



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN BIOMASSA
TEMPURUNG KELAPA PADA FLUIDIZED BED COMBUSTOR
UNIVERSITAS INDONESIA DENGAN PARTIKEL HAMPARAN
PASIR BERUKURAN MESH 20-40**

SKRIPSI

AZMI MUNTAQO

0906605252

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JANUARI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN BIOMASSA
TEMPURUNG KELAPA PADA FLUIDIZED BED COMBUSTOR
UNIVERSITAS INDONESIA DENGAN PARTIKEL HAMPARAN
PASIR BERUKURAN *MESH 20-40***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

AZMI MUNTAQO

0906605252

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

DEPOK

JANUARI 2012

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

STUDI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN BIOMASSA TEMPURUNG KELAPA PADA FLUIDIZED BED COMBUSTOR UNIVERSITAS INDONESIA DENGAN PARTIKEL HAMPARAN PASIR BERUKURAN MESH 20-40

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, 5 Desember 2011



AZMI/MUNTAQO

NPM : 0906605252

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Azmi Muntaqo
NPM : 0906605252
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : STUDI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN
BIOMASSA TEMPURUNG KELAPA PADA
FLUIDIZED BED COMBUSTOR UI DENGAN
PARTIKEL HAMPARAN PASIR BERUKURAN
MESH 20-40

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M.Eng.
Penguji : Prof. Dr. I Made K Dhiputra Dipl.-Ing
Penguji : Dr. Agus S. Pamitran, S.T., M.Eng.



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 16 Januari 2012



KATA PENGANTAR

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

1. Allah SWT, Tuhan semesta alam. Karena berkat rahmat dan berkahNya lah saya dapat
2. Ibu dan Adik tercinta, Mainih Sibun dan Darari Alba Jilly yang selalu memanjatkan doa yang tulus, perhatian serta kasih sayangnya yang begitu besar terhadap saya, juga adik saya yang selalu menjadi saudara 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. Saya pribadi ingin memohon maaf sebesar-besarnya jika selama ini saya ada kesalahan selama masa bimbingan ini. Tak lupa ucapan “ Terima kasih banyak atas ilmu yang tak ternilai harganya ini,”
4. Dr. Ir. Rusdy Marlin, M.Eng, selaku pembimbing akademik yang telah banyak member arahan dan dukungan selama kuliah baik secara moril maupun strategi. Terimakasih banyak .
5. Seluruh dosen, staf pengajar dan karyawan DTM FTUI yang secara langsung atau tidak langsung memberikan pelajaran, wawasan dan informasi.

6. Perempuan Henia Yulianda yang selama ini telah memberikan kasih sayang dan perhatian yang sangat besar kepada saya. Serta telah dengan sabar memberikan semangat agar saya dapat menyelesaikan skripsi ini.
7. Seluruh teman seperjuangan skripsi saya, Riza Rahmat, Amd., Muhammad Wiweko S. Amd., Nanda Prima, Arya Yuana dan Egi Adine yang banyak menginspirasi saya, semua tawa, suka duka, senang dan sedih bersama selama pengerjaan skripsi. Serta teman-teman anak bimbingan bapak Adi Tim GASIFIKASI baik *Updraft* maupun *Downdraft*, Terima kasih untuk kalian semua yang sudah banyak membantu dalam pengerjaan skripsi ini.
8. Seluruh teman-teman saya yang banyak sekali mendukung saya baik secara langsung maupun tidak langsung dari kosan *sepuh*. Arif Hudaya, Amd., Dwi Hariyanto, Amd., Rhino Sugiarto, Amd., Readyas Wibawa, Amd., Gilang Arif Wibowo, Amd., dan semua penghuni kosan *sepuh* yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu, serta seluruh rekan seperjuangan PPSE09, dan masih banyak lagi. Terima kasih untuk semuanya.
9. Seluruh staf DTM FTUI terutama Bapak Suryadi, \Bapak Syarif, Bapak Wasis dan masih banyak lagi. Terimakasih banyak.
10. Seluruh pihak yang tidak dapat saya ucapkan satu persatu. Saya ucapkan terima kasih banyak atas segala hal yang begitu berarti dalam setiap perjalanan hidup saya.

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

Depok, 5 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 : Azmi Muntaqo
NPM : 0906605252
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi


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

**STUDI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN BIOMASSA
TEMPURUNG KELAPA PADA FLUIDIZED BED COMBUSTOR
UNIVERSITAS INDONESIA DENGAN PARTIKEL HAMPARAN
PASIR BERUKURAN MESH 20-40**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 16 Januari 2012 .

Yang menyatakan,

(Azmi Muntaqo)



ABSTRAK

Nama : Azmi Muntaqo

Npm : 0906605252

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : Studi Karakteristik Pembakaran Biomassa Tempurung Kelapa Pada Fluidized Bed Combustor Universitas Indonesia Dengan Partikel Hampanan Pasir Berukuran Mesh 20-40

Potensi energi biomassa cukup besar di Indonesia karena sebagian besar wilayahnya terdiri dari hutan dan pesisir pantai. Salah satu pemanfaatan energi biomassa saat ini yang cukup populer yaitu *Fluidized Bed Combustor*, Alat pengkonversi energi biomassa menjadi energi panas yang dapat dimanfaatkan lagi. Biomassa yang digunakan berupa tempurung kelapa dengan ukuran 1x1 cm dan 1.5 x1.5 cm. *Fluidized Bed Combustor* bekerja memanfaatkan hampanan pasir yang difluidisasikan menggunakan udara bertekanan. Temperatur kerja rata-rata . *Fluidized Bed Combustor* berada pada 600-900°C. Hampanan pasir yang digunakan ialah pasir silika dengan ukuran mesh 20-40 μm . Pasir memiliki peranan penting dalam pengoperasian *Fluidized Bed Combustor*. Maka dilakukan pengujian terhadap hampanan pasir *mesh* 20-40 μm . Dengan pembandingan menggunakan hampanan pasir *mesh* 20-30 μm , hasilnya hampanan pasir *mesh* 20-40 μm lebih baik dari *mesh* 20-30 μm karena, hasil fluidisasinya lebih stabil dengan rata-rata temperatur T2 738 °C - 863 °C . dan temperature pada *free board area* T4 mencapai 823.3709°C.

