah tersebut maka terjadi modifikasi selanjutnya yaitu menambah lubang orifis di bagian tengah distributor selain itu, penampang distributor distributor dibuat lebih besar dengan tujuan agar tidak ada aliran udara yang melewati tepi distributor. Dengan modifikasi ini pemanasan pasir dan fluidisasi pasir menjadi lebih baik.



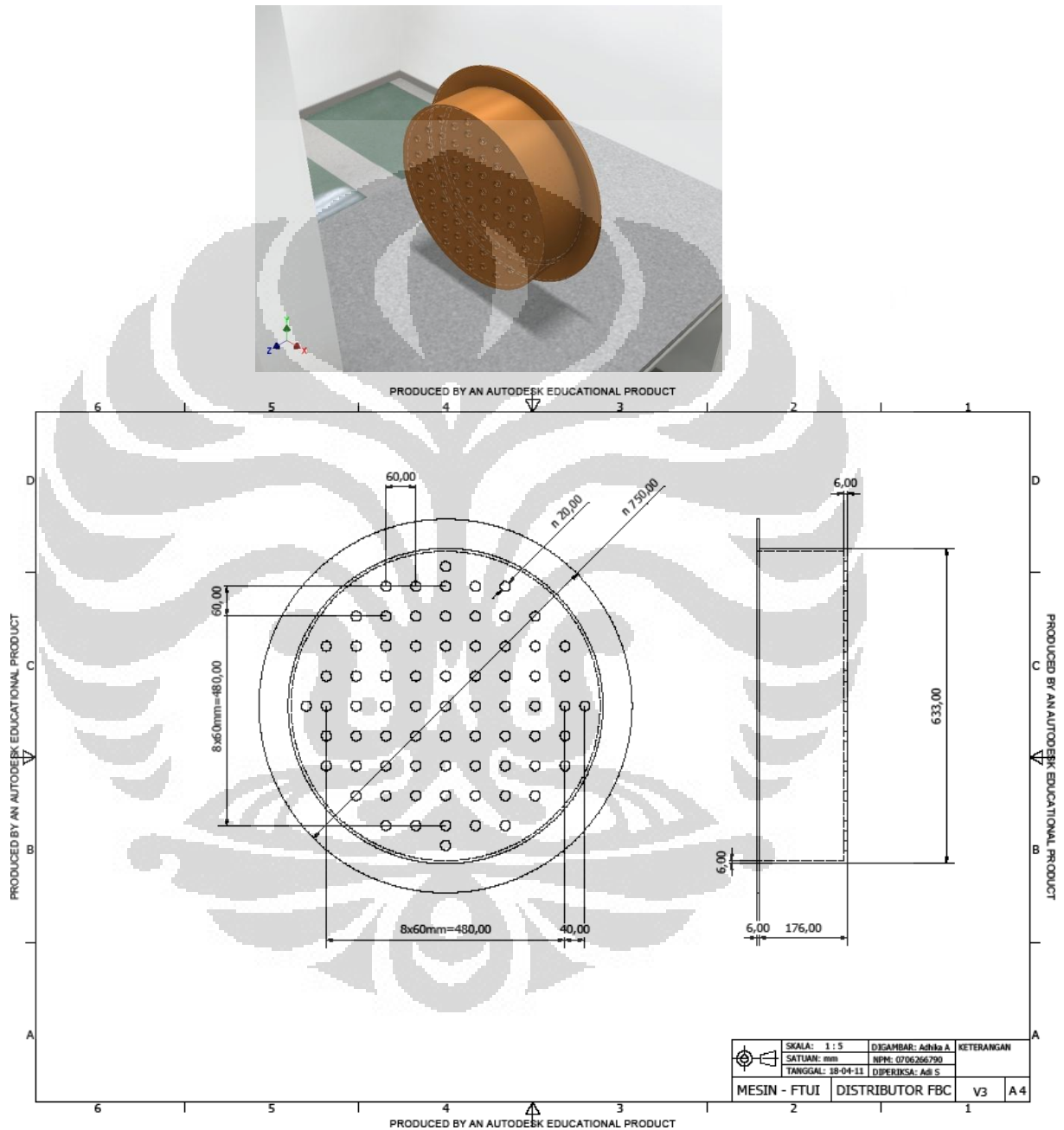
Gambar 4.14 Distributor II

Berdasarkan data skripsi terakhir tahun 2010, pengujian didapat temperatur pemanasan awal pasir menjadi lebih baik mencapai suhu T2 pada pasir  $118^{\circ}\text{C}$  pada 30 menit pertama. Namun, dilihat dari data itu, suhu pasir belum optimal karena belum mencapai suhu  $200^{\circ}\text{C}$ . Selain itu, pada suhu T2 di pasir ternyata bukan kondisi sesuai karena termokopel tidak menyentuh pasir, jadi tidak menggambarkan suhu pasir sesungguhnya.



Gambar 4.15 Posisi termokopel T2 dengan distributor lama

Oleh karena itu, untuk mengatasi masalah ini maka dilakukan modifikasi kembali dengan menaikkan kedudukan distributor sebesar 17 cm tanpa mengubah desain lama.

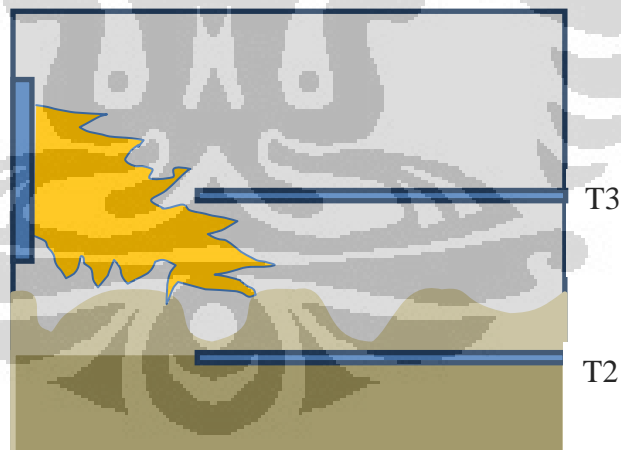


Gambar 4.16 Desain distributor baru yang digunakan sekarang di FBC UI



Gambar 4.17 Distributor baru hasil pabrikasi

Pertimbangan dengan distributor baru ini, diharapkan peletakkan T2 yaitu temperature pasir lebih akurat dan pemanasan awal pasir lebih cepat. Selain itu, temperatur pasir yang mengenai flame benar-benar kondisi yang tepat bukan temperature termokopel T2 yang terkena flame langsung dari burner.



Gambar 4.18 Posisi termokopel T2 dengan distributor baru

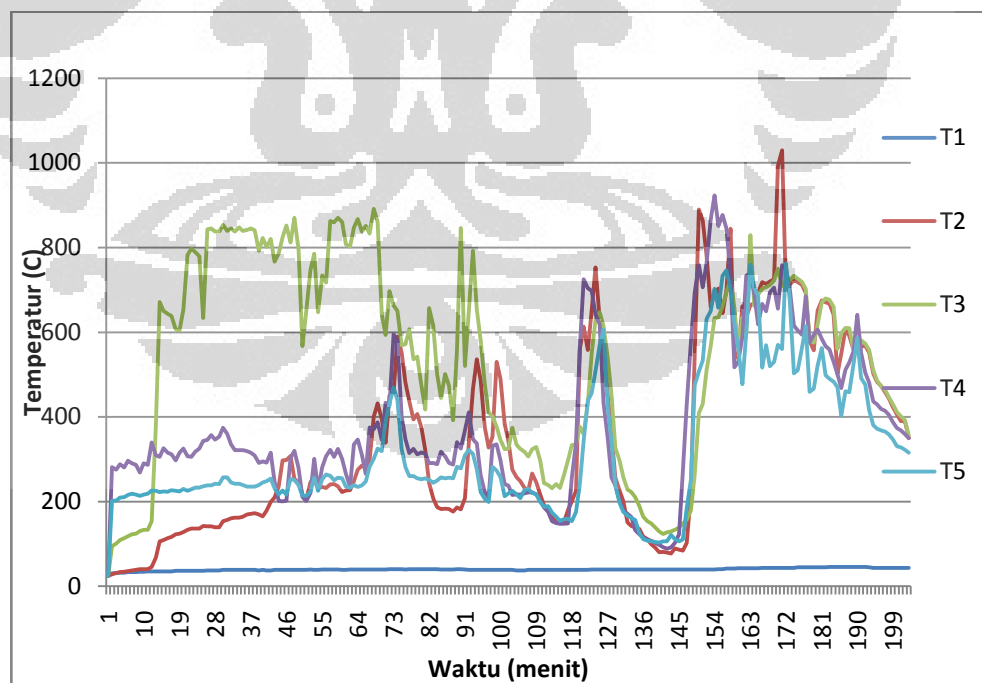
#### 4.2 Pengujian Bahan Bakar Biomassa pada FBC UI

Berdasarkan dari perkembangan modifikasi pada FBC UI, untuk mengetahui kemajuan perkembangan fenomena yang terjadi pada kondisi sekarang, maka dilakukan pengolahan data dan analisa data yang disajikan dalam setiap bagian dilakukan nilai suplai udara blower yang berbeda : 3400 rpm~ 0,095 m<sup>3</sup>/s dengan menggunakan pasir mesh 40-50 mesh.

