



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI VARIASI SUPLAI UDARA BLOWER UNTUK
PENCAPAIAN PEMBAKARAN MANDIRI PADA
EKSPERIMEN UJI BAHAN BAKAR FLUIDIZED BED
COMBUSTOR**

SKRIPSI

Riza Rahmat

0906605321

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
DESEMBER 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI VARIASI SUPLAI UDARA BLOWER UNTUK
PENCAPAIAN PEMBAKARAN MANDIRI PADA
EKSPERIMEN UJI BAHAN BAKAR FLUIDIZED BED
COMBUSTOR**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Riza Rahmat

0906605321

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
DESEMBER 2011**

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

STUDI VARIASI SUPLAI UDARA BLOWER UNTUK PENCAPAIAN PEMBAKARAN MANDIRI PADA EKSPERIMEN UJI BAHAN BAKAR FLUIDIZED BED COMBUSTOR

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, 28 Desember 2011



RIZA RAHMAT

NPM : 0906605321

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Riza Rahmat
NPM : 0906605321
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Studi Variasi Suplai Udara Blower Untuk
Pencapaian Pembakaran Mandiri Pada Experimen Uji Bahan Bakar Fluidized Bed
Combustor

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 : Ir. Agung Subagio Dipl. Eng ()

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

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

Penguji : Agus S. Pamitran, M.Eng., Ph.D ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 16 Januari 2012

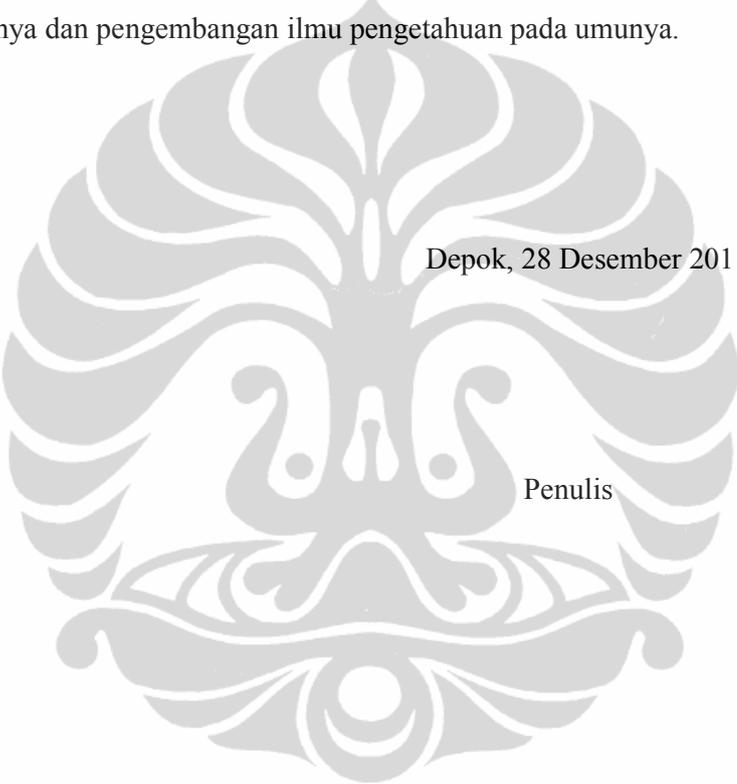
KATA PENGANTAR

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

1. Allah SWT, karena berkat rahmat dan berkahNya lah saya dapat menyelesaikan skripsi ini tepat pada waktunya.
2. Mamah dan Papa tercinta, Drs.Rahmatullah dan Dra.Mimin Hermin yang telah memberikan pengertian, perhatian serta kasih sayangnya yang begitu besar kepada saya. serta kakak saya, Ria Herlia yang selalu mendukung dan menyemangati saya untuk selalu berusaha sebaik mungkin.
3. 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. “ Terimakasih banyak Pak atas semua ilmu dan didikan yang telah diberikan, semoga Allah SWT membalas semua kebaikan yang Bapak berikan, Amin”.
4. Seluruh dosen, staf pengajar dan karyawan DTM FTUI yang secara langsung atau tidak langsung memberikan pelajaran, wawasan dan informasi.
5. Noviescha Permana, Terkasih dan tercinta. Yang selalu memberikan semangat untuk menyelesaikan skripsi.
6. Azmi Muntaqo A.md, selaku teman skripsi dan tempat berbagi cerita suka maupun duka, yang selalu memberikan semangat dan dorongan untuk selalu maju. “Persahabatan adalah awal kemajuan kita, tetap semangat dan selalu tatap masa depan dengan indah”
7. Nanda Prima, selaku teman skripsi. “Dark Green is always the best than the other colors”.

8. Muhammad Wiweko A.md, selaku teman kuliah dan penerus skripsi di lab FBC, yang selalu ikhlas meluangkan waktu untuk membantu proses pengujian di lab. “Makasih banyak, semua kebaikan weko pasti akan ada balasnya dari Allah SWT”.
9. Teman teman kuliah, baik blok barat maupun blok timur. Saya ucapkan terima kasih banyak atas segala hal yang begitu berarti dalam setiap perjalanan hidup saya.
10. Spartan dan Andika Net, selaku komunitas bermain yang selalu bisa menghibur disaat duka.

Akhir kata, penulis 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, 28 Desember 2011

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Riza Rahmat
NPM : 0906605321
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

STUDI VARIASI SUPLAI UDARA BLOWER UNTUK PENCAPAIAN PEMBAKARAN MANDIRI PADA EKSPERIMEN UJI BAHAN BAKAR FLUIDIZED BED COMBUSTOR

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 28 Desember 2011

Yang menyatakan,



(Riza Rahmat)

ABSTRAK

Nama : Riza Rahmat

Npm : 0906605321

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : Studi Variasi Suplai Udara Blower Untuk Pencapaian
Pembakaran Mandiri Pada Experimen Uji Bahan Bakar Fluidized Bed
Combustor

Seiring dengan perkembangan jaman dan meningkatnya kebutuhan umat manusia serta diikuti dengan terus menipisnya cadangan sumber daya fosil yang selama ini menjadi sumber energi di seluruh dunia telah melahirkan banyak teknologi pengkonversi sumber daya alam terbarukan sebagai upaya penekanan pemakaian bahan bakar fosil. Salah satu teknologi tersebut adalah *Fluidized Bed Combustor* (FBC). *Fluidized Bed Combustor* berfungsi mengubah energi biomassa menjadi energi panas yang dapat dimanfaatkan. Alat ini bekerja dengan memanfaatkan hamparan pasir silika yang difluidisasikan menggunakan udara bertekanan. Hamparan pasir silika yang terfluidisasi ini berfungsi sebagai sarana penyimpan dan pendistribusi panas yang baik. Temperatur pengoperasian *fluidized bed combustor* berada pada saat *bed* 750-800°C sehingga bahan bakar dapat terbakar dengan baik sehingga terjadi *self sustained combustion*. Agar terjadi proses pembakaran yang baik dari pemanasan awal hingga kondisi *self sustained combustion* diperlukan suplai udara bertekanan yang dihasilkan dari putaran blower. Dalam pengujian ini dilakukan dua kali pengujian dengan suplai udara 0,093 m³/s dan 0,085 m³/s, dengan variasi *feeding* yang berbeda. Hasil yang terbaik adalah dengan suplai udara 0,093 m³/s.

Kata kunci: *Fluidized Bed Combustor*, suplai udara, *bed*, biomassa, *self sustained combustion*.

ABSTRACT

Name : Riza Rahmat

NPM : 0906605321

Study Program : Mechanical Engineering

Title : Study Of Variation Blower Air Supply For Self Sustained
Combustion In Fuel Experiment Fluidized Bed Combustor.

Along with the time changing and the increasing needs of mankind and followed by continuing depletion of fossil resources which has been a source of energy worldwide has spawned many technologies converting renewable natural resources as an effort to emphasize the use of fossil fuels. One such technology is the Fluidized bed combustor (FBC). Fluidized Bed combustor serves convert biomass energy into heat energy that can be utilized. It works by exploiting silica sand which fluidized using pressurized air. Fluidized silica sand that serves as a means of storage and good heat distributor. Operation temperature of fluidized bed combustor to be in 750-800 Celcius degree bed, so that fuel can be burned and resulting in self-sustained combustion. In order to develop good combustion process from the beginning to the heating stage, it is necessary to provide self-sustained combustion air supply resulted by a blower. This test was done twice with testing air supply at 0.093 m³/kg and 0.085m³/kg, with different variations of feeding. Best result is to supply air at 0.093 m³/kg

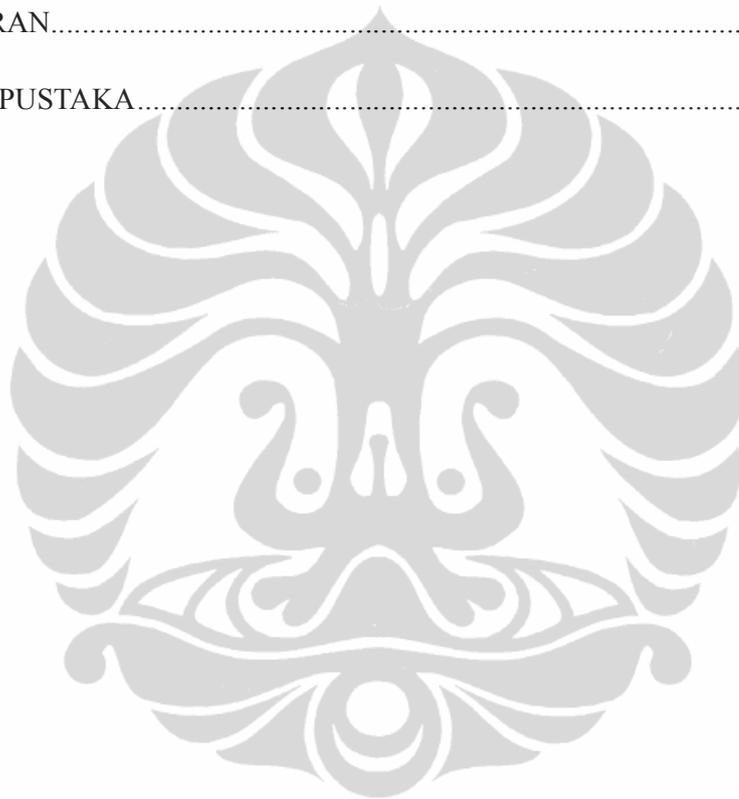
Key word : Fluidized Bed Combustor, air supply, bed, biomass, self sustained combustion.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 JUDUL PENELITIAN	1
1.2 LATAR BELAKANG MASALAH	1
1.3 POKOK PERMASALAHAN.....	4
1.4 TUJUAN PENULISAN	5
1.5 BATASAN MASALAH	5
1.6 METODOLOGI PENULISAN.....	6
1.7 SISTEMATIKA PENULISAN	7
BAB 2 LANDASAN TEORI	8
2.1 ENERGI BIOMASSA.....	8
2.1.1 Jenis-Jenis Biomassa	8
2.1.2 Teknologi Pengkonversian Energi Biomassa.....	9

2.1.3	Kelebihan dan Kekurangan	14
2.2	KARAKTERISTIK BIOMASSA	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 Fluidized Bed Combustor	27
2.4.2	Pinsip Kerja Fluidized Bed Combustor	28
2.4.3	Bagian-Bagian Fluidized Bed Combustor	30
2.5	FENOMENA FLUIDISASI	40
2.5.1	Proses Fluidisasi	40
2.5.2	Kondisi Fluidisasi	41
2.5.3	Jenis-Jenis Fluidisasi	43
2.5.4	Parameter-Parameter Fluidisasi	44
BAB 3 PERSIAPAN DAN PROSEDUR PENGUJIAN		55
3.1	PERSIAPAN PENGUJIAN	55
3.2	STANDAR OPERASI ALAT PENGUJIAN	67
3.2.1	Sistem feeder	67
3.2.2	Blower	69
3.2.3	Sistem burner	71
3.3	PROSEDUR PENGUJIAN PEMBAKARAN	74
3.3.1	Rangkaian Alat Pengujian	75
3.3.2	Prosedur Pengambilan Data Pembakaran	76
BAB 4 HASIL DAN ANALISA		78
4.1	HASIL	78
4.1.1	Pembakaran dengan suplai udara 0,093 m ³ /s	78
4.1.2	Pembakaran dengan suplai udara 0,085 m ³ /s	79

4.2 ANALISA	79
4.2.1 Kondisi pemanasan menuju kondisi kerja	81
4.2.2 Analisa kondisi kerja	83
4.2.3 Analisa pembakaran biomassa pada kondisi kerja	85
4.2.4 Perbandingan daya panas terhadap variasi umpanan	94
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	95
5.1 KESIMPULAN	95
5.2 SARAN	96
DAFTAR PUSTAKA	97



DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Energi Fosil di Indonesia	2
Tabel 1.2 Potensi energi terbarukan Indonesia	3
Tabel 2.1 <i>Ultimate Analysis</i> Beberapa Jenis Biomassa	17
Tabel 2.2 <i>Proximate Analysis</i> Beberapa Jenis Biomassa	18
Tabel 2.3 Nilai LHV Beberapa Jenis Biomassa	18
Tabel 2.4 Jenis-Jenis Bahan Bakar	21
Tabel 3.1 Potensi biomassa di Indonesia	56
Tabel 3.2 <i>Specific Heat</i> berbagai substansi	58
Tabel 3.3 Sifat fisik, termal, dan mekanik pasir silika	59
Tabel 3.4 Distribusi ukuran pengayakan pasir silika	60
Tabel 3.5 Spesifikasi motor <i>feeder</i>	68
Tabel 3.6 Spesifikasi teknis <i>ring blower</i>	70
Tabel 3.7 Spesifikasi teknis <i>Hi-Temp Premixed Burner</i>	74
Tabel 4.1 Temperatur rata-rata pada saat pemanasan awal	82
Tabel 4.2 Temperatur rata-rata pada saat kondisi kerja	84
Tabel 4.3 Temperatur pembakaran bahan bakar 1kg pada 0,093 m ³ /s	86
Tabel 4.4 Temperatur pembakaran bahan bakar 1,25kg pada 0,093 m ³ /s	86
Tabel 4.5 Temperatur pembakaran bahan bakar 1,5kg pada 0,093 m ³ /s	87
Tabel 4.6 Temperatur pembakaran bahan bakar 1 kg pada 0,085 m ³ /s	89
Tabel 4.7 Temperatur pembakaran bahan bakar 1,25kg pada 0,085 m ³ /s	90
Tabel 4.8 Temperatur pembakaran bahan bakar 1,5 kg pada 0,085 m ³ /s	92
Tabel 4.9 Temperatur pembakaran berdasarkan feedrate pada 0,093 m ³ /s	94

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Penggunaan Energi Dunia	1
Gambar 2.1 Chart Teknologi Konversi Biomassa	9
Gambar 2.2 <i>Direct Combustor</i>	10
Gambar 2.3 <i>Proses Gasifikasi</i>	11
Gambar 2.4 <i>Anaerobic Digester</i>	13
Gambar 2.5 <i>Rangkaian Instalasi Biogas</i>	13
Gambar 2.6 Analisis Proximat untuk Beberapa Jenis Bahan Bakar Padat	16
Gambar 2.7 Definisi Analisis Ultimat dan Proximat	17
Gambar 2.8 Skematis <i>Fluidized Bed Combustor</i>	25
Gambar 2.9 Diagram Proses Pencampuran (<i>mixing</i>) dalam <i>Fluidized Bed Combustor</i>	26
Gambar 2.10 Tahapan Proses Kerja <i>Fluidized Bed Combustor</i>	29
Gambar 2.11 Ruang Bakar Utama <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI	30
Gambar 2.12 Perilaku Gelembung Setiap Jenis Distributor	31
Gambar 2.13 Distributor yang Digunakan pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI	32
Gambar 2.14 Jenis-Jenis <i>Solid Flow Control</i>	33
Gambar 2.15 <i>Screw Feeder</i>	34
Gambar 2.16 <i>Burner</i> yang digunakan pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI	35
Gambar 2.17 <i>Cyclone Separator Fluidized Bed Combustor</i> UI	37
Gambar 2.18 Blower Sentrifugal yang Digunakan pada FBC	38
Gambar 2.19 <i>Control Panel</i>	39
Gambar 2.20 <i>Portable Data Acquisition Module</i>	40
Gambar 2.21 Skematik Fluidisasi	41
Gambar 2.22 Hubungan Tinggi Hampan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hampan Zat Padat	42
Gambar 2.23 Hubungan Penurunan Tekanan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hampan Zat Padat	42
Gambar 2.24 Diagram Klasifikasi Jenis-Jenis Pasir	49

Gambar 2.25 Daerah batas fluidisasi	54
Gambar 3.1 Tempurung kelapa	56
Gambar 3.2 Tempurung kelapa hasil <i>crushing</i>	57
Gambar 3.3 Pasir silika mesh 20-40 yang digunakan pada FBC UI	61
Gambar 3.4 Generator set yang digunakan	62
Gambar 3.5 Konfigurasi termokopel	63
Gambar 3.6 <i>Portable Data Acquisition Module</i>	64
Gambar 3.7 Timbangan dengan skala maksimum 5 kg	65
Gambar 3.8 <i>Coconut Shell Crusher</i>	66
Gambar 3.9 <i>Control panel</i> yang digunakan untuk feeder dan blower	67
Gambar 3.10 Sistem feeder pada <i>fluidized bed combustor</i> UI	67
Gambar 3.11 Ring blower pada <i>fluidized bed combustor</i> UI	69
Gambar 3.12 Bagian-bagian <i>hi-temppremixed burner</i>	73
Gambar 3.13 Rangkaian seluruh alat untuk melakukan pengujian pembakaran ..	76
Gambar 4.1 Grafik pembakaran dengan suplai udara 0,093m ³ /s	78
Gambar 4.2 Grafik pembakaran dengan suplai udara 0,085m ³ /s	79
Gambar 4.3 Kondisi kerja FBC UI	80
Gambar 4.4 Grafik Pemanasan dengan suplai udara 0,093m ³ /s	81
Gambar 4.5 Grafik Pemanasan dengan Suplai udara 0,085m ³ /s	81
Gambar 4.6 Distribusi Temperatur pada saat kondisi pemanasan	82
Gambar 4.7 Kondisi kerja dengan suplai udara 0,093 m ³ /s	83
Gambar 4.8 Kondisi kerja dengan suplai udara 0,085 m ³ /s	83
Gambar 4.9 Distribusi temperatur pada saat kondisi kerja	84
Gambar 4.10 Temperatur kerja pada umpanan 1 kg (0,093 m ³ /s)	85
Gambar 4.11 Temperatur kerja pada umpanan 1,25 kg (0,093 m ³ /s)	86
Gambar 4.12 Temperatur kerja pada umpanan 1,5 kg (0,093 m ³ /s)	87
Gambar 4.13 Distribusi temperatur kerja pada umpanan 1 kg; 1,25 kg dan 1,5 kg (0,093m ³ /s)	88
Gambar 4.14 Temperatur kerja pada umpanan 1,5 kg dengan (0,085 m ³ /s)	89
Gambar 4.15 Temperatur kerja pada umpanan 1,25 kg dengan (0,085 m ³ /s)	90

Gambar 4.16 Temperatur kerja pada umpanan 1,5 kg (0,085 m ³ /s)	91
Gambar 4.17 Distribusi temperatur kerja pada umpanan 1 kg; 1,25 kg dan 1,5 kg (0,085m ³ /s)	92
Gambar 4.18 Distribusi temperatur kerja pada umpanan 1,5 kg (0,085 m ³ /s dan 0,093 m ³ /s)	93
Gambar 4.19 Grafik Daya Panas yang Dihasilkan terhadap variasi feedrate bahan bakar	94



BAB I

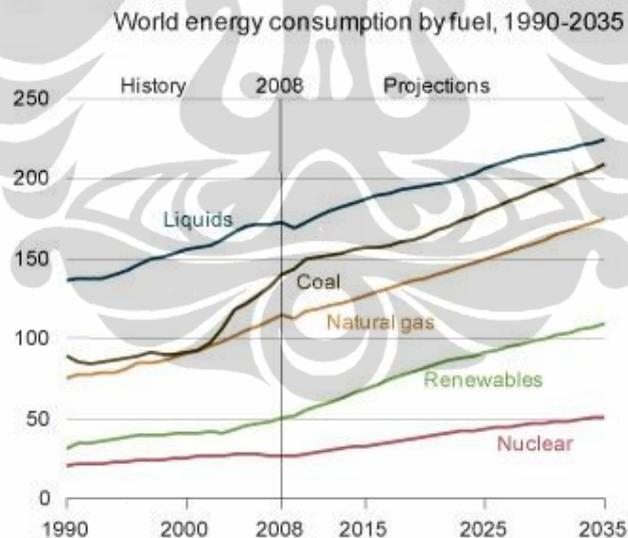
PENDAHULUAN

1.1 Judul Penelitian

Studi variasi suplai udara blower untuk pencapaian pembakaran mandiri pada eksperimen uji bahan bakar fluidized bed combustion.

1.2 Latar Belakang Masalah

Pertambahan penduduk dunia yang cepat dan kemajuan teknologi mendorong meningkatnya konsumsi energi di dunia, khususnya negara maju dan berkembang. Dalam laporan rutin yang dikeluarkan oleh *International Energy Agency* (IEA) pada tahun 2004 diperkirakan peningkatan konsumsi energi akan terus meningkat dengan kenaikan rata-rata 1.6% setiap tahunnya. Sementara itu sebuah laporan yang diterbitkan oleh suatu perusahaan minyak *British Petroleum* (BP) pada tahun 2005 tentang konsumsi energi di seluruh dunia disebutkan bahwa peningkatan konsumsi energi antara tahun 2003 dan 2004 mengalami kenaikan sebesar 43%.



Gambar 1.1 Penggunaan Energi Dunia

Sumber : International Energy Outlook 2011 Highlights, U.S Energy Information Administration (<http://www.eia.gov/oiaf/ieo/highlights.html>)

Sesuai dengan data yang dipaparkan oleh Administrasi Informasi Energi Amerika Serikat pada artikelnya yang bertajuk *International Energy Outlook*

2011, saat ini penggunaan bahan bakar fosil dengan bentuk cair masih mendominasi dan tetap akan mendominasi hingga lebih dari 20 tahun ke depan. Ketergantungan manusia terhadap bahan bakar fosil bukan merupakan sesuatu yang baik, karena bahan bakar fosil merupakan energi yang tidak dapat diperbaharui sehingga dapat habis suatu saat nanti. Ketergantungan manusia terhadap bahan bakar fosil dapat menjadi berbahaya jika pada saat bahan bakar itu habis, manusia belum dapat menemukan sumber energi pengganti yang dapat diandalkan sebagai sumber kehidupan umat manusia.

Indonesia sebagai negara keempat dengan penduduk terbanyak di dunia (PBB, dirilis dalam artikel *World population prospects: 2010 revision*) memiliki tantangan dalam memenuhi kebutuhan energi penduduknya. Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia (ESDM) menyebutkan bahwa energi terbesar yang digunakan di Indonesia saat ini adalah energi yang berasal dari fosil. Sementara menurut ESDM, cadangan energi fosil yang dimiliki oleh bumi Indonesia akan habis berkisar antara dua puluh empat hingga seratus tahun lagi bergantung dari jenis bahan-bakarnya.

Tabel 1.1 Energi Fosil di Indonesia

EnergiFosil	SumberDaya	Cadangan	<u>Produksi</u> tahun	Rasio* $\frac{\text{Cadangan}}{\text{Produksi}}$
Minyak bumi	56,6 MilyarBarel	8,4 MilyarBarel**	348 JutaBarel	24 tahun
Gas bumi	334,5 TSCF	165 TSCF	2,79 TSCF	59 tahun
Batubara	90,5 Milyar Ton	18,7 MilyarTon	201 Juta Ton	93 tahun
CBM (Gas)	453 TSCF	-	-	-

* Tidak ada temuan cadangan baru

**Termasuk blok Cepu

Sumber: Presentasi Menteri ESDM, 11 April 2008.