Kata kunci : *Fluidized Bed Combustor*, pasir silika, biomassa, *mesh* 20-40 μm



DAFTAR ISI

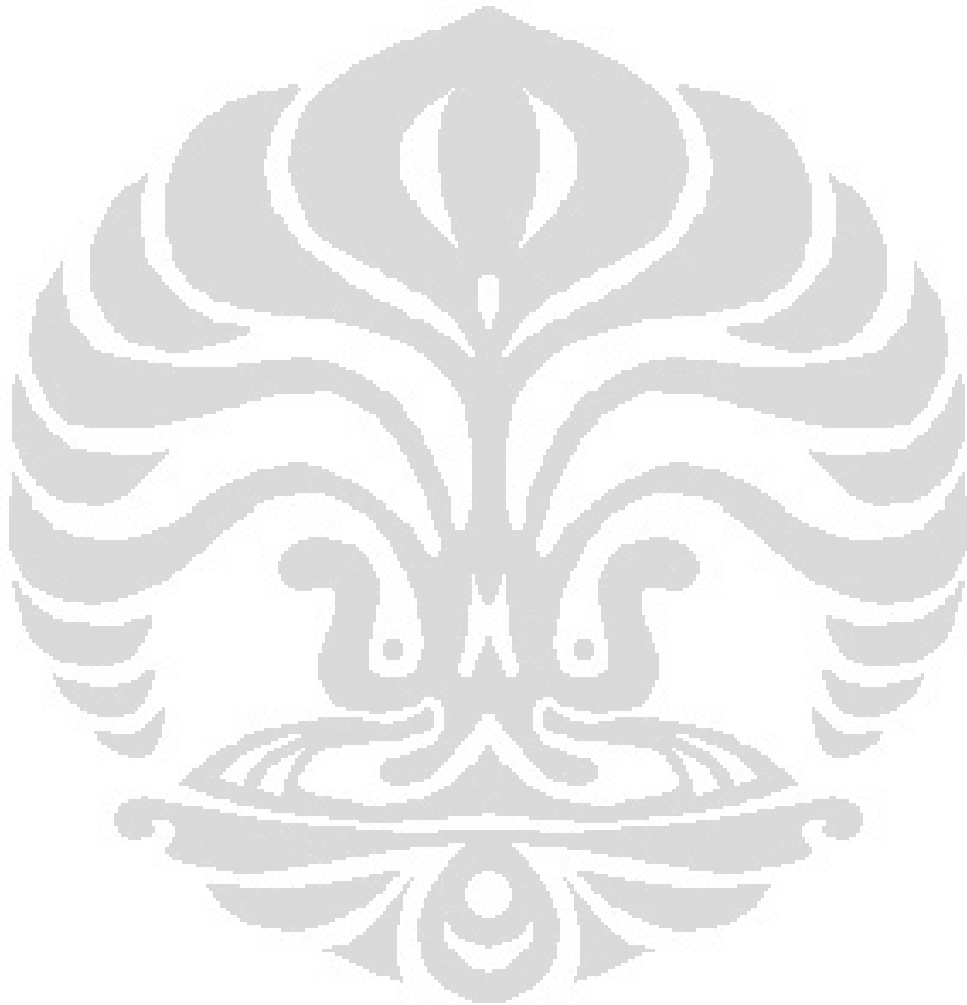
HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 JUDUL PENELITIAN	1
1.2 LATAR BELAKANG MASALAH	1
1.3 PERUMUSAN PERMASALAHAN	4
1.4 TUJUAN PENULISAN	5
1.5 BATASAN MASALAH	5
1.6 METODOLOGI PENELITIAN.....	5
1.7 SISTEMATIKA PENULISAN	6
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	14
2.3	SISTEM REAKSI PEMBAKARAN	17
2.3.1	Hal-Hal Yang Harus Diperhatikan Dalam Proses Pembakaran	19
2.3.2	Komponen-Komponen Utama Reaksi Pembakaran	20
2.4	FLUIDIZED BED COMBUSTOR	22
2.4.1	Jenis-Jenis Fluidized Bed Combustor	25
2.4.2	Pinsip Kerja Fluidized Bed Combustor	26
2.4.3	Bagian-Bagian Fluidized Bed Combustor	28
2.5	FENOMENA FLUIDISASI	38
2.5.1	Proses Fluidisasi	38
2.5.2	Kondisi Fluidisasi	38
2.5.3	Jenis-Jenis Fluidisasi	40
2.5.4	Parameter-Parameter Fluidisasi	42
BAB 3 PERSIAPAN DAN PROSEDUR PENGUJIAN		51
3.1	PERSIAPAN PENGUJIAN	51
3.1.1	Bahan Bakar Biomassa	51
3.1.2	Pasir	53
3.1.3	Perlengkapan dan Peralatan	56
3.2	STANDAR OPERASI ALAT PENGUJIAN	61
3.2.1	Sistem feeder	61
3.2.2	Blower	63
3.2.3	Sistem burner	65
3.3	PROSEDUR PENGUJIAN PEMBAKARAN	68
3.3.1	Rangkaian Alat Pengujian	68
3.3.2	Prosedur Pengambilan Data Pembakaran	69
BAB 4 HASIL DAN ANALISA		72

4.1 HASIL	72
4.1.1 Pembakaran dengan Mesh 20-30	72
4.1.2 Pembakaran dengan suplai udara Mesh 20-40.....	73
4.2 ANALISA	73
4.2.1 Sebelum kondisi kerja.....	74
4.2.2 Analisa Saat kondisi kerja.....	76
4.2.3 Pembakaran biomassa pada kondisi kerja	79
4.2.3.1. Pembakaran pada percobaan dengan hamparan pasir <i>mesh</i> 20-30.....	79
4.2.3.2. Pembakaran pada percobaan dengan hamparan pasir <i>mesh</i> 20-40.....	82
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	88
5.1 KESIMPULAN.....	88
5.2 SARAN.....	89
DAFTAR PUSTAKA	

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Data Energi Fosil di Indonesia	2
Tabel 2.1 <i>Ultimate Anaysis</i> Beberapa Jenis Biomassa.....	17
Tabel 2.2 <i>Proximate Analysis</i> Beberapa Jenis Biomassa	17
Tabel 2.3 Nilai LHV Beberapa Jenis Biomassa	17
Tabel 2.4 Jenis-Jenis Bahan Bakar	20
Tabel 2.5 <i>Increasing Size and Density</i>	49
Tabel 3.1 Potensi Biomassa di Indonesia.....	52
Tabel 3.2 <i>Specific Heat</i> berbagai subtansi.....	54
Tabel 3.3 Sifat fisik, termal, dan mekanik pasir silika	54
Tabel 3.4 Distribusi ukuran pengayakan pasir silika	55
Tabel 3.5 Spesifikasi motor <i>feeder</i>	62
Tabel 3.6 Spesifikasi teknis <i>ring blower</i>	64
Tabel 3.7 Spesifikasi teknis <i>Hi-Temp Premixed Burner</i>	68
Tabel 4.1 Temperatur rata-rata pada saat pemanasan 30 menit pertama.....	76
Tabel 4.2 Temperatur rata-rata pada saat kondisi kerja	78
Tabel 4.3 Temperatur rata-rata <i>feeding</i> 1 kg kondisi kerja di menit 97dan 101 dengan hamparan pasir <i>mesh</i> 20-30.....	80
Tabel 4.4 Temperatur rata-rata <i>feeding</i> 1,25 kg kondisi kerja di menit 124 dan 129 hamparan pasir <i>mesh</i> 20-30.....	81
Tabel 4.5 Temperatur rata-rata <i>feeding</i> 1,5 kg kondisi kerja di menit 133, 153, 174 hamparan pasir <i>mesh</i> 20-30.....	81
Tabel 4.6 Temperatur rata-rata <i>feeding</i> 0,5 kg sebelum kondisi kerja di menit 48 dan 50 dengan hamparan <i>mesh</i> 20-40.....	83
Tabel 4.7 Temperatur rata-rata <i>feeding</i> 1kg kondisi kerja di menit 64 dan 67 dengan hamparan <i>mesh</i> 20-40.....	84
Tabel 4.8 Temperatur rata-rata <i>feeding</i> 1,5 kg kondisi kerja di menit 79 dan 87	



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>	10
Gambar 2.4 <i>Anaerobic Digester</i>	12
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	16
Gambar 2.8 Skematis <i>Fluidized Bed Combustor</i>	24
Gambar 2.9 Diagram Proses Pencampuran (<i>mixing</i>) dalam <i>Fluidized Bed Combustor</i>	25
Gambar 2.10 Tahapan Proses Kerja <i>Fluidized Bed Combustor</i>	28
Gambar 2.11 Ruang Bakar Utama <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI	29
Gambar 2.12 Perilaku Gelembung Setiap Jenis Distributor	30
Gambar 2.13 Distributor yang Digunakan pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI	30
Gambar 2.14 Jenis-Jenis <i>Solid Flow Control</i>	31
Gambar 2.15 <i>Screw Feeder</i>	32
Gambar 2.16 <i>Burner</i> yang digunakan pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI	33
Gambar 2.17 <i>Cyclone Separator Fluidized Bed Combustor</i> UI	35
Gambar 2.18 Blower Sentrifugal yang Digunakan pada FBC	36
Gambar 2.19 <i>Control Panel</i>	37
Gambar 2.20 <i>Portable Data Acquisition Module</i>	37
Gambar 2.21 Skematik Fluidisasi	38
Gambar 2.22 Hubungan Tinggi Hampanan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hampanan Zat Padat	39
Gambar 2.23 Hubungan Penurunan Tekanan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hampanan Zat Padat	40
Gambar 2.24 Diagram Klasifikasi Jenis-Jenis Pasir	46

