



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN BIOMASSA  
TEMPURUNG KELAPA FLUIDIZED BED COMBUSTOR  
UNIVERSITAS INDONESIA DENGAN KAPASITAS UMPAN  
MAKSIMUM**

**SKRIPSI**

**R. ARYA TRISUTRISNO**

**0606073455**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
DESEMBER 2010**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN BIOMASSA  
TEMPURUNG KELAPA FLUIDIZED BED COMBUSTOR  
UNIVERSITAS INDONESIA DENGAN KAPASITAS UMPAN  
MAKSIMUM**

**SKRIPSI**

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

**R. ARYA TRISUTRISNO**

**0606073455**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
DESEMBER 2010**

## **PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI**

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

### **STUDI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN BIOMASSA TEMPURUNG KELAPA FLUIDIZED BED COMBUSTOR UNIVERSITAS INDONESIA DENGAN KAPASITAS UMPAN MAKSIMUM**

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi sarjana teknik pada program studi Teknik Mesin, Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia. Sejauh 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, 15 desember 2010

**R. Arya Trisutrisno**

NPM : 0606073455

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : R. Arya Trisutrisno  
NPM : 0606073455  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : STUDI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN  
BIOMASSA TEMPURUNG KELAPA FLUIDIZED  
BED COMBUSTOR UI DENGAN KAPASITAS  
UMPAN MAKSIMUM

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 : Ir. Yulianto Sulistyono, M.Sc., Ph.D ( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 28 Desember 2010

## KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

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, Sutrisno dan Yuli Afiah 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. serta kedua kakak saya dan kedua kakak ipar saya yang selalu membantu kesulitan saya dan memotivasi saya agar saya bisa mencapai yang terbaik.
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. “ Terima kasih pak untuk ilmu yang tak ternilai harganya ini”
3. Seluruh dosen, staf pengajar dan karyawan DTM FTUI yang secara langsung atau tidak langsung memberikan pelajaran, wawasan dan informasi.
4. Seluruh teman seperjuangan skripsi saya (Reynaldo BTY, Ilham Riadhi, Anton Atmaja, Irvandi P) 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.
5. Seluruh teman-teman saya yang banyak sekali mendukung saya baik secara langsung maupun tidak langsung. Nursanty E, Herowiko T, Ryan F, Kristoforus B rengka, Iqbal Anzifa, Fajar Prananda, Luhur, M Ardiansyah,

Teddy H Z, David Sidebang, Apriyos Naldi, Raja Darmawan, Raka KL, Gunawan M Alif, Satriawan W, Sulaiman A, Farhan H, Emral A, Dinda P V. Terima kasih untuk semuanya.

6. 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, 15 desember 2010

Penulis

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

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

Nama : R. Arya Trisutrisno

NPM : 0606073455

Program Studi : Teknik Mesin

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

demikian 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 :

**STUDI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN BIOMASSA  
TEMPURUNG KELAPA FLUIDIZED BED COMBUSTOR UI  
DENGAN KAPASITAS UMPAN MAKSIMUM**

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 : 28 desember 2010

Yang menyatakan,

(R. Arya Trisutrisno)

## ABSTRAK

Nama : R. Arya Trisutrisno

Npm : 0606073455

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : Studi Karakteristik Pembakaran Biomassa Tempurung Kelapa  
*Fluidized Bed Combustor* UI dengan Kapasitas Maksimal

Tempurung kelapa merupakan potensi biomassa yang sangat besar. Sejauh ini masih sedikit yang memanfaatkannya tersebut sebagai sumber energi alternatif. *Fluidized bed combustor* merupakan salah satu alat pengkonversi energi biomassa menjadi energi panas yang dapat dimanfaatkan lagi. Proses pembakaran yang terjadi ialah pembakaran dengan sendirinya secara terus-menerus yang berlangsung pada temperatur yang cukup tinggi. Pengujian untuk pembakaran dilakukan pada FBC jenis *bubbling* menggunakan bahan bakar Tempurung kelapa untuk mengetahui *feed rate* bahan bakar yang terbaik. Eksperimen ini menggunakan beberapa variasi *feeding* bahan bakar, yaitu 0.25kg sampai 1.75 kg. *Feeding* terbaik pada saat bahan bakar dimasukkan 1.25 kg dengan *feed rate* bahan bakar setiap 4 menit dan temperatur rata-rata 633,88°C

Kata kunci : *Fluidized bed combustor*, *Feed rate*, biomassa, Tempurung Kelapa,

## ABSTRACT

Name : R. Arya Trisutrisno  
NPM : 0606073455  
Study Program : Mechanical Engineering  
Title : Characteristics Combustion study of Coconut Shell Biomass for University of Indonesia Fluidized Bed Combustor with Maximum Capacity.

Coconut shell is a very large biomass potential. So far, in this world still a few who use it as an alternative energy source. Fluidized bed combustor is one of the biomass energy converter tool into *heat* energy that can be used again. Combustion process that occurs is burning by itself is continuously at high temperature. Burning testing on the type of bubbling FBC in University of Indonesia using coconut shells to determine the best fuel feed *rate*. This experiment uses a variation of the fuel feeding, which is 0.25kg to 1.75 kg. The best feeding at time of 1,25 kg of fuel included with a feed *rate* of fuel every 4 minutes and the average temperature of 633.88 ° C

Key word : Fluidized bed combustor, feed *rate*,Biomass, Coconut shell.

# DAFTAR ISI

COVER .....	1
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
BAB 1.....	1
1.1 JUDUL PENELITIAN.....	1
1.2 LATAR BELAKANG MASALAH.....	1
1.3 PERUMUSAN MASALAH.....	4
1.4 TUJUAN PENELITIAN.....	5
1.5 BATASAN MASALAH.....	5
1.6 METODOLOGI PENULISAN.....	5
1.7 SISTEMATIKA PENULISAN.....	6
BAB 2 DASAR TEORI.....	8
2.1 ENERGI BIOMASSA.....	8
2.1.1 Jenis-Jenis Biomassa.....	8

2.1.2	Teknologi Pengkonversian Energi Biomassa .....	9
2.1.3	Kelebihan dan Kekurangan .....	14
2.2	KARAKTERISTIK BIOMASSA .....	14
2.3	SISTEM REAKSI PEMBAKARAN .....	17
2.3.1	Hal-Hal Yang Harus Diperhatikan Dalam Proses Pembakaran .....	19
2.3.2	Komponen-Komponen Utama Reaksi Pembakaran .....	19
2.4	FLUIDIZED BED COMBUSTOR .....	22
2.4.1	Jenis-Jenis Fluidized Bed Combustor .....	25
2.4.2	Pinsip Kerja Fluidized Bed Combustor .....	26
2.4.3	Bagian-Bagian Fluidized Bed Combustor .....	28
2.5	FENOMENA FLUIDISASI .....	39
2.5.1	Proses Fluidisasi .....	39
2.5.2	Kondisi Fluidisasi .....	39
2.5.3	Jenis-Jenis Fluidisasi .....	41
2.5.4	Parameter-Parameter Fluidisasi .....	43
BAB 3 METODE PENELITIAN .....		53
3.1	DIAGRAM ALIR PENELITIAN .....	53
3.2	PERSIAPAN PENGUJIAN .....	54
3.2.1	Bahan Bakar Biomassa .....	54
3.2.2	Pasir .....	57
3.2.3	Perlengkapan dan Peralatan .....	59
3.3	STANDAR OPERASI ALAT PENGUJIAN .....	64
3.3.1	Sistem Feeder .....	64
3.3.2	Blower .....	66
3.3.3	Sistem Burner .....	68
3.4	PROSEDUR PENGUJIAN PEMBAKARAN .....	71
3.4.1	Rangkaian Alat Pengujian .....	72
3.4.2	Prosedur Pengambilan Data Pembakaran .....	73

3.4.3 Prosedur Pengambilan Data Karakteristik Blower .....	74
BAB 4 PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA.....	77
4.1 HASIL .....	77
4.1.1 Karakteristik <i>Blower</i> .....	77
4.1.2 Karakteristik Pembakaran Biomassa .....	79
4.2 ANALISA.....	94
4.2.1 Analisa Karakteristik Kerja <i>Ring Blower</i> .....	94
4.2.2 Analisa grafik pada pemanasan awal.....	95
4.2.3 Analisa grafik pada proses <i>self combustion</i> .....	99
4.2.4 Perbandingan <i>self combustion</i> Tempurung kelapa dengan beberapa bahan bakar lainnya .....	107
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....	120
5.1 KESIMPULAN.....	120
5.2 SARAN.....	121
DAFTAR PUSTAKA.....	123

## DAFTAR TABEL

tabel 1. 1 Potensi Energi Terbaharukan di Indonesia.....	2
tabel 2. 1 <i>Ultimate Anaysis</i> Beberapa Jenis Biomassa.....	16
tabel 2. 2 <i>Proximate Analysis</i> Beberapa Jenis Biomassa .....	17
tabel 2. 3 Nilai LHV Beberapa Jenis Biomassa .....	17
tabel 2. 4 Jenis-Jenis Bahan Bakar .....	20
tabel 2. 5 Increasing Size and Density .....	51
tabel 3. 1 potensi biomassa di Indonesia.....	56
tabel 3. 2 <i>Specific Heat</i> Berbagai Substansi.....	58
tabel 3. 3 Fisik, Termal, dan Mekanik Pasir Silika.....	59
tabel 3. 4 spesifikasi sistem feeder .....	65
tabel 3. 5 spesifikasi burner.....	71
Tabel 4. 1 Pengujian <i>blower</i> menggunakan manometer tabung U .....	79
Tabel 4. 2 data hasil pemanasan awal ranting dilanjutkan dengan <i>self combustion</i> Tempurung kelapa .....	86
tabel 4. 3 <i>feed rate</i> Tempurung kelapa pada <i>self combustion</i> .....	87
Tabel 4. 4 rata-rata temperatur saat pemanasan awal .....	87
Tabel 4. 5 rata-rata temperatur saat <i>self combustion</i> .....	88

Tabel 4. 6 hasil pemanasan awal Tempurung kelapa dilanjutkan <i>self combustion</i> Tempurung kelapa terhadap waktu .....	92
Tabel 4. 7 rata-rata temperatur saat pemanasan awal .....	93
Tabel 4. 8 rata-rata temperatur saat <i>self combustion</i> .....	94
Tabel 4. 9 rata-rata temperatur saat <i>feeding</i> 0,25 kg.....	101
Tabel 4. 10 rata-rata temperatur saat <i>feeding</i> 0,5 kg.....	102
Tabel 4. 11 rata-rata temperatur saat <i>feeding</i> 0,75 kg.....	103
Tabel 4. 12 rata-rata temperatur saat <i>feeding</i> 1 kg.....	104
Tabel 4. 13 rata-rata temperatur saat <i>feeding</i> 1.25 kg.....	105
Tabel 4. 14 rata-rata temperatur saat <i>feeding</i> 1.5 kg.....	106
Tabel 4. 15 rata-rata temperatur saat <i>feeding</i> 1.75 kg.....	107
tabel 4. 16 karakteristik bahan bakar saat proses FBC berlangsung (T2).....	108
tabel 4. 17 karakteristik bahan bakar saat proses FBC berlangsung (T3).....	109
tabel 4. 18 Feed <i>rate</i> -rata (min).....	111
tabel 4. 19 T2 rata-rata pada masing-masing bahan bakar.....	111
tabel 4. 20 Perhitungan Q input bahan bakar ranting pohon.....	112
tabel 4. 21 Perhitungan Qoutput bahan bakar ranting pohon.....	112
tabel 4. 22 Perhitungan Qinput bahan bakar tempurung kelapa.....	114
tabel 4. 23 perbandingan Qoutput bahan bakar tempurung kelapa .....	114
tabel 4. 24 perhitungan Qinput bahan bakar cangkang sawit.....	116
tabel 4. 25 perhitungan Qoutput bahan bakar cangkang sawit.....	116
tabel 4. 26 tabel <i>Heat loss</i> pada masing-masing bahan bakar dengan feed <i>rate</i> tertentu .....	118

## DAFTAR GAMBAR

gambar 1. 1 <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	3
gambar 2. 1 Chart Teknologi Konversi Biomassa .....	9
gambar 2. 2 Proses Gasifikasi (sumber : <a href="http://www.w3.org">http://www.w3.org</a> ).....	10
gambar 2. 3 <i>Anaerobic Digester</i> .....	12
gambar 2. 4 Rangkaian Instalasi Biogas .....	13
gambar 2. 5 Analisis Proximat untuk Beberapa Jenis Bahan Bakar Padat. ....	15
gambar 2. 6 Definisi Analisis Ultimat dan Proximat. ....	16
gambar 2. 7 Skematis <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	24
gambar 2. 8 Diagram Proses Pencampuran ( <i>mixing</i> ) dalam <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	25
gambar 2. 9 Tahapan Proses Kerja <i>Fluidized Bed Combustor</i> ; (a) Tahapan pada Kondisi Awal; .....	28
gambar 2. 10 Ruang Bakar Utama <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI .....	29
gambar 2. 11 Perilaku Gelembung Setiap Jenis Distributor; (a) <i>Porous Plate</i> ; (b) <i>Perforated Plate</i> ; .....	30
gambar 2. 12 Distributor yang digunakan pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI .....	30
gambar 2. 13 Jenis-Jenis <i>Solid Flow Control</i> ; (a) <i>Slide Valve</i> (b) <i>Rotary Valve</i> ; ..	31
gambar 2. 14 <i>Screw Feeder</i> .....	32
gambar 2. 15 Burner yang Digunakan pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI .....	34

gambar 2. 16 <i>Cyclone Separator Fluidized Bed Combustor</i> UI.....	36
gambar 2. 17 Blower Sentrifugal yang Digunakan pada FBC.....	37
gambar 2. 18 <i>Control Panel</i> .....	38
gambar 2. 19 <i>Data Logger</i> .....	38
gambar 2. 20 Skematik Fluidisasi.....	39
gambar 2. 21 Hubungan Tinggi Hampanan Terhadap Kecepatan Superfisial .....	40
gambar 2. 22 Hubungan Penurunan Tekanan Terhadap Kecepatan Superfisial....	41
gambar 2. 23 Diagram Klasifikasi Jenis-Jenis Pasir. [sumber: Geldart. 1991].....	48
gambar 2. 24 Daerah batas fluidisasi [sumber: Grace. 1986] .....	52
gambar 3. 1 Skematik Siklus Biomassa.....	55
gambar 3. 2 Tempurung kelapa .....	55
gambar 3. 3 Tempurung Kelapa yang telah dihancurkan.....	57
gambar 3. 4 Pasir Silika yang Digunakan pada FBC UI.....	59
gambar 3. 5 Generator Set yang Digunakan .....	60
gambar 3. 6 Ketinggian Termokopel .....	61
gambar 3. 7 manometer tabung U .....	64
gambar 4. 1 Skema pengujian blower.....	78
gambar 4. 2 grafik hasil pemanasan awal ranting dilanjutkan <i>self combustion</i> Tempurung kelapa terhadap waktu (menit).....	86
gambar 4. 3 grafik hasil pemanasan awal Tempurung kelapa dilanjutkan <i>self</i> <i>combustion</i> Tempurung kelapa terhadap waktu (menit).....	93

gambar 4. 4 grafik hasil pengujian <i>blower rpm vs flow rate</i> .....	95
gambar 4. 5 grafik distribusi temperatur terhadap waktu pemanasan awal ranting (T1-T4).....	96
gambar 4. 6 grafik distribusi temperatur terhadap waktu pemanasan awal ranting (T5-T7).....	96
gambar 4. 7 grafik distribusi temperatur terhadap waktu pemanasan awal Tempurung kelapa (T1-T4) .....	98
gambar 4. 8 grafik distribusi temperatur terhadap waktu pemanasan awal Tempurung kelapa (T5-T7) .....	98
gambar 4. 9 grafik distribusi temperatur terhadap waktu saat <i>self combustion</i> dengan pemanasan awal ranting.....	99
gambar 4. 10 grafik distribusi temperatur terhadap waktu saat <i>self combustion</i> dengan pemanasan awal Tempurung kelapa .....	100
gambar 4. 11 grafik distribusi temperatur terhadap waktu saat <i>self combustion</i> dengan <i>feeding</i> 0,25 kg .....	101
gambar 4. 12 grafik distribusi temperatur terhadap waktu saat <i>self combustion</i> dengan <i>feeding</i> 0,5 kg .....	101
gambar 4. 13 grafik distribusi temperatur terhadap waktu saat <i>self combustion</i> dengan <i>feeding</i> 0,75 kg .....	102
gambar 4. 14 grafik distribusi temperatur terhadap waktu saat <i>self combustion</i> dengan <i>feeding</i> 1 kg .....	103
gambar 4. 15 grafik distribusi temperatur terhadap waktu saat <i>self combustion</i> dengan <i>feeding</i> 1.25 kg .....	104
gambar 4. 16 grafik distribusi temperatur terhadap waktu saat <i>self combustion</i> dengan <i>feeding</i> 1.5 kg .....	105

gambar 4. 17 grafik distribusi temperatur terhadap waktu saat <i>self combustion</i> dengan <i>feeding</i> 1.75kg .....	106
gambar 4. 18 Grafik karakteristik bahan bakar saat proses FBC berlangsung (T2) .....	108
gambar 4. 19 Grafik karakteristik bahan bakar saat proses FBC berlangsung (T3) .....	109
gambar 4. 20 skema <i>heat balance</i> pada FBC UI.....	110
gambar 4. 21 grafik $Q_{in}$ vs $Q_{out}$ Ranting pohon .....	113
gambar 4. 22 grafik $Q_{in}$ vs $Q_{out}$ bahan bakar tempurung kelapa.....	115
gambar 4. 23 grafik $Q_{input}$ vs $Q_{output}$ bahan bakar cangkang sawit.....	116
gambar 4. 24 grafik $Q_{input}$ pada setiap bahan bakar .....	117
gambar 4. 25 grafik $Q_{output}$ pada setiap bahan bakar .....	117
gambar 4. 26 Grafik <i>heat loss</i> pada setiap bahan bakar.....	119
gambar 5. 1 Gambar distributor yang ada pada FBC UI .....	121
gambar 5. 2 Desain Distributor baru untuk FBC UI.....	122

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 JUDUL PENELITIAN

Studi Karakteristik Pembakaran Biomassa (Tempurung Kelapa) *Fluidized Bed Combustor* UI dengan Kapasitas Maksimal

### 1.2 LATAR BELAKANG MASALAH

Persediaan bahan bakar fosil yang selama ini menjadi sumber energi utama di seluruh dunia semakin menipis dan diperkirakan akan habis dalam waktu 40 tahun ke depan. Sumber energi alternatif dibutuhkan sebagai pengganti bahan bakar fosil. Biomassa merupakan salah satu sumber energi alternatif yang dapat menggantikan bahan bakar fosil. Biomasa memiliki keunggulan, yakni sebagai sumber daya alam yang dapat diperbaharui.

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.

Jenis sumber energi	Potensi	Kapasitas terpasang
Hidro	75,67 GW	4200 MW
Mikrohidro	712 MW	206 MW

Geotermal	27 GW	807 MW
Biomassa	49.81 GW	302.4 MW
Surya	4,8 kWh/m <sup>2</sup> /day	6 MW
Angin	3 - 6 m/sec	0,6 MW

tabel 1. 1 Potensi Energi Terbarukan di Indonesia

(Sumber : Direktorat Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi, 2004)

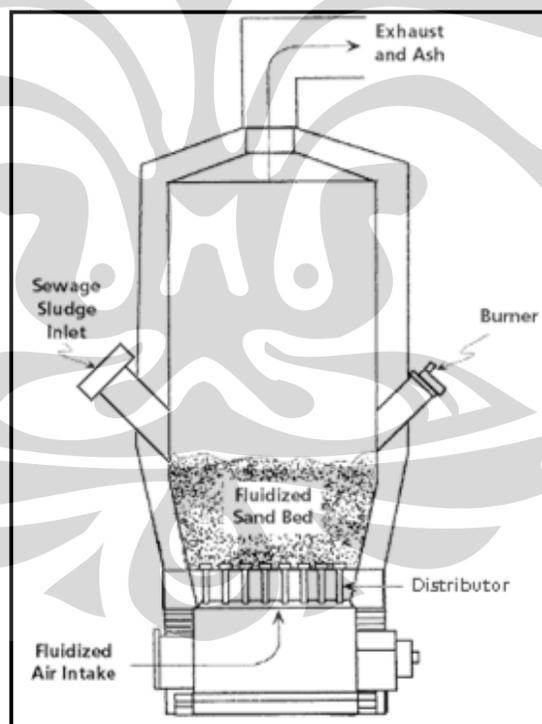
Dari tabel 1.1 dapat dilihat bahwa biomassa memiliki potensi yang besar setelah energi hidro yaitu 49,81 GW namun hanya 302,4 MW saja yang sudah dimanfaatkan atau hanya 0.6% dari seluruh potensi yang ada. Hal ini dikarenakan jumlah instalasi dan kapasitas terpasang masih kurang. Bila kita maksimalkan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

Pemanfaatan biomassa biasanya dilakukan dengan cara membakarnya sehingga menghasilkan kalor yang nantinya digunakan untuk memanaskan boiler. Uap yang dihasilkan dari pemanasan tersebut kemudian ditransfer ke dalam turbin. Putaran turbin tersebut akan menggerakkan generator

Pembakaran biomassa secara langsung memiliki kelemahan yakni efisiensi yang dihasilkan sangat rendah. Oleh karena itu perlu diterapkan beberapa teknologi

untuk meningkatkan manfaat biomassa sebagai bahan bakar. Teknologi pembakaran yang digunakan harus simpel, efisien, tidak menimbulkan gangguan terhadap lingkungan sekitar, serta biaya instalasinya relatif tidak terlalu mahal. Teknologi yang memenuhi kriteria tersebut adalah ***Fluidized Bed Combustor (FBC)***.

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



gambar 1. 1 *Fluidized Bed Combustor*

*Fluidized bed combustor* memiliki bentuk seperti sebuah tungku pembakar biasa, namun memiliki media pengaduk berupa pasir. Pasir yang digunakan bisa

pasir kuarsa ataupun pasir silika. Fungsi pasir ini berfungsi sebagai penyimpan dan pendistribusi panas, sehingga panas yang dihasilkan dapat merata. *Fluidized bed combustor* memiliki temperatur pengoperasian antara 600 sampai 900°C sehingga bahan bakar seperti limbah dapat habis terbakar hingga menjadi abu yang tidak berbahaya bagi lingkungan.

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

### 1.3 PERUMUSAN MASALAH

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

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

#### 1.4 TUJUAN PENELITIAN

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

1. Mengetahui karakteristik sistem feeder dengan menggunakan bahan bakar Tempurung kelapa.
2. Mengetahui karakteristik pembakaran biomassa dengan menggunakan *fluidized bed combustor* yang ada di Universitas Indonesia.
3. Mengetahui pengaruh jumlah masukan bahan bakar.
4. Mengetahui bahan bakar biomassa yang terbaik untuk proses *bed combustor* yang ada di Universitas Indonesia

#### 1.5 BATASAN MASALAH

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

1. Penelitian yang dilakukan hanya mencakup eksperimental pembakaran yang tujuannya untuk mengetahui karakteristik pembakaran dengan bahan bakar biomassa (pemanasan awal serta *self sustained combustion*). Sedangkan penghitungan nilai *heat rate* output dari proses pembakaran, perhitungan efisiensi alat serta emisi gas buang yang dihasilkan tidak akan dibahas secara mendalam dalam tulisan ini.
2. Bahan bakar biomassa yang digunakan pada pemanasan awal adalah ranting dan Tempurung kelapa, sedangkan bahan bakar yang digunakan untuk *self sustained combustion* adalah Tempurung kelapa.
3. Perbandingan dilakukan menggunakan bahan bakar ranting, Tempurung sawit, campuran Tempurung kelapa dengan ranting.

#### 1.6 METODOLOGI PENELITIAN

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

1. Persiapan
  - 1.1. Identifikasi masalah yang akan dibahas
  - 1.2. Penelusuran literatur

- 1.3. Pemilihan bahan bakar yang akan digunakan serta menentukan ukurannya
2. Set Up Preparation
  - 2.1. Instalasi Laboratorium
  - 2.2. Penentuan dimensi bahan bakar
  - 2.3. Kalibrasi Instrumentasi
  - 2.4. Instalasi Instrumentasi laboratorium
3. Pengujian dan Pengambilan Data
  - 3.1. Pengukuran massa dan ukuran rata-rata setiap jenis bahan bakar sebelum memasuki *feeding*
  - 3.2. Pengukuran variasi putaran pada blower.
4. Pengolahan Data dan Grafik
  - 4.1. Perhitungan laju aliran massa bahan bakar pada *feeding* terhadap perubahan temperatur yang dihasilkan.
  - 4.3. Interpretasi grafik perbandingan dari berbagai kondisi dari hasil pengolahan data
5. Analisa dan Kesimpulan
  - 5.1. Menganalisa kestabilan dari proses pembakaran dengan pemasukan bahan bakar yang terkontrol
  - 5.2. Menganalisa korelasi dan pengaruh dari laju aliran massa bahan bakar dan temperatur yang dicapai
  - 5.3. Menarik kesimpulan dari keseluruhan proses penelitian yang dilakukan

## 1.7 SISTEMATIKA PENULISAN

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

BAB 1            PENDAHULUAN, berisi :

Latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.

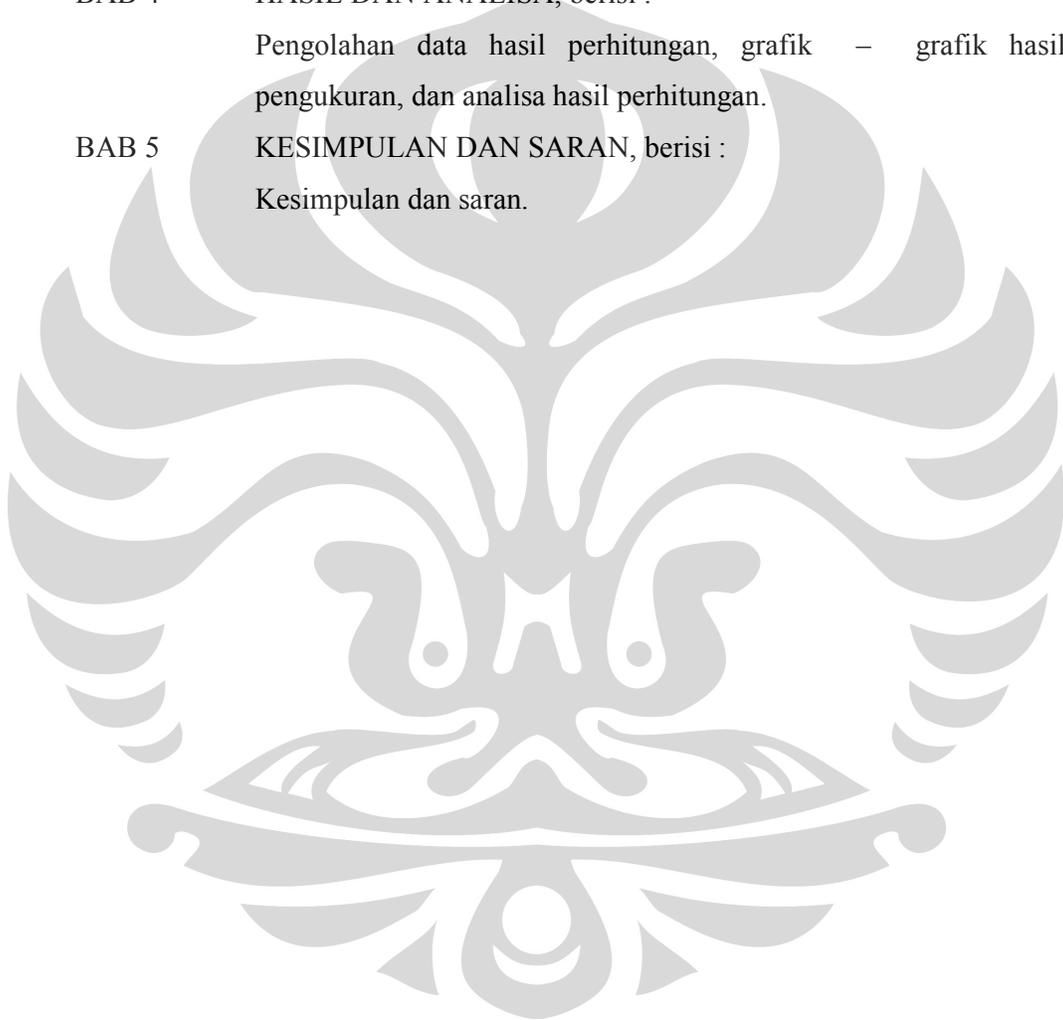
BAB 2            TINJAUAN PUSTAKA, berisi :

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

BAB 3 PENGUJIAN DAN PENGUKURAN, berisi :  
Skematik pengujian, metodologi pengujian, dan metodologi pengambilan data.

