



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN CANGKANG  
KELAPA SAWIT MENGGUNAKAN FLUIDIZED BED  
COMBUSTER UNIVERSITAS INDONESIA**

**SKRIPSI**

**IRVANDI PERMANA ARGA DIPUTRA**

**0606073272**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

**DEPOK**

**DESEMBER 2010**

## **PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI**

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

### **STUDI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN CANGKANG KELAPA SAWIT MENGGUNAKAN FBC UI**

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

**Irvandi Permana Arga Diputra**

NPM : 0606073272

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Irvandi Permana Arga Diputra  
NPM : 06 06 07 32 72  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : STUDI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN CANGKANG KELAPA SAWIT MENGGUNAKAN FLUIDIZED BED COMBUSTOR UNIVERSITAS INDONESIA

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir Adi Surjosatyo ( )  
Penguji : Prof. Dr. Ir. I Made K Dhiputra Dipl.-Ing ( )  
Penguji : Prof. Dr. Ir. Yulianto Sulistyono, M.Sc., Ph.D ( )

Ditetapkan di : Depok  
Tanggal : 7 Januari 2011

## 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. 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;
2. Ayah, Ibu dan keluarga tercinta, yang telah memberikan pengertian, perhatian serta kasih sayangnya yang begitu besar kepada saya. Terima kasih juga sudah sangat memberikan dukungan kepada saya untuk menjalani semua. Semoga dengan bekal ilmu ini, saya bisa berguna untuk banyak orang umumnya dan keluarga khususnya.
3. Mas Syarif, Mas Yasin, Pak Wasis dan seluruh pegawai DTM yang tidak bisa disebutkan satu per satu. Terima kasih banyak untuk semua bantuannya sehingga saya bisa menyelesaikan skripsi ini dengan lancar.
4. Semua teman – teman seperjuangan sekaligus sahabat – sahabat saya, R. Arya Trisutrisno, Ilham Riadhi, Reynaldo B.T.Y, Anton Atmaja. Terima kasih sudah bisa berbagi semua pengalaman selama mengerjakan skripsi ini. Terima kasih sudah mau bersama – sama bepergian ke Salemba, Bogor, dll demi skripsi ini.
5. Rainy Nafitri Naland, yang benar – benar mendukung apa yang saya lakukan. Terima kasih mau menemani di segala kondisi, susah, senang, pusing. Terima kasih sudah mau menjadi tempat bercerita tentang segala – galanya. Terima Kasih sudah menjadi tempat

berbagi apapun. Terima kasih sudah menjadi orang yang sangat amat spesial dalam hidup saya.

6. Semua penghuni Kepodang, yang sudah menceriakan hidup saya. Saya akan sangat – sangat merindukan untuk berkumpul, mengobrol hingga larut malam dan melakukan banyak kegiatan menyenangkan bersama kalian semua.
7. Seluruh pihak yang tidak dapat saya ucapkan satu persatu. Saya ucapkan terima kasih banyak atas segala hal yang begitu berarti dalam setiap perjalanan hidup saya.

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

Depok, Desember 2010

Irvandi Permana Arga Diputra

## ABSTRAK

Nama : Irvandi Permana Arga Diputra  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul : Studi Karakteristik Pembakaran Cangkang Kelapa Sawit Menggunakan Fluidized Bed Combustor Universitas Indonesia

Pemanfaatan Biomassa khususnya cangkang kelapa sawit sebagai sumber energy alternative masih kurang dieksploitasi. Teknologi fluidized bed combustor merupakan teknologi yang tepat untuk mengubah atau mengkonversi energy biomassa menjadi energi panas. Perlunya studi tentang karakteristik pembakaran dari cangkang kelapa sawit diperlukan untuk mendapatkan suhu maksimal dari sistem ini. Parameter yang menjadi pertimbangan yaitu variasi berat feeding ke dalam ruang bakar dan feed rate bahan bakar. Hasil eksperimental menunjukkan bahwa pembakaran dengan menggunakan bahan bakar cangkang kelapa sawit mampu menghasilkan suhu maksimal 694<sup>o</sup>C. Hal ini menunjukkan bahwa cangkang kelapa memiliki potensi sebagai sumber bahan bakar alternative.

Kata kunci :

*Fluidized Bed Combustion*, Biomassa, Energi Alternatif, Cangkang Kelapa sawit

## ABSTRACT

Name : Irvandi Permana Arga Diputra  
Study Program : Mechanical Engineering  
Title : Characteristic Study of Palm Kernel Shell Combustion Using Universitas Indonesia's Fluidized Bed Combustor.

Biomass uses especially Palm Kernel Shell as an alternative energy still less. Fluidized Bed Combustor Technology is a perfect technology to convert biomass into heat energy. The Characteristic Study of Palm Kernel Shell Combustion is needed to get the maximum temperature from this system. The parameter that uses is the variation of feeding weight from palm kernel shell. The experiment shows that palm kernel shell can reach  $694^{\circ}\text{C}$ . this shows that palm kernel shell have a potential as an alternative fuel.

### Keywords

*Fluidized bed combustion*, Biomass, Alternative Energy, Palm kernel shell

# DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
ABSTRAK .....	vi
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL .....	xiv
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Judul Penelitian .....	1
1.2 Latar Belakang Masalah .....	1
1.3 Perumusan Masalah .....	4
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Batasan Masalah .....	5
1.6 Metodologi Penelitian .....	5
1.7 Sistematika Penulisan .....	6
<b>BAB 2 LANDASAN TEORI .....</b>	<b>9</b>
2.1 Energi Biomassa .....	9
2.1.1 Jenis-Jenis Biomassa .....	9
2.1.1.1 Solid Biomassa .....	9
2.1.1.2 Biogas .....	10
2.1.1.3 Liquid Biofuel.....	10
2.1.2 Teknologi Pengkonversian Energi Biomassa.....	10
2.1.2.1 Proses Thermal.....	11
2.1.2.2 Proses Biologis .....	12
2.1.3 Kelebihan dan Kekurangan Biomassa.....	15



2.2 Karakteristik Biomassa.....	15
2.3 Sistem Reaksi Pembakaran.....	18
2.3.1 Hal-Hal yang Harus Diperhatikan dalam Proses Pembakaran.....	20
2.3.2 Komponen-Komponen Utama Reaksi Pembakaran.....	21
2.4 Fluidized Bed Combustor.....	23
2.4.1 Jenis-Jenis <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	27
2.4.2 Pinsip Kerja <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	28
II.4.3 Bagian-Bagian <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	29
II.4.3.1 <i>Fluidization Vessel</i> .....	30
II.4.3.2 <i>Solid Feeder</i> .....	32
II.4.3.3 <i>Burner</i> .....	33
II.4.3.4 <i>Bed Material</i> .....	34
II.4.3.5 <i>Cyclone Separator</i> .....	36
II.4.3.6 <i>Blower</i> .....	37
II.4.3.7 <i>Instrumentasi</i> .....	38
II.5 Fenomena Fluidisasi.....	39
II.5.1 Proses Fluidisasi.....	39
II.5.2 Kondisi Fluidisasi.....	40
II.5.3 Jenis-Jenis Fluidisasi.....	42
II.5.3.1 Fluidisasi Partikulat ( <i>Particulate Fluidization</i> ).....	42
II.5.3.2 Fluidisasi Gelembung ( <i>Bubbling Fluidization</i> ).....	43
II.5.4 Parameter-Parameter Fluidisasi.....	43
II.5.4.1 Ukuran Partikel.....	44
II.5.4.2 Massa Jenis Padatan.....	44
II.5.4.3 <i>Sphericity</i> .....	44
II.5.4.4 <i>Bed voidage</i> .....	45
II.5.4.5 Kecepatan Fluidisasi Minimum.....	45
II.5.4.6 Penurunan Tekanan Melintas Hampan.....	46
II.5.4.7 Penurunan Tekanan Melintas <i>Distributor</i> .....	47
II.5.4.8 Klasifikasi Pasir.....	48

II.5.4.9 Daerah Batas Fluidisasi ( <i>fluidization regimes</i> ).....	52
<b>BAB 3 PERSIAPAN DAN PROSEDUR PENGUJIAN</b> .....	54
III.1 Persiapan Pengujian.....	54
3.1.1 Bahan Bakar Biomassa .....	54
3.1.1.1 Cangkang Kelapa.....	55
3.1.1.2 Ranting Pohon.....	57
3.1.1.3 Cangkang Kelapa Sawit.....	58
3.1.2 Pasir .....	59
3.1.3 Perlengkapan dan peralatan.....	62
III.2 Standar Operasi Pengujian.....	66
3.2.1 Sistem feeder.....	66
3.2.2 Blower.....	68
3.2.3 Sistem Burner.....	70
3.3 Prosedur pengujian pembakaran.....	74
3.3.1 Rangkaian alat pengujian.....	74
3.3.2 Prosedur pengambilan data pembakaran.....	75
3.3.2.1 Prosedur pemanasan awal pembakaran.....	76
3.3.2.2 Prosedur pengambilan data pembakaran.....	76
<b>BAB 4 HASIL DAN ANALISA</b> .....	78
4.1 Hasil .....	78
4.1.1 Hasil Pengujian untuk Bahan Bakar Cangkang Kelapa Sawit dengan pemanasan awal menggunakan cangkang kelapa.....	78
4.1.2 Hasil Pengujian untuk Bahan Bakar Cangkang Kelapa Sawit dengan Pemanasan Awal Menggunakan Ranting Pohon.....	86
4.1.3 Perhitungan Heat Balance.....	94
4.1.4 Karakteristik Blower.....	96
4.2 Analisa.....	98

4.2.1 Analisa Karakteristik Pembakaran Bahan Bakar dengan Pemanasan Awal Menggunakan Cangkang Kelapa dan Ranting .....	98
4.2.2 Analisa Karakteristik Blower.....	100
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>102</b>
5.1 Kesimpulan.....	102
5.2 Saran.....	102
<b>REFERENSI.....</b>	<b>104</b>



## DAFTAR GAMBAR

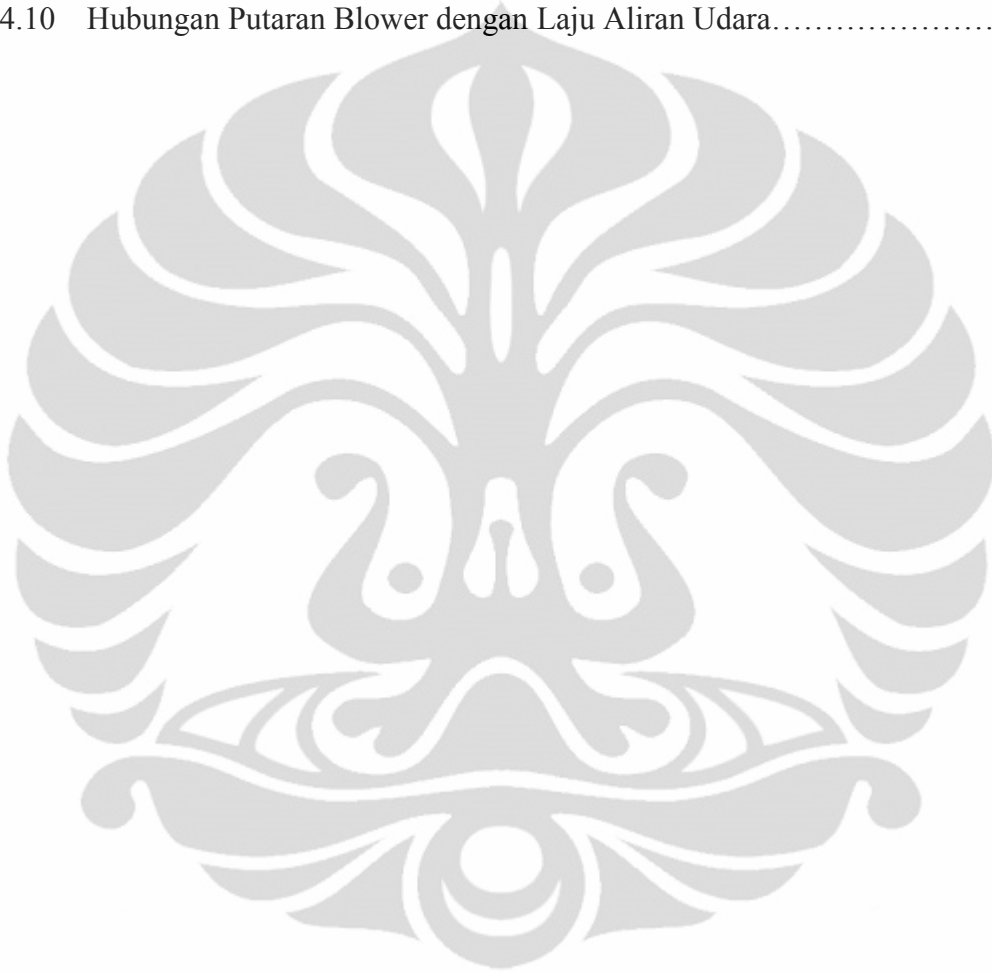
Gambar 1.1.	<i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	3
Gambar 1.2.	Flowchart Metodologi .....	8
Gambar 2.1.	Chart Teknologi Konversi Biomassa .....	10
Gambar 2.2.	<i>Proses Gasifikasi</i> .....	11
Gambar 2.3.	<i>Anaerobic Digester</i> .....	13
Gambar 2.4.	<i>Rangkaian Instalasi Biogas</i> .....	14
Gambar 2.5.	Analisa Proximat untuk Berbagai Jenis Bahan Bakar Padat.....	17
Gambar 2.6.	Definisi Analisa Proximat dan Ultimat.....	17
Gambar 2.7.	Skematis Fluidized Bed Combustor .....	25
Gambar 2.8.	Diagram Pencampuran dalam Fluidized Bed Combustor.....	26
Gambar 2.9.	Tahapan Proses Kerja fluidized Bed Combustor.....	29
Gambar 2.10.	Ruang Bakar Utama pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI .....	30
Gambar 2.11.	Perilaku Gelembung Pada Setiap Distributor .....	31
Gambar 2.12.	Jenis – jenis Solid Flow Control.....	32
Gambar 2.13.	<i>Screw feeder</i> .....	33
Gambar 2.14.	Burner pada Fluidized Bed Combustor UI .....	34
Gambar 2.15.	Cyclone separator Pada Fluidized Bed Combustor UI.....	37
Gambar 2.16.	Blower Ring Pada Fluidized Bed Combustor UI .....	38
Gambar 2.17.	Control Panel .....	38
Gambar 2.18.	Data Logger .....	39
Gambar 2.19.	Skematik Fluidisasi .....	40
Gambar 2.20.	Hubungan Tinggi Hampan dengan Kecepatan superficial Pada Hampan Zat Padat .....	41
Gambar 2.20.	Hubungan Penurunan Tekanan dengan Kecepatan superficial Pada Hampan Zat Padat .....	41
Gambar 2.21.	Diagram Klasifikasi Jenis – Jenis Pasir .....	49
Gambar 2.22.	Daerah Batas Fluidisasi .....	53
Gambar 3.1.	Skematik Siklus Biomassa.....	56
Gambar 3.2.	Tempurung Kelapa.....	56
Gambar 3.3.	Cangkang Kelapa Setelah di cacah.....	57
Gambar 3.4.	Ranting Pohon.....	58
Gambar 3.5.	Cangkang Kelapa Sawit .....	58
Gambar 3.6.	Pasir Silika.....	62
Gambar 3.7.	Generator Set yang digunakan.....	63
Gambar 3.8.	KONfigurasi Termokopel.....	64
Gambar 3.9.	Temperature data logger .....	65
Gambar 3.10.	Timbangan .....	65

Gambar 3.11. <i>Control Panel</i> yang Digunakan untuk Feeder dan Blower .....	66
Gambar 3.12. Sistem Feeder pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI .....	67
Gambar 3.13. Ring Blower pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI .....	69
Gambar 3.14. Bagian-bagian <i>Hi-temp Premixed Burner</i> .....	73
Gambar 3.15. Rangkaian Seluruh Alat untuk Melakukan Pengujian Pembakaran .....	75
Gambar 4.1. Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 0,5kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal cangkang Kelapa .....	79
Gambar 4.2. Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 0,75kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal cangkang Kelapa .....	80
Gambar 4.3. Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 1 kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal cangkang Kelapa.....	81
Gambar 4.4. Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal cangkang Kelapa .....	85
Gambar 4.5. Perbandingan Temperatur pada Termokopel Nomor 2 Reaktor FBC dengan Variasi Feeding Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal cangkang Kelapa .....	85
Gambar 4.6. Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 0,5kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal Ranting.....	86
Gambar 4.7. Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 0,75kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal Ranting.....	87
Gambar 4.8. Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 1 kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal Ranting.....	88
Gambar 4.9. Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 1,5kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal Ranting.....	89
Gambar 4.10. Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Berbagai Variasi Feeding Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal Ranting.....	92
Gambar 4.11. Perbandingan Temperatur pada Termokopel Nomor 2 Reaktor FBC dengan berbagai Variasi Feeding Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal Ranting .....	92

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	<i>Ultimate Anaysis</i> Beberapa Jenis Biomassa .....	12
Tabel 2.2.	<i>Proximate Analysis</i> Beberapa Jenis Biomassa .....	12
Tabel 2.3.	Jenis-Jenis Bahan Bakar .....	21
Tabel 2.4.	Increasing Size and Density .....	52
Tabel 3.1.	<i>Specific Heat</i> Berbagai Substansi .....	59
Tabel 3.2.	Sifat Fisik, Termal, dan Mekanik Pasir Silika .....	60
Tabel 3.3.	Distribusi Ukuran Pengayakan Pasir Silika .....	61
Tabel 3.4.	Spesifikasi motor feeder .....	67
Tabel 3.5.	Spesifikasi Teknis Ring Blower .....	69
Tabel 3.6.	Spesifikasi Teknis <i>Hi-Temp Premixed Burner</i> .....	73
Tabel 4.1	Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 0,5 kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal cangkang Kelapa.....	79
Tabel 4.2	Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 0,75 kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal cangkang Kelapa.....	80
Tabel 4.3	Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 1 kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal cangkang Kelapa.....	80
Tabel 4.4	Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal cangkang Kelapa.....	85
Tabel 4.5	Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 0,5kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal Ranting .....	86
Tabel 4.6	Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 0,75kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal Ranting.....	87
Tabel 4.7	Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 1 kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal Ranting.....	87

Tabel 4.8	Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 1,5kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal Ranting.....	88
Tabel 4.9	Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Berbagai Variasi Feeding Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal Ranting.....	91
Tabel 4.10	Hubungan Putaran Blower dengan Laju Aliran Udara.....	93



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### ***1.1 Judul Penelitian***

Studi Karakteristik Pembakaran Cangkang Kelapa Sawit Menggunakan Fluidized Bed Combustor UI.