Gambar 2.25 Daerah batas fluidisasi	50
Gambar 3.1 Tempurung kelapa	52
Gambar 3.2 Tempurung kelapa hasil <i>crushing</i>	53
Gambar 3.3 Pasir silika mesh 20-40 yang digunakan pada FBC UI	56
Gambar 3.4 Generator set yang digunakan	57
Gambar 3.5 Konfigurasi termokopel	58
Gambar 3.6 (a) <i>Portable Data Acquisition Module</i>	59
Gambar 3.6 (b) Tampilan Perangkat Lunak <i>Adam View</i>	59
Gambar 3.7 Timbangan dengan skala maksimum 5 kg	60
Gambar 3.8 <i>Control panel</i> yang digunakan untuk feeder dan blower.....	60
Gambar 3.9 <i>Coconut Shell Crusher</i>	61
Gambar 3.10 Sistem feeder pada <i>fluidized bed combustor</i> UI	62
Gambar 3.11 Ring blower pada <i>fluidized bed combustor</i> UI	64
Gambar 3.12 Bagian-bagian <i>hi-tempmixed burner</i>	67
Gambar 3.13 Rangkaian seluruh alat untuk melakukan pengujian pembakaran ..	69
Gambar 4.1 Grafik pembakaran dengan <i>mesh</i> 20-30	72
Gambar 4.2 Grafik pembakaran dengan <i>mesh</i> 20-40.....	73
Gambar 4.3 Grafik pemanasan dengan ukuran hamparan <i>mesh</i> 20-30	75
Gambar 4.4 Grafik pemanasan dengan ukuran hamparan <i>mesh</i> 20-40	75
Gambar 4.5 Grafik pembakaran pada kondisi kerja dengan ukuran hamparan <i>mesh</i> 20-30	77
Gambar 4.6 Grafik pembakaran pada kondisi kerja dengan ukuran hamparan <i>mesh</i> 20-40.....	77
Gambar 4.7 Asap yang keluar dari feeder pada percobaan dengan hamparan pasir <i>mesh</i> 20-30.....	78
Gambar 4.8 Kondisi kerja dengan hamparan pasir <i>mesh</i> 20-40.....	78
Gambar 4.9 Grafik distribusi temperature terhadap waktu kondisi kerja dengan <i>feeding</i> 1 kg.....	79
Gambar 4.10 Grafik distribusi temperature terhadap waktu kondisi kerja	

dengan <i>feeding</i> 1,25 kg.....	80
Gambar 4.11 Grafik distribusi temperature terhadap waktu kondisi kerja dengan <i>feeding</i> 1,5 kg	81
Gambar 4.12 Grafik distribusi temperature kerja pada saat pemasukan bahan bakar 1, 1,25 dan 1,5 kg.....	82
Gambar 4.13 Grafik distribusi temperature terhadap waktu sebelum kondisi kerja dengan <i>feeding</i> 0,5 kg dengan hamparan <i>mesh</i> 20-40.....	83
Gambar 4.14 Grafik distribusi temperature terhadap waktu sebelum kondisi kerja dengan <i>feeding</i> 1 kg dengan hamparan <i>mesh</i> 20-40.....	84
Gambar 4.15 Grafik distribusi temperature terhadap waktu sebelum kondisi kerja dengan <i>feeding</i> 1,5 kg dengan hamparan <i>mesh</i> 20-40.....	85
Gambar 4.16 Grafik distribusi temperature terhadap waktu kondisi kerja dengan <i>feeding</i> 1 kg dengan hamparan <i>mesh</i> 20-40	86
Gambar 4.18 Distribusi temperatur kerja pada saat umpanan 1;1,25 dan 1,5 kg dengan <i>mesh</i> 20-40.....	87



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Judul Penelitian

Studi Karakteristik Pembakaran Biomass Tempurung Kelapa Pada Fluidized Bed Combustor Universitas Indonesia Dengan Partikel *Bed* Berukuran *Mesh* 20-40

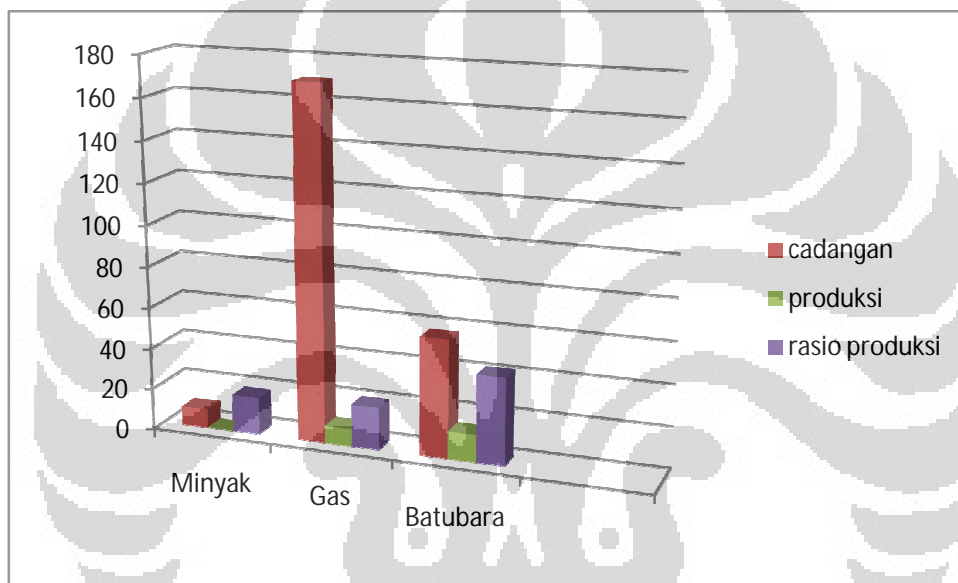
1.2 Latar Belakang Masalah

Keberlangsungan kegiatan sehari-hari manusia, tidak dapat lepas dari kebutuhannya akan energi. Segalanya memerlukan energi, mulai dari membaca dan menulis sampai ke tingkat industri. Proporsi minyak bumi sebagai sumber utama energi mencapai 40% dari total permintaan energi dunia, namun cadangannya terus berkurang. Pada tahun 2011 pertumbuhan permintaan minyak bumi dunia akan mencapai 1,7% sementara peningkatan produksi hanya mencapai 0,9%. Keadaan ini menyebabkan negara-negara termasuk Indonesia rentan terhadap risiko terjadinya krisis energi dunia.

Cadangan minyak bumi terbukti saat ini di Indonesia diperkirakan 9 milyar barel, dengan tingkat produksi rata-rata 0,5 milyar barel per tahun, sehingga diperkirakan cadangan minyak akan habis dalam waktu 18 tahun. Cadangan gas diperkirakan 170 TSCF (*trillion standart cubic feed*) sedangkan kapasitas produksi mencapai 8,35 BSCF (*billion standart cubic feed*). Cadangan batubara diperkirakan 57 miliar ton dengan kapasitas produksi 131,72 juta ton per tahun. Oleh karena itu energi memegang peran penting dalam kehidupan sosial dan ekonomi.

Tabel 1.1 Data energi fosil Indonesia

ENERGI FOSIL	CADANGAN TERBUKTI	PRODUKSI TAHUNAN	RASIO CADANGAN/PRODUKSI
Minyak	9 milyar barel	0,5 milyar barel	18 tahun
Gas	170 TSCF	8,35 BSCF	20,4 tahun
Batu bara	57 miliar ton	131,72 juta ton	26,5 tahun



Gambar 1.1 rasio energi fosil Indonesia

Sumber : Kementerian Luar Negeri Republik Indonesia

(<http://www.kemlu.go.id/Pages/IssueDisplay.aspx?IDP=6&l=id>)

Sesuai dengan data yang dipaparkan oleh Kementerian Luar Negeri Republik Indonesia 2011, saat ini penggunaan bahan bakar fosil dalam bentuk minyak masih mendominasi dan tetap akan mendominasi hingga 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 harinya. 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 pemutar roda perekonomian dan kehidupan umat manusia.

Potensi energi non fosil di Indonesia, energi biomassa mempunyai potensi tertinggi kedua di bawah energi air, yaitu sebesar 49,81 Giga Watt. Namun kapasitas pembangkit yang sudah terpasang baru sekitar 445 Mega Watt, atau baru sekitar 0,9 % dari seluruh potensi energi yang tersedia. Hal ini tentu masih harus ditingkatkan, mengingat banyaknya keunggulan yang dimiliki oleh energi biomassa dibandingkan dengan energi lainnya. Selain memang sifatnya yang dapat diperbaharui secara terus menerus, juga lebih ramah terhadap lingkungan. Emisi yang dikeluarkan lebih rendah, terutama gas karbondioksida sehingga mampu mengurangi efek rumah kaca yang menyebabkan pemanasan global. Energi biomassa menjadi penting bila dibandingkan dengan energi terbaharukan karena proses konversi menjadi energi listrik memiliki investasi yang lebih murah bila dibandingkan dengan jenis sumber energi terbaharukan lainnya. Hal inilah yang menjadi kelebihan biomassa dibandingkan dengan energi lainnya.