BAB 4 HASIL DAN ANALISA, berisi :  
Pengolahan data hasil perhitungan, grafik – grafik hasil pengukuran, dan analisa hasil perhitungan.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN, berisi :  
Kesimpulan dan saran.



## **BAB 2**

### **DASAR TEORI**

#### **2.1 ENERGI BIOMASSA**

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

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

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

##### **2.1.1 Jenis-Jenis Biomassa**

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

###### **2.1.1.1 Solid Biomassa**

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

- a) *Temperate Regions (wilayah beriklim sedang)*  
Menghasilkan kayu, sisa tumbuhan, serta kotoran manusia dan hewan.
- b) *Arid and semi – arid Regions (wilayah beriklim kering)*  
Menghasilkan sedikit vegetasi untuk sumber energi.
- c) *Humid Tropical Regions (wilayah beriklim lembab)*

- d) Menghasilkan persediaan kayu dan sisa – sisa tumbuhan yang sangat berlebih serta kotoran manusia dan hewan

### 2.1.1.2 Biogas

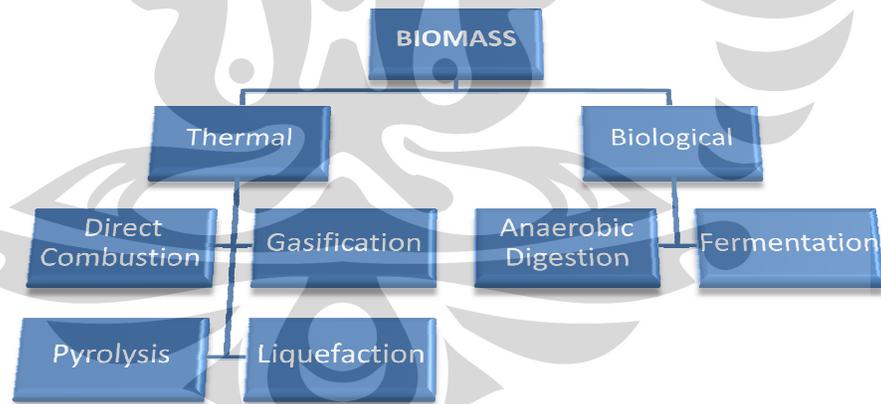
Biogas berasal dari material organik yang telah melewati proses fermentasi atau anaerob digesting oleh bakteri pada koindisi udara kekurangan oksigen yang kemudian menghasilkan gas yang dapat terbakar (combustible gas).

### 2.1.1.3 Liquid Biofuel

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

## 2.1.2 Teknologi Pengkonversian Energi Biomassa

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



gambar 2. 1 Chart Teknologi Konversi Biomassa

### 2.1.2.1 Proses Thermal

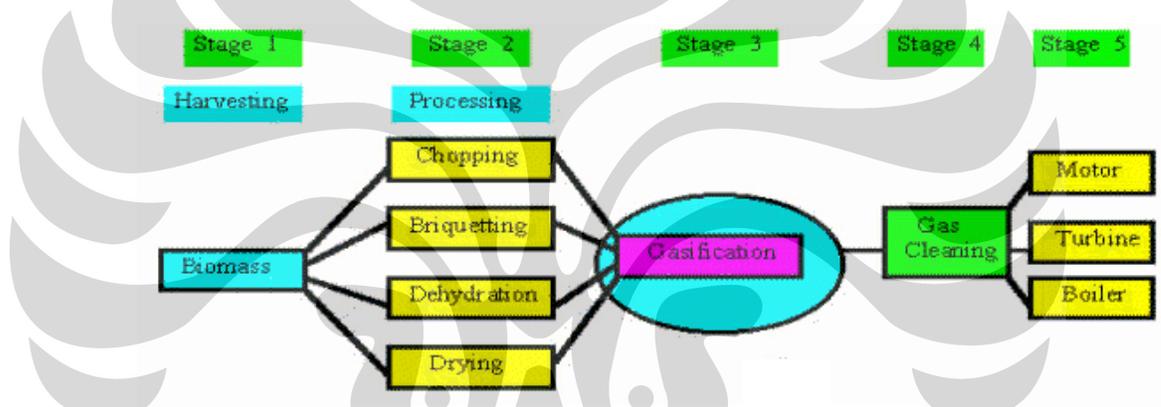
Ada 3 proses pemanasan dalam menghasilkan energi biomassa, yaitu:

1. *Direct Combustor*

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

## 2. Gasification

Gasifikasi adalah proses pembentukan gas yang dapat terbakar yang berasal dari material organik, seperti kayu, gabah/sampah pertanian yang dipanaskan dan dibakar dengan keadaan oksigen 1/3 dari jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk pembakaran penuh. Pembakaran dengan keadaan kekurangan oksigen inilah yang disebut dengan pyrolysis. Proses ini menghasilkan gas yang dapat dibakar seperti H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, N<sub>2</sub>, dan gas-gas lain yang tak dapat terbakar.



gambar 2. 2 Proses Gasifikasi (sumber : <http://www.w3.org>)

Secara umum ada 3 sesi proses gasifikasi biomassa:

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

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

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

Aplikasi pada proses gasifikasi, salah satunya adalah sebagai sumber energi alternatif untuk pembangkit listrik. Dimana bahan bakar gas hasil dari pembakaran (secara gasifikasi) dari sampah organik digunakan untuk memanaskan air hingga berubah fase menjadi uap panas (steam) bertekanan tinggi untuk ditransportasikan untuk memutar turbin uap. Shaft dari turbin uap

dikoneksikan ke shaft generator dan ketika shaft turbin berotasi mengakibatkan shaft generator berotasi dan kemudian membangkitkan listrik. Setelah uap (steam) melewati turbin uap suhunya menjadi lebih rendah dan tekanannya menurun dan dikondensasikan pada cooling system oleh kondensor hingga fasenya kembali berubah menjadi air. 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<sup>0</sup> C, air akan terpisah dan dibuang, pyrolysis sesungguhnya terjadi pada suhu antara 280 sampai 500<sup>0</sup> C, pyrolysis menghasilkan banyak karbon dioksida, tar, dan sedikit metil alkohol. Antara 500 sampai 700<sup>0</sup> C produksi gas mengandung hidrogen. Secara umum pyrolysis menghasilkan  $C_6H_{10}O_5 = 5CO + 5H_2 + C$ .

### 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**

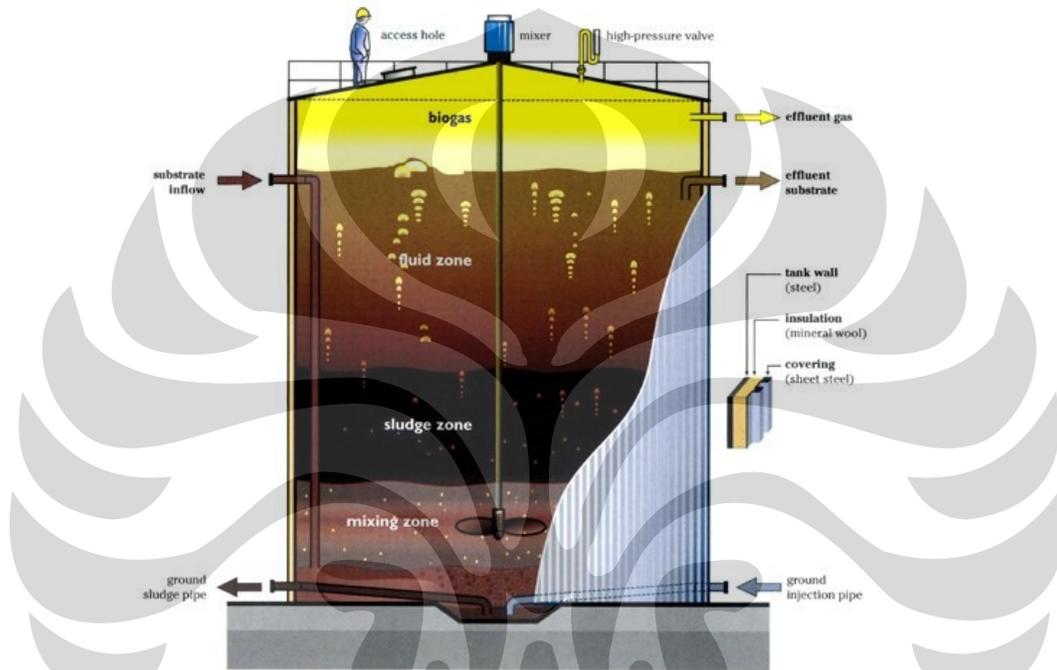
Proses ini bertujuan untuk menghasilkan gas yang dapat terbakar melalui proses yang mengikutsertakan komponen biologi, yaitu bakteri. Proses ini akan menghasilkan gas dari sampah organik seperti kotoran ternak dan sisa-sisa makanan.

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

##### 1. *Anaerobic degistion*

Proses ini adalah proses yang mengikutsertakan mikroorganisme untuk menguraikan material dengan kondisi tanpa oksigen. Proses ini dapat digunakan

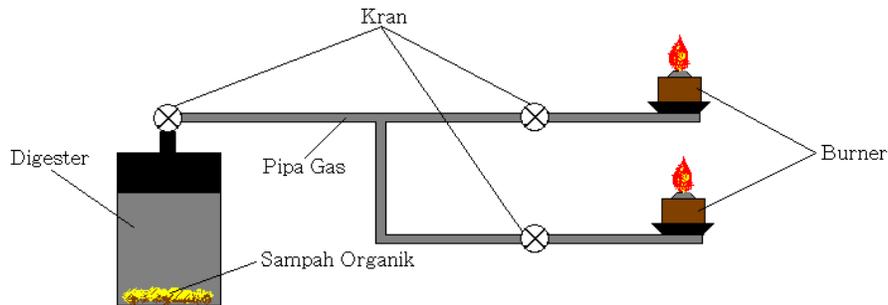
pada sampah organik dan juga kotoran hewan. Anaerobic digestion merupakan proses yang kompleks. Pertama-tama, mikro organisme mengubah material organik kedalam bentuk asam organik. Bakteri anaerob (methanogenic) akan mengubah asam ini dan menyelesaikan proses dekomposisi dengan menghasilkan metana.



gambar 2. 3 Anaerobic Digester

(sumber: [http://www.daviddarling.info/encyclopedia/A/AE\\_anaerobic\\_bacteria.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/A/AE_anaerobic_bacteria.html))

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



gambar 2. 4 Rangkaian Instalasi Biogas

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

### 2. *Hydrolisis*

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

### 3. *Fermentasi*

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

### 4. *Acetogenesis*

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

### 5. *Methanogenesis*

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

### 6. *Fermentasi*

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

### 2.1.3 Kelebihan dan Kekurangan

Energi biomassa memiliki kelebihan dan kekurangan beberapa diantaranya yaitu:

Kelebihan energi biomassa :

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

Kekurangan energi biomassa :

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

## 2.2 KARAKTERISTIK BIOMASSA

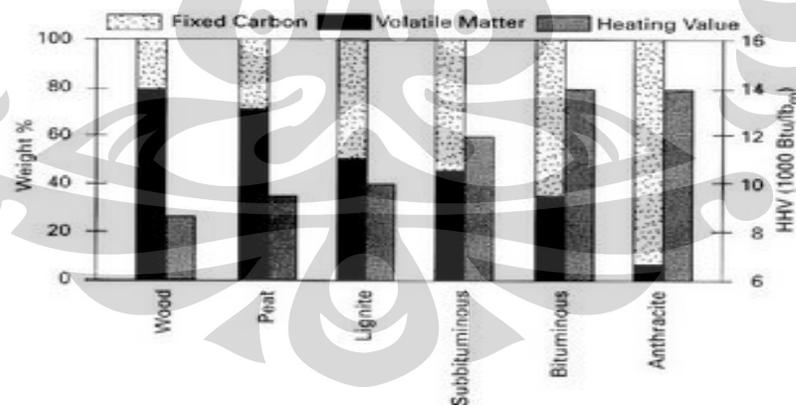
Potensi biomassa yang melimpah merupakan solusi energi masa depan karena dapat dikategorikan sebagai “*green and sustainable energi*” yaitu pemanfaatannya yang bersifat ramah lingkungan dan keberadaannya melimpah di dunia khususnya di Indonesia. Untuk pemanfaatan dengan cara *indirect combustor*, biomassa dikenal sebagai *zero CO<sub>2</sub> emission*, dengan kata lain tidak menyebabkan akumulasi CO<sub>2</sub> di atmosfer, dan biomassa juga mengandung lebih sedikit sulfur jika dibandingkan dengan batubara.

Nilai kalor rendah (LHV) biomass (15-20 MJ/kg) lebih rendah dibanding nilai kalor batubara (25-33 kJ/kg) dan bahan bakar minyak (gasoline, 42,5 MJ/kg). Artinya untuk setiap kg biomassa hanya mampu menghasilkan energi 2/3 dari energi 1 kg batubara dan 1/2 dari energi 1 kg gasoline. Nilai kalor berhubungan langsung dengan kadar C dan H yang dikandung oleh bahan bakar padat. Semakin besar kadar keduanya akan semakin besar nilai kalor yang dikandung. Menariknya

dengan proses 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°C. Pada temperatur ini, air berada dalam kondisi fasa uap. Jika jumlah kalor laten uap air diperhitungkan atau setelah terbakar, temperatur gas pembakaran dibuat 25°C, maka akan diperoleh nilai kalor atas (HHV, *higher heating value*). Pada temperatur ini, air akan berada dalam kondisi fasa cair.

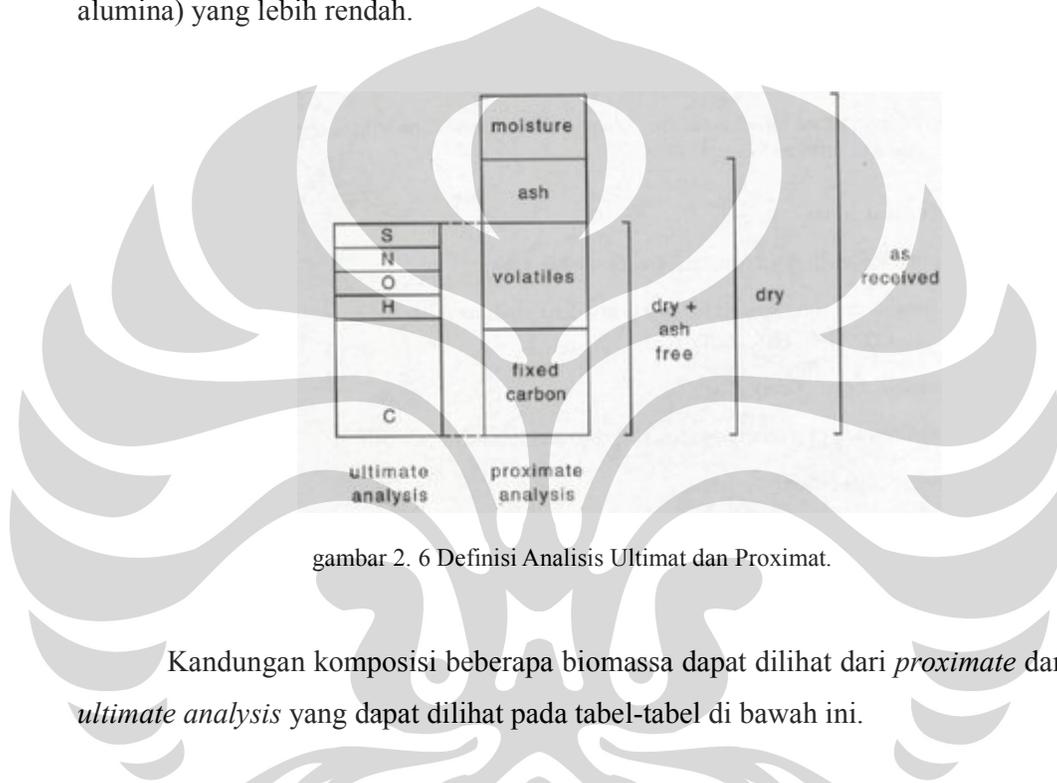
Biomassa mempunyai kadar *volatile* yang tinggi (sekitar 60-80%) dibanding kadar *volatile* pada batubara, maka biomas lebih reaktif dibanding batubara. Perbandingan bahan bakar (FR) dinyatakan sebagai perbandingan kadar karbon dengan kadar volatil. Untuk batubara, FR ~ 1 - 10. Untuk gambut, FR ~ 0.3.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



gambar 2. 5 Analisis Proximat untuk Beberapa Jenis Bahan Bakar Padat.

Pada analisis proximat biomassa juga mengandung abu dan air (lihat Gambar di bawah). Massa biomassa awal umumnya diistilahkan sebagai as received (mengandung air, abu, volatil, dan karbon). Kadar abu dari biomass

berkisar dari 1% sampai 12% untuk kebanyakan jerami-jeramian dan bagas. Abu dari biomass lebih ramah dibandingkan abu dari batubara karena banyak mengandung mineral seperti fosfat dan potassium. Pada saat pembakaran maupun gasifikasi, abu dari biomas juga lebih aman dibandingkan abu dari batubara. Dengan temperatur operasi tidak lebih dari 950°C atau 1000°C, abu dari biomass tidak menimbulkan terak. Abu biomas mempunyai jumlah oxida keras (silica dan alumina) yang lebih rendah.



gambar 2. 6 Definisi Analisis Ultimat dan Proximat.

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

<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
Tempurung Kelapa	47.62	6.2	0.7	43.38	-	2.1
Ranting kayu	50.46	5.97	42.37	0.15	0.05	1
Kertas	43.41	5.82	44.32	0.25	0.20	6.00

tabel 2. 1 *Ultimate Anaysis* Beberapa Jenis Biomassa

(Sumber: Walter R. Niese.)

<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
Tempurung Kelapa	7,8	80,8	18,8	0,4
Ranting kayu	20	67.89	11.31	0.8
Kertas	10.24	75.94	8.44	5.38

tabel 2. 2 *Proximate Analysis* Beberapa Jenis Biomassa

(Sumber: Walter R. Niessen. 1994)

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

tabel 2. 3 Nilai LHV Beberapa Jenis Biomassa

### 2.3 SISTEM REAKSI PEMBAKARAN

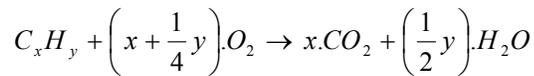
Pembakaran adalah sebuah reaksi antara oksigen dan bahan bakar yang menghasilkan panas. Oksigen diambil dari udara yang berkomposisi 21 % oksigen serta 79 % nitrogen (persentase volume), atau 77 % oksigen serta 23 % nitrogen (persentase massa). Unsur terbanyak yang terkandung dalam bahan bakar adalah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



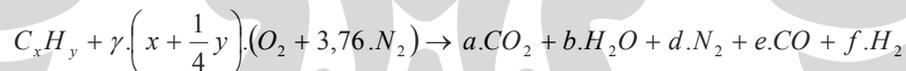
Nilai dari x dan y di atas bergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan. Nilai x adalah fraksi massa untuk kandungan *Carbon*, dan y fraksi massa untuk kandungan *Hidrogen* dalam bahan bakar.

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.



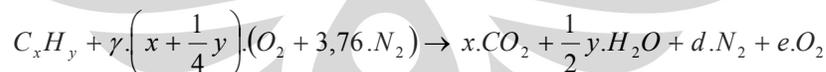
Namun, ada kalanya juga proses pembakaran tidak terjadi pada komposisi ideal antara bahan bakar dengan udara. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, proses yang tidak pada kondisi ideal ini bisa terbagi menjadi dua, yaitu pembakaran kaya dan pembakaran miskin.

- 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.

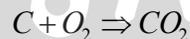
Padat	Cair	Gas
Kayu + Ranting	Solar	LNG
Ampas Tebu	Minyak Tanah	LPG
Tempurung + Sabut	Bensin, dll.	dll.
Kelapa		
Batu bara, dll.		

tabel 2. 4 Jenis-Jenis Bahan Bakar

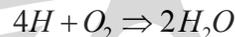
### 2. Zat yang membakar

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

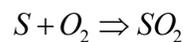
- Karbon terbakar sempurna akan membentuk  $CO_2$  menurut persamaan :



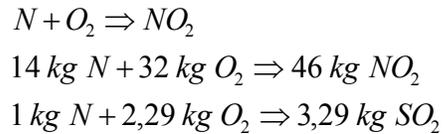
- Hidrogen terbakar sempurna akan membentuk  $H_2O$  menurut persamaan :



- Belerang terbakar akan membentuk  $SO_2$  menurut persamaan :



- Nitrogen terbakar membentuk  $NO_2$  menurut persamaan :



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

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

Kebutuhan udara dalam proses pembakaran dapat diklasifikasikan menjadi sebagai berikut :

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

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

Nilai *excess air* ini dapat ditulis sebagai berikut :

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

keterangan :  $m = excess\ air$

$A_o =$  jumlah udara teoritis

$A =$  jumlah udara aktual

### 3. Zat yang dihasilkan dari pembakaran

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

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

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

## 2.4 FLUIDIZED BED COMBUSTOR

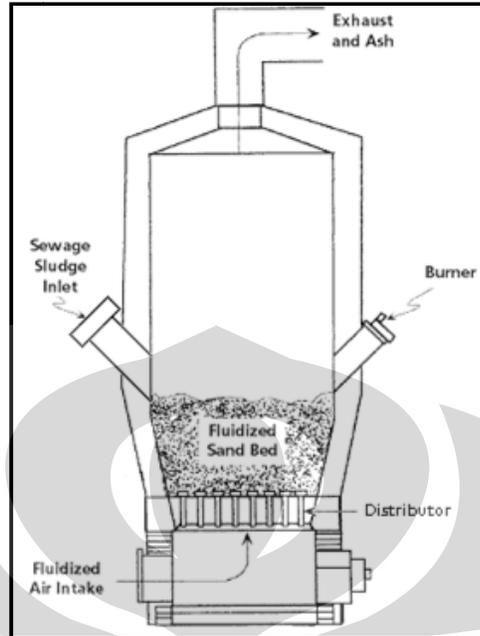
*Fluidized bed combustor* adalah sebuah tungku pembakar yang menggunakan media pengaduk berupa pasir seperti pasir kuarsa dan silika, tujuannya agar terjadi pencampuran (*mixing*) yang homogen antara udara dengan butiran-butiran pasir tersebut. *Mixing* yang konstan antara partikel-partikel mendorong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

Hamparan pasir yang menjadi media pengaduk diletakkan di atas *distributor* yang berupa grid logam dengan dilapisi bahan tahan api. Grid ini berisi suatu pelat berpori berisi nosel-nosel injeksi udara atau *tuyere* di mana udara dialirkan ke dalam ruang bakar untuk menfluidisasi hamparan (*bed*) tersebut. Aliran udara melalui nosel menfluidisasi hamparan 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 hamparan 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.

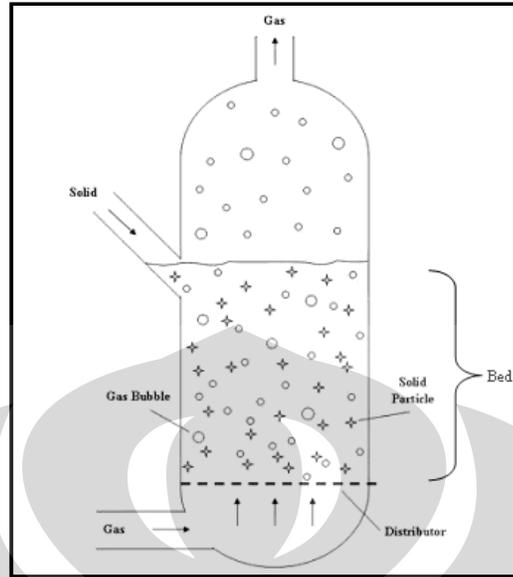
Reaktor unggun atau hamparan fluidisasi (*fluidized bed*) berfungsi meningkatkan penyebaran umpan bahan bakar yang datang dengan pemanasan yang cepat sampai temperatur pengapiannya (*ignition*) serta meningkatkan waktu kontak yang cukup dan juga kondisi pencampuran yang hebat untuk pembakaran sempurna.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

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



gambar 2. 7 Skematis *Fluidized Bed Combustor*

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



gambar 2. 8 Diagram Proses Pencampuran (*mixing*) dalam *Fluidized Bed Combustor*

Pencampuran dalam *fluidized bed* terdistribusi secara cepat dan seragam antara bahan bakar dan udara atau gas seperti yang diperlihatkan pada gambar, sehingga mengakibatkan perpindahan kalor dan pembakaran yang baik. 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 *Bubbling Fluidized Bed* (BFB) sedangkan jenis lainnya adalah insinerator *Circulating Fluidized Bed* (CFB), yang mana kecepatan udara yang lebih tinggi menyebabkan laju perpindahan partikel yang tinggi.

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

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

#### 2.4.2 Pinsip Kerja Fluidized Bed Combustor

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

- Turbulensi partikel padatan, dengan meningkatkan kontak fisik antara partikel padat (pasir) dengan bahan bakar (sampah), yang menghasilkan panas dan perpindahan panas yang lebih baik, dan juga menunjukkan panas yang seragam di sekitar pasir, dan juga di sekitar ruang bakar secara umumnya.
- Temperatur sebagai kontrol variabel yang independen dapat meningkatkan kontrol polusi yang dapat dihasilkan oleh penempatan bahan bakar dan

sistem distribusi udara, serta penempatan tabung *heat recovery* dalam reaktor.

- Penggunaan pasir sebagai *inert material* dapat mengurangi dampak sisa hasil pembakaran dengan menggunakan bahan bakar yang basah atau kotor.

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

1. Kondisi awal

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

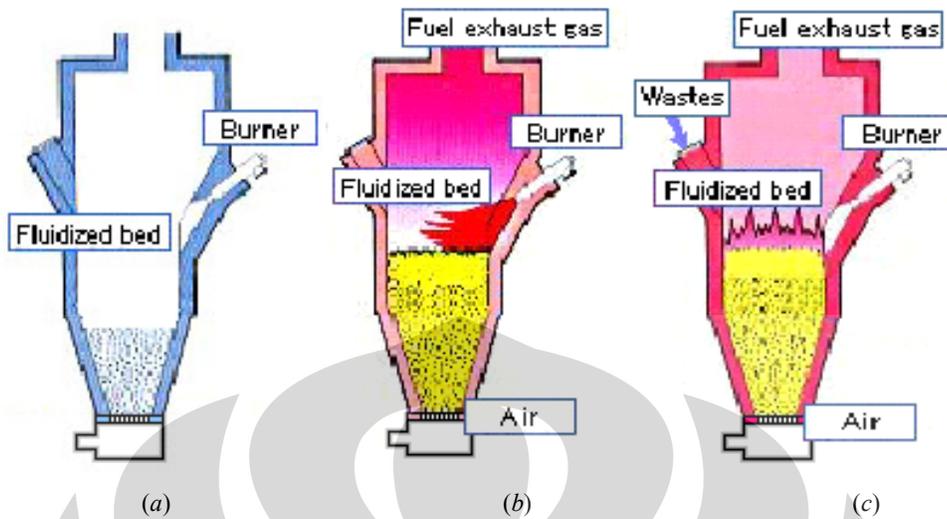
2. Proses pemanasan

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

3. Kondisi operasi

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

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



gambar 2. 9 Tahapan Proses Kerja *Fluidized Bed Combustor*; (a) Tahapan pada Kondisi Awal; (b) Tahapan Proses Pemanasan; (c) Tahapan pada Kondisi Operasi.