Tabel 1.1 menunjukkan bahwa cadangan minyak bumi yang dimiliki Indonesia berada di angka 8,4 Milyar Barel. Dengan jumlah produksi 348 juta per tahun, maka cadangan minyak bumi hanya menyisakan penggunaan selama 24 tahun lagi. Kemudian gas bumi dengan cadangan 165 TSCF dan jumlah produksi per tahun sebesar 2,79 TSCF menyisakan penggunaan selama 59 tahun lagi. Batu bara yang dimiliki Indonesia memiliki cadangan cukup tinggi yaitu sebesar 18,7 milyar ton dengan produksi sekitar 201 juta ton per tahun sehingga diprediksi masih bisa bertahan sekitar 93 tahun lagi. Namun, perhitungan rasio cadangan berbanding produksi tersebut diasumsikan memiliki produksi yang sama setiap tahunnya. Jika terjadi pertumbuhan produksi dan penggunaan seperti yang ditunjukkan pada gambar 1.1, di setiap tahunnya, maka cadangan bahan bakar fosil tersebut akan lebih cepat habis. Kondisi ini akan menyebabkan krisis energi dan perlu dicari solusi untuk mengatasinya. Pemerintah Republik Indonesia menjawab situasi ini dengan mengeluarkan Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional untuk mengembangkan sumber energi alternatif sebagai pengganti BBM. Kebijakan tersebut tidak hanya menekankan untuk menggunakan batu bara dan gas sebagai pengganti bahan bakar minyak, namun juga menekankan untuk menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui untuk memenuhi kebutuhan energi nasional.

Data yang dikeluarkan oleh ESDM menunjukkan Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang cukup besar.

Tabel 1.2 Potensi energi terbarukan Indonesia

Energi Non Fosil	SumberDaya	Setara	KapasitasTerpasang
Tenaga Air	845 Juta SBM	75,67 GW	4,2000 GW
Panas Bumi	219 Juta SBM	27,00 GW	1,0400 GW
Mini/MikroHidro	0,45 GW	0,450 GW	0,0840 GW
Biomassa	49,81 GW	49,81 GW	0,3000 GW
Tenaga Surya	-	4,80 kWh/m ² /day	0,0080 GW
Tenaga Angin	9,29 GW	9,290 GW	0,0005 GW

Sumber: Presentasi Menteri ESDM, 11 April 2008

Dari data yang ditunjukkan pada tabel 1.2, air dan biomassa menempati dua posisi teratas yang memiliki sumber daya di bumi Indonesia. Energi biomassa memiliki keunggulan dalam hal penanaman investasi yang lebih terjangkau dibanding energi lainnya. Di Indonesia, pemanfaatan biomassa berkisar pada pemanfaatan 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 sumber energi biomassa. Sedangkan potensi energi biomassa yang lain seperti tempurung kelapa dan sabut kelapa, sekam padi, limbah kayu dan ranting masih belum banyak dilirik sebagai sumber energi. Pemanfaatan biomassa perlu mendapatkan perhatian dalam teknik pengolahannya. Pembakaran biomassa secara langsung memiliki kelemahan yakni efisiensi yang dihasilkan sangat rendah. Oleh karena itu, perlu diterapkan beberapa teknologi untuk meningkatkan manfaat biomassa sebagai bahan bakar. Teknologi pembakaran yang mudah, efisien serta biaya investasinya cukup rendah. Teknologi fluidized bed combustion memenuhi kriteria tersebut.

Fluidized bed combustor (FBC) merupakan salah satu teknologi pembakaran yang memiliki keunggulan mengkonversi berbagai jenis bahan bakar baik sampah maupun biomassa yang sulit untuk diproses dengan metode lain. Teknologi ini menggunakan konsep turbulensi pada benda padat yang terjadi pada proses pembakaran yang memiliki perpindahan panas dan massa yang tinggi. Teknologi ini telah diperkenalkan sejak abad kedupuluh, dan saat ini telah diaplikasikan untuk mengubah biomassa menjadi energi yang efisien. Keunggulan teknologi ini adalah laju pembakaran yang cukup tinggi dan dapat memproses bahan bakar yang memiliki kadar air tinggi.

Potensi biomassa yang melimpah di Indonesia diikuti dengan teknologi FBC membuat penelitian mengenai teknologi FBC menjadi menarik sekaligus memiliki potensi kembang yang tinggi untuk dilakukan.

1.3 Pokok Permasalahan

Fluidized bed combustion merupakan teknologi yang masih dapat dikembangkan secara maksimal di berbagai aspek. Pada alat FBC Universitas

Indonesia, pemanasan pasir awal menggunakan burner membutuhkan waktu yang cukup lama. Hal ini disebabkan oleh jauhnya jarak antara burner dan pasir. Oleh karena itu, dilakukan modifikasi terhadap alat ini. Modifikasi yang dilakukan adalah penyempurnaan desain distributor menjadi lebih tinggi, sehingga dapat menaikkan tinggi pasir sehingga semakin dekat dengan burner.

Selain modifikasi distributor akan dilakukan juga percobaan menggunakan flowrate udara yang ditiupkan dari bawah pasir dengan angka yang berbeda. Dengan percobaan ini diharapkan dapat diketahui penggunaan angka flow rate yang tepat untuk FBC UI ini.

1.4 Tujuan Penulisan

Penulisan skripsi ini ditujukan sebagai salah satu syarat untuk kelulusan Sarjana Strata Satu Teknik Mesin Universitas Indonesia. Selain itu, tujuan penulisan skripsi ini adalah mengetahui pengaruh penggunaan suplai udara yang berbeda pada blower terhadap performa pembakaran di FBC UI.

1.5 Batasan Masalah

Pembatasan masalah pada penelitian ini yaitu:

- a. Variasi suplai udara yang digunakan adalah $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ dan $0,093 \text{ m}^3/\text{s}$.
- b. Analisa mengenai perbedaan temperatur kerja pada saat pemanasan menuju kondisi kerja *self sustaining combustion* pada suplai udara yang berbeda.
- c. Analisa mengenai perbedaan temperatur kerja pada saat kondisi kerja *self sustaining combustion* di masing-masing percobaan dengan suplai udara yang berbeda.
- d. Analisa pembakaran tempurung kelapa pada kondisi kerja (*self sustaining combustion*) di masing-masing percobaan dengan suplai udara yang berbeda.

1.6 Metodologi Penelitian

Uji pembakaran dengan bahan bakar tempurung kelapa

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

1.7 Sistematika Penulisan

Penulisan skripsi ini akan dibagi menjadi lima bab, yaitu :

Bab I Pendahuluan

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

Bab II Landasan Teori

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

Bab III Persiapan dan Prosedur Pengujian

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

Bab IV Hasil & Analisa

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

Bab V Kesimpulan & Saran

Bab ini membahas mengenai kesimpulan dan saran dari pengujian *Fluidized Bed Combustor* dengan bahan bakar tempurung kelapa.

BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1 Energi Biomassa

Energi Biomassa adalah energi yang berasal dari material organik, misalnya tumbuhan dan hewan, oleh karena itu energi ini merupakan bagian dari energi terbarukan. Energi ini juga merupakan energi yang ramah lingkungan karena menghasilkan emisi gas buang yang jauh lebih sedikit dibandingkan emisi gas buang bahan bakar fosil.

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

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

2.1.1 Jenis-Jenis Biomassa

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

2.1.1.1 Solid Biomassa

Bahan dasar yang digunakan berasal dari material organik kering seperti misalnya pohon, sisa-sisa tumbuhan, 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

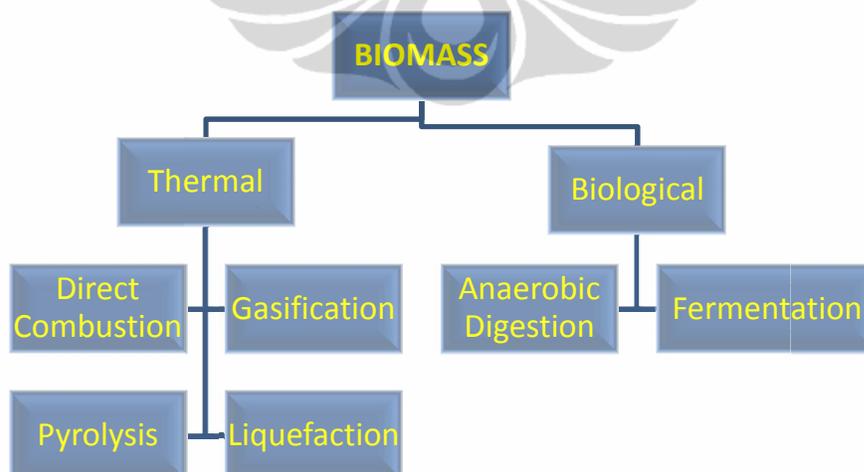
Biogas berasal dari material organik yang telah melewati proses fermentasi atau anaerob digesting oleh bakteri pada kondisi udara kekurangan oksigen yang kemudian menghasilkan gas yang dapat terbakar (*combustable gas*).

2.1.1.3 Liquid Biofuel

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

2.1.2 Teknologi Pengkonversian Energi Biomassa

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



Gambar 2.1 Chart Teknologi Konversi Biomassa

2.1.2.1 Proses Thermal

Ada 3 proses pemanasan dalam menghasilkan energi biomassa, yaitu:

1. *Direct Combustor*

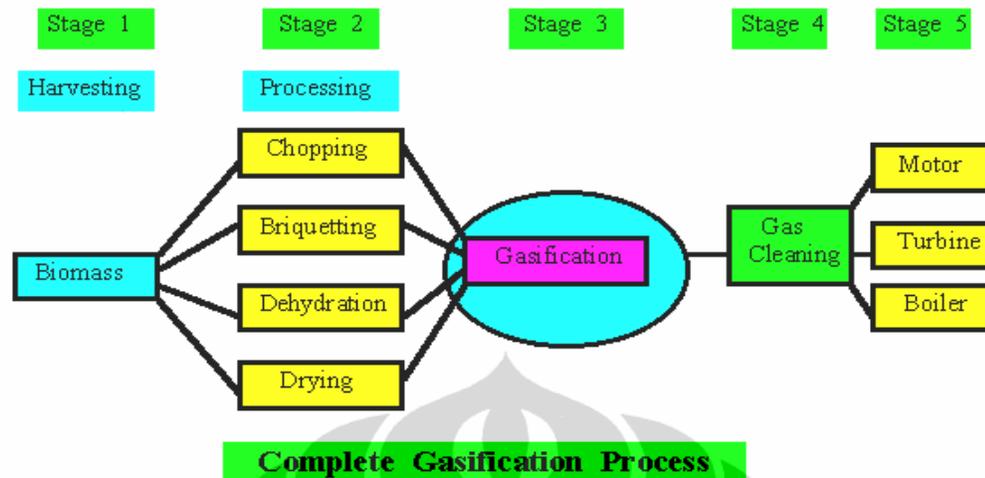
Pada proses ini material organik (biomassa) dilakukan pembakaran secara langsung. Agar efisiensi pembakaran baik, dilakukan pengeringan (*drying*) untuk menghilangkan kadar air pada material organik. Salah satu aplikasi dari *direct combustor* adalah kompor masak yang menggunakan kayu bakar.



Gambar 2.2 *Direct Combustor*

2. *Gasification*

Gasifikasi adalah proses pembentukan gas yang dapat terbakar yang berasal dari material organik, seperti kayu, gabah/sampah pertanian yang dipanaskan dan dibakar dengan keadaan oksigen $\frac{1}{3}$ dari jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk pembakaran penuh. Pembakaran dengan keadaan kekurangan oksigen inilah yang disebut dengan *pyrolysis*. Proses ini menghasilkan gas yang dapat terbakar seperti H_2 , CH_4 , CO , N_2 , dan gas-gas lain yang tak dapat terbakar.



Gambar 2.3 Proses Gasifikasi(sumber : <http://www.w3.org>)

Secara umum ada 3 sesi proses gasifikasi biomassa:

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

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

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

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

3. *Pyrolysis*

Pyrolysis adalah pemanasan dan pembakaran dengan keadaan sedikit atau 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°C , air akan terpisah dan dibuang, *Pyrolysis* sesungguhnya terjadi pada suhu antara 400 sampai 600°C , *Pyrolysis* menghasilkan banyak karbon dioksida, tar, dan sedikit metil alkohol.

4. *Liquefaction*

Liquefaction adalah proses pembentukan cairan dari suatu gas. Pembentukan gas ini dengan tujuan agar bahan bakar gas mudah untuk ditransportasikan. Banyak macam gas yang hanya membutuhkan pendinginan untuk membuatnya menjadi bentuk cairan. LPG adalah salah satu bentuk dari *liquefaction*

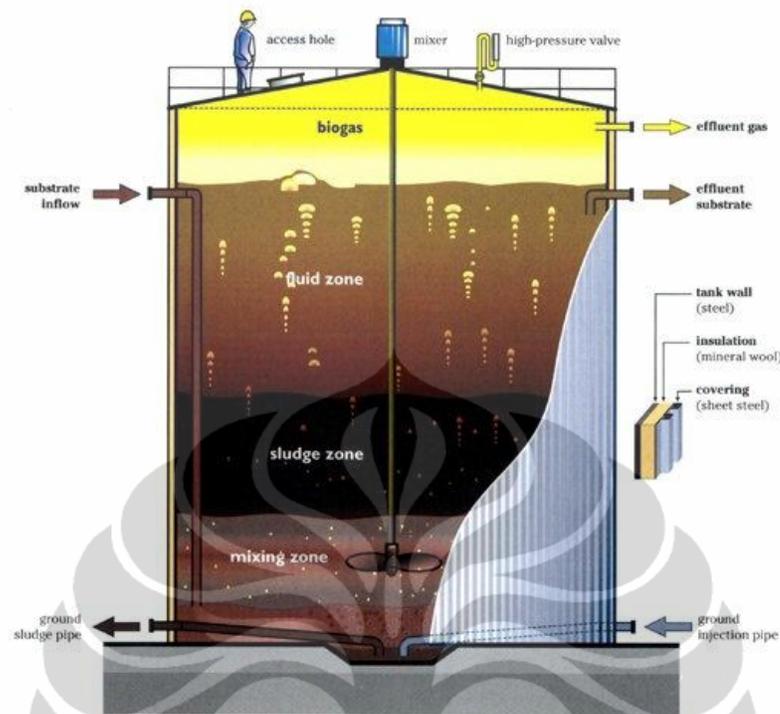
2.1.2.2 Proses Biologis

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

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

1. *Anaerobic Digestion*

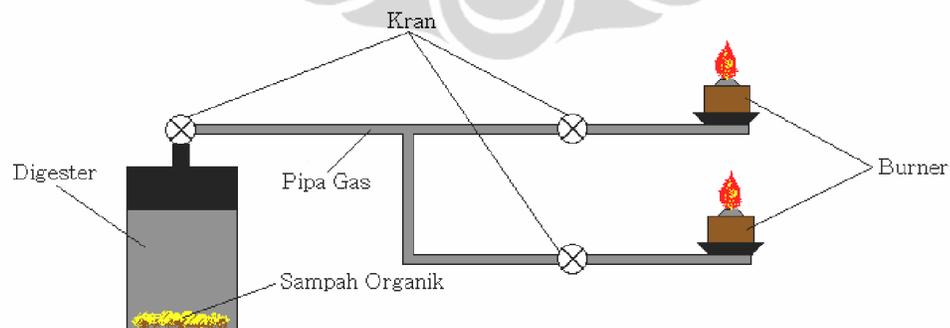
Proses ini adalah proses yang mengikutsertakan mikroorganisme untuk menguraikan material dengan kondisi tanpa oksigen. Proses ini dapat digunakan pada sampah organik dan juga kotoran hewan. *Anaerobic digestion* merupakan proses yang kompleks. Pertama-tama, mikro organisme mengubah material organik kedalam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



Gambar 2.4 Anaerobic Digester

(sumber: http://www.daviddarling.info/encyclopedia/A/AE_anaerobic_bacteria.html)

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



Gambar 2.5 Rangkaian Instalasi Biogas

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

1. *Hydrolysis*

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

2. *Fermentasi*

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

3. *Acetogenesis*

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

4. *Methanogenesis*

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

2. Fermentasi

Fermentasi adalah proses produksi energi dalam sel dalam keadaan anaerobik (tanpa oksigen). Secara umum, fermentasi adalah salah satu bentuk respirasi anaerobik.

2.1.3 Kelebihan dan Kekurangan

Energi biomassa memiliki kelebihan dan kekurangan beberapa diantaranya yaitu:

Kelebihan energy 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 combustion* akan menghasilkan gas karbon dioksida dan gas penyebab efek rumah kaca lain yang merupakan penyebab pemanasan global.
2. Membutuhkan energi yang lebih banyak untuk memproduksi biomassa dan mengumpulkannya dari pada energi yang dapat dihasilkan.
3. Masih merupakan sumber energi yang mahal dalam memproduksi, mengumpulkan, dan mengubahnya kedalam bentuk energi yang lain

2.2 Karakteristik Biomassa

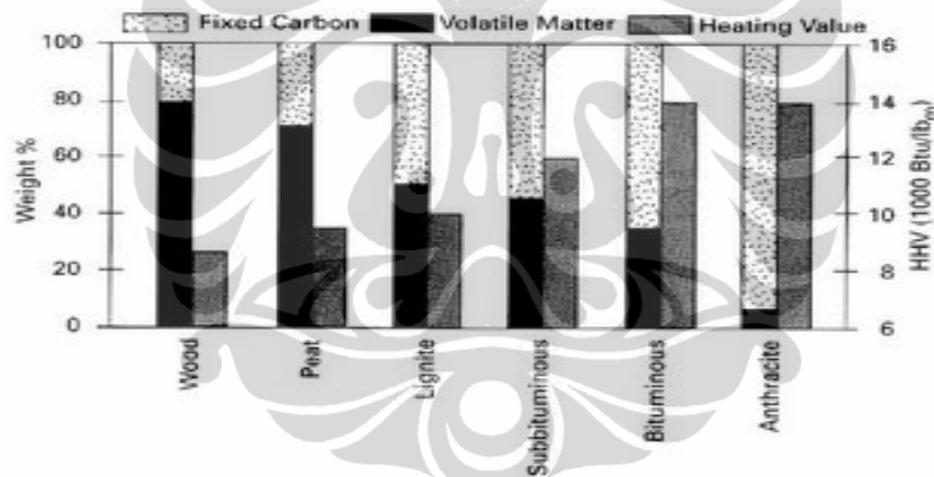
Potensi biomassa yang melimpah merupakan solusi energi masa depan karena dapat dikategorikan sebagai “*green and sustainable energi*” yaitu pemanfaatannya yang bersifat ramah lingkungan dan keberadaannya melimpah di dunia khususnya di Indonesia. Untuk pemanfaatan dengan cara *indirect combustor*, biomassa dikenal sebagai *zero CO₂ emission*, dengan kata lain tidak menyebabkan akumulasi CO₂ 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 1/2 dari energi 1 kg *gasoline*. Nilai kalor berhubungan langsung dengan kadar C dan H yang dikandung oleh bahan bakar padat. Semakin besar kadar keduanya akan semakin besar nilai kalor yang dikandung. Menariknya dengan proses *charing* (pembuatan arang), nilai kalor arang yang dihasilkan akan meningkat cukup tajam. Sebagai gambaran, dari hasil proses pembuatan arang tempurung 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.

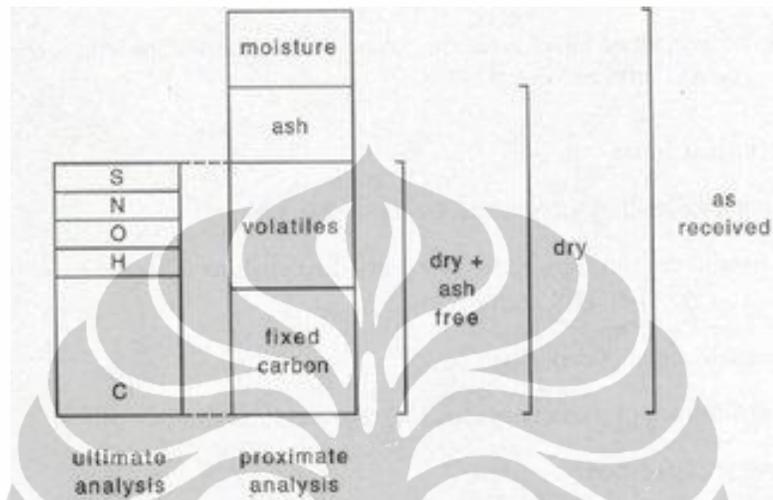
Biomassa mempunyai kadar *volatile* yang tinggi (sekitar 60-80%) dibanding kadar *volatile* pada batubara, maka biomas lebih reaktif dibanding batubara. Perbandingan bahan bakar (FR) dinyatakan sebagai perbandingan kadar karbon dengan kadar *volatile*. Untuk batubara, FR $\sim 1 - 10$. Untuk gambut, 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 2.6 Analisis Proximat untuk Beberapa Jenis Bahan Bakar Padat.

Pada analisis *proximate* 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. Abu dari biomassa lebih ramah dibandingkan abu dari batubara karena banyak mengandung mineral seperti fosfat dan *potassium*. Pada saat pembakaran maupun gasifikasi, abu dari biomas juga lebih aman dibandingkan abu dari batubara. Dengan temperatur operasi tidak lebih dari

950°C atau 1000°C. Abu biomassa mempunyai jumlah oksida keras (silica dan alumina) yang lebih rendah.



Gambar 2.7 Definisi Analisis Ultimat dan Proximat.

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

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

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

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

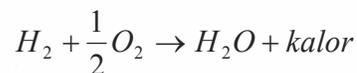
<i>Solid Waste</i>	<i>Moisture</i>	<i>Volatile</i>	<i>Fixed Carbon</i>	<i>Non Comb.</i>
Daun	9.97	66.92	19.29	3.82
Cangkang Kelapa	7,8	80,8	18,8	0,4
Ranting Pohon	20	67.89	11.31	0.8
Kertas	10.24	75.94	8.44	5.38

Tabel 2.3 Nilai LHV Beberapa Jenis Biomassa

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

2.3 Sistem Reaksi Pembakaran

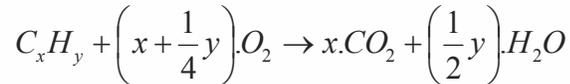
Pembakaran adalah sebuah reaksi antara oksigen dan bahan bakar yang menghasilkan panas. Oksigen diambil dari udara yang berkomposisi 21 % oksigen serta 79 % nitrogen (persentase volume), atau 77 % oksigen serta 23 % nitrogen (persentase massa). Unsur terbanyak yang terkandung dalam bahan bakar adalah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



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

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

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



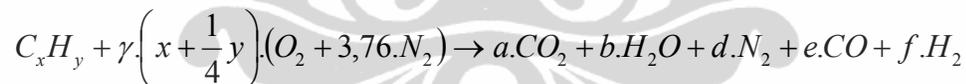
Nilai dari x dan y di atas bergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan. Nilai x adalah fraksi massa untuk kandungan *Carbon*, dan y fraksi massa untuk kandungan *Hydrogen* dalam bahan bakar.

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



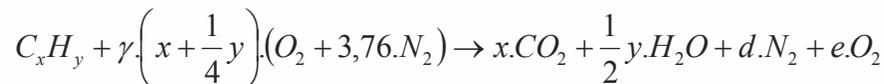
Namun, ada kalanya juga proses pembakaran tidak terjadi pada komposisi ideal antara bahan bakar dengan udara. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, proses yang tidak pada kondisi ideal ini bisa terbagi menjadi dua, yaitu pembakaran kaya dan pembakaran miskin.