Beberapa parameter yang harus diperhatikan dalam percobaan ini:

- Suplai aliran udara ke ruang bakar (0,095 m<sup>3</sup>/s)
- Ketinggian Termokopel (T1= (dibawah distributor) 31,5 cm; T2= di atas 3,5 cm; T3=24,5 cm; T4=63,5cm; T5=144,5cm)
- LHV cangkang kelapa (29400 kJ/kg)
- Percobaan dilakukan dengan *feed rate* yang bervariasi

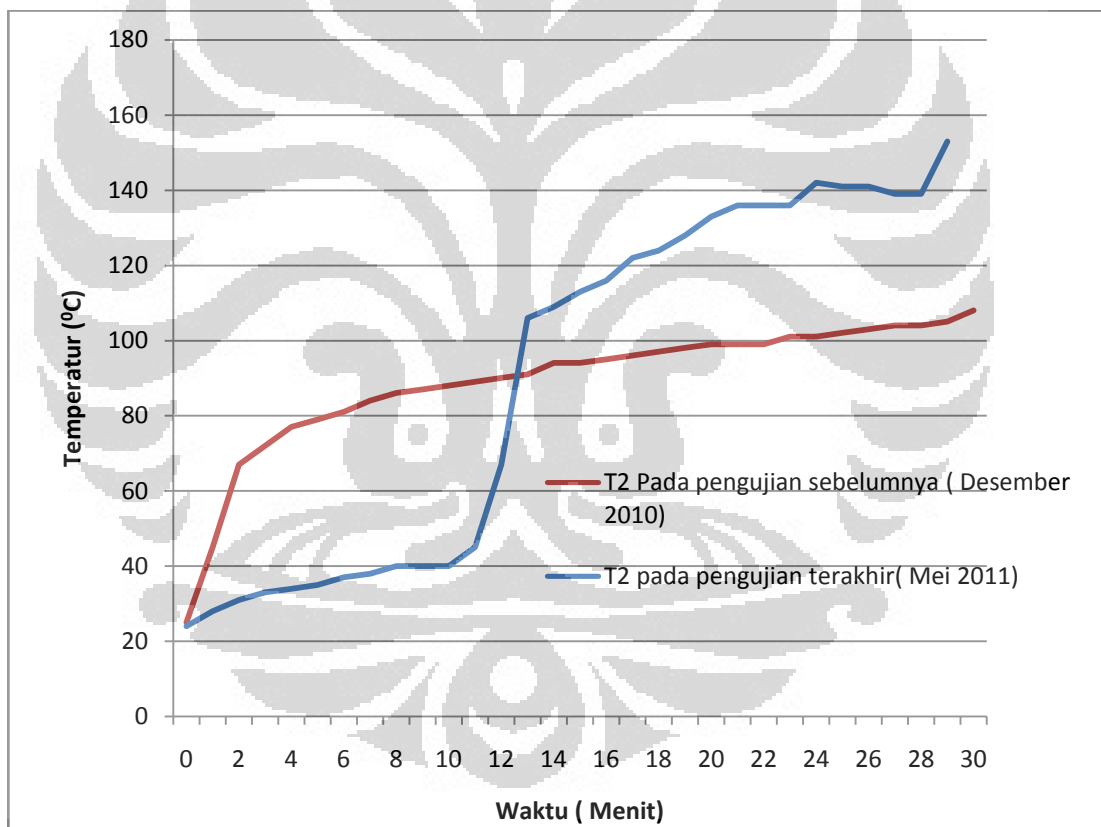
Data akan diplot ke dalam grafik distribusi temperatur sehingga dapat dilihat pola kurva karakteristik pembakarannya. Grafik distribusi temperatur berikut merupakan keseluruhan proses pengujian mulai dari pemanasan awal hingga *self combustion* untuk bahan bakar cangkang kelapa.



Gambar 4.19 Grafik Distribusi temperatur pembakaran cangkang kelapa dengan suplai udara 0,095 m<sup>3</sup>/s

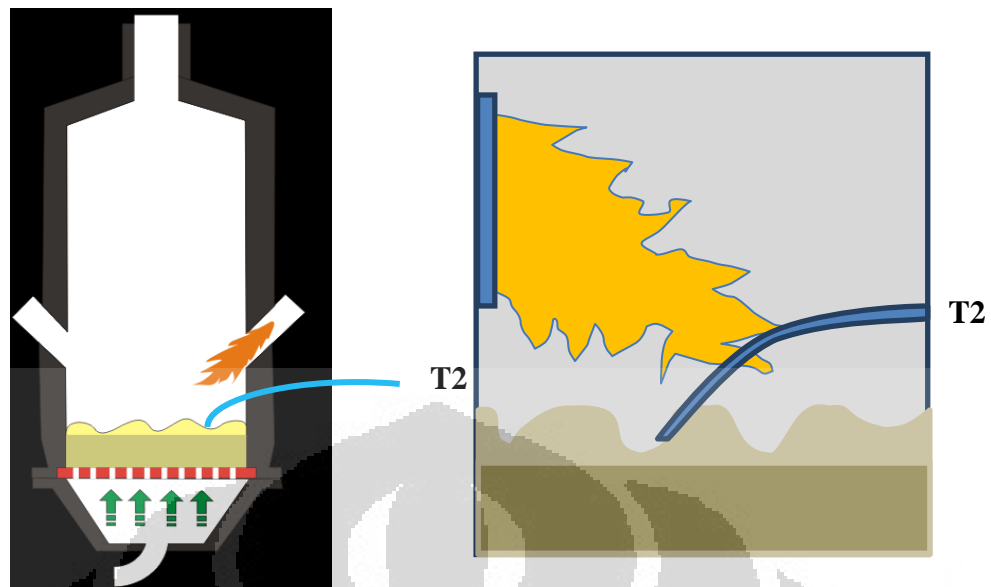
#### 4.2.1 Pemanasan Awal Sebelum Bahan Bakar Biomassa Dimasukkan

Pada prosedur pengujian, dibutuhkan pemanasan awal pasir selama 30 menit sebelum bahan bakar dimasukkan, pada pengujian terakhir yang dilakukan didapat bahwa untuk dalam Termokopel pada T2 adalah indikator kapan masuknya bahan bakar. Setelah dilakukan eksperimental terakhir didapatkan dalam 30 menit suhu di T2 mencapai  $153^{\circ}\text{C}$  sedangkan pada tahun sebelumnya didapatkan dalam 30 menit hanya mencapai suhu  $108^{\circ}\text{C}$ . Ini menandakan bahwa terjadi kemajuan dalam pemanasan awal pasir sekitar  $45^{\circ}\text{C}$  lebih tinggi. Kenaikan ini terjadi karena pengaruh distributor yang dinaikkan sekitar 17 cm.

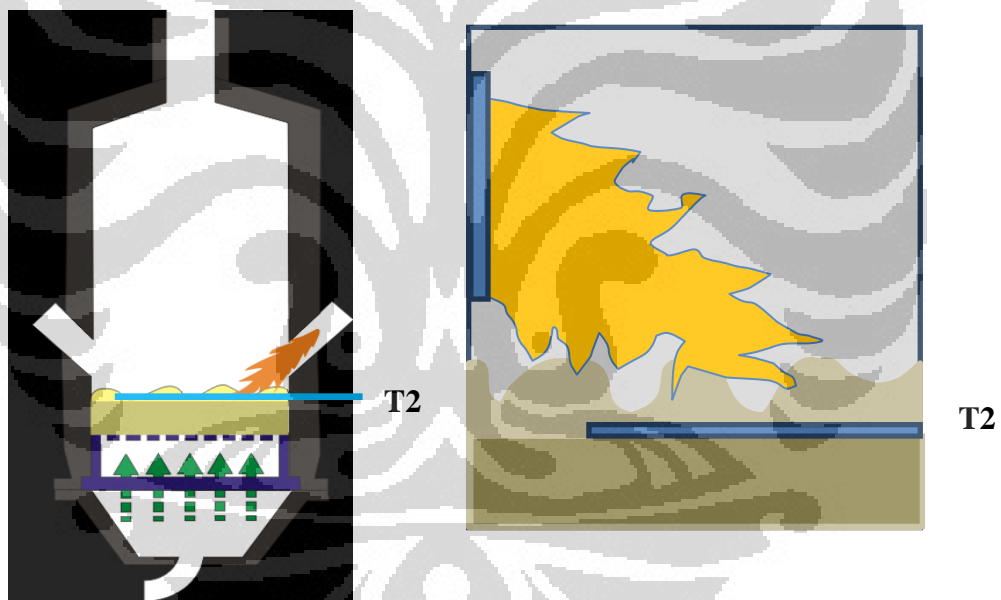


Gambar 4.20 Grafik Perbandingan T2 pengujian terakhir dengan pengujian sebelumnya





Gambar 4.21 Posisi termokopel T2 dengan distributor lama

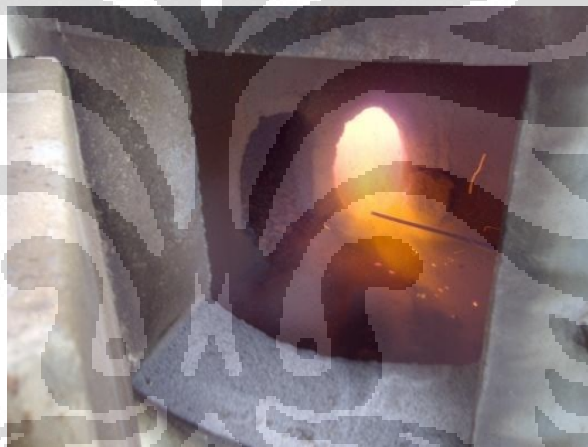


Gambar 4.22 Posisi termokopel T2 dengan distributor baru

Pada percobaan dengan hamparan pasir *mesh* 40-50 distributor yang digunakan telah dinaikkan ketinggiannya sebesar 17 cm sehingga letak Termokopel T2 hanya berada 3,5 cm dari permukaan distributor. Penambahan ketinggian ini dimaksudkan agar letak termokopel T2 terletak tepat pada hamparan pasir agar pembacaan temperatur hamparan pasir menjadi lebih presisi. Karena pada percobaan sebelumnya, letak termokopel T2 terletak pada ketinggian 20,5 cm, sedangkan

ketinggian hamparan pasir hanya sekitar 7,5 cm. Akibatnya menjadi sangat sulit untuk membaca perubahan temperatur pada T2 dengan tepat. Sedangkan temperatur T2 digunakan untuk melihat keadaan pencampuran dan pembakaran bahan bakar yang terjadi pada hamparan pasir.