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

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

#### 2.4.3.1 *Fluidization Vessel*

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

##### 1. Ruang Bakar

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



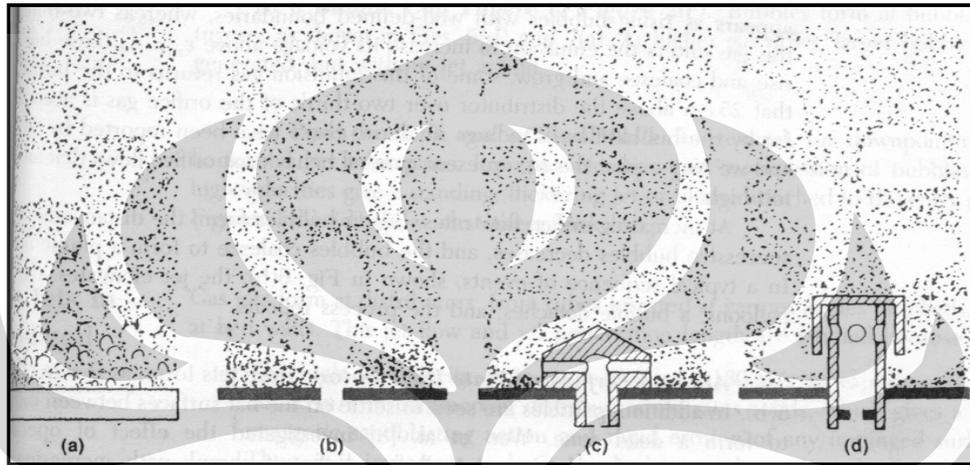
gambar 2. 10 Ruang Bakar Utama *Fluidized Bed Combustor* UI

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

## 2. Distributor

Distributor digunakan untuk untuk mendistribusikan aliran udara dari blower secara seragam pada keseluruhan penampang reaktor sehingga hamparan pasir yang ditopang oleh distributor tersebut terjadi fluidisasi. Distributor ini juga

memiliki pengaruh terhadap ukuran dan jumlah *bubble* yang dihasilkan. Terdapat beberapa jenis distributor yang sering digunakan, yaitu *porous plate*, *perforated plate*, *nozzle-type tuyere*, dan *bubble cap tuyere*. Masing-masing jenis distributor tersebut dapat menghasilkan perilaku gelembung yang berbeda-beda seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.8.



gambar 2. 11 Perilaku Gelembung Setiap Jenis Distributor; (a) *Porous Plate*; (b) *Perforated Plate*; (c) *Nozzle-type Tuyere*; (d) *Bubble Cap Tuyere*.



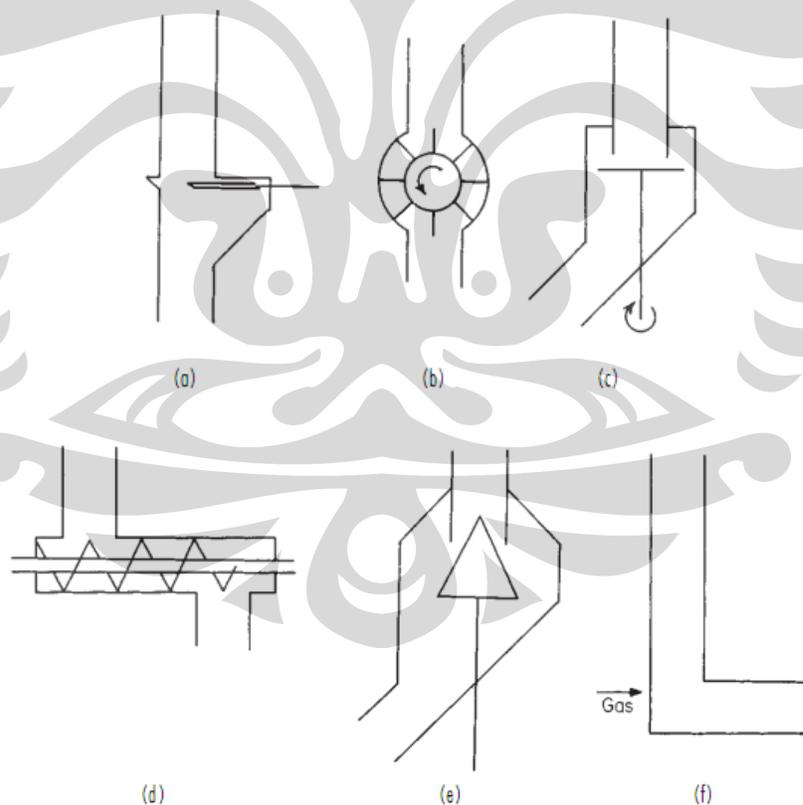
gambar 2. 12 Distributor yang digunakan pada *Fluidized Bed Combustor* UI

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

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

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



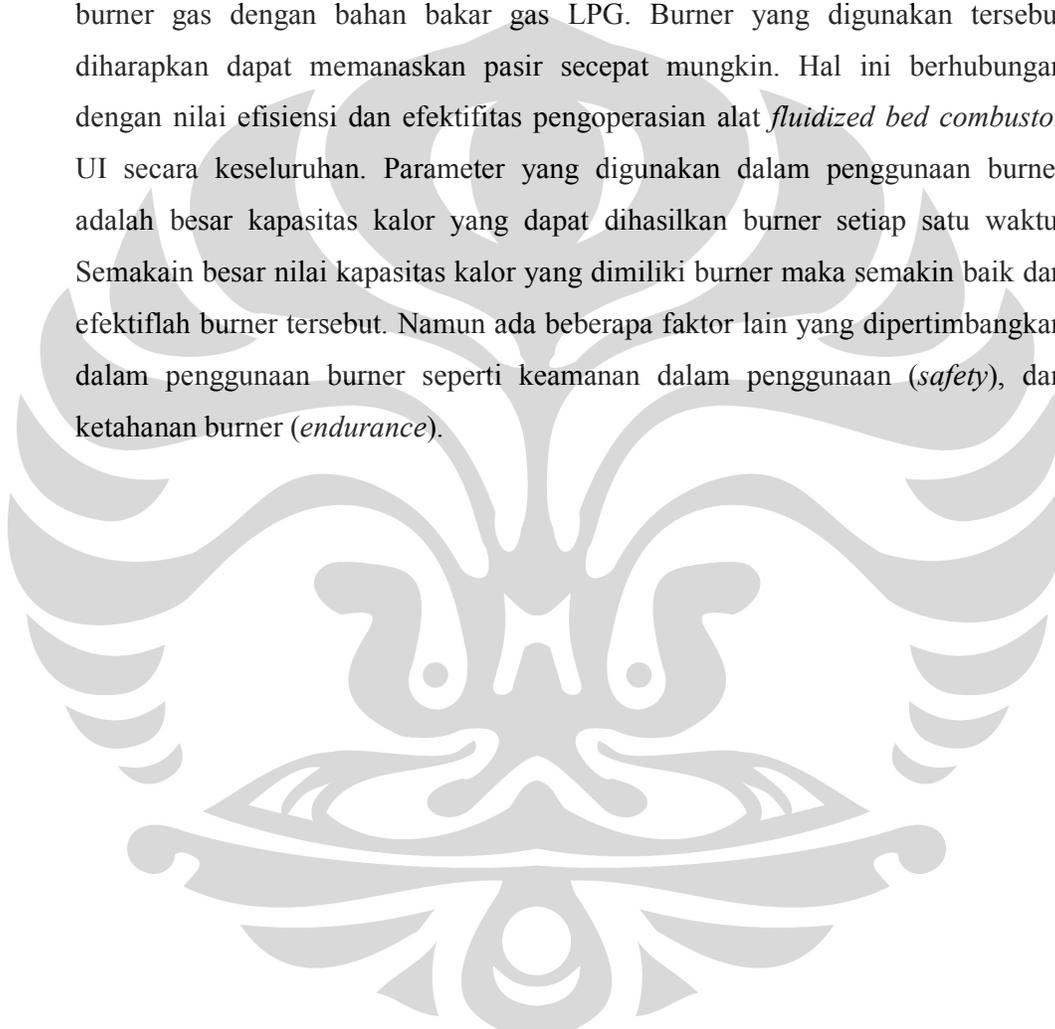
gambar 2. 14 *Screw Feeder*

#### **2.4.3.3 Burner**

*Burner* merupakan komponen penting pada *fluidized bed combustor*. Burner digunakan sebagai alat untuk proses pemanasan awal. Burner berfungsi untuk memanaskan pasir sampai pasir tersebut mencapai temperatur 750-800 °C.

Dalam pengoperasiannya, burner hanyalah digunakan sementara. Burner tidak digunakan selamanya selama pengoperasian alat berlangsung seperti halnya blower, namun burner hanya digunakan pada proses awal saat proses pemanasan pasir dilakukan sampai temperatur operasi. Ketika hamparan pasir sudah mencapai temperatur yang diinginkan, maka burner ini akan berhenti bekerja.

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





gambar 2. 15 Burner yang Digunakan pada *Fluidized Bed Combustor* UI

#### 2.4.3.4 Bed Material

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

termal yang tinggi, kalor jenis yang rendah, titik lebur yang tinggi, serta tahan terhadap temperature tinggi dalam waktu yang lama.

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

- *Group A*

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

- *Group B*

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

- *Group C*

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

- *Group D*

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

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

#### 2.4.3.5 Cyclone separator

*Cyclone separator* merupakan salah satu komponen penting sebagai *gas cleaning system* dari hasil proses pembakaran yang terjadi. *Cyclone separator* berfungsi sebagai alat pemisah partikel padat dengan gas. Pada komponen ini, yang dipisahkan adalah partikel-partikel hasil dari proses pembakaran. Akibat yang dihasilkan dari proses pembakaran yang terjadi, terutama pembakaran dengan *fluidized bed combustor*, akan menghasilkan partikel-partikel padat besar dan partikel-partikel padat kecil beserta dengan partikel gas.

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



gambar 2. 16 *Cyclone Separator Fluidized Bed Combustor UI*

#### 2.4.3.6 Blower

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



gambar 2. 17 Blower Sentrifugal yang Digunakan pada FBC

#### 2.4.3.7 Instrumentation

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

1. *Control Panel*

Berfungsi untuk mengontrol putaran feeder dan putaran blower.



*gambar 2. 18 Control Panel*

2. *Termokopel*

Berfungsi untuk mengukur temperatur di dalam ruang bakar.

3. *Data logger*

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

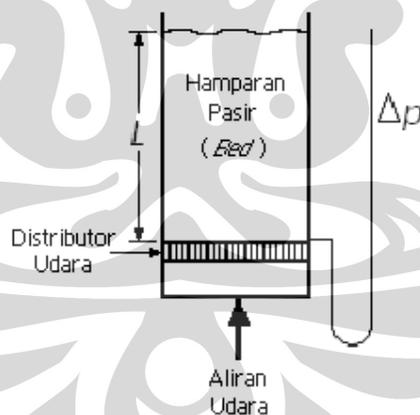


*gambar 2. 19 Data Logger*

## 2.5 FENOMENA FLUIDISASI

### 2.5.1 Proses Fluidisasi

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



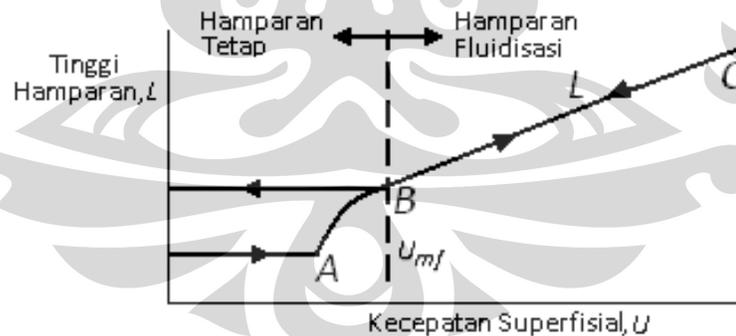
gambar 2. 20 Skematik Fluidisasi

### 2.5.2 Kondisi Fluidisasi

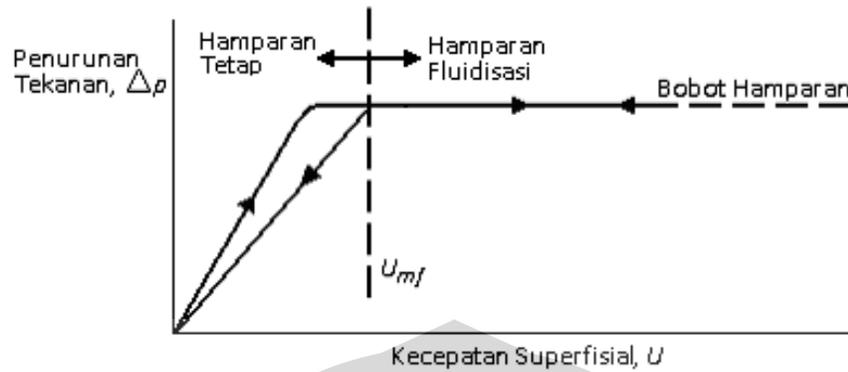
Perhatikan suatu tabung vertikal yang sebagian berisi dengan bahan butiran, sebagaimana terlihat dalam skema gambar. Tabung itu turbulen pada bagian atas, dan mempunyai plat berpori pada bagian bawah untuk menopang

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

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



gambar 2. 21 Hubungan Tinggi Hamparan Terhadap Kecepatan Superfisial  
di Dalam Hamparan Zat Padat



gambar 2. 22 Hubungan Penurunan Tekanan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hamparan Zat Padat

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

### 2.5.3 Jenis-Jenis Fluidisasi

#### 2.5.3.1 Fluidisasi partikulat (*particulate fluidization*)

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

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

Ketika fluida cair 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 tereksansi dan pergerakan partikel semakin cepat. Jalan bebas rata-rata suatu partikel di antara tubrukan-tubrukan dengan partikel lainnya akan bertambah besar dengan meningkatnya kecepatan fluida, dan akibatnya porositas hamparan akan meningkat pula. Ekspansi dari hamparan ini akan diikuti dengan meningkatnya kecepatan fluida sampai setiap partikel bertindak sebagai suatu individu. Proses ini dikenal sebagai fluidisasi partikulat.

### **2.5.3.2 Fluidisasi gelembung (*bubbling fluidization*)**

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

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

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 hampan pasir. *Bed voidage* didefinisikan sebagai perbandingan antara selisih volume hampan 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 hampan ( $\rho_b$ ).

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

### 2.5.4.5 Kecepatan fluidisasi minimum

Bila gas dilewatkan melalui lapisan hampan partikel padat pasir pada kecepatan rendah, partikel-partikel itu tidak bergerak. Jika kecepatan fluida berangsur-angsur dinaikkan, partikel-partikel pasir itu akhirnya akan mulai bergerak dan melayang di dalam fluida, dan gesekan (*friction*) menyebabkan terjadinya penurunan tekanan (*pressure drop*). Ketika kecepatan gas dinaikkan, penurunan tekanan meningkat sampai besar penurunan tekanan tersebut sama dengan berat hamparannya dibagi dengan luas penampangnya. Kecepatan gas ini disebut kecepatan fluidisasi minimum,  $U_{mf}$ . Kecepatan fluidisasi minimum adalah kecepatan superfisial terendah yang dibutuhkan untuk terjadinya fluidisasi. Jika  $U_{mf}$  tidak dapat ditentukan secara eksperimental, maka gunakan persamaan di bawah ini.

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

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

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

bilangan *Archimedes* ( $Ar$ ):

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

keterangan :  $U_{mf}$  = kecepatan fluidisasi minimum (  $m/s$  )  
 $\bar{d}_p$  = diameter partikel rata-rata pasir (  $m$  )  
 $\rho_f$  = densitas fluida gas (  $kg/m^3$  )  
 $\rho_p$  = densitas partikel pasir (  $kg/m^3$  )  
 $\mu_f$  = viskositas dinamik fluida gas (  $N.s/m^2$  )  
 $g$  = percepatan gravitasi (  $m/s^2$  )

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

#### 2.5.4.6 Penurunan tekanan melintas 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*.

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

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

Keterangan :

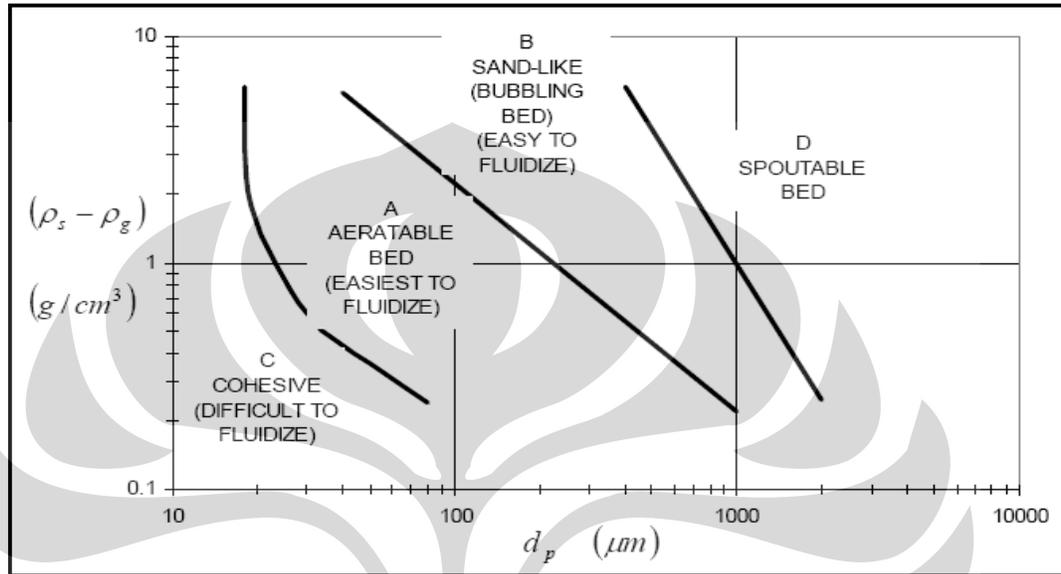
- $\Delta P_d$  = penurunan tekanan melewati distributor ( $N/m^2$ )
- $U_o$  = kecepatan udara superfisial ( $m/s$ )
- $U_{or}$  = kecepatan udara rata-rata melewati orifis ( $m/s$ )
- $f_{or}$  = *fractional open area* ( $m^2$ )
- $\rho_f$  = massa jenis fluida udara ( $kg/m^3$ )
- $C_D$  = *Orifice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

#### 2.5.4.8 Klasifikasi pasir

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

Geldart meneliti perilaku tiap-tiap kelompok pasir ketika mengalami fluidisasi. Dia 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. 23 Diagram Klasifikasi Jenis-Jenis Pasir. [sumber: Geldart, 1991]

Klasifikasi jenis-jenis pasir menurut Geldart, yaitu :

a) *Group A*

Pasir yang dikategorikan dalam *group A* menurut Geldart biasanya memiliki massa jenis kurang dari  $1400 kg/m^3$  dan memiliki ukuran berkisar antara 20 sampai  $100 \mu m$ . 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 hamparan (*channelling*) dari distributor sampai permukaan hamparan. Jika *channelling* tidak terbentuk, maka seluruh hamparan akan terangkat seperti piston. Semua kelompok partikel pasir ini (*group A, B, C,* dan *D*) ketika kecepatan gas dinaikkan lagi, densitas hamparan akan berkurang dan turbulensi meningkat.

Pada pasir yang lebih halus dan kurang padat (*group A*), ukuran gelembung stabil maksimum jauh lebih kecil daripada pasir yang lebih kasar dan lebih padat (*group B*) sehingga distribusi ukuran gelembung yang stabil dapat dicapai pada hamparan (*bed*) berdiameter yang lebih kecil dengan pasir *group A* daripada *group B*. Karena gelembung yang lebih besar naik lebih cepat daripada gelembung yang lebih kecil, maka udara yang digunakan untuk proses

penggelembungan akan lepas dari hamparan dengan lebih cepat saat ukuran gelembung rata-rata lebih besar, sehingga terdapat banyak variasi dalam pengembangan hamparan secara keseluruhan.

Group	C	A	B	D	
Most obvious characteristic	Cohesive, difficult to fluidize	Bubble-free range of fluidization	Starts bubbling at $U_{mf}$	Coarse solids	
Property	Flour, cement	Cracking catalyst	Building sand, table salt	Crushed limestone coffee beans	
1. Bed expansion	Low when bed channel, can be high when fluidized	High	Moderate	Low	
2. Deaeration rate	Initially fast, exponential	Slow, linear	Fast	Fast	
3. Bubble Properties	No bubbles. Channels, and cracks	Splitting/recoalescence predominate; maximum size exist; large wake	No limit on size	No known upper size; small wake	
4. Solids mixing <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 $\mu\text{m}$ fraction improves properties	None	Increases segregation
	Increasing pressure, temperature, viscosity, density of gas	Probably improves	Definitely improves	Uncertain, some possibly	Uncertain, some possibly

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

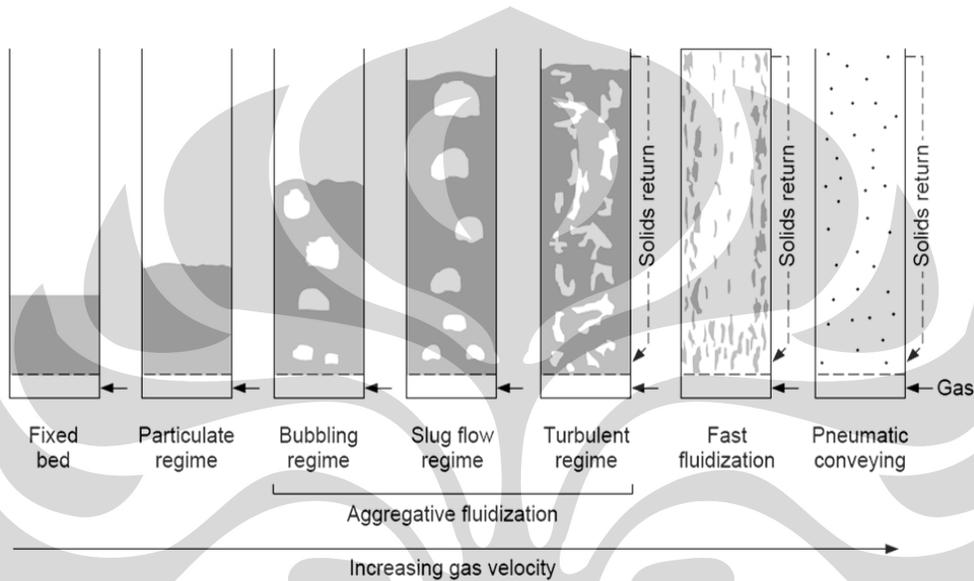
tabel 2. 5 Increasing Size and Density

(Sumber: Geldart. 1991)

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

Pada kecepatan gas rendah, suatu padatan dalam tabung hamparan fluidisasi akan berada dalam keadaan konstan atau tetap. Seiring dengan bertambahnya kecepatan gas, gaya seret mengimbangi berat hamparannya sehingga hamparan secara menyeluruh ditopang oleh aliran gas tersebut. Pada fluidisasi minimum, hamparan memperlihatkan pergerakan yang minimal dan hamparan tersebut akan sedikit mengembang. Begitu seterusnya hamparan akan

mengembang saat kecepatan aliran gas dinaikkan pula dan mengalami daerah batas fluidisasi dari *fixed bed* sampai *pneumatic conveying*. Untuk daerah batas fluidisasi turbulenta dan di atasnya beroperasi di atas kecepatan terminal dari beberapa atau bahkan semua partikel, maka pengembalian kembali partikel (*solids return*) adalah perlu untuk mempertahankan hamparan. Cara setiap daerah batas fluidisasi tampil berbeda-beda menurut kecepatan aliran gas (gambar 3.5).



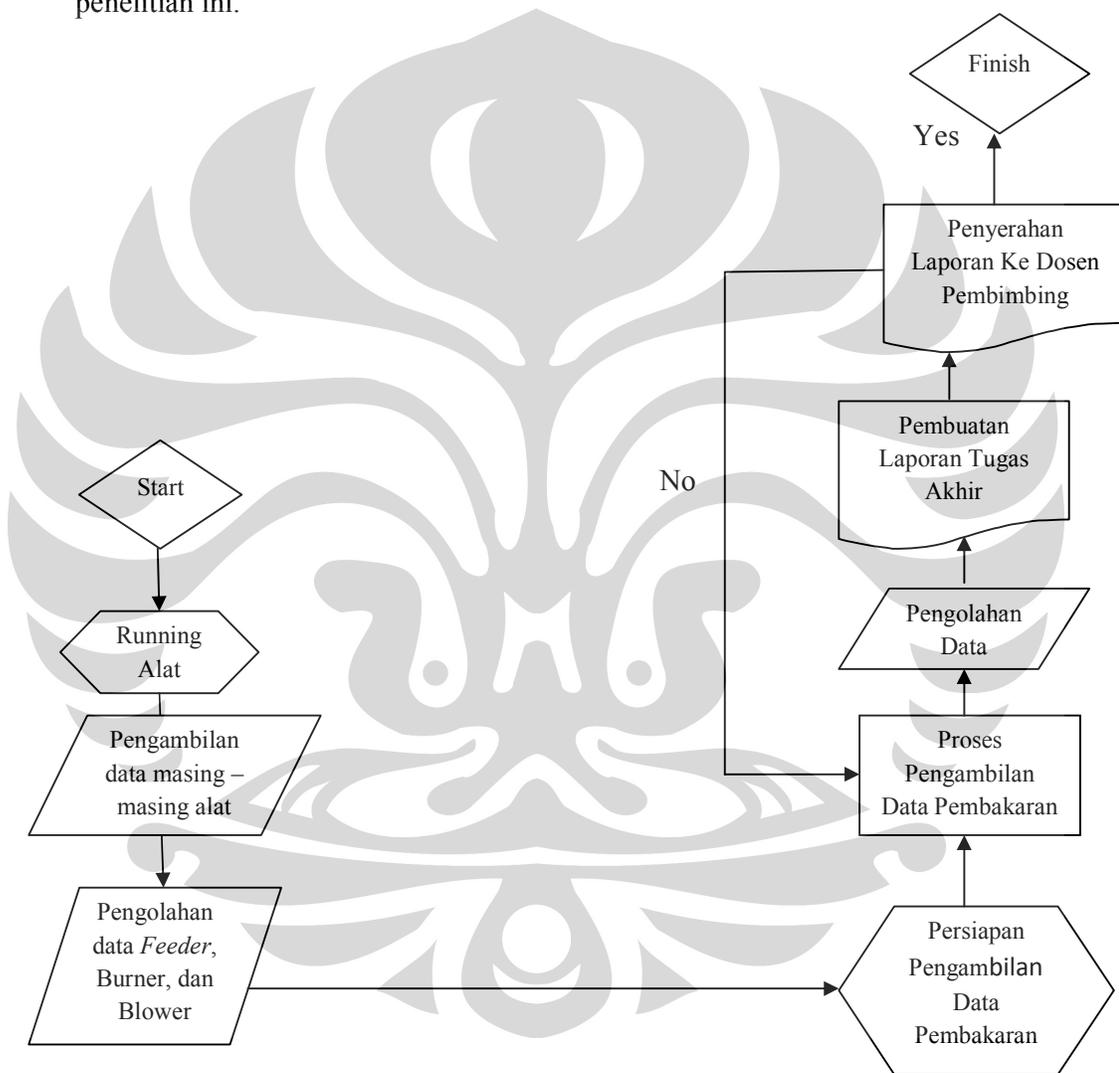
gambar 2. 24 Daerah batas fluidisasi [sumber: Grace. 1986]

# BAB 3

## METODE PENELITIAN

### 3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN

Berikut merupakan uraian proses kegiatan yang dilakukan dalam penelitian ini.