### ***1.2 Latar Belakang masalah***

Permasalahan energi merupakan hal yang sangat sering didiskusikan akhir – akhir ini seiring dengan isu menipisnya bahan bakar fosil. Penggunaan bahan bakar fosil khususnya minyak dan gas bumi terus mendominasi dunia dengan persentase penggunaan sebesar  $\pm 40\%$  dan  $\pm 25\%$ , sedangkan penggunaan energi terbarukan saat ini baru mencapai  $\pm 8\%$ . Potensi akan meningkatnya penggunaan energi terbarukan yang sangat besar ini menjadi sebuah tantangan yang besar yang dapat bermanfaat untuk pemenuhan kebutuhan energi di masa kini. Penggunaan bahan bakar fosil dan minyak bumi yang terus meningkat dari waktu ke waktu menyebabkan cadangan minyak bumi yang selama ini menjadi sumber energi utama kian menipis. Oleh karena itu, industri harus tanggap dalam menghadapi permasalahan ini dengan cara meningkatkan efektifitas dan efisiensi penggunaan minyak bumi, serta dengan melakukan optimasi dalam penggunaan minyak bumi di berbagai sektor. Selain itu, yang harus dilakukan adalah terus mencari dan mengembangkan sumber energy alternatif guna mensubstitusi kebutuhan akan minyak bumi tersebut.

Batubara dan biomassa yang sebenarnya mempunyai persediaan melimpah bisa dijadikan salah satu solusi untuk mensubstitusi minyak dan gas bumi sebagai energy utama. Sayangnya selama ini penggunaan kedua bahan bakar tersebut langsung dibakar untuk menghasilkan energy sehingga kurang efisien. Selain itu hasil pembakaran langsung dari batubara dan biomassa tidak ramah lingkungan. Akan tetapi, pemilihan biomassa sebagai bahan bakar utama sangat dianjurkan karena biomassa merupakan salah satu bentuk energy terbarukan yang pemakaiannya masih kurang dieksploitasi.

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

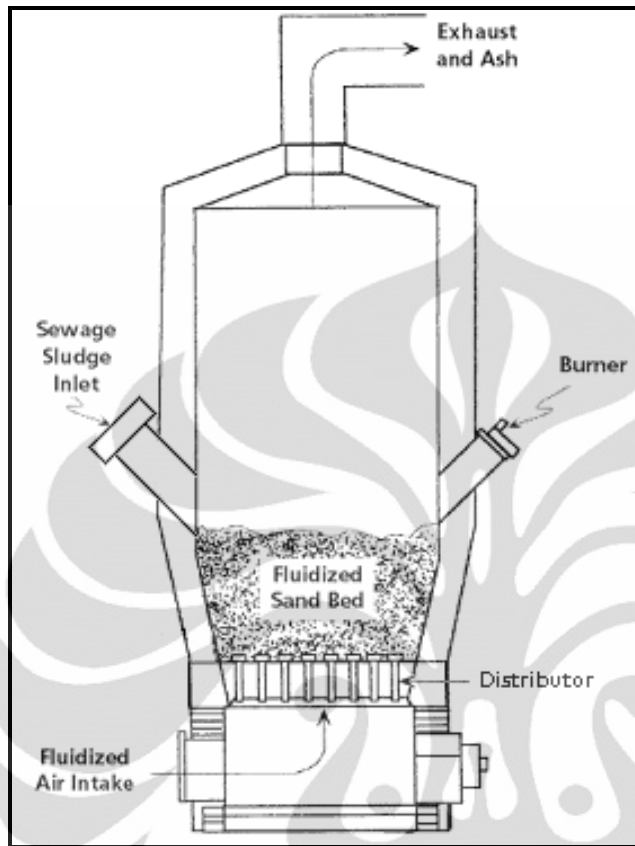
Hutan di Universitas Indonesia juga memiliki potensi penghasil biomassa yaitu berupa limbah kayu seperti ranting dan dedaunan. Sebagian besar tanaman yang ada di hutan UI adalah akasia dan meranti. Limbah tersebut apabila ditinggalkan saja akan menjadi tak



berguna. Oleh karena itu perlu dilakukan pengolahan agar dapat dimanfaatkan sebagai sumber energy. Pemanfaatan biomassa biasanya dilakukan dengan cara membakarnya sehingga menghasilkan kalor yang nantinya digunakan untuk memanaskan boiler. Uap yang dihasilkan dari pemanasan tersebut kemudian ditransfer ke dalam turbin. Putaran turbin tersebut akan menggerakkan generator sehingga menghasilkan listrik yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan. Oleh karena itu ada satu alternatif dari pengolahan batubara dan biomassa yang dapat meningkatkan efisiensi dan mengurangi gas berbahaya dari gas buang pembakaran yaitu dengan sistem *fluidized bed combustor*.

*Fluidized Bed Combustor (FBC)* membuat bahan bakar padatan tertiuap ke atas karena tiupan udara dari blower yang ada dibawahnya. Hal tersebut dilakukan selama proses pembakaran. Hasilnya adalah percampuran turbulen antara udara dan bahan bakar padatan. Hal tersebut membuat reaksi kimia dan transfer kalor yang lebih efektif.

FBC juga mengurangi jumlah dari sulfur yang terdapat pada emisi  $SO_x$ , sehingga emisi yang dihasilkan juga lebih ramah lingkungan. Selain itu FBC juga lebih fleksibel karena dapat menggunakan bahan bakar padatan apapun seperti batubara dan berbagai macam biomassa. Syarat yang harus dipenuhi hanyalah ukuran dari bahan bakar padatan yang masuk harus relative kecil agar tidak mengganggu proses percampuran antara udara dan bahan bakar.



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. 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.

### **1.3 Perumusan Masalah**

Konversi bahan bakar dari energy tidak terbarukan ke energy terbarukan harus dilakukan secepat mungkin. Karena 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.

Hutan Universitas Indonesia memiliki potensi yang besar sebagai penghasil biomassa. Limbah hutan seperti kayu, ranting, dan dedaunan berpotensi sebagai sumber energi. Selain itu, cangkang kelapa sawit yang sudah cukup lama dijadikan bahan bakar pengganti batubara juga harus lebih banyak dimanfaatkan lagi. Sehingga diperlukan suatu unit pengolahan yang handal untuk biomassa di atas agar dapat dimanfaatkan menjadi energi yang berguna.

*Fluidized Bed Combustor* di Universitas Indonesia merupakan unit pemanfaatan limbah yang masih dalam pengembangan. Masih banyak kekurangan yang perlu diperbaiki seperti pada sistem feeder. Oleh karena itu diperlukan satu suatu pengujian untuk mengetahui performa serta karakteristik pembakaran terhadap berbagai ukuran berat *feeding* bahan bakar. Pengujian dilakukan dengan bahan bakar biomassa seperti ranting, cangkang kelapa, dan cangkang kelapa sawit.

### **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 pembakaran biomassa dengan menggunakan *fluidized bed combustor* yang ada di Universitas Indonesia.
2. Mengetahui pengaruh jumlah masukan bahan bakar terhadap nilai kalor yang dihasilkan.

### **1.5 Batasan Masalah**

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

1. Penelitian yang dilakukan hanya mencakup eksperimental pembakaran yang tujuannya untuk mengetahui karakteristik pembakaran dengan bahan bakar biomassa. Sedangkan penghitungan nilai heat rate output dari proses pembakaran, perhitungan efisiensi alat serta emisi gas buang yang dihasilkan tidak akan dibahas secara mendalam dalam tulisan ini.
2. Bahan bakar biomassa yang digunakan adalah ranting pohon akasia, cangkang kelapa, dan cangkang kelapa sawit.

3. Dari pengujian ini hanya diambil beberapa variasi jumlah *feeding* bahan bakar mulai dari 0,25 kg, 0,5 kg, 0,75 kg, 1 kg sampai terus menerus hingga mencapai maksimal 2 kg.

### **1.6 Metodologi Penelitian**

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

1. Persiapan
  - 1.1. Identifikasi masalah yang akan dibahas
  - 1.2. Penelusuran literatur
  - 1.3. Pemilihan beberapa jenis bahan bakar yang akan digunakan serta menentukan ukurannya
2. Set Up Preparation
  - 2.1. Instalasi Laboratorium
  - 2.2. Penentuan dimensi bahan bakar
  - 2.3. Kalibrasi Instrumentasi
  - 2.4. Instalasi Instrumentasi laboratorium
3. Pengujian dan Pengambilan Data  
Pengukuran temperatur dengan variasi jumlah *feeding* bahan bakar tertentu.
4. Pengolahan Data dan Grafik
  - 4.1. Interpretasi grafik perbandingan berbagai macam bahan bakar dari hasil pengolahan data
  - 4.2. Interpretasi grafik dari satu jenis bahan bakar dengan variasi jumlah *feeding* bahan bakar yang berbeda.
5. Analisa dan Kesimpulan
  - 5.1. Menganalisa kestabilan dari proses pembakaran dengan pemasukan bahan bakar yang terkontrol
  - 5.2. Menganalisa korelasi dan pengaruh dari laju aliran massa bahan bakar dan temperatur yang dicapai
  - 5.3. Menarik kesimpulan dari keseluruhan proses penelitian yang dilakukan

### **1.7 Sistematika Penulisan**

Dalam penyusunan tugas akhir ini, penulis akan membagi dalam lima bab, dimana masing-masing bab terdiri dari beberapa sub bab. Hal tersebut dimaksudkan untuk

memudahkan dan mengarahkan pembahasan agar didapatkan informasi secara menyeluruh. Kerangka penulisan tersebut diuraikan sebagai berikut:

### **Bab I Pendahuluan**

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

### **Bab II Landasan Teori**

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

### **Bab III Persiapan dan Prosedur Pengujian**

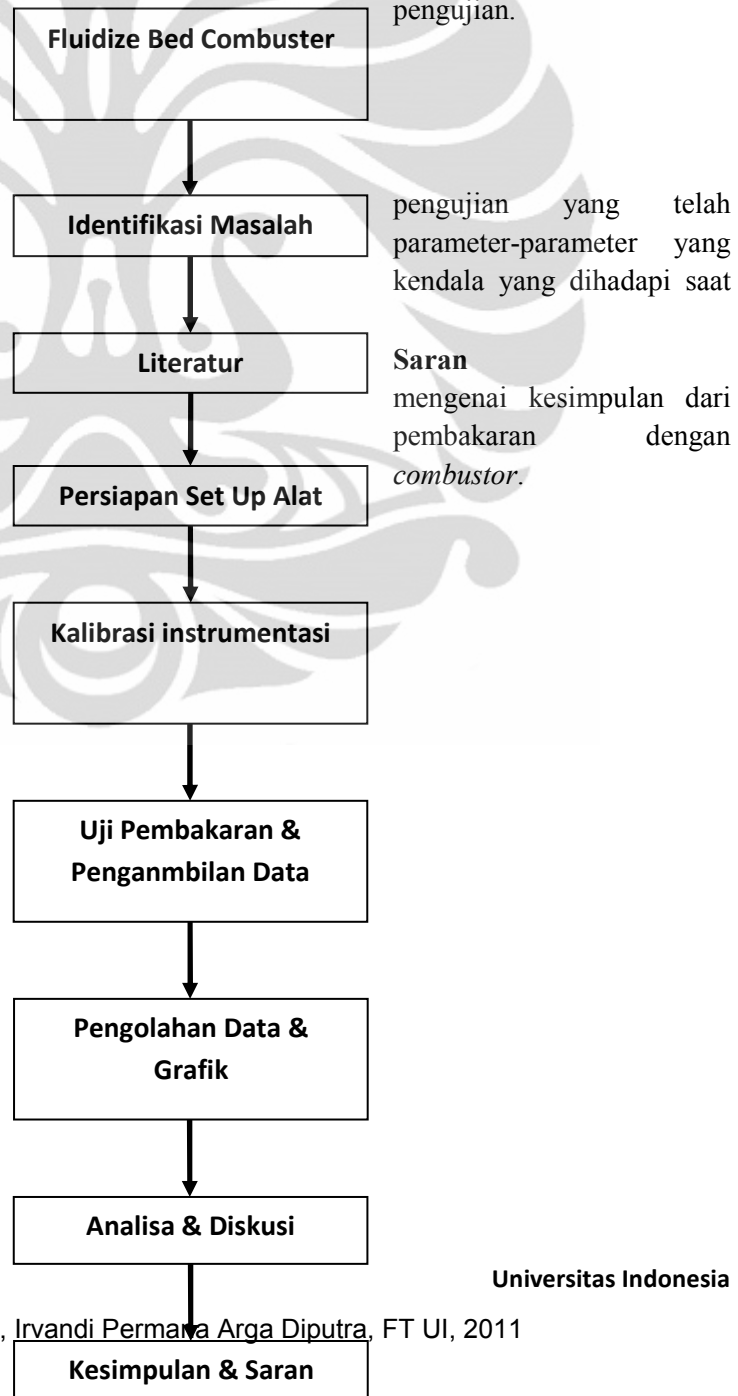
Bab ini membahas mengenai mekanisme eksperimental pembakaran biomassa dengan *fluidized bed combustor* yaitu meliputi persiapan yang dilakukan sebelum melakukan pengujian serta prosedur pengujian.

### **Bab IV Hasil dan Analisa**

Bab ini membahas hasil dilakukan dan analisisnya, berpengaruh serta kendala-pengujian alat.

### **Bab V Kesimpulan dan**

Bab ini membahas hasil eksperimental menggunakan *fluidized bed*





Gambar 1.2 Flow Chart Methodologi

## BAB 2

### LANDASAN TEORI

#### ***2.1 ENERGI Biomassa***

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

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

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

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

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

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

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

*a) Temperate Regions (wilayah beriklim sedang)*

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

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

Menghasilkan sedikit vegetasi untuk sumber energi.

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

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

###### **2.1.1.2 Biogas**

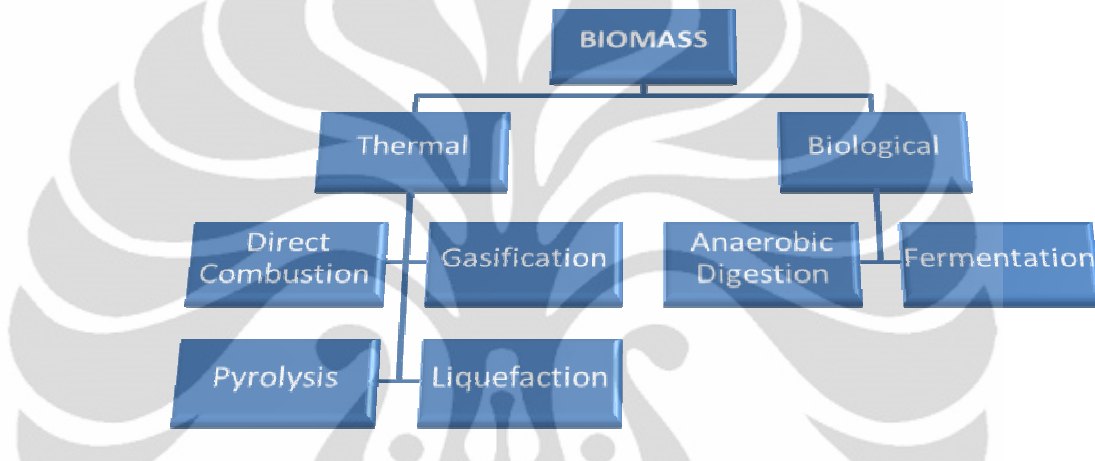
Biogas berasal dari material organik yang telah melewati proses fermentasi atau anaerob digesting oleh bakteri pada kondisi udara kekurangan oksigen yang kemudian menghasilkan gas yang dapat terbakar (combustible gas).

###### **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:

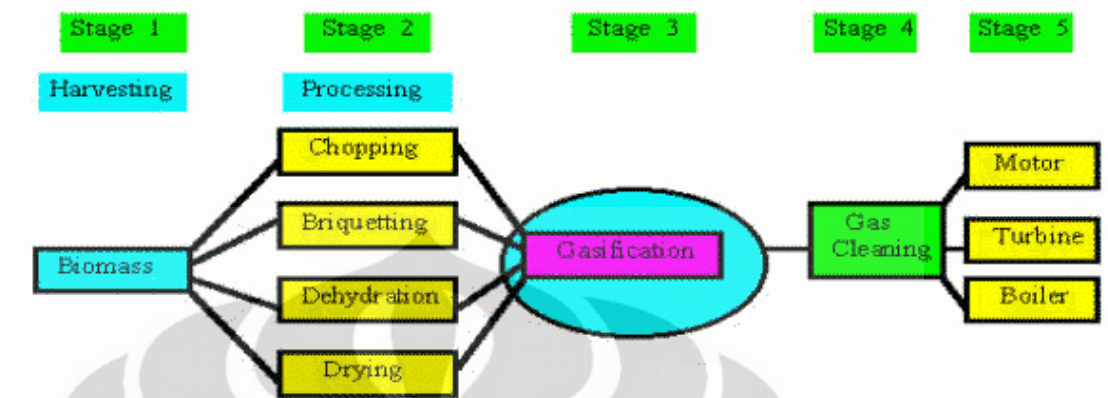
##### 1. *Direct Combustor*

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  $200^0$  C, air akan terpisah dan dibuang, pyrolysis sesungguhnya terjadi pada suhu antara  $280$  sampai  $500^0$  C, pyrolysis menghasilkan banyak karbon dioksida, tar, dan sedikit metil alkohol. Antara  $500$  sampai  $700^0$  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

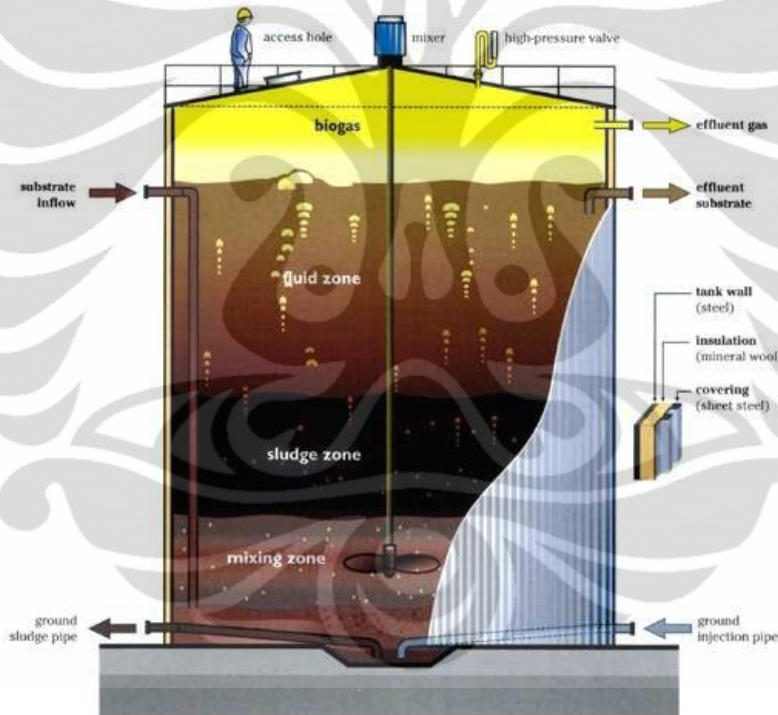
### 2.1.2.2 Proses Biologis

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 digestion*

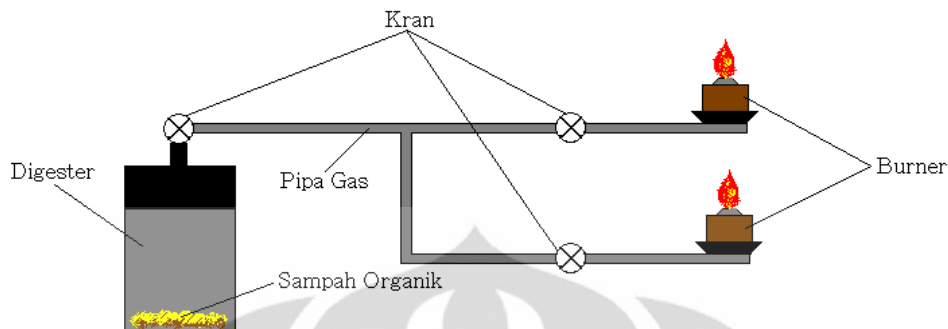
Proses ini adalah proses yang mengikutsertakan mikroorganisme untuk menguraikan material dengan kondisi tanpa oksigen. Proses ini dapat digunakan pada sampah organik dan juga kotoran hewan. Anaerobic digestion merupakan proses yang kompleks. Pertama-tama, mikro organisme mengubah material organik kedalam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