- Proses pembakaran-kaya



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

- Proses pembakaran-miskin



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

2.3.1 Hal-Hal Yang Harus Diperhatikan Dalam Proses Pembakaran

Sebelumnya telah dibahas reaksi kimia pembakaran secara teoritis. Namun pada kenyataannya, proses pembakaran ini akan menghasilkan gas-gas atau sisa-sisa hasil pembakaran lainnya yang tidak disebutkan pada reaksi tersebut. Untuk memperoleh hasil pembakaran yang baik, maka proses pembakaran harus memperhatikan parameter-parameter seperti *mixing* (pencampuran), udara, temperatur, waktu, dan kerapatan. Berikut ini merupakan hal-hal yang harus diperhatikan dalam proses pembakaran, yaitu :

1. Mixing

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

2. Udara

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

3. Temperatur

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

4. Waktu

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

5. Kerapatan

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

2.3.2 Komponen-Komponen Utama Reaksi Pembakaran

Suatu reaksi pembakaran memiliki 3 komponen utama, yaitu :

1. Zat yang dibakar

Unsur-unsur kimia pada bahan bakar yang berpotensi memberikan energi kalor adalah karbon, oksigen, hidrogen, dan sulfur. Setiap bahan bakar memiliki kandungan energi kalor yang dinyatakan dalam jumlah karbon. Jenis bahan bakar dibedakan menjadi tiga bentuk, seperti pada tabel 2.1.

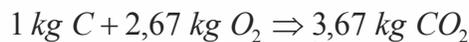
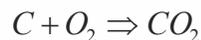
Tabel 2.4 Jenis-Jenis Bahan Bakar

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

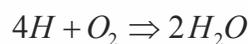
2. Zat yang membakar

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

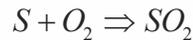
- Karbon terbakar sempurna akan membentuk CO_2 menurut persamaan :



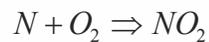
- Hidrogen terbakar sempurna akan membentuk H_2O menurut persamaan :



- Belerang terbakar akan membentuk SO_2 menurut persamaan :



- Nitrogen terbakar membentuk NO_2 menurut persamaan :



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

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

Kebutuhan udara dalam proses pembakaran dapat diklasifikasikan menjadi sebagai berikut :

- Udara primer

Udara yang bercampur dengan bahan bakar dalam ruang bakar.

- Udara sekunder

Udara yang masuk dari sekeliling ruang bakar.

- Udara tersier

Udara yang menembus celah pada ruang bakar.

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

Nilai *excess air* ini dapat ditulis sebagai berikut :

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

keterangan : $m = \text{excess air}$

$A_o =$ 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 (*combustion product*), atau biasa disebut juga sebagai gas buang.

2.4 Fluidized Bed Combustor

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

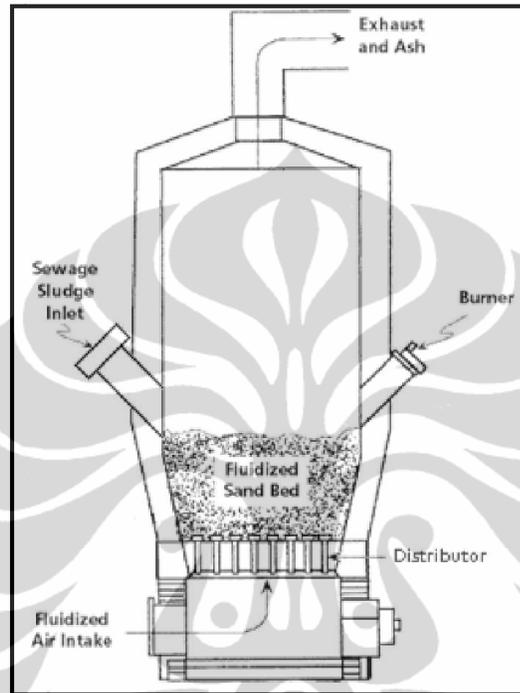
Hampan pasir yang menjadi media pengaduk diletakkan di atas *distributor* yang berupa grid logam dengan dilapisi bahan tahan api. Grid ini berisi suatu pelat

berpori berisi nosel-nosel injeksi udara atau *tuyere* di mana udara dialirkan ke dalam ruang bakar untuk menfluidisasi hampan (*bed*) tersebut. Aliran udara melalui nosel hampan terfluidisasi sehingga berkembang menjadi dua kali volume sebelumnya. Fluidisasi meningkatkan pencampuran dan turbulensi serta laju perpindahan panas yang terjadi. Bahan bakar bantu digunakan selama pemanasan awal untuk memanaskan hampan sampai temperatur operasi sekitar 600 sampai 900°C sehingga pembakaran dapat terjaga pada temperatur konstan. Dalam beberapa instalasi, suatu sistem *water spray* digunakan untuk mengendalikan suhu ruang bakar.

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

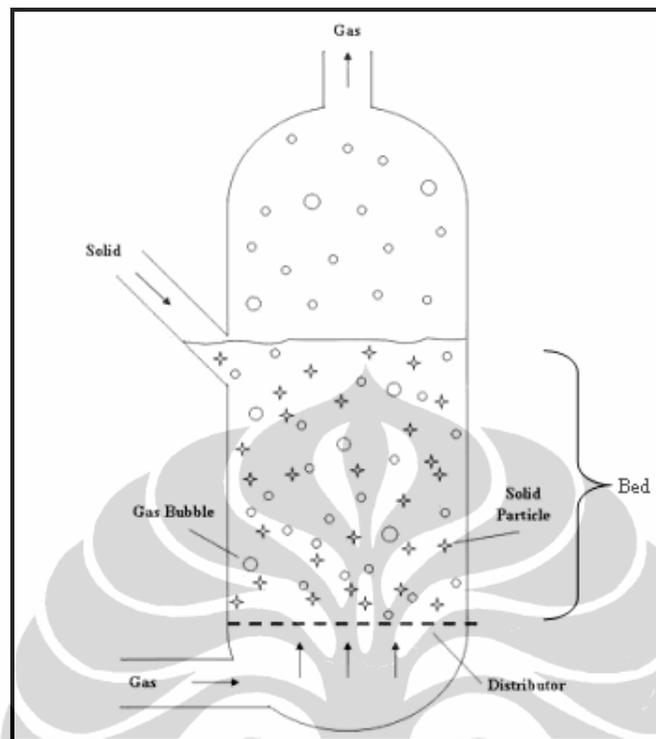
Pembakaran dengan teknologi *fluidized bed* merupakan satu rancangan alternatif untuk pembakaran limbah padat. Teknologi ini telah diaplikasikan untuk berbagai macam bahan bakar padat seperti biofuel, batu bara, serta limbah, baik itu limbah organik maupun anorganik. Bahan bakar padat yang sudah dalam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

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



Gambar 2.8 Skematis *Fluidized Bed Combustor*

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



Gambar 2.9 Diagram Proses Pencampuran (*mixing*) dalam *Fluidized Bed Combustor*

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

2.4.1 Jenis-Jenis *Fluidized Bed Combustor*

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

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

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

2.4.2 Pinsip Kerja *Fluidized Bed Combustor*

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

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

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

1. Kondisi awal

Pada kondisi awal, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.10a, ruang bakar masih pada temperatur ruang. Pasir sebagai media pengaduk sekaligus pertukaran kalor dituang ke dalam ruang bakar.

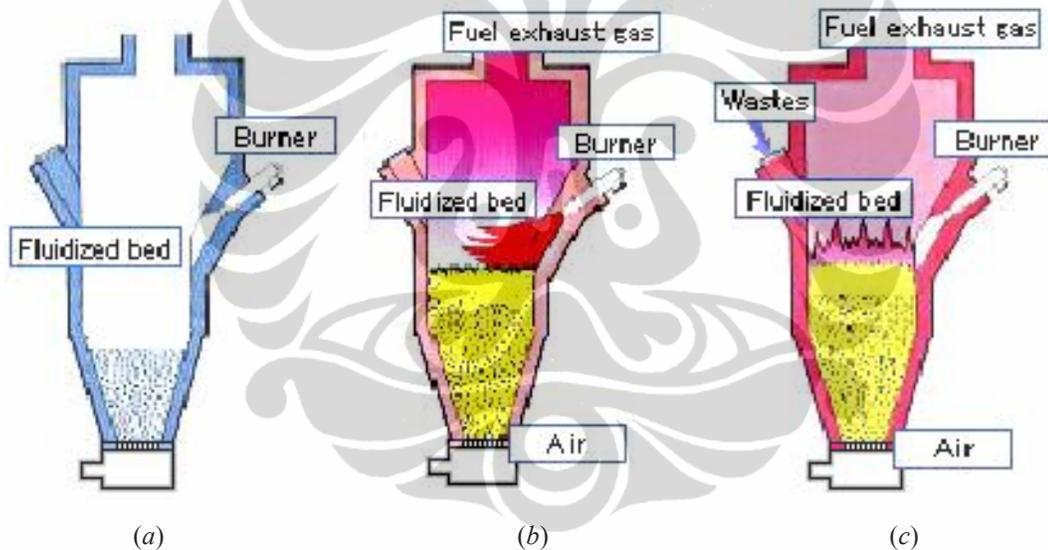
2. Proses pemanasan

Pada tahapan proses pemanasan, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.10b, 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 kerja

Pada kondisi operasi, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.10c, temperatur ruang bakar pada hampan sudah mencapai temperatur operasi. Pada kondisi ini bahan bakar bantu tidak dipakai lagi, burner dimatikan. Temperatur ruang bakar terjaga konstan dengan laju pengumpanan sampah yang tetap. Kecepatan udara dari blower dinaikkan sampai pada kecepatan pengoperasian maksimum. Sampah akan terbakar sendiri pada kondisi ini karena panas yang diberikan oleh pasir sudah melewati temperatur nyala dari sampah.

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



Gambar 2.10 Tahapan Proses Kerja *Fluidized Bed Combustor*;

- (a) Tahapan pada Kondisi Awal;
- (b) Tahapan Proses Pemanasan;
- (c) Tahapan pada Kondisi Operasi.

2.4.3 Bagian-Bagian *Fluidized Bed Combustor*

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

2.4.3.1 *Fluidization Vessel*

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

1. Ruang Bakar

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

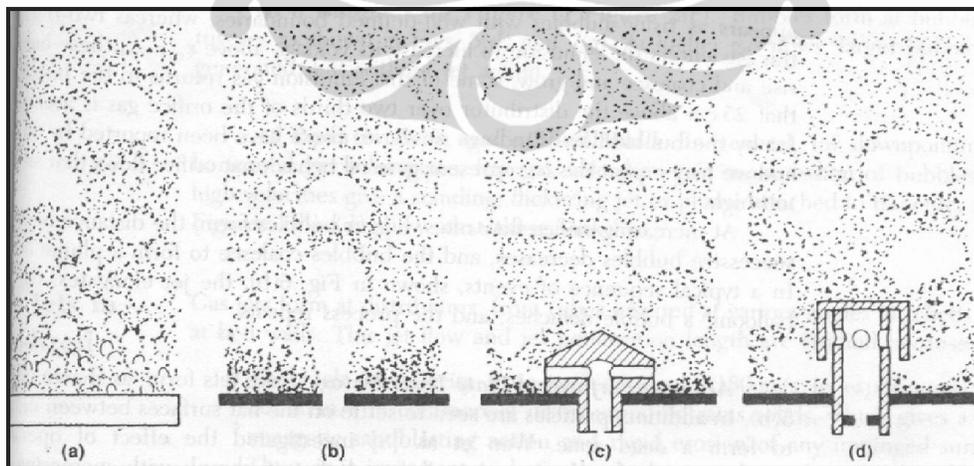


Gambar 2.11 Ruang Bakar Utama *Fluidized Bed Combustor* UI

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

2. Distributor

Distributor digunakan untuk untuk mendistribusikan aliran udara dari blower secara seragam pada keseluruhan penampang reaktor sehingga hamparan pasir yang ditopang oleh distributor tersebut terjadi fluidisasi. Distributor ini juga memiliki pengaruh terhadap ukuran dan jumlah *bubble* yang dihasilkan. Terdapat beberapa jenis distributor yang sering digunakan, yaitu *porous plate*, *perforated plate*, *nozzle-type tuyere*, dan *bubble cap tuyere*. Masing-masing jenis distributor tersebut dapat menghasilkan perilaku gelembung yang berbeda-beda seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.12:



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



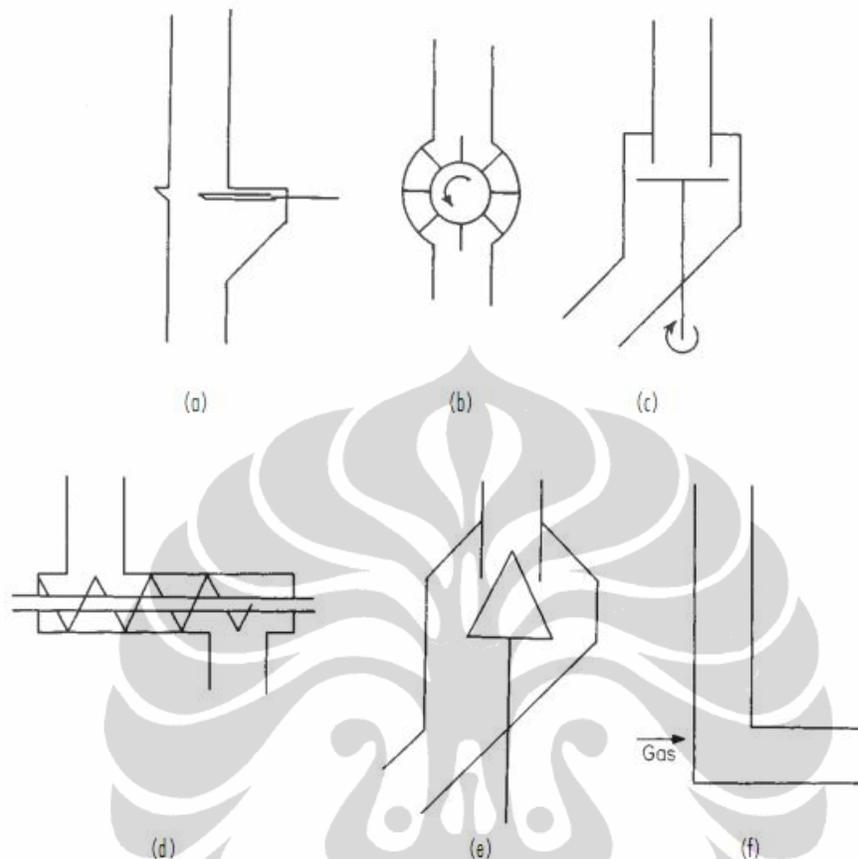
Gambar 2.13 Distributor yang Digunakan pada *Fluidized Bed Combustor* UI

3. *Plenum*

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

2.4.3.2 *Solid Feeder*

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



Gambar 2.14 Jenis-Jenis *Solid Flow Control*; (a) *Slide Valve* (b) *Rotary Valve*; (c) *Table Feeder*; (d) *Screw Feeder*; (e) *Cone Valve*; (f) *L Valve*

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

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



Gambar 2.15 *Screw Feeder*

2.4.3.3 Burner

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

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



Gambar 2.16 *Burner* yang digunakan pada *Fluidized Bed Combustor* UI

2.4.3.4 *Bed Material*

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

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

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

Untuk tujuan fluidisasi yang baik, sebaiknya menggunakan pasir silika atau pasir kuarsa dengan ukuran diameter $400 - 700 \mu m$. Pasir jenis ini dapat diklasifikasikan diantara grup B. Pasir kuarsa dan pasir silika tidak jauh berbeda kandungannya, keduanya sama-sama memiliki kandungan SiO_2 . Kedua pasir tersebut berasal dari batuan yang sangat keras sehingga sangat cocok digunakan untuk penggunaan pada temperatur tinggi dan sebagai media pemindah panas.

2.4.3.5 Cyclone separator

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

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

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



Gambar 2.17 *Cyclone Separator Fluidized Bed Combustor UI*

2.4.3.6 Blower

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



Gambar 2.18 Blower Sentrifugal yang Digunakan pada FBC

2.4.3.7 Instrumentation

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

1. Control Panel

Berfungsi untuk mengontrol putaran feeder dan putaran blower.



Gambar 2.19 Control Panel

2. Termokopel

Berfungsi untuk mengukur temperatur di dalam ruang bakar.

3. Portable Data Acquisition Module

Berfungsi sebagai pengkonversi suhu dari analog ke digital yang dihubungkan dengan suatu perangkat komputer, dan data keluaran temperatur akan ditampilkan pada layar komputer.

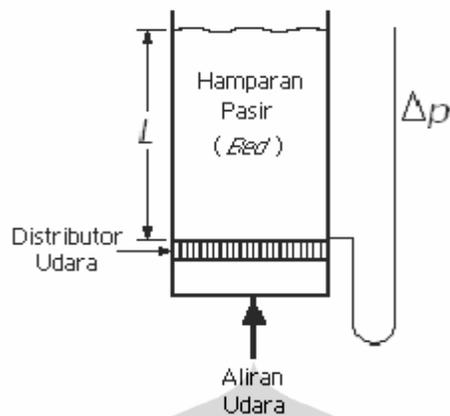


Gambar 2.20 *Portable Data Acquisition Module*

2.5 Fenomena Fluidisasi

2.5.1 Proses Fluidisasi

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

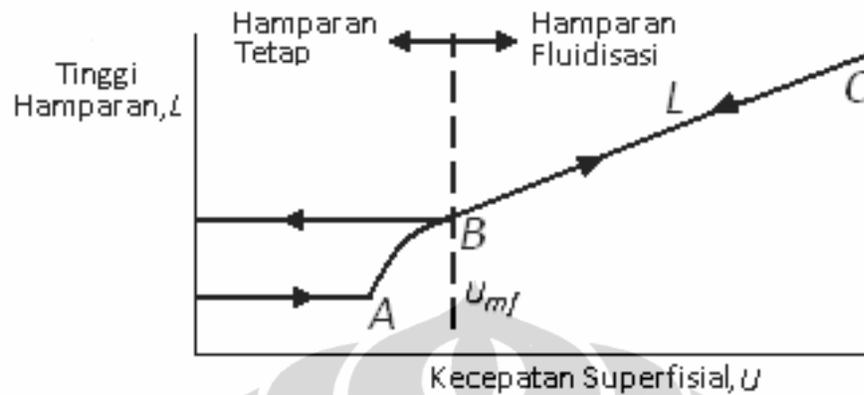


Gambar 2.21 Skematik Fluidisasi

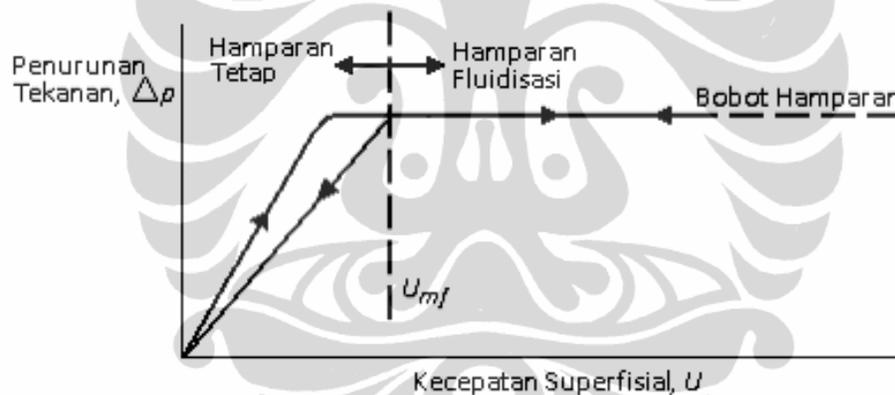
2.5.2 Kondisi Fluidisasi

Perhatikan suatu tabung vertikal yang sebagian berisi dengan bahan butiran, sebagaimana terlihat dalam skema gambar. Tabung itu turbulen pada bagian atas, dan mempunyai plat berpori pada bagian bawah untuk menopang pasir di atasnya serta untuk menyebarkan aliran secara seragam pada keseluruhan penampang. Udara dimasukkan di bawah plat distribusi atau distributor (penyebar udara) dengan laju lambat, dan naik ke atas melalui hamparan tanpa menyebabkan terjadinya gerakan pada partikel. Jika partikel itu cukup kecil, aliran di dalam saluran-saluran di antara partikel-partikel dalam hamparan itu akan bersifat laminar. Jika kecepatan itu berangsur-angsur dinaikkan, penurunan tekanan (*pressure drop*) akan meningkat, tetapi partikel-partikel itu masih tetap tidak bergerak dan tinggi hamparan pun tidak berubah.

Pada kecepatan tertentu, penurunan tekanan melintas hamparan itu akan mengimbangi gaya gravitasi yang dialaminya; dengan kata lain, mengimbangi bobot hamparan, dan jika kecepatan masih dinaikkan lagi, partikel itu akan mulai bergerak. Titik ini digambarkan oleh titik *A* pada grafik gambar 2.22. 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 2.22 dan 2.23), akan tetapi tinggi hamparan bertambah terus jika aliran ditingkatkan lagi.



Gambar 2.22 Hubungan Tinggi Hambaran Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hambaran Zat Padat



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

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

2.5.3 Jenis-Jenis Fluidisasi

2.5.3.1 Fluidisasi partikulat (*particulate fluidization*)

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

Ketika fluida cairan seperti air dan padatannya berupa kaca, gerakan dari partikel saat fluidisasi terjadi dalam ruang sempit dalam hamparan. Seiring dengan bertambahnya kecepatan fluida dan penurunan tekanan, maka hamparan akan 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 “hampan didih” (*boiling bed*).

Perilaku hampan fluidisasi gelembung sangat bergantung pada banyaknya dan besarnya gelembung gas dan ini tidak mudah meramalkannya. Ukuran rata-rata gelembung itu bergantung pada jenis dan ukuran partikel, jenis plat distributor, kecepatan superfisial, dan tebalnya hampan. Gelembung-gelembung cenderung bersatu, dan menjadi besar pada waktu naik melalui hampan fluidisasi (*fluidized bed*) itu dan ukuran maksimum gelembung stabil berkisar antara beberapa inci sampai beberapa kaki diameternya

2.5.4 Parameter-Parameter Fluidisasi

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

2.5.4.1 Ukuran partikel

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

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

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

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

2.5.4.2 Massa jenis padatan

Massa jenis padatan dapat dibedakan dalam tiga jenis, yaitu *bulk*, *skeletal*, dan *particle density*. Massa jenis borongan (*bulk density*) merupakan pengukuran berat dari keseluruhan partikel dibagi dengan volume partikel. Pengukuran ini menyertakan faktor kekosongan di antara partikel dan kekosongan dalam pori-pori partikel. Massa jenis padatan (*skeletal density*) sesungguhnya adalah densitas dari suatu padatan jika porositasnya nol. Dalam perhitungan hamparan fluidisasi (*fluidized bed*) biasanya menggunakan massa jenis partikel (ρ_p), yang merupakan berat dari suatu partikel dibagi volumenya dan menyertakan lubang atau pori-pori.

2.5.4.3 Sphericity

Sphericity (ψ) 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 (ϵ) merupakan faktor kekosongan di antara partikel di dalam hamparan pasir. *Bed voidage* didefinisikan sebagai perbandingan antara selisih volume hamparan dan volume partikel dibagi dengan volume hamparannya. Pada partikel yang tidak memiliki porositas internal, *bed voidage* dapat ditentukan dari massa jenis partikel (ρ_p) dan massa jenis borongan pada hamparan (ρ_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 superfisialterendah 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)

ρ_f = densitas fluida gas (kg/m^3)

ρ_p = densitas partikel pasir (kg/m^3)

μ_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 2.23.

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 (ΔP_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 :

- ΔP_b = penurunan tekanan melewati hamparan (N/m^2)
- h = tinggi hamparan pasir (kg)
- ρ_p = massa jenis partikel pasir (kg/m^3)
- ρ_f = massa jenis fluida udara (kg/m^3)
- ϵ = *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, ΔP_D . Jumlah orifis, nozzle, dan sebagainya yang dibutuhkan pada

distributor untuk mencapai besar nilai penurunan tekanan ini harus ditentukan dahulu. Kita pertimbangkan dahulu contoh kasus paling sederhana dari sebuah distributor *perforated plate*. Jika kecepatan udara superfisial dalam *windbox* atau ruang plenum adalah U_o dan *fractional open area* dari distributor (yaitu fraksi dari jumlah total luas bukaan pada aliran udara yang melewati distributor) adalah f_{oa} , maka kecepatan udara rata-rata melewati orifis adalah:

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

Sehingga persamaan penurunan tekanan melalui distributor adalah:

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

yang mana ρ_f merupakan massa jenis udara dan C_d merupakan *orrifice discharge coefficient*.