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

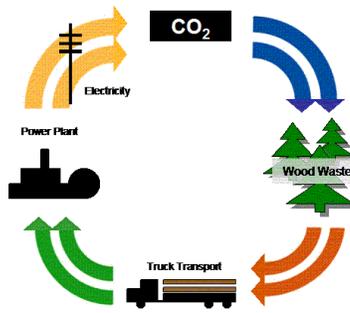
Demikian juga dengan persiapan yang harus dilakukan sebelum dilakukan pengujian alat FBC yang ada di Universitas Indonesia ini. Agar persiapan dan proses operasi pengambilan data berlangsung dengan baik dan benar, maka diberikan juga SOP (*standard operational procedure*) pada setiap alat, komponen,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

### **3.2 PERSIAPAN PENGUJIAN**

#### **3.2.1 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)



gambar 3. 1 Skematik Siklus Biomassa

([http://www.renogy.com/images/BiomassCycleChart\\_001.gif](http://www.renogy.com/images/BiomassCycleChart_001.gif))

Tempurung kelapa merupakan salah satu contoh biomassa. Tempurung 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. 2 Tempurung kelapa

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

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

tabel 3. 1 potensi biomassa di Indonesia

Dalam proses dari Tempurung kelapa yang masih merupakan bahan baku menjadi Tempurung kelapa yang siap menjadi bahan bakar hanya diperlukan dua proses, yakni pelepasan sabut dan pencacahan Tempurung kelapa tersebut menjadi bagian-bagian kecil untuk memudahkannya menjadi bahan bakar dalam proses FBC

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

panjang = ±15 mm

lebar = ±15 mm

tebal = ±4 mm



gambar 3. 3 Tempurung Kelapa yang telah dihancurkan

### 3.2.2 Pasir

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

Sebagai perbandingan nilai *specific heat* untuk substansi- substansi yang lain dapat dilihat pada tabel 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.

<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 °C)	0,50	2093
lempung berpasir	0,33	1381
udara kering (permukaan laut)	0,24	1005
pasir silika	0,20	838
pasir kuarsa	0,19	795
granit	0,19	794

tabel 3. 2 *Specific Heat* Berbagai Substansi

<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>

tabel 3. 3 Fisik, Termal, dan Mekanik Pasir Silika



gambar 3. 4 Pasir Silika yang Digunakan pada FBC UI

Beberapa keterangan yang harus diperhatikan ialah spesifikasi kondisi dari hampan 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 hampan pasir ( $d_b$ ) =  $63,5 \text{ cm} = 0,635 \text{ m}$
- tinggi hampan pasir (*bed height*) =  $15 \text{ cm} = 0,15 \text{ m}$

### 3.2.3 Perlengkapan dan Peralatan

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

1. *Generator Set*

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



gambar 3. 5 Generator Set yang Digunakan

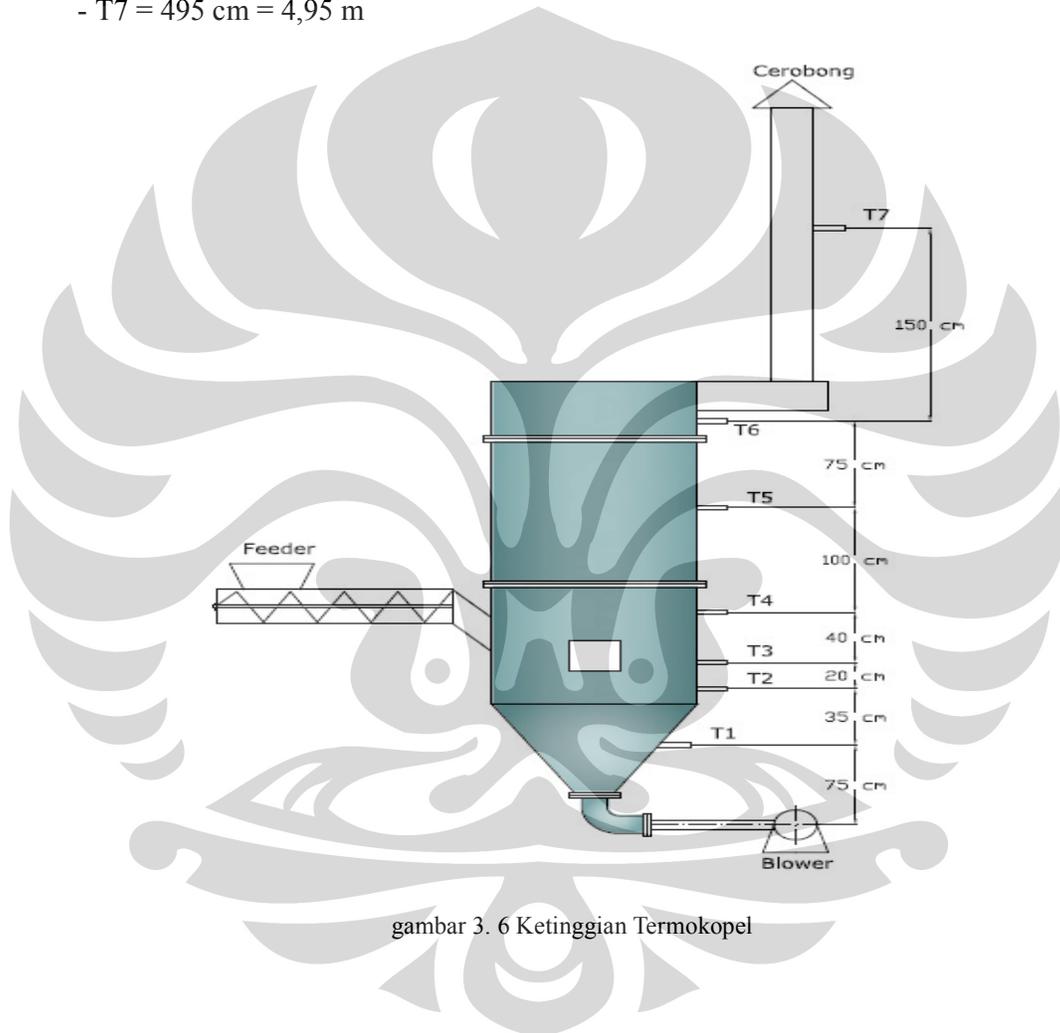
Berikut ini spesifikasi dari genset dengan merk Starke GFH 6900 LXE

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

## 2. Termokopel

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

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



gambar 3. 6 Ketinggian Termokopel



Gambar 3.7 Konfigurasi Termokopel

### 3. *Temperature Data Logger*

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



Gambar 3.8 *Temperature Data Logger*

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

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



Gambar 3.9 Timbangan dengan Skala Maksimum 2 kg

#### 4. Control Panel

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



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

#### 6. *Manometer*

Manometer di sini digunakan untuk pengujian *Blower*. Pada Manometer tersebut, diberikan air pada pipa U nya untuk mengetahui perbedaan ketinggian air pada Manometer tersebut.



gambar 3. 7 manometer tabung U

### 3.3 STANDAR OPERASI ALAT PENGUJIAN

#### 3.3.1 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 3.11 Sistem Feeder pada *Fluidized Bed Combustor* UI

Putaran (rpm)	Waktu Awal Keluar	Waktu Terakhir Keluar	Delta t (s)	Feed Rate (kg/s)	Feed Rate (kg/menit)
5	-	-	-	0	0
10	-	-	-	0	0
15	19	61	42	0,0476	2,85714
20	13	48	35	0,0571	3,42857
25	12	45	33	0,0606	3,636
30	12	43	31	0,06451	3,870967
35	10	40	30	0,0666	4
40	10	35	25	0,08	4,8
45	9	31	22	0,0909	5,45454
50	9	27	18	0,1111	6,666666

tabel 3. 4 spesifikasi sistem feeder

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

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

### 3.3.2 Blower

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



Gambar 3.12 Ring Blower pada Fluidized Bed Combustor UI

Spesifikasi dari blower yang ada dapat dilihat berikut ini :

<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

Tabel 3.5. Spesifikasi Teknis Ring Blower

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

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

2. Sambungkan konektor dari panel kontrol ke generator set untuk mendapatkan sumber tegangan, kemudian nyalakan genset.
3. Lalu aktifkan *switch* utama dan *circuit breaker* nya dengan menekan ke arah atas, lampu di pintu panel akan menyala.
4. Tekan *switch* berwarna hitam sebelah kanan ke arah bawah agar *inverter blower* menyala.
5. Tekan tombol atas ataupun bawah untuk mencari set untuk putaran (rpm), lalu tekan tombol *enter* di tengah.
6. Tekan tombol di pintu panel sebelah kanan agar menyala hijau, kemudian atur besarnya rpm hingga 3400 rpm.
7. Jika sudah selesai dan ingin mematikan blower, putar pengendali ke nol lagi dan matikan semua *switch* pada panel kontrol.

### 3.3.3 Sistem Burner

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

1. Buka *ball valve* utama gas masuk.
2. Cek tekanan kerja gas adalah 20~30 mbar (200 ~ 300 mm H<sub>2</sub>O).
3. Putar saklar *burner control* ke posisi on untuk mengaktifkan *burner control* untuk bekerja. Pada tahap awal *burner control* melakukan pengecekan status awal apakah ada tekanan udara palsu dan apakah ada api yang terdeteksi *UV sensor*. Bila ada gejala ini maka indikator burner *misfire* dan lampu merah reset akan menyala.

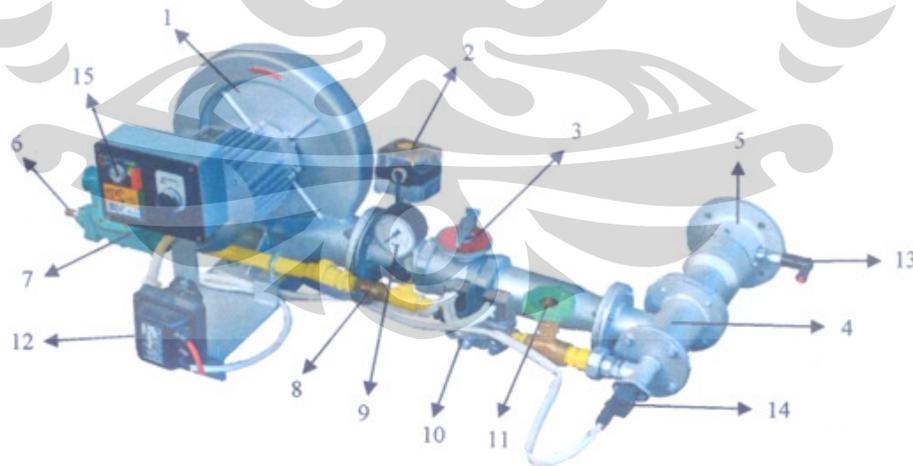
4. Kemudian blower akan berputar untuk menghasilkan tekanan yang stabil. Apabila tekanan blower di bawah nilai setting dari *air pressure switch* maka sistem akan di *cut-off* dan indikator *cut-off* akan menyala.
5. Setelah 10 detik proses *pre-purge*, yang berguna untuk mengusir gas yang terperangkap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

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

- *Penyetelan mutu api* :
  - a. Stel volume gas yang mengalir:  
Putar bagian knop *needle valve*:
    - Searah jarum jam : *flow* gas berkurang (-), api berubah menjadi lebih merah.

- Berlawanan jarum jam : *flow* gas bertambah (+), api menjadi lebih ke biru.
- b. Stel manual *air damper* pada posisi buka setengah yaitu skala nomor 3 pada *damper*. Posisi ini bisa diatur lebih lanjut, untuk mendapatkan komposisi udara dan gas yang tepat untuk membentuk mutu nyala api yang bagus. Kencangkan baut pengunci supaya posisi stelan *damper* tidak berubah.
- *Penyetelan panjang api* :
  - a. Stel *gas regulator* sehingga tekanan kerja antara 20~30 *mbar* (200~300 *mmH<sub>2</sub>O*).
  - b. Buka tutup dan putar penyetel :
    - Searah jarum jam : tekanan gas bertambah (+), panjang api berubah menjadi lebih panjang.
    - Berlawanan jarum jam : tekanan gs berkurang (-), api menjadi lebih pendek.
  - c. Selanjutnya stel kembali *damper* udara untuk mendapatkan mutu nyala api yang bagus.

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



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

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

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 <i>V</i> ; 0,75 <i>kW</i>

tabel 3. 5 spesifikasi burner

### 3.4 PROSEDUR PENGUJIAN PEMBAKARAN

Pengujian pembakaran dengan bahan bakar biomassa (Tempurung kelapa dan ranting pohon) yang dilakukan ini bertujuan untuk mendapatkan karakteristik distribusi panas serta daya panas yang dihasilkan pada alat *fluidized bed combustor* UI ini dengan melihat hubungan-hubungan antara temperatur di setiap

titik termokopel tiap satuan waktu, ketinggian termokopel, variasi *feed rate* dari feeder, variasi *flow rate* udara dari blower, serta lamanya waktu yang dibutuhkan untuk melakukan sebuah pengujian ini sampai selesai. Pengujian ini keseluruhan meliputi pengujian *feed rate*, pengujian karakteristik blower, dan pengujian pembakaran biomassa. Pengujian pembakaran ini membutuhkan metode yang optimal untuk mendapatkan hasil yang baik.

#### 3.4.1 Rangkaian Alat Pengujian

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

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

### 3.4.2 Prosedur Pengambilan Data Pembakaran

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

#### 3.4.2.1 Prosedur pemanasan awal pembakaran

1. Pastikan semua persiapan, rangkaian dan posisi alat sudah dilakukan dengan benar sesuai dengan yang sudah disebutkan sebelumnya.
2. Menyalakan blower sebagai penyedia udara saat menyalakan burner dan saat proses pembakaran berlangsung, selain itu juga untuk proses fluidisasi pasir agar panasnya tersebar merata di seluruh pasir.
3. Menyalakan burner untuk memanaskan *bed* (pasir) tunggu sampai 30 menit sehingga kenaikan temperatur pada *bed* terjadi
4. Setelah itu memasukkan *solid fuel* untuk pemanasan awal (Tempurung kelapa ataupun ranting pohon) *feeding* 0.25 kg per sampai *bed temperature* mencapai suhu sekitar 400-500 °C.
5. Kemudian burner dimatikan secara perlahan dan jaga temperatur bed temperatur diantara 400 – 500 °C. Pada temperatur ini bahan bakar Tempurung kelapa maupun ranting pohon sudah dapat terbakar dengan sendirinya (*self-sustained combustion*).

#### 3.4.2.2 Prosedur pengambilan data pembakaran

1. Setelah mencapai temperatur stabil tersebut, bahan bakar yang sudah disiapkan dengan sejumlah massa tertentu (0.25-2kg) dimasukkan ke dalam feeder melalui *hopper* dan feeder dijalankan dengan putaran 50 rpm
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, dimasukkan massa yang 0.5 kg melalui feeder dengan putaran yang sama,

perubahan temperatur setiap menitnya juga dicatat, dan begitu seterusnya sampai 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 sudah cukup rendah, maka tidak dicatat lagi perubahannya.

### 3.4.3 Prosedur Pengambilan Data Karakteristik Blower

Pengambilan data untuk karakteristik blower ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan antara besarnya putaran blower dengan laju aliran udara yang dihasilkan oleh blower pada putaran tersebut.

Pengujian *Blower* tersebut dilakukan dengan menggunakan bantuan beberapa alat, yaitu:

1. Pipa *Orifis*



Gambar 4. 1 Pipa *Orifis*

2. Manometer



Gambar 4. 2 Manometer

### 3. Selang Manometer



Gambar 4. 3 Selang Manometer

Ketiga alat di atas, disusun sedemikian rupa sesuai dengan gambar di bawah ini.

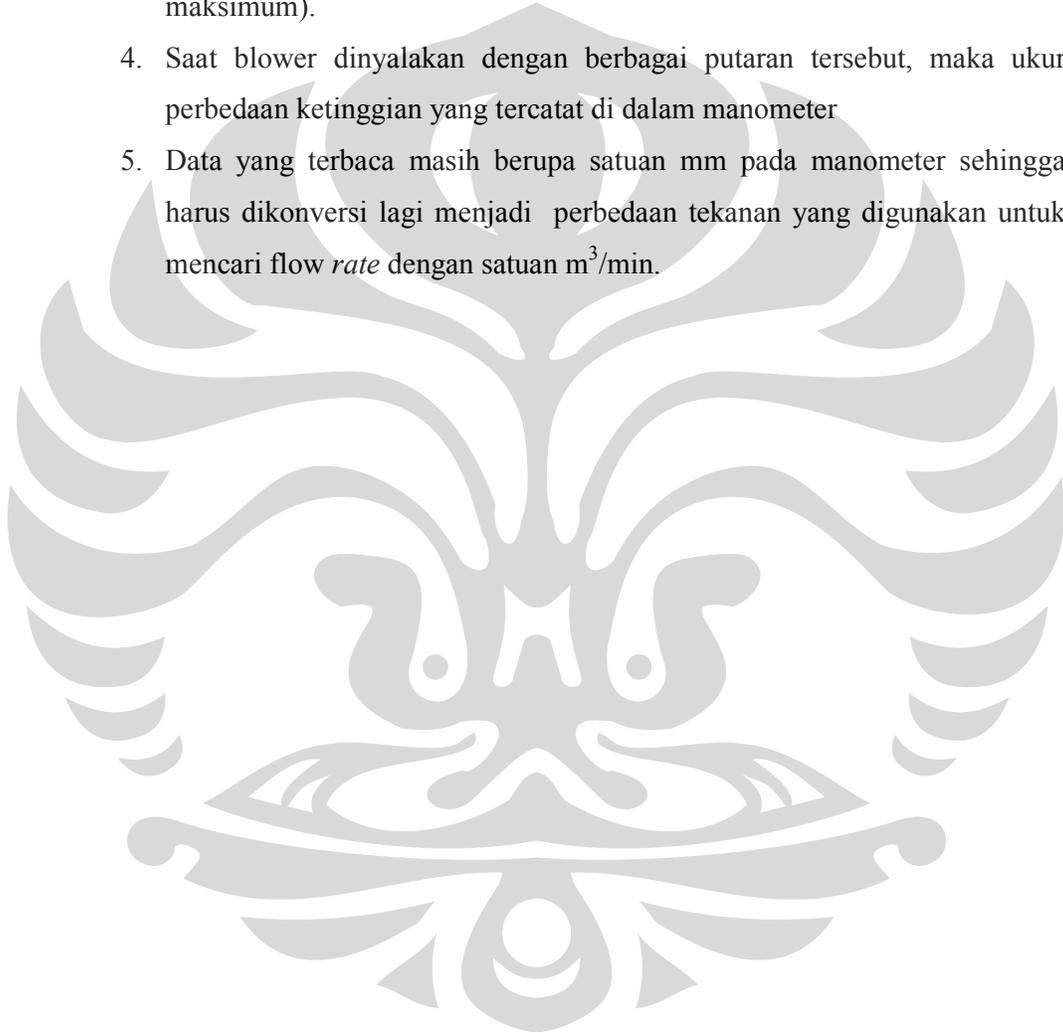


Gambar 4. 4 Pengujian *Blower*

Panjang pipa pertama adalah 2 kali panjang pipa kedua. Prosedur pengambilan datanya adalah dengan mengukur perbedaan ketinggian air pada manometer. Kecepatan putaran pada *Blower* divariasikan mulai dari kecepatan 2000 rpm sampai 3500 rpm.

Langkah-langkahnya disebutkan berikut ini :

1. Pastikan bahwa blower sudah terhubung dengan panel kontrol dan juga ke genset.
2. Blower disambungkan dengan orifice plate yang sudah dilengkapi manometer tabung U
3. Blower dinyalakan mulai dari putaran 2000 rpm, dan secara bertahap naik ke 2100 rpm, 2200 rpm, dan seterusnya sampai 3600 rpm (putaran maksimum).
4. Saat blower dinyalakan dengan berbagai putaran tersebut, maka ukur perbedaan ketinggian yang tercatat di dalam manometer
5. Data yang terbaca masih berupa satuan mm pada manometer sehingga harus dikonversi lagi menjadi perbedaan tekanan yang digunakan untuk mencari *flow rate* dengan satuan  $\text{m}^3/\text{min}$ .



## BAB 4

### PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA

#### 4.1 HASIL

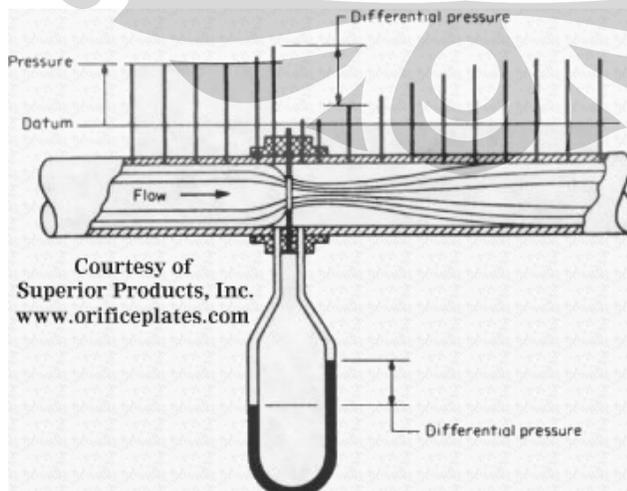
Tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah untuk mengetahui sifat dan karakteristik pada berbagai jenis parameter yang terdapat pada *fluidized bed combustor* UI, karakteristik *flow rate blower*, dan uji karakteristik pembakaran dengan menggunakan dua macam bahan bakar biomassa, yaitu Tempurung kelapa dan ranting pohon. Percobaan dilakukan dengan *feed rate* yang bervariasi

Perbandingan karakteristik Tempurung kelapa ditinjau dari:

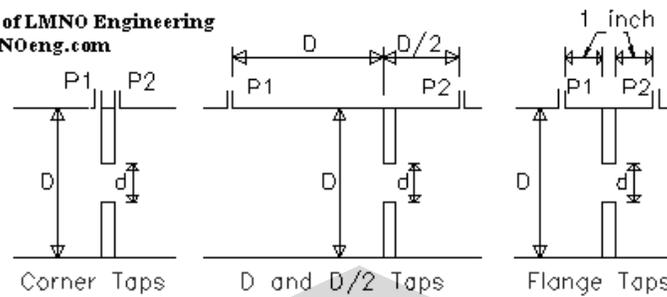
- Temperatur api yang dihasilkan pemanasan awal
- Temperatur api yang dihasilkan *self combustion*

#### 4.1.1 Karakteristik *Blower*

Pengujian *blower* menggunakan manometer tabung U untuk mencari perbedaan ketinggian dari manometer tersebut. Kemudian ketinggian manometer tersebut digunakan untuk mencari perbedaan tekanan. Perbedaan tekanan ini selanjutnya digunakan untuk mencari nilai dari *flowrate* dari *ring blower*.



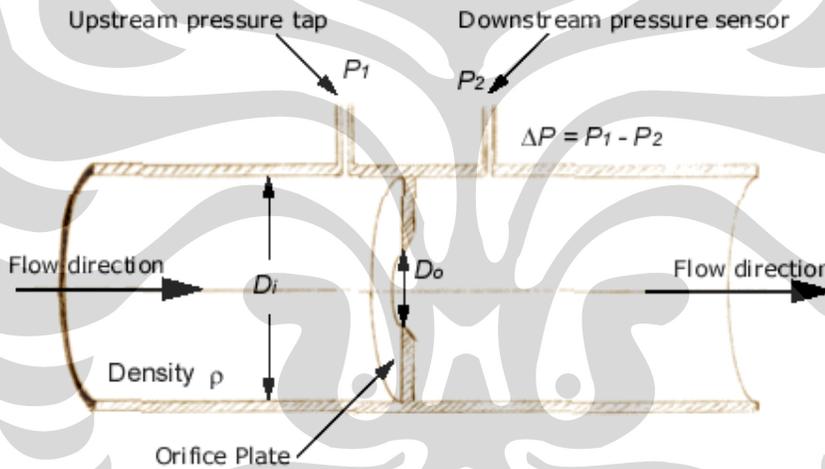
Courtesy of LMNO Engineering  
www.LMNOeng.com



→ Flow Direction for all Orifice types

gambar 4. 1 Skema pengujian blower

Pada pengujian blower ini digunakan metode perhitungan dengan menggunakan sistem **D and D/2 Taps**



$$\Delta P = h(\gamma_{\text{air}} - \gamma_{\text{udara}})$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho Q^2 \frac{1}{A_2^2} \left[ 1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]$$

$$Q = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2}}$$

$\Delta h$  = perbedaan ketinggian pada manometer (m)

gamma air = berat jenis air ( $\text{N/m}^3$ )

$\gamma$  udara = berat jenis udara ( $\text{N/m}^3$ )

$\Delta P$  = perbedaan tekanan (Pa)

$d/D$  = perbandingan diameter orifice dengan pipa exhaust

$\rho$  = massa jenis udara ( $\text{Kg/m}^3$ )

$Q$  = flowrate dari blower

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

Tabel 4. 1 Pengujian *blower* menggunakan manometer tabung U

#### 4.1.2 Karakteristik Pembakaran Biomassa

Eksperimen *Fluidized Bed Combustor* yang ada di Universitas Indonesia dibagi menjadi dua tahap, yaitu tahap pemanasan awal dimana *burner* masih dinyalakan untuk memanaskan pasir fluidisasi, sedangkan tahap kedua adalah

tahap *self combustion* dimana *burner* dimatikan sehingga bahan bakar terbakar dengan sendirinya.