Gambar 2.3 Anaerobic Digester

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

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



Gambar 2.4 Rangkaian Instalasi Biogas

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

### 2. *Hydrolisis*

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

### 3. *Fermentasi*

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

### 4. *Acetogenesis*

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

### 5. *Methanogenesis*

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

### 6. *Fermentasi*

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

## 2.1.3 Kelebihan dan Kekurangan

Energi biomassa memiliki kelebihan dan kekurangan beberapa diantaranya yaitu:

Kelebihan energi biomassa :

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

Kekurangan energi biomassa :

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

## 2.2 KARAKTERISTIK BIOMASSA

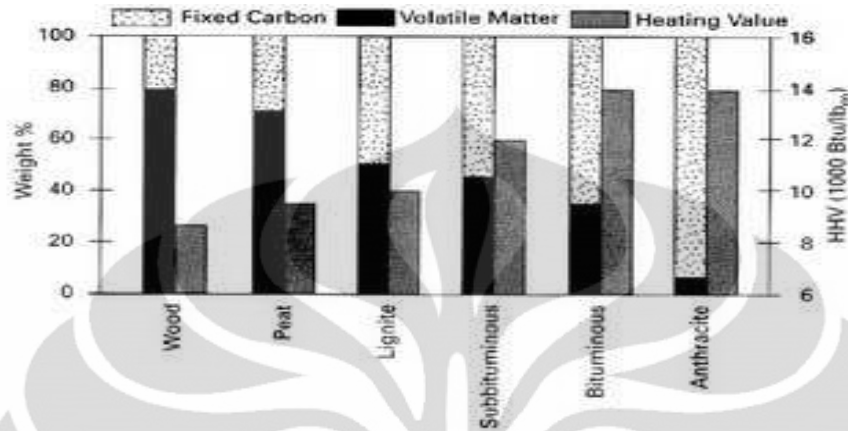
Potensi biomassa yang melimpah merupakan solusi energi masa depan karena dapat dikategorikan sebagai “*green and sustainable energi*” yaitu pemanfaatannya yang bersifat ramah lingkungan dan keberadaannya melimpah di dunia khususnya di Indonesia. Untuk pemanfaatan dengan cara *indirect combustor*, biomassa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

Nilai kalor rendah (LHV) biomass (15-20 MJ/kg) lebih rendah dibanding nilai kalor batubara (25-33 MJ/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 ½ 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.

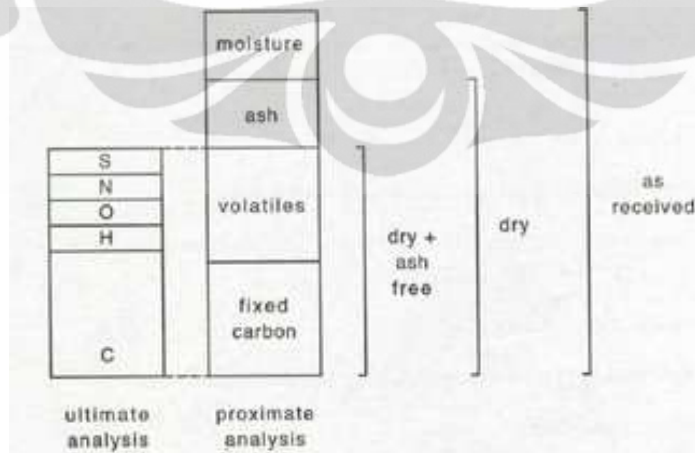
Biomassa mempunyai kadar *volatile* yang tinggi (sekitar 60-80%) dibanding kadar *volatile* pada batubara, maka biomas lebih reaktif dibanding batubara. Perbandingan bahan bakar (FR) dinyatakan sebagai perbandingan kadar karbon dengan kadar volatil. Untuk batubara, FR ~ 1 - 10. Untuk gambut, FR ~ 0.3. 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 biomassa berkisar dari 1% sampai 12% untuk kebanyakan jerami-jeramian dan bagas. Abu dari biomassa lebih ramah dibandingkan abu dari batubara karena banyak mengandung mineral seperti fosfat dan potassium. Pada saat pembakaran maupun gasifikasi, abu dari biomassa juga lebih aman dibandingkan abu dari batubara. Dengan temperatur operasi tidak lebih dari 950°C atau 1000°C, abu dari biomassa tidak menimbulkan terak. Abu biomassa mempunyai jumlah oksida keras (silica dan alumina) yang lebih rendah.



Gambar 2.6 Definisi Analisis Ultimat dan Proximat.

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



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

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

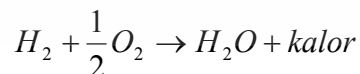
<i>Solid Waste</i>	<i>Moisture</i>	<i>Volatile</i>	<i>Fixed Carbon</i>	<i>Non Comb.</i>
Daun	9.97	66.92	19.29	3.82
Cangkang Kelapa	7,8	80,8	18,8	0,4
Ranting kayu	20	67.89	11.31	0.8
Kertas	10.24	75.94	8.44	5.38

Tabel 2.2 *Proximate Analysis* Beberapa Jenis Biomassa

(Sumber: Walter R. Niessen. 1994)

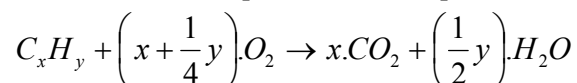
### 2.3 SISTEM REAKSI PEMBAKARAN

Pembakaran adalah sebuah reaksi antara oksigen dan bahan bakar yang menghasilkan panas. Oksigen diambil dari udara yang berkomporsi 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 :



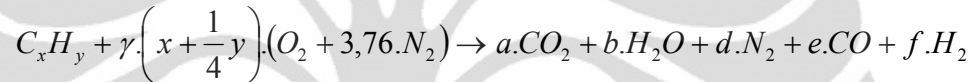
Nilai dari  $x$  dan  $y$  di atas bergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan. Nilai  $x$  adalah fraksi massa untuk kandungan *Carbon*, dan  $y$  fraksi massa untuk kandungan *Hidrogen* dalam bahan bakar.

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.



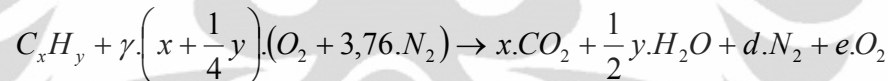
Namun, ada kalanya juga proses pembakaran tidak terjadi pada komposisi ideal antara bahan bakar dengan udara. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, proses yang tidak pada kondisi ideal ini bisa terbagi menjadi dua, yaitu pembakaran kaya dan pembakaran miskin.

- 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.

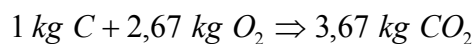
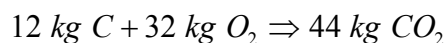
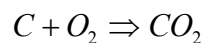
Padat	Cair	Gas
Kayu + Ranting	Solar	LNG
Ampas Tebu	Minyak Tanah	LPG
Cangkang + Sabut Kelapa	Bensin, dll.	dll.
Batu bara, dll.		

Tabel 2.3 Jenis-Jenis Bahan Bakar

### 2. Zat yang membakar

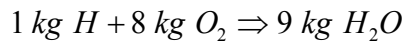
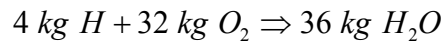
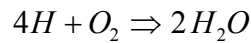
Jika komposisi bahan bakar diketahui, maka dapat dihitung pula jumlah kebutuhan udara yang proporsional dengan jumlah bahan bakar, agar dapat mencapai pembakaran yang sempurna.

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

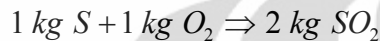
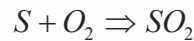


- Hidrogen terbakar sempurna akan membentuk  $H_2O$  menurut persamaan :

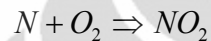




- Belerang terbakar akan membentuk  $SO_2$  menurut persamaan :



- Nitrogen terbakar membentuk  $NO_2$  menurut persamaan :



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

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

Kebutuhan udara dalam proses pembakaran dapat diklasifikasikan menjadi sebagai berikut :

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

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

Nilai *excess air* ini dapat ditulis sebagai berikut :

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

keterangan :  $m = excess\ air$

$A_o =$  jumlah udara teoritis

$A$  = jumlah udara aktual

### 3. Zat yang dihasilkan dari pembakaran

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

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

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

## 2.4 FLUIDIZED BED COMBUSTOR

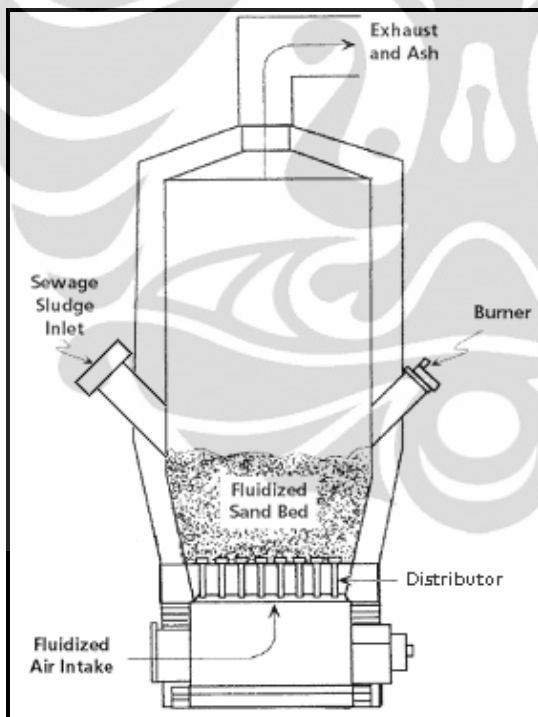
*Fluidized bed combustor* adalah sebuah tungku pembakar yang menggunakan media pengaduk berupa pasir seperti pasir kuarsa dan silika, tujuannya agar terjadi pencampuran (*mixing*) yang homogen antara udara dengan butiran-butiran pasir tersebut. *Mixing* yang konstan antara partikel-partikel mendorong terjadinya perpindahan panas yang cepat serta pembakaran sempurna. *Fluidized bed combustor* umumnya berbentuk silindris tegak dengan kerangka baja yang dilapisi bahan tahan api, berisi 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 unggul 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*.

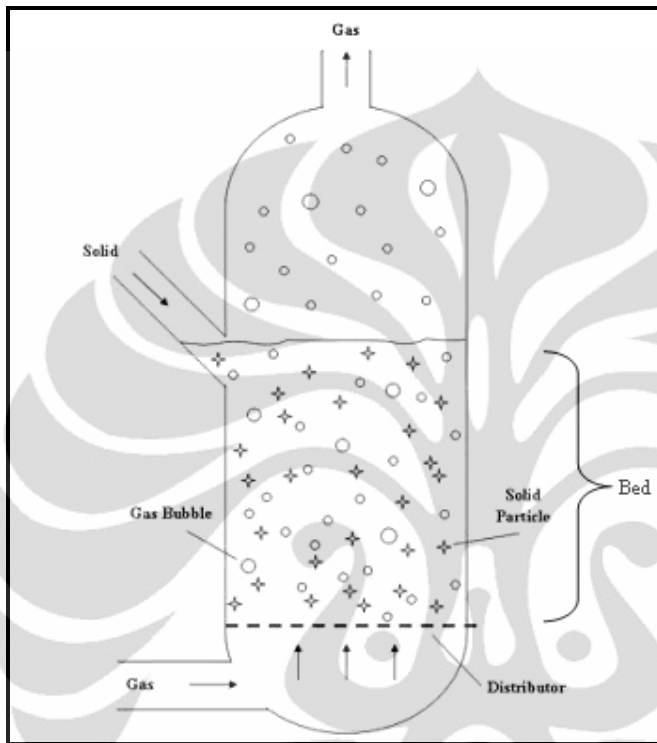
Pembakaran dengan teknologi *fluidized bed* merupakan satu rancangan alternatif untuk pembakaran limbah padat. Teknologi ini telah diaplikasikan untuk berbagai macam bahan bakar padat seperti biofuel, batu bara, serta limbah, baik itu limbah organik maupun anorganik. Bahan bakar padat yang sudah dalam 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 terbang pada umumnya 5 persen dari volume hamparan untuk setiap 300 jam operasi. Pengumpanan (*feed*) pada ruang bakar itu dimasukkan baik dari atas atau secara langsung ke dalam hamparan.



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

##### 1. Kondisi awal

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

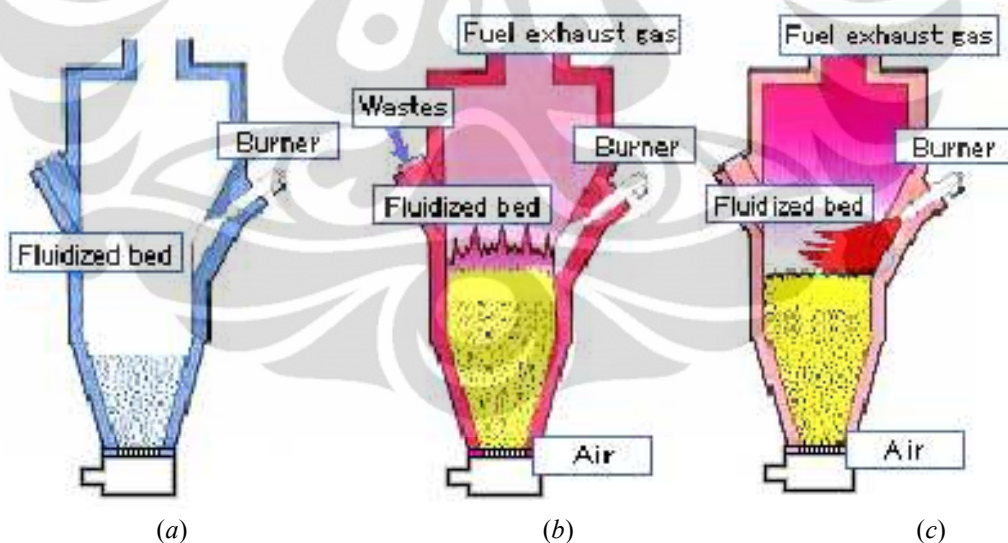
## 2. Proses pemanasan

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.

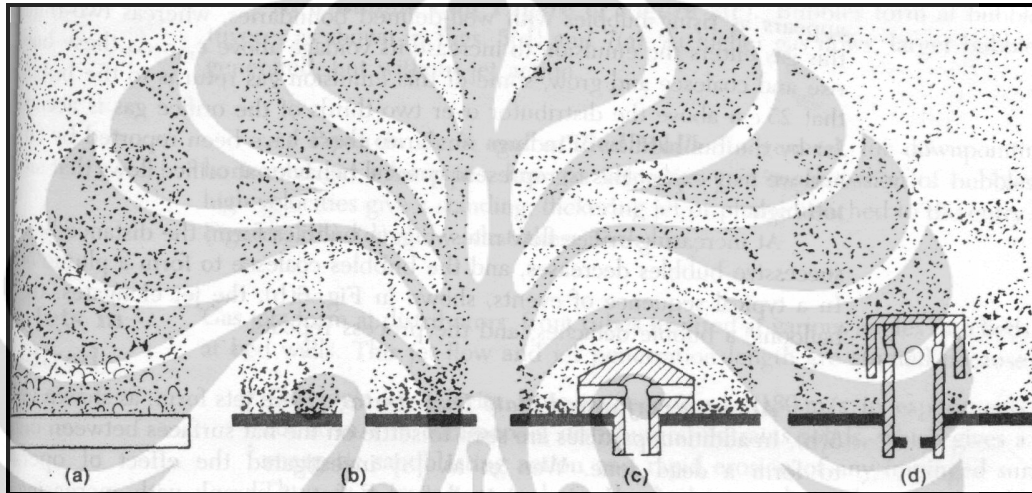


Gambar 2.10 Ruang Bakar Utama *Fluidized Bed Combustor* UI

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*.

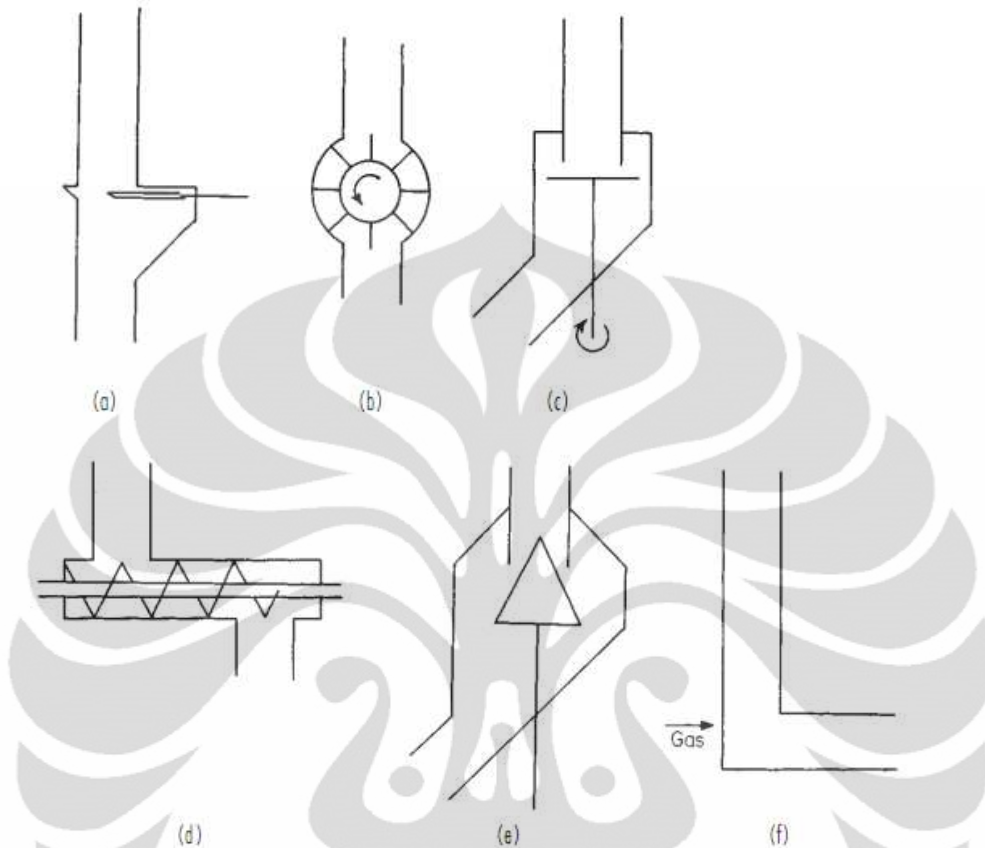
### 3. *Plenum*

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

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

- *Group A*

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

- *Group B*

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

- *Group C*

Kelompok ini memiliki ukuran rata-rata diameter partikel yang lebih kecil ( $<30 \mu m$ ) dengan densitas yang kecil. Partikelnya sangat halus seperti tepung. Fluidisasi sangat

sulit terjadi karena gaya interstitial antara partikel mempunyai efek yang lebih besar dibandingkan gaya gravitasi.