Orrifice discharge coefficient bergantung pada bentuk dari lubang distributor (*orrifice*). Terdapat kemungkinan bahwa udara yang melewati lubang distributor menuju hamparan terfluidisasi (*fluidized bed*) mengalami penurunan tekanan yang lebih sedikit daripada yang tanpa ada partikel atau kosong. Untuk lubang 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 :
 ΔP_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)

ρ_f = massa jenis fluida udara (kg/m^3)

C_D = Orifice discharge coefficient

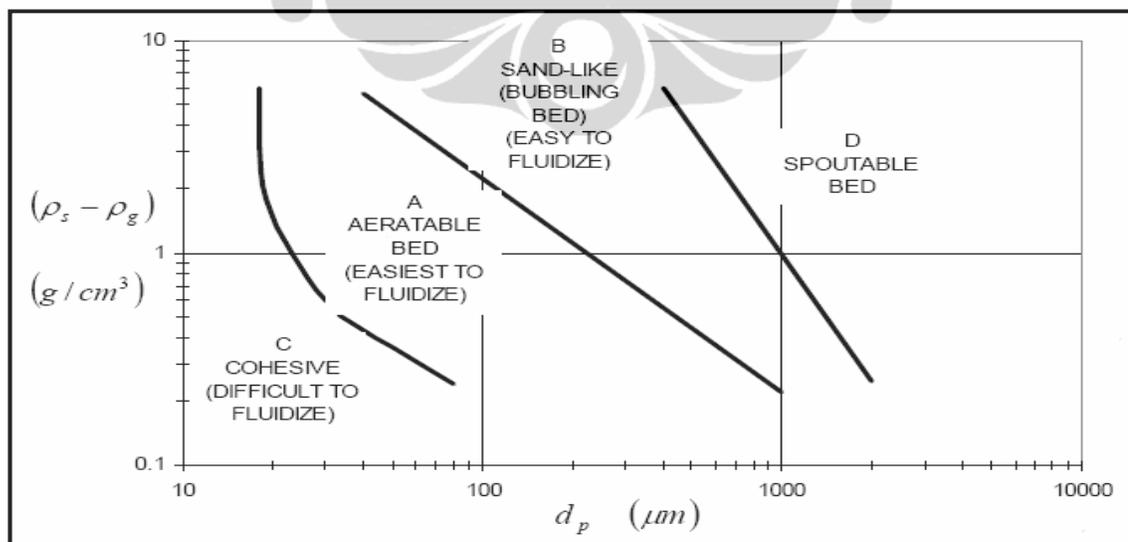
t = tebal plat distributor (m)

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

2.5.4.8 Klasifikasi pasir

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

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



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

Klasifikasi jenis-jenis pasir menurut Geldart, yaitu :

a) *Group A*

Pasir yang dikategorikan dalam *group A* menurut Geldart biasanya memiliki massa jenis kurang dari 1400 kg/m^3 dan memiliki ukuran berkisar antara 20 sampai $100 \mu\text{m}$. Hampan pasir pada kelompok ini sangat mengembang pada kecepatan udara antara U_{mf} dan kecepatan yang mana gelembung mulai terjadi, U_{mb} , karena pasir kelompok ini sedikit kohesif. Pasir jenis ini memperlihatkan suatu peningkatan hampan (*bed*) nyata yang mengembang stabil ketika kecepatan fluidisasi minimum terlampaui, dan fluidisasi dapat terjaga seragam atau fluidisasi partikulat seperti itu bahkan sampai kecepatan fluidisasi minimum telah terlampaui dua sampai tiga kalinya. Tetapi, dengan memperbesar lagi kecepatan udara sampai pada suatu titik yang mana terjadinya hampan mengempis kembali sehingga pada keadaan kurang mengembang yang kira-kira pada tingkat mengembangnya hampan di bawah kondisi fluidisasi minimum dan kebanyakan udara berlebih akan mengalir melalui hampan seperti fase gelembung, yakni yang sering disebut dengan fluidisasi agregatif. Kecepatan udara pada saat yang mana hampan mengempis terjadi merupakan kecepatan minimum gelembung (*minimum bubbling velocity*, U_{mb}).

b) *Group B*

Pasir *group B* menurut Geldart cenderung memiliki ukuran berkisar antara 40 sampai $500 \mu\text{m}$ dan massa jenis berkisar antara 1400 sampai 4000 kg/m^3 . Berkebalikan dengan pasir *group A*, gaya antar partikel diabaikan dan gelembung-gelembung mulai terbentuk pada kecepatan fluidisasi minimum atau sedikit lebih di atasnya. Hampan tersebut akan mengempis dengan sangat cepat ketika suplai udara dihentikan. Kebanyakan gelembung naik lebih cepat daripada kecepatan udara *interstitial* dan ukuran gelembung meningkat seiring dengan peningkatan tinggi hampan dan kecepatan udara berlebih ($U - U_{mf}$). Pasir jenis ini memperlihatkan pengembangan hampan 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. Hal ini dikarenakan besar penurunan tekanan sama dengan berat per unit luas. Hal ini menunjukkan bahwa peranan dari berat, bahkan jika hamparan menunjukkan sifat-sifat tampaknya seperti fluida, disokong oleh gaya antar partikel dan persinggungan permukaan partikel. Pada pasir jenis ini, *channelling* sangat mudah terjadi. Sekali hal ini terjadi, maka cenderung memperbesar jalurnya ketika meningkatkan kecepatan udara sehingga udara tidak terdistribusi dengan baik yang mana tidak pernah terjadi benar-benar fluidisasi.

d) *Group D*

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

Bila gas dilewatkan melalui lapisan hamparan partikel *group A, B*, atau *D*, gesekan (*friction*) menyebabkan terjadinya penurunan tekanan (*pressure drop*). Ketika kecepatan gas dinaikkan, penurunan tekanan meningkat sampai besar

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

Pada pasir yang lebih halus dan kurang padat (*group A*), ukuran gelembung stabil maksimum jauh lebih kecil daripada pasir yang lebih kasar dan lebih padat (*group B*) sehingga distribusi ukuran gelembung yang stabil dapat dicapai pada hamparan (*bed*) berdiameter yang lebih kecil dengan pasir *group A* daripada *group B*. Karena gelembung yang lebih besar naik lebih cepat daripada gelembung yang lebih kecil, maka udara yang digunakan untuk proses penggelembungan akan lepas dari hamparan dengan lebih cepat saat ukuran gelembung rata-rata lebih besar, sehingga terdapat banyak variasi dalam pengembangan hamparan secara keseluruhan.

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

Group		C	A	B	D
Most obvious characteristic		Cohesive, difficult to fluidize	Bubble-free range of fluidization	Starts bubbling at U_{mf}	Coarse solids
Property	Typical solids	Flour, cement	Cracking catalyst	Building sand, table salt	Crushed limestone coffee beans
1. Bed expansion		Low when bed channel, can be high when fluidized	High	Moderate	Low
2. Deaeration rate		Initially fast, exponential	Slow, linear	Fast	Fast
3. Bubble Properties		No bubbles. Channels, and cracks	Splitting/recoalescence predominate; maximum size exist; large wake	No limit on size	No known upper size; small wake
4. Solids mixing ^a		Very low	High	Moderate	Low
5. Gas backmixing ^a		Very low	High	Moderate	Low
6. Slug properties		Solids slug	Axisymmetric	Axisymmetric, asymmetric	Horizontal voids, solids slugs, wall slugs
7. Spouting		No	No, except in very shallow beds	Shallow beds only	Yes, even in deep beds
Effect on properties 1 to 7 of:	Mean particle size within group	Cohesiveness increases as d_p decreases	Properties improve as size decreases	Properties improve as size decreases	Not known
	Particle size distribution ^b	Not known	Increasing <45 μm fraction improves properties	None	Increases segregation
	Increasing pressure, temperature, viscosity, density of gas	Probably improves	Definitely improves	Uncertain, some possibly	Uncertain, some possibly

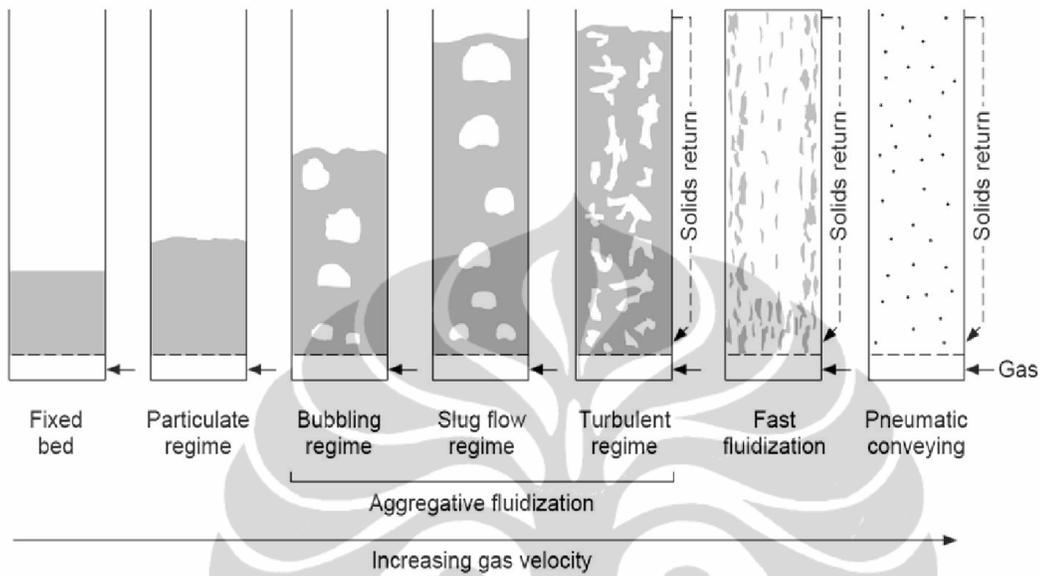
^a At equal $U-U_{mf}$.

^b At equal d_p .

2.5.4.9 Daerah batas fluidisasi (*fluidization regimes*)

Pada kecepatan gas rendah, suatu padatan dalam tabung hampan fluidisasi akan berada dalam keadaan konstan atau tetap. Seiring dengan bertambahnya kecepatan gas, gaya seret mengimbangi berat hamparannya sehingga hampan secara menyeluruh ditopang oleh aliran gas tersebut. Pada fluidisasi minimum, hampan memperlihatkan pergerakan yang minimal dan akan sedikit mengembang. Kemudian hampan akan mengembang saat kecepatan aliran gas dinaikkan dan mengalami daerah batas fluidisasi dari *fixed bed* sampai dengan *pneumatic conveying*. Bila kecepatan aliran gas melewati batas fluidisasi turbulen, maka pengembalian kembali partikel (*solids return*) perlu untuk digunakan untuk mempertahankan hampan karena kecepatan gas berada di atas kecepatan terminal dari beberapa atau

bahkan semua partikel. Cara setiap daerah batas fluidisasi tampil berbeda-beda menurut kecepatan aliran gas (gambar 2.25).



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

BAB 3

PERSIAPAN DAN PROSEDUR PENGUJIAN

Sebelum melakukan pengujian pada *Fluidized Bed Combustor* UI, sebaiknya dilakukan pengecekan dan pengujian masing-masing alat, sehingga dapat dipastikan alat tersebut dapat berjalan dengan semestinya dan agar dapat dipahami SOP (*Standart Operational Procedure*) dari tiap masing-masing alat.

3.1 Persiapan Pengujian

3.1.1 Bahan Bakar Biomassa

Energi biomassa adalah energi yang berkelanjutan dan dapat dihasilkan secara alami. Sumber dari biomassa terdiri dari :

1. Residu dari perhutanan (sampah hijau dari limbah penggergajian kayu, dan juga limbah *vegetative* dan kayu).
2. Tumbuhan pertanian yang khusus ditujukan untuk kepentingan energi dan juga limbah agrikultur.
3. Konstruksi kayu dan limbah reruntuhan kayu.
4. Kotoran binatang
5. Limbah etanol
6. Limbah perkotaan dalam bentuk limbah padat
7. Limbah industri yang lainnya (sampah kertas dari proses daur ulang)

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 rata-rata ketebalan 2-3 mm.



Gambar 3.1 Tempurung kelapa

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

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

Tabel 3.1 Potensi biomassa di Indonesia

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

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

Partikel kecil : panjang = 10 – 15 mm
 lebar = 10– 15 mm
 tebal = 2 – 3 mm



Gambar 3.2 Tempurung kelapa hasil *crushing*

3.1.2 Pasir

Pasir yang digunakan akan sangat berpengaruh terhadap berhasil tidaknya proses fluidisasi dan pembakaran yang akan dilakukan. Dalam menentukan jenis pasir yang akan digunakan pada alat FBC UI ini sebaiknya menggunakan pasir silika atau pasir kuarsa untuk tujuan mendapatkan fluidisasi yang baik dengan densitas partikelnya kurang lebih sebesar 2650 kg/m^3 . Pasir silika dan pasir kuarsa juga memiliki nilai *specific heat* (kalor jenis) yang kecil sehingga sangat baik dalam menyimpan kalor. Karena semakin kecil nilai *specific heat* suatu material maka akan semakin mudah untuk menaikkan temperatur material tersebut. Dengan massa dan

besar kenaikan temperatur yang sama, dua material yang berbeda dengan nilai kalor jenis yang jauh berbeda akan memiliki besar jumlah kalor yang jauh berbeda pula untuk menaikkan temperaturnya.

Sebagai perbandingan nilai *specific heat* untuk substansi-substansi yang lain dapat dilihat pada tabel 3.3. Pasir silika memiliki titik lebur yang tinggi sampai mencapai temperatur sekitar 1800 °C sehingga sangat cocok digunakan untuk aplikasi *fluidized bed combustor* yang *range* operasinya berada pada temperatur tinggi. Sifat fisik, termal dan mekanik pasir silika dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 *Specific Heat* berbagai substansi

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

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

Tabel 3.3 Sifat fisik, termal, dan mekanik pasir silika

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

<i>Properties</i>	<i>Silica Sand</i>
<i>Particle density (kg/m³)</i>	2650
<i>Bulk density (kg/m³)</i>	1300
<i>Thermal conductivity (Wm⁻¹K)</i>	1.3
<i>Tensile strength (MPa)</i>	55
<i>Compressive strength (MPa)</i>	2070
<i>Melting point (°C)</i>	1830
<i>Modulus of elasticity (GPa)</i>	70
<i>Thermal shock resistance</i>	<i>Excellent</i>

Setelah memilih jenis pasir yang digunakan, maka ditentukan ukuran diameter partikel pasir yang digunakan pada FBC UI. Jenis pasir yang digunakan sudah pasti antara pasir silika dan pasir kuarsa. Menurut pengklasifikasian partikel pasir oleh Geldart seperti yang telah dijelaskan pada bab dua, maka jenis partikel pasir tersebut terkelompok dalam *group B* dan *group D*. Namun partikel pasir dalam *group D* membutuhkan kecepatan fluidisasi yang besar sehingga sangat sulit untuk mendapatkan pencampuran yang baik bila dibandingkan dengan pasir *group A* dan *group B*. Dengan demikian partikel pasir yang paling baik digunakan untuk aplikasi *fluidized bed combustor* ini adalah partikel pasir *group B* dengan ukuran diameter partikel pasir yang paling baik untuk tujuan fluidisasi berkisar antara 400 μm sampai 700 μm .

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 3.4 yang mana terdapat ukuran lubang ayakan (*mesh*) menurut standar di Amerika. Berdasarkan tabel tersebut maka partikel pasir yang

berkisar antara $400 \mu\text{m}$ sampai $700 \mu\text{m}$ adalah partikel pasir dengan ukuran diameter partikel pasir antara *mesh* 25 sampai *mesh* 40.

Tabel 3.4 Distribusi ukuran pengayakan pasir silika

Sumber: AGSCO silica sand technical data sheet

Sieve Size		Individual Percent Retained				
US	μm	16-30	20-40	30-50	40-70	50-80
16	1180	1.4				
20	850	35.7	2.3			
25	725	58	19.7	2.3		
30	600	4.7	28	10.4	0.3	
35	500	0.2	30.3	17.1	5.2	
40	425		15.8	31.9	16.5	2.7
50	300		3.6	29.2	37	39.3
60	250		0.3	4.7	14.2	23.8
70	212			2.3	9.3	16.2
80	180			2.1	5.5	9.1
100	150				7.2	5.4
120	125				4.8	3.5

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



Gambar 3.3 Pasir silika mesh 20-40 yang digunakan pada FBC UI

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

- massa jenis partikel pasir (ρ_p) = 2650 kg/m^3
- massa jenis borongan pasir (ρ_b) = 1300 kg/m^3
- diameter hampan pasir (d_b) = $63,5 \text{ cm} = 0,635 \text{ m}$
- tinggi hampan pasir (*bed height*) = $7,5 \text{ cm} = 0,075 \text{ m}$

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 adalah satu-satunya sumber tegangan untuk pengoperasian seluruh alat FBC ini, dan dapat memberikan daya listrik sebesar 4 kVA.



Gambar 3.4 Generator set yang digunakan

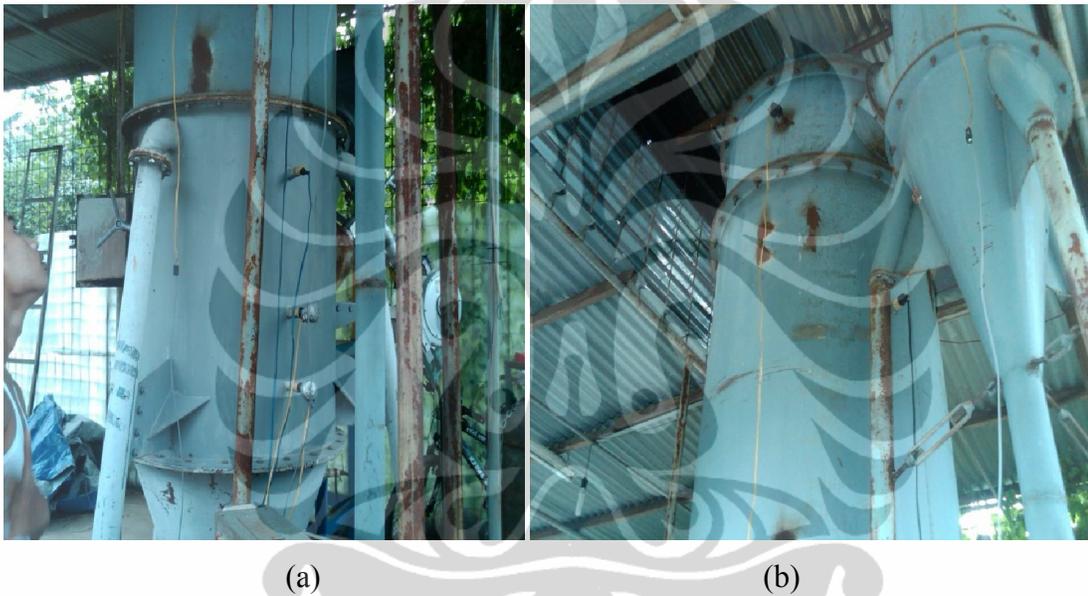
Berikut ini spesifikasi dari genset dengan merk Starke GFH 6900 LXE tersebut :

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

2. Termokopel

Jenis termokopel yang digunakan disini adalah termokopel tipe K. Lima termokopel yang ada sebelumnya sudah dikalibrasi oleh mahasiswa peneliti untuk keperluan skripsi di lab gasifikasi. Termokopel itu dimasukkan satu persatu pada reaktor FBC dengan konfigurasi ketinggian yang berbeda-beda diukur dari batas tengah distributor FBC yang ada (T2 paling dekat dengan hamparan pasir dan T6 paling jauh dari hamparan pasir. Sedangkan T1 berada di bawah distributor), yaitu :

- T1 = 31,5 cm di bawah distributor = 0,315 m
- T2 = 3,5 cm = 0,035 m
- T3 = 24,5 cm = 0,245 m
- T4 = 63,5 cm = 0,635 m
- T5 = 144,5 cm = 1,445 m
- T6 = 219,5 cm = 2,195 m



Gambar 3.5 Konfigurasi termokopel (a). T1 – T4, dan (b). T5 – T6

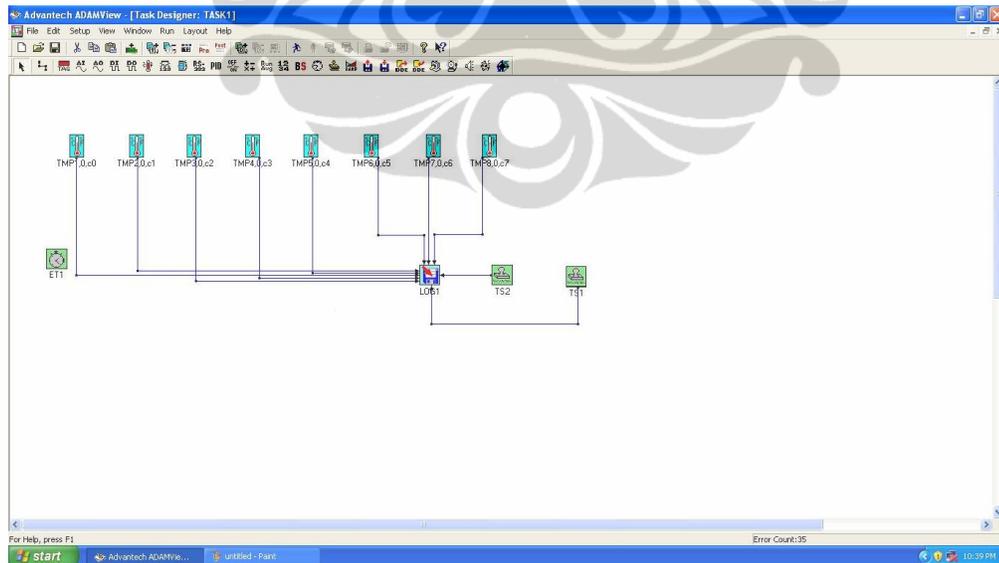
3. *Portable Data Acquisition Module*

Untuk mendapatkan data-data keluaran dari distribusi temperturnya digunakan *Portable Data Acquisition Module* sebagai pengkonversi suhu dari analog ke digital yang dihubungkan dengan suatu perangkat komputer, dan data keluaran temperatur akan ditampilkan pada layar komputer dengan bantuan perangkat lunak *adam view*, serta data yang telah ditampilkan akan tersimpan secara otomatis sesuai dengan urutan waktu, jadi tidak diperlukan pencatatan suhu secara manual, sehingga akan lebih memudahkan pada saat pengoperasian FBC UI.

Portable Data Acquisition Module memiliki 16 *channels* termokopel, yang berarti dapat digunakan maksimal untuk 8 termokopel, karena setiap termokopel membutuhkan 2 *channels* yaitu positif (+) dan negatif (-). *Portable Data Acquisition Module* dihubungkan dengan komputer melalui media USB (*Universal Serial Bus*) dengan konsumsi daya 100mA pada maksimal 5V.



Gambar 3.6 (a) *Portable Data Acquisition Module*



Gambar 3.6 (b) Tampilan perangkat lunak *Adam View*

4. Timbangan (*weight scale*)

Timbangan digunakan untuk mengukur massa dari bahan bakar (tempurung kelapa) yang digunakan untuk pembakaran dan untuk mengukur massa hamparan pasir yang akan digunakan.



Gambar 3.7 Timbangan dengan skala maksimum 5 kg

6. *Coconut Shell Crusher*

Coconut Shell Crusher atau yang biasa disebut dengan alat pencacah tempurung kelapa yaitu suatu alat penghancur tempurung kelapa yang digerakan oleh motor tiga fase dengan menggunakan sistem pully sehingga dapat memutar blade yang terdapat didalam ruang pencacah, sehingga tempurung kelapa dapat dicacah menjadi partikel lebih kecil.



Gambar 3.8 *Coconut Shell Crusher*

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 AC 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 5,4hp.