#### 4.1.2.1 Karakteristik pemanasan ranting kemudian dilanjutkan dengan *self combustion* dengan Tempurung kelapa

Beberapa parameter yang menjadi pertimbangan antara lain sebagai berikut :

- Flow rate* dari ring *blower* 5,72088337 m<sup>3</sup>/s (3400 pm)
- Feed rate* bahan bakar bervariasi sesuai dengan keterangan yang ada di tabel

time	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Feeding
0	35	44	49	51	51	48	35	
1	36	62	494	242	171	150	68	valve 5,75 putaran
2	36	70	510	254	178	161	73	
3	36	80	521	263	183	168	79	
4	36	86	532	267	185	168	83	
5	36	91	530	261	187	172	85	
6	36	96	528	265	189	173	87	
7	36	99	530	267	189	173	88	
8	36	102	533	273	187	175	89	
9	36	104	530	266	187	176	90	
10	37	106	527	264	186	175	90	
11	37	107	527	261	185	175	90	
12	37	109	529	265	185	178	90	
13	37	111	536	274	195	178	91	
14	37	112	541	275	190	182	93	
15	37	113	541	275	191	179	94	
16	37	113	539	272	190	180	94	
17	37	115	540	269	196	182	94	
18	37	116	544	264	199	184	96	
19	37	117	541	256	199	185	97	
20	37	119	543	251	195	185	97	

21	37	120	543	242	194	185	98	
22	37	120	543	229	195	185	98	
23	37	122	547	212	192	186	98	
24	37	123	545	206	192	185	98	
25	37	124	556	206	192	185	98	
26	37	125	562	240	198	186	99	
27	37	126	552	239	198	187	99	
28	37	127	547	234	200	188	100	
29	37	128	553	238	200	188	99	
30	37	115	538	235	190	190	100	
31	37	118	540	230	190	190	100	
32	37	118	544	230	188	188	100	0,25 kg Ranting
33	37	117	526	236	187	188	100	
34	37	128	526	239	194	189	100	
35	37	129	534	236	193	189	100	
36	37	123	537	232	197	190	101	
37	37	126	540	240	194	192	102	
38	37	131	535	234	189	192	101	
39	37	130	545	226	187	191	101	
40	37	132	536	222	188	185	101	
41	37	125	540	224	183	179	96	
42	37	123	537	234	178	178	89	
43	37	122	520	235	178	178	91	
44	37	121	537	241	193	181	94	
45	37	118	542	178	193	188	99	
46	37	123	537	234	178	179	89	
47	37	122	520	235	178	178	91	
48	37	121	537	241	193	181	94	
49	37	118	542	178	193	188	99	
50	37	115	534	171	192	189	101	
51	37	115	556	186	190	186	101	
52	37	119	570	189	188	182	99	
53	37	126	558	200	189	183	98	
54	37	127	564	191	190	182	98	

55	37	127	565	215	194	182	97	
56	37	125	556	217	193	185	97	
57	37	125	524	222	187	188	98	
58	37	129	548	214	186	188	99	
59	37	126	553	206	176	185	99	0,25 kg Ranting
60	37	132	352	189	172	160	80	
61	37	182	418	208	187	172	90	
62	37	205	464	218	198	180	95	
63	38	226	441	221	202	184	97	
64	37	234	459	229	209	192	99	
65	37	264	462	233	215	200	103	
66	37	440	494	246	223	205	106	
67	37	503	499	244	228	214	108	
68	37	521	521	277	247	222	112	
69	37	446	591	270	265	247	118	
70	37	430	680	276	257	253	126	
71	37	514	697	287	318	237	124	0,5 kg Ranting
72	37	515	830	456	385	372	150	
73	37	623	743	408	339	335	157	
74	37	497	555	391	306	293	147	
75	37	541	498	382	295	277	141	
76	37	462	634	352	273	274	137	
77	37	362	577	323	274	257	128	0,5 kg Ranting
78	37	599	764	495	391	346	142	
79	37	478	636	354	285	287	147	valve 4 putaran
80	37	355	558	312	245	245	132	0,25 kg Ranting
81	37	266	541	298	237	233	127	
82	37	233	553	279	235	229	124	
83	37	232	556	272	237	231	123	
84	37	264	554	264	242	223	118	0,25 kg Ranting
85	37	284	634	309	260	242	125	
86	37	297	670	343	281	249	122	0,25 kg Ranting
87	37	620	634	357	313	283	134	
88	37	555	604	352	283	282	136	0,5 kg Ranting

89	37	365	596	360	289	266	130	
90	37	408	703	432	325	318	152	
91	37	411	620	338	270	274	141	
92	37	318	577	275	235	242	132	0,25 kg Ranting
93	37	249	586	274	227	233	125	
94	37	216	587	266	227	233	125	
95	37	195	586	274	232	227	119	0,25 kgRanting
96	37	182	547	269	235	227	121	
97	37	173	517	254	225	222	120	
98	37	166	494	246	223	216	119	
99	37	168	485	241	214	208	115	0,25 kg Ranting
100	37	174	461	236	214	209	115	
101	37	187	446	238	214	206	114	
102	37	195	467	243	225	215	115	0,25 kg Ranting
103	37	199	455	252	236	216	114	
104	37	197	588	338	291	265	124	
105	37	216	593	301	267	266	132	
106	37	280	528	276	265	250	128	
107	36	486	514	271	257	248	128	
108	37	467	458	343	282	244	123	0,25 kg Ranting
109	37	670	624	428	357	319	139	valve 3 putaran
110	37	730	590	387	325	320	148	0,25 kg Ranting
111	36	545	604	456	356	328	144	
112	37	500	635	381	300	323	151	
113	37	403	568	320	257	273	144	
114	37	299	541	267	240	244	162	0,5 kg Ranting
115	37	256	576	304	279	259	130	
116	36	250	600	358	307	287	138	
117	36	475	649	377	330	321	148	
118	37	350	562	303	255	263	142	0,5 kg Ranting
119	36	277	569	318	270	246	132	
120	36	242	570	364	317	260	135	
121	36	456	620	385	312	331	155	valve 2 putaran
122	37	382	530	307	257	284	144	0,25 kg Ranting

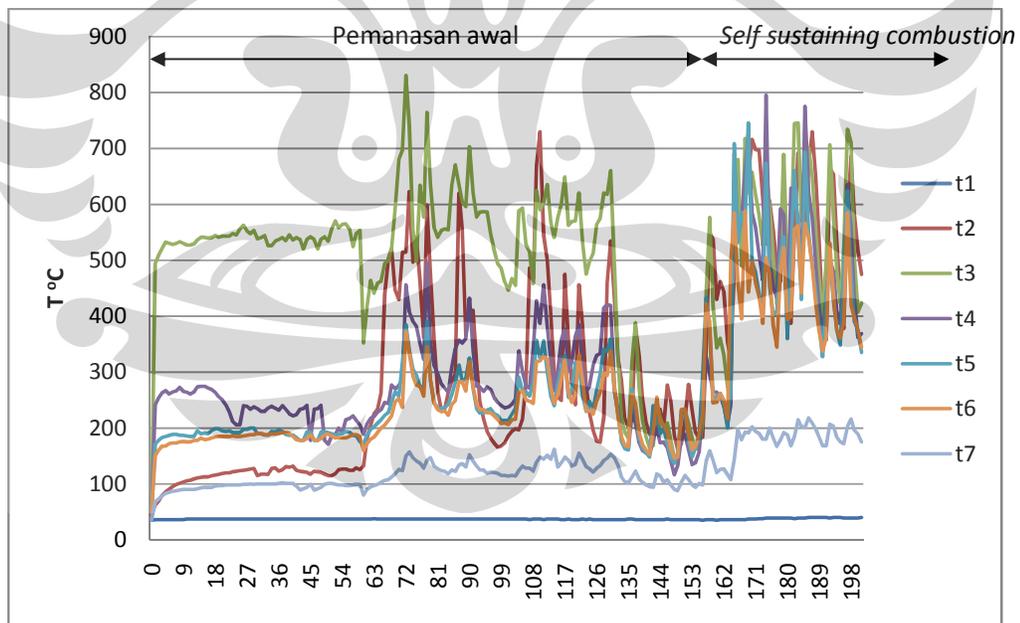
123	36	277	475	265	230	231	131	
124	37	229	497	275	248	232	127	
125	36	196	512	312	234	225	121	0,5 kg Ranting
126	36	177	564	330	268	249	128	
127	36	175	575	333	296	264	133	
128	36	220	620	415	341	298	142	
129	36	460	618	421	337	294	146	0,25 kg Ranting
130	36	535	660	419	360	338	153	
131	36	437	492	270	268	275	147	<i>Burner Mati</i>
132	36	325	324	226	234	221	134	
133	36	286	219	180	176	184	112	0,25 kg Tempurung kelapa
134	36	218	192	165	163	169	104	
135	37	201	182	163	161	167	102	
136	37	215	320	229	269	260	112	0,25 kg Tempurung kelapa
137	36	382	388	210	228	244	123	
138	36	328	272	174	182	192	109	0,25 kg Tempurung kelapa
139	36	253	213	160	164	171	103	
140	36	211	184	156	156	161	98	
141	36	189	165	152	148	153	95	
142	36	178	169	180	240	196	94	0,5 kg Tempurung kelapa
143	36	227	246	201	231	255	118	
144	36	234	220	174	190	208	114	
145	36	205	202	175	199	205	103	0,5 kg Tempurung kelapa
146	37	277	209	165	172	192	107	
147	36	248	178	141	147	162	98	
148	36	187	148	117	137	146	90	0,5 kg Tempurung kelapa
149	36	160	138	134	155	148	88	
150	36	172	224	183	231	233	103	
151	36	215	232	189	227	234	115	
152	36	278	210	160	180	189	108	0,75 kg Tempurung kelapa
153	36	231	181	135	149	161	98	
154	36	193	163	138	165	167	94	
155	36	182	163	157	180	188	101	
156	35	184	207	255	298	226	98	0,75 kg Tempurung kelapa

157	36	340	446	327	433	422	141	
158	36	548	576	297	375	390	159	
159	36	538	419	264	249	245	142	
160	35	430	343	264	258	246	120	0,75 kg Tempurung kelapa
161	36	462	360	259	262	262	126	
162	36	444	332	238	240	250	127	
163	36	353	273	208	200	217	117	1 kg Tempurung kelapa
164	36	325	244	240	268	496	108	
165	36	475	639	690	708	585	143	
166	36	605	680	540	532	460	197	
167	36	540	490	574	586	395	179	1 kg Tempurung kelapa
168	36	648	717	659	560	588	193	
169	37	656	620	725	745	443	191	1,25 kg Tempurung kelapa
170	37	716	657	585	497	497	202	
171	37	698	617	559	478	459	194	
172	38	697	581	510	440	435	190	
173	38	615	526	464	400	387	180	
174	39	529	672	795	673	504	180	1,25 kg Tempurung kelapa
175	39	607	596	500	454	475	200	
176	39	553	500	450	400	383	182	
177	39	490	421	434	410	345	167	1,5 kg Tempurung kelapa
178	39	462	514	592	512	482	179	
179	39	569	689	582	542	523	192	
180	39	535	478	400	360	394	188	1,5 kg Tempurung kelapa
181	39	387	540	629	513	399	168	
182	38	545	744	625	660	556	185	
183	39	692	745	569	551	562	215	
184	39	625	570	483	430	441	203	
185	39	548	640	775	693	566	201	1,5 kg Tempurung kelapa
186	40	670	700	620	546	542	218	
187	40	730	650	575	492	489	209	
188	40	650	553	493	444	421	198	
189	40	545	472	418	390	374	184	
190	40	395	399	358	328	338	168	1,75 kg Tempurung kelapa

191	40	358	500	437	432	362	168	
192	39	665	706	501	502	530	207	
193	40	654	581	481	430	438	203	
194	40	537	482	410	376	375	184	
195	40	430	424	386	348	361	175	1,75 kg Tempurung kelapa
196	39	378	524	475	482	390	172	
197	39	580	734	635	624	585	203	
198	39	686	710	555	481	419	216	
199	39	585	507	433	390	398	196	
200	39	517	407	362	375	376	189	
201	40	475	423	369	335	344	175	

Tabel 4. 2 data hasil pemanasan awal ranting dilanjutkan dengan *self combustion* Tempurung kelapa

Data diatas diplot ke dalam grafik sehingga dapat dilihat pola kurva karakteristik pembakarannya berdasarkan *feed rate* yang berbeda



gambar 4. 2 grafik hasil pemanasan awal ranting dilanjutkan *self combustion* Tempurung kelapa terhadap waktu (menit)

sistem *feeding* pada pengambilan data diatas adalah sistem batch. *Feeding* dilakukan saat T2 mengalami penurunan setelah T2 mencapai titik maksimum yang diperoleh dari *feeding* sebelumnya.

<i>feeding</i>	<i>feed rate</i>
0,25 kg	0,25 kg/3 menit
0,5 kg	0,5 kg/3,3 menit
0,75 kg	0,75 kg/3,7 menit
1 kg	1 kg/3 menit
1,25 kg	1,25 kg/ 4menit
1,5 kg	1,5 kg/4,3 menit
1,75 kg	1,75/5,3 menit

tabel 4. 3 *feed rate* Tempurung kelapa pada *self combustion*

Berikut ini adalah hubungan antara ketinggian termokopel dengan distribusi temperatur. Temperatur yang diambil pada setiap posisi termokopel adalah temperatur rata-rata pada setiap proses, yaitu proses pemanasan awal dan *self combustion*.

T1	36,86
T2	285,34
T3	558,41
T4	286,73
T5	245,68
T6	235,57
T7	120,15

Tabel 4. 4 rata-rata temperatur saat pemanasan awal

T1	37,46
T2	433,92
T3	426,46
T4	374,46
T5	361,62
T6	344,34
T7	152,47

Tabel 4. 5 rata-rata temperatur saat *self combustion*

**4.1.2.2 Karakteristik pemanasan Tempurung kelapa kemudian dilanjutkan dengan *self combustion* dengan Tempurung kelapa**

time	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Feeding
0	31	25	33	33	33	30	28	
1	35	45	560	230	162	145	59	valve 5,75 putaran
2	36	67	651	288	210	190	78	
3	36	72	653	295	214	191	91	
4	36	77	643	301	214	196	93	
5	36	79	636	297	216	199	94	
6	36	81	648	299	217	198	95	
7	36	84	649	306	220	199	97	
8	36	86	649	296	220	198	97	
9	36	87	647	303	222	200	98	
10	35	88	636	309	222	202	99	
11	36	89	641	312	219	200	99	
12	36	90	658	311	223	203	101	
13	36	91	681	305	222	205	103	
14	36	94	671	308	223	204	103	
15	36	94	655	311	226	204	103	
16	36	95	660	305	228	203	103	
17	36	96	650	312	226	206	104	
18	36	97	666	307	225	207	105	
19	36	98	670	308	224	206	106	
20	36	99	660	308	227	207	105	
21	36	99	666	311	227	208	105	
22	36	99	664	308	228	208	106	
23	36	101	669	311	230	208	108	
24	36	101	665	311	228	213	107	
25	36	102	668	301	229	213	108	
26	37	103	667	310	228	211	108	
27	37	104	676	306	230	209	108	

28	37	104	678	304	229	210	109	
29	37	105	676	311	229	213	105	
30	37	108	658	299	219	211	105	
31	37	108	663	305	223	214	109	0,25 Tempurung
32	37	108	682	295	224	214	110	
33	37	108	735	265	220	216	112	
34	37	109	706	273	220	213	112	0,5 Tempurung
35	37	109	710	269	220	214	109	
36	37	111	706	251	215	213	110	
37	37	114	681	221	206	209	109	
38	37	120	665	222	207	208	109	
39	37	122	665	228	207	212	110	
40	37	124	640	210	208	207	110	
41	37	126	625	206	205	205	110	0,75 Tempurung
42	37	107	618	208	204	203	108	
43	37	94	644	204	196	196	103	
44	37	88	607	205	205	199	106	
45	37	87	607	205	206	203	107	
46	37	88	612	203	209	204	109	
47	37	91	597	206	207	202	109	
48	37	94	609	206	207	203	109	
49	37	99	605	204	208	203	109	
50	37	105	606	212	210	204	110	
51	37	113	645	231	229	219	112	
52	37	118	638	253	232	225	115	
53	37	125	651	248	238	230	117	
54	37	132	645	253	240	235	119	
55	37	135	640	260	240	234	121	
56	37	137	654	260	240	234	121	
57	37	141	661	258	241	232	122	
58	37	144	625	258	240	232	122	
59	37	148	632	253	241	233	123	
60	37	152	624	254	243	234	123	
61	37	154	623	264	240	234	123	

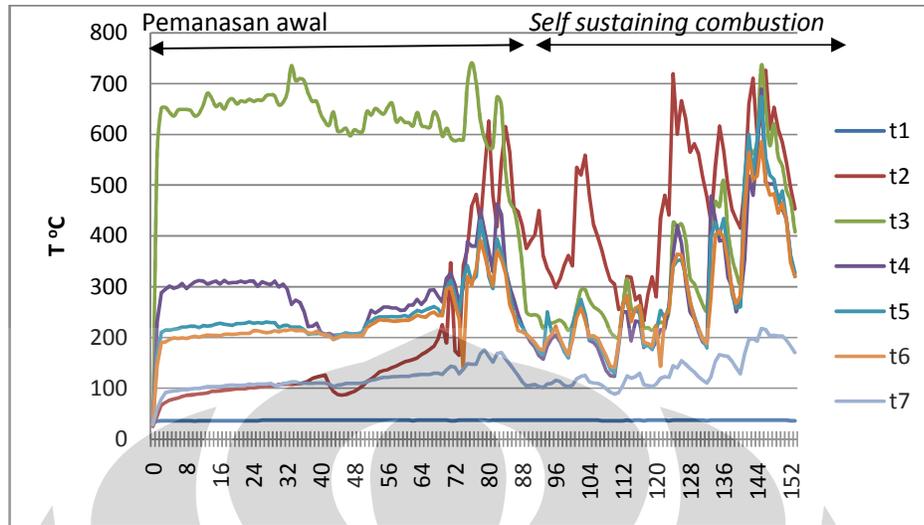
62	36	157	617	264	247	238	125	
63	37	160	643	275	253	244	126	
64	37	166	618	265	250	241	127	
65	37	171	615	274	254	240	127	
66	37	177	614	293	257	247	127	
67	37	183	644	294	261	250	129	
68	37	198	631	281	256	243	129	
69	37	225	596	270	243	243	127	0,5 Tempurung
70	37	189	612	317	297	295	136	
71	36	347	593	327	312	299	143	
72	36	174	587	303	282	267	141	
73	37	165	590	266	246	237	128	0,75 Tempurung
74	37	341	590	299	315	140	137	
75	37	374	704	388	341	320	148	
76	37	459	741	380	310	303	147	
77	37	482	704	380	320	335	147	0,75 Tempurung/ 4 valve
78	37	424	630	450	430	392	167	
79	37	528	593	410	390	363	175	3 valve
80	36	626	572	371	320	328	162	1 Tempurung/ 2 valve
81	37	480	575	330	296	302	151	
82	37	418	673	463	394	371	168	
83	37	543	660	443	368	354	170	
84	37	615	533	334	332	326	158	burner mati
85	37	565	469	300	286	264	147	
86	37	456	453	274	245	243	136	
87	37	448	412	246	234	213	125	
88	37	421	342	223	221	211	112	
89	37	375	251	205	205	206	104	0,25 Tempurung kelapa
90	37	390	244	190	198	198	105	
91	37	402	245	181	186	190	107	
92	37	450	240	164	172	178	103	
93	37	361	218	157	166	175	101	0,25 Tempurung kelapa
94	37	335	230	184	250	197	108	
95	37	319	228	198	210	205	109	0,25 Tempurung kelapa

96	37	298	231	205	220	222	115	
97	37	315	234	192	198	198	113	
98	37	342	227	174	172	180	105	
99	37	361	214	160	160	166	103	0,5 Tempurung kelapa
100	37	341	226	203	223	195	106	
101	37	535	261	249	253	240	118	
102	37	520	293	260	275	258	123	0,5 Tempurung kelapa
103	37	559	294	244	246	234	125	
104	37	480	274	194	197	202	112	0,75 Tempurung kelapa
105	37	422	261	190	200	203	110	
106	37	399	255	180	192	198	109	
107	36	372	247	158	173	180	106	
108	36	340	232	135	158	164	99	
109	36	313	212	125	137	144	92	0,25 Tempurung kelapa
110	36	305	202	123	130	141	88	
111	36	255	200	183	192	189	91	0,25 Tempurung kelapa
112	36	259	260	250	266	264	105	
113	37	320	315	250	270	283	124	
114	36	318	258	193	236	231	119	0,5 Tempurung kelapa
115	37	274	251	232	258	257	122	
116	37	282	260	230	246	263	129	
117	36	233	220	180	183	190	107	0,25 Tempurung kelapa
118	37	286	219	188	184	188	105	
119	37	319	214	177	176	183	103	0,5 Tempurung kelapa
120	37	280	224	194	212	223	108	
121	37	435	230	215	253	143	119	
122	37	480	230	217	238	243	122	
123	36	441	253	262	260	253	121	0,75 Tempurung kelapa
124	37	719	426	364	339	341	144	
125	37	600	418	420	351	364	140	1 Tempurung kelapa
126	37	666	423	386	353	363	154	
127	37	632	391	312	323	321	147	1 Tempurung kelapa
128	37	565	318	250	268	270	138	
129	37	581	306	237	241	237	131	

130	37	561	285	210	215	219	122	
131	37	515	265	191	197	196	116	
132	36	477	253	183	179	188	110	1,25 Tempurung kelapa
133	37	427	400	478	396	280	123	
134	37	536	467	431	426	402	152	
135	37	616	458	390	403	410	166	
136	37	567	509	392	434	396	164	1,25 Tempurung kelapa
137	37	498	414	319	365	353	162	
138	37	452	358	299	286	292	153	
139	37	432	328	250	257	266	140	1,5 Tempurung kelapa
140	37	415	308	278	260	282	128	
141	37	500	437	354	513	447	168	
142	37	660	572	518	600	565	196	
143	37	710	562	480	518	510	197	1,75 Tempurung kelapa
144	37	596	586	560	590	518	192	
145	37	636	736	689	674	585	217	
146	37	726	655	505	555	511	215	
147	37	610	578	502	519	481	203	2 Tempurung kelapa
148	37	653	621	503	511	483	204	
149	37	610	557	476	464	445	202	
150	37	584	537	453	488	464	202	
151	37	545	490	432	431	430	194	
152	36	495	468	359	362	346	183	
153	36	453	408	320	326	320	170	

Tabel 4. 6 hasil pemanasan awal Tempurung kelapa dilanjutkan *self combustion* Tempurung kelapa terhadap waktu

Data diatas diplot ke dalam grafik sehingga dapat dilihat pola kurva karakteristik pembakarannya berdasarkan *feed rate* yang berbeda :



gambar 4. 3grafik hasil pemanasan awal Tempurung kelapa dilanjutkan *self combustion* Tempurung kelapa terhadap waktu (menit)

Berikut ini adalah hubungan antara ketinggian termokopel dengan distribusi temperatur. Temperatur yang diambil pada setiap posisi termokopel adalah temperatur rata-rata pada setiap proses, yaitu proses pemanasan awal dan *self combustion*.

T1	36,92593
T2	207,6481
T3	636,2222
T4	279,0185
T5	255,6481
T6	245,5926
T7	125,7963

Tabel 4. 7 rata-rata temperatur saat pemanasan awal

T1	36,81538
T2	457,7385
T3	338,2615
T4	282,8154
T5	294,4462

T6	284,1385
T7	134,9077

Tabel 4. 8 rata-rata temperatur saat *self combustion*

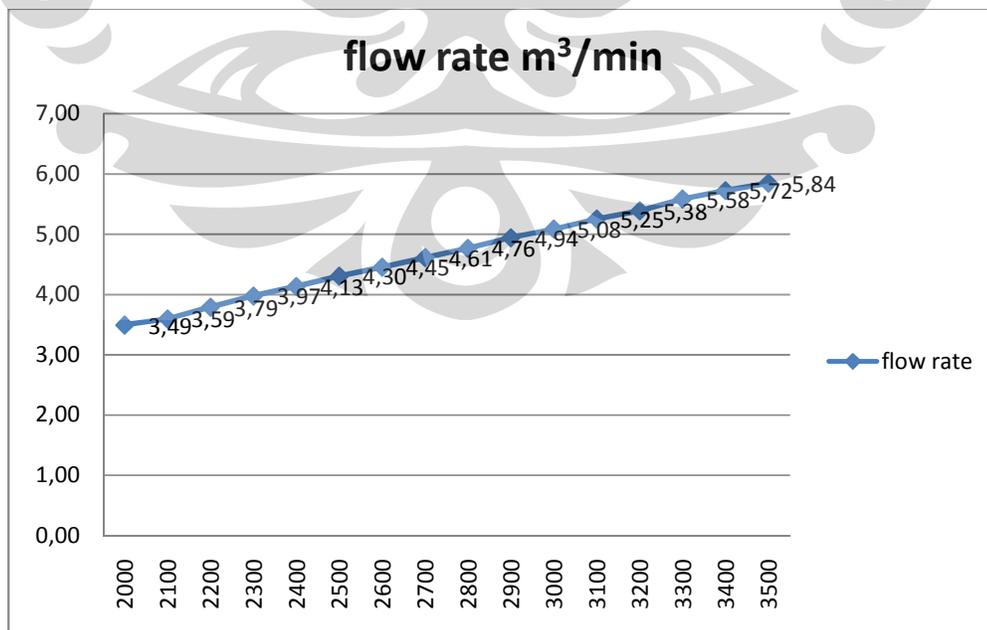
## 4.2 ANALISA

Setelah melakukan beberapa pengujian dan pengambilan data pada Fluidize Bed Combuster pada lingkungan Universitas Indonesia mulai dari karakteristik feeder, ring *blower*, maupun karakteristik pembakaran biomassa, yakni Tempurung kelapa, selanjutnya data ini diolah kemudian diinterpretasikan dalam bentuk grafik. Grafik yang dihasilkan antara lain:

- grafik putaran *blower* vs *flow rate* udara yang dihasilkan,
- grafik temperatur pembakaran pada berbagai termokopel terhadap waktu terhadap *feed rate* bahan bakar,

### 4.2.1 Analisa Karakteristik Kerja *Ring Blower*

Pengujian *blower* dilakukan pada 2000 rpm sampai dengan 3500 rpm, berikut ini grafik dari pengujian *blower* yang telah dilakukan.



gambar 4. 4 grafik hasil pengujian *blower rpm vs flow rate*

Hasil dari pengujian didapatkan *flow rate* maksimum sebesar  $5,84 \text{ m}^3/\text{min}$ , berbeda dengan referensi yaitu  $6,2 \text{ m}^3/\text{min}$ , hal ini menunjukkan adanya *losses* dari *ring blower* tersebut. penyebabnya adalah adanya kotoran yang terdapat pada *intake* dari *ring blower* tersebut. penyebab lain adalah kondisi *ring blower* yang sudah tidak maksimal lagi yang disebabkan *blower* telah termakan usia.

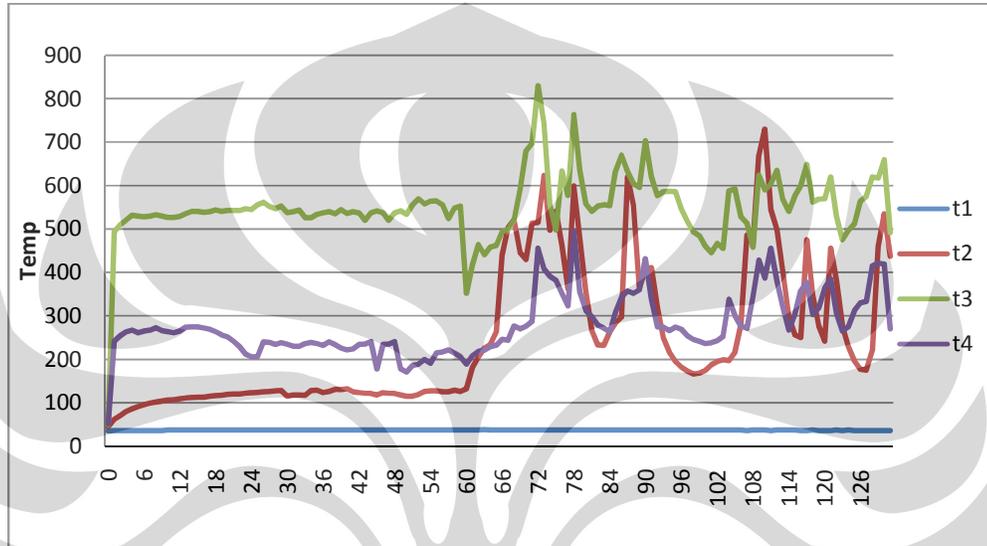
#### 4.2.2 Analisa grafik pada pemanasan awal

Proses pemanasan awal menggunakan dua bahan bakar yang berbeda yaitu ranting dan Tempurung kelapa, dari pembacaan grafik akan dihasilkan bahan bakar apa yang efektif untuk pemanasan awal. Proses pemanasan awal dilakukan selama 30 menit pertama tanpa melakukan *feeding*, hal ini bertujuan untuk memanaskan pasir fluidisasi agar bahan bakar bisa terbakar dengan cepat. Pada menit ke-30 dan seterusnya dilakukan *feeding* secara kontinyu berdasarkan perubahan temperatur. *Feeding* dilakukan bila temperatur mulai turun dari titik tertinggi yang dicapainya. Buka valve dari *burner* perlahan dimatikan dan T2 dipertahankan  $400^\circ\text{C}$ - $500^\circ\text{C}$  agar bisa dilanjutkan dengan proses *self combustion*

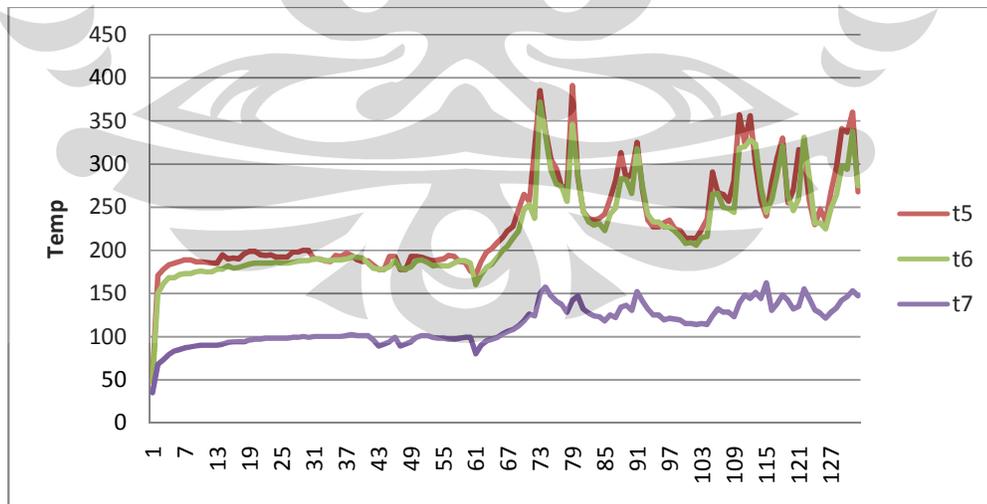
Dari grafik dapat diketahui adanya kecenderungan turunnya temperatur, sesaat setelah memasukkan bahan bakar ruang bakar. Hal ini disebabkan oleh adanya perubahan rasio perbandingan udara-bahan bakar, AFR. Adanya kenaikan temperatur setelah penurunan sebelumnya menunjukkan bahan bakar mulai terbakar, sebagai reaksi pembakaran awal terlepasnya *volatile* terlihat asap agak kuning kecoklatan secara kasat mata, hal ini terjadi sesaat, kemudian temperatur mulai naik, yang mengindikasikan bahan bakar telah terbakar. Hingga perubahan temperatur cenderung menurun maka dimasukkan bahan bakar selanjutnya, dimasukkan dengan metode yang sama kemudian dilakukan pengambilan data, dan begitu seterusnya.