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

Pembakaran biomassa secara langsung memiliki kelemahan yakni efisiensi yang dihasilkan sangat rendah. Oleh karena itu perlu diterapkan beberapa teknologi untuk meningkatkan manfaat biomassa sebagai bahan bakar. Teknologi pembakaran yang digunakan harus simpel, efisien, tidak menimbulkan gangguan terhadap lingkungan sekitar, serta biaya instalasinya relatif tidak terlalu mahal. Teknologi yang memenuhi kriteria tersebut adalah *Fluidized Bed Combustor (FBC)*.

Fluidized Bed Combustor (FBC) merupakan salah satu teknologi pembakaran yang mempunyai keunggulan mengkonversi berbagai jenis bahan bakar baik sampah, limbah, biomassa ataupun bahan bakar fosil berkalori rendah. Teknologi ini menggunakan konsep turbulensi benda padat yang terjadi pada proses pembakaran,

dimana dalam mekanisme pembakarannya tersebut terjadi perpindahan panas dan massa yang tinggi. Teknologi ini telah diperkenalkan sejak abad kedupuluh dan telah diaplikasikan dalam banyak sektor industri dan pada tahun-tahun belakangan ini telah diaplikasikan untuk mengkonversi biomassa menjadi energi.

Fluidized bed combustor memiliki bentuk seperti sebuah tungku pembakar biasa, namun memiliki media pengaduk berupa pasir. Pasir yang digunakan bisa pasir kuarsa ataupun pasir silika. Fungsi pasir ini berfungsi sebagai penyimpan dan pendistribusi panas, sehingga panas yang dihasilkan dapat merata. *Fluidized bed combustor* memiliki temperatur pengoperasian antara 700 °C sampai 900°C sehingga bahan bakar seperti limbah dapat habis terbakar hingga menjadi abu yang tidak berbahaya bagi lingkungan.

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

1.3 Perumusan Permasalahan

Fluidized Bed Combustor di Universitas Indonesia merupakan unit pemanfaatan limbah yang masih dalam pengembangan. Berdasarkan pengalaman pengujian di laboratorium, terdapat kesulitan-kesulitan yang dapat diidentifikasi. yaitu masalah pemanasan awal *bed* yang masih cukup lama akibat terlalu jauhnya jarak *burner* dengan permukaan *bed* serta fluidisasi *bed* yang kurang merata akibat tidak meratanya tekanan pasokan udara yang melalui distributor. Selain itu diperlukan juga pengujian dengan bahan bakar biomassa tempurung kelapa.

Tujuannya untuk mengetahui kualitas dan karakteristik pembakaran dengan bahan bakar tersebut.

1.4 Tujuan Penulisan

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

1. Mengetahui karakteristik fluidisasi pada *bed* dengan menggunakan distributor yang telah dimodifikasi.
2. Mengetahui pengaruh ukuran partikel pasir yang digunakan pada *bed*.
3. Mengetahui karakteristik pembakaran tempurung kelapa dengan menggunakan *fluidized bed combustor* yang ada di Universitas Indonesia.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah yang ditetapkan dalam penelitian ini adalah:

1. Penelitian yang dilakukan hanya mencakup eksperimental pembakaran yang tujuannya untuk mengetahui karakteristik pembakaran dengan bahan bakar biomassa (pemanasan awal serta *self sustained combustion*). Sedangkan penghitungan nilai *heat rate* output dari proses pembakaran, perhitungan efisiensi alat serta emisi gas buang yang dihasilkan tidak akan dibahas secara mendalam dalam tulisan ini.
2. Bahan bakar biomassa yang digunakan pada pemanasan awal dan pada *self sustained combustion* adalah Tempurung kelapa.
3. Perbandingan dilakukan menggunakan *bed* dengan partikel pasir berukuran mesh 20-30 dengan partikel pasir berukuran mesh 20-40.

1.6 Metodologi Penelitian

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

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

1.7 Sistematika Penulisan

Dalam penyusunan tugas akhir ini penulis membagi menjadi lima bab, yang masing-masing terdiri dari sub-bab. Hal tersebut dimaksudkan untuk mempermudah

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

BAB 1 PENDAHULUAN, berisi :

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

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA, berisi :

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

BAB 3 PENGUJIAN DAN PENGUKURAN, berisi :

Skematik pengujian, metodologi pengujian, dan metodologi pengambilan data.

BAB 4 HASIL DAN ANALISA, berisi :

Pengolahan data hasil perhitungan, grafik-grafik hasil pengukuran, dan analisa hasil perhitungan.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN, berisi :

Kesimpulan dan saran.



BAB II

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 tidak sebesar emisi gas buang bahan bakar fosil.

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

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

2.1.1 Jenis-Jenis Biomassa

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

2.1.1.1 Solid Biomassa

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

a) *Temperate Regions (wilayah beriklim sedang)*

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

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

Menghasilkan sedikit vegetasi untuk sumber energi. *Humid Tropical Regions (wilayah beriklim lembab)*

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

2.1.1.2 Biogas

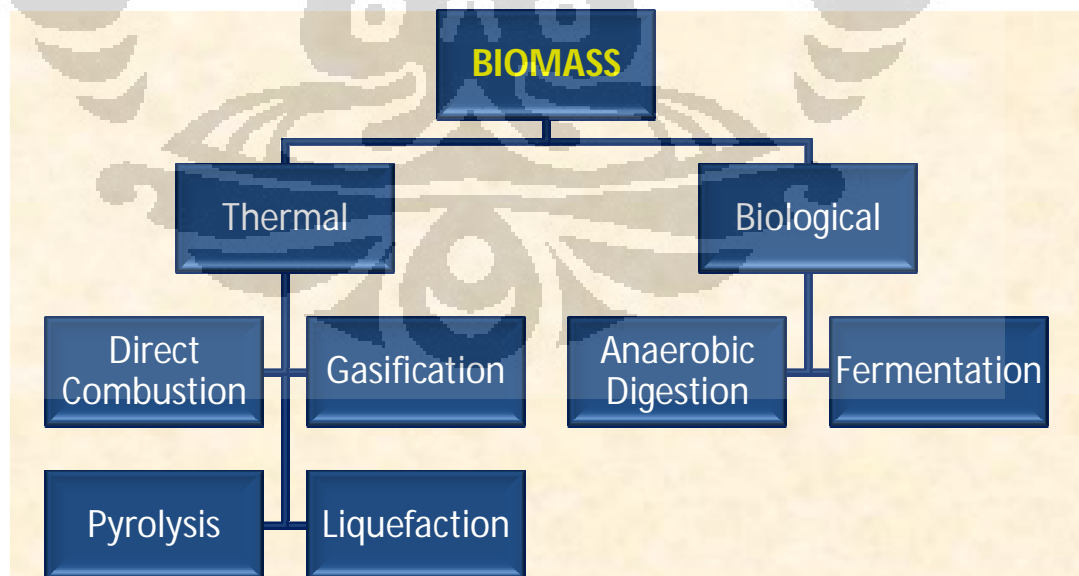
Biogas berasal dari material organik yang telah melewati proses fermentasi atau anaerob digesting oleh bakteri pada koindisi udara kekurangan oksigen yang kemudian menghasilkan gas yang dapat terbakar (combustible gas).

2.1.1.3 Liquid Biofuel

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

2.1.2 Teknologi Pengkonversian Energi Biomassa

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



Gambar 2.1 Chart Teknologi Konversi Biomassa

2.1.2.1 Proses Thermal

Ada 3 proses pemanasan dalam menghasilkan energi biomassa, yaitu:

1. *Direct Combustor*

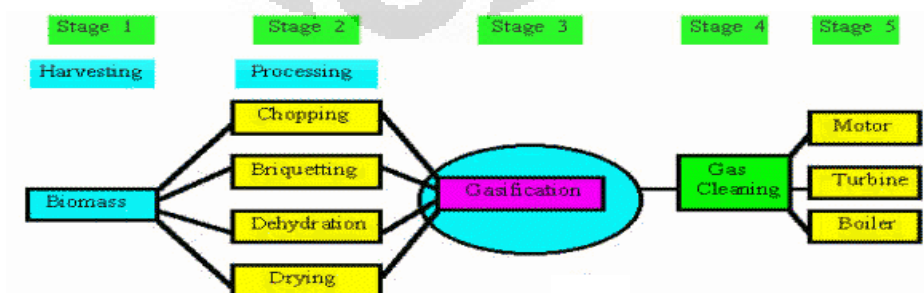
Pada proses ini material organik (biomassa) dilakukan pembakaran secara langsung. Agar efisiensi pembakaran baik, dilakukan pengeringan (drying) untuk menghilangkan kadar air pada material organik. Salah satu aplikasi dari direct combustor adalah kompor masak yang menggunakan kayu bakar.