Gambar 3.9 *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 3.10 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 3.5 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 control untuk feeder, sambungkan setiap kabel sesuai dengan warnanya.
2. Sambungkan konektor dari panel kontrol ke generator set yang sudah menyala untuk mendapatkan sumber tegangan. Gunakan *test pen* untuk memastikan sisi konektor terhubung dengan sisi *generator set* yang benar.
3. Aktifkan *switch* utama dan *circuit breaker* dengan menekan ke arah atas, lampu di pintu panel akan menyala.
4. Tekan *switch* berwarna hitam sebelah kiri ke arah bawah agar *inverter* motor feeder menyala.
5. Putar pengendali putaran motor feeder sesuai yang diinginkan (rpm maksimum 50 rpm).
6. Jika sudah selesai dan ingin mematikan feeder, maka putar kembali pengendalinya ke nol lagi, dan matikan semua *switch* pada panel kontrol.

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

3.2.2 Blower

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



Gambar 3.11 Ring blower pada *fluidized bed combustor* UI

Spesifikasi dari blower yang digunakan adalah sebagai berikut ini :

Tabel 3.6 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 H₂O)</i>	2800
<i>Air Flow (max)(m³/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 luntuk blower, sambungkan setiap kabel sesuai dengan warnanya.
2. Sambungkan konektor dari panel kontrol ke generator set yang sudah menyala untuk mendapatkan sumber tegangan. Gunakan *test pen* untuk memastikan sisi konektor terhubung dengan sisi *generator set* yang benar.
3. Lalu aktifkan *switch* utama dan *circuit breaker* dengan menekan ke arah atas, lampu di pintu panel akan menyala.
4. Tekan *switch* berwarna hitam sebelah kanan ke arah bawah agar *inverter* blower menyala.
5. Tekan tombol atas ataupun bawah untuk mencari set untuk putaran (*rpm*), lalu tekan tombol *enter* di bagian tengah.

6. Tekan tombol di pintu panel sebelah kanan agar menyala hijau, kemudian atur besarnya *rpm* yang diinginkan dengan memutar-mutar pengendali blower yang ada di pintu panel di atas tombol berwarna hijau tersebut.
7. Jika sudah selesai dan ingin mematikan blower, putar pengendali ke nol lagi dan matikan semua *switch* pada panel kontrol.

3.2.3 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. Atur tekanan kerja gas pada 20~30 mbar (200 ~ 300 mm H_2O).
3. Putar saklar *burner control* ke posisi *on* untuk mengaktifkan *burner control*. Pada tahap awal, *burner control* melakukan pengecekan status awal apakah ada tekanan udara palsu dan apakah ada api yang terdeteksi *UV sensor*. Bila gejala ini ditemukan, maka indikator burner *misfire* dan lampu merah reset akan menyala.
4. Blower akan berputar untuk menghasilkan tekanan yang stabil. Apabila tekanan blower di bawah nilai setting dari *air pressure switch* maka sistem akan di *cut-off* dan indikator *cut-off* akan menyala.
5. Setelah 30 detik proses *pre-purge* yang berguna untuk mengusir gas yang terperangkap (bila ada), maka *solenoid valve* untuk gas akan membuka. Pada saat bersamaan *ignition trafo* bekerja untuk membentuk *spark* listrik pada elektroda busi. Pertemuan campuran udara dan gas dengan percikan listrik

akan menghasilkan nyala api. Atur besarnya volume gas untuk api pilot dengan memutar *needle valve* sampai api menyala konsisten.

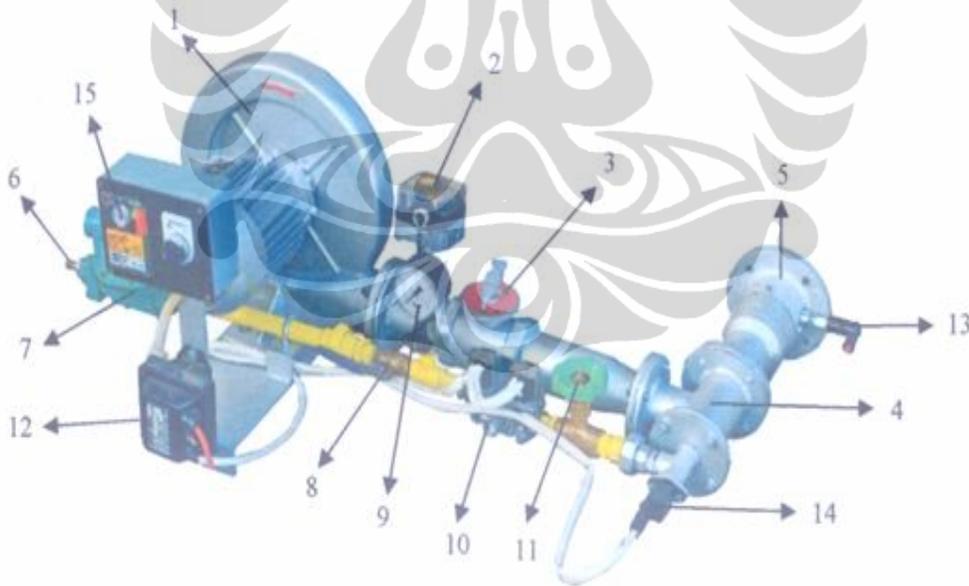
6. *UV sensor* akan mendeteksi nyala api dan mengirim sinyal ke *burner control*. *Burner control* akan tetap membuka *solenoid valve* sehingga api tetap menyala. Tapi bila pembacaan *UV sensor* kurang maka sistem akan di *cut-off* menjadi *misfire*. Bila hal ini terjadi, segera cari tahu apa penyebabnya dan segera tangani. Ulangi urutan proses (*sequence*) dari awal dengan menekan tombol reset atau memutar saklar *burner control* ke posisi *off* lalu nyalakan lagi dari awal.
7. Setelah nyala api terbentuk dapat dilakukan penyetelan untuk mendapat mutu nyala api yang bagus dan panjang api yang diinginkan.
8. Jika ingin mematikan burner, putar saklar burner ke posisi *off* dan pastikan bahwa api burner sudah mati semua.
9. Tutup *ball valve* utama gas masuk dan tutup katup utama pada tabung gas LPG.

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

- Penyetelan mutu api:
 - a. Atur volume gas yang mengalir:
Putar bagian knop *needle valve*:
 - Searah jarum jam: *flow* gas berkurang (-), api berubah menjadi lebih merah.
 - Berlawanan jarum jam: *flow* gas bertambah (+), api menjadi lebih ke biru.
 - b. Atur manual *air damper* pada posisi buka setengah yaitu skala nomor 5. Posisi ini bisa diatur lebih lanjut untuk mendapatkan komposisi udara dan gas yang tepat untuk membentuk mutu nyala api yang bagus. Kencangkan baut pengunci supaya posisi *damper* tidak berubah.

- Penyetelan panjang api:
 - a. Atur *gas regulator* sehingga tekanan kerja antara 20~30 *mbar* (200~300 *mmH₂O*).
 - b. Buka tutup dan putar penyetel:
 - Searah jarum jam: tekanan gas bertambah (+), panjang api berubah menjadi lebih panjang.
 - Berlawanan jarum jam: tekanan gs berkurang (-), api menjadi lebih pendek.
 - c. Selanjutnya atur kembali *dampier* udara untuk mendapatkan mutu nyala api yang bagus.

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



Gambar 3.12 Bagian-bagian *hi-temppremixed burner*

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

Tabel 3.7 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 (tempurung kelapa) yang dilakukan bertujuan untuk mendapatkan karakteristik distribusi panas serta daya panas yang dihasilkan pada alat *fluidized bed combustor* UI dengan melihat hubungan-hubungan antara temperatur di setiap titik termokopel tiap satuan waktu, ketinggian termokopel, ukuran partikel pasir, ketinggian distributor serta lamanya waktu yang dibutuhkan untuk melakukan sebuah pengujian ini sampai selesai.

3.3.1 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 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 *Portable Data Acquisition Module*, dan *Portable Data Acquisition Module* juga terhubung ke sebuah komputer untuk dapat membaca nilai suhunya di setiap termokopel.
- Untuk posisi masing-masing alat diletakkan dengan sebaik mungkin, sehingga tidak ada kabel yang tertekan, terikat, ataupun tertarik. panel kontrol diletakkan dengan sebaik mungkin agar dapat dengan mudah melakukan pengaturan.



Gambar 3.13 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 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, serta untuk proses fluidisasi pasir agar panasnya tersebar merata di seluruh pasir. Digunakan dua flow rate udara yang berbeda (jika dilihat putarannya, yang pertama ialah 3000 rpm).
3. Menyalakan *burner* untuk memanaskan *bed* (pasir) hingga *bed temperature* mencapai suhu diatas 400°C.

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

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, 0,5kg, 1kg, 1,25kg hingga 1,5kg) dimasukkan ke dalam ruang bakar.
2. Dimulai dari massa 0,25 kg, lalu mengamati perubahan temperatur yang terjadi menitnya. Pada awalnya temperatur akan menurun kemudian naik lagi dan akhirnya saat bahan bakar habis terbakar masukkan bahan bakar dengan massa 0,5 kg. Perhatikan perubahan temperatur setiap menitnya dan lakukan proses yang sama hingga bahan bakar massa 1,5 kg.
3. Setelah semua bahan bakar tersebut dimasukkan, perubahan temperturnya terus diamati setiap menitnya sampai pada akhirnya suhu di ruang bakar turun terus-menerus secara perlahan karena sudah tidak dimasukkan bahan bakar lagi. Saat temperatur *bed* sudah cukup rendah dibawah 500°C, *Portable Data Acquisition Module* dapat dimatikan.
4. Kemudian setelah suhu ruang bakar mencapai suhu ambient, langkah pemanasan awal 1-5 dan pengambilan data 1-3 diatas diulang kembali tetapi dengan flow rate udara yang berbeda.

BAB 4

HASIL DAN ANALISA

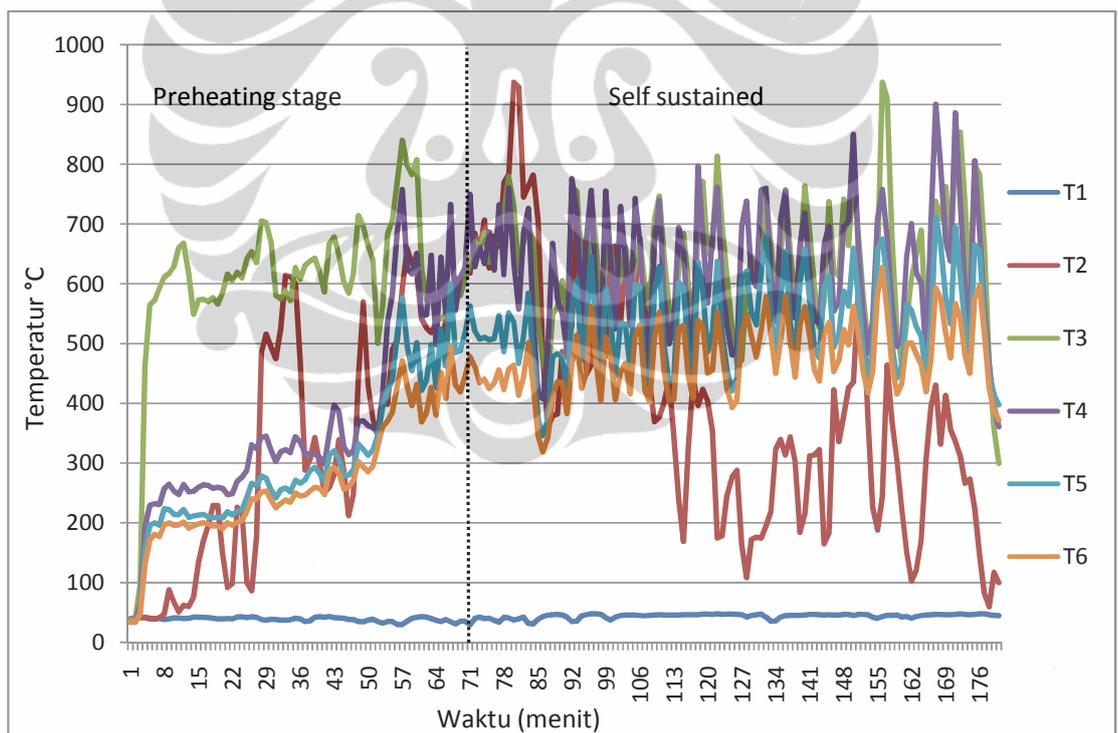
4.1 Hasil

Hasil dari percobaan ini dibagi menjadi dua bagian yaitu kurva pembakaran dengan nilai suplai udara blower yang berbeda: $0,085\text{m}^3/\text{s}$ dan $0,093\text{m}^3/\text{s}$.

4.1.1 Pembakaran dengan suplai udara $0,093\text{m}^3/\text{s}$

Beberapa parameter dalam melakukan percobaan:

- Suplai udara blower ke ruang bakar $0,093\text{m}^3/\text{s}$
- Menggunakan bahan bakar cangkang kelapa dengan Heating Value 5500 kcal/kg (Julian A. Banzon, 1980)
- Ketinggian Termokopel (T1= 31,5 cm (dibawah distributor); T2=3,5 cm; T3=24,5 cm; T4=63,5cm; T5=144,5cm; T6=219,5cm)

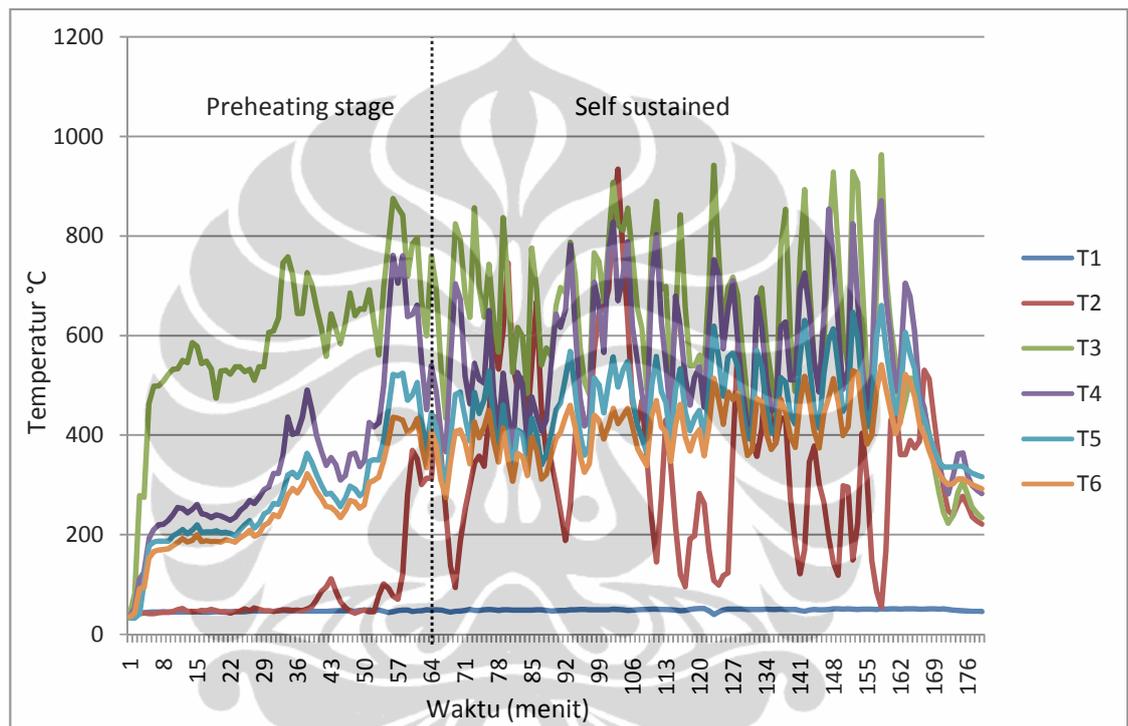


Gambar 4.1 Grafik pembakaran dengan suplai udara $0,093\text{m}^3/\text{s}$

4.1.2 Pembakaran dengan suplai udara $0,085\text{m}^3/\text{s}$

Beberapa parameter dalam melakukan percobaan:

- Suplai udara blower ke ruang bakar $0,085\text{m}^3/\text{s}$
- Menggunakan bahan bakar cangkang kelapa dengan Heating Value 5500 kcal/kg (Julian A. Banzon, 1980)
- Ketinggian Termokopel (T1=31,5 cm (dibawah distributor); T2=3,5 cm; T3=24,5 cm; T4=63,5cm; T5=144,5cm; T6=219,5cm)



Gambar 4.2 Grafik pembakaran dengan suplai udara $0,085\text{m}^3/\text{s}$

4.2 Analisa

Pada kedua percobaan yang dilakukan, baik menggunakan suplai udara $0,085\text{m}^3/\text{s}$ ataupun $0,093\text{m}^3/\text{s}$; secara visual menunjukkan keadaan fluidisasi yang serupa khususnya pada kondisi temperatur T2 (Termokopel pada *bed*). Kondisi T2 terlihat berlawanan dengan kondisi suhu termokopel yang lainnya, hal ini disebabkan terjadinya *heat transfer* dari bahan bakar terhadap *bed* serta dari *bed* terhadap *biomass* yang dimasukkan. Pada kondisi tersebut, biasanya bahan bakar biomassa yang dimasukkan akan cepat terbakar sehingga dapat dengan cepat

meningkatkan temperatur rata-rata T2 hingga T6 pada FBC. Oleh karena itu, pada percobaan tersebut, kondisi ini diasumsikan sebagai Kondisi Kerja FBC UI. Jika dianalisa pada grafik percobaan, didapatkan kondisi kerja percobaan dengan suplai udara 0,093m³/s dimulai di menit 71 dan pada percobaan dengan suplai udara 0,085 m³/s dimulai pada menit ke 64.



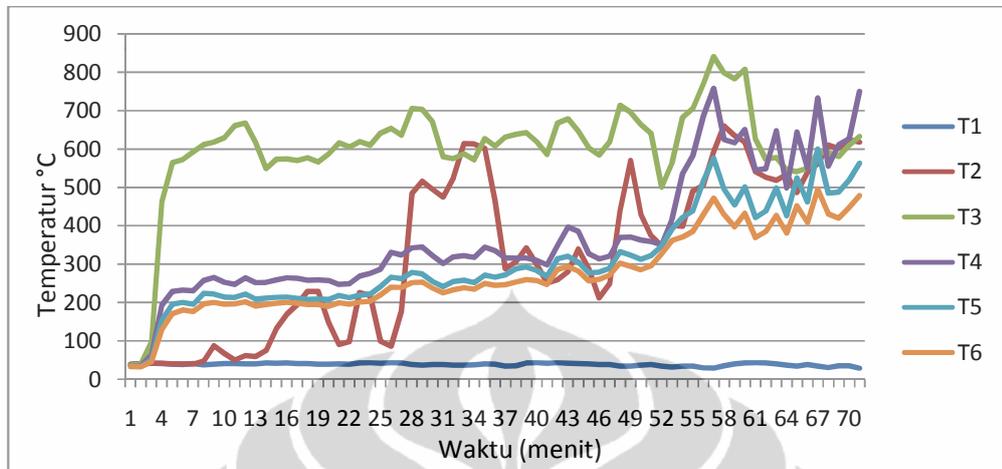
Gambar 4.3 Kondisi kerja FBC UI

Dengan berpedoman pada kondisi kerja FBC UI yang telah disebutkan pada bagian sebelumnya, maka analisa percobaan ini dibagi menjadi:

- a. Kondisi pemanasan menuju kondisi kerja
- b. Analisa kondisi kerja
- c. Analisa pembakaran biomassa pada kondisi kerja
- d. Perbandingan daya panas terhadap variasi umpanan

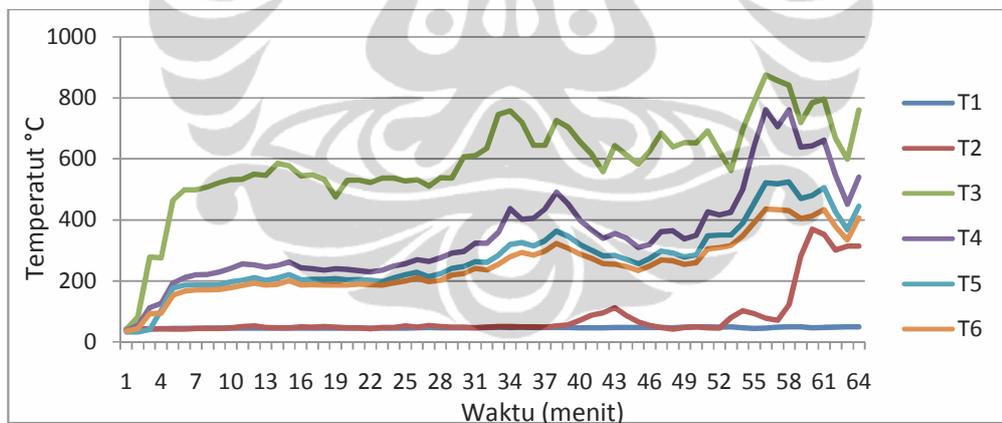
4.2.1 Kondisi Pemanasan Menuju Kondisi Kerja

Kondisi pemanasan sebelum kondisi kerja pada percobaan dengan suplai udara $0,093\text{m}^3/\text{s}$ berlangsung dari menit pertama hingga menit ke 71.



Gambar 4.4 Grafik Pemanasan dengan suplai udara $0,093\text{m}^3/\text{s}$

Sedangkan, pada percobaan dengan suplai udara $0,085\text{m}^3/\text{s}$, pemanasan sebelum kondisi kerja berlangsung dari menit pertama hingga menit 64.

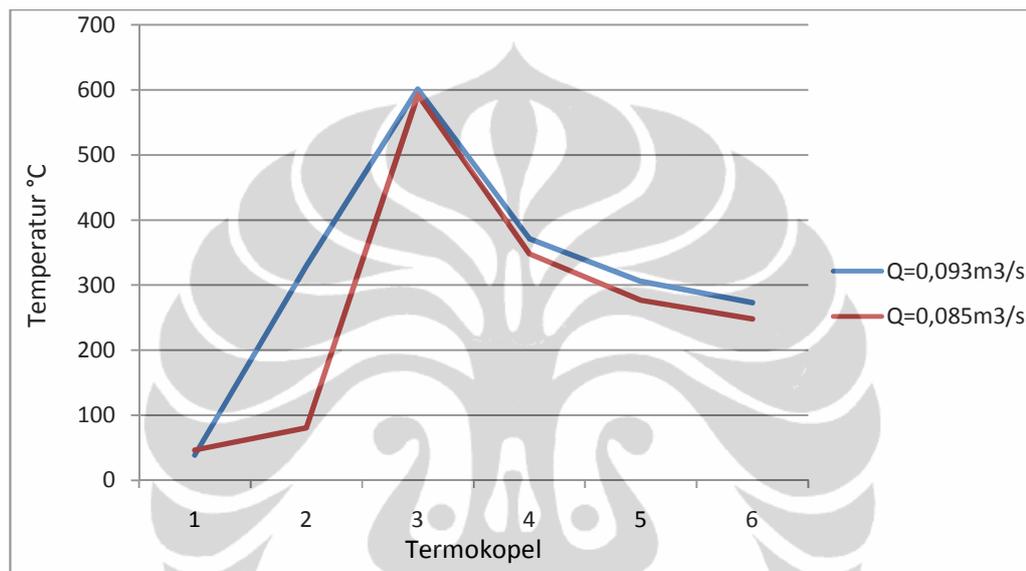


Gambar 4.5 Grafik Pemanasan dengan Suplai udara $0,085\text{m}^3/\text{s}$

Dari kedua grafik di atas, waktu yang dibutuhkan untuk pemanasan pada suplai udara $0,085\text{m}^3/\text{s}$ lebih cepat dibanding dengan pemanasan dengan suplai udara $0,093\text{m}^3/\text{s}$. Hal ini disebabkan pada suplai udara $0,093\text{m}^3/\text{s}$ dimasukan umpanan tempurung kelapa lebih banyak, sehingga membutuhkan waktu lebih lama untuk proses pemanasan awal.