Selain itu penambahan tinggi distributor juga dimaksudkan agar pemanasan awal menggunakan *gas burner* dapat berjalan lebih cepat. Karena letak hamparan pasir setelah distributor dinaikkan berada tepat dibawah lubang *burner* sehingga diharapkan api yang dihasilkan oleh *burner* dapat langsung mengenai hamparan pasir. Namun pada percobaan, api yang dihasilkan oleh *burner* tidak sampai mengenai hamparan pasir. Hal ini disebabkan api *burner* tertiuip oleh udara dari blower yang melewati hamparan pasir.



Gambar 4.23 Posisi flame pada saat burner nyala (kondisi sekarang)

Rata-rata suhu yang dicapai selama 30 menit pertama proses pemanasan tidak terlalu berbeda jauh pada tiap percobaan yang menggunakan hamparan pasir yang berbeda. Hanya saja temperatur rata-rata T3 pada percobaan yang sebelumnya lebih besar dibandingkan dengan percobaan yang sekarang Temperatur pada T4 dan T5 pada kedua percobaan tidak terlalu jauh berbeda. Hal ini disebabkan oleh panas dari api *burner* lebih banyak mempengaruhi kedua termokopel tersebut.

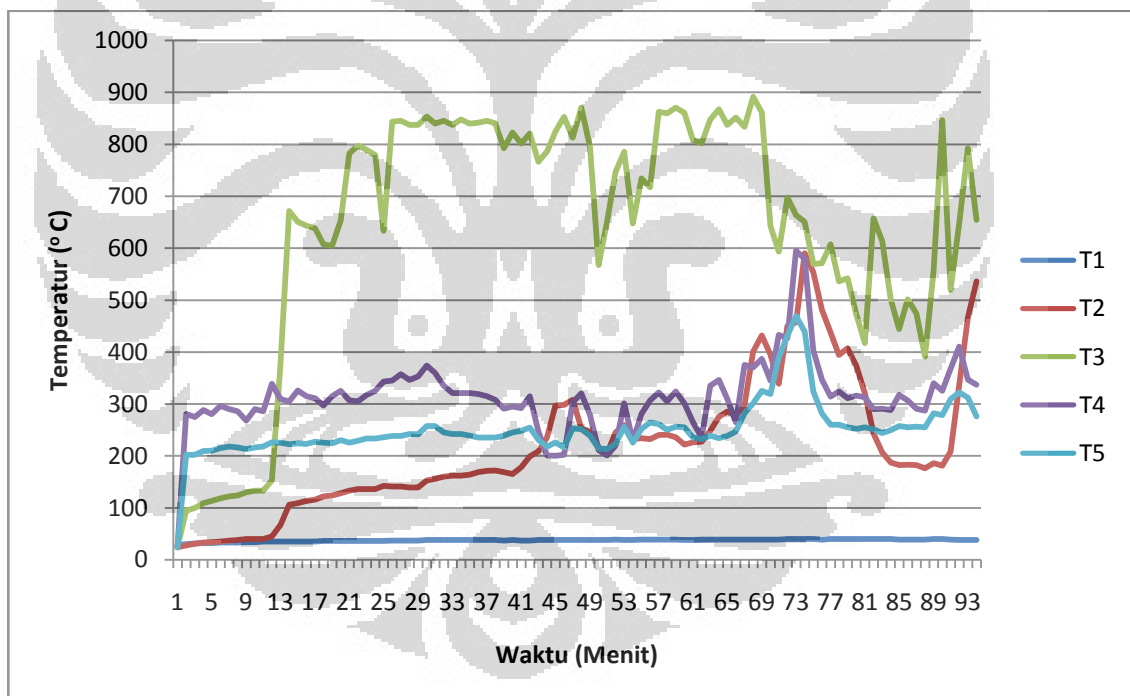
Tabel 4.2 Temperatur rata-rata pemanasan 30 menit pertama

Percobaan	T1	T2	T3	T4	T5
Mei 2011	34,63	90,2	473,06	302,6	218,03
Desember 2010	35,93	89,03	635,61	294,06	215,16

#### 4.2.2 Pemanasan Awal dan Self Combustion

Setelah distribusi temperatur secara keseluruhan maka kemudian diolah kembali menjadi dibagi 2

- Temperatur api yang dihasilkan pemanasan awal
- Temperatur api yang dihasilkan *self combustion*



Gambar 4.24 Grafik distribusi temperatur pemanasan awal cangkang kelapa

Dari data tersebut dapat dilihat untuk melakukan pemanasan membutuhkan waktu 93 menit dengan suhu 466<sup>0</sup>C. Dengan rata-rata temperatur distribusi panas setiap termokopel sebagai berikut :

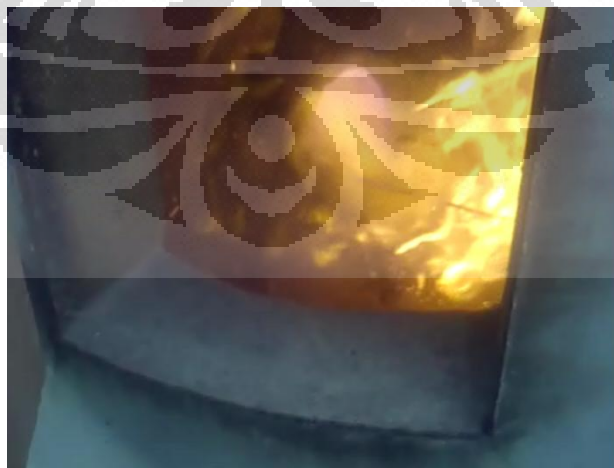
Tabel 4.3 Temperatur rata-rata saat pemanasan awal

Pengujian Mei 2011				
T1	T2	T3	T4	T5
37,42	212.34	641.53	312.68	250.49
Pengujian Desember 2010				
T1	T2	T3	T4	T5
36,93	207,61	636,22	279,02	255,65

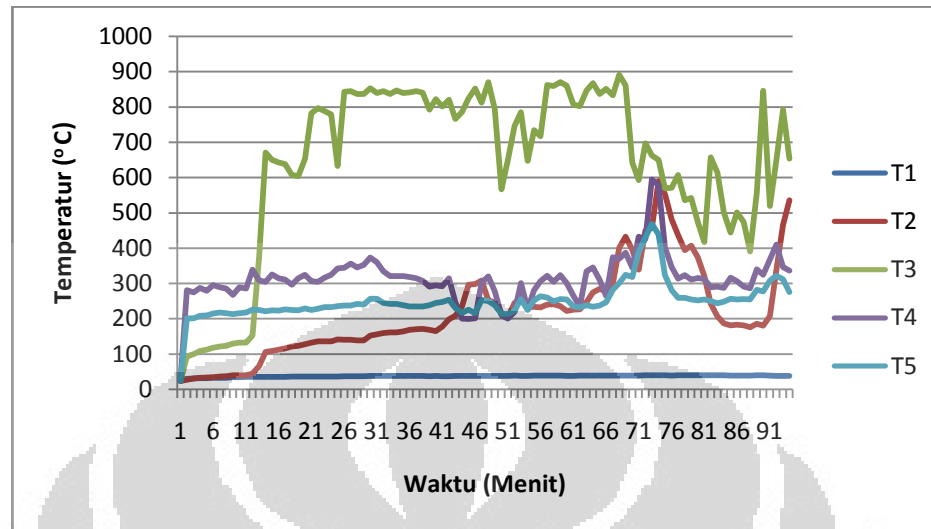
Tabel 4. 4 Temperatur maksimal pada setiap termokopel

T1	T2	T3	T4	T5
40	590	891	595	469

Dalam percobaan terakhir ini ternyata kondisi flame sangat bagus. Dapat dilihat dari juga temperatur maksimal setiap termokopel menunjukkan T2 mencapai 590 °C dan T3 891 °C sehingga suhu ini sangat tepat untuk membuat bahan bakar terbakar. Jika kita bandingkan dengan penelitian sebelumnya terlihat distribusi temperatur terlihat T1-T5 terlihat lebih tinggi dari pengujian sebelumnya, ini mengindikasikan bahwa perkembangan modifikasi dari sebelumnya mengarah pada kemajuan yang signifikan.