- *Group D*

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

Untuk tujuan fluidisasi yang baik, sebaiknya menggunakan pasir silika atau pasir kuarsa dengan ukuran diameter  $400 - 600 \mu\text{m}$ . Pasir jenis ini diklasifikasikan diantara grup B. Pasir kuarsa dan pasir silika tidak jauh berbeda kandungannya, keduanya sama-sama memiliki kandungan  $\text{SiO}_2$ . Kedua pasir tersebut berasal dari batuan yang sangat keras sehingga sangat cocok digunakan untuk penggunaan pada 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  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  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 Ring 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.

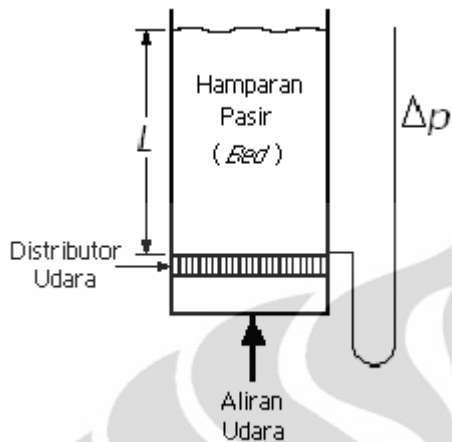


Gambar 2.19 Data Logger

## 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.



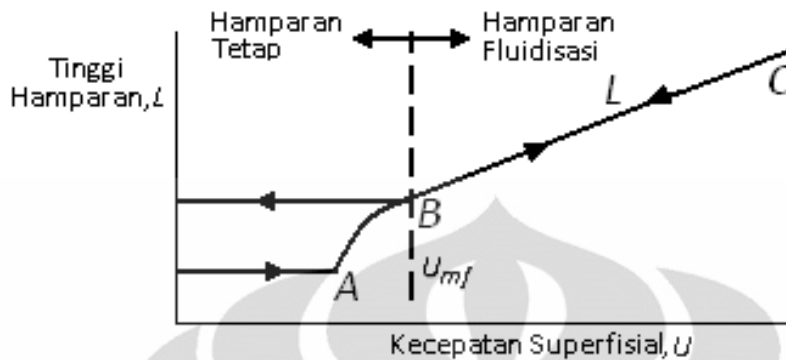
Gambar 2.20 Skematik Fluidisasi

### 2.5.2 Kondisi Fluidisasi

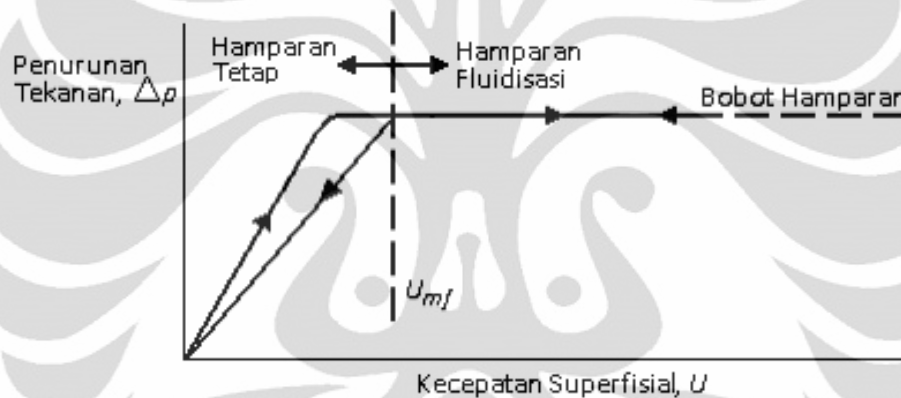
Perhatikan suatu tabung vertikal yang sebagian berisi dengan bahan butiran, sebagaimana terlihat dalam skema gambar. Tabung itu turbulen pada bagian atas, dan mempunyai plat berpori pada bagian bawah untuk menopang pasir di atasnya serta untuk menyebarkan aliran secara seragam pada keseluruhan penampang. 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 Hambaran Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hambaran Zat Padat



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

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

### 2.5.3 Jenis-Jenis Fluidisasi

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

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

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

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

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

Perilaku hamparan fluidisasi gelembung sangat bergantung pada banyaknya dan besarnya gelembung gas dan ini tidak mudah meramalkannya. Ukuran rata-rata gelembung itu bergantung pada jenis dan ukuran partikel, jenis plat distributor, kecepatan superfisial, dan tebalnya hamparan. Gelembung-gelembung cenderung bersatu, dan menjadi besar pada waktu naik melalui hamparan fluidisasi (*fluidized bed*) itu dan ukuran maksimum gelembung stabil berkisar antara beberap 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 hampan fluidisasi (*fluidized bed*) biasanya menggunakan massa jenis partikel ( $\rho_p$ ), yang merupakan berat dari suatu partikel dibagi volumenya dan menyertakan lubang atau pori-pori.

#### 2.5.4.3 Sphericity

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

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

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

#### 2.5.4.4 Bed voidage

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

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

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 superficial 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 *orrifice discharge coefficient*.

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

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

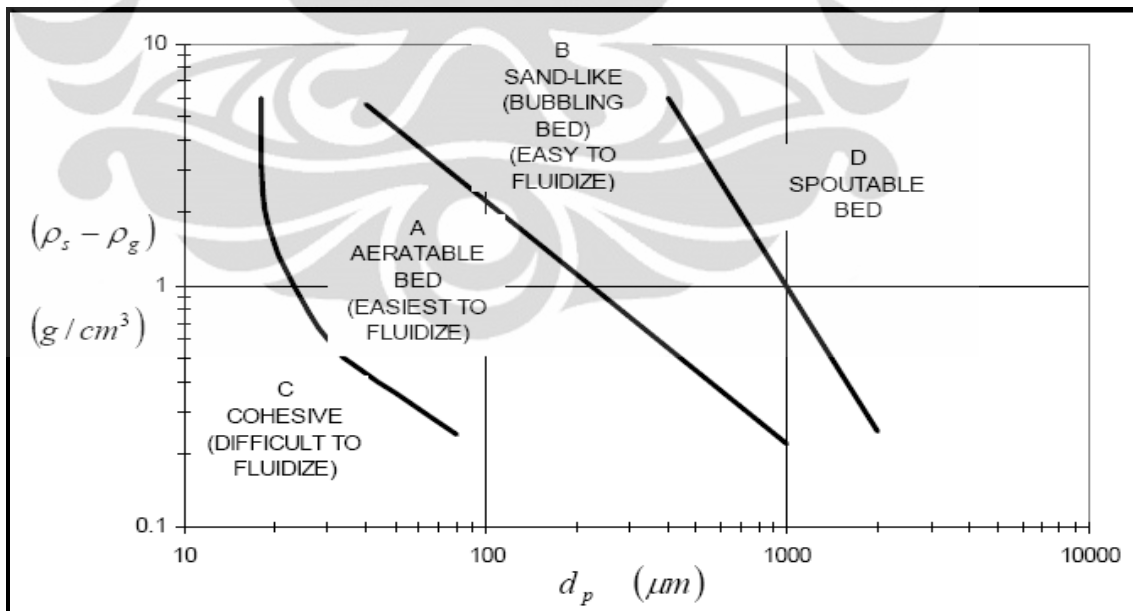
Keterangan :

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

#### 2.5.4.8 Klasifikasi pasir

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

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



Gambar 2.23 Diagram Klasifikasi Jenis-Jenis Pasir. [sumber: Geldart. 1991]

Klasifikasi jenis-jenis pasir menurut Geldart, yaitu :

a) *Group A*

Pasir yang dikategorikan dalam *group A* menurut Geldart biasanya memiliki massa jenis kurang dari  $1400 \text{ kg/m}^3$  dan memiliki ukuran berkisar antara 20 sampai  $100 \mu\text{m}$ . Para peneliti telah menunjukkan dengan meyakinkan bahwa terdapat gaya antar partikel bahkan pada pasir seperti *cracking catalyst* yang menunjukkan pada kelompok ini. 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 agregatif. 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  $500 \mu\text{m}$  dan massa jenis berkisar antara 1400 sampai  $4000 \text{ kg/m}^3$ . 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 agregatif) 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 ( $<30 \mu\text{m}$ ) dan atau massa jenis yang lebih kecil juga sehingga gaya-gaya antar partikel mempunyai pengaruh yang lebih besar daripada gaya gravitasi. Pasir jenis ini sangat sulit untuk terfluidisasi. Tidak mungkin terjadi pada pasir jenis ini yang mana besar penurunan tekanan sama dengan berat per unit luas. Hal ini menunjukkan bahwa peranan dari berat, bahkan jika hamparan menunjukkan sifat-sifat tampaknya seperti fluida, disokong oleh gaya antar partikel dan persinggungan permukaan partikel. Pada pasir jenis ini, *channelling* sangat mudah terjadi. Sekali hal ini terjadi, maka cenderung memperbesar jalurnya ketika meningkatkan kecepatan udara sehingga udara tidak terdistribusi dengan baik yang mana tidak pernah terjadi benar-benar fluidisasi.

d) *Group D*

Pasir *group D* biasanya memiliki ukuran lebih besar dari pada  $600 \mu\text{m}$  dan atau massa jenis yang besar. Walaupun suatu hampan 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 hampan 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 hampan (*bed*) dibagi dengan luas penampangnya. Kecepatan gas ini disebut kecepatan fluidisasi minimum,  $U_{mf}$ . Ketika batas ini tercapai, hampan partikel *group A* akan mengembang secara seragam sampai pada kecepatan gas yang lebih tinggi lagi akan terbentuk gelembung-gelembung (*bubbles*); kecepatan ini disebut kecepatan minimum gelembung,  $U_{mb}$ . Untuk partikel *group B* dan *group D* besar  $U_{mf}$  dan  $U_{mb}$  pada dasarnya sama. Partikel *group C* cenderung lebih kohesif dan ketika kecepatan gas dinaikkan lagi maka akan terbentuk semacam saluran atau rongga pada hampan (*channelling*) dari distributor sampai permukaan hampan. Jika *channelling* tidak terbentuk, maka seluruh hampan akan terangkat seperti piston. Semua kelompok partikel pasir ini (*group A*, *B*, *C*, dan *D*) ketika kecepatan gas dinaikkan lagi, densitas hampan akan berkurang dan 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 hampan (*bed*) berdiameter yang lebih kecil dengan pasir *group A* daripada *group B*. Karena gelembung yang lebih besar naik lebih cepat daripada gelembung yang lebih kecil, maka udara yang digunakan untuk proses penggelembungan akan lepas dari hampan dengan lebih cepat saat ukuran gelembung rata-rata lebih besar, sehingga terdapat banyak variasi dalam pengembangan hampan 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	
	Mean particle size within group	Cohesiveness increases as $\phi_p$ decreases	Properties improve as size decreases	Properties improve as size decreases	Not known
Effect on properties 1 to 7 of:	Particle size distribution <sup>b</sup>	Not known	Increasing <45 $\mu\text{m}$ fraction improves properties	None	Increases segregation
	Increasing pressure, temperature, viscosity, density of gas	Probably improves	Definitely improves	Uncertain, some possibly	Uncertain, some possibly

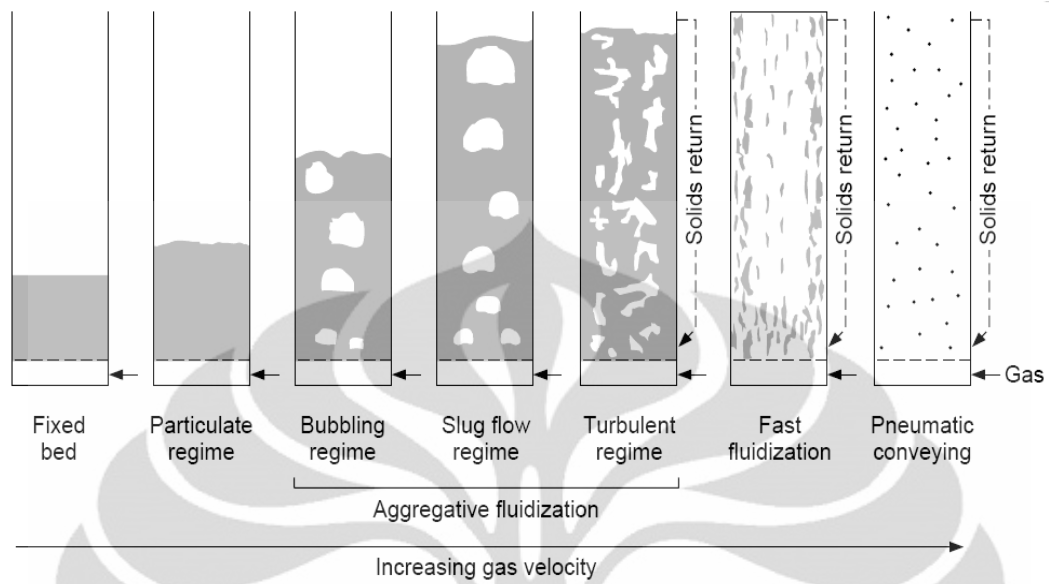
<sup>a</sup> At equal  $U-U_{mf}$ .

<sup>b</sup> At equal  $\phi_p$ .

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 hampan fluidisasi akan berada dalam keadaan konstan atau tetap. Seiring dengan bertambahnya kecepatan gas, gaya seret mengimbangi berat hampannya sehingga hampan secara menyeluruh ditopang oleh aliran gas tersebut. Pada fluidisasi minimum, hampan memperlihatkan pergerakan yang minimal dan hampan tersebut akan sedikit mengembang. Begitu seterusnya hampan akan mengembang saat kecepatan aliran gas dinaikkan pula dan mengalami daerah batas fluidisasi dari *fixed bed* sampai *pneumatic conveying*. Untuk daerah batas fluidisasi 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 hampan. Cara setiap daerah batas fluidisasi tampil berbeda-beda menurut kecepatan aliran gas (gambar 3.5).



Gambar 2.24 Daerah batas fluidisasi [sumber: Grace, 1986]

## **BAB 3**

### **PERSIAPAN DAN PROSEDUR PENGUJIAN**

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

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

#### **3.1 PERSIAPAN PENGUJIAN**

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

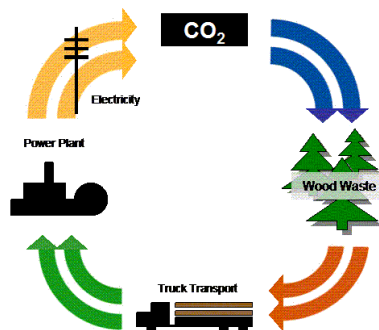
Di Indonesia sekarang ini mempunyai potensi yang cukup luas pada sumber energi biomassa nya, antara lain seperti kayu, dedaunan, pepohonan, biji-bijian, sekam padi, cangkang kelapa, kapas, ranting, dan termasuk juga cangkang kelapa sawit. Untuk pengujian saat ini, jenis bahan bakar biomassa yang digunakan ialah 3 jenis, yaitu cangkang kelapa, ranting pohon, dan cangkang kelapa sawit. Alasan menggunakan kedua jenis ini ialah karena selain mudah didapat dan banyak sumbernya, tetapi juga lokasi untuk mengumpulkannya lebih banyak dan lebih dekat di kawasan UI, seperti di daerah hutan dekat lab FBC. Khusus untuk cangkang kelapa sawit, biomassa ini sudah menjadi pilihan utama sebagai pengganti batubara untuk bahan bakar dan pemanfaatan kelapa sawit yang luas membuat limbah cangkang kelapa sawit juga masih terhitung mudah untuk didapatkan.

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

### 3.1.1.1 Cangkang Kelapa

Energi biomassa adalah energi yang didapatkan dari sinar matahari yang kemudian ditangkap oleh materi organik seperti tumbuhan ataupun hewan. Sumber dari biomassa terdiri dari :[13]

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 2.1 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 2.2**

Tempurung Kelapa

(sumber : <http://pramukasmansaka.files.wordpress.com/2009/08/tempurung-kelapa.jpg>)

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

Untuk percobaan kali ini, cangkang kelapa harus dicacah terlebih dahulu agar tidak menghambat proses fluidisasi di dalam reactor FBC. Untuk mendapatkan ukuran yang tepat, cangkang kelapa hanya perlu dihancurkan dengan menggunakan palu. Sebelumnya cangkang kelapa harus dibersihkan dari sabutnya terlebih dahulu.



#### 3.1.1.2 Ranting Pohon

Ranting pohon yang digunakan disini ialah jenis ranting pohon akasia (*acacia auriculiformis*). Jenis ranting pohon ini cukup banyak terdapat di kawasan hutan Universitas Indonesia terutama di area hutan dekat lab FBC itu sendiri. Ranting yang akan digunakan



juga harus melalui proses pencacahan terlebih dahulu. Tujuannya sama dengan cangkang kelapa, yaitu agar tidak menghambat proses fluidisasi di dalam reactor FBC.

Untuk mendapatkan ukuran partikel ranting pohon tersebut juga dilakukan beberapa tahap persiapan, yaitu pengumpulan dari kawasan hutan UI dan juga pemotongan menjadi panjang yang diinginkan, karena ranting awal yang didapat masih sangat panjang untuk digunakan dalam percobaan. Pemotongan ranting menggunakan golok untuk ranting dengan diameter yang relative kecil dan menggunakan *jig saw* untuk ranting dengan diameter yang relative tebal.



Gambar 3.4 Ranting pohon sebelum dilakukan pemotongan

### 3.1.1.3 Cangkang Kelapa Sawit

Kelapa sawit seperti halnya kelapa merupakan tanaman yang hampir semua bagiannya dapat dimanfaatkan. Pada kelapa sawit, biasanya dimanfaatkan untuk bahan baku minyak goreng, margarine dan sebagainya. Cangkang kelapa sawit merupakan limbah dari usaha – usaha tersebut di atas. Akan tetapi tidak berarti cangkang kelapa sawit tidak dapat dimanfaatkan. Cangkang kelapa sawit saat ini merupakan alternative utama sebagai bahan bakar pengganti batubara karena memiliki tingkat kalor yang cukup tinggi, yaitu sekitar 3800 kkal/kg.