Tabel 4.1 Temperatur rata-rata pada saat pemanasan awal

Rata rata	Q=0,093 m ³ /s	Q=0,085 m ³ /s
T1	38,63262	46,35294
T2	329,0819	80,65765
T3	601,0684	591,8626
T4	371,085	348,0888
T5	305,349	276,5325
T6	272,8903	247,9489

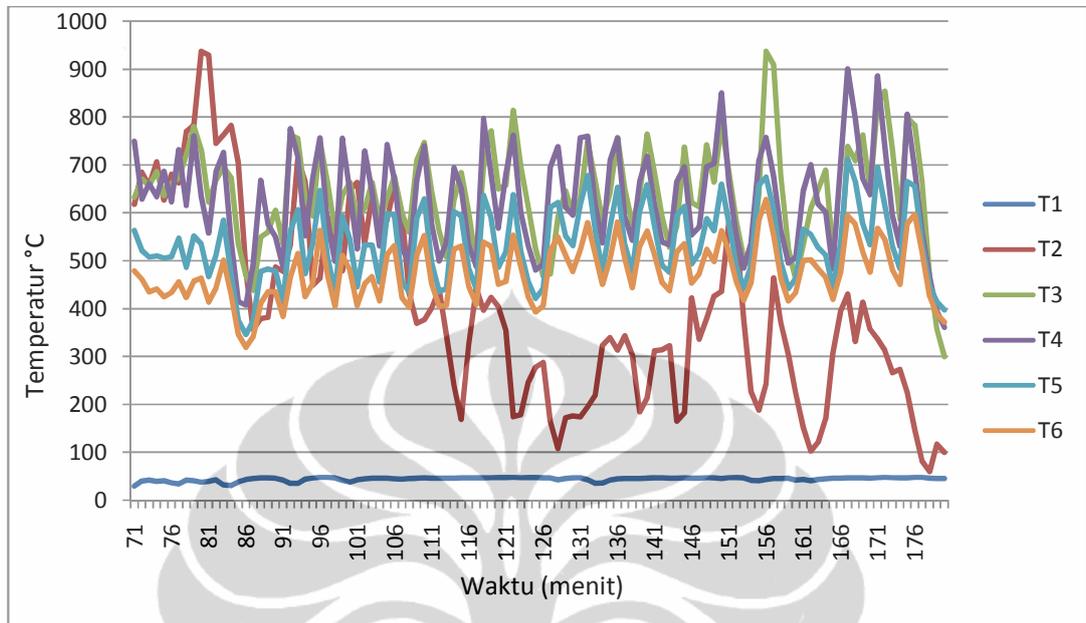


Gambar 4.6 Distribusi Temperatur pada saat kondisi pemanasan

Namun, jika membandingkan temperatur kerja pada saat kondisi pemanasan, suplai udara 0,093m³/s memiliki temperatur rata-rata yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan pemanasan dengan suplai udara 0,085m³/s hal ini disebabkan oleh jumlah bahan bakar dan suplai udara (dalam hal ini oksigen) pada 0,093m³/s lebih mencukupi dibandingkan dengan kondisi pemanasan pada 0,085m³/s.

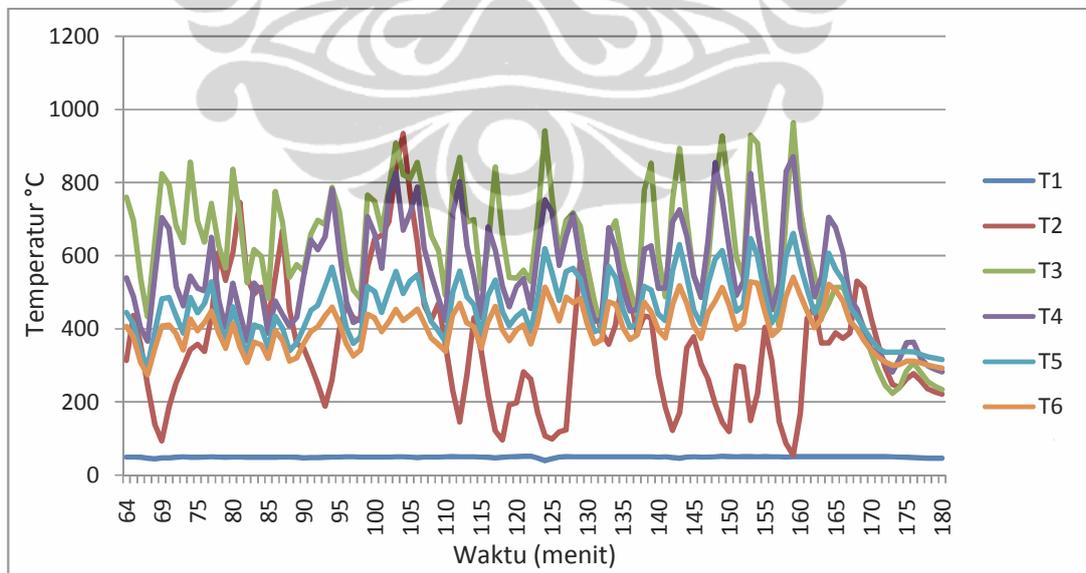
4.2.2 Analisa Kondisi Kerja

Kondisi kerja pada percobaan dengan suplai udara $0,093 \text{ m}^3/\text{s}$ dimulai dari menit ke 71 hingga percobaan selesai.



Gambar 4.7 Kondisi kerja dengan suplai udara $0,093 \text{ m}^3/\text{s}$

Kondisi kerja pada percobaan dengan suplai udara $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ dimulai dari menit ke 64 hingga percobaan selesai

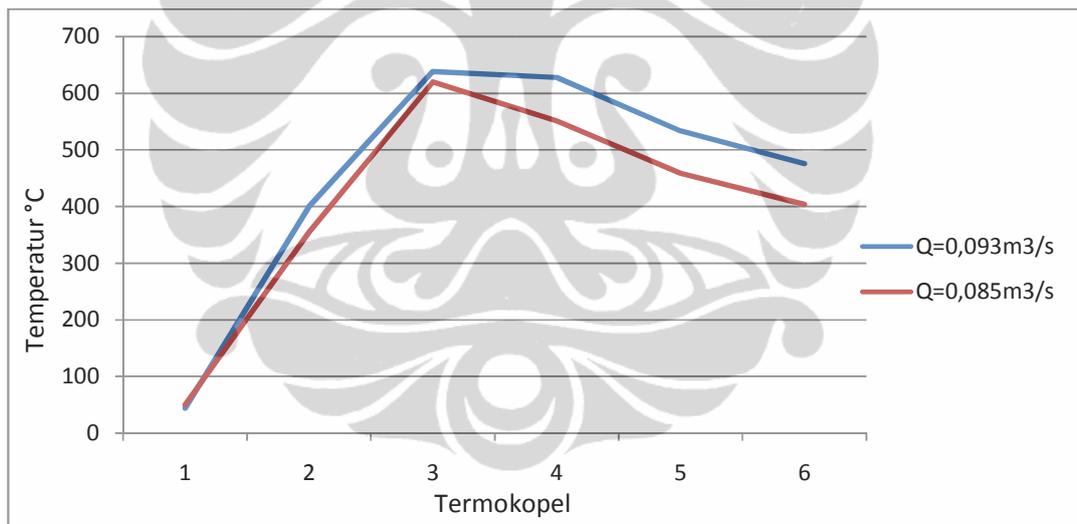


Gambar 4.8 Kondisi kerja dengan suplai udara $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$

Dari kedua grafik di atas, dapat dijabarkan sebagai berikut. Kurva pembakaran pertama, dengan suplai udara 0,093 m³/s memiliki lama waktu kondisi kerja sekitar 109 menit. Sedangkan, kurva kedua dengan suplai udara 0,085 m³/s mempertahankan kondisi kerjanya selama 116 menit. Kondisi ini terjadi dikarenakan percobaan dengan suplai udara 0,085 m³/s dapat mencapai kondisi kerja lebih awal dibandingkan dengan suplai udara 0,093 m³/s.

Tabel 4.2 Temperatur rata-rata pada saat kondisi kerja

rata rata	Q=0,093 m ³ /s	Q=0,085 m ³ /s
T1	44,05409	49,53454
T2	399,8909	354,8351
T3	638,5902	619,8335
T4	627,8579	551,0894
T5	533,6478	458,9699
T6	476,0353	403,7739



Gambar 4.9 Distribusi temperatur pada saat kondisi kerja

Gambar 4.9 menunjukkan distribusi temperatur pada saat kondisi kerja di FBC UI menggunakan dua suplai udara, 0,085 m³/s dan 0,093 m³/s. Pada titik T1 baik percobaan pertama dan kedua selalu memperlihatkan data yang jauh lebih rendah dibandingkan temperatur termokopel lainnya. Hal ini disebabkan karena T1 terletak di bawah distributor dan hampan pasir. Temperatur T1 mengukur

temperatur udara masuk menuju ruang bakar, yang berkisar tidak jauh dari 45 °C. Pada data dengan suplai udara 0,093 m³/s menunjukkan angka rata-rata sebesar 44 °C sedangkan pada data dengan suplai udara 0,085 m³/s memiliki angka rata-rata sebesar 49,5 °C. Pada gambar 4.9 terlihat bahwa suplai udara 0,093m³/s menghasilkan suhu lebih tinggi, hal ini disebabkan karena pasir silika lebih mudah terangkat dan mengaduk dari pada suplai udara 0,085m³/s.

4.2.3 Analisa Pembakaran Biomassa pada Kondisi Kerja

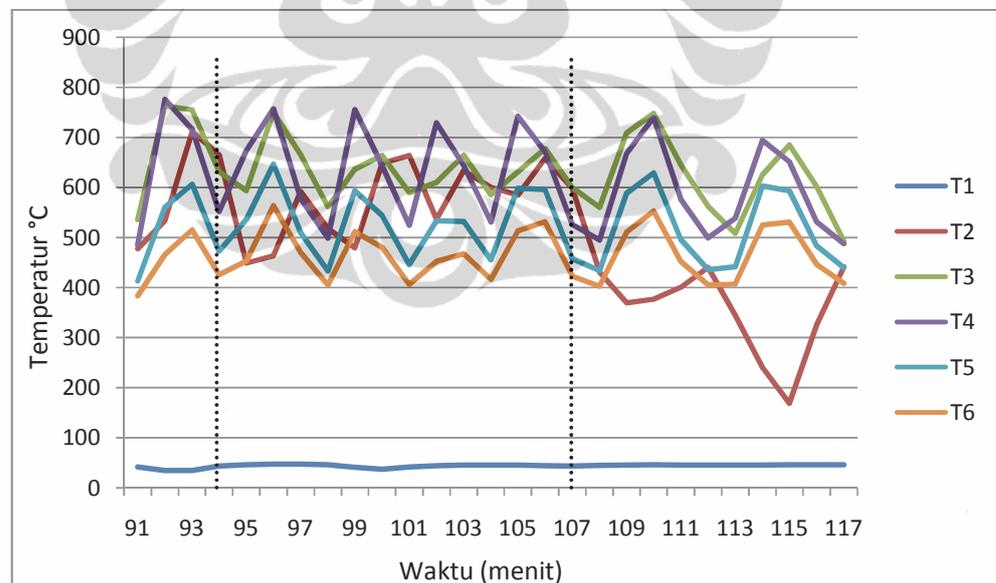
Pada bagian ini akan dianalisa mengenai pengaruh banyaknya bahan bakar yang dimasukkan pada sekali masuk terhadap perubahan temperatur. Data ini diambil pada saat kondisi dan temperatur mencapai kondisi kerja FBC di masing-masing percobaan.

4.2.3.1 Pembakaran pada percobaan dengan suplai udara 0,093 m³/s

Pada percobaan ini di kondisi kerja, dilakukan percobaan dengan 1 kg, 1,25 kg dan 1,5 kg.

a. Pembakaran 1 kg

Pemberian umpanan 1 kg dilakukan pada menit 94 dan menit 107.



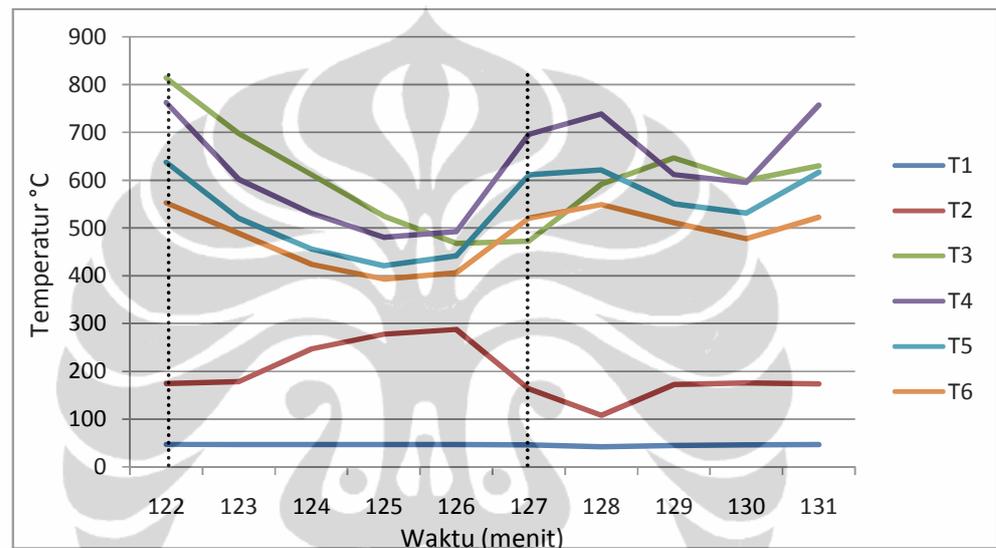
Gambar 4.10 Temperatur kerja pada umpanan 1 kg (0,093 m³/s)

Rata-rata temperatur dari grafik di atas kemudian diterjemahkan ke dalam tabel. Tabel di bawah menunjukkan rata-rata temperatur T1 hingga T6 pada saat pembakaran umpan tersebut.

Tabel 4.3 Temperatur pembakaran bahan bakar 1kg pada 0,093 m³/s

T1	T2	T3	T4	T5	T6
44,3313	494,4459	631,1384	617,9034	521,31	463,5212

b. Pembakaran 1,25 kg



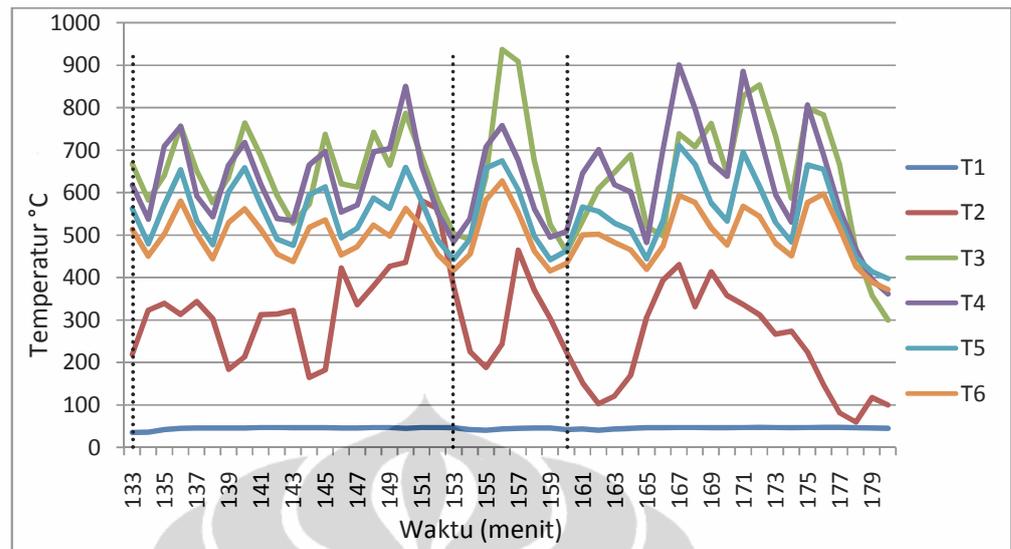
Gambar 4.11 Temperatur kerja pada umpanan 1,25 kg (0,093 m³/s)

Pembakaran dengan bahan bakar sebesar 1,25 kg ini dilakukan pada menit 122 dan menit 127. Grafik di atas menunjukkan temperatur kerja pada pembakaran bahan bakar 1,25 kg. Temperatur tersebut kemudian dirata-ratakan dan dimasukkan pada tabel 4.4

Tabel 4.4 Temperatur pembakaran bahan bakar 1,25kg pada 0,093 m³/s

T1	T2	T3	T4	T5	T6
46,28356	195,8882	605,649	626,5126	540,7613	484,4603

c. Pembakaran 1,5 kg

Gambar 4.12 Temperatur kerja pada umpanan 1,5 kg (0,093 m³/s)

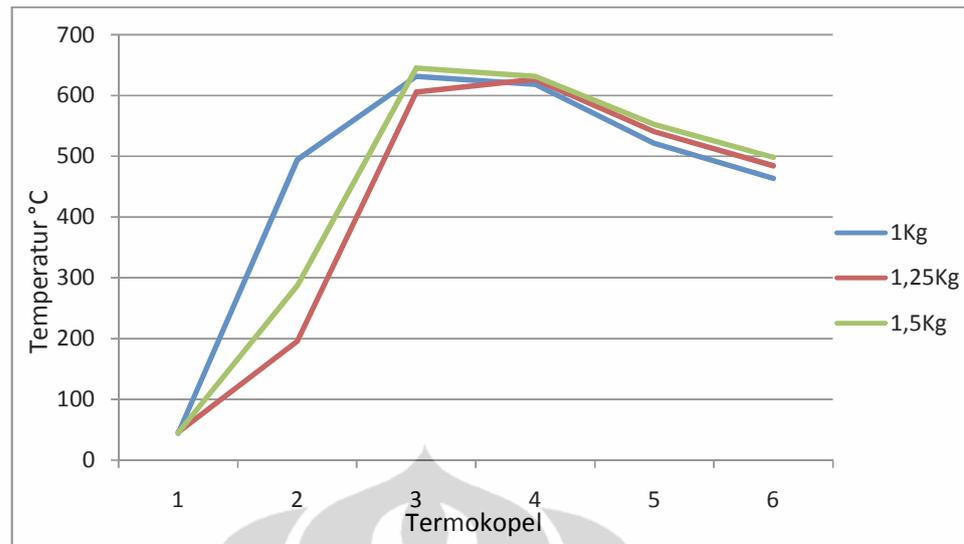
Pembakaran dengan bahan bakar sebanyak 1,5kg dilakukan pada menit ke 133, menit 153 dan menit 160. Pada grafik di atas, rata-rata temperatur dari T1 hingga T6 dimasukkan ke dalam satu tabel .

Tabel 4.5 Temperatur pembakaran bahan bakar 1,5kg pada 0,093 m³/s

T1	T2	T3	T4	T5	T6
45,04306	286,9316	644,9553	631,0548	552,2518	497,9048

d. Perbandingan temperatur rata-rata

Tabel rata-rata temperatur untuk umpanan bahan bakar 1 kg, 1,25kg dan 1,5 kg.



Gambar 4.13 Distribusi temperatur kerja pada umpanan 1 kg; 1,25 kg dan 1,5 kg (0,093m³/s)

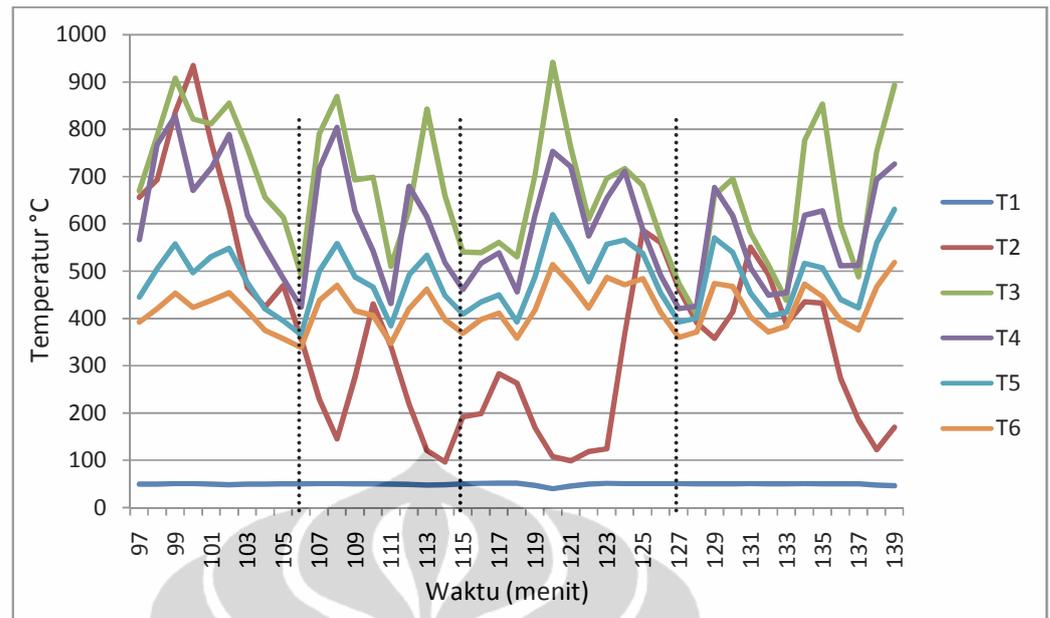
Pada akhir distribusi temperatur kerja yang ditunjukkan pada gambar 4.13, bahan bakar tempurung kelapa dengan berat 1 kg adalah bahan bakar yang paling rendah temperatur rata-ratanya, hal ini menunjukkan bahwa pemasukan bahan bakar dengan berat 1 kg kurang efektif pada kondisi kerja dengan suplai udara 0,085 m³/s. Sedangkan temperatur rata-rata pada pembakaran cangkang kelapa dengan berat 1,5 kg menunjukkan kinerja paling efektif. Temperatur pada T4 dan T5 atau area *freeboard* menunjukkan rata-rata tertinggi pada 625 °C dan 538 °C.

4.2.3.2 Pembakaran pada percobaan dengan suplai udara 0,085 m³/s

Pada percobaan ini dilakukan percobaan dengan bahan bakar 1kg; 1,25kg dan 1,5kg.

- a. Pembakaran 1 kg

Pemberian umpanan 1 kg dilakukan pada menit 106,115 dan menit 127.



Gambar 4.14 Temperatur kerja pada umpanan 1,5 kg dengan (0,085 m³/s)

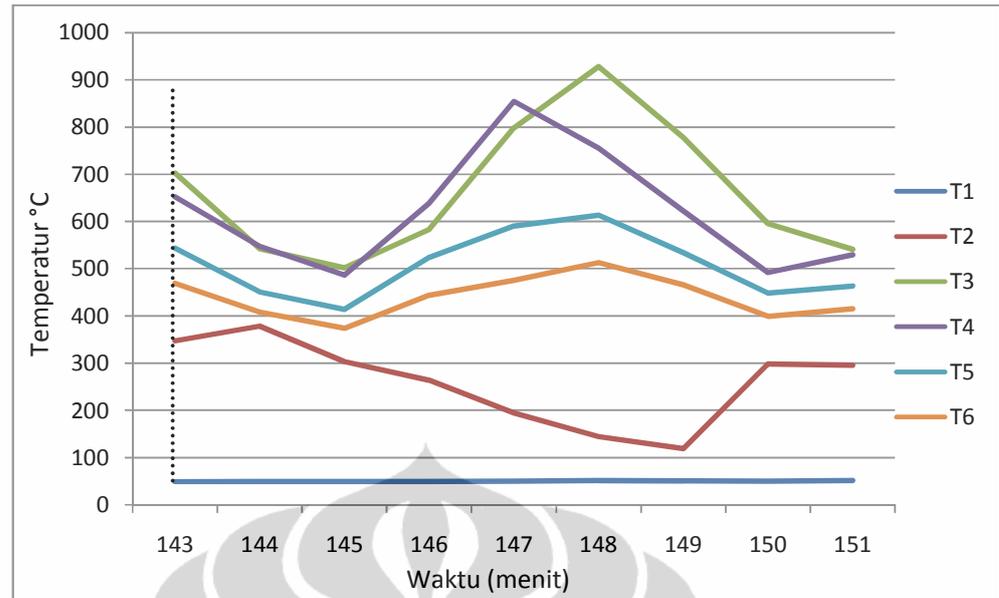
Gambar 4.14 menunjukkan temperatur kerja yang diberikan pada percobaan dengan suplai udara 0,085 m³/s disaat membakar bahan bakar tempurung kelapa dengan berat 1 kg. Terlihat bahwa dibutuhkan waktu lama hingga temperatur naik.