Gambar 4.25 Kondisi Flame pada Temperatur maksimal di T2



Gambar 4.26 Grafik distribusi temperatur self combustion cangkang kelapa

Tabel 4.5 Temperatur rata-rata *self combustion*

Pengujian Mei 2011				
T1	T2	T3	T4	T5
40,59	452,78	453,73	432,75	373,26
Pengujian Desember 2010				
T1	T2	T3	T4	T5
36,81538	457,73	338,2615	282,81	294,44

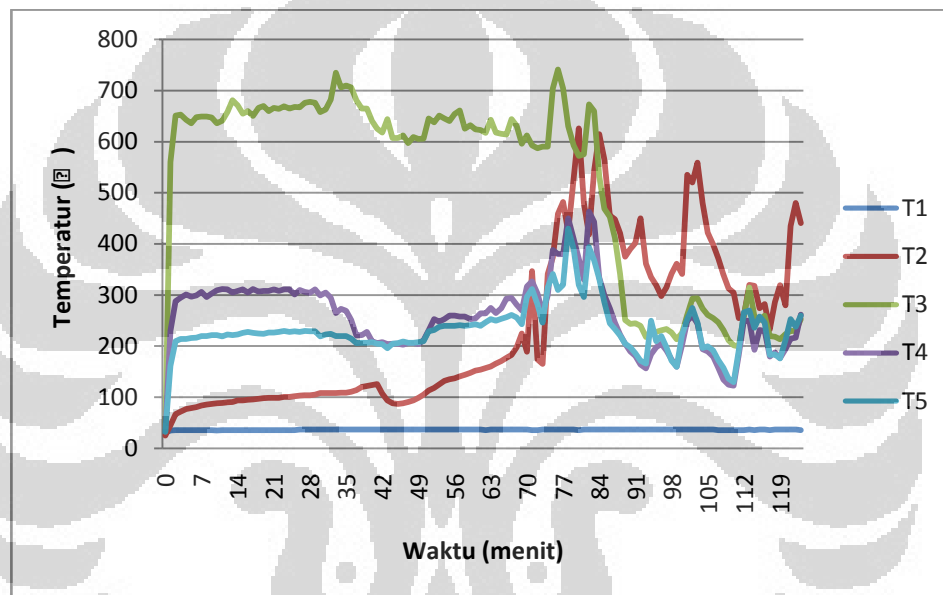
Pada pengujian terakhir ini dengan perkembangan modifikasi pada FBC UI terlihat pada self combustion temperatur rata-rata T2 yaitu 452.7818. Dapat dilihat dari juga temperatur maksimal setiap termokopel menunjukkan T2 mencapai 1030<sup>0</sup>C dan T3 829<sup>0</sup>C sehingga suhu ini tinggi untuk membuat bahan bakar terbakar dengan sempurna.

Tabel 4. 6 Temperatur maksimal pada setiap termokopel

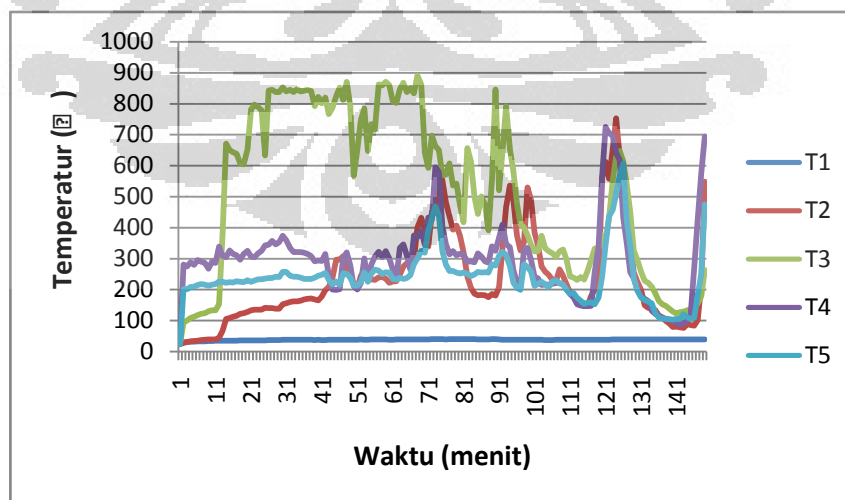
T1	T2	T3	T4	T5
45	1030	829	923	762

#### 4.2.2 Pembakaran Biomassa Menuju Kondisi Kerja

Pada percobaan desember 2010 yang menggunakan hamparan pasir dengan ukuran partikel *mesh* 30, dibutuhkan waktu sekitar 123 menit hingga dapat mencapai kondisi kerja pada suhu  $719^{\circ}\text{C}$ . Sedangkan pada percobaan terakhir yang dilakukan pada bulan mei 2011 yang menggunakan hamparan pasir *mesh* 40-50 kondisi kerja tercapai pada menit ke 149 pada suhu  $549^{\circ}\text{C}$ .



Gambar 4.27 Grafik distribusi temperatur menuju kondisi kerja pada bulan desember 2010



Gambar 4.28 Grafik Distribusi Temperatur menuju kondisi kerja dengan suplai udara 0,095m<sup>3</sup>/s pada bulan mei 2011

Tabel 4.7 Temperatur rata-rata menuju kondisi kerja

PERCOBAAN	T1	T2	T3	T4	T5
Mei 2011	37.79866	237.5503	516.9463	296.4497	241.1486
Desember 2010	36.632	234.384	516.92	259.456	232.76

Dari grafik dan tabel di atas, terlihat bahwa untuk mencapai kondisi kerja pengujian terakhir membutuhkan waktu lebih lama, akan tetapi distribusi temperatur lebih tinggi dibandingkan percobaan sebelumnya. Pada percobaan sebelumnya panas dari flame tersebutlah yang kemudian terbaca oleh termokopel bukan karena kondisi kerja yang sesungguhnya.



Gambar 4.29 Kondisi kerja pada percobaan sebelumnya



Gambar 4.30 Kondisi kerja untuk mencapai fluidisasi pada 0,095m<sup>3</sup>/s

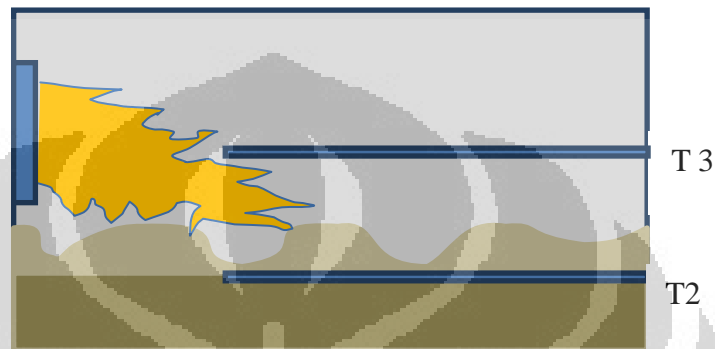
Pada percobaan menggunakan hampan pasir *mesh* 40-50, bahan bakar terfluidisasi dengan baik dan tidak terjadi api (*flame*) yang besar seperti pada percobaan menggunakan hampan pasir *mesh* 30. Keadaan hampan yang terfluidisasi dengan baik memungkinkan bahan bakar (cangkang kelapa) terbakar ketika dimasukkan, temperatur lebih tinggi pada pengujian sebelumnya.

Kondisi kerja pun terjadi ketika suhu T2 hingga T5 berada di atas 500<sup>0</sup>C. Kondisi tersebut memiliki fluidisasi baik lebih stabil serta memiliki warna merah kekuningan seperti pada gambar. Selain itu, pada kondisi tersebut, biasanya bahan bakar biomassa yang dimasukkan akan cepat beraksi sehingga dapat dengan cepat meningkatkan temperatur rata-rata T2 hingga T5 pada FBC. Oleh karena itu, pada percobaan tersebut, kondisi ini diasumsikan sebagai Kondisi Kerja FBC UI. Jika dianalisa pada grafik percobaan dan observasi menggunakan video, didapatkan kondisi kerja percobaan dengan suplai udara dengan suplai udara 3400 RPM/ 0,095m<sup>3</sup>/s dimulai pada menit ke 149, mempertahankan kondisi kerjanya selama 54 menit.

Pada pengujian sebelumnya Desember 2010 diperlukan 9,5 kg dalam waktu 124 menit berarti pemasukan bahan bakar 0,08 kg/min sedangkan dalam pengujian terakhir dengan perkembangan modifikasi terakhir dengan suplai udara 0,095m<sup>3</sup>/s yang sama untuk mencapai kondisi kerja hanya membutuhkan 8,5 kg cangkang kelapa dalam waktu 149 menit berarti sudah efisien dalam pemasukan bahan bakar yaitu 0,06 kg/min.