Gambar 2.2 *Direct Combustor*

2. *Gassification*

Gasifikasi adalah proses pembentukan gas yang dapat terbakar yang berasal dari material organik, seperti kayu, gabah/sampah pertanian yang dipanaskan dan dibakar dengan keadaan oksigen 1/3 dari jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk pembakaran penuh. Pembakaran dengan keadaan kekurangan oksigen inilah yang disebut dengan *pyrolysis*. Proses ini menghasilkan gas yang dapat dibakar seperti H₂, CH₄, CO, N₂, dan gas-gas lain yang tak dapat terbakar.



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

Secara umum ada 3 sesi proses gasifikasi biomassa:

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

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

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

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

3. *Pyrolysis*

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

Produk dari *Pyrolysis* tergantung dari temperatur, tekanan, dan lain lain. Pada suhu 200^0 C, air akan terpisah dan dibuang, *Pyrolysis* sesungguhnya terjadi pada suhu antara 280 sampai 500^0 C, *Pyrolysis* menghasilkan banyak karbon dioksida, tar, dan sedikit metil alkohol. Antara 500 sampai 700^0 C produksi gas mengandung hidrogen. Secara umum *Pyrolysis* menghasilkan $C_6H_{10}O_5 = 5CO + 5H_2 + C$.

4. *Liquefaction*

Liquefaction adalah proses pembentukan cairan dari suatu gas. Pembentukan gas ini dengan tujuan agar bahan bakar gas mudah untuk ditransportasikan. Banyak macam gas yang hanya membutuhkan pendinginan

untuk membuatnya menjadi bentuk cairan. LPG adalah salah satu bentuk dari liquefaction

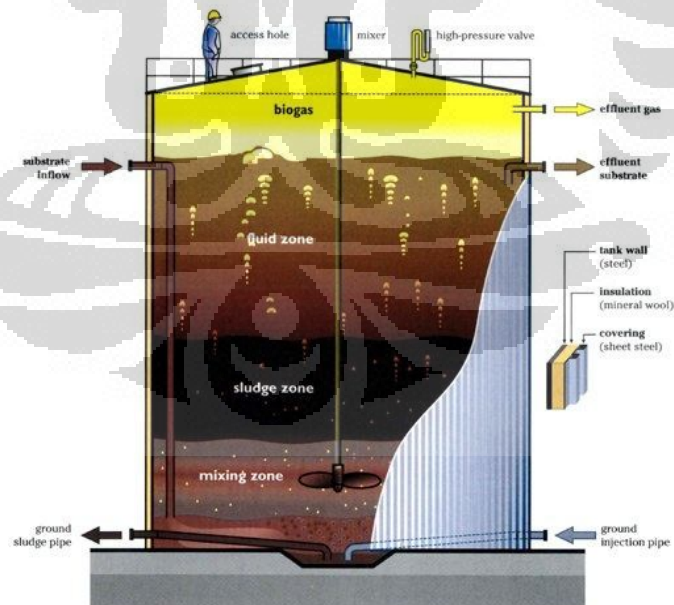
2.1.2.2 Proses Biologis

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

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

1. *Anaerobic Digestion*

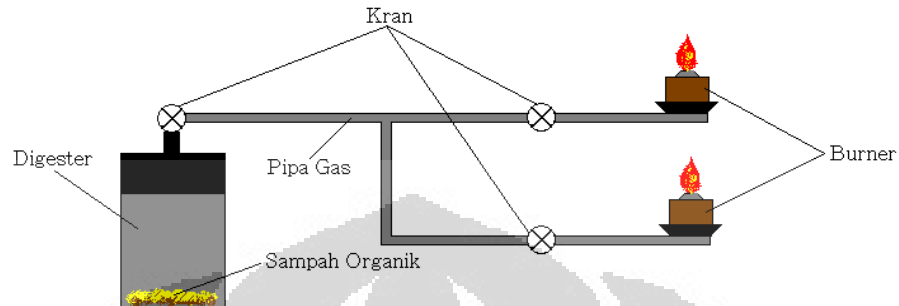
Proses ini adalah proses yang mengikutsertakan mikroorganisme untuk menguraikan material dengan kondisi tanpa oksigen. Proses ini dapat digunakan pada sampah organik dan juga kotoran hewan. *Anaerobic digestion* merupakan proses yang kompleks. Pertama-tama, mikro organisme mengubah material organik kedalam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



Gambar 2.4 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. *Hydrolisis*

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

2. *Fermentasi*

Zat yang telah dirombak pada proses hydrolisis, 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, akan tetapi, terdapat definisi yang lebih jelas yang mendefinisikan fermentasi sebagai respirasi dalam lingkungan anaerobik dengan tanpa akseptor elektron eksternal.

2.1.3 Kelebihan dan Kekurangan

Energi biomassa memiliki kelebihan dan kekurangan beberapa diantaranya yaitu:

Kelebihan energi biomassa :

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

Kekurangan energi biomassa :

1. Untuk penggunaan secara *direct 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

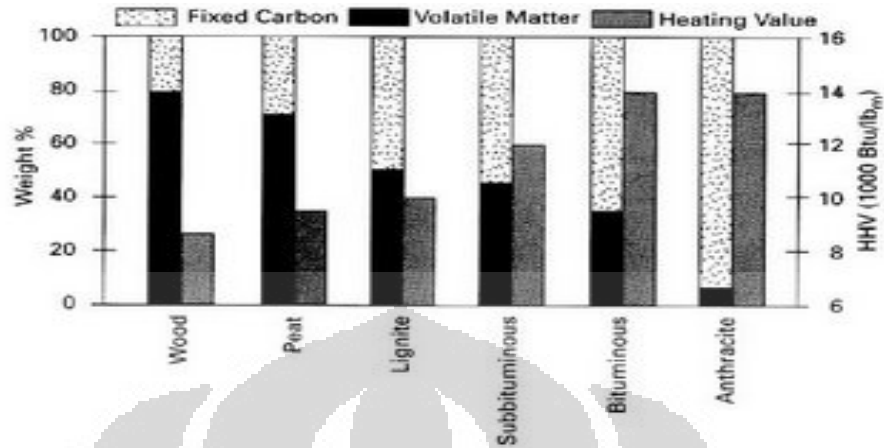
Potensi biomassa yang melimpah merupakan solusi energi masa depan karena dapat dikategorikan sebagai “*green and sustainable energi*” yaitu pemanfaatannya yang bersifat ramah lingkungan dan keberadaannya melimpah di dunia khususnya di Indonesia. Untuk pemanfaatan dengan cara *indirect combustor*, biomassa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

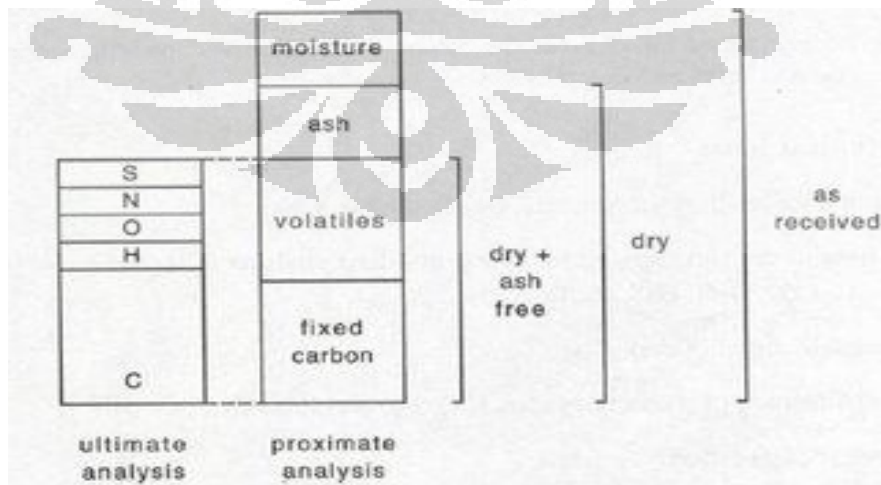
Nilai kalor rendah (LHV, *lower heating value*) adalah jumlah energi yang dilepaskan dari proses pembakaran suatu bahan bakar dimana kalor laten dari uap air tidak diperhitungkan, atau setelah terbakar, temperatur gas pembakaran dibuat 150°C. Pada temperatur ini, air berada dalam kondisi fasa uap. Jika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