Untuk cangkang kelapa sawit tidak lagi perlu dicacah karena bentuknya sudah relative kecil. Untuk pengujian pembakaran ketiga jenis bahan bakar tersebut, telah dipersiapkan sejumlah massa yang akan dijadikan sebagai variasi dari *feed rate* bahan bakar yang akan dimasukkan ke dalam reaktor, yaitu : 0,25 kg, 0,5 kg, 0,75 kg, 1 kg, 1,25 kg hingga maksimal 2 kg. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui berapa *feeding* yang efektif.



### 3.1.2 Pasir

Pasir yang digunakan akan sangat berpengaruh terhadap berhasil tidaknya proses fluidisasi dan pembakaran yang akan dilakukan. Dalam menentukan jenis pasir yang akan digunakan pada alat FBC UI ini sebaiknya menggunakan pasir silika atau pasir kuarsa untuk tujuan mendapatkan fluidisasi yang baik dengan densitas partikelnya sebesar  $2600 \text{ kg/m}^3$ . 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. Komposisi pasir silika dalam keadaan kering antara lain adalah :

- $\text{SiO}_2$  : 88,62 %
- $\text{Al}_2\text{O}_3$  : 4,5 %
- $\text{Fe}_2\text{O}_3$  : 2 %
- $\text{CaCO}_3$  : 1,9 %
- $\text{MgCO}_3$  : 1,27 %
- $\text{H}_2\text{O}$  : 5,80 %

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

Tabel 3.1 *Specific Heat* berbagai substansi

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

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

Tabel 3.2 Sifat fisik, termal, dan mekanik pasir silika

<b>Properties</b>	<b>Silica Sand</b>
<i>Particle density ( kg/m<sup>3</sup> )</i>	2600
<i>Bulk density ( kg/m<sup>3</sup> )</i>	1300
<i>Thermal conductivity ( Wm<sup>-1</sup>K )</i>	1.3
<i>Tensile strength ( MPa )</i>	55
<i>Compressive strength ( MPa )</i>	2070
<i>Melting point ( °C )</i>	1830
<i>Modulus of elasticity ( GPa )</i>	70
<i>Thermal shock resistance</i>	<i>Excellent</i>

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

Kemudian setelah memilih jenis pasir yang digunakan, maka ditentukan ukuran diameter partikel pasir yang digunakan pada FBC UI. Jenis pasir yang digunakan sudah pasti antara pasir silika dan pasir kuarsa. Menurut pengklasifikasian partikel pasir oleh *Geldart* seperti yang telah dijelaskan pada bab dua, maka jenis partikel pasir tersebut terkelompok dalam *group B* dan *group D*. Namun partikel pasir dalam *group D* membutuhkan kecepatan fluidisasi yang besar sehingga sangat sulit untuk pencampuran yang baik dibandingkan *group A* dan *group B*. Dengan demikian partikel pasir yang paling baik digunakan untuk aplikasi *fluidized bed combustor* ini adalah partikel pasir *group B* dengan ukuran diameter partikel pasir yang paling baik untuk tujuan fluidisasi berkisar antara 300  $\mu\text{m}$  sampai 500  $\mu\text{m}$ .

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

<b>Sieve Size</b>		<b>Individual Percent Retained</b>				
<b>US</b>	<b><math>\mu\text{m}</math></b>	<b>16-30</b>	<b>20-40</b>	<b>30-50</b>	<b>40-70</b>	<b>50-80</b>
16	1180	1.4				
20	850	35.7	2.3			
25	725	58	19.7	2.3		
30	600	4.7	28	10.4	0.3	
35	500	0.2	30.3	17.1	5.2	
40	425		15.8	31.9	16.5	2.7
50	300		3.6	29.2	37	39.3



60	250		0.3	4.7	14.2	23.8
70	212			2.3	9.3	16.2
80	180			2.1	5.5	9.1
100	150				7.2	5.4
120	125				4.8	3.5

Tabel 3.3 Distribusi ukuran pengayakan pasir silika

Sumber: AGSCO silica sand technical data sheet

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



Gambar 3.5 Pasir silika mesh 30-50 yang digunakan pada FBC UI

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

- massa jenis partikel pasir ( $\rho_p$ ) =  $2600 \text{ kg/m}^3$
- massa jenis borongan pasir ( $\rho_b$ ) =  $1300 \text{ kg/m}^3$
- diameter hamparan pasir ( $d_b$ ) =  $63,5 \text{ cm} = 0,635 \text{ m}$
- tinggi hamparan pasir (*bed height*) =  $\pm 10 \text{ cm} = \pm 0,1 \text{ m}$

### 3.1.3 Perlengkapan dan Peralatan

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

## 1. Generator Set

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



Gambar 3.6 Generator set yang digunakan

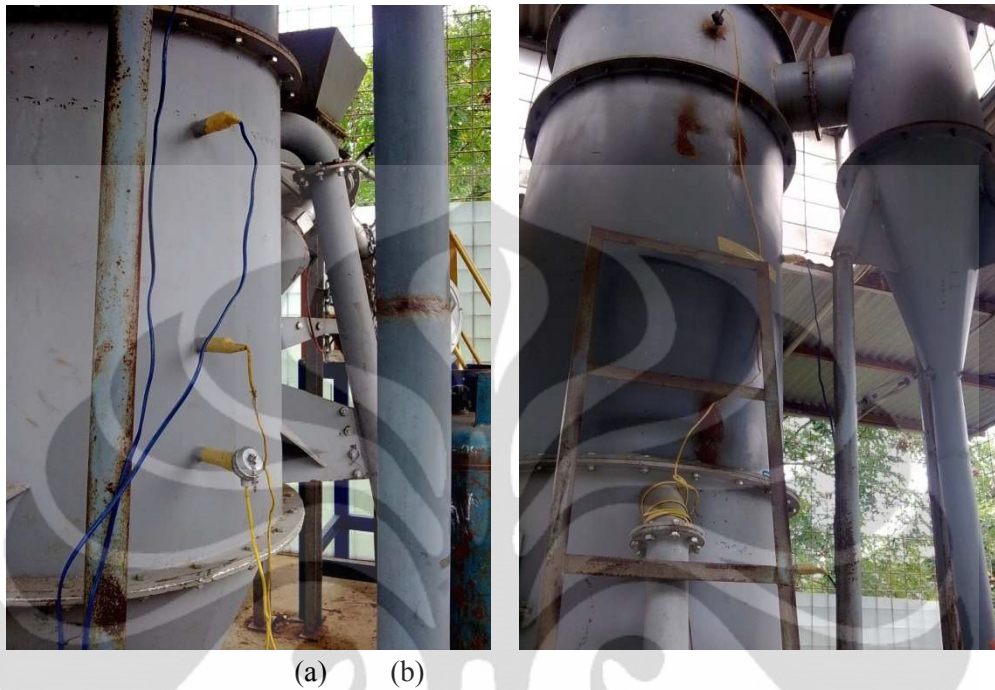
Berikut ini spesifikasi dari genset dengan merk Starke GFH 6900 LXE tersebut : -

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

## 2. Termokopel

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

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



Gambar 3.7 Konfigurasi termokopel (a). T1 - T3, dan (b). T4 – T5

### 3. *Temperature Data Logger*

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



Gambar 3.8 *Temperature data logger*

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

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



Gambar 3.10 Timbangan dengan skala maksimum 2 kg

#### 5. *Control Panel*

Panel kontrol ini berfungsi sebagai pengontrol dan pengatur dari putaran motor feeder dan putaran blower yang akan dioperasikan. Pada panel kontrol ini terdapat dua



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



Gambar 3.11 *Control panel* yang digunakan untuk feeder dan blower

## 3.2 STANDAR OPERASI ALAT PENGUJIAN

### 3.2.1 Sistem Feeder

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



Gambar 3.13 Sistem feeder pada *fluidized bed combustor* UI

Berikut ini beberapa spesifikasi pada sistem feeder tersebut :

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

Tabel 3.4 Spesifikasi motor feeder

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

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

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

1. Pastikan bahwa kabel motor feeder sudah terhubung dengan tepat ke panel kontrol untuk feeder, sambungkan setiap kabel sesuai dengan warnanya.
2. Sambungkan konektor dari panel kontrol ke generator set untuk mendapatkan sumber tegangan, kemudian nyalakan genset.
3. Lalu aktifkan switch utama dan circuit breaker nya dengan menekan ke arah atas, lampu di pintu panel akan menyala.

4. Tekan *switch* berwarna hitam sebelah kiri ke arah bawah agar *inverter* motor feeder menyala.
5. Putar pengendali putaran motor feeder sesuai yang diinginkan (rpm maksimum 50 rpm).
6. Jika sudah selesai dan ingin mematikan feeder, maka putar kembali pengendalinya ke nol lagi, dan matikan semua *switch* pada panel kontrol.

### 3.2.2 Blower

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



Gambar 3.14 Ring blower pada *fluidized bed combustor* UI

Spesifikasi dari blower yang ada dapat dilihat berikut ini :

Tabel 3.5. Spesifikasi teknis ring blower

<i>Phase</i>	3 Ø
<i>Frequency ( Hz )</i>	50 / 60

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

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

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

### 3.2.3 Sistem Burner

Burner yang dipakai di fluidized bed combustor UI saat ini ialah jenis *hi-temp premixed burner* yang berfungsi sebagai alat pemberi kalor atau pemanas untuk menaikkan temperatur pasir saat melakukan *start up* awal pengujian pembakaran. Akan tetapi, setelah mencapai suhu yang cukup tinggi di ruang bakar, maka burner dapat dimatikan. Untuk dapat



melakukan pengoperasian burner ini dengan baik maka perlu diketahui urutan langkah-langkah yang dilakukan dalam penyalaan dan mematikan *hi-temp premixed burner* ini. Prosedur mengoperasikan burner ini adalah sebagai berikut :

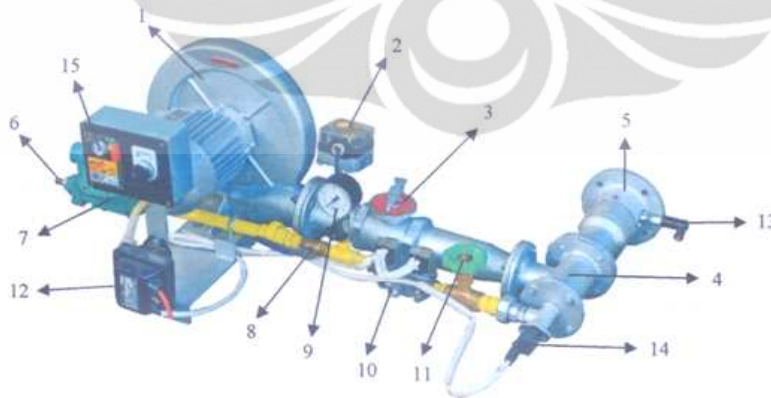
1. Buka *ball valve* utama gas masuk.
2. Cek tekanan kerja gas adalah 20~30 mbar (200 ~ 300 mm H<sub>2</sub>O).
3. Putar saklar *burner control* ke posisi on untuk mengaktifkan *burner control* untuk bekerja. Pada tahap awal *burner control* melakukan pengecekan status awal apakah ada tekanan udara palsu 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 3.15 Bagian-bagian *hi-temp premixed burner*

- Keterangan :
- |                        |                                |
|------------------------|--------------------------------|
| 1. Blower              | 9. Gas pressure gauge          |
| 2. Air pressure switch | 10. Combination solenoid valve |

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

Tabel 3.5 Spesifikasi teknis *Hi-Temp Premixed Burner*

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

### 3.3 PROSEDUR PENGUJIAN PEMBAKARAN

Pengujian pembakaran dengan bahan bakar biomassa (cangkang kelapa, ranting pohon, dan cangkang kelapa sawit) 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, serta lamanya waktu yang dibutuhkan untuk melakukan sebuah pengujian ini sampai selesai. Pengujian ini keseluruhan meliputi pengujian *feed rate* dan pengujian pembakaran biomassa. Pengujian pembakaran ini membutuhkan metode yang optimal untuk mendapatkan hasil yang baik.

#### 3.3.1 Rangkaian Alat Pengujian

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

- Panel kontrol dihubungkan ke generator set untuk mendapatkan sumber tegangan yang cukup.
- Sistem feeder terhubung ke panel kontrol agar dapat diatur putarannya.

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



Gambar 3.16 Rangkaian seluruh alat untuk melakukan pengujian pembakaran

### 3.3.2 Prosedur Pengambilan Data Pembakaran

Dalam melakukan pengujian pembakaran dan pengambilan data untuk *fluidized bed combustor* UI ini harus dilakukan dengan metode yang optimal, sehingga hasil atau data-data yang didapat menjadi lebih akurat dan benar. Keseluruhan langkah-langkah yang dilakukan

dari awal setelah persiapan dan sebelum pengambilan data sampai setelah pengambilan data akan dijelaskan berikut ini.

#### *3.3.2.1 Prosedur pemanasan awal pembakaran*

1. Pastikan semua persiapan, rangkaian dan posisi alat sudah dilakukan dengan benar sesuai dengan yang sudah disebutkan sebelumnya.
2. Menyalakan blower sebagai penyedia udara saat menyalakan burner dan saat proses pembakaran berlangsung, selain itu juga untuk proses fluidisasi pasir agar panasnya tersebar merata di seluruh pasir. Digunakan flow rate udara 3400 rpm.
3. Menyalakan burner untuk memanaskan bed (pasir) hingga bed temperature mencapai suhu sekitar  $\pm 110$  °C.
4. Setelah itu memasukkan solid fuel yang dapat berupa cangkang kelapa ataupun ranting pohon untuk pemanasan awal ke dalam ruang bakar dengan feed rate bervariasi antara 0,25 kg sampai 1 kg sampai bed temperature mencapai suhu sekitar  $\pm 600$  °C.
5. Kemudian burner dimatikan secara perlahan dan temperatur bed akan perlahan menurun dan ditunggu hingga suhunya stabil (kondisi steady). Pada temperatur ini bahan bakar sudah dapat terbakar dengan sendirinya (self-sustained combustion). Rata-rata waktu yang dibutuhkan sekitar 7 – 8 menit dan temperature juga dicatat setiap menitnya.

#### *3.3.2.2 Prosedur pengambilan data pembakaran*

1. Setelah mencapai temperatur stabil tersebut, bahan bakar yang sudah disiapkan dengan sejumlah massa tertentu (0,25 kg, 0,5 kg, 0,75 kg, 1 kg hingga maksimal 2 kg) dimasukkan ke dalam feeder melalui hopper dan feeder dijalankan dengan putaran yang tidak terlalu rendah dan tidak terlalu tinggi.
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 didapatkan massa yang optimal.
3. Setelah semua bahan bakar tersebut dimasukkan, perubahan temperaturnya terus dicatat setiap menitnya sampai pada akhirnya suhu di ruang bakar turun terus-menerus secara perlahan karena sudah tidak dimasukkan bahan bakar lagi. Saat

temperatur sudah cukup rendah sekitar 500 – 550 °C, maka tidak dicatat lagi perubahannya.

4. Kemudian, setelah suhu ruang bakar mencapai suhu ambient, langkah pemanasan awal 1-5 dan pengambilan data 1-3 diatas diulang kembali tetapi dengan bahan bakar yang berbeda (jika awal dilakukan menggunakan cangkang kelapa, maka selanjutnya diganti dengan ranting pohon dan cangkang kelapa sawit).



## BAB 4

### HASIL DAN ANALISA

#### 4.1 Hasil

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah untuk mengetahui sifat dan karakteristik pada cangkang kelapa sawit pada *fluidized bed combustor* UI. Pengujian dilakukan dengan menggunakan berbagai macam berat dari bahan bakar. Mengenai prosedur persiapan, perlengkapan alat-alat maupun tahapan pengambilan datanya sudah dibahas pada bab tiga. Sedangkan pada bab ini akan diperlihatkan data hasil pengujian beserta hasil pengolahannya. Data yang didapat akan di plot dalam bentuk grafik yang kemudian akan dianalisa dan dibahas lebih lanjut.