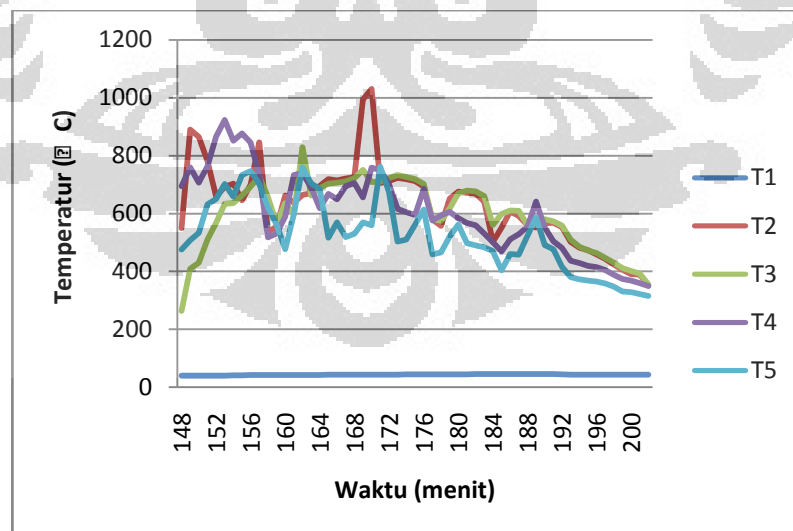
Oleh karena itu, perkembangan modifikasi ini, dengan modifikasi terakhir distributor baru, peletakkan T2 yaitu temperature pasir lebih akurat dan pemanasan awal pasir lebih cepat sehingga bahan bakar membuat tempatur mencapai kondisi kerja. Selain itu, temperatur pasir yang mengenai flame benar-benar kondisi yang tepat bukan temperature termokopel T2 yang terkena flame langsung dari burner.



Gambar 4.31 Posisi termokopel T2 dengan distributor baru

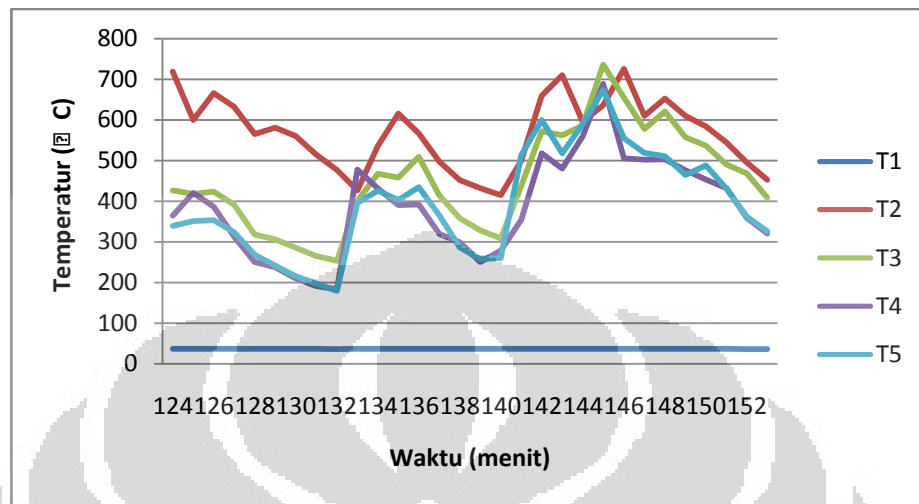
#### 4.2.3 Pembakaran Biomassa Saat Kondisi Kerja

Pada percobaan terakhir yang dilakukan pada bulan mei 2011 yang menggunakan hambaran pasir *mesh* 40-50 kondisi kerja tercapai pada menit ke 149 pada suhu  $549^{\circ}\text{C}$  , dan dapat mempertahankan suhu selama 54 menit.



Gambar 4.32 Grafik distribusi temperature saat kondisi kerja pada pengujian terakhir

Pada percobaan sebelumnya kondisi kerja tercapai pada menit ke 124, dan kondisi kerja berlangsung selama 28 menit seperti yang terlihat pada grafik berikut.



Gambar 4.33 Grafik distribusi temperatur saat kondisi kerja dengan pengujian sebelumnya

Tabel 4.9 Temperatur rata-rata saat kondisi kerja

Percobaan	T1	T2	T3	T4	T5
Mei 2011	42,76	631,05	596,56	603,72	525,12
Desember 2010	36,9	567,9	451,13	384,7	394,8

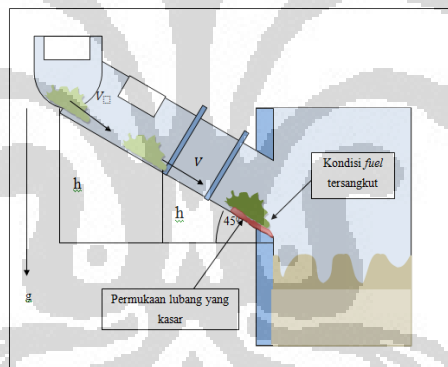
Dari tabel di atas, terlihat bahwa rata-rata temperatur pada percobaan sekarang cenderung lebih besar dibandingkan dengan percobaan sebelumnya.. Ini menandakan ada kemajuan dalam perkembangan modifikasi FBC UI saat ini, distribusi temperature menjadi lebih tinggi.

Setelah melakukan pengujian terakhir ini, pada ekseperimen yang terakhir dilakukan ternyata masih ada masalah yang terjadi yaitu ada beberapa bahan bakar yang macet sehingga tidak jatuh ke ruang bakar akhirnya bahan bakar tersebut mengendap dan akhirnya terjadi pembakaran di lubang feeder akibatnya pemanasan pasir menjadi terhambat dan pada temperature pasir. Akibatnya dalam grafik T2 terjadi ketidakstabilan dikarenakan oleh bahan bakar yang tersangkut.



Gambar 4.34 Bahan bakar yang tertahan di lubang *feder*

Oleh karena itu pada saat percobaan ini berusaha mendorong cangkang kelapa ini agar jatuh ke ruang bakar akibatnya suhu terlihat mengalami kenaikan secara signifikan . Selain itu, ketidaksatbilan distribusi temperature pada termokopel dikarenakan termokopel terkadang tidak dalam posisi yang baik karena terkena bahan bakar yang mengendap dan tidak terbakar di T2.



Gambar 4.35 Ilustrasi kondidi *fuel* tersangkut

Oleh karena itu, jalur masukan bahan bakar tersebut menjadi macet dikarenakan juga permukaan lubang feeder yang kasar dan tidak merata sehingga menimbulkan gaya gesek sehingga mengurangi kecepatannya jatuh. Oleh karena itu, lubang feeder tersebut dibuat lebih rata dan halus lagi agar kecepatan jatuhnya bahan bakar menjadi lebih stabil .

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 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 .
- Dalam perkembangan dan modifikasi *Fluidized bed combustor (FBC)* di Universitas Indonesia telah mencapai beberapa kemajuan. Sistem pemanasan awal pasir yang baik , nyala api menjadi stabil dan metode penyalan pun menjadi aman, selain itu, sitem suplai udara sudah lebih baik melebihi laju aliran udara yang dibutuhkan, denganspesifikasi adalah  $6, 2 \text{ m}^3/\text{min}$  maka blower yang sekarang sudah memenuhi standar sehingga terlihat dari eksperimen terakhir fluidisasi baik dan juga sistem feeding membuat laju aliran bahan bakar akan tetap stabil dengan jumlah muatan masukan bahan bakar yang konstan. Dengan *feeder* jenis ini tidak ada kendala mengenai macetnya jalur masukan *feeder* akibat tersangkutnya bahan bakar.
- Setelah dilakukan eksperimental terakhir didapatkan dalam 30 menit suhu di T2 mencapai  $153^{\circ}\text{C}$  sedangkan pada tahun sebelumnya didapatkan dalam 30 menit hanya mencapai suhu  $108^{\circ}\text{C}$ . Ini menandakan bahwa terjadi kemajuan dalam pemanasan awal pasir sekitar  $45^{\circ}\text{C}$  lebih tinggi. Kenaikan ini terjadi karena pengaruh distributor yang dinaikkan sekitar 17 cm.
- Pada percobaan sebelumnya dibutuhkan waktu sekitar 123 menit hingga dapat mencapai kondisi kerja pada suhu  $719^{\circ}\text{C}$ . Sedangkan pada percobaan terakhir yang dilakukan pada bulan mei 2011 kondisi kerja tercapai pada menit ke 149 pada suhu  $549^{\circ}\text{C}$ . Terlihat bahwa untuk mencapai kondisi kerja pengujian terakhir membutuhkan waktu lebih lama akan tetapi, distribusi

temperature rata-rata T1 hingga T5 lebih tinggi dibandingkan pengujian sebelumnya. Keadaan hamparan yang terfluidisasi dengan baik memungkinkan bahan bakar (cangkang kelapa) terbakar ketika dimasukkan sehingga temperatur lebih tinggi pada pengujian sebelumnya. Pengujian sebelumnya distribusi temperature lebih rendah disebabkan oleh terbentuknya api (*flame*) pada kondisi kerja pada percobaan sebelumnya. Panas dari flame tersebutlah yang kemudian terbaca oleh termokopel bukan karena kondisi kerja yang sesungguhnya.

- Pada kondisi kerja, penelitian sebelumnya diperlukan 9,5 kg dalam waktu 124 menit berarti pemasukan bahan bakar 0,08 kg/min sedangkan dalam pengujian terakhir dengan perkembangan modifikasi terakhir dengan suplai udara 0,095m<sup>3</sup>/s yang sama untuk mencapai kondisi kerja hanya membutuhkan 8,5 kg cangkang kelapa dalam waktu 149 menit berarti sudah efisien dalam pemasukan bahan bakar yaitu 0,06 kg/min.
- Namun pada eksperimen yang terakhir dilakukan ternyata masih ada masalah yang terjadi yaitu ada beberapa bahan bakar yang macet sehingga tidak jatuh ke ruang bakar akhirnya bahan bakar tersebut mengendap dan akhirnya terjadi pembakaran di lubang feeder akibatnya pemanasan pasir menjadi terhambat dan terjadi ketidakstabilan pada distribusi temperature di termokopel. Jalur masukan bahan bakar tersebut menjadi macet dikarenakan juga permukaan lubang feeder yang kasar dan tidak merata sehingga menimbulkan gaya gesek sehingga mengurangi kecepatannya jatuhnya bahan bakar. Oleh karena itu, untuk kedepannya, lubang feeder tersebut dibuat lebih rata dan halus lagi agar kecepatan jatuhnya bahan bakar menjadi lebih stabil .