#### 4.2.2.1 pemanasan awal ranting

Proses pemanasan awal ranting memakan waktu 130 menit berbeda dengan proses pemanasan awal menggunakan Tempurung kelapa. Hal ini disebabkan sifat dari ranting yang cepat terbakar namun cepat habis, sehingga pada pembakaran ranting untuk mencapai temperatur yang tinggi dibutuhkan *feeding* dengan jumlah banyak



gambar 4. 5 grafik distribusi temperatur terhadap waktu pemanasan awal ranting (T1-T4)



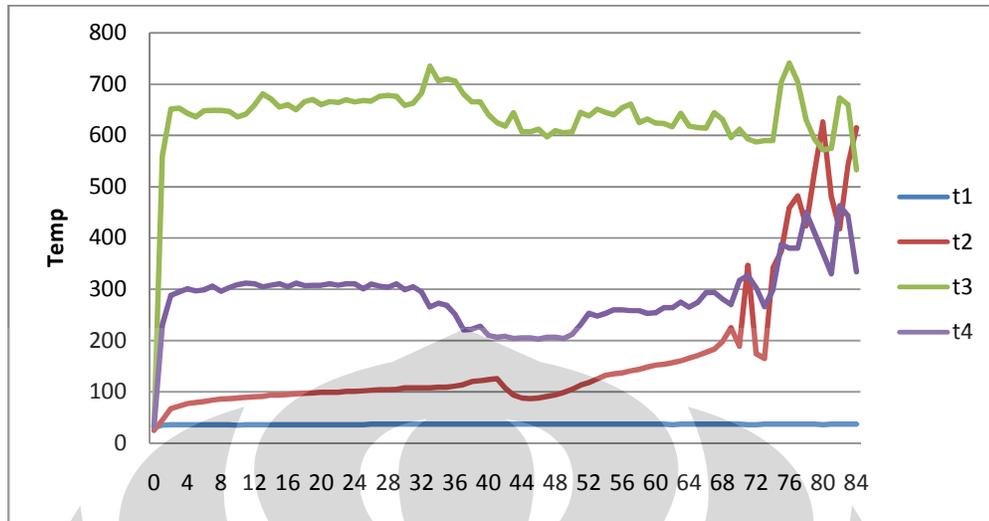
gambar 4. 6 grafik distribusi temperatur terhadap waktu pemanasan awal ranting (T5-T7)

Nilai T1 hampir konstan pada tiap proses yang ada pada FBC. Hal ini disebabkan T1 hanya mengukur temperatur dari udara *blower* untuk fluidisasi. Nilai T2 pada pemanasan awal sebelum *feeding* mengalami kenaikan secara perlahan karena pemanasan dari *blower*. Setelah menit ke-60, mengalami kenaikan hingga 500° C disebabkan ranting telah terbakar memanaskan pasir fluidisasi. Proses selanjutnya menutup katup secara perlahan-lahan dari 5.75 putaran menjadi 4,3,2,0 putaran. Penutupan katup ini dilakukan sesuai temperatur yang terbaca pada T2. Penutupan katup dapat dilakukan bila temperatur T2 di atas 400° C. Inilah yang menyebabkan pemanasan ranting lebih lama dibandingkan Tempurung kelapa karena sifatnya yang cepat terbakar dan cepat habis.

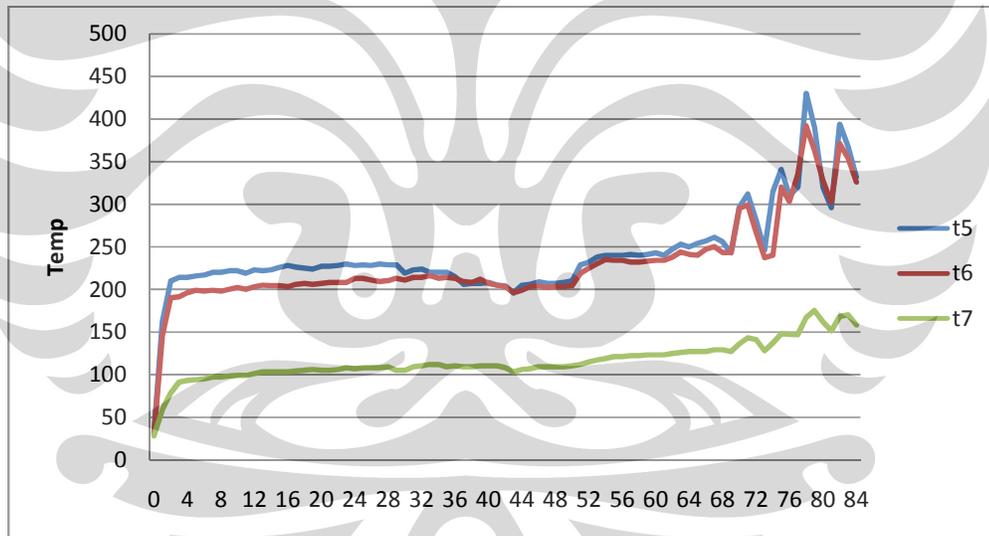
Nilai T3 pada pemanasan awal hampir konstan. Karena temperatur yang dibaca oleh T3 adalah api yang keluar dari *burner* dan sedikit terpengaruh dengan proses pembakaran ranting. Begitu juga dengan T4, perbedaannya T4 sudah banyak terpengaruh dari proses pembakaran ranting. Perubahan Nilai T5,T6,T7 berdasarkan pada jumlah ranting yang terbakar pada combustor. Perbedaan ketiganya adalah letaknya dari pusat pembakaran.

#### **4.2.2.2 Pemanasan awal Tempurung kelapa**

Proses pemanasan awal Tempurung kelapa hanya memakan waktu 84 menit. Hal ini disebabkan sifat dari Tempurung kelapa yang memiliki energi lebih besar dibandingkan dengan ranting. Karakteristik dari bahan bakar ini adalah lebih lama terbakar dibandingkan dengan ranting, namun titik temperatur maksimum dari Tempurung kelapa jauh lebih tinggi dibandingkan ranting, sehingga memudahkan untuk mematikan *burner* secara cepat. Proses *self combustion* dapat lebih mudah dicapai dan tidak memakan waktu yang banyak.



gambar 4. 7 grafik distribusi temperatur terhadap waktu pemanasan awal Tempurung kelapa (T1-T4)



gambar 4. 8 grafik distribusi temperatur terhadap waktu pemanasan awal Tempurung kelapa (T5-T7)

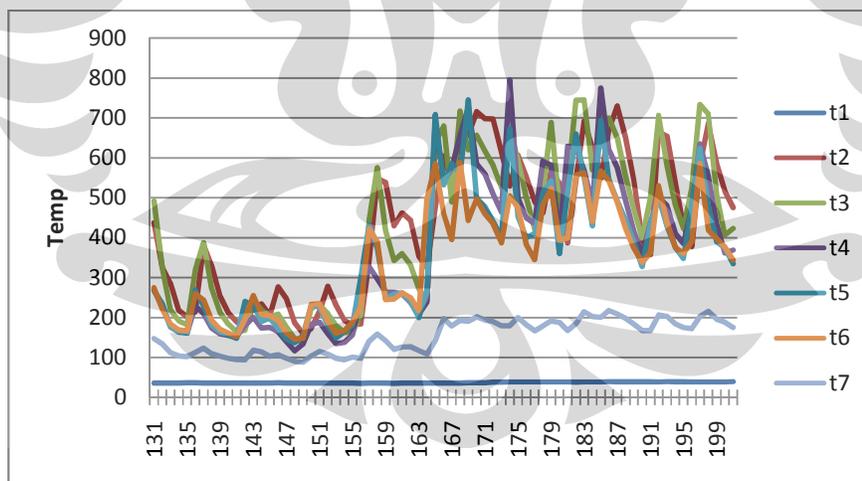
karakteristik perubahan temperatur yang terbaca pada *data logger* saat pemanasan awal ranting dan pemanasan awal Tempurung kelapa hampir sama. Perbedaannya adalah ranting mudah terbakar dibandingkan dengan Tempurung kelapa. Dari grafik pemanasan awal bisa dilihat pada menit ke-60 T2, T4, T5, T6, T7 sudah mulai ada perubahan, menunjukkan ranting yang terbakar, sedangkan pada

menit ke-70 Tempurung kelapa baru mulai terbakar, dari literatur *flash point* dari ranting lebih mudah daripada Tempurung kelapa, hal ini menunjukkan bahwa Tempurung lebih sulit terbakar dibandingkan ranting.

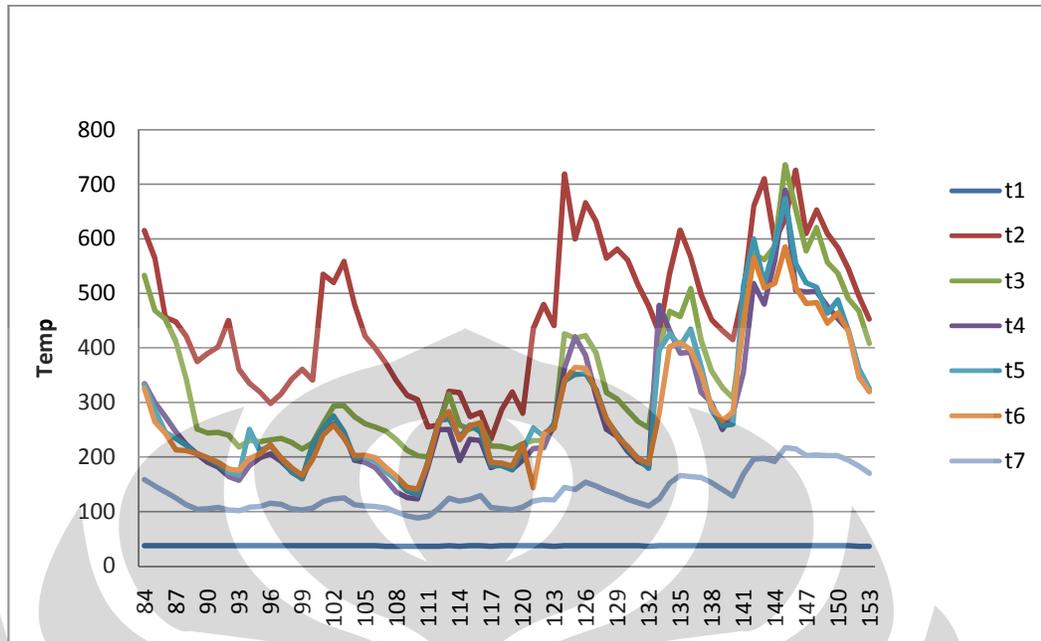
Jika kita lihat selanjutnya, walaupun Tempurung kelapa lebih lama terbakar. Temperatur yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan ranting, selain itu juga stabil. Sehingga memudahkan untuk mematikan *burner* dan proses pemanasan awal dengan Tempurung kelapa bisa berlangsung lebih cepat dibandingkan proses pemanasan awal menggunakan ranting.

#### 4.2.3 Analisa grafik pada proses *self combustion*

Proses *self combustion* Tempurung kelapa dengan pemanasan awal ranting atau Tempurung kelapa tidak jauh berbeda, perbedaannya hanya terlihat pada awal proses *self combustion*. Temperatur pada pemanasan awal ranting menunjukkan penurunan yang drastis dibandingkan pemanasan awal Tempurung kelapa. Hal ini disebabkan kedua bahan bakar ini memiliki sifat berbeda yang telah dijelaskan sebelumnya



gambar 4. 9 grafik distribusi temperatur terhadap waktu saat *self combustion* dengan pemanasan awal ranting

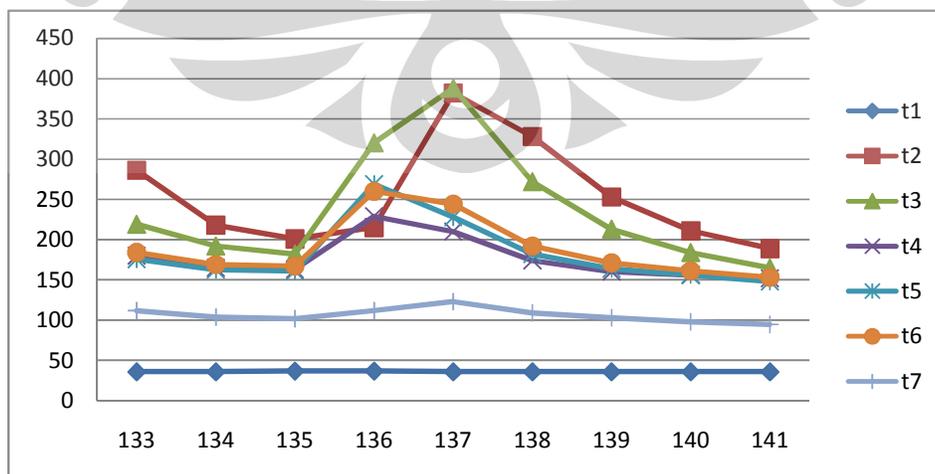


gambar 4. 10 grafik distribusi temperatur terhadap waktu saat *self combustion* dengan pemanasan awal Tempurung kelapa

perubahan temperatur pada proses *self combustion* sangat dipengaruhi oleh jumlah *feeding* bahan bakar. Berikut analisa grafik pengaruh jumlah *feeding* terhadap temperatur.

#### 4.2.3.1 Feeding 0.25 Kg Tempurung Kelapa

*Feeding* 0.25 kg Tempurung kelapa dilakukan pada menit ke 133,136,138



gambar 4. 11 grafik distribusi temperatur terhadap waktu saat *self combustion* dengan *feeding* 0,25 kg

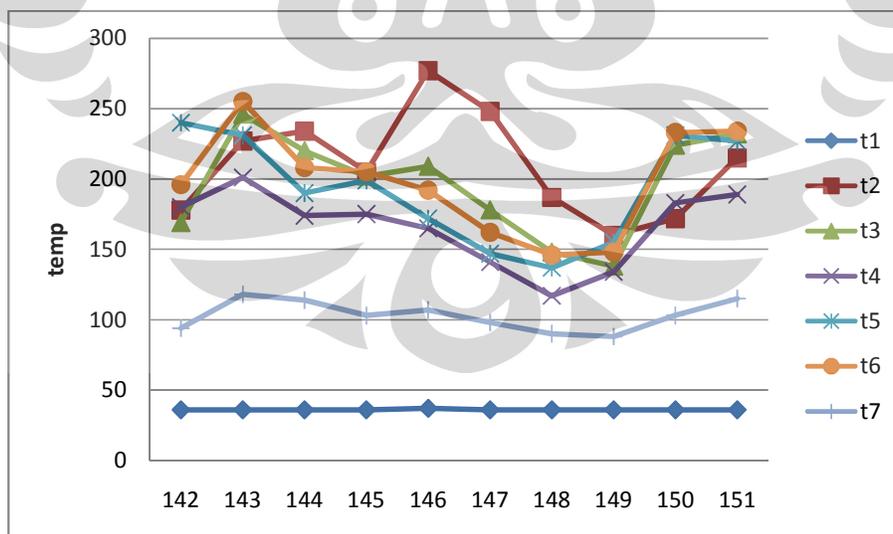
Hasil dari grafik menunjukkan *feeding rate* 0.25 kg tidak menunjukkan hasil yang efektif. Nilai T2-T7 tidak mengalami kenaikan yang signifikan. Yang perlu diperhatikan disini adalah nilai dari T2. T2 terletak tepat diatas pasir fluidisasi. Rata-rata T2 adalah 253,7°C

	T avg
T1	36,22
T2	253,7
T3	237,2
T4	176,6
T5	183
T6	189
T7	106,4

Tabel 4. 9 rata-rata temperatur saat *feeding* 0,25 kg

#### 4.2.3.2 Feeding 0.5 Kg Tempurung Kelapa

*Feeding* 0.5 kg Tempurung kelapa dilakukan pada menit ke 142,145,148



gambar 4. 12 grafik distribusi temperatur terhadap waktu saat *self combustion* dengan *feeding* 0,5 kg

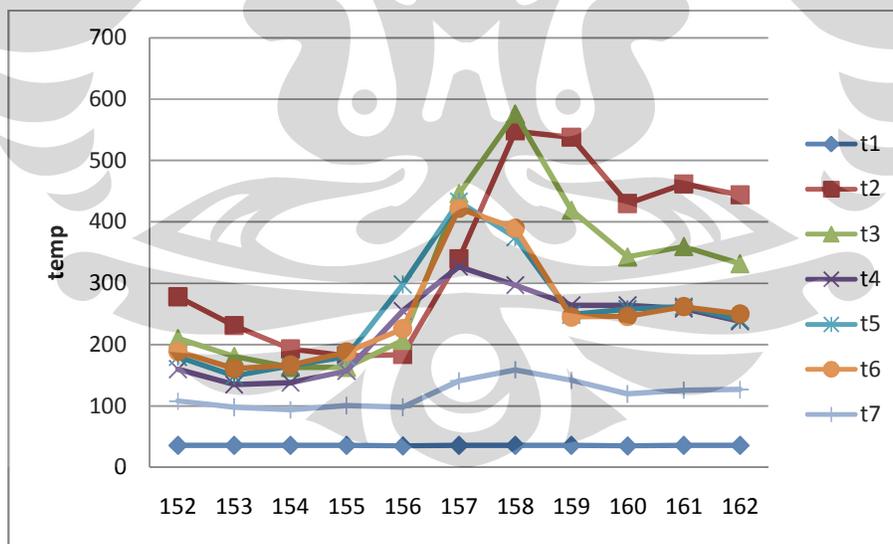
Begitu juga pada saat dilakukan *feeding* 0.5 kg. Meskipun terdapat kenaikan temperatur. Namun masih belum maksimal. Hal ini disebabkan pasokan bahan bakar yang masih kurang banyak. T2 rata-rata 210,3° C

	T avg
T1	36,1
T2	210,3
T3	196,6
T4	433,1
T5	192,9
T6	197,9
T7	103

Tabel 4. 10 rata-rata temperatur saat *feeding* 0,5 kg

#### 4.2.3.3 Feeding 0.75 Kg Tempurung Kelapa

*Feeding* 0.5 kg Tempurung kelapa dilakukan pada menit ke 152,156,160



gambar 4. 13 grafik distribusi temperatur terhadap waktu saat *self combustion* dengan *feeding* 0,75 kg

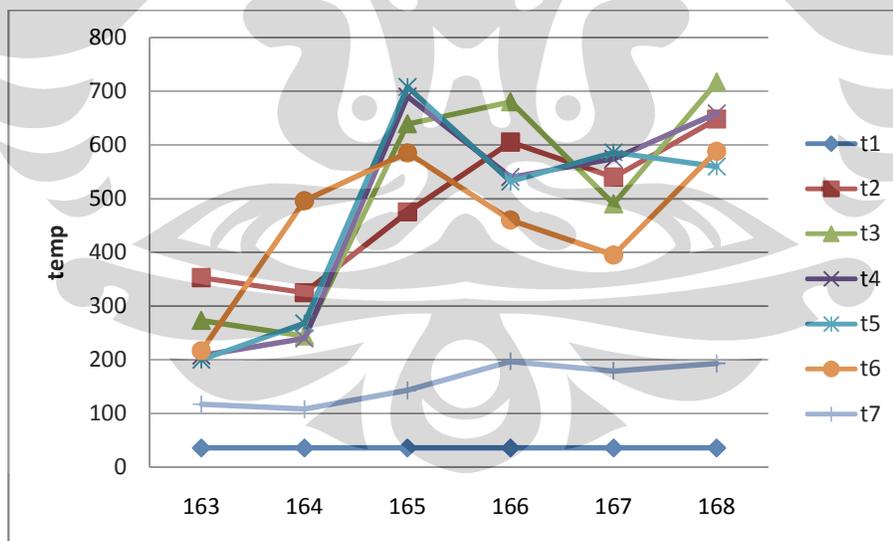
Pada saat *feeding* 0.75 kg kenaikan temperatur sudah mulai terlihat. Dapat dilihat dari nilai T2 rata-rata 348,2° C. Meskipun sudah mulai menunjukkan kenaikan temperatur, hasil dari grafik menunjukkan pembakarannya belum efektif.

	T avg
T1	35,81
T2	348,18
T3	309,09
T4	226,72
T5	253,54
T6	249,63
T7	119,45

Tabel 4. 11 rata-rata temperatur saat *feeding* 0,75 kg

#### 4.2.3.4 *Feeding* 1 Kg Tempurung Kelapa

*Feeding* 1 kg Tempurung kelapa dilakukan pada menit ke 163,167



gambar 4. 14 grafik distribusi temperatur terhadap waktu saat *self combustion* dengan *feeding* 1 kg

Pada *feeding* 1kg Tempurung kelapa, kenaikan temperatur menunjukkan hasil yang signifikan. T2 rata-rata mencapai 491° C, T2 maksimalnya mencapai 648° C.

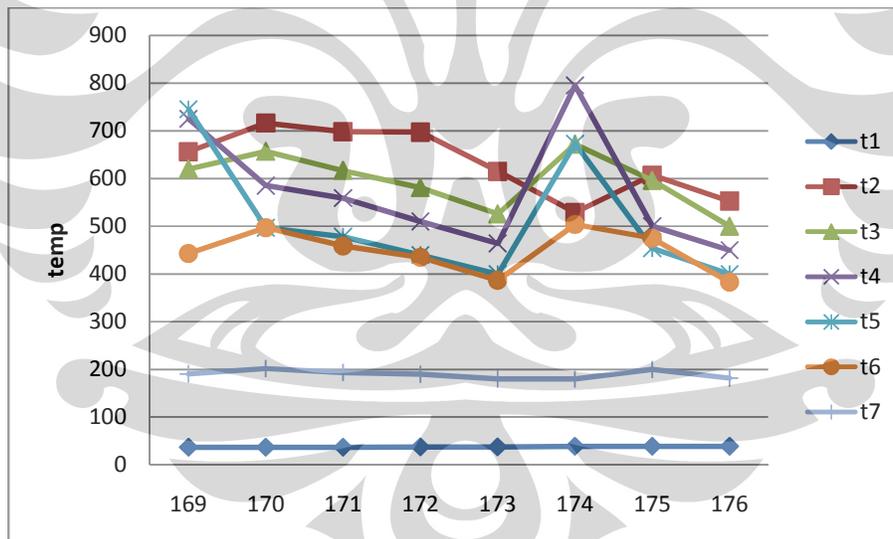
Hasil ini menunjukkan proses pembakaran yang efektif saat *feeding* 1 kg Tempurung kelapa.

	T avg
T1	36
T2	491
T3	507,1667
T4	485,1667
T5	475,6667
T6	456,8333
T7	156,1667

Tabel 4. 12 rata-rata temperatur saat *feeding* 1 kg

#### 4.2.3.5 Feeding 1.25 Kg Tempurung Kelapa

*Feeding* 1.25 kg Tempurung kelapa dilakukan pada menit ke 169,174



gambar 4. 15 grafik distribusi temperatur terhadap waktu saat *self combustion* dengan *feeding* 1.25 kg

Hasil yang didapat saat *feeding* 1.25 kg mendapatkan hasil yang baik. Dapat dilihat dari persebaran datanya. Pada saat *feeding* dilakukan T2 hanya

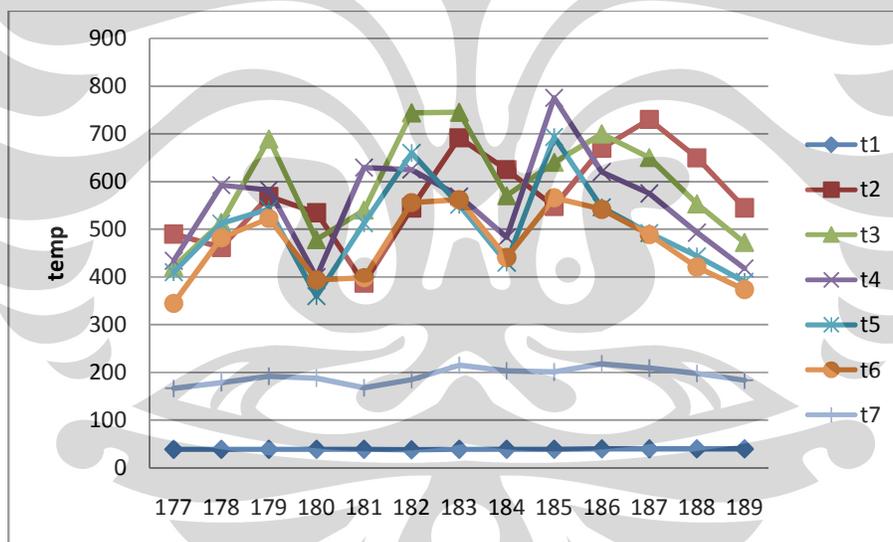
mngalami penurunan sesaat sebelum akhirnya naik kembali. Nilai T2 rata-rata 633,9° C dengan T2 maksimal 716° C

	T avg
T1	38
T2	633,875
T3	596,125
T4	573,5
T5	510,875
T6	447,875
T7	189,875

Tabel 4. 13 rata-rata temperatur saat *feeding* 1.25 kg

#### 4.2.3.5 Feeding 1.5 Kg Tempurung Kelapa

*Feeding* 1.5 kg Tempurung kelapa dilakukan pada menit ke 177,180,185



gambar 4. 16 grafik distribusi temperatur terhadap waktu saat *self combustion* dengan *feeding* 1.5 kg

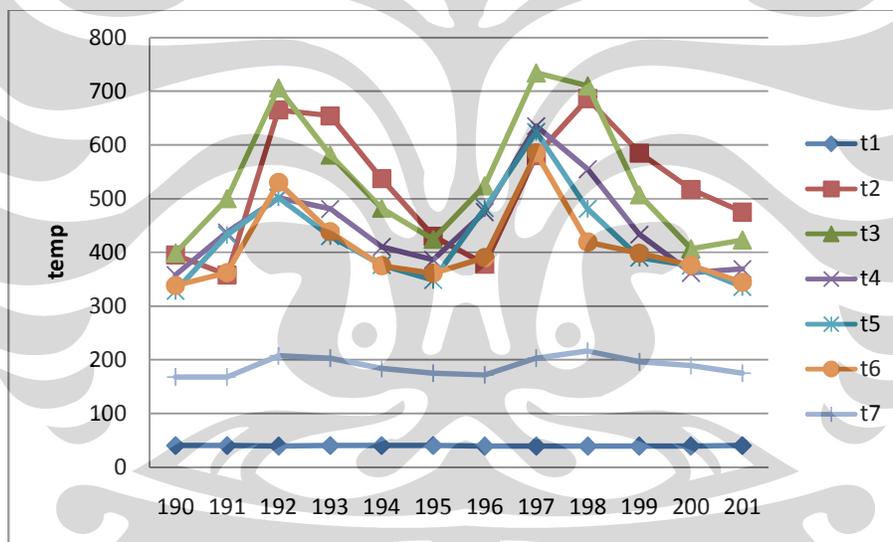
Saat *feeding* 1,5 kg hasil yang didapat masih efektif, hasil pembakarannya memiliki nilai rata-rata T2 572,9° C , namun terdapat penurunan temperatur yang signifikan bahkan nilai T2 minimum dibawah 400° C (387° C).