4.1.1 Hasil Pengujian untuk Bahan Bakar Cangkang Kelapa Sawit dengan pemanasan awal menggunakan cangkang kelapa.

Beberapa parameter yang menjadi pertimbangan antara lain sebagai berikut :

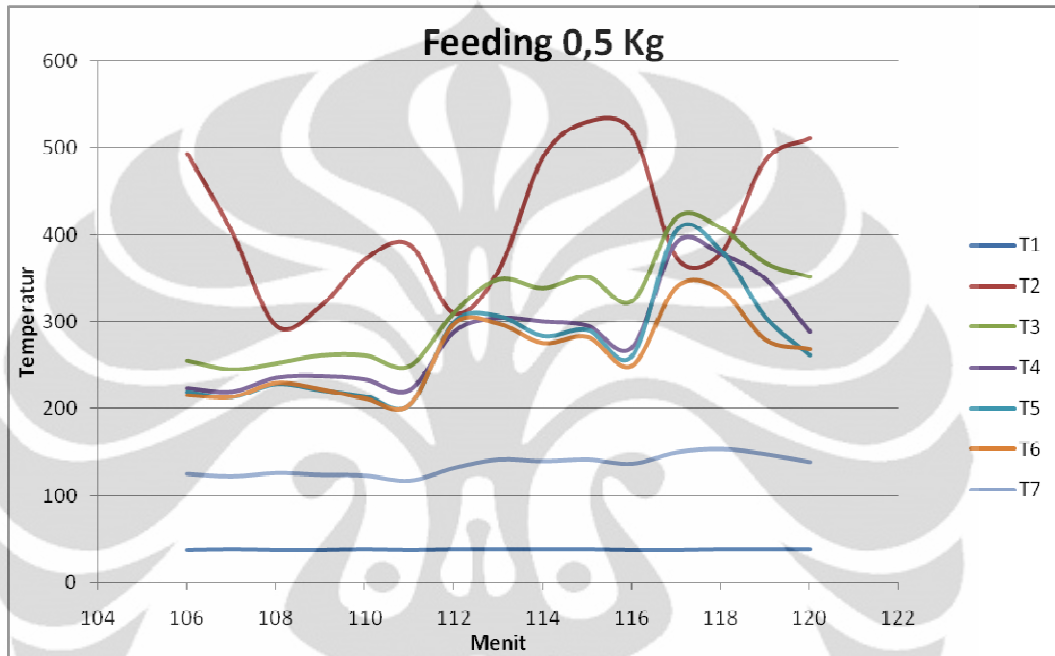
- a. Laju aliran udara ke ruang bakar ( $5,53 \text{ m}^3/\text{s}$ )
- b. *Feeding* bahan bakar (0,5 kg, 0,75 kg, dan 1 kg)
- c. Ketinggian termokopel (20,5 cm; 41,5 cm; 80,5 cm; 161,5 cm; 233,5 cm)
- d. LHV bahan bakar (3500 kCal/kg) dan efisiensi FBC (85%)

Menit	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
106	37	494	256	224	220	216	125
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
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
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

Tabel 4.1 Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 0,5kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal cangkang Kelapa



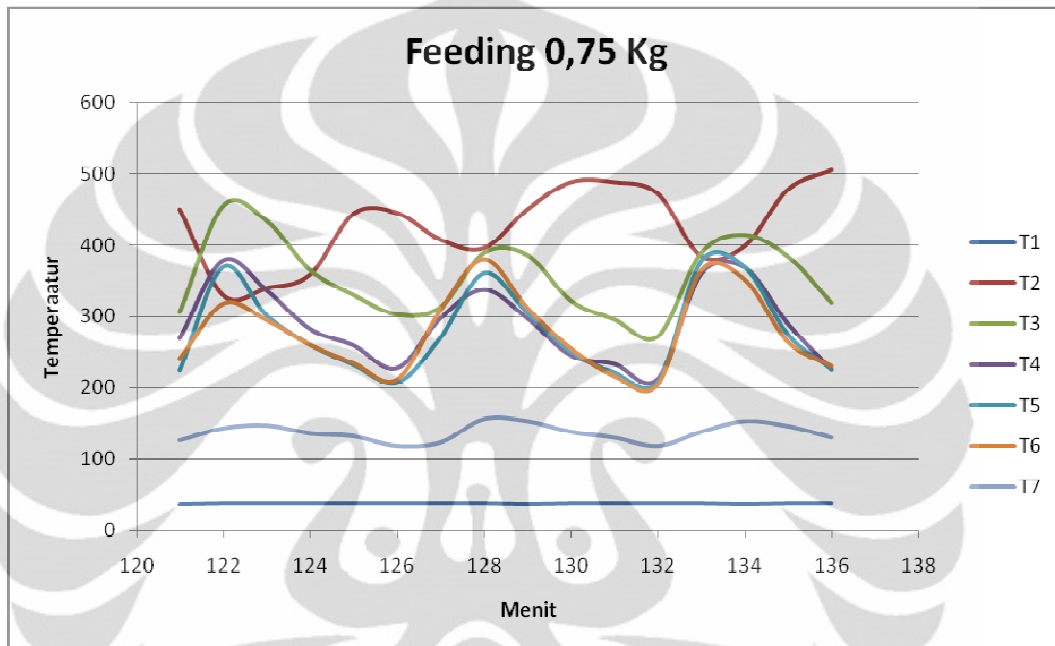
Gambar 4.1 Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 0,5kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal cangkang Kelapa

Menit	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
121	37	450	306	270	224	240	126
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
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
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

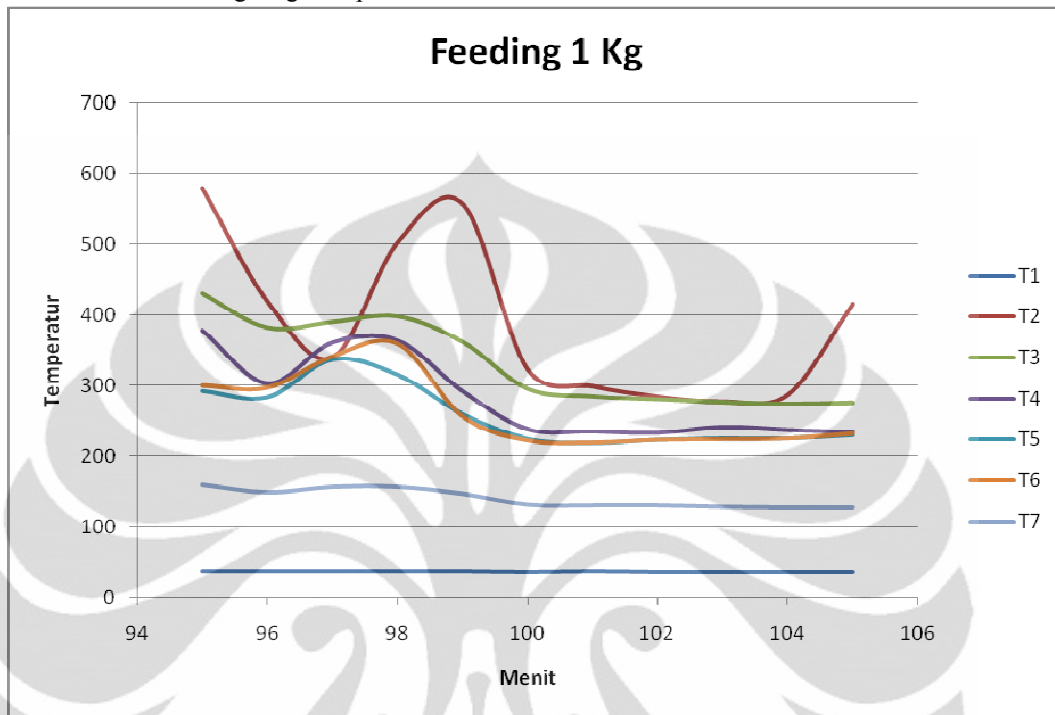
Tabel 4.2 Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 0,75kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal cangkang Kelapa



Gambar 4.2 Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 0,75kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal cangkang Kelapa

Menit	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
95	38	580	430	378	293	301	160
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
101	38	300	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

Tabel 4.3 Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 1 kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal cangkang Kelapa



Gambar 4.3 Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 1 kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal cangkang Kelapa

Menit ke-	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Keterangan
0	31	28	37	36	38	35	30	
1	34	49	693	221	188	166	67	
2	34	67	721	230	193	179	75	
3	35	78	701	226	193	182	80	
4	34	79	599	223	185	164	72	
5	35	92	622	218	191	168	77	
6	35	96	623	218	191	172	80	
7	35	102	626	219	195	174	83	
8	35	105	636	227	194	175	84	
9	35	104	669	234	192	182	87	
10	35	106	678	231	198	181	88	
11	35	107	683	228	200	186	89	
12	36	109	692	238	205	190	85	
13	36	118	699	253	213	195	89	
14	36	125	703	253	214	197	93	

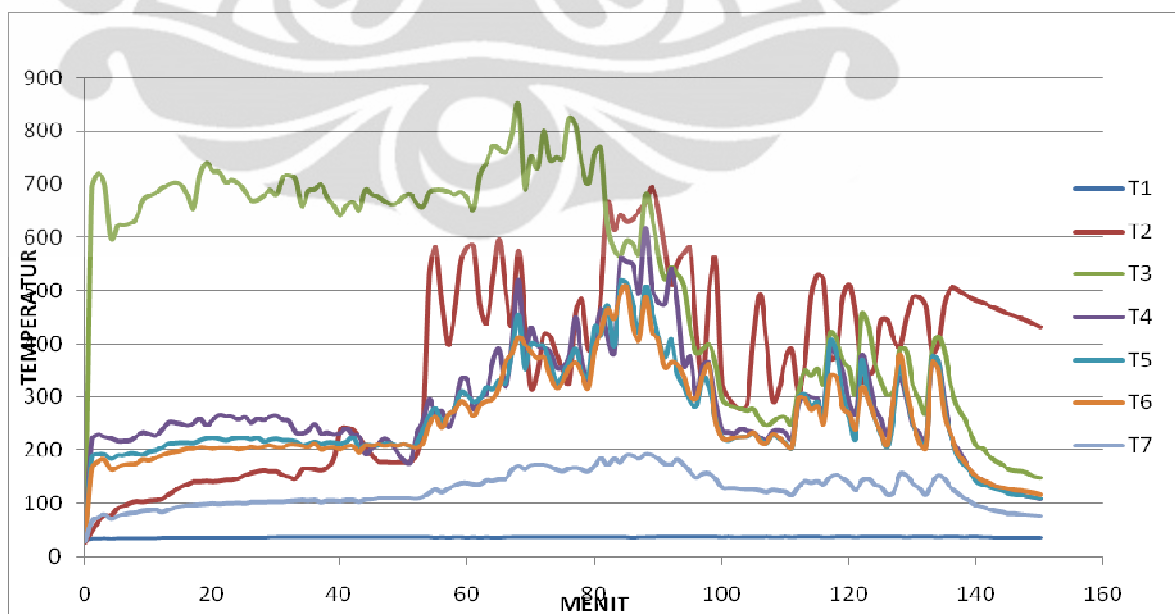
15	36	132	699	251	215	199	95	
16	36	137	679	247	215	203	97	
17	36	142	654	252	214	203	98	
18	36	142	719	260	219	206	99	
19	36	143	740	248	223	205	100	
20	36	142	725	258	224	203	101	
21	36	143	723	267	222	205	100	
22	36	145	704	265	219	205	101	
23	36	145	708	265	222	205	101	
24	36	148	702	259	224	202	102	
25	36	154	687	264	224	204	101	
26	36	158	670	253	221	207	103	
27	36	161	670	260	224	205	103	
28	36	163	678	258	217	207	103	
29	37	161	689	264	220	209	104	
30	37	161	680	266	222	206	104	
31	37	154	713	258	219	206	104	0,25 kg cangkang
32	37	151	717	256	219	210	105	
33	37	148	709	235	217	210	106	
34	37	165	658	233	210	208	107	
35	37	167	687	237	212	206	106	
36	37	165	690	250	216	212	107	
37	37	163	700	232	212	201	103	0,25 kg cangkang
38	37	168	675	234	215	205	106	
39	37	185	659	230	215	206	106	
40	37	240	641	233	213	202	105	
41	37	244	659	242	216	207	107	
42	37	239	666	230	225	208	107	
43	37	225	651	227	206	196	104	0,5 kg cangkang
44	37	209	689	195	211	209	108	
45	37	191	680	205	210	208	109	
46	37	180	676	212	209	211	111	
47	37	179	668	222	213	208	111	
48	37	178	662	213	213	210	111	
49	37	178	665	197	209	208	111	
50	37	178	676	182	212	211	111	
51	37	180	681	178	208	208	111	
52	37	190	665	229	212	205	110	
53	37	241	657	255	238	213	113	

54	37	535	685	296	266	250	121	
55	36	583	689	267	280	264	127	
56	37	477	689	274	254	242	122	0,5 kg cangkang
57	36	398	686	244	268	268	129	
58	37	459	680	272	279	274	134	
59	37	557	685	334	310	292	139	4 putaran valve
60	36	583	672	332	303	282	139	
61	37	585	653	278	292	264	137	0,5 kg cangkang
62	36	471	719	299	298	285	137	
63	37	439	741	309	320	293	144	
64	36	520	771	367	315	296	143	
65	36	596	766	390	332	320	146	3 putaran valve
66	37	503	760	320	326	366	147	0,75 kg cangkang
67	37	435	791	393	382	382	163	
68	37	575	850	521	456	413	171	
69	37	455	692	377	354	400	165	1 kg cangkang
70	37	319	751	431	401	386	172	
71	37	348	731	398	398	373	173	
72	37	418	801	393	397	376	173	
73	37	415	746	386	367	341	170	
74	37	380	750	356	327	317	164	1 kg cangkang
75	37	350	748	358	343	330	161	
76	37	327	823	375	367	354	166	
77	37	460	810	450	391	365	168	
78	37	484	738	372	348	343	164	2 putaran valve dan 1 kg cangkang
79	37	391	700	333	339	317	161	
80	37	390	760	412	434	392	172	
81	37	494	768	466	416	422	186	
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

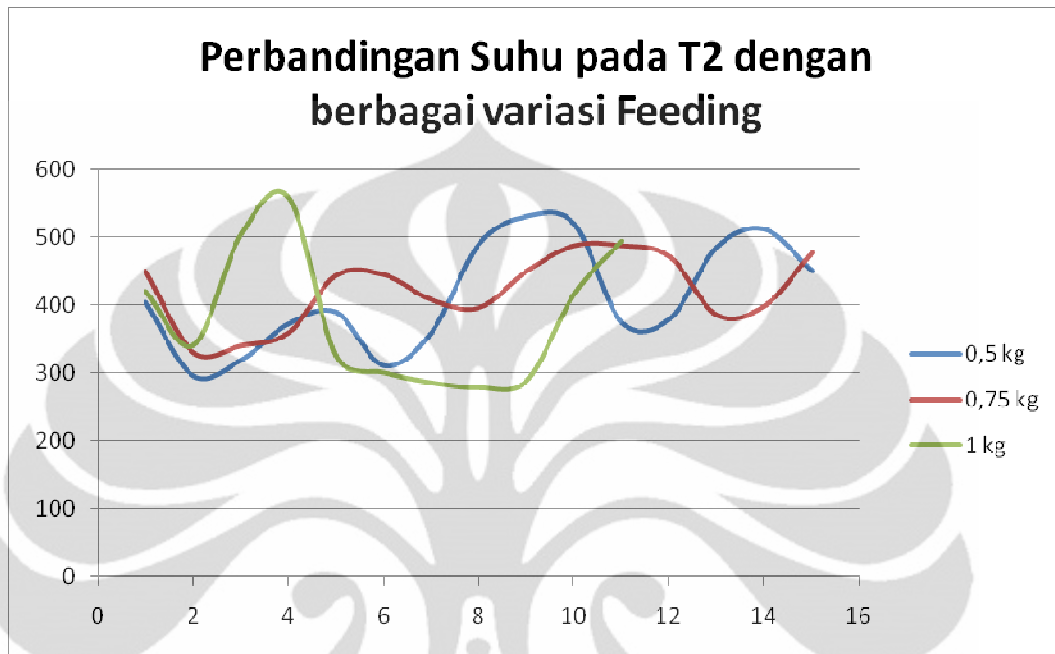
93	38	551	531	478	345	362	183	
94	38	571	509	359	321	339	173	
95	38	580	430	378	293	301	160	1 kg sawit
96	38	420	382	303	284	298	149	
97	38	340	390	361	338	342	157	
98	38	503	398	364	316	360	157	
99	38	558	362	292	260	257	147	
100	37	324	296	238	225	223	131	1 kg sawit
101	38	300	285	235	219	220	130	
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	

Tabel 4.4 Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal cangkang Kelapa



Gambar 4.4 Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 0,75kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal cangkang Kelapa



Gambar 4.5 Perbandingan Temperatur pada Termokopel Nomor 2 Reaktor FBC dengan Variasi Feeding Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal cangkang Kelapa

#### 4.1.2 Hasil Pengujian untuk Bahan Bakar Cangkang Kelapa Sawit dengan Pemanasan Awal Menggunakan Ranting Pohon.

Beberapa parameter yang menjadi pertimbangan antara lain sebagai berikut :

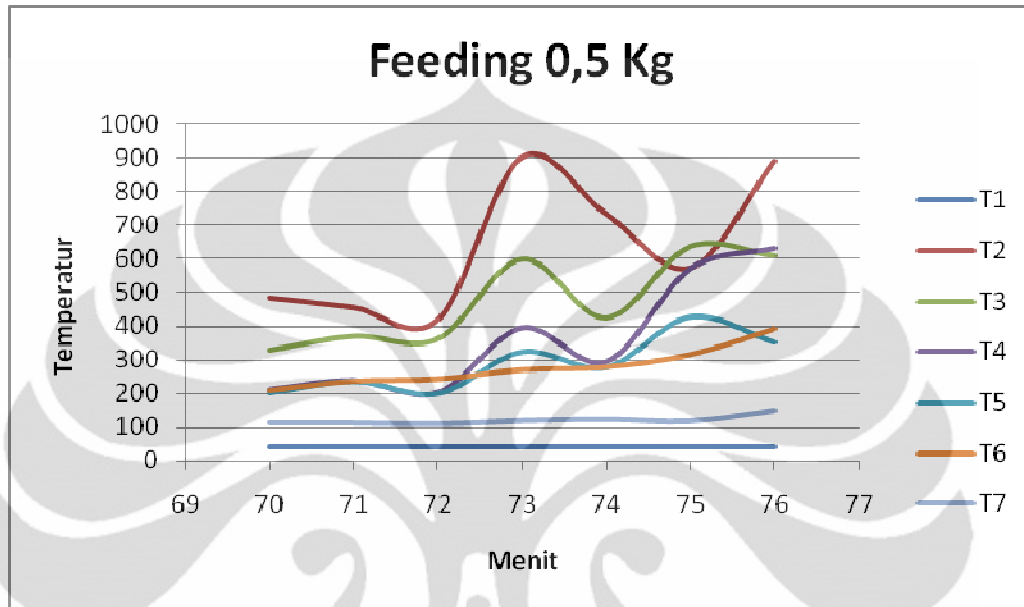
- Laju aliran udara ke ruang bakar ( $5,53 \text{ m}^2/\text{s}$ )
- Feeding bahan bakar (0,5 kg, 0,75 kg, 1 kg dan 1,5 kg)
- Ketinggian termokopel (20,5 cm; 41,5 cm; 80,5 cm; 161,5 cm; 233,5 cm)
- LHV bahan bakar (3500 kCal/kg) dan efisiensi FBC (85%)

Menit	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
70	40	483	328	212	200	208	115
71	40	454	370	240	235	236	114
72	40	417	362	204	198	242	111
73	40	901	598	395	323	270	120
74	40	732	424	295	277	278	124
75	40	571	635	570	428	315	119



76	40	890	608	630	352	392	150
----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

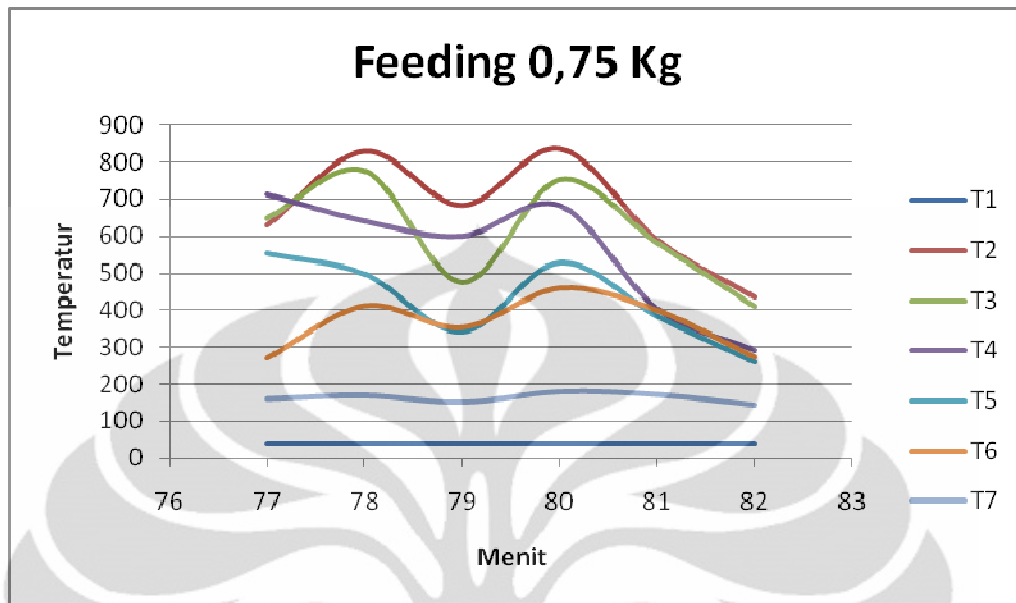
Tabel 4.5 Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 0,5kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal Ranting