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



Gambar 2.6 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 dan bagas. Abu dari biomassa lebih ramah dibandingkan abu dari batu bara karena banyak mengandung mineral seperti fosfat dan *potassium*. Pada saat pembakaran maupun gasifikasi, abu dari biomas juga lebih aman dibandingkan abu dari batubara. Dengan temperatur operasi tidak lebih dari 950°C atau 1000°C, abu dari biomassa tidak menimbulkan terak. 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

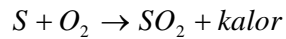
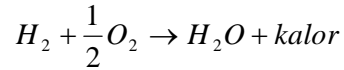
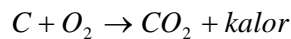
Tabel 2.3 Nilai LHV Beberapa Jenis Biomassa

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

2.3 SISTEM REAKSI PEMBAKARAN

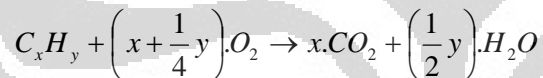
Pembakaran adalah sebuah reaksi antara oksigen dan bahan bakar yang menghasilkan panas. Oksigen diambil dari udara yang berkomposisi 21 % oksigen serta 79 % nitrogen (persentase volume), atau 77 % oksigen serta 23 % nitrogen (persentase massa). Unsur terbanyak yang terkandung dalam bahan bakar adalah

karbon, hidrogen, dan sedikit sulfur. Pembakaran pada umumnya terdiri dari tiga proses, yaitu:



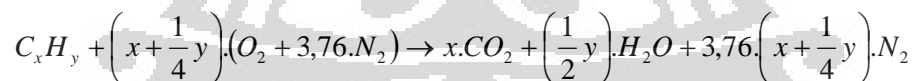
Tiga senyawa dan panas yang dihasilkan tersebut disebut juga sebagai hasil pembakaran.

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



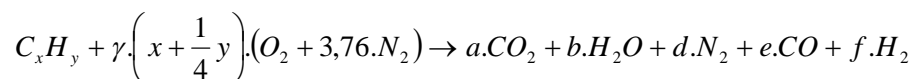
Nilai dari x dan y di atas bergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan. Nilai x adalah fraksi massa untuk kandungan *Carbon*, dan y fraksi massa untuk kandungan *Hydrogen* dalam bahan bakar.

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.



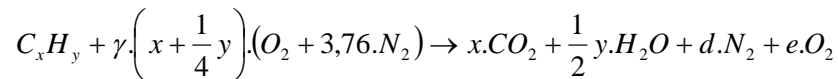
Namun, ada kalanya juga proses pembakaran tidak terjadi pada komposisi ideal antara bahan bakar dengan udara. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, proses yang tidak pada kondisi ideal ini bisa terbagi menjadi dua, yaitu pembakaran kaya dan pembakaran miskin.

- Proses pembakaran-kaya



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

- Proses pembakaran-miskin



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

2.3.1 Hal-Hal Yang Harus Diperhatikan Dalam Proses Pembakaran

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

1. Mixing

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

2. Udara

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

3. Temperatur

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

4. Waktu

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

5. Kerapatan

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

2.3.2 Komponen-Komponen Utama Reaksi Pembakaran

Suatu reaksi pembakaran memiliki 3 komponen utama, yaitu :

1. Zat yang dibakar

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

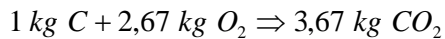
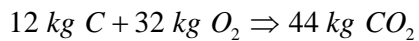
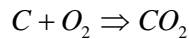
Tabel 2.4 Jenis-Jenis Bahan Bakar

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

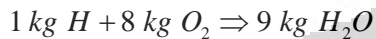
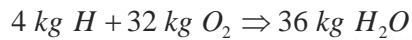
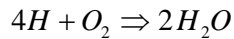
2. Zat yang membakar

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

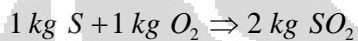
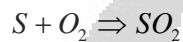
- Karbon terbakar sempurna akan membentuk CO_2 menurut persamaan :



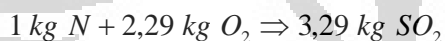
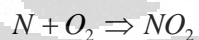
- Hidrogen terbakar sempurna akan membentuk H_2O menurut persamaan :



- 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 :

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

keterangan : $m = excess\ air$

$A_o =$ jumlah udara teoritis

$A =$ jumlah udara aktual

3. Zat yang dihasilkan dari pembakaran

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

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

Gas asap terbentuk dari hasil pembakaran antara gas-gas sisa pembakaran. Pada pembakaran yang sempurna, gas asap terdiri dari komponen-komponen seperti CO_2 , H_2O , SO_2 , N_2 , dan O_2 . Komponen-komponen tersebut disebut juga sebagai hasil pembakaran (*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 hamparan pasir (*sand bed*) dan

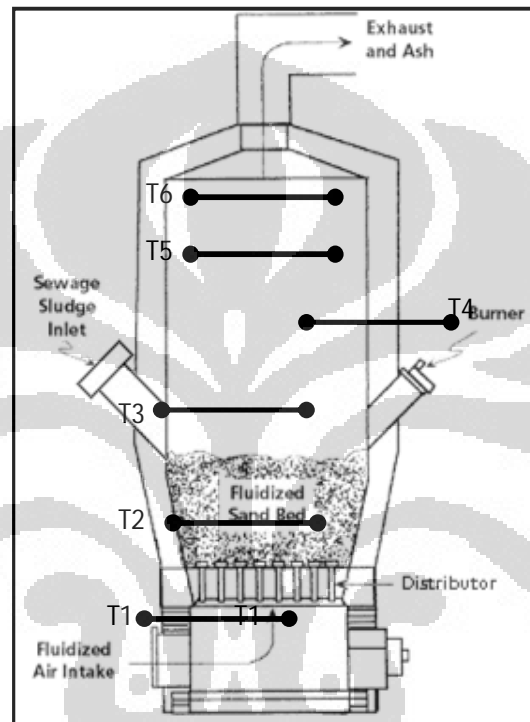
distributor untuk fluidisasi udara. *Fluidized bed combustor* normalnya tersedia dalam ukuran berdiameter dari 9 sampai 34 ft.

Hamparan pasir yang menjadi media pengaduk diletakkan di atas *distributor* yang berupa grid logam dengan dilapisi bahan tahan api. Grid ini berisi suatu pelat berpori berisi nosel-nosel injeksi udara atau *tuyere* di mana udara dialirkan ke dalam ruang bakar untuk menfluidisasi hamparan (*bed*) tersebut. Aliran udara melalui nosel hamparan 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 hamparan sampai temperatur operasi sekitar 600 sampai 900 °C sehingga pembakaran dapat terjaga pada temperatur konstan. Dalam beberapa instalasi, suatu sistem *water spray* digunakan untuk mengendalikan suhu ruang bakar.

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

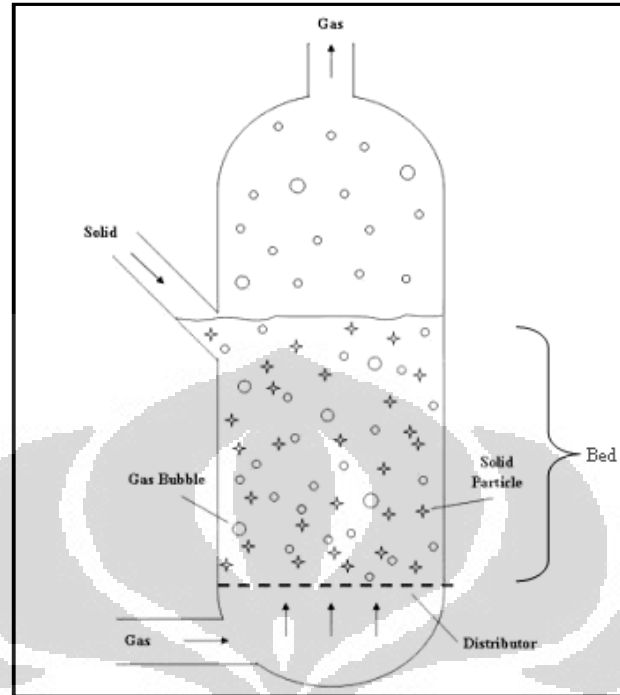
Pembakaran dengan teknologi *fluidized bed* merupakan satu rancangan alternatif untuk pembakaran limbah padat. Teknologi ini telah diaplikasikan untuk berbagai macam bahan bakar padat seperti biofuel, batu bara, serta limbah, baik itu limbah organik maupun anorganik. Bahan bakar padat yang sudah dalam bentuk tercacah atau dipotong-potong menjadi kecil-kecil, dimasukkan ke dalam ruang bakar dengan kapasitas yang konstan dan diletakkan tepat di atas pasir-pasir tersebut. Udara untuk proses pembakaran diberikan dari blower yang melewati *plenum* yaitu bagian *fluidized bed combustor* yang letaknya terdapat di bawah ruang bakar dan berfungsi sebagai saluran udara. Kemudian udara tersebut akan