## 5.2 Saran

Studi mengenai Fluidize Bed Combuster merupakan solusi di masa yang akan datang, sehingga diharapkan performance dari Fluidize Bed Combuster UI dapat meningkat untuk keperluan penelitian lebih tinggi. Untuk itu ada beberapa 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. Perlunya peningkatan kapasitas dan kualitas instrumentasi dan alat ukur, seperti timbangan, insrumentasi listrik pada laboratorium FBC, untuk kepentingan penelitian yang lebih baik.
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 system penutup pada burner sehingga pada saat operasi pembakaran, hasil pembakaran tidak masuk ke dalam system burner. Selain itu, penggantian dan perbaikan bagian busi sebagai ignitor juga perlu dilakukan.
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.

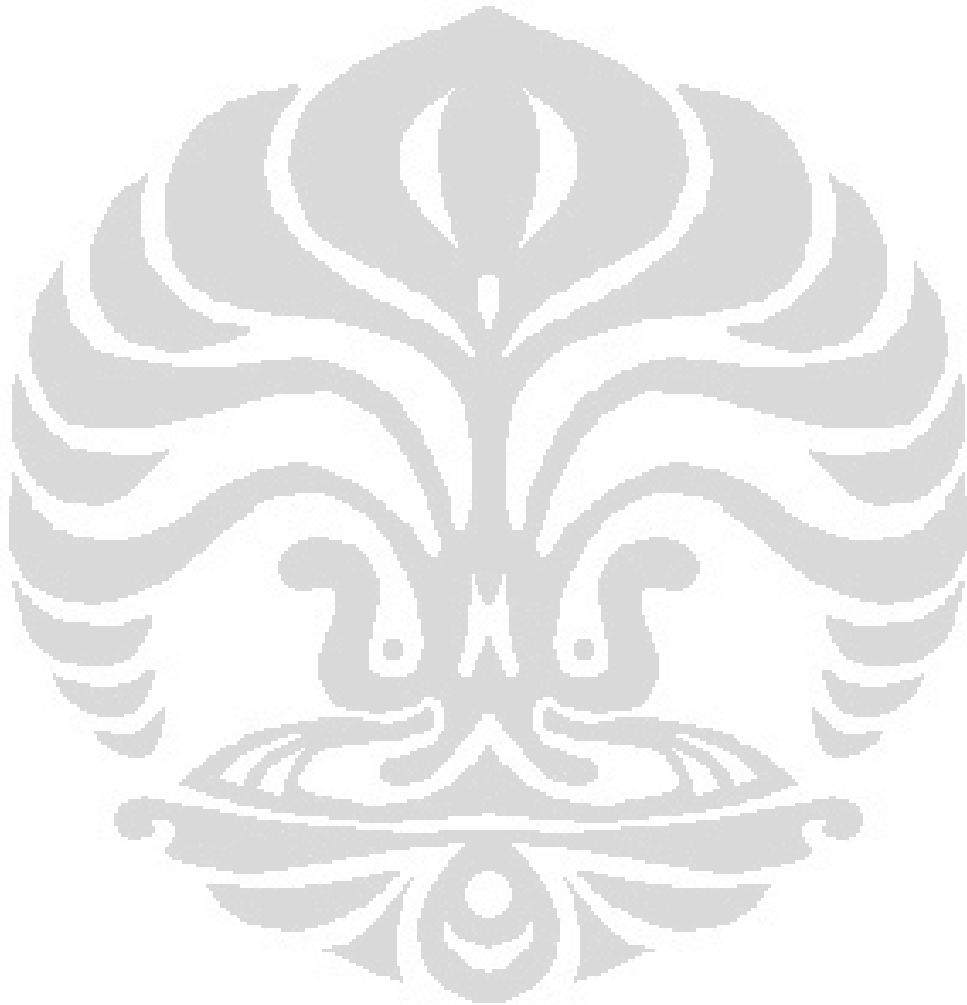
## DAFTAR PUSTAKA

1. Energy Information Administration (US), International Energy Annual 2006 sumber <http://www.eia.doe.gov/iea/> diakses pada tanggal 8 Mei 2011.
2. Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2006 sumber [http://www.batan.go.id/prod\\_hukum/extern/Perpres5\\_2006.pdf](http://www.batan.go.id/prod_hukum/extern/Perpres5_2006.pdf) diakses pada tanggal 8 Mei 2011.
3. Howard, J. R., *Fluidized Beds – Combustion and Applications*, (London: Applied Science Publishers, 1983).
4. Geldart, D., *Gas Fluidization Technology*, (New York: John Wiley & Sons, 1986).
5. Kunii, Daizo & Octave Levenspiel, *Fluidization Engineering*, (New York: Butterworth-Heinemann, 1991).
6. Mel Pell, Ph.D & James B. Dunson, M.S- *Gas-Solid Operations and Equipment* (American Institute of Chemical Engineers, 1999)
7. Henrik Thunman, *Combustion of Biomass – Nordic Course Lyngby, Danmark*, 19-23 August 2002.
8. “Experimental Operating & Maintenance Manual – Fluidisation and Fluid Bed Heat Transfer Unit H692,” P. A. Hilton Ltd.
9. Robert H. Perry, Don W. Green, *Perry’s Chemical Engineers’ Handbook 7<sup>th</sup> Ed.*, (Singapore: McGraw-Hill Int., 1997).
10. Bruce R. Munson, Donald F. Young, *Mekanika Fluida*, terj. Harinaldi, Budiarso (Jakarta: Erlangga, 2003).
11. Christian, Hans. “Modifikasi Sistem Burner dan Pengujian Aliran Dingin *Fluidized Bed Incinerator* UI.” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2008.
12. Surjosatyo, Adi. “Fluidized Bed Incineration of Palm Shell & Oil Sludge Waste.” Tesis, Program Magister Engineering Universiti Teknologi Malaysia, 1998.
13. “Experimental Operating & Maintenance Manual – Fluidisation and Fluid Bed Heat Transfer Unit H692,” P. A. Hilton Ltd.

14. 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.
15. Lintang, Arsyia. “Perbandingan Eksperimental Pembakaran Cangkang Kelapa Dan Ranting Pohon Dengan Menggunakan Fluidized Bed Combustor”. Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2009.
16. Hartono, Rudi. “Distribusi Temperatur Pembakaran Campuran Ranting Pohon dan Cangkang Kelapa pada Fluidized Bed Combustor UI”. Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2009.
17. Trisutrisno, R. arya. “Studi Karakteristik Pembakaran Biomassa (Tempurung Kelapa) *Fluidized Bed Combustor* UI dengan Kapasitas Maksimal.” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2010.
18. Atmaja, Anton. “Modifikasi Feeder dan Uji Pembakaran Ranting dengan Feeding Bertahap Naik pada Fluidized Bed Combustor.” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2010.



## LAMPIRAN



## Tabel Konversi Satuan

### Massa

$$1 \text{ gram} = 1,00 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

### Panjang

$$1 \text{ sentimeter (cm)} = 1,00 \times 10^{-2} \text{ meter}$$

$$1 \text{ milimeter (mm)} = 1,00 \times 10^{-3} \text{ meter}$$

$$1 \text{ kaki (ft)} = 3.048 \times 10^{-1} \text{ meter}$$

$$1 \text{ mikrometer } (\mu\text{m}) = 1,00 \times 10^{-6} \text{ meter}$$

### Waktu

$$1 \text{ menit} = 6,00 \times 10^1 \text{ sekon}$$

$$1 \text{ jam} = 3,60 \times 10^3 \text{ sekon}$$

### Energi

$$1 \text{ BTU (British Thermal Unit)} = 1,054350 \times 10^3 \text{ joule}$$

$$1 \text{ kilojoule (kJ)} = 1,00 \times 10^3 \text{ joule}$$

$$1 \text{ kalori (cal)} = 4,184 \text{ joule}$$

$$1 \text{ kilokalori (kcal)} = 4,184 \times 10^3 \text{ joule}$$

### Daya

$$1 \text{ house power (HP)} = 7,4569987 \times 10^2 \text{ Watt}$$

$$1 \text{ kilowatt (kW)} = 1.00 \times 10^3 \text{ Watt}$$

$$1 \text{ megawatt (MW)} = 1.00 \times 10^6 \text{ Watt}$$

$$1 \text{ gigawatt (GW)} = 1.00 \times 10^9 \text{ Watt}$$

### Tekanan

$$1 \text{ N/m}^2 = 1,00 \text{ pascal (Pa)}$$

$$1 \text{ bar} = 1,00 \times 10^5 \text{ pascal (Pa)}$$

1 milibar =  $1,00 \times 10^2$  Pa

1 mm H<sub>2</sub>O = 9,795 Pa

**Tabel Pengujian dengan Manometer U**

no	rpm	$\Delta h(\text{mm})$	$\gamma$ 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	<b>0,095348</b>	5,72088337
16	3500	238	9789	11,61	2327,0188	0,660714	1,165	0,097417	5,84499506