	T avg
T1	39,23077
T2	572,9231
T3	593,5385
T4	553,4615
T5	503,3077
T6	468,7692
T7	192,8462

Tabel 4. 14 rata-rata temperatur saat *feeding* 1.5 kg

#### 4.2.3.6 Feeding 1.75 Kg Tempurung Kelapa

*Feeding* 1.5 kg Tempurung kelapa dilakukan pada menit ke 190,195



gambar 4. 17 grafik distribusi temperatur terhadap waktu saat *self combustion* dengan *feeding* 1.75kg

Pembakaran Tempurung kelapa dengan *feeding* 1,75 kg mulai menunjukkan hasil yang tidak efektif. Penurunan temperatur signifikan setelah dilakukan *feeding*. Dapat dilihat dari grafik, nilai T2 menunjukkan fluktuasi yang tinggi. T2 rata-rata 521,7°C.

	T avg
T1	39,5
T2	521,6667
T3	533,0833
T4	450,1667
T5	425,25
T6	409,6667
T7	188

Tabel 4. 15 rata-rata temperatur saat *feeding* 1.75 kg

Dari analisa diatas dapat kita ketahui bahwa *feeding* yang terbaik adalah saat dimasukkan Tempurung kelapa dengan jumlah 1.25kg dan 1.5, hal ini bisa dilihat dari rata-rata temperatur yang ditunjukkan oleh T2 dan T3 dengan *feed rate* rata-rata lima menit.

#### 4.2.4 Perbandingan *self combustion* Tempurung kelapa dengan beberapa bahan bakar lainnya

Setiap bahan bakar yang diuji di FBC Universitas Indonesia memiliki karakteristik yang berbeda-beda, bahan bakar yang akan dibuat perbandingan adalah ranting, campuran ranting dengan Tempurung kelapa, Tempurung sawit. Pengambilan data dari bahan bakar tersebut diperoleh dengan cara yang sama, sehingga data tersebut dapat dibandingkan dengan Tempurung kelapa untuk mengetahui karakteristik masing masing bahan bakar. Perbandingan akan dilihat dari nilai T2 yang paling berpengaruh dalam proses FBC Universitas Indonesia. T2 mengukur temperatur fluidisasi pasir dan bahan bakar. T3 juga akan ditampilkan untuk mengetahui seberapa besar nyala api yang dihasilkan oleh masing masing bahan bakar.

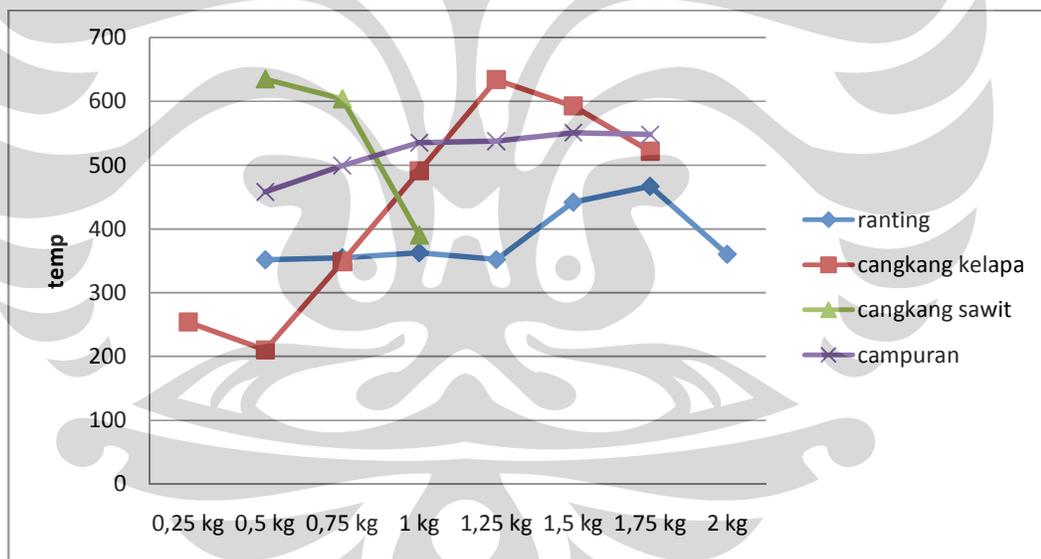
##### 4.2.4.1 perbandingan temperatur di T2

Pengujian FBC dengan bahan bakar biomassa (ranting, Tempurung kelapa, Tempurung sawit, campuran Tempurung kelapa dengan ranting) dimulai dari *feeding* 0.25 kg atau 0.5 kg, seterusnya kelipatan 0.25kg dan diakhiri bila nilai T2

rata-rata mulai menurun. Karakteristik dari masing-masing bahan bakar akan dijelaskan dalam tabel berikut ini.

bahan bakar/ jumlah <i>feeding</i>	0,25 kg	0,5 kg	0,75 kg	1 kg	1,25 kg	1,5 kg	1,75 kg	2 kg
ranting		351,33	354,4	362,5	351,6	441,67	466,67	360
Tempurung kelapa	253,67	210,3	348,18	491	633,88	592,7	521,57	
Tempurung sawit		634,8	603,71	390,55				
campuran (Tempurung kelapa dan ranting)		458	499,38	535,17	537,5	550,82	548,08	

tabel 4. 16 karakteristik bahan bakar saat proses FBC berlangsung (T2)



gambar 4. 18 Grafik karakteristik bahan bakar saat proses FBC berlangsung (T2)

Dari grafik diatas dapat dilihat masing-masing karakteristik bahan bakar untuk proses FBC. Masing-masing bahan bakar memiliki jumlah *feeding* optimal yang berbeda-beda. Ranting menunjukkan *feeding* terbaik 1,75 kg dengan temperatur rata-rata 466.67°C, Tempurung kelapa memiliki *feeding* terbaik 1,25

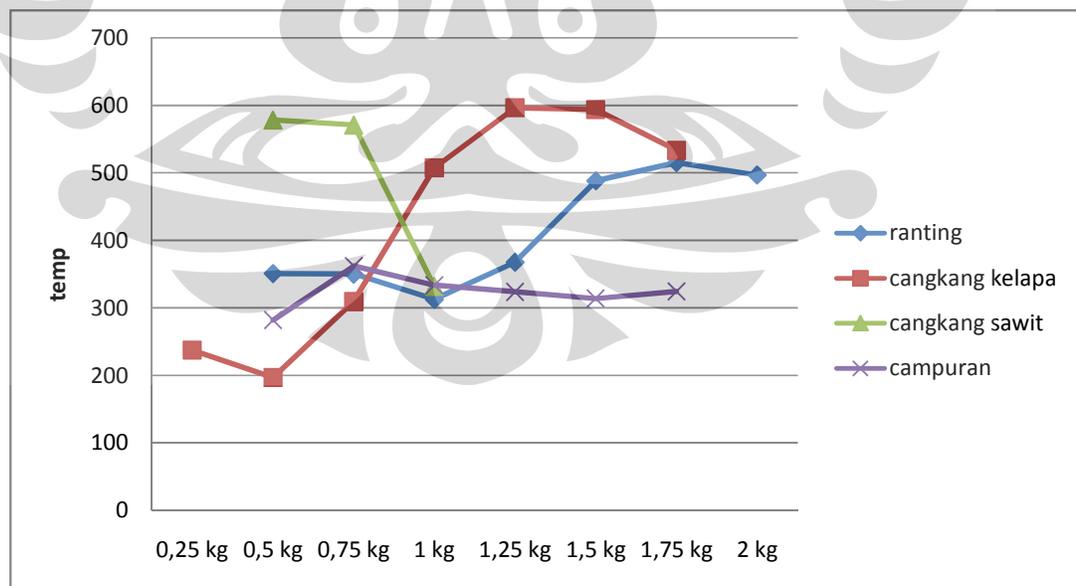
kg dengan temperatur rata-rata 633.88°C, Tempurung sawit 0.5 kg dengan temperatur rata-rata 634.8, sedangkan campuran Tempurung kelapa dengan ranting memiliki *feeding* terbaik 1.5 kg dengan T2 rata-rata 550.82°C.

#### 4.2.4.2 Perbandingan Temperatur di T3

Seperti yang dibahas sebelumnya, T3 menunjukkan temperatur di ketinggian 40 cm dari permukaan bed, sehingga dapat mewakili besarnya nyala api yang ditunjukkan oleh termokopel.

bahan bakar/ jumlah <i>feeding</i>	0,25 kg	0,5 kg	0,75 kg	1 kg	1,25 kg	1,5 kg	1,75 kg	2 kg
ranting		350,75	350	312,5	367,6	488	515	496,5
Tempurung kelapa	237,2	196,6	309,09	507,17	596,13	593,54	533,08	
Tempurung sawit		578	570,71	331,91				
campuran (Tempurung kelapa dan ranting)		281,8	361,81	333,33	323,6	313,82	324,23	

tabel 4. 17 karakteristik bahan bakar saat proses FBC berlangsung (T3)

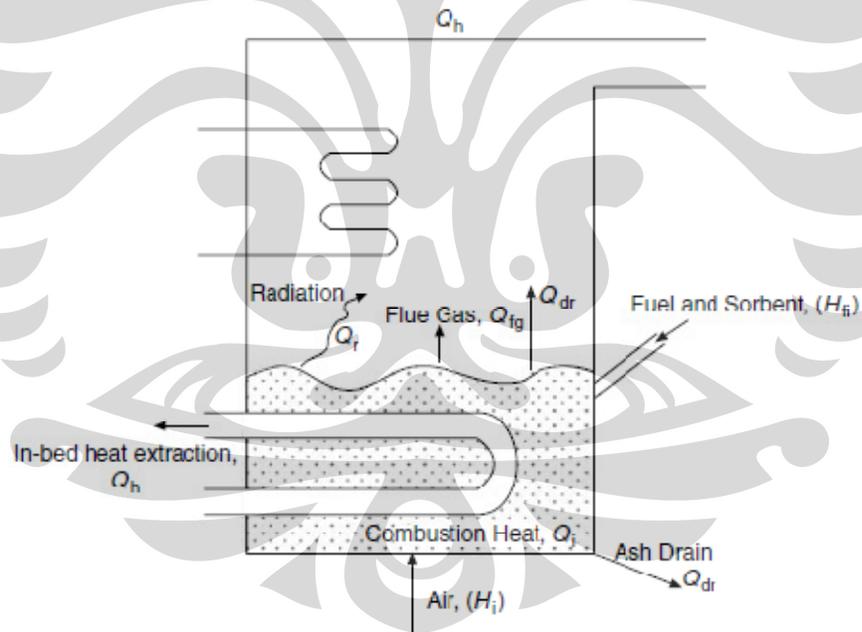


gambar 4. 19 Grafik karakteristik bahan bakar saat proses FBC berlangsung (T3)

Dari grafik dan tabel diatas dapat dilihat bahwa T3 maksimum terbaik pada bahan bakar Tempurung kelapa dan Tempurung sawit. Tempurung kelapa 596.13°C, Tempurung sawit 578°C. Kemudian ranting 515°C dan terakhir bahan bakar campuran 361.81°C.

#### 4.2.4.3 Perbandingan *Heat Balance*

Perhitungan *heat balance* merupakan perhitungan kesetimbangan panas yang terjadi di dalam sistem fluidized bed combustion yaitu jumlah panas yang masuk sama dengan jumlah panas yang keluar. Dengan kata lain *heat balance* merupakan total panas dari seluruh sistem yang bekerja di dalam reaktor. Perhitungan parameter-parameter panas yang terdapat dalam sistem fluidized bed combustion mirip dengan perhitungan *heat balance* pada fluidized bed boiler. Sebagai ilustrasi panas yang bekerja pada sistem seperti terlihat pada gambar.



gambar 4. 20 skema *heat balance* pada FBC UI

$$\begin{aligned} \text{Total } \textit{heat} \text{ entering bed} &= \text{Total } \textit{heat} \text{ leaving bed} \\ \text{Total } \textit{heat} \text{ entering bed} &= Q_i + H_i \\ \text{Total } \textit{heat} \text{ leaving bed} &= \text{HRR} + Q_{fg} + Q_{dr} + Q_r + Q_h \end{aligned}$$

Nilai  $Q_i$  = massflow bahan bakar x LHV bahan bakar

$$H_i = \text{massflow udara} \times c_p \text{ udara} \times \Delta T_1 - T_{\text{lingkungan}} \text{ (ring blower)}$$

$$Q_{\text{release}} = \text{massflow udara} \times c_p \text{ udara} \times \Delta T_2 - T_{\text{lingkungan}} \text{ (combustion chamber)}$$

Untuk perbandingan bahan bakar (tempurung Kelapa, cangkang sawit, ranting pohon) Nilai  $Q_{fg}, Q_{dr}, Q_r, Q_h$  tidak diperhitungkan, karena tidak memberikan pengaruh yang signifikan (sesuai percobaan tahun 1 % dari total *heat leaving bed*)

feed rate rata-rata (min)

bahan bakar/ jumlah feeding	0,25 kg	0,5 kg	0,75 kg	1 kg	1,25 kg	1,5 kg	1,75 kg	2 kg
ranting		2	2	3	3	3	3	4
cangkang kelapa	3	3,3	3,7	3	3,3	4	5	
cangkang sawit		3	3,3	4				

tabel 4. 18 Feed rate-rata (min)

$T_2$  Rata-rata

bahan bakar/ jumlah feeding	0,25 kg	0,5 kg	0,75 kg	1 kg	1,25 kg	1,5 kg	1,75 kg	2 kg
ranting		351,3333	354,4	362,5	351,6	441,6667	466,6667	360
cangkang kelapa	253,6667	210,3	348,181	491	633,875	592,7	521,5714	
cangkang sawit		634,8	603,714	390,545				

tabel 4. 19  $T_2$  rata-rata pada masing-masing bahan bakar

### Ranting pohon

$T_{\text{lingkungan}} = 26^\circ\text{C}$

$LHV = 14.370 \text{ Kj/Kg}$

$$Q_{in} = Q_i + H_i$$

Nilai  $H_i$  dari ranting pohon adalah

$$\text{massflow udara} \times c_p \text{ udara} \times \Delta T_1 - T_{\text{lingkungan}} \text{ (ring blower)}$$

$$5.7 \times 1.005 \times (36,958-26)$$

$$62,775 \text{ Kj/min}$$

Nilai  $Q_i$  dan  $Q_{in}$  dari ranting pohon dapat dilihat dari tabel berikut

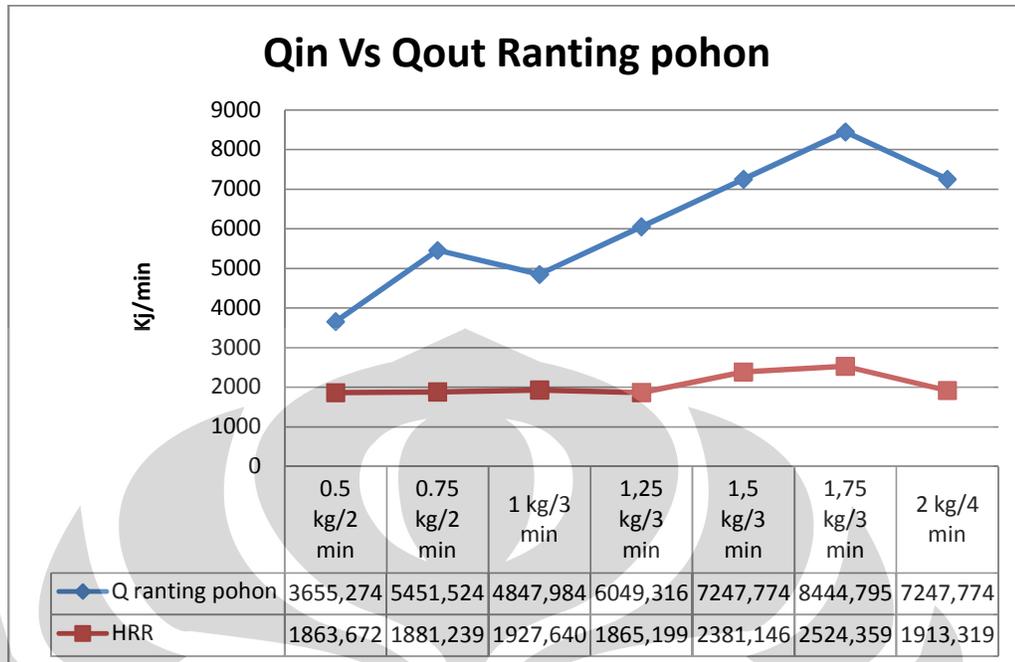
feed rate	mass flow (min)	LHV	$Q_i$	$H_i$	$Q_{in} (Q_i+H_i)$
0.5 kg/2 min	0,25	14370	3592,5	62,7748125	3655,275
0.75 kg/2 min	0,375	14370	5388,75	62,7748125	5451,525
1 kg/3 min	0,333	14370	4785,21	62,7748125	4847,985
1,25 kg/3 min	0,4166	14370	5986,542	62,7748125	6049,317
1,5 kg/3 min	0,5	14370	7185	62,7748125	7247,775
1,75 kg/3 min	0,5833	14370	8382,021	62,7748125	8444,796
2 kg/4 min	0,5	14370	7185	62,7748125	7247,775

tabel 4. 20 Perhitungan  $Q$  input bahan bakar ranting pohon

$Q$  output

feed rate	flow rate (ring blower)	$C_p$ udara	$\Delta T$ lingkungan	Heat Release Rate
0.5 kg/2 min	5,7	1,005	325,3333	1863,672
0.75 kg/2 min	5,7	1,005	328,4	1881,2394
1 kg/3 min	5,7	1,005	336,5	1927,64025
1,25 kg/3 min	5,7	1,005	325,6	1865,1996
1,5 kg/3 min	5,7	1,005	415,6667	2381,1465
1,75 kg/3 min	5,7	1,005	440,6667	2524,359
2 kg/4 min	5,7	1,005	334	1913,319

tabel 4. 21 Perhitungan  $Q_{output}$  bahan bakar ranting pohon



gambar 4. 21 grafik Qin vs Qout Ranting pohon

Dari grafik diatas dapat disimpulkan bahwa semakin besar jumlah bahan bakar yang dimasukkan semakin besar Qin yang didapat. Untuk *heat release rate*, grafik mengalami peningkatan sampai titik optimal (1,75 kg) kemudian terus mengalami penurunan.

### Tempurung Kelapa

T lingkungan = 26°C

LHV = 17.230 Kj/Kg

Q Input

$$Q_{in} = Q_i + H_i$$

Nilai  $H_i$  dari tempurung kelapa adalah

massflow udara x  $c_p$  udara x  $\Delta T_1 - T_{lingkungan}$  (ring blower)

$$5.7 \times 1.005 \times (37,464 - 26)$$

$$65,670 \text{ Kj/min}$$

Nilai  $Q_i$  dan  $Q_{in}$  dari tempurung kelapa dapat dilihat dari tabel berikut

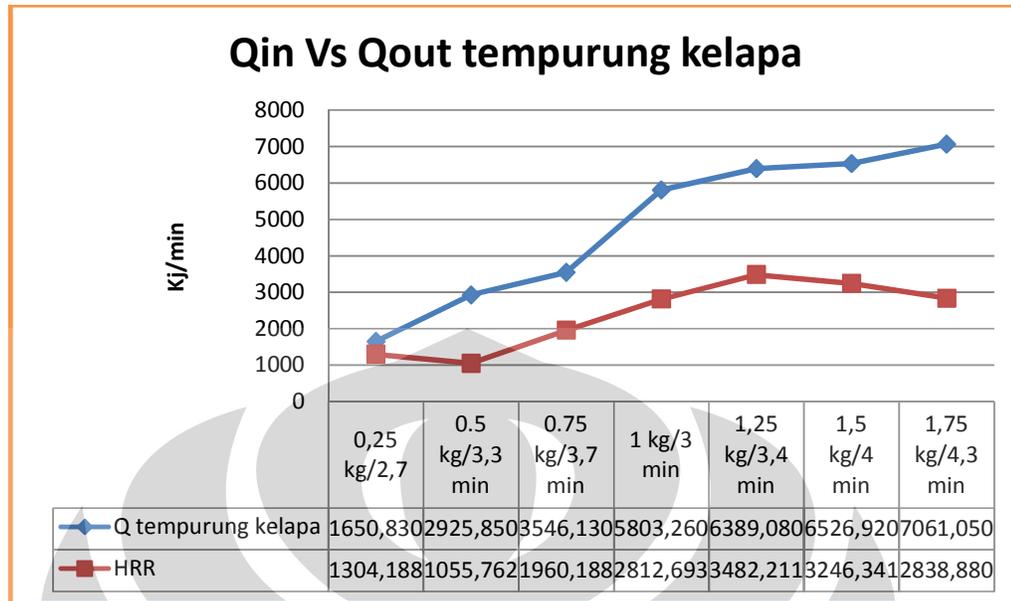
feed rate	mass flow (min)	LHV	Qi	$\Delta T_2-T_{lingkungan}$	Qin (Qi+Hi)
0,25 kg/2,7	0,092	17230	1585,16	65,67019565	1650,83
0.5 kg/3,3 min	0,166	17230	2860,18	65,67019565	2925,85
0.75 kg/3,7 min	0,202	17230	3480,46	65,67019565	3546,13
1 kg/3 min	0,333	17230	5737,59	65,67019565	5803,26
1,25 kg/3,4 min	0,367	17230	6323,41	65,67019565	6389,08
1,5 kg/4 min	0,375	17230	6461,25	65,67019565	6526,92
1,75 kg/4,3 min	0,406	17230	6995,38	65,67019565	7061,05

tabel 4. 22 Perhitungan Qin input bahan bakar tempurung kelapa

Qout

feed rate	flow rate (ring blower)	Cp udara	$\Delta T_2-T_{lingkungan}$	HRR (Kj/min)
0,25 kg/3	5,7	1,005	227,6667	1304,1885
0.5 kg/3,3 min	5,7	1,005	184,3	1055,76255
0.75 kg/3,7 min	5,7	1,005	342,1818	1960,188545
1 kg/3 min	5,7	1,005	491	2812,6935
1,25 kg/3,4 min	5,7	1,005	607,875	3482,211938
1,5 kg/4 min	5,7	1,005	566,7	3246,34095
1,75 kg/4,3 min	5,7	1,005	495,5714	2838,880929

tabel 4. 23 perbandingan Qoutput bahan bakar tempurung kelapa



gambar 4. 22 grafik Qin vs Qout bahan bakar tempurung kelapa

Dari grafik diatas dapat disimpulkan bahwa semakin besar jumlah bahan bakar yang dimasukkan semakin besar Qin yang didapat. Untuk *heat release rate*, grafik mengalami peningkatan sampai titik optimal (1,25 kg) kemudian terus mengalami penurunan.

#### Cangkang sawit

T lingkungan = 26°C

LHV = 19.300 KJ/Kg

Q Input

$$Q_{in} = Q_i + H_i$$

Nilai  $H_i$  dari cangkang sawit adalah

massflow udara x cp udara x  $\Delta T_1 - T_{lingkungan}$  (ring blower)

$$5.7 \times 1.005 \times (37,147 - 26)$$

$$65,670 \text{ KJ/min}$$

Nilai  $Q_i$  dan  $Q_{in}$  dari ranting pohon dapat dilihat dari tabel berikut

feed rate	mass flow (min)	LHV	$Q_i$	$\Delta T_{lingkungan}$	$Q_{in} (Q_i + H_i)$
0.5 kg/2,5 min	0,2	19300	3860	65,400375	3925,4

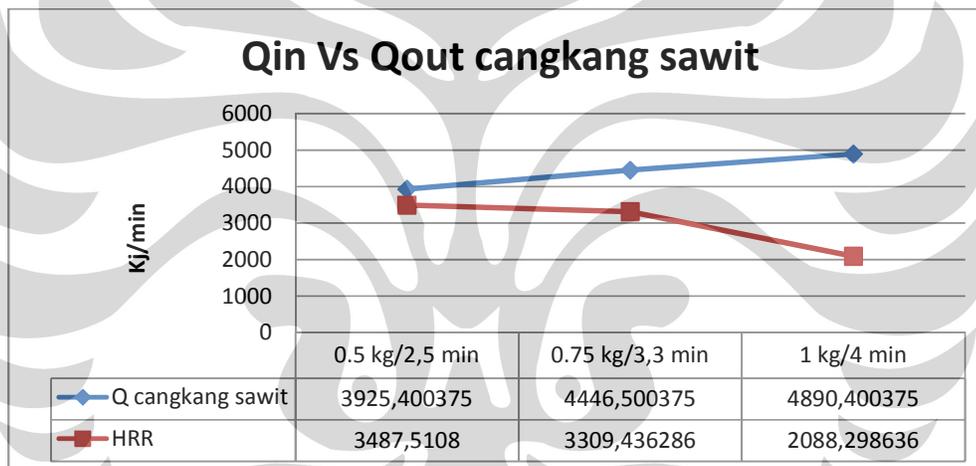
0.75 kg/3,3 min	0,227	19300	4381,1	65,400375	4446,5
1 kg/4 min	0,25	19300	4825	65,400375	4890,4

tabel 4. 24 perhitungan  $Q_{input}$  bahan bakar cangkang sawit

#### $Q_{out}$

feed rate	flow rate (ring blower)	$C_p$ udara	$\Delta T_2 - T_1$ lingkungan	Heat Release Rate
0.5 kg/3 min	5,7	1,005	608,8	3487,5108
0.75 kg/3,3 min	5,7	1,005	577,7143	3309,436286
1 kg/4 min	5,7	1,005	364,5455	2088,298636

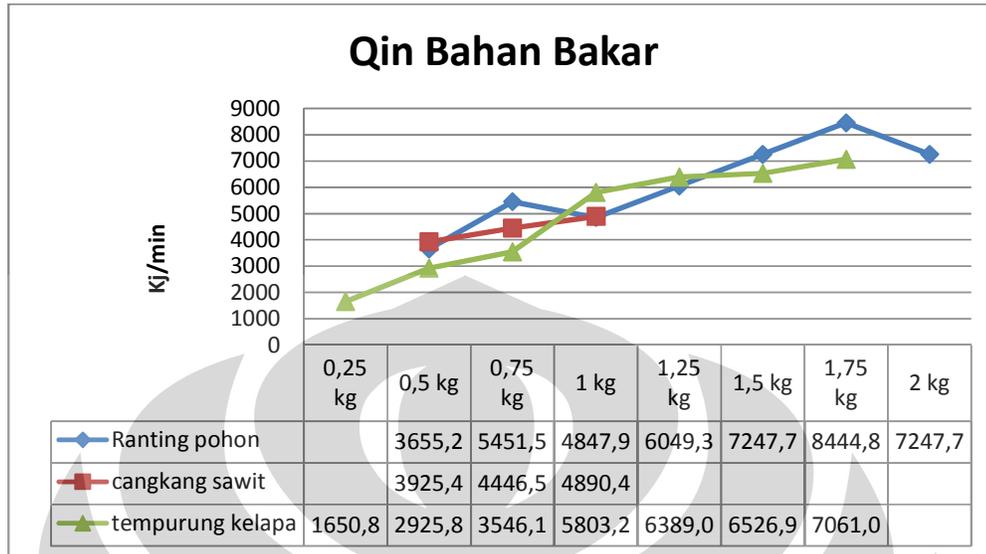
tabel 4. 25 perhitungan  $Q_{output}$  bahan bakar cangkang sawit



gambar 4. 23 grafik  $Q_{input}$  vs  $Q_{output}$  bahan bakar cangkang sawit

Dari grafik diatas dapat disimpulkan bahwa semakin besar jumlah bahan bakar yang dimasukkan semakin besar  $Q_{in}$  yang didapat. Untuk *heat release rate*, grafik di titik optimal saat 0,5 kg kemudian terus mengalami penurunan. Hal ini disebabkan FBC UI sudah mencapai kapasitas umpan maksimum.