melewati *distributor* sehingga aliran udara yang akan masuk ke dalam ruang bakar akan bergerak secara seragam menuju timbunan pasir yang ada di atasnya [Basu : 1994; Howard : 1994]. Kemudian ruang kosong yang ada di ruang bakar, dan tepat di 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 2.3. Terlihat pada gambar tersebut bahwa *fluidized bed combustor* memiliki satu ruangan dimana pengeringan dan pembakaran terjadi di hamparan pasir terfluidisasi. Waktu kontak di dalam daerah pembakaran hanyalah beberapa detik pada temperatur 750 sampai 900 °C. Abu terbawa keluar dari puncak ruang bakar dan dibersihkan dengan alat kontrol polusi udara. Pasir yang terbawa dengan abu harus diganti. Pasir yang terbang pada umumnya 5 persen dari volume hamparan untuk setiap 300 jam operasi. Pengumpanan (*feed*) pada ruang bakar itu dimasukkan baik dari atas atau secara langsung ke dalam hamparan.



Gambar 2.9 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 2.5a, ruang bakar masih pada temperatur ruang. Pasir sebagai media pengaduk sekaligus pertukaran kalor dituang ke dalam ruang bakar.

2. Proses pemanasan

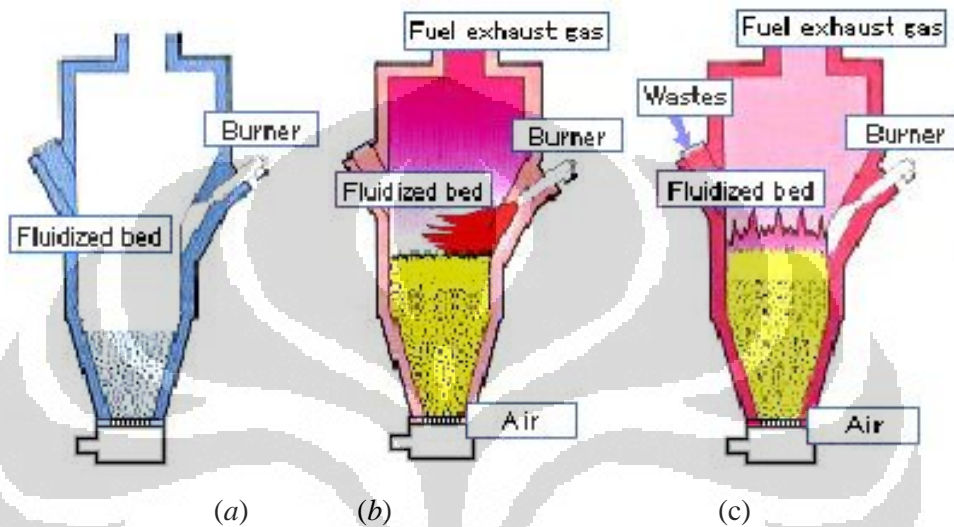
Pada tahapan proses pemanasan, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.5b, pasir tersebut mulai dipanaskan. Udara bertekanan mulai dialirkan dari blower ke dalam ruang bakar dari bagian bawah insinerator untuk menfluidisasi pasir. Pada kondisi ini sudah terjadi fluidisasi pada kecepatan fluidisasi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

3. Kondisi operasi

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

karena panas yang diberikan oleh pasir sudah melewati temperatur nyala dari sampah.

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



Gambar 2.10 Tahapan Proses Kerja *Fluidized Bed Combustor*; (a) Tahapan pada Kondisi Awal; (b) Tahapan Proses Pemanasan; (c) Tahapan pada Kondisi Operasi.

2.4.3 Bagian-Bagian *Fluidized Bed Combustor*

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

2.4.3.1 *Fluidization Vessel*

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

1. Ruang Bakar

Ruang bakar ini merupakan ruang tempat meletakkan pasir dan umpan sampah yang akan dibakar, sehingga proses pembakaran terjadi di sini. Pasir

difluidisasi di ruang bakar ini dengan suplai udara dari blower. Ruang bakar dalam *fluidized bed combustor* juga harus dapat menjaga temperatur pasir yang dapat mencapai 800 – 900 °C.



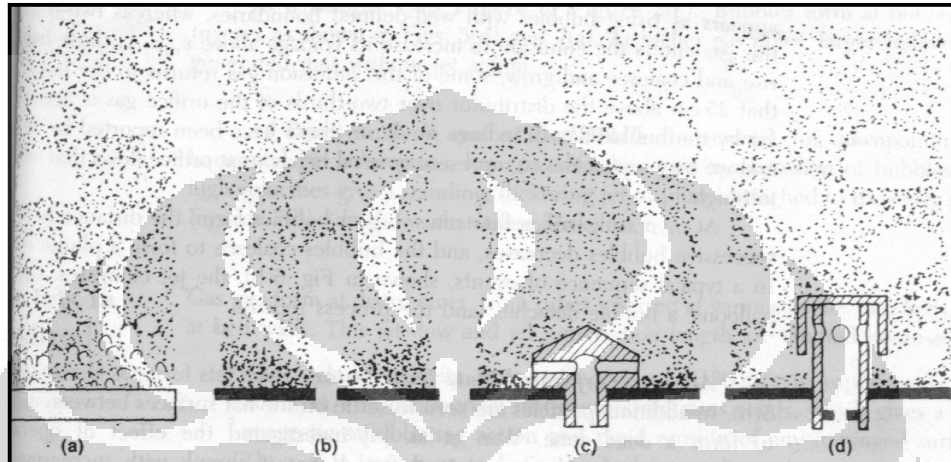
Gambar 2.11 Ruang Bakar Utama *Fluidized Bed Combustor* UI

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

2. Distributor

Distributor digunakan untuk mendistribusikan aliran udara dari blower secara seragam pada keseluruhan penampang reaktor sehingga hamparan pasir yang ditopang oleh distributor tersebut terjadi fluidisasi. Distributor ini juga memiliki pengaruh terhadap ukuran dan jumlah *bubble* yang dihasilkan. Terdapat

beberapa jenis distributor yang sering digunakan, yaitu *porous plate*, *perforated plate*, *nozzle-type tuyere*, dan *bubble cap tuyere*. Masing-masing jenis distributor tersebut dapat menghasilkan perilaku gelembung yang berbeda-beda seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.12:



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



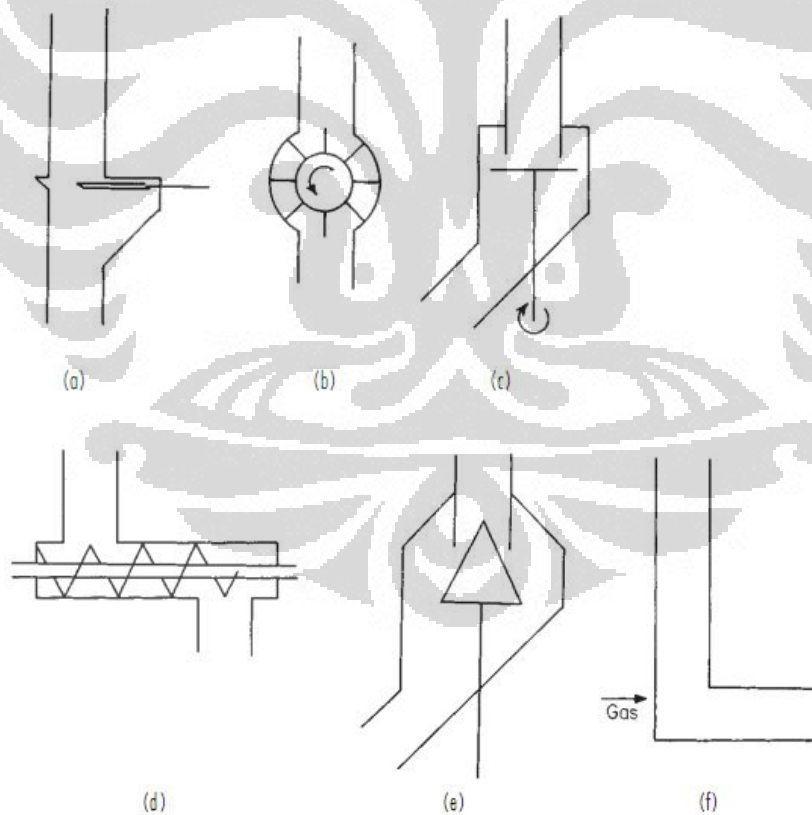
Gambar 2.13 Distributor yang Digunakan pada *Fluidized Bed Combustor* UI

3. Plenum

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

2.4.3.2 Solid Feeder

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



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

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

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



Gambar 2.15 *Screw Feeder*

2.4.3.3 *Burner*

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

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



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

2.4.3.4 *Bed Material*

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

sebagai media harus memenuhi persyaratan teknik diantaranya yaitu konduktifitas termal yang tinggi, kalor jenis yang rendah, titik lebur yang tinggi, serta tahan terhadap temperature tinggi dalam waktu yang lama.