Tabel 4.6 Temperatur pembakaran bahan bakar 1 kg pada 0,085 m³/s

T1	T2	T3	T4	T5	T6
49,56360786	379,8763	674,753	596,703	482,1753	420,6249

b. Pembakaran 1,25 kg

Pada pembakaran cangkang kelapa menggunakan berat 1,25kg ketika kondisi kerja, dilakukan pada menit ke 143.



Gambar 4.15 Temperatur kerja pada umpanan 1,25 kg dengan (0,085 m3/s)

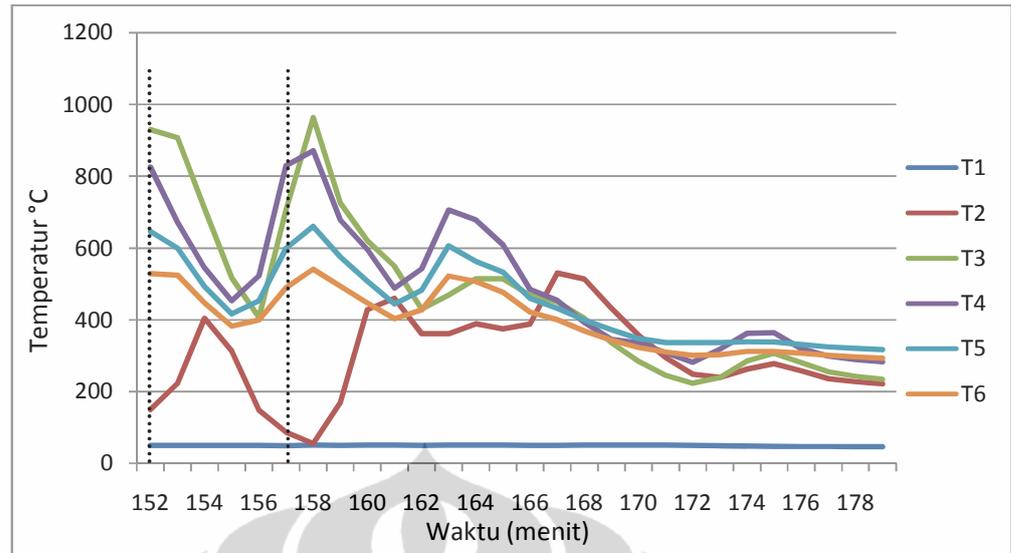
Pada pembakaran cangkang kelapa dengan berat 1,25 kg pada suplai udara 0,085 m³/s menunjukkan temperatur yang cukup tinggi. Pada pemasukan di menit 143 terlihat mengalami kenaikan temperatur, terlebih dahulu mengalami penurunan suhu yang cukup lama .

Tabel 4.7 Temperatur pembakaran bahan bakar 1,25kg pada 0,085 m³/s

T1	T2	T3	T4	T5	T6
50,4330977	260,6531	663,2001	619,8157	509,1091	440,6407

c. Pembakaran 1,5 kg

Pembakaran dengan bahan bakar cangkang kelapa seberat 1,5 kg dilakukan pada menit ke 152 dan menit 157.



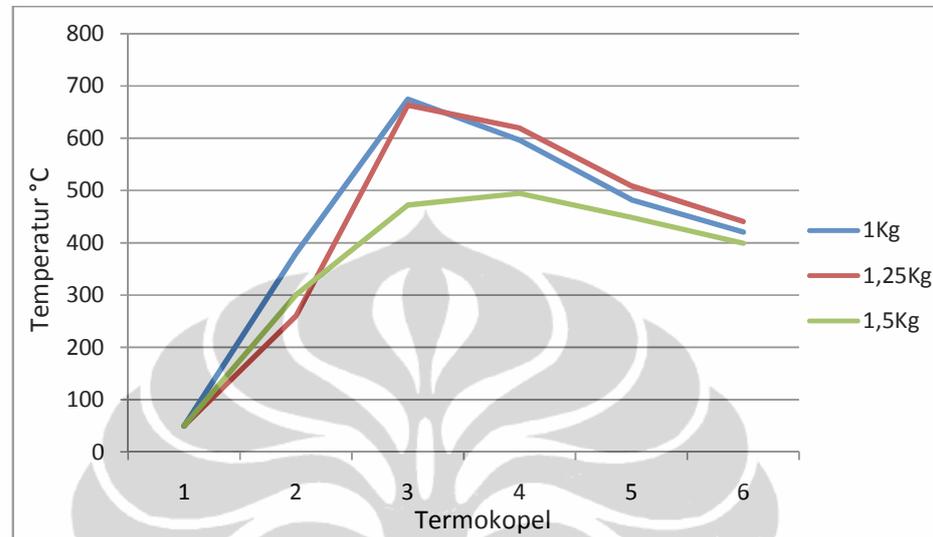
Gambar 4.16 Temperatur kerja pada umpanan 1,5 kg (0,085 m³/s)

Pada gambar 4.16 grafik menunjukkan temperatur kerja pada saat bahan bakar 1,5kg dimasukkan. Pada bagian ini terjadi hal penting yaitu penurunan temperatur secara signifikan ketika bahan bakar dimasukkan. Penurunan ini terjadi selama empat menit. Setelah penurunan tersebut, terjadi kenaikan kembali yang kemudian diikuti dengan penurunan suhu secara perlahan setelah dipemasukan kedua pada menit 157. Hal ini menggambarkan bahwa bahan bakar baru yang masuk ke dalam ruang bakar membutuhkan waktu untuk mengurangi kelembabannya sendiri kemudian meningkatkan suhunya sehingga kemudian terbakar dan ikut meningkatkan temperatur di ruang bakar FBC. Penurunan suhu ini juga menggambarkan performa suplai udara 0,085 m³/s dengan reaksinya terhadap bahan bakar seberat 1,5 kg untuk menyuplai udara agar terjadi pembakaran.

Tabel 4.8 Temperatur pembakaran bahan bakar 1,5 kg pada 0,085 m³/s

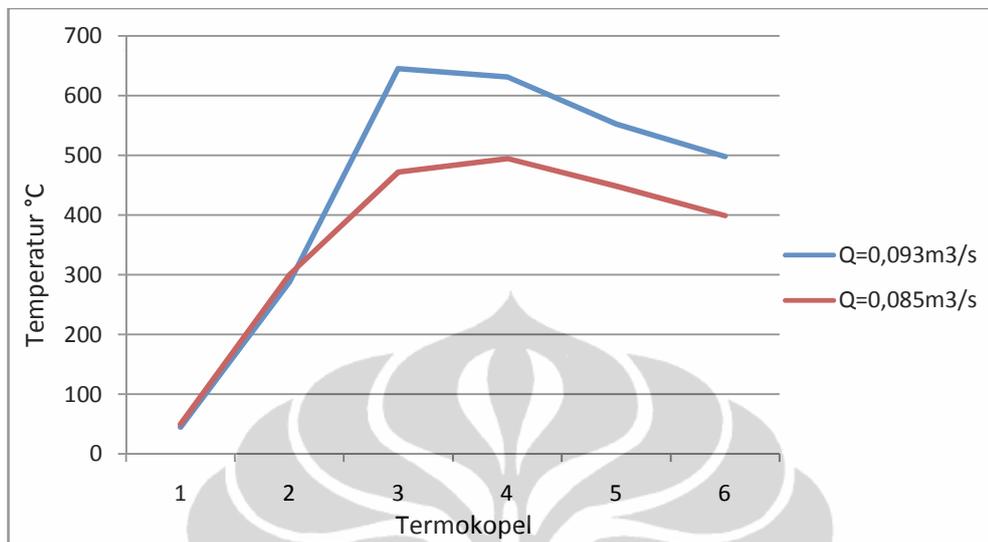
T1	T2	T3	T4	T5	T6
50,0832455	300,4225	472,0219	494,5734	448,5358	399,1872

d. Perbandingan temperatur rata-rata

Gambar 4.17 Distribusi temperatur kerja pada umpanan 1 kg; 1,25 kg dan 1,5 kg (0,085m³/s)

Perbandingan distribusi temperatur rata-rata pada pembakaran bahan bakar tempurung kelapa dengan berat 1 kg; 1,25 kg dan 1,5 kg dengan suplai udara 0,085 m³/s ditunjukkan pada gambar 4.17. Tidak seperti percobaan sebelumnya dengan suplai udara 0,093 m³/s, pada percobaan kali ini di akhir grafik menunjukkan umpanan 1,25 kg lebih tinggi dari umpanan 1 kg, tetapi umpanan 1,5 kg menjadi lebih rendah diantara yang lainnya, hal ini terjadi karena setelah memberi umpanan 1,5 kg, kondisi pasir tidak terfluidaisasi dengan baik, sehingga tiap menit terjadi penurunan secara simultan. Area *freeboard* di T4 menunjukkan temperatur rata-rata paling tinggi di angka 570 °C. Sedangkan, temperatur T5 paling tinggi ditunjukkan oleh pembakaran tempurung kelapa seberat 1,25 kg di angka 509 °C.

4.2.3.3 Perbandingan Pembakaran Tempurung Kelapa 1,5kg di Kedua Percobaan



Gambar 4.18 Distribusi temperatur kerja pada umpanan 1,5 kg (0,085 m³/s dan 0,093 m³/s)

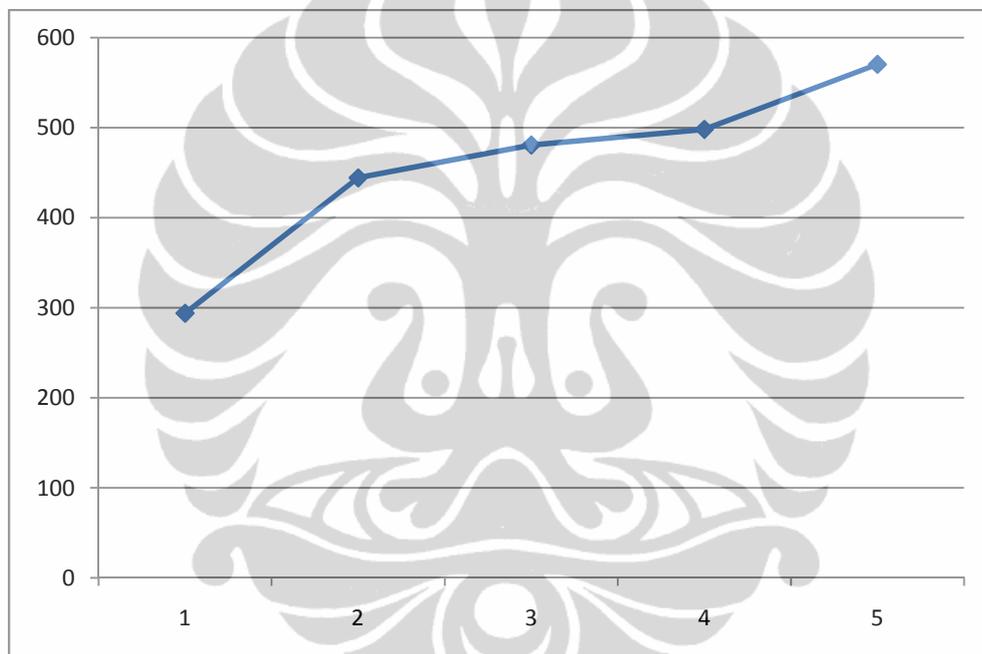
Gambar 4.18 menunjukkan perbandingan distribusi temperatur ketika bahan bakar 1,5kg di kedua percobaan dengan suplai udara berbeda, yaitu 0,085 m³/s dan 0,095 m³/s. Pada grafik dapat dengan jelas diperhatikan bahwa terdapat perbedaan rata-rata temperatur yang signifikan antara kedua percobaan. Pada percobaan dengan menggunakan suplai udara 0,085 m³/s menunjukkan bahwa rata-rata temperatur T4 di area *freeboard* hanya 494,5 °C, sangat jauh jika dibandingkan dengan temperatur T4 pada percobaan dengan suplai udara 0,093 m³/s yaitu 631°C. Perbandingan angka yang serupa juga terlihat dari rata-rata temperatur pada T2, T3, T5 dan T6 kecuali T1, karena T1 hanya mengukur temperatur udara yang memasuki ruang bakar. Perbedaan temperatur dari T2 hingga T6 ini menunjukkan bahwa pada kondisi kerja, penggunaan suplai udara 0,093 m³/s lebih efisien jika dibandingkan dengan suplai udara 0,085 m³/s. Hal ini disebabkan oleh jumlah udara dan oksigen yang masuk ke dalam ruang bakar lebih banyak, sehingga bahan bakar lebih banyak terbakar jika dibandingkan dengan pembakaran dengan suplai udara lebih rendah.

4.2.4 Perbandingan Daya Panas Terhadap Variasi Umpanan

Setelah melakukan percobaan dengan berbagai *feedrate*. Maka dapat jelaskan dalam bentuk tabel dan grafik dibawah ini.

Tabel 4.9 Temperatur pembakaran berdasarkan feedrate pada 0,093 m³/s

No	feedrate	temperatur
1	0,25	293,8122
2	0,5	444,2049
3	1	480,6828
4	1,25	498,0183
5	1,5	570,204



Gambar 4.19 Grafik Daya Panas yang Dihasilkan terhadap variasi feedrate bahan bakar

Pada gambar 4.19 terlihat jelas bahwa umpanan yang paling baik untuk suplai udara 0,093 m³/s adalah 1,5 kg karena mampu menghasilkan temperatur yang tinggi, tetapi tentunya pada proses pemanasan awal hingga kondisi kerja dilakukan umpanan secara bertahap, hal ini dikarenakan pada proses awal, kondisi kondisi *bed* belum terfluidaisasi dengan baik.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

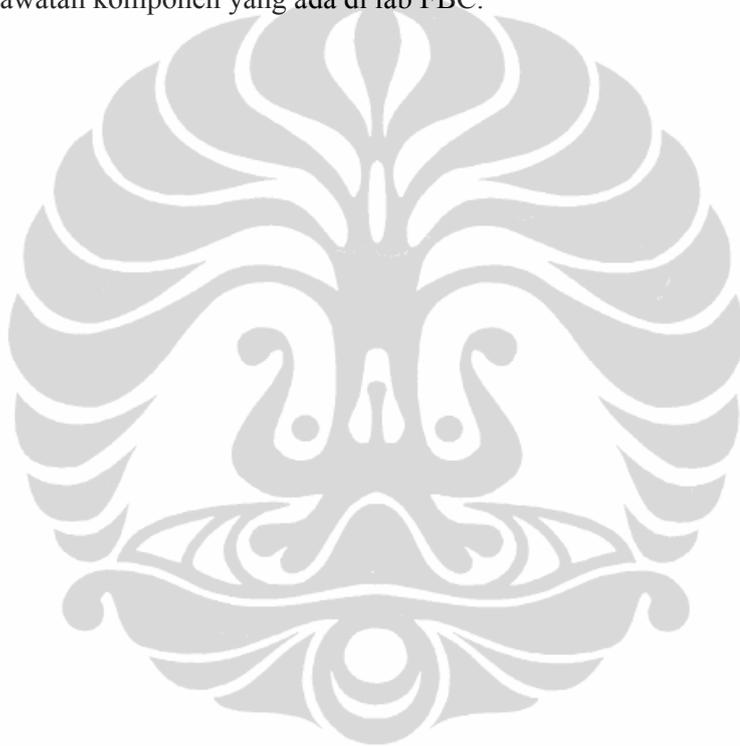
Fluidized bed combustor Universitas Indonesia termasuk jenis FBC *bubbling fluidized bed*, hal ini ditunjukkan dengan kecepatan suplai udara yang tidak cukup tinggi, sehingga tidak membuat partikel hamparan (pasir) untuk terbawa terbang dan keluar menuju *cyclone*.

Kesimpulan yang dapat diambil dari percobaan fluidized bed combustion dengan suplai udara yang berbeda ini adalah:

1. Rasio suplai udara yang berbeda pada proses ini berpengaruh pada hasil temperatur kerja FBC UI.
2. Untuk mendapatkan kondisi kerja FBC atau *self sustaining combustion* diperlukan dilakukan pemanasan awal dengan *burner* sekaligus pemasukan bahan bakar hingga mencapai temperatur 600 – 800°C.
3. Proses pemanasan awal menggunakan suplai udara lebih kecil, yaitu 0,085 m³/s menghabiskan waktu lebih cepat, sekitar 64 menit jika dibandingkan dengan pengoperasian dengan suplai udara 0,093 m³/s selama 71 menit.
4. Pada percobaan dengan suplai udara 0,085 m³/s dan 0,093 m³/s, *feedrate* 1,5 kg tempurung kelapa menghasilkan temperatur yang paling baik.
5. Pada pengoperasian dengan laju aliran udara 0,085 m³/s menghasilkan temperatur rata-rata pembakaran di daerah freeboard T4 pada kondisi kerja *self sustaining combustion* sebesar 551,08°C; sedangkan pada pengoperasian dengan laju aliran udara 0,093 m³/s menghasilkan temperatur sebesar 637,85°C. Hal ini berarti suplai udara 0,093 m³/s melakukan pembakaran lebih baik daripada pengoperasian dengan suplai udara 0,085 m³/s.

5.2 SARAN

1. Peningkatan kapasitas burner dirasakan perlu agar pemanasan awal pasir dapat menjadi lebih cepat, sehingga kondisi kerja self sustaining combustion dapat dicapai dengan lebih cepat
2. Instalasi listrik pada laboratorium pengujian FBC sangat diperlukan untuk menjalankan peralatan FBC. Saat ini laboratorium menggunakan sumber listrik dari genset yang tidak stabil, sehingga terkadang tidak kuat untuk menalankan segala peralatan yang dibutuhkan sekaligus.
3. Pengadaan alat-alat (*tools*) perbengkelan, sebagai alat perbaikan dan perawatan komponen yang ada di lab FBC.



DAFTAR PUSTAKA

1. Basu, Prabir. "Combustion and Gasification in Fluidized Beds" (Taylor & Francis Group 2006).
2. Oka, Simeon N. "Fluidized Bed Combustion" (Marcel Dekker, Inc. 2004)
3. Bruce R. Munson, Donald F. Young, *Mekanika Fluida*, terj. Harinaldi, Budiarto (Jakarta: Erlangga, 2003).
4. Surjosatyo, Adi. "Fluidized Bed Incineration of Palm Shell & Oil Sludge Waste." Tesis, Program Magister Engineering Universiti Teknologi Malaysia, 1998.
5. Howard, J. R., *Fluidized Beds – Combustion and Applications*, (London: Applied Science Publishers, 1983).
6. www.energyefficiencyasia.org
7. www.unep.fr
8. <http://fluidizedbedcombustion.com/>
9. www.em-ea.org
10. <http://www.fossil.energy.gov>

LAMPIRAN



DATA PENGUJIAN DENGAN SUPLAI UDARA 0,085m³/s

Waktu	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Bahan Bakar
1	42,95662	42,22359	40,82095	36,94791	32,62843	35,15798	
2	43,05176	42,93166	81,2485	53,2616	32,86098	43,25352	
3	43,17476	42,2306	278,5863	111,9444	40,92036	91,89259	
4	43,45403	42,97962	275,3906	125,4202	104,893	94,08428	
5	44,13472	41,94107	464,0801	192,5161	177,1649	153,6384	
6	44,48541	42,19698	498,4473	210,3599	185,7691	166,4877	
7	44,45026	43,64498	499,2008	219,9929	187,3525	169,5405	
8	45,07626	44,27455	508,5316	221,4905	187,325	170,8956	
9	44,99659	44,348	522,3591	229,0544	186,9273	171,5707	
10	44,91672	45,99088	532,4291	240,5456	197,4117	177,8395	Serabut
11	44,95722	50,05931	533,5727	255,3296	203,2086	184,6988	
12	44,66597	51,9686	550,448	252,9145	210,3358	192,2523	
13	44,76597	46,79545	545,7147	244,2412	202,0384	185,7044	Serabut
14	45,04698	46,23095	585,7136	250,8258	209,3819	188,8678	
15	45,29814	46,08683	577,9718	261,3629	220,0712	200,0976	
16	45,02767	48,62184	543,9601	242,3148	204,1534	186,5784	
17	44,8934	47,80202	548,4681	239,9802	205,6115	187,897	0,25kg
18	45,03897	50,17181	532,7557	234,4654	205,547	186,3063	
19	45,28529	47,88055	474,6795	239,7881	207,9921	186,9668	0,25kg
20	44,97397	45,75119	529,506	237,4098	203,6493	185,328	
21	45,48559	45,43681	530,4266	233,2157	204,8942	189,6551	
22	45,535	43,05021	522,6476	229,2379	202,6189	187,998	Serabut
23	45,535	46,49533	537,2614	235,2018	197,9654	185,3814	
24	45,535	46,61176	536,7592	248,3794	209,9389	193,6269	Serabut
25	45,535	51,67595	527,7109	256,0851	220,1276	199,5858	
26	46,52371	48,02107	532,2261	268,8813	228,4949	209,1534	0,25kg
27	47,01979	53,53755	510,6949	262,919	213,4051	197,3488	
28	46,6949	50,30679	537,7323	275,1453	223,0208	201,9533	
29	46,577	48,07759	537,2533	290,5556	241,4364	218,9489	
30	46,28745	47,74793	606,1513	296,0209	247,3871	224,2086	
31	46,32636	46,22472	609,5978	323,0916	262,8459	240,7714	
32	47,53376	48,01353	634,6264	322,9283	260,7091	236,4015	
33	48,51364	49,88722	746,1798	358,5523	284,0108	254,8649	
34	47,66471	49,55274	758,2728	436,6718	319,8674	279,4456	
35	47,81493	48,58055	721,1332	401,7937	325,5717	292,9411	0,25kg
36	47,63921	49,13974	644,3355	404,9414	315,0228	283,8551	
37	46,8561	48,12807	644,1631	435,6893	332,0173	298,3854	
38	47,46845	51,6591	725,9293	490,9827	363,619	322,5111	
39	46,773	55,79845	704,0818	451,3034	346,0778	307,2289	
40	46,688	70,46022	656,4507	400,4628	320,1161	287,7163	0,25kg

41	46,688	86,75341	615,661	367,3437	299,9837	272,9972	
42	46,688	94,82786	558,2046	339,2808	281,6165	256,7022	
43	46,9431	111,6912	643,6303	355,0913	283,528	254,7714	
44	47,522	86,62505	613,1315	340,5323	270,5378	246,7445	
45	47,522	65,88922	583,1352	309,6367	255,9845	234,4299	
46	47,522	53,88098	624,8499	318,5874	273,5077	248,4113	0,25kg
47	47,522	46,9274	684,9199	360,9282	297,8807	268,5355	
48	46,51026	42,26093	640,0781	363,9528	291,6848	265,6779	
49	48,65409	46,73238	653,6034	336,8352	278,559	253,2055	
50	48,94131	48,98653	652,8056	348,5963	285,9566	259,7396	
51	49,047	45,45147	691,9008	425,5926	347,2829	304,849	Serabut
52	48,11828	45,36974	623,8803	416,3485	350,5889	308,9227	
53	48,84271	78,95812	561,3242	424,9361	350,1996	315,9045	
54	46,5515	101,6476	697,2224	499,6479	389,7612	346,9827	Serabut
55	44,00364	92,4564	787,7673	642,1871	455,5237	391,0287	
56	45,06512	77,17195	874,9931	761,3722	521,829	435,7054	
57	47,83188	70,68629	857,0333	705,0957	519,1147	434,11	
58	49,08179	121,876	841,7565	760,8519	524,5453	429,7233	
59	48,86495	281,1507	718,9493	638,0764	470,1938	404,2013	0,25kg
60	46,01979	369,7152	783,9395	642,586	480,5866	412,6359	
61	47,36205	352,0209	795,7537	661,3536	505,8291	433,4134	
62	47,96972	301,0868	666,9876	545,4412	426,0863	377,8644	
63	49,37128	313,5859	599,6448	451,6059	368,2185	334,5904	Serabut
64	49,28836	313,802	760,5127	539,5814	444,6937	406,542	Self Sustained
65	49,44591	436,7531	696,8671	487,5733	413,8419	378,3421	0,25kg
66	49,13995	359,5273	536,0466	402,1094	338,4676	307,8602	
67	46,72866	246,6561	433,249	366,2774	296,4979	274,9505	
68	44,55224	137,9498	637,7959	547,7868	392,8293	345,3523	0,25kg
69	46,81893	94,07657	824,2757	704,124	481,6441	407,5858	
70	47,11433	187,0221	793,6789	674,0043	486,0584	410,4899	Serabut
71	48,60234	251,4919	683,0422	517,639	436,1789	386,3266	
72	50,11752	297,2038	636,5734	463,1151	388,2361	342,3382	0,5kg
73	48,5175	343,6715	856,1504	544,3576	485,6724	426,593	
74	48,5986	358,1108	694,749	511,9154	443,7833	394,5679	
75	49,48774	337,9935	636,9493	504,4093	469,7816	416,9014	
76	50,19516	433,2286	742,8687	650,1598	528,7769	449,4073	
77	49,62486	609,5581	629,2366	480,319	421,6311	387,0586	
78	48,44629	533,144	566,7125	403,1072	365,7397	346,0519	0,5kg
79	49,42802	609,3752	836,4004	524,6083	460,4162	414,3986	
80	49,63326	746,0799	706,2836	443,7109	385,896	352,4015	
81	48,9865	540,5457	526,4283	367,4422	328,5238	307,4975	0,5kg
82	48,82203	494,8189	616,365	525,5027	410,041	363,6534	
83	49,02469	514,3127	598,6709	502,6284	403,7114	356,2331	