## Data Pembakaran Cangkang Kelapa pada Bulan Desember 2010

Data hasil pembakaran yang digunakan adalah hasil penelitian periode sebelumnya (Desember 2010). Parameter-parameter yang digunakan dalam percobaan:

- Suplai udara blower menuju ruang bakar  $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$
- Menggunakan bahan bakar cangkang kelapa dengan nilai kalor  $5780 \text{ cal/gram}$ .
- Ketinggian Termokopel dari distributor (T2=20,5 cm; T3=41,5 cm; T4=80,5cm; T5=161,5cm)

Tabel Pembakaran Cangkang Kelapa dengan ukuran hamparan *mesh* 30

Waktu	T1	T2	T3	T4	T5	Bahan bakar
<b>0</b>	31	25	33	33	33	
<b>1</b>	35	45	560	230	162	
<b>2</b>	36	67	651	288	210	
<b>3</b>	36	72	653	295	214	
<b>4</b>	36	77	643	301	214	
<b>5</b>	36	79	636	297	216	
<b>6</b>	36	81	648	299	217	
<b>7</b>	36	84	649	306	220	
<b>8</b>	36	86	649	296	220	
<b>9</b>	36	87	647	303	222	
<b>10</b>	35	88	636	309	222	
<b>11</b>	36	89	641	312	219	
<b>12</b>	36	90	658	311	223	
<b>13</b>	36	91	681	305	222	
<b>14</b>	36	94	671	308	223	

<b>15</b>	36	94	655	311	226	
<b>16</b>	36	95	660	305	228	
<b>17</b>	36	96	650	312	226	
<b>18</b>	36	97	666	307	225	
<b>19</b>	36	98	670	308	224	
<b>20</b>	36	99	660	308	227	
<b>21</b>	36	99	666	311	227	
<b>22</b>	36	99	664	308	228	
<b>23</b>	36	101	669	311	230	
<b>24</b>	36	101	665	311	228	
<b>25</b>	36	102	668	301	229	
<b>26</b>	37	103	667	310	228	
<b>27</b>	37	104	676	306	230	
<b>28</b>	37	104	678	304	229	
<b>29</b>	37	105	676	311	229	
<b>30</b>	37	108	658	299	219	
<b>31</b>	37	108	663	305	223	+0,2 kg
<b>32</b>	37	108	682	295	224	
<b>33</b>	37	108	735	265	220	
<b>34</b>	37	109	706	273	220	+0,5 kg
<b>35</b>	37	109	710	269	220	
<b>36</b>	37	111	706	251	215	
<b>37</b>	37	114	681	221	206	
<b>38</b>	37	120	665	222	207	
<b>39</b>	37	122	665	228	207	
<b>40</b>	37	124	640	210	208	
<b>41</b>	37	126	625	206	205	0,75 kg

<b>42</b>	37	107	618	208	204	
<b>43</b>	37	94	644	204	196	
<b>44</b>	37	88	607	205	205	
<b>45</b>	37	87	607	205	206	
<b>46</b>	37	88	612	203	209	
<b>47</b>	37	91	597	206	207	
<b>48</b>	37	94	609	206	207	
<b>49</b>	37	99	605	204	208	
<b>50</b>	37	105	606	212	210	
<b>51</b>	37	113	645	231	229	
<b>52</b>	37	118	638	253	232	
<b>53</b>	37	125	651	248	238	
<b>54</b>	37	132	645	253	240	
<b>55</b>	37	135	640	260	240	
<b>56</b>	37	137	654	260	240	
<b>57</b>	37	141	661	258	241	
<b>58</b>	37	144	625	258	240	
<b>59</b>	37	148	632	253	241	
<b>60</b>	37	152	624	254	243	
<b>61</b>	37	154	623	264	240	
<b>62</b>	36	157	617	264	247	
<b>63</b>	37	160	643	275	253	
<b>64</b>	37	166	618	265	250	
<b>65</b>	37	171	615	274	254	
<b>66</b>	37	177	614	293	257	
<b>67</b>	37	183	644	294	261	
<b>68</b>	37	198	631	281	256	

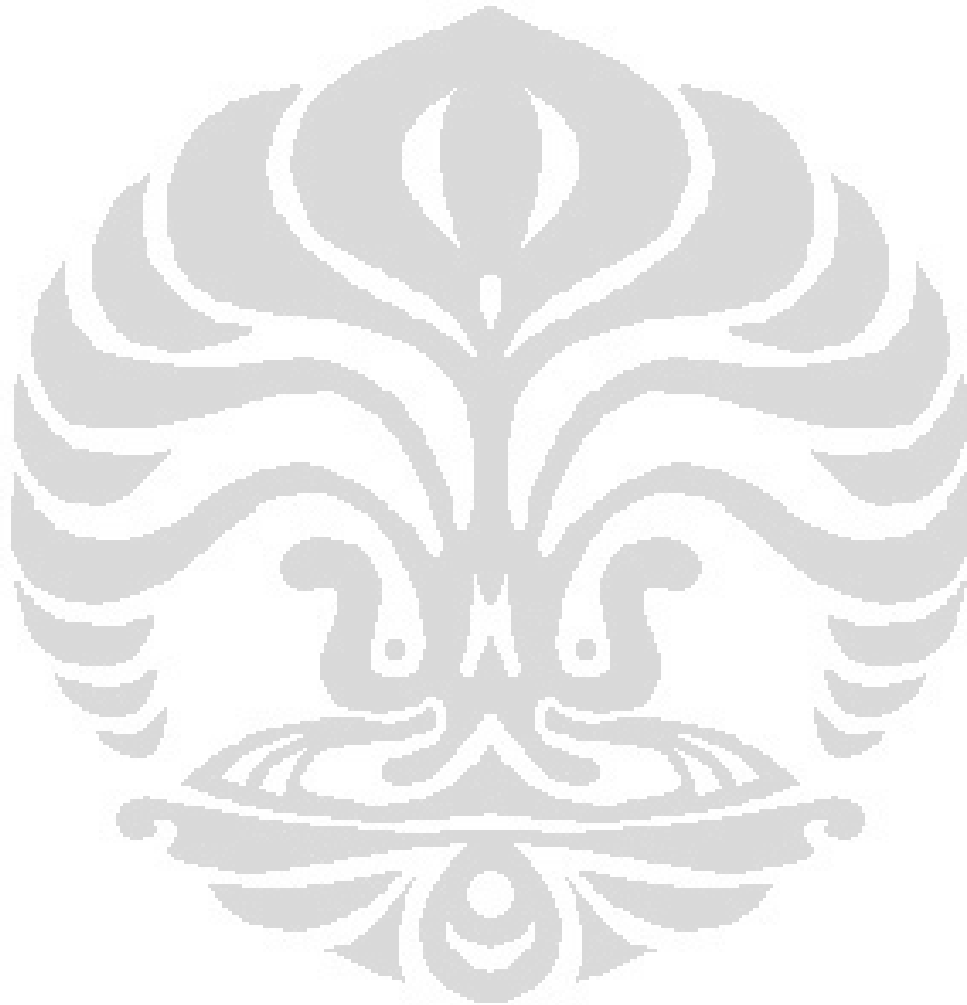
69	37	225	596	270	243	+0,5 kg
70	37	189	612	317	297	
71	36	347	593	327	312	
72	36	174	587	303	282	
73	37	165	590	266	246	+0,75
74	37	341	590	299	315	
75	37	374	704	388	341	
76	37	459	741	380	310	
77	37	482	704	380	320	+0,75 kg
78	37	424	630	450	430	
79	37	528	593	410	390	
80	36	626	572	371	320	+1 kg
81	37	480	575	330	296	
82	37	418	673	463	394	
83	37	543	660	443	368	
84	37	615	533	334	332	burner mati
85	37	565	469	300	286	
86	37	456	453	274	245	
87	37	448	412	246	234	
88	37	421	342	223	221	
89	37	375	251	205	205	+0,25 kg
90	37	390	244	190	198	
91	37	402	245	181	186	
92	37	450	240	164	172	
93	37	361	218	157	166	+0,25 kg
94	37	335	230	184	250	
95	37	319	228	198	210	+0,25 kg

<b>96</b>	37	298	231	205	220	
<b>97</b>	37	315	234	192	198	
<b>98</b>	37	342	227	174	172	
<b>99</b>	37	361	214	160	160	+0,5 kg
<b>100</b>	37	341	226	203	223	
<b>101</b>	37	535	261	249	253	
<b>102</b>	37	520	293	260	275	+0,5 kg
<b>103</b>	37	559	294	244	246	
<b>104</b>	37	480	274	194	197	+0,75 kg
<b>105</b>	37	422	261	190	200	
<b>106</b>	37	399	255	180	192	
<b>107</b>	36	372	247	158	173	
<b>108</b>	36	340	232	135	158	
<b>109</b>	36	313	212	125	137	+0,25 kg
<b>110</b>	36	305	202	123	130	
<b>111</b>	36	255	200	183	192	+0,25kg
<b>112</b>	36	259	260	250	266	
<b>113</b>	37	320	315	250	270	
<b>114</b>	36	318	258	193	236	+0,5 kg
<b>115</b>	37	274	251	232	258	
<b>116</b>	37	282	260	230	246	
<b>117</b>	36	233	220	180	183	+0,25 kg
<b>118</b>	37	286	219	188	184	
<b>119</b>	37	319	214	177	176	+0,5 kg
<b>120</b>	37	280	224	194	212	
<b>121</b>	37	435	230	215	253	
<b>122</b>	37	480	230	217	238	