Gambar 4.6 Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 0,5kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal Ranting

Menit	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
77	40	629	648	712	555	270	160
78	40	828	775	640	499	412	169
79	40	682	476	600	343	354	151
80	40	835	751	682	530	460	179
81	40	590	582	404	385	400	171
82	40	436	411	292	260	273	144

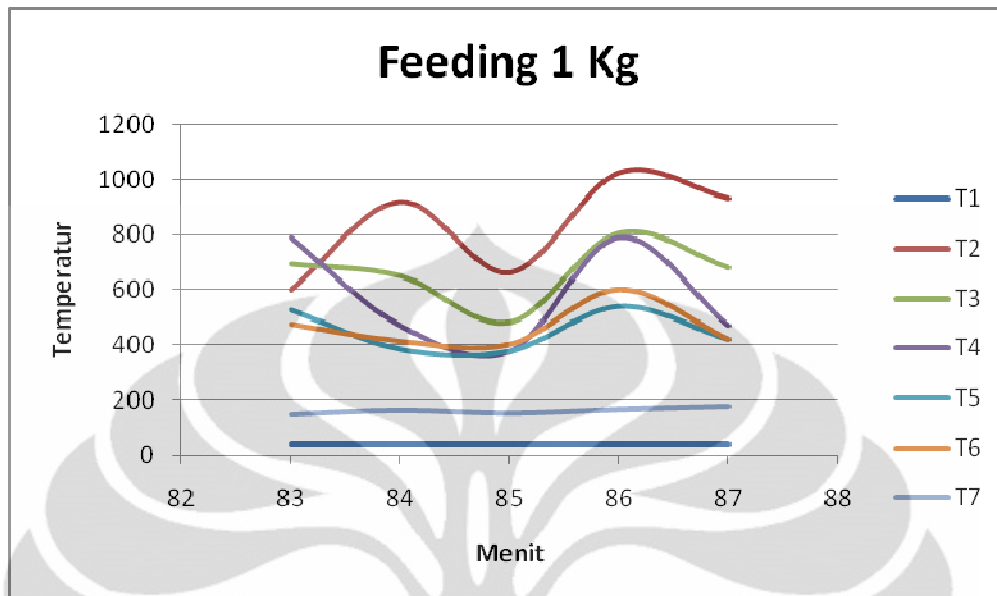
Tabel 4.6 Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 0,75 kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal Ranting



Gambar 4.7 Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 0,75 kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal Ranting

Menit	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
83	40	599	694	789	527	475	149
84	41	920	650	470	385	413	164
85	40	662	480	375	378	401	153
86	40	1025	807	790	540	601	167
87	41	932	680	470	420	420	177

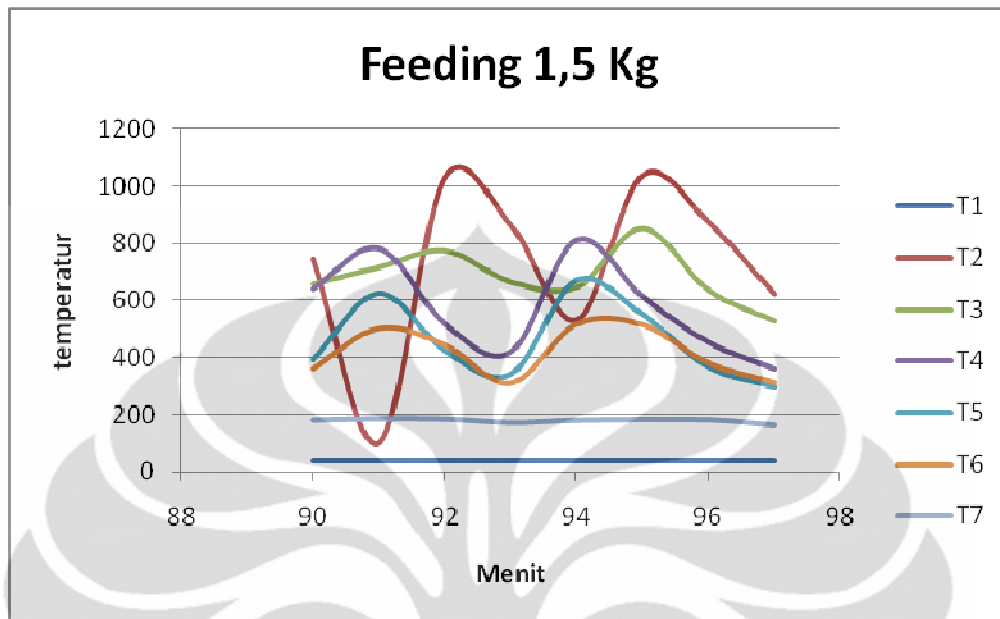
Tabel 4.7 Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 1 kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal Ranting



Gambar 4.8 Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 1 kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal Ranting

Menit	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
90	40	746	656	640	392	361	182
91	40	101	715	781	624	503	187
92	40	1030	773	520	424	445	186
93	40	866	664	420	340	310	172
94	40	532	645	810	669	518	181
95	40	1039	851	614	550	516	184
96	40	875	635	455	366	381	183
97	40	623	527	362	297	312	164

Tabel 4.8 Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 1,5kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal Ranting



Gambar 4.9 Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Feeding 1,5kg Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal Ranting

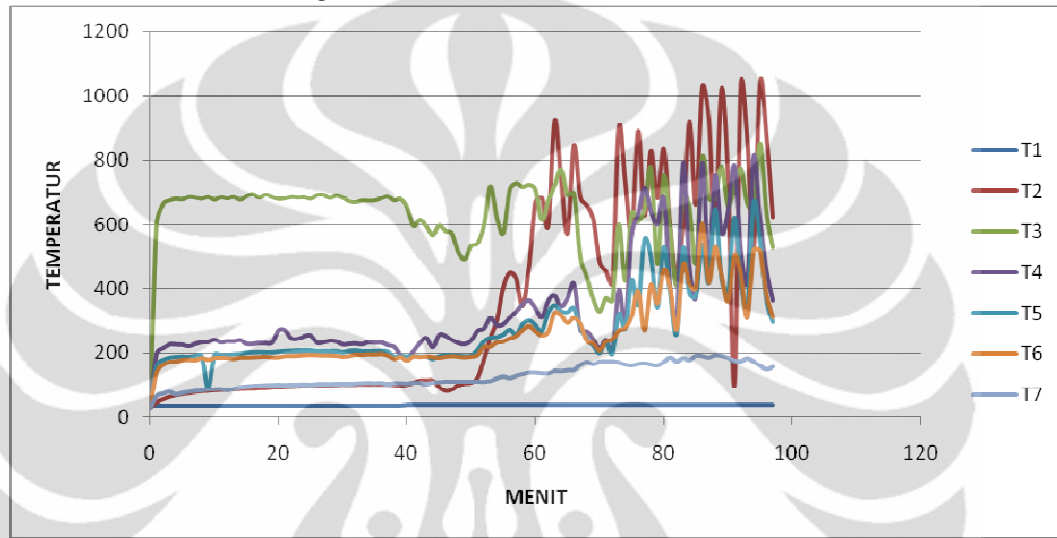
Menit	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Keterangan
0	35	29	38	38	39	36	37	
1	35	47	602	197	161	140	66	
2	36	56	662	213	178	163	75	
3	36	64	674	225	185	171	79	
4	36	69	679	225	188	173	85	
5	36	73	677	224	189	178	87	
6	35	76	686	220	188	179	89	
7	36	79	684	227	191	178	90	
8	36	81	680	233	191	184	91	
9	36	82	686	234	92	179	92	
10	36	84	676	240	194	184	92	
11	36	85	685	233	193	184	93	
12	35	86	681	236	194	184	94	
13	36	87	686	235	196	182	95	
14	36	88	676	239	197	185	96	
15	36	89	688	227	201	185	96	

16	36	89	693	227	202	186	96	
17	36	91	684	230	203	187	97	
18	36	91	692	229	202	188	97	
19	35	93	685	232	202	186	98	
20	36	93	679	269	204	186	98	
21	36	94	681	269	206	190	99	
22	36	95	686	243	207	190	100	
23	36	96	684	243	208	191	100	
24	35	97	685	251	208	193	100	
25	36	97	680	253	208	194	101	
26	36	98	691	231	206	193	101	
27	36	98	691	233	206	192	100	
28	36	100	683	237	206	192	100	
29	36	101	690	235	206	191	101	
30	36	102	683	225	202	188	99	
31	36	102	671	227	207	190	99	
32	36	102	668	228	208	195	99	
33	36	103	674	226	205	194	100	
34	36	103	673	233	205	196	102	
35	35	103	674	232	206	195	103	
36	36	103	681	232	206	197	104	
37	36	103	687	223	204	192	98	0,75 ranting
38	36	101	674	218	188	182	96	
39	36	98	678	192	191	187	98	
40	40	102	652	182	189	177	100	
41	40	107	594	204	190	189	101	
42	40	114	614	230	189	187	102	
43	40	114	593	246	189	189	102	
44	40	114	566	216	182	187	100	0,5 ranting
45	40	94	596	255	190	184	99	
46	40	82	578	252	194	188	101	
47	40	86	570	239	194	190	101	
48	40	100	512	230	192	188	100	
49	40	105	491	226	190	186	101	
50	40	107	532	238	192	188	102	
51	40	123	541	268	210	194	103	
52	40	180	596	275	237	219	110	
53	40	248	717	308	248	219	112	
54	40	301	620	285	250	233	115	

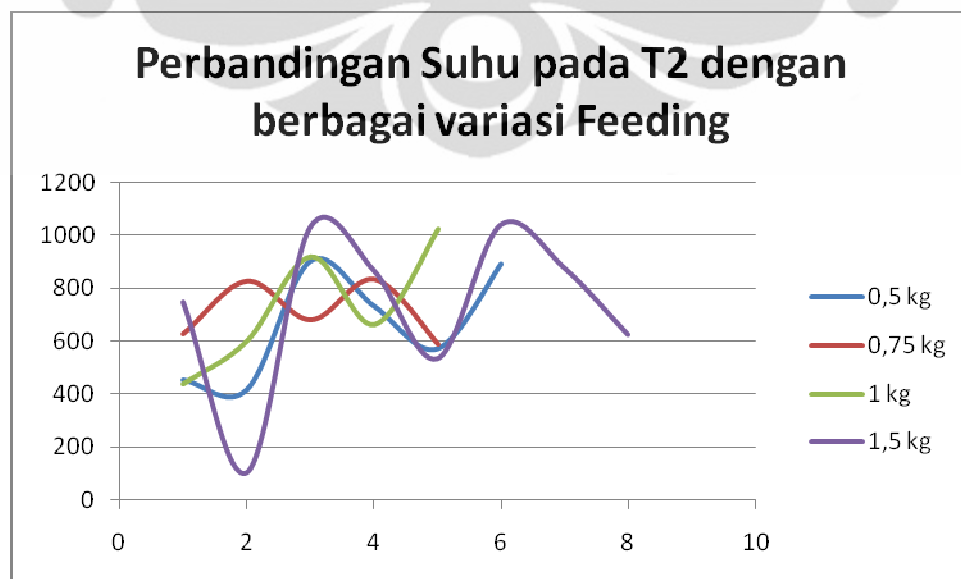
55	40	405	572	288	258	236	119	
56	40	449	707	309	273	245	120	4 valve
57	40	431	727	328	257	253	118	0,5 ranting
58	40	346	715	350	290	271	123	
59	40	470	722	362	302	283	129	
60	40	670	707	338	287	267	129	3 valve
61	40	684	612	310	267	255	127	
62	40	596	672	361	327	266	127	0,5 ranting
63	40	923	720	377	349	325	137	2 valve
64	40	739	769	343	330	317	144	
65	40	572	690	369	328	293	136	0,5 ranting
66	40	845	696	414	340	310	147	
67	40	683	496	270	279	289	139	mati
68	40	659	435	266	246	238	124	0,25 sawit
69	40	617	366	242	223	230	120	
70	40	483	328	212	200	208	115	0,5 sawit
71	40	454	370	240	235	236	114	
72	40	417	362	204	198	242	111	0,5 sawit
73	40	901	598	395	323	270	120	
74	40	732	424	295	277	278	124	
75	40	571	635	570	428	315	119	0,5 sawit
76	40	890	608	630	352	392	150	
77	40	629	648	712	555	270	160	0,75 sawit
78	40	828	775	640	499	412	169	
79	40	682	476	600	343	354	151	0,75 sawit
80	40	835	751	682	530	460	179	
81	40	590	582	404	385	400	171	
82	40	436	411	292	260	273	144	
83	40	599	694	789	527	475	149	1 sawit
84	41	920	650	470	385	413	164	
85	40	662	480	375	378	401	153	1 sawit
86	40	1025	807	790	540	601	167	
87	41	932	680	470	420	420	177	
88	40	600	680	752	650	529	176	1,25 sawit
89	41	1022	780	572	430	440	185	
90	40	746	656	640	392	361	182	1,5 sawit
91	40	101	715	781	624	503	187	
92	40	1030	773	520	424	445	186	
93	40	866	664	420	340	310	172	

94	40	532	645	810	669	518	181	1,5 sawit
95	40	1039	851	614	550	516	184	
96	40	875	635	455	366	381	183	
97	40	623	527	362	297	312	164	

Tabel 4.9 Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Berbagai Variasi Feeding Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal Ranting

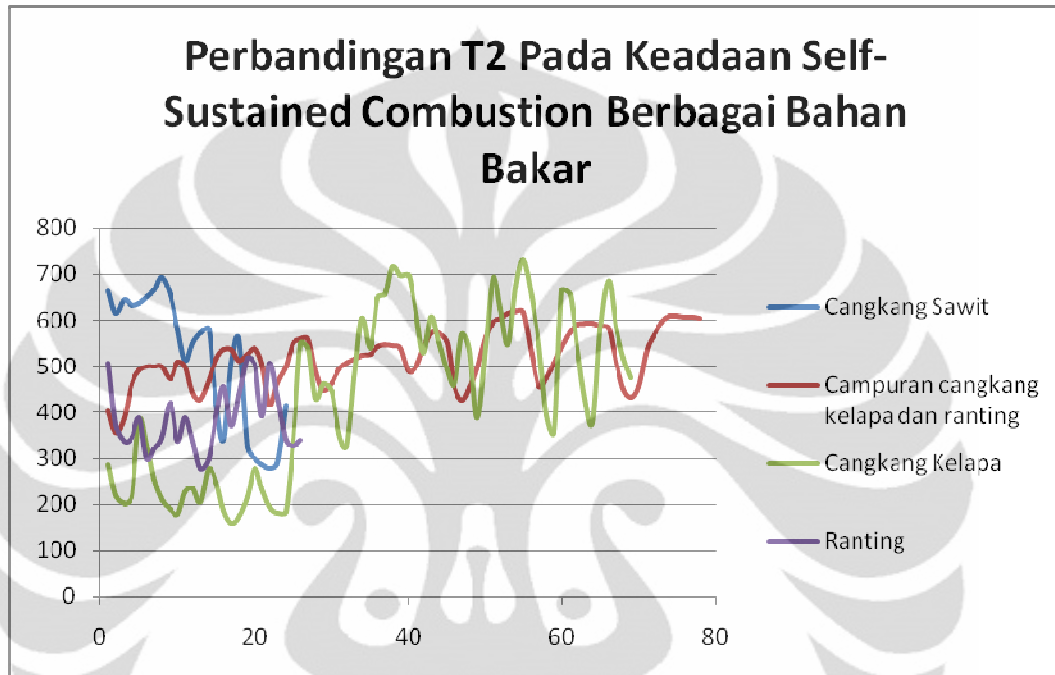


Gambar 4.11 Hubungan Temperatur pada Reaktor FBC dengan Berbagai Variasi Feeding Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal Ranting

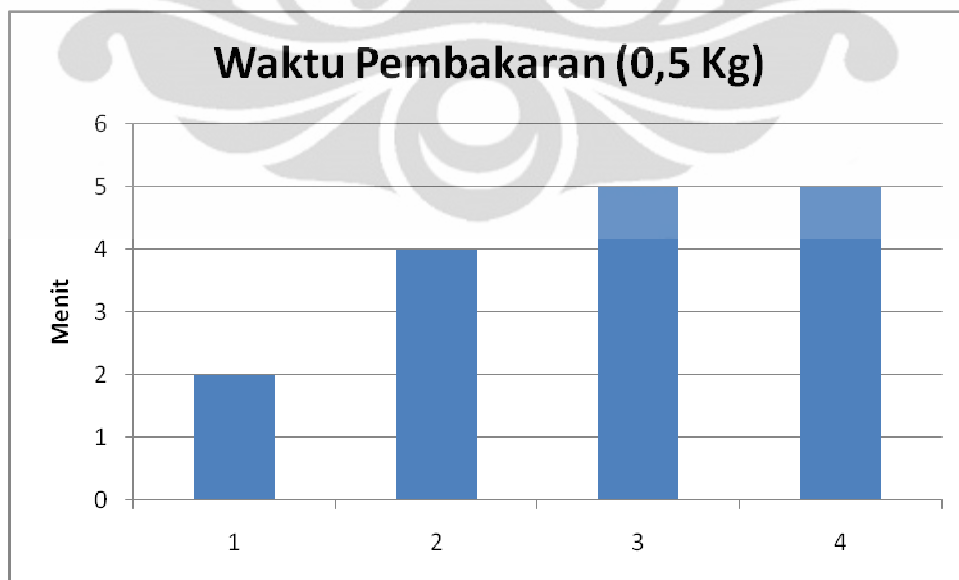




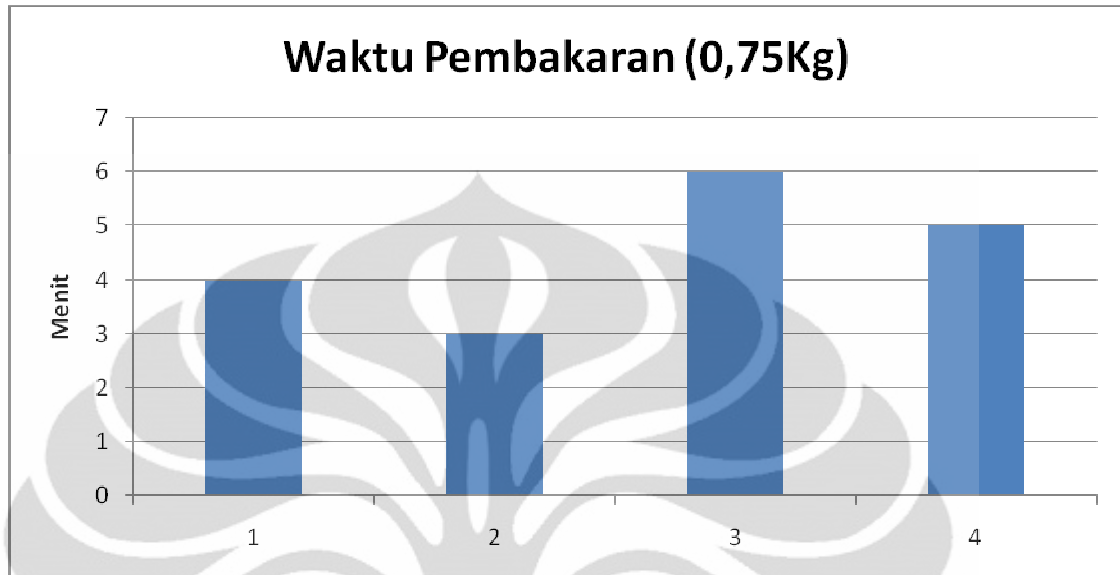
Gambar 4.12 Perbandingan Temperatur pada Termokopel Nomor 2 Reaktor FBC dengan berbagai Variasi Feeding Cangkang Sawit dan Pemanasan Awal Ranting