84	49,12226	423,9567	483,972	387,361	347,014	318,9815	0,5kg
85	49,16647	541,0878	775,3678	476,6167	434,0347	395,078	
86	49,5691	668,6798	692,313	440,3319	401,8739	369,6455	
87	49,37671	454,2303	540,9683	407,9435	340,2896	311,618	
88	48,56709	359,7894	575,1858	431,8604	361,3354	321,2703	
89	47,23971	347,6677	558,1155	542,0181	402,5293	359,1365	
90	47,91416	298,8511	660,1798	643,2321	450,673	393,0406	
91	48,10622	248,6859	696,5861	616,3683	464,7971	405,5713	
92	48,64229	188,6712	685,5131	651,705	515,8123	435,7494	0,5kg
93	49,47409	260,5286	787,2197	781,9237	568,3086	460,0051	
94	49,58676	395,5556	721,8757	617,4518	488,0583	416,1193	
95	50,05983	465,9558	579,0741	476,1914	402,281	359,62	0,5kg
96	50,04031	429,8745	507,405	418,256	360,0302	325,6347	
97	49,74816	422,0156	481,6775	427,9652	377,7857	342,6368	1kg
98	49,73826	568,8349	765,9579	707,1689	515,0192	439,6996	
99	49,61819	645,6345	748,6878	659,7917	501,6214	429,6883	
100	49,38041	655,8276	669,3658	565,8758	444,803	392,0168	1kg
101	49,67348	693,0055	786,8493	766,8898	505,4048	420,1938	
102	50,56902	835,3712	907,5635	827,4579	557,033	453,3961	1kg
103	50,44588	934,0501	821,5856	670,0732	496,4943	422,9633	
104	49,55657	771,176	811,3247	717,6554	530,55	437,8548	
105	48,24809	634,9426	855,447	788,252	547,599	453,6798	
106	49,26455	464,7487	760,788	618,5443	475,927	415,4735	1kg
107	49,76528	424,1427	655,6673	548,7597	419,4328	374,147	
108	49,97821	469,4345	613,8295	484,0634	394,9683	356,7522	
109	50,16676	357,4011	492,1791	423,4442	365,7048	338,4353	
110	50,98376	229,7239	789,5231	716,2884	499,5561	437,2496	Serabut
111	50,63579	145,276	869,3363	803,0957	557,7466	469,5709	
112	50,43105	275,0826	692,3594	626,773	487,4157	416,1346	
113	50,38638	430,3397	698,6337	542,1738	466,1265	405,734	
114	49,77078	340,3943	509,9494	431,0911	384,3835	346,852	
115	48,90471	217,9194	628,8004	679,2195	491,4441	420,4672	1kg
116	47,57271	121,2118	842,6398	614,5574	533,1019	461,7446	
117	48,45634	96,27119	658,7376	517,3435	447,27	397,6034	
118	50,15824	191,9355	540,2826	460,84	409,076	368,0521	Serabut
119	51,38181	198,2486	538,7684	515,9854	434,4205	397,2694	
120	52,0339	282,8261	560,5665	537,9878	449,7058	410,6514	
121	51,84398	262,9122	529,908	455,6518	392,4085	358,3964	1kg
122	47,10845	169,0475	702,2785	617,4546	487,129	417,4475	
123	39,89831	107,9963	941,4889	752,4384	618,8999	513,8789	
124	45,40528	99,02614	761,2235	720,3172	553,5842	472,0188	1kg
125	49,24612	118,7072	609,8872	573,7966	477,5751	421,5476	
126	51,08921	124,0524	695,8464	653,8883	556,5013	486,4332	

127	50,52367	366,3109	716,9687	710,6724	565,3798	470,8695	1kg
128	50,57795	586,7114	680,853	587,8298	537,0075	483,807	
129	50,68874	559,9561	570,9782	490,7328	453,0844	412,6498	
130	50,48729	463,1103	474,5749	420,1948	392,538	359,3702	
131	50,01269	391,4356	407,6504	425,0574	400,1352	370,5543	1kg
132	50,25312	357,7503	659,3956	676,2867	570,1173	473,7733	
133	50,32353	412,9994	695,1282	616,7902	539,2952	467,1252	Serabut
134	50,61543	550,3114	581,055	506,9879	452,9767	403,106	
135	50,25386	492,8222	511,6459	448,9392	404,4426	371,0214	
136	50,10421	387,1192	438,116	453,7008	412,7777	383,6387	
137	50,55922	435,2463	776,4924	617,5987	515,8866	472,582	1kg
138	50,17631	432,2939	853,1741	627,2999	506,655	446,3695	
139	49,96791	273,3215	598,1947	511,0364	440,1305	396,5101	
140	50,07457	184,9035	487,6791	511,8358	422,3434	375,2935	
141	47,76426	122,3199	752,4404	692,6644	558,4458	466,0027	
142	46,49731	170,1426	893,1369	725,868	630,1587	518,0824	
143	49,23348	347,2524	702,2133	652,5592	543,9578	469,4819	1,25kg
144	50,08941	378,6387	542,2962	547,2128	450,6097	408,0963	
145	49,59471	303,5608	501,6438	486,5013	413,8038	374,052	
146	49,79978	263,9502	583,0092	638,5228	523,7242	444,0878	1,25kg
147	50,40162	194,4524	798,2592	854,3408	590,7238	475,9677	
148	51,63378	144,3461	927,6075	755,5052	613,6626	513,2169	
149	51,24057	118,9945	776,9744	622,2342	534,2601	466,0232	
150	50,54309	298,6265	595,7213	491,9426	447,9467	399,1863	
151	51,36145	296,0566	541,0762	529,5227	463,2931	415,6544	
152	50,98859	149,6299	929,1843	824,8029	646,4097	528,8073	1,5kg
153	50,43745	223,2403	906,6538	671,363	598,9509	524,5135	
154	50,9294	404,1949	710,8998	544,0049	492,6201	447,0134	
155	50,7381	313,9617	516,3352	452,9472	416,4933	381,8499	
156	50,67505	148,4678	407,2213	522,1689	452,5974	399,7349	
157	50,00726	86,669	704,9915	829,3165	598,2137	489,178	1,5kg
158	51,26471	55,29941	962,8106	870,9574	660,4301	541,011	
159	50,91343	169,047	725,216	678,0747	574,3239	493,234	
160	51,15312	428,2972	620,0942	596,0118	507,4145	447,5235	
161	51,19266	459,9946	549,2885	488,0391	443,9376	402,9099	
162	50,98722	361,1507	429,9805	541,991	482,29	427,0692	1,5kg
163	51,44562	361,2462	468,9917	705,2131	606,2728	521,9706	
164	51,44967	389,3526	514,149	677,6424	562,8966	506,3565	
165	51,32762	374,5196	513,9694	608,4688	532,5077	476,4654	
166	50,99245	388,217	467,9295	484,9243	459,7783	421,7368	
167	50,87043	530,2691	449,7927	454,2447	431,6295	400,1152	
168	51,39722	513,2878	403,5804	391,9898	399,6551	368,3487	
169	51,17541	432,0762	336,5977	345,3451	371,8393	342,5289	1,5kg

170	51,06922	357,2348	284,8422	335,2585	347,5529	322,9608	
171	51,13698	294,2277	245,4754	308,8404	335,6388	309,7745	
172	50,19647	248,138	223,4756	281,9143	335,5915	300,5831	
173	49,26443	239,6016	239,1676	317,7845	335,6857	302,3631	
174	48,68169	262,6301	285,6409	362,1222	338,2616	312,1506	
175	47,64667	277,6258	307,0209	363,8714	337,7581	312,1419	
176	47,09597	257,9783	281,0607	319,8345	330,4637	307,0414	
177	46,6711	236,0849	255,4028	298,7568	323,7301	300,7801	
178	46,48683	227,8141	242,9085	289,4468	319,501	296,5675	
179	46,1361	221,5731	233,9317	282,719	316,5589	292,5112	



DATA PENGUJIAN DENGAN SUPLAI UDARA 0,093m³/s

Waktu	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Bahan Bakar
1	39,41933	38,88976	36,98922	33,95863	33,71235	33,91037	
2	40,65909	40,75141	39,10339	35,71861	33,80902	33,24067	
3	41,26641	41,80454	96,12687	63,31339	51,91339	46,4037	
4	41,18204	41,87913	462,4865	193,2695	154,2964	130,2038	
5	39,19802	40,38791	564,2929	229,0838	195,73	171,0124	
6	38,84543	40,07722	572,1483	232,3046	199,8704	180,9174	
7	40,58628	40,71091	592,7585	230,7441	195,79	176,9713	Serabut
8	38,14111	47,63311	611,5011	257,1153	223,3147	196,4106	
9	39,2317	88,27891	617,5762	264,9957	222,0795	200,0552	Serabut
10	40,74217	67,56133	629,1535	253,1105	214,0373	195,7157	Serabut
11	40,91211	50,78213	660,8454	247,2112	213,7095	196,3045	
12	39,71343	61,94993	668,066	264,5826	221,8201	201,7838	Serabut
13	40,41765	59,75548	616,9664	251,6511	208,8078	191,1442	0,25kg
14	42,19043	75,80737	549,1135	252,964	211,2664	194,9103	
15	41,89428	132,6265	573,5097	259,1736	213,1182	197,8126	
16	42,0525	168,967	574,3363	264,109	214,045	200,2998	
17	41,08817	195,388	570,1115	262,8682	210,1752	198,1175	
18	40,49761	229,1015	576,9976	257,9876	208,3181	194,7578	
19	39,35843	229,3896	566,3947	259,3951	208,7255	194,6945	
20	39,51617	149,3131	586,3636	257,5873	207,7191	190,17	0,25kg
21	39,69324	91,39817	616,5422	247,4035	218,3118	199,842	0,25kg
22	39,5432	98,48789	605,4246	248,8425	213,0297	195,925	
23	42,40676	226,1192	619,6885	269,4706	219,0601	200,8028	
24	42,91617	218,1718	610,1316	276,5149	221,6833	203,546	
25	41,3538	100,1756	641,6398	287,2754	241,7178	219,7468	0,25kg
26	42,99848	86,1533	654,0243	330,8067	266,0077	240,2623	
27	42,05811	177,7607	635,4921	324,0614	261,7494	239,4927	
28	38,33493	484,4613	705,5794	343,0322	278,0106	251,6929	
29	37,31917	515,9847	702,8419	344,9602	274,7653	253,4423	
30	38,6658	494,6893	670,8253	322,3002	254,9787	237,9797	
31	38,30117	474,7102	580,6414	302,3453	241,6492	225,0242	
32	37,13787	525,0142	574,8248	319,187	255,2042	232,6972	
33	37,33122	614,0697	587,6871	322,6498	258,2206	238,4292	
34	37,8095	612,6082	571,6265	317,5143	251,6541	234,63	0,25kg
35	40,1965	601,0011	627,371	344,103	271,2483	249,5849	
36	39,59165	466,1642	607,7686	334,6554	266,1681	244,705	0,25kg
37	35,05961	288,092	630,8011	315,8712	271,9712	246,1836	
38	35,68298	306,2025	638,1475	315,1227	287,4341	253,2984	
39	41,99357	342,92	643,0081	315,782	292,6466	259,472	
40	42,75102	298,6506	618,3714	309,716	282,8056	257,6122	

41	41,71817	251,2012	586,1505	298,0284	268,3399	247,2802	
42	43,08926	260,0005	667,6643	349,6458	314,3093	286,2714	
43	41,44759	281,075	678,8279	396,9377	320,4398	292,9408	
44	40,9062	339,3468	646,3616	385,2658	305,6898	282,3312	
45	40,2703	287,5049	602,7467	326,9181	277,799	256,3254	
46	38,28411	212,0224	584,2271	314,022	279,2326	260,3164	
47	38,29861	249,3887	618,5855	321,1537	289,4267	271,1814	
48	35,12226	439,1425	714,2788	370,2732	331,8692	302,3164	
49	34,64433	569,7528	696,1287	371,029	323,1568	293,9397	
50	37,15054	430,3033	663,9502	362,6577	313,0175	285,6264	Serabut 0,25kg
51	38,72883	373,7803	640,1863	359,0672	321,8231	295,1595	
52	35,0932	346,3852	500,2623	350,2784	346,7479	326,6155	Serabut 0,5kg
53	32,59028	401,6867	563,3161	416,9085	391,1502	360,8796	
54	34,69128	398,5903	682,8609	535,9469	420,9367	370,4415	
55	34,77313	490,6295	705,3055	582,2586	438,5558	385,6318	
56	29,94917	505,5161	770,4448	686,6582	515,618	429,3066	
57	29,83904	592,9783	840,6063	757,6207	575,8364	471,1368	
58	35,22989	659,8407	798,5838	625,0497	495,8311	429,0163	
59	40,21452	634,501	782,4585	616,0951	454,3903	396,5912	Serabut 0,5kg
60	42,0393	617,6838	807,6723	650,9184	501,3597	432,1972	
61	42,91637	540,8906	626,0039	544,9236	421,4905	368,8872	Serabut 0,5kg
62	42,10909	526,3746	573,2473	547,9257	438,0696	384,233	0,5kg
63	39,71307	518,4454	577,9253	647,7242	498,1903	426,7864	
64	37,02093	533,201	546,0697	497,9517	426,1104	380,5797	
65	34,92009	486,2474	540,9783	644,1642	524,197	451,9483	0,5kg
66	38,61257	538,8083	549,6722	548,9007	461,9222	407,9973	
67	34,47726	561,7587	591,023	732,5927	599,4448	495,294	0,5kg
68	30,89928	609,9773	590,5181	555,5897	484,4649	430,4291	0,5kg
69	35,16857	601,6114	580,4604	610,9053	487,9512	419,2222	0,5kg
70	35,4635	624,235	609,7804	627,2864	518,886	446,8526	
71	29,47846	618,0489	632,2785	749,5823	562,9505	478,2705	Self Sustained
72	40,45759	685,0153	670,5427	628,5032	521,0183	461,3053	
73	42,24276	656,9592	656,7427	660,8358	507,182	434,5075	0,25kg
74	39,66761	707,0148	685,9356	633,6387	510,1649	440,768	
75	40,52378	626,321	636,1298	686,4423	505,5296	424,7091	0,25kg
76	36,64002	680,2111	661,1378	622,6859	508,2447	433,7299	
77	33,9833	662,4507	673,5658	732,089	546,6677	456,2805	0,25kg
78	42,00715	769,807	720,4452	615,4499	486,353	422,9514	
79	40,671	782,977	780,006	760,5294	551,5322	457,4438	0,25kg

80	37,44126	937,3947	732,2442	633,6425	535,7462	463,8222	
81	39,2643	929,3469	622,0838	557,5047	466,3887	413,441	
82	42,45793	744,9915	668,7054	685,4189	511,2143	442,8623	0,5kg
83	32,03385	762,8922	695,6482	726,0913	584,2165	501,3954	
84	30,78289	782,3221	673,8753	539,3718	471,9147	429,7745	0,5kg
85	38,60763	705,2156	536,1908	414,5704	375,3949	346,3587	
86	43,3952	478,0625	469,2132	407,4684	345,7869	318,8547	0,5kg
87	45,50446	357,0676	438,1218	491,4736	373,7295	341,6764	
88	46,42783	378,9995	549,6044	667,6388	477,5053	410,931	
89	46,56861	381,7967	559,7941	575,8158	483,0773	435,4294	
90	45,7702	486,8216	605,4603	549,3911	477,7156	435,5673	
91	42,27107	477,3758	535,5623	485,4701	413,4217	383,1302	1kg
92	34,98998	533,8303	762,3975	775,949	560,6032	465,8688	
93	35,2367	711,7025	754,8875	716,2899	606,4133	514,735	
94	44,0462	665,0307	631,1439	551,6948	472,6767	424,9465	1kg
95	46,44528	448,5604	593,2109	673,6073	535,7318	452,3105	
96	47,51326	463,7501	749,3919	756,4909	646,3737	563,3764	
97	47,55989	592,0832	664,9656	577,5558	509,2861	469,1724	
98	46,54946	517,2589	560,9115	498,5134	432,9409	404,7368	1kg
99	41,48102	478,8836	635,8172	755,5302	593,0534	511,0283	
100	37,35939	648,1727	663,6785	643,3478	543,9282	479,9857	
101	42,40678	663,8199	589,4136	524,2722	445,5302	406,1078	
102	44,74654	536,5995	609,862	729,0139	533,3156	452,0172	
103	45,96576	633,6332	663,8782	643,4196	532,2493	466,7733	1kg
104	45,78009	599,7864	585,1688	530,7696	455,1926	416,0807	
105	45,95302	584,5222	630,3044	742,5158	598,4458	513,0245	
106	44,57124	657,4993	677,0972	670,9065	595,4437	530,9466	
107	44,12665	598,7248	599,5278	526,3607	457,5223	422,685	1kg
108	45,41302	431,0802	559,6783	494,8806	433,7931	402,494	
109	46,00065	369,2777	708,6589	668,3842	588,3912	510,4109	
110	46,20557	376,798	747,218	739,7153	628,9091	552,3225	
111	46,01002	400,7581	644,8108	576,1597	495,8173	452,0969	1kg
112	45,86748	440,3135	562,2915	499,1845	435,3163	404,8702	
113	45,74609	344,7497	507,9652	538,5641	441,6734	406,673	
114	45,85515	239,851	625,0632	693,9257	602,5669	524,4229	1kg
115	46,45891	168,7243	684,2721	651,4751	593,2922	530,691	
116	46,194	325,941	601,4225	531,7799	483,4709	445,9648	
117	46,19198	441,3133	492,1363	487,6144	440,0118	408,2002	1kg
118	46,40937	396,5885	694,5923	797,166	636,512	538,7789	
119	47,37876	423,6908	771,1973	680,8307	588,1512	529,8553	
120	47,15326	404,0502	649,5833	567,7159	486,1629	450,2354	
121	46,81724	353,3925	658,0913	681,3202	519,0846	456,5188	
122	47,58596	174,4103	813,8177	762,0233	637,414	552,8589	1,25kg

123	46,89452	178,4537	697,702	601,3199	519,8533	488,5027	
124	47,15459	247,0358	612,0211	530,6011	455,9896	423,4693	
125	47,2305	277,6132	525,2901	480,6472	421,0062	392,878	
126	46,72013	287,757	468,1731	492,6853	441,5473	406,0146	
127	46,20285	163,1578	472,3713	695,8695	611,236	520,5117	1,25kg
128	42,39874	107,9953	591,7441	738,1891	621,3576	549,0881	
129	44,99883	172,3567	646,1309	611,8661	551,1	511,3696	
130	46,45635	175,8239	599,4202	595,1905	531,2437	477,1217	
131	47,19315	174,2782	629,8198	756,734	616,8658	522,7884	
132	42,41778	194,9254	748,6515	760,0477	677,9455	579,3098	
133	35,26541	219,2628	667,5887	617,782	561,8516	513,1667	1,5kg
134	35,97117	323,0546	582,1808	536,8039	479,255	450,0565	
135	42,12259	339,6382	640,809	709,2297	570,943	502,7365	
136	44,84661	313,456	757,3621	755,4082	653,603	580,4292	
137	45,48167	343,5462	651,2893	592,0699	533,4668	503,0233	
138	45,41202	303,4903	576,0007	542,382	477,058	443,5366	1,5kg
139	45,20343	184,1364	637,8542	665,6452	602,2164	529,9151	
140	45,81948	213,8713	764,1814	718,1367	658,5379	561,5427	
141	46,7547	312,1018	686,1924	619,9128	571,8862	513,002	
142	46,66185	313,669	593,1825	538,6395	490,7577	455,0543	
143	46,02341	322,5303	527,6916	533,3128	475,6649	437,1476	1,5kg
144	45,94022	164,7789	572,9727	664,851	594,4402	517,9411	
145	46,23287	182,6755	737,5287	696,399	613,3222	535,5307	
146	45,8945	422,3585	620,9835	554,1799	493,0444	453,1853	
147	45,88274	335,8456	612,9801	569,9648	516,0955	472,5468	
148	46,84983	380,1594	741,9423	695,8419	587,5947	523,6118	
149	46,64863	426,1827	664,3492	703,133	562,4065	497,7701	
150	45,01896	435,3017	786,5101	850,0002	659,3141	562,242	
151	46,88337	580,8617	684,7197	662,182	579,1712	518,6058	
152	47,00424	561,7655	582,2565	552,6612	488,5045	454,6019	
153	46,23604	377,9754	503,677	484,4413	442,3317	417,4411	1,5kg
154	41,65085	225,4987	490,2226	538,9487	490,7535	454,7686	
155	40,56611	188,1128	637,6832	708,0477	657,6838	582,8367	
156	43,25739	243,2046	937,3323	757,6858	674,8525	627,5982	
157	45,07387	464,0788	909,2603	676,3709	607,0895	554,0038	
158	45,32141	370,067	677,4583	562,4316	497,1975	462,9662	1,5kg
159	45,7053	304,0069	524,8657	494,7071	441,8701	415,7317	
160	42,19504	223,8563	460,5015	507,8275	462,9358	433,3413	1,5kg
161	43,25239	152,0513	533,5494	645,462	565,9443	500,3391	
162	40,57793	102,6282	610,0595	700,6602	555,2201	501,4783	
163	43,14078	121,0862	648,1424	618,3697	527,6288	482,9535	
164	44,81365	169,8138	689,5736	601,2901	511,7283	465,185	
165	45,96552	306,5971	520,3361	482,1895	443,8267	419,3125	

166	46,09261	393,8305	498,6229	700,8964	533,8815	473,4623	
167	46,693	430,3894	738,6706	900,3531	711,5834	593,5347	
168	46,74374	331,8196	708,4539	797,0928	666,1666	576,4751	
169	46,19159	413,3447	762,8969	671,2585	576,1267	517,4726	
170	46,07198	357,3558	645,8117	637,9583	532,9757	476,0834	
171	46,96565	336,8087	827,4315	885,8278	694,4138	567,3739	
172	47,6183	312,4252	854,1537	736,9175	614,6191	544,2519	
173	46,97952	266,3178	733,9367	595,4724	530,1471	481,0412	1,5kg
174	46,29567	273,5515	586,6763	530,2116	483,4619	450,4887	
175	46,79302	224,2769	798,6403	806,0302	665,2227	576,8503	
176	47,74896	146,891	783,3098	689,1786	655,2252	596,4792	
177	47,69715	81,55035	665,6555	560,8885	537,3334	516,9909	
178	46,0323	59,58174	465,0565	465,8126	447,4484	425,2533	
179	45,50546	117,2301	357,5039	394,8471	414,086	388,4482	
180	44,96414	99,68022	299,7952	360,9165	397,199	371,6228	