<b>123</b>	36	441	253	262	260	+0,75 kg
<b>124</b>	37	719	426	364	339	
<b>125</b>	37	600	418	420	351	+1 kg
<b>126</b>	37	666	423	386	353	
<b>127</b>	37	632	391	312	323	+1 kg
<b>128</b>	37	565	318	250	268	
<b>129</b>	37	581	306	237	241	
<b>130</b>	37	561	285	210	215	
<b>131</b>	37	515	265	191	197	
<b>132</b>	36	477	253	183	179	+1,25 kg
<b>133</b>	37	427	400	478	396	
<b>134</b>	37	536	467	431	426	
<b>135</b>	37	616	458	390	403	
<b>136</b>	37	567	509	392	434	+1,25 kg
<b>137</b>	37	498	414	319	365	
<b>138</b>	37	452	358	299	286	
<b>139</b>	37	432	328	250	257	+1,5 kg
<b>140</b>	37	415	308	278	260	
<b>141</b>	37	500	437	354	513	
<b>142</b>	37	660	572	518	600	
<b>143</b>	37	710	562	480	518	+1,75 kg
<b>144</b>	37	596	586	560	590	
<b>145</b>	37	636	736	689	674	
<b>146</b>	37	726	655	505	555	
<b>147</b>	37	610	578	502	519	+2 kg
<b>148</b>	37	653	621	503	511	
<b>149</b>	37	610	557	476	464	

<b>150</b>	37	584	537	453	488	
<b>151</b>	37	545	490	432	431	
<b>152</b>	36	495	468	359	362	
<b>153</b>	36	453	408	320	326	



## Data Pembakaran Cangkang Kelapa pada Bulan Mei 2011

Beberapa parameter dalam percobaan ini:

- e. Suplai aliran udara ke ruang bakar (0,095 m<sup>3</sup>/s)
- f. Ketinggian Termokopel (T1= (dibawah distributor) 31,5 cm; T2= di atas 3,5 cm; T3=24,5 cm; T4=63,5cm; T5=144,5cm)
- g. LHV cangkang kelapa (29400 kJ/kg)

Menit	T1	T2	T3	T4	T5	Bahan Bakar
1	28	24	24	24	24	
2	30	28	94	281	202	
3	31	31	100	275	202	
4	32	33	109	288	209	
5	32	34	113	280	210	
6	33	35	118	296	215	
7	33	37	122	290	218	
8	33	38	124	286	216	
9	34	40	130	268	213	
10	34	40	133	290	216	
11	35	40	133	286	218	
12	35	45	153	339	226	
13	35	67	378	309	225	
14	35	106	671	305	222	
15	35	109	650	326	224	
16	35	113	643	315	223	
17	35	116	638	311	227	
18	36	122	607	297	225	
19	36	124	604	315	224	
20	36	128	653	325	230	
21	36	133	782	307	225	
22	36	136	797	305	229	
23	36	136	789	317	233	
24	36	136	779	325	233	
25	36	142	633	343	236	
26	37	141	843	345	238	
27	37	141	845	357	238	
28	37	139	837	346	242	

29	37	139	837	353	241	
30	38	153	853	374	257	+0,25 kg
31	38	156	839	360	257	
32	38	160	845	335	245	
33	38	162	837	321	242	
34	38	162	847	321	242	
35	38	164	839	321	239	
36	38	169	841	319	235	
37	38	171	845	315	235	
38	38	172	840	308	235	+0,25 kg
39	37	169	792	291	239	
40	38	165	822	295	245	
41	37	178	801	292	248	
42	37	199	820	315	254	
43	38	209	766	247	231	
44	38	236	786	201	217	
45	38	297	824	200	226	
46	38	298	852	202	216	
47	38	308	812	303	253	
48	38	253	870	320	251	+0,5 kg
49	38	246	795	279	239	
50	38	217	567	211	214	
51	38	204	649	201	213	
52	39	245	746	220	223	
53	38	259	785	301	256	
54	38	232	647	228	225	
55	39	234	734	281	252	
56	39	232	717	307	264	
57	39	240	862	322	261	
58	39	241	859	305	250	
59	39	236	870	324	256	+0,75 kg
60	38	222	860	301	255	
61	38	226	807	265	235	
62	39	227	802	235	232	
63	39	248	847	335	239	
64	39	275	867	346	234	
65	39	285	837	310	238	
66	39	278	851	265	247	+0,5 kg
67	39	298	833	375	282	

68	39	401	891	370	301	
69	39	432	861	387	325	+0,75 kg
70	39	395	642	345	319	
71	39	339	593	433	389	
72	40	450	697	426	431	
73	40	457	663	595	469	
74	40	590	650	579	439	
75	40	553	569	403	324	
76	39	481	571	347	281	
77	40	437	607	314	260	
78	40	394	536	324	260	
79	40	407	542	311	255	+0,25 kg
80	40	374	473	316	252	
81	40	321	417	313	255	
82	40	243	657	290	251	
83	40	207	614	291	244	+0,5 kg
84	40	187	501	288	249	
85	39	182	444	317	257	
86	39	183	501	307	255	
87	39	182	474	291	256	
88	39	176	391	287	255	
89	40	186	557	340	282	
90	40	181	846	325	278	
91	39	208	520	368	309	
92	38	337	648	410	322	
93	38	466	792	347	312	
94	38	536	654	337	276	+0,5 kg (Burner dimatikan)
95	38	487	581	262	222	
96	38	375	477	222	206	
97	38	327	410	209	199	+0,25 kg
98	38	353	401	332	282	
99	38	530	376	335	273	
100	38	490	345	297	258	+0,25 kg
101	38	384	323	241	212	
102	38	342	324	237	219	
103	38	275	374	215	225	
104	37	258	334	217	217	+0,5 kg
105	37	248	324	216	208	

106	37	232	317	219	227	
107	38	227	306	221	230	
108	38	266	323	221	220	
109	38	245	329	217	217	+0,5 kg
110	38	217	297	202	199	
111	38	191	243	186	187	
112	38	179	239	175	189	
113	38	165	231	153	174	
114	38	151	241	149	164	
115	38	148	232	147	154	
116	38	150	261	147	158	
117	38	180	297	148	159	
118	38	200	333	257	153	
119	38	225	335	338	175	+0,75 kg
120	38	560	376	563	241	
121	38	613	359	725	344	
122	38	558	433	704	438	
123	39	652	549	698	456	
124	39	753	629	641	509	+0,75 kg
125	39	630	647	619	569	
126	39	574	614	433	606	
127	39	455	540	351	425	
128	39	360	451	256	341	
129	39	256	326	237	239	+0,75 kg
130	39	226	297	201	197	
131	39	200	257	178	175	
132	39	150	228	171	166	
133	39	142	222	163	161	
134	39	138	210	132	156	
135	39	135	189	122	125	
136	39	117	164	115	111	
137	39	111	153	110	107	
138	39	99	148	107	106	
139	39	91	139	103	104	
140	39	80	129	97	103	
141	39	81	123	92	106	
142	39	79	127	88	106	
143	39	77	129	91	121	
144	39	89	133	102	111	

145	39	86	138	122	106	
146	39	84	148	272	110	
147	39	102	156	429	184	+0,5 kg
148	39	219	179	576	251	
149	39	549	263	694	475	Kondisi kerja
150	39	890	409	759	507	+1,25 kg
151	39	864	430	706	533	
152	39	781	510	763	631	
153	39	659	567	866	650	+1,25 kg
154	39	692	633	923	702	
155	40	703	635	851	658	
156	40	645	662	877	733	+1,25 kg
157	41	699	693	845	746	
158	41	845	727	734	702	
159	41	537	657	517	621	
160	42	553	564	530	562	+2kg
161	42	662	635	589	477	
162	42	636	597	733	597	
163	42	664	829	739	760	
164	42	669	662	690	705	
165	42	695	688	618	685	
166	43	718	703	667	516	
167	43	714	706	649	569	+0,25 kg
168	43	720	711	694	519	
169	43	725	722	705	530	
170	43	993	750	655	570	
171	43	1030	709	758	560	
172	43	705	710	749	762	
173	43	712	722	703	676	
174	43	723	733	615	503	
175	44	718	726	604	510	+1,25 kg
176	44	712	719	594	562	
177	44	693	702	685	614	
178	44	579	580	576	459	
179	44	557	575	593	466	+1,25 kg
180	44	651	617	606	521	
181	44	675	670	584	562	
182	44	671	679	567	498	
183	45	668	676	559	490	

<b>184</b>	45	641	660	530	483	
<b>185</b>	45	501	560	501	470	+1 kg
<b>186</b>	45	550	598	468	403	
<b>187</b>	45	607	610	511	460	
<b>188</b>	45	591	609	528	458	
<b>189</b>	45	559	559	554	523	
<b>190</b>	45	551	568	641	586	+1 kg
<b>191</b>	45	566	580	551	491	
<b>192</b>	45	568	573	504	476	
<b>193</b>	44	552	558	481	416	
<b>194</b>	43	502	510	436	380	
<b>195</b>	43	482	485	429	372	
<b>196</b>	43	473	472	419	368	
<b>197</b>	43	458	463	414	365	
<b>198</b>	43	443	446	404	358	
<b>199</b>	43	423	430	388	347	
<b>200</b>	43	405	411	373	330	
<b>201</b>	43	390	401	368	328	
<b>202</b>	43	389	392	359	322	
<b>203</b>	43	350	355	349	315	