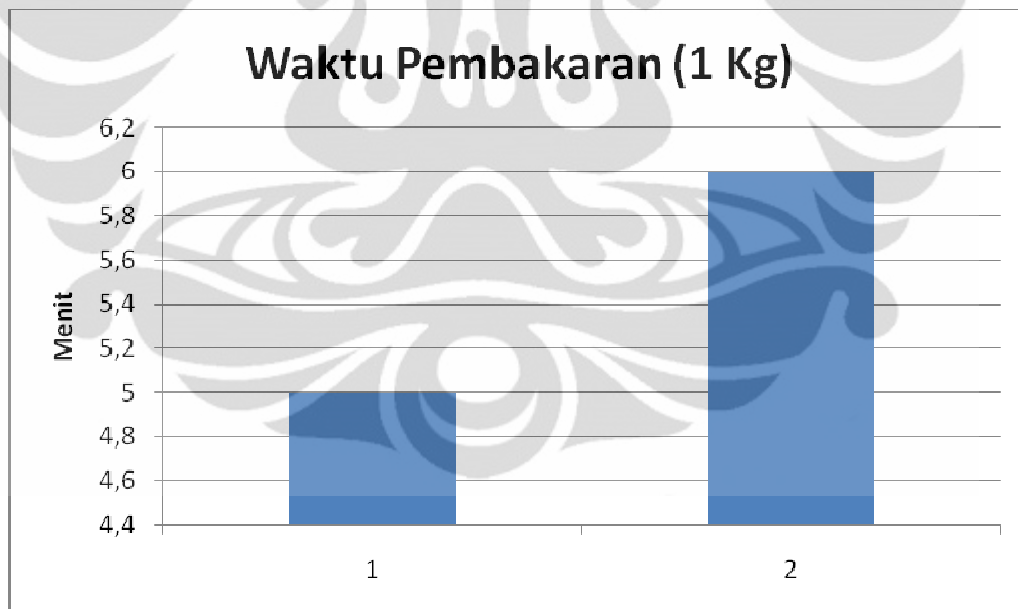
Gambar 4.13 Perbandingan T2 pada Keadaan Self-Sustained Combustion berbagai Bahan Bakar



Gambar 4.14 Grafik Waktu Pembakaran Pada Feeding 0,5 Kg



Gambar 4.15 Grafik Waktu Pembakaran Pada Feeding 0,75 Kg



Gambar 4.16 Grafik Waktu Pembakaran Pada Feeding 1 Kg

#### 4.1.3 Perhitungan 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.

Total heat entering bed = Total heat leaving bed

Total heat entering bed =  $Q_i + H_i + H_{fi}$

Total heat leaving bed =  $Q_{fg} + Q_{dr} + Q_r + Q_h$

- $Q_i$

$$Q_i = m_c X_b LHV$$

Feeding	Kalor (kJ/jam)
0,5	118644,75
0,75	188220,375
1	159657,75

- $H_i$

$$H_i = m_a C_{air} (T_i - T_a)$$

Feeding	Kalor (kJ/jam)
0,5	4065,779872
0,75	3999,776952
1	2847,725985

- $H_{fi}$

$$H_{fi} = (m_c + m_s) Cp T_a + (m_c M_f + m_s M_s) H_0$$

Feeding	Kalor (kJ/Jam)
0,5	28161,03812
0,75	44600,9993
1	37851,96261

- $Q_{in\ total} = Q_i + H_i + H_{fi}$

Feeding	Kalor (kJ/Jam)
0,5	150870,82
0,75	236821,151
1	200357,439

- $Q_{fg}$

$$Q_{fg} = m_c M_{flue} C_f T_b + m_c M_f H_{Tb} + (1 - x_d)(X_{ash} m_c + m_s) C_p T_b$$

Feeding	Kalor
0,5	90976,66663
0,75	177917,8207
1	88298,45966

- $Q_{dr}$

$$Q_{dr} = (m_c X_{ash} x_d + m_s x_d) C_p T_b$$

Feeding	Kalor (kJ/Jam)
0,5	481,1728234
0,75	720,4385308
1	394,9625131

- $Q_r$

$$Q_r = \sigma e_b A_b \left[ (T_b + 273)^4 - (T_{fb} + 273)^4 \right]$$

Feeding	Kalor
0,5	2537,735999
0,75	1416,18589

1	1003,344129
---	-------------

- $Q_{\text{out total}} = Q_{\text{fg}} + Q_{\text{dr}} + Q_{\text{r}}$

Feeding	Kalor
0,5	93995,575
0,75	180054,444
1	89696,765

- Heat Loss =  $Q_{\text{in total}} - Q_{\text{out total}}$

Feeding	Kalor
0,5	56875,245
0,75	56766,707
1	110660,67

#### 4.1.4 Karakteristik Blower

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

Putaran (rpm)	Kecepatan Aliran Udara (m/s)	Flow rate ( $\text{m}^3/\text{min}$ )	Flow rate (lpm)
100	0.78	0.110916	110.916
200	1.51	0.214722	214.722
300	2.45	0.34839	348.39
400	5.51	0.783522	783.522
500	6.63	0.942786	942.786
600	7.73	1.099206	1099.206
700	8.84	1.257048	1257.048
800	10.03	1.426266	1426.266
900	11.24	1.598328	1598.328
1000	12.3	1.74906	1749.06

1100	13.56	1.928232	1928.232
1200	14.66	2.084652	2084.652
1300	15.7	2.23254	2232.54
1400	16.92	2.406024	2406.024
1500	18.18	2.585196	2585.196
1600	19.38	2.755836	2755.836
1700	20.52	2.917944	2917.944
1800	21.23	3.018906	3018.906
1900	22.26	3.165372	3165.372
2000	23.01	3.272022	3272.022
2100	24.26	3.449772	3449.772
2200	25.4	3.61188	3611.88
2300	26.52	3.771144	3771.144
2400	27.41	3.897702	3897.702
2500	28.33	4.028526	4028.526
2600	28.9	4.10958	4109.58
2700	29.96	4.260312	4260.312
2800	32.15	4.57173	4571.73
2900	33.27	4.730994	4730.994
3000	34.4	4.89168	4891.68
3100	35.52	5.050944	5050.944
3200	36.65	5.21163	5211.63
3300	37.77	5.370894	5370.894
3400	38.9	5.53158	5531.58
3500	40.02	5.690844	5690.844
3600	41.14	5.850108	5850.108

Tabel 4.10 Hubungan Putaran Blower dengan Laju Aliran Udara

Di dalam tabel tersebut terdapat data mengenai kecepatan udara (tetapi bukan kecepatan superfisial), laju aliran udara dengan satuan  $\text{m}^3/\text{min}$ , serta laju aliran udara dengan satuan liter per menit (lpm). Jika data pada tabel diatas tersebut dibuat dalam bentuk grafik, maka akan terlihat karakteristik blower yang digunakan pada *fluidized bed combustor* UI. Grafik yang dibuat adalah grafik putaran (rpm) terhadap *flow rate* (lpm). Area kerja yang dipakai untuk pengujian pembakaran ialah pada putaran 3400 rpm.

## 4.2 ANALISA

Setelah dilakukan pengujian dan pengambilan data pada *fluidized bed combustor* UI mengenai performa blower dan juga pembakaran biomassa, dalam hal ini ialah

me menggunakan cangkang kelapa sawit. Pengujian menggunakan dua jenis pemanasan awal yaitu dengan cangkang kelapa dan ranting pohon. Selanjutnya dilakukan pengolahan data yang ada sehingga dapat diplot ke dalam bentuk grafik. Grafik yang dibuat dalam pengujian ini ialah diantaranya grafik distribusi suhu tiap menit pada termokopel – termokopel yang ada pada reactor dan *cyclone* FBC UI, serta grafik perbandingan suhu puncak yang dicapai pada berbagai variasi massa feeding.

#### 4.2.1 Analisa Karakteristik Pembakaran Bahan Bakar dengan Pemanasan Awal Menggunakan Cangkang Kelapa dan Ranting

Pengambilan data dilakukan dengan menggunakan berbagai macam variasi berat dari *feeding* bahan bakar. Variasi tersebut antara lain dimulai dari 0,5 kg, 0,75 kg, dan 1 kg setelah dapat dilakukannya *self-sustained combustion* pada reactor FBC UI.

Pemanasan awal pada reactor dilakukan dengan menggunakan *gas burner* dengan jenis *Hi-Temp Premixed Burner* berbahan bakar LPG. Pasir yang sudah mencapai fluidisasi minimum, dipanaskan selama 30 menit sehingga mencapai suhu kurang lebih 100°C. Kemudian, untuk meningkatkan suhunya lagi menjadi yang diharapkan (suhu yang melebihi suhu *self-combustion* sekitar 700°C), sejumlah bahan bakar pendukung (*solid support fuel*) yaitu cangkang kelapa atau ranting dimasukkan ke dalam ruang bakar dan terus dicatat perubahan temperaturnya. Untuk menuju suhu tersebut, burner dimatikan secara perlahan – lahan dengan tetap memasukkan *solid support fuel*. Setelah temperatur dicapai kemudian burner dimatikan dan dimasukkan bahan bakar untuk dimulai *self-sustained combustion*.

Untuk yang menggunakan pemanasan awal cangkang kelapa, *feeding* bahan bakar dimulai dari 0,25 kg. *Feeding* pertama ini dilakukan untuk menghabiskan *solid support fuel* yang ada pada reactor. Dapat terlihat pada grafik, suhu akan naik kembali sampai pada satu titik akan turun kembali. Jika suhu sudah mulai menurun, maka *feeding* akan dilakukan kembali. Hal ini membuat suhu yang terbaca pada *data logger* akan turun dengan drastis dan akan mulai naik kembali pada satu titik. *Feeding* dimulai dari 0,5 kg dan terus meningkat hingga didapatkan suhu maksimum yang dapat dicapai oleh cangkang kelapa sawit. Perubahan suhu pada termokopel – termokopel juga terus dicatat.

Keputusan *timing feeding* yang tepat juga sangat menentukan berhasil atau tidaknya percobaan ini, khususnya bila suhu sudah relative rendah (300 – 400 C). *timing feeding* yang tepat bisa menggunakan pembacaan suhu pada termokopel 6 dan 7. Karena termokopel – termokopel tersebut terletak di atas reactor dan di *cyclone*. Jika kita lihat grafik, maka ada satu waktu dimana pembacaan suhu pada kedua termokopel tersebut justru turun di saat pembacaan suhu pada termokopel pada *freeboard* seperti termokopel 2, 3, dan 4 menunjukkan kenaikan. Hal itu dikarenakan adanya *volatile matter* pada bahan bakar. *Volatile* merupakan zat yang mudah menguap dan mudah terbakar. Ketika proses pemasukan bahan bakar ke dalam ruang bakar, zat ini akan menguap dengan cepat dan terbakar. Kemungkinan dengan besarnya *flow rate blower* yang digunakan, *volatile matter* terbakar saat mencapai termokopel 6 dan 7, dan tidak lagi terbakar pada *freeboard*.

Dapat dilihat pula suhu tertinggi pada *freeboard* saat dilakukan *feeding* bahan bakar sebanyak 0,75 kg, yaitu 674°C. jika *feeding* terus ditingkatkan menjadi 1 kg, maka suhu



tersebut tidak akan tercapai kembali. Hal ini kemungkinan disebabkan bahan bakar mulai tidak terfluidisasi dengan baik sehingga sangat susah untuk mencapai suhu yang cukup tinggi. Apalagi penurunan suhu juga cukup drastic sebelum kembali naik.

Untuk pemanasan awal menggunakan ranting pohon, *feeding* juga dimulai pada 0,5 kg dan terus menerus naik sampai 1,5 kg. Pada kali ini terjadi hal yang menurut saya cukup unik, cangkang kelapa sawit yang sudah *self-sustained combustion* bisa mencapai suhu lebih dari 1000°C. Hal ini tidak dapat tercapai pada pemanasan awal menggunakan cangkang kelapa. Apalagi hal ini terjadi pada hampir semua variasi *feeding* yang dilakukan. Jika melihat potongan ranting yang merupakan bahan bakar pendukung kali ini, saya menyimpulkan kepadatan dan *specific weight* dari ranting tersebut membuat bahan bakar tidak terfluidisasi dengan baik, sehingga membuat bahan bakar mengendap berada di termokopel 2 dan menghasilkan pembakaran *fixed bed*, bukan *fluidized bed* seperti yang diinginkan.

Grafik waktu pembakaran menunjukkan jarak antara *feeding* pertama dengan *feeding* selanjutnya. Hal ini menunjukkan waktu dari proses *feeding* hingga habisnya bahan bakar di dalam reaktor. Di sini terlihat rata – rata waktu pembakaran dari *feeding* 0,5 Kg adalah 4 menit, sedangkan rata – rata waktu pembakaran dari *feeding* 0,75 Kg adalah 4,5 menit. Rata – rata waktu pembakaran yang tertinggi di percobaan ini adalah pada *feeding* 1 Kg yaitu 5,5 menit. Dari grafik ini dapat disimpulkan jika *feeding* terus ditingkatkan maka waktu pembakaran juga akan terus meningkat.

Jika melihat dari tabel *Heat Balance*, maka dapat terlihat bahwa *feeding* 0,75 Kg merupakan yang paling optimal karena *heat loss* yang dihasilkan sekitar 56766,707 kJ/Jam. Jika *feeding* ditingkatkan menjadi 1 Kg maka *Heat Loss* akan semakin besar menjadi sekitar 110660,67 kJ/Jam.

#### 4.2.2 Analisa Karakteristik Blower

Ring blower yang ada pada *fluidized bed combustor* UI mempunyai kemampuan hingga putaran 3600 rpm. Proses pengambilan data dilakukan dengan mengukur laju aliran udara pada sisi discharge ring blower menggunakan anemometer pada setiap kenaikan putaran 100 rpm mulai dari 100 rpm hingga 3600 rpm.

Jika dilihat pada grafik putaran blower dengan laju aliran udara yang dihasilkan, maka cenderung membentuk pola linear karena saling berbanding lurus antara keduanya. Hal ini berarti semakin besar putaran rpm menghasilkan laju aliran udara semakin besar.

Pada grafik terlihat bahwa laju aliran udara maksimum yang memiliki nilai 5,85 m<sup>3</sup>/menit, juga terdapat nilai fluidisasi minimum yang diperoleh dari perhitungan penelitian sebelumnya, yaitu di putaran 2700 rpm dengan laju 2,6 m<sup>3</sup>/menit. Nilai ini masih berada di bawah nilai blower yang akan digunakan, yaitu pada 3400 rpm (5,53 m<sup>3</sup>/min).

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

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 KESIMPULAN

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

Proses pembakaran biomassa yang dilakukan dengan menggunakan *fluidized bed combustor* UI sudah tercapai sesuai dengan yang diharapkan. Untuk pembakaran dengan menggunakan bahan bakar cangkang kelapa sawit, dengan pemanasan awal menggunakan cangkang kelapa temperatur yang dihasilkan sekitar 500-600°C. sedangkan untuk pembakaran dengan pemanasan awal menggunakan ranting ranting akasia, temperature yang dihasilkan bisa dikatakan tidak *valid* karena kurang terjadinya fluidisasi di dalam reactor FBC UI. Panas yang dihasilkan dari pembakaran kedua jenis bahan bakar tersebut dirasa cukup untuk dimanfaatkan pada *heat exchanger*.

Untuk didapatkan suhu maksimal, maka jumlah *feeding* dari bahan bakar juga akan sangat menentukan. Jika bahan bakar yang dimasukkan terlalu sedikit, maka bahan bakar akan habis sebelum mencapai suhu yang lebih tinggi, sedangkan bila bahan bakar yang dimasukkan terlalu banyak, maka suhu akan turun dengan drastis dan bahan bakar juga tidak akan mencapai suhu yang lebih tinggi. Oleh karena itu, didapatkan jumlah *feeding* yang optimal untuk FBC UI adalah pada 0,75 kg. Suhu tertinggi yang dicapai dengan jumlah bahan bakar tersebut adalah 694°C.

#### 7.2 SARAN

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

1. Persiapan bahan bakar sebelum melakukan pengujian harus dilakukan dengan baik, mulai dari dimensi partikel, ketersediaan dalam volume yang memadai dalam pengujian experimental pembakaran. Jika dimensi bahan bakar yang digunakan semakin kecil dan seragam, maka akan semakin baik.
3. Perlunya peningkatan kapasitas dan kualitas instrumentasi dan alat ukur, seperti timbangan, instrumentasi listrik pada laboratorium FBC, untuk kepentingan penelitian yang lebih baik.
3. Perlunya pengadaan instalasi jaringan listrik dan air bersih pada laboratorium pengujian FBC, karena hal ini sangat dibutuhkan untuk praktikan laboratorium di masa mendatang.

## REFERENSI

1. Basu, Prabir. "Combustion and Gasification in Fluidized Beds" (Taylor & Francis Group 2006).
2. Oka, Simeon N. "Fluidized Bed Combustion" (Marcel Dekker, Inc. 2004)
3. Bruce R. Munson, Donald F. Young, *Mekanika Fluida*, terj. Harinaldi, Budiarmo (Jakarta: Erlangga, 2003).
4. Christian, Hans. "Modifikasi Sistem Burner dan Pengujian Aliran Dingin *Fluidized Bed Incinerator* UI." Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2008.
5. Surjosatyo, Adi. "Fluidized Bed Incineration of Palm Shell & Oil Sludge Waste." Tesis, Program Magister Engineering Universiti Teknologi Malaysia, 1998.
6. "Experimental Operating & Maintenance Manual – Fluidisation and Fluid Bed Heat Transfer Unit H692," P. A. Hilton Ltd.
7. Geldart, D., *Gas Fluidization Technology*, (New York: John Wiley & Sons, 1986).
8. Howard, J. R., *Fluidized Beds – Combustion and Applications*, (London: Applied Science Publishers, 1983).
9. Kunii, Daizo & Octave Levenspiel, *Fluidization Engineering*, (New York: Butterworth-Heinemann, 1991).
10. Robert H. Perry, Don W. Green, *Perry's Chemical Engineers' Handbook* 7<sup>th</sup> Ed., (Singapore: McGraw-Hill Int., 1997).