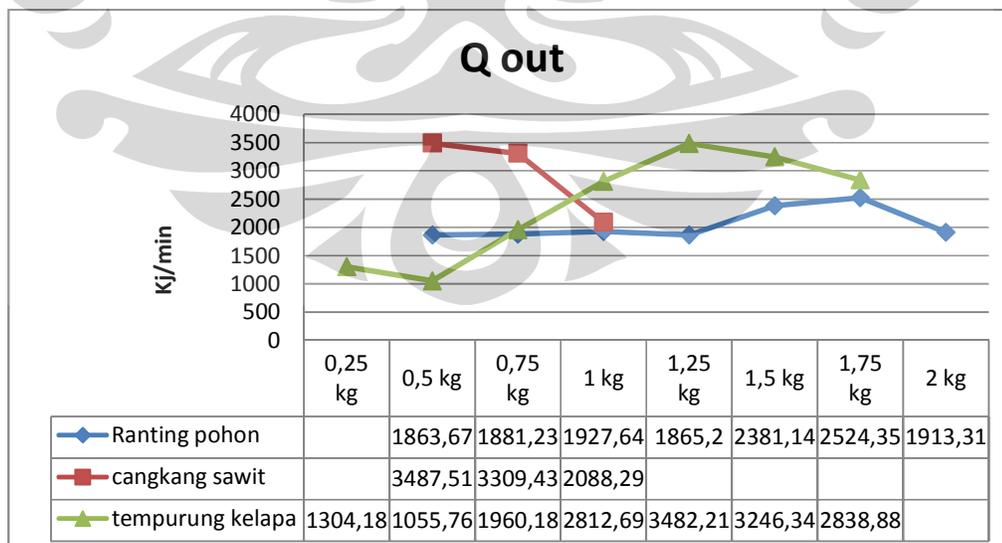
### Perbandingan Q input



gambar 4. 24 grafik Qin input pada setiap bahan bakar

Dari grafik diatas dapat dilihat grafik Qin input pada masing-masing feedrate bahan bakar. Dari ketiga grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa ketiga bahan bakar tersebut memiliki karakteristik relatif sama, hal ini dikarenakan nilai LHV tidak berbeda jauh. Selain itu ketiga bahan bakar tersebut adalah biomassa sehingga karakteristiknya pun sama.

### Perbandingan Q output



gambar 4. 25 grafik Qoutput pada setiap bahan bakar

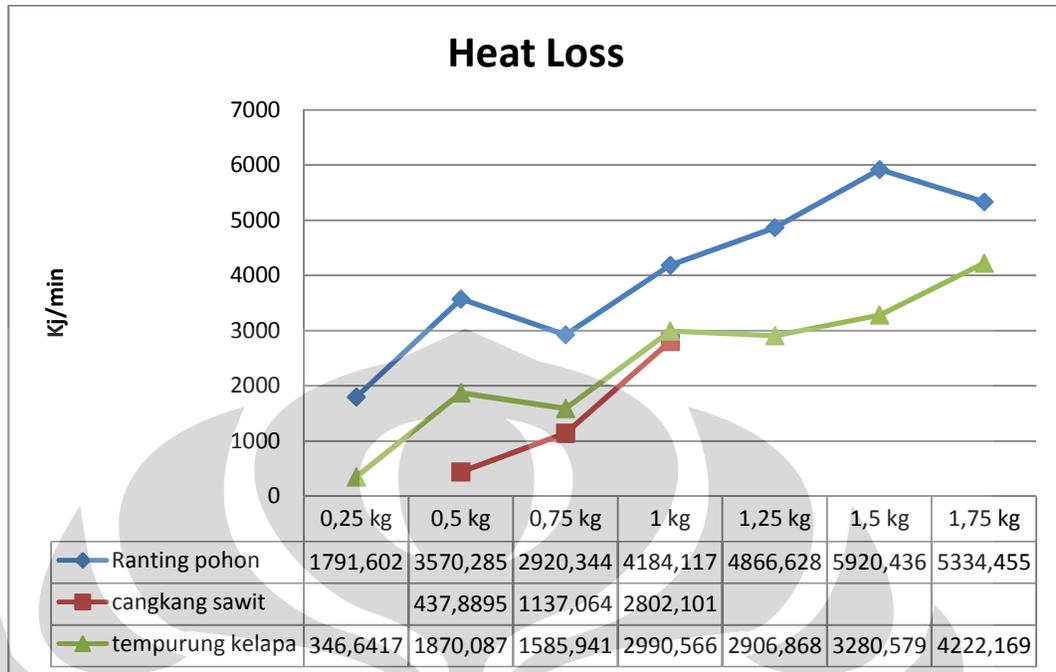
Meskipun perbandingan  $Q_{input}$  relatif sama tetapi *heat release rate* yang dihasilkan tidak sama. Dari grafik diatas dapat disimpulkan bahwa cangkang sawit memiliki *heat release* yang baik saat feeding 0.5 kg sedangkan tempurung kelapa saat feeding 1,25 kg dan ranting pada saat 1,75 kg. Hasil ini sama saat perbandingan bahan bakar berdasar pada nilai  $T_2$ . Hal ini disebabkan perhitungan *heat release rate* juga berdasarkan pada nilai  $T_2$ .

### **Heat Loss**

$$Heat\ loss = Q_{in} - Q_{out}$$

feed rate	ranting	tempurung kelapa	cangkang sawit
0,25 kg		346,6417	
0,5 kg	1791,603	1870,088	437,8896
0,75 kg	3570,285	1585,942	1137,064
1 kg	2920,345	2990,567	2802,102
1,25 kg	4184,117	2906,868	
1,5 kg	4866,628	3280,579	
1,75 kg	5920,437	4222,169	
2 kg	5334,456		

tabel 4. 26 tabel *Heat loss* pada masing-masing bahan bakar dengan feed rate tertentu



gambar 4. 26 Grafik *heat loss* pada setiap bahan bakar

Dari grafik diatas dapat disimpulkan bahwa semakin besar masukan bahan bakar semakin tinggi nilai *heat loss*nya. Setiap alat pasti memiliki *heat loss*, tidak ada yang ideal, hal ini dapat dibuktikan dari persebaran grafik diatas.

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

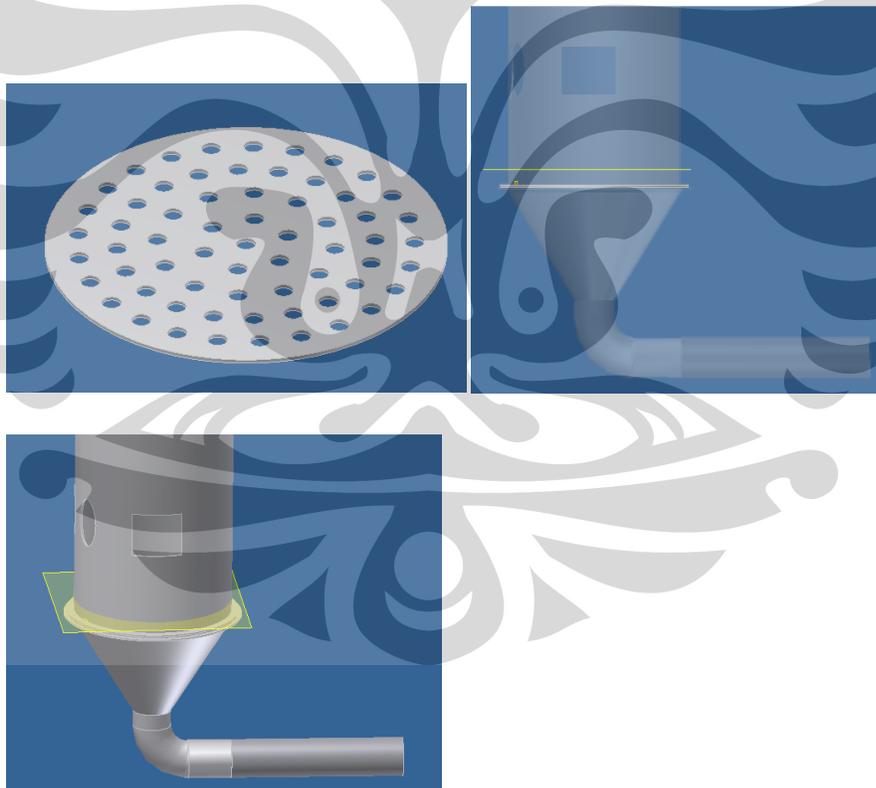
#### 5.1 KESIMPULAN

1. proses pemanasan awal menggunakan Tempurung kelapa lebih baik dibandingkan menggunakan ranting. Waktu yang dibutuhkan oleh pemanasan awal Tempurung sebelum proses *self sustaining combustion* membutuhkan waktu 84 menit. Pemanasan awal ranting membutuhkan 131 menit.
2. Proses pemanasan awal yang berbeda (ranting dan Tempurung kelapa) tidak memberikan pengaruh pada proses *self sustaining combustion* Tempurung kelapa
3. Untuk mendapatkan *Self sustaining combustion* pada Tempurung kelapa perlu dilakukan pemanasan awal. Setelah T2 *steady condition* pada temperatur 400-500 °C proses *self sustaining combustion* dapat dilakukan.
4. *Feed rate* Tempurung kelapa yang berbeda-beda memberikan pengaruh signifikan pada perubahan T2,T3,T4,T5,T6,T7. *Feeding* yang terbaik adalah 1,25 kg dengan *feed rate* rata-rata 1,25 kg/ 4menit.
5. Perbandingan *self sustaining combustion* Tempurung kelapa dengan bahan bakar biomassa lainnya (ranting, Tempurung sawit, campuran Tempurung kelapa dan ranting) mendapatkan hasil feeding optimal Tempurung sawit 0.5 kg. Kemudian Tempurung kelapa 1.25 kg dan campuran Tempurung kelapa dengan ranting 1,5 kg. Sedangkan feeding ranting optimal saat 1,75 kg

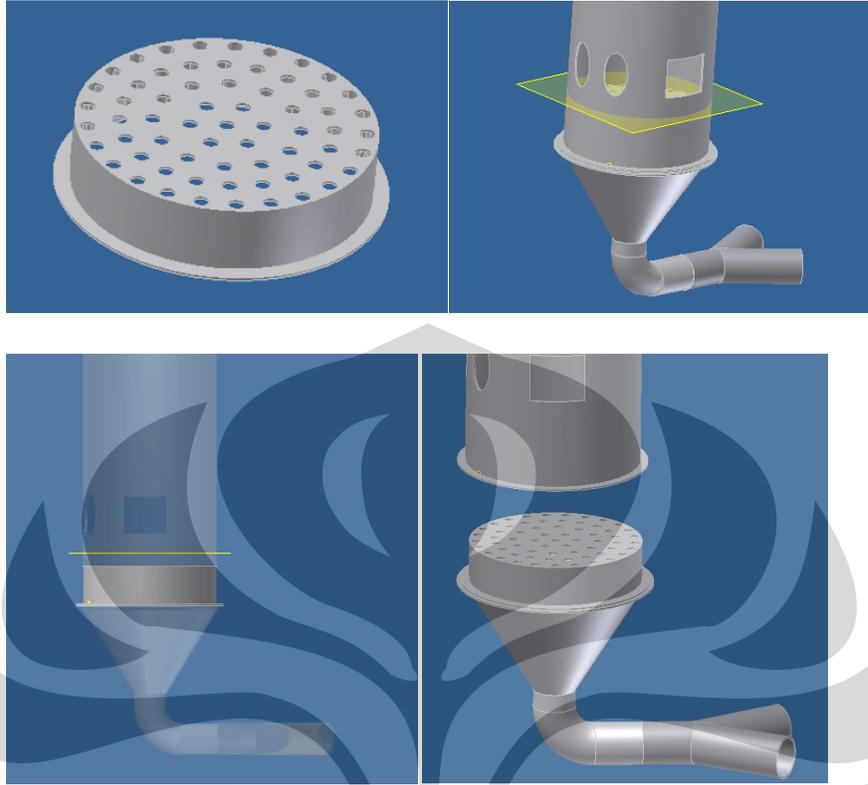
## 5.2 SARAN

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. beberapa rekomendasi yang saya ajukan untuk kepentingan penelitian lebih jauh,yakni:

1. Persiapkan bahan bakar dengan baik (jumlah maupun ukuran) sehingga saat proses FBC berlangsung dengan baik
2. Ring blower perlu ditingkatkan lagi kapasitasnya agar fluidisasi pasir lebih optimal serta ketinggian distributor harus lebih dekat dengan burner sehingga proses pemanasan awal menjadi lebih cepat.



gambar 5. 1 Gambar distributor yang ada pada FBC UI



gambar 5. 2 Desain Distributor baru untuk FBC UI

3. Penambahan kapasitas burner perlu dilakukan untuk mengurangi lamanya proses pemanasan awal.
4. Perlunya pengadaan instalai jaringan listrik dan air bersih pada laboratorium pengujian FBC, karena hal ini sangat dibutuhkan untuk praktikan laboratorium di masa mendatang.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Basu, Prabir. "Combustion and Gasification in Fluidized Beds" (Taylor & Francis Group 2006).
2. Oka, Simeon N. "Fluidized Bed Combustion" (Marcel Dekker, Inc. 2004)
3. Bruce R. Munson, Donald F. Young, *Mekanika Fluida*, terj. Harinaldi, Budiarto (Jakarta: Erlangga, 2003).
4. Surjosatyo, Adi. "Fluidized Bed Incineration of Palm Shell & Oil Sludge Waste." Tesis, Program Magister Engineering Universiti Teknologi Malaysia, 1998.
5. Howard, J. R., *Fluidized Beds – Combustion and Applications*, (London: Applied Science Publishers, 1983).
6. Kunii, Daizo & Octave Levenspiel, *Fluidization Engineering*, (New York: Butterworth-Heinemann, 1991).
7. [www.cogeneration.net/fluidized\\_bed\\_combustion.htm](http://www.cogeneration.net/fluidized_bed_combustion.htm)
8. [www.doiserbia.nb.rs/ft.aspx?id=0354-98360302105G](http://www.doiserbia.nb.rs/ft.aspx?id=0354-98360302105G)
9. [www.tpub.com/content/altfuels10/Gasification/Gasification0018.htm](http://www.tpub.com/content/altfuels10/Gasification/Gasification0018.htm)
10. [www.fluidizedbedcombustion.com/](http://www.fluidizedbedcombustion.com/)

**LAMPIRAN**



Tabel Self combustion ranting

menit	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	
1	36	508	278	282	285	284	144	0,5 ranting
2	37	373	385	269	259	273	140	
3	37	336	376	272	262	257	137	
4	37	345	364	245	237	242	131	
5	37	387	323	218	208	211	125	0,75 ranting
6	37	299	366	336	308	280	136	
7	37	321	398	304	285	271	143	
8	37	345	365	250	257	255	133	
9	37	420	298	219	208	209	125	
10	37	338	236	176	192	195	112	1 ranting
11	36	387	389	263	303	310	145	
12	37	336	307	254	241	246	128	1,25 ranting
13	37	277	414	366	457	410	172	
14	37	299	404	326	374	366	166	
15	37	390	375	295	300	295	155	
16	37	456	338	223	229	255	133	
17	37	371	432	570	600	576	161	1,5 ranting
18	37	436	535	515	497	463	182	
19	37	518	497	408	350	349	171	
20	37	503	443	531	535	324	155	1,75 ranting
21	37	391	637	578	606	484	212	
22	37	506	465	345	314	336	170	
23	37	434	432	525	610	559	129	2 ranting
24	37	340	574	532	550	518	196	
25	37	326	525	405	384	363	181	
26	37	340	455	319	302	320	158	
27	36	321	325	265	247	249	140	0,5 ranting
28	37	311	386	310	315	306	149	
29	36	322	397	396	291	281	146	
30	37	363	402	263	252	257	137	
31	37	385	337	345	220	220	129	
32	37	321	308	286	275	239	127	0,25 ranting
33	37	341	354	320	290	276	137	
34	37	390	330	154	238	243	132	
35	36	381	306	197	320	352	123	1,5 ranting
36	37	315	355	314	395	389	158	
37	37	292	285	267	270	274	149	
38	37	278	308	329	252	252	138	
39	37	395	295	269	230	224	132	
40	36	374	274	204	198	207	119	0,25 ranting
41	37	282	246	183	196	198	118	

## Self combustion batok kelapa

menit	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	
1	36	286	219	180	176	184	112	0,25 batok kelapa
2	36	218	192	165	163	169	104	
3	37	201	182	163	161	167	102	
4	37	215	320	229	269	260	112	0,25 batok kelapa
5	36	382	388	210	228	244	123	
6	36	328	272	174	182	192	109	0,25 batok kelapa
7	36	253	213	160	164	171	103	
8	36	211	184	156	156	161	98	
9	36	189	165	152	148	153	95	
10	36	178	169	180	240	196	94	0,5 batok kelapa
11	36	227	246	201	231	255	118	
12	36	234	220	174	190	208	114	
13	36	205	202	175	199	205	103	0,5 batok kelapa
14	37	277	209	165	172	192	107	
15	36	248	178	141	147	162	98	
16	36	187	148	117	137	146	90	0,5 batok kelapa
17	36	160	138	134	155	148	88	
18	36	172	224	183	231	233	103	
19	36	215	232	189	227	234	115	
20	36	278	210	160	180	189	108	0,75 batok kelapa
21	36	231	181	135	149	161	98	
22	36	193	163	138	165	167	94	
23	36	182	163	157	180	188	101	
24	35	184	207	255	298	226	98	0,75 batok kelapa
25	36	340	446	327	433	422	141	
26	36	548	576	297	375	390	159	
27	36	538	419	264	249	245	142	
28	35	430	343	264	258	246	120	0,75 batok kelapa
29	36	462	360	259	262	262	126	
30	36	444	332	238	240	250	127	
31	36	353	273	208	200	217	117	1 batok kelapa
32	36	325	244	240	268	496	108	
33	36	475	639	690	708	585	143	
34	36	605	680	540	532	460	197	
35	36	540	490	574	586	395	179	1 batok kelapa
36	36	648	717	659	560	588	193	
37	37	656	620	725	745	443	191	1,25 batok kelapa
38	37	716	657	585	497	497	202	
39	37	698	617	559	478	459	194	
40	38	697	581	510	440	435	190	

41	38	615	526	464	400	387	180	
42	39	529	672	795	673	504	180	1,25 batok kelapa
43	39	607	596	500	454	475	200	
44	39	553	500	450	400	383	182	
45	39	490	421	434	410	345	167	1,5 batok kelapa
46	39	462	514	592	512	482	179	
47	39	569	689	582	542	523	192	
48	39	535	478	400	360	394	188	1,5 batok kelapa
49	39	387	540	629	513	399	168	
50	38	545	744	625	660	556	185	
51	39	692	745	569	551	562	215	
52	39	625	570	483	430	441	203	
53	39	548	640	775	693	566	201	1,5 batok kelapa
54	40	670	700	620	546	542	218	
55	40	730	650	575	492	489	209	
56	40	650	553	493	444	421	198	
57	40	545	472	418	390	374	184	
58	40	395	399	358	328	338	168	1,75 batok kelapa
59	40	358	500	437	432	362	168	
60	39	665	706	501	502	530	207	
61	40	654	581	481	430	438	203	
62	40	537	482	410	376	375	184	
63	40	430	424	386	348	361	175	1,75 batok kelapa
64	39	378	524	475	482	390	172	
65	39	580	734	635	624	585	203	
66	39	686	710	555	481	419	216	
67	39	585	507	433	390	398	196	
68	39	517	407	362	375	376	189	
69	40	475	423	369	335	344	175	

## Self combustion cangkang sawit

menit	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	
82	37	664	623	416	474	465	173	burner mati dan 0,5 kg sawit
83	37	615	578	384	396	448	184	
84	37	643	564	560	518	493	178	0,5 kg sawit
85	37	631	593	556	516	508	191	
86	36	635	587	550	474	431	190	
87	37	650	568	496	423	408	185	
88	37	665	680	618	508	488	193	0,75 kg sawit
89	37	694	640	508	465	423	191	
90	38	654	570	480	415	409	185	
91	38	580	521	476	375	356	175	
92	38	511	544	542	409	366	174	0,75 kg sawit
93	38	551	531	478	345	362	183	
94	38	571	509	359	321	339	173	
95	38	580	430	378	293	301	160	1 kg sawit
96	38	420	382	303	284	298	149	
97	38	340	390	361	338	342	157	
98	38	503	398	364	316	360	157	
99	38	558	362	292	260	257	147	
100	37	324	296	238	225	223	131	1 kg sawit
101	38	304	285	235	219	220	130	
102	37	285	281	233	224	224	130	
103	37	278	277	241	226	225	128	
104	37	288	274	237	226	226	127	
105	37	416	276	234	231	233	127	
106	37	494	256	224	220	216	125	0,5 kg sawit
107	38	404	246	220	214	214	122	
108	37	295	253	236	229	230	126	
109	37	318	262	238	222	223	124	
110	38	372	262	234	215	212	123	
111	37	389	250	222	205	205	117	0,5 kg sawit
112	38	310	311	289	300	298	132	
113	38	359	349	305	307	298	142	
114	38	490	339	301	284	276	140	
115	38	531	352	296	291	283	142	
116	37	520	324	271	261	250	137	0,5 kg sawit
117	37	374	420	392	405	340	150	
118	38	379	408	379	382	337	154	
119	38	486	368	350	306	280	148	
120	38	512	352	289	262	269	139	

121	37	450	306	270	224	240	126	0,75 kg sawit
122	38	330	455	379	369	318	143	
123	38	340	434	337	301	295	147	
124	38	359	365	283	260	260	136	
125	38	444	330	260	232	234	132	
126	38	445	303	228	207	211	118	
127	38	408	313	298	270	309	123	0,75 kg sawit
128	38	396	389	338	360	381	156	
129	37	450	386	298	305	312	153	
130	38	488	322	246	250	255	138	
131	38	488	296	234	221	216	130	
132	38	472	272	213	208	204	118	0,75 kg sawit
133	38	385	389	360	377	365	138	
134	37	399	414	369	369	352	153	
135	38	478	384	290	274	264	146	
136	38	505	319	226	226	230	130	
137	38	502	281	204	191	195	121	
138	37	494	261	183	173	179	111	
139	38	487	234	163	161	163	105	
140	38	482	208	151	142	151	97	
141	37	478	202	143	136	142	94	
142	37	472	189	137	132	139	90	
143	36	467	179	133	128	132	87	
144	36	462	173	129	125	130	85	
145	36	457	164	123	120	128	82	
146	36	453	161	121	118	125	82	
147	36	448	160	118	116	124	80	
148	36	444	157	114	114	122	79	
149	36	438	150	112	112	120	78	
150	36	432	148	109	110	117	77	

## Self combustion campuran batok kelapa dengan ranting pohon

menit	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	
151	36	401	154	184	120	118	78	0,5 kg campuran ranting dan batok
152	37	356	351	284	364	350	130	
153	37	389	382	269	295	312	134	
154	37	461	318	211	226	217	124	
155	37	492	271	186	176	184	108	
156	37	500	254	166	161	162	103	
157	38	500	231	151	149	154	96	
158	38	500	214	146	142	141	94	
159	38	472	323	277	323	318	128	0,5 kg campuran ranting dan batok
160	38	509	320	215	242	238	127	
161	38	498	280	197	191	205	116	0,75 kg campuran ranting dan batok
162	38	441	304	335	388	300	117	
163	38	428	454	340	401	370	151	
164	38	468	392	282	288	280	147	
165	38	515	330	202	199	212	122	
166	38	536	286	177	180	181	114	
167	38	536	158	157	154	162	101	0,75 kg campuran ranting dan batok
168	38	511	409	336	356	323	135	
169	38	527	396	315	313	303	144	
170	37	538	328	220	204	332	222	
171	37	503	299	273	203	188	114	0,75 kg campuran ranting dan batok
172	38	416	519	360	435	400	140	
173	38	464	553	365	374	400	159	
174	38	500	437	287	294	400	150	
175	38	550	339	233	206	218	127	
176	38	559	305	193	173	181	116	
177	38	558	258	167	159	165	104	1 kg campuran ranting dan batok
178	37	488	364	267	300	330	116	
179	38	448	467	342	356	360	150	
180	38	463	412	273	290	282	144	
181	37	493	344	230	216	223	125	
182	38	508	315	200	187	186	120	
183	38	514	268	176	170	175	107	
184	37	522	250	171	155	157	101	
185	38	525	237	162	145	151	94	
186	37	541	213	149	137	141	92	
187	38	546	198	143	130	137	88	
188	38	545	191	136	126	131	86	
189	37	540	181	143	126	130	84	1 kg campuran ranting dan batok
190	38	489	339	250	300	290	107	

191	38	498	432	453	348	345	142	
192	38	540	419	268	275	284	142	
193	38	572	332	221	234	237	127	
194	38	572	297	206	193	219	119	
195	37	549	264	223	223	245	106	1,25 kg campuran ranting dan batok
196	38	454	507	453	490	450	158	
197	38	427	533	398	399	372	168	
198	38	452	411	279	255	272	143	
199	36	497	343	230	223	220	130	
200	37	563	288	198	182	190	114	
201	38	597	259	178	161	163	104	
202	38	603	229	162	152	155	96	
203	38	614	207	151	144	145	92	
204	38	619	195	141	135	139	88	
205	37	618	183	135	131	133	85	1,5 kg campuran ranting dan batok
206	38	526	263	233	305	187	100	
207	38	456	543	476	453	453	151	
208	38	474	480	323	385	400	162	
209	38	507	403	297	282	281	153	
210	38	541	350	231	213	230	156	
211	38	575	300	198	185	187	116	
212	37	590	265	183	164	170	102	
213	38	592	246	166	150	156	98	
214	38	593	223	156	146	150	92	
215	38	587	196	145	133	137	86	
216	38	582	190	140	132	135	84	1,75 kg campuran ranting dan batok
217	38	510	201	227	159	215	85	
218	37	449	560	410	523	353	137	
219	38	432	604	453	480	454	174	
220	38	455	530	360	396	400	168	
221	38	536	383	280	256	254	145	
222	38	570	350	237	211	230	128	
223	38	596	302	202	191	191	117	
224	37	608	252	179	160	171	101	
225	38	608	240	167	147	157	95	
226	38	607	214	150	140	147	91	
227	38	607	198	143	131	142	86	
228	38	604	191	128	128	135	84	
229	36	543	324	360	428	330	87	1,25 kg campuran ranting dan batok
230	36	551	442	381	417	407	148	
231	36	577	426	312	310	414	152	
232	36	581	357	256	240	264	135	
233	36	577	298	201	191	205	118	

234	36	569	257	176	168	174	106	
235	36	562	233	166	154	162	96	
236	36	550	215	150	145	149	90	
237	36	542	202	143	139	142	87	
238	36	536	187	135	132	135	83	
239	36	531	181	132	129	132	81	
240	36	526	172	126	127	130	79	