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

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

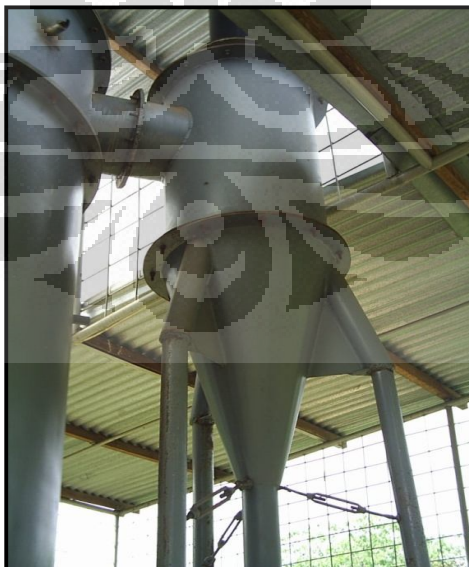
Untuk tujuan fluidisasi yang baik, sebaiknya menggunakan pasir silika atau pasir kuarsa dengan ukuran diameter $400 - 600 \mu m$. Pasir jenis ini diklasifikasikan diantara grup B. Pasir kuarsa dan pasir silika tidak jauh berbeda kandungannya, keduanya sama-sama memiliki kandungan SiO_2 . Kedua pasir

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



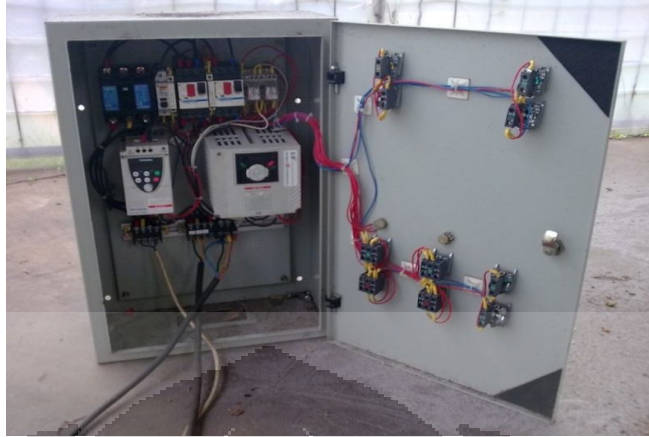
Gambar 2.18 Blower Sentrifugal yang Digunakan pada FBC

2.4.3.7 Instrumentation

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

1. Control Panel

Berfungsi untuk mengontrol putaran feeder dan putaran blower.



Gambar 2.19 *Control Panel*

2. *Termokopel*

Berfungsi untuk mengukur temperatur di dalam ruang bakar.

3. *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.

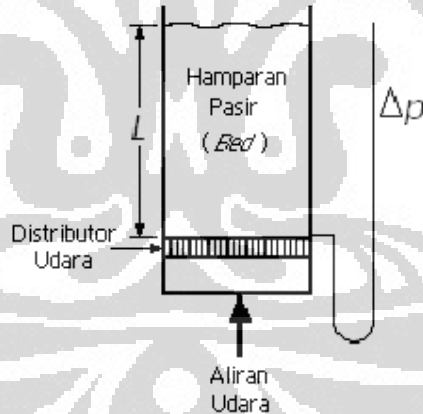


Gambar 2.20 *Portable Data Acquisition Module*

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.



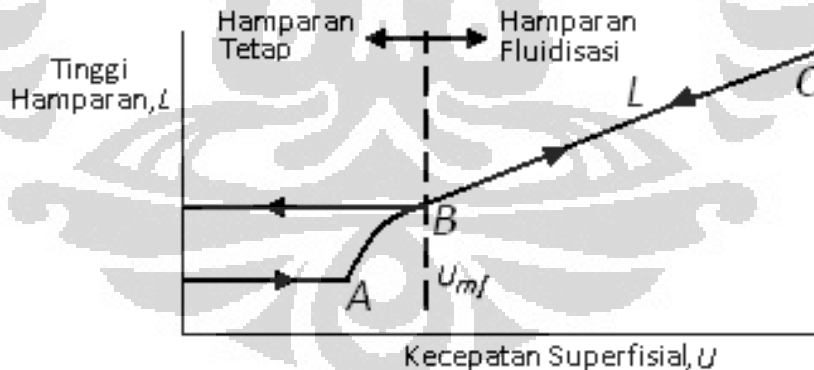
Gambar 2.21 Skematik Fluidisasi

2.5.2 Kondisi Fluidisasi

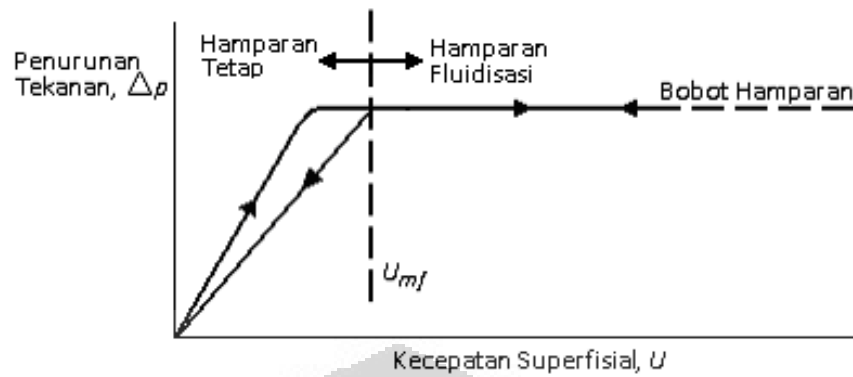
Perhatikan suatu tabung vertikal yang sebagian berisi dengan bahan butiran, sebagaimana terlihat dalam skema gambar. Tabung itu turbulen pada bagian atas, dan mempunyai plat berpori pada bagian bawah untuk menopang pasir di atasnya serta untuk menyebarkan aliran secara seragam pada keseluruhan

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 2.10. Jika kecepatan itu terus ditingkatkan lagi, partikel-partikel itu akan memisah dan menjadi cukup berjauhan satu sama lain sehingga dapat berpindah-pindah di dalam hamparan itu, dan fluidisasi yang sebenarnya pun mulailah terjadi (titik B). Jika hamparan itu sudah terfluidisasi, penurunan tekanan melintas hamparan tetap konstan (gambar 3.2 dan 3.3), akan tetapi tinggi hamparan bertambah terus jika aliran ditingkatkan lagi.



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



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

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

2.5.3 Jenis-Jenis Fluidisasi

2.5.3.1 Fluidisasi partikulat (*particulate fluidization*)

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

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

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

2.5.3.2 *Fluidisasi gelembung (bubbling fluidization)*

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

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

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 hampan pasir. *Bed voidage* didefinisikan sebagai perbandingan antara selisih volume hampan dan volume partikel dibagi dengan volume hamparannya. Pada partikel yang tidak memiliki porositas internal, *bed voidage* dapat ditentukan dari massa jenis partikel (ρ_p) dan massa jenis borongan pada hampan (ρ_b).

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

2.5.4.5 *Kecepatan fluidisasi minimum*

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

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

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 *orifice discharge coefficient*.

Orifice discharge coefficient bergantung pada bentuk dari lubang distributor (*orifice*). Terdapat kemungkinan bahwa udara yang melewati lubang distributor menuju hamparan terfluidisasi (*fluidized bed*) mengalami penurunan tekanan yang lebih sedikit dari pada 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:

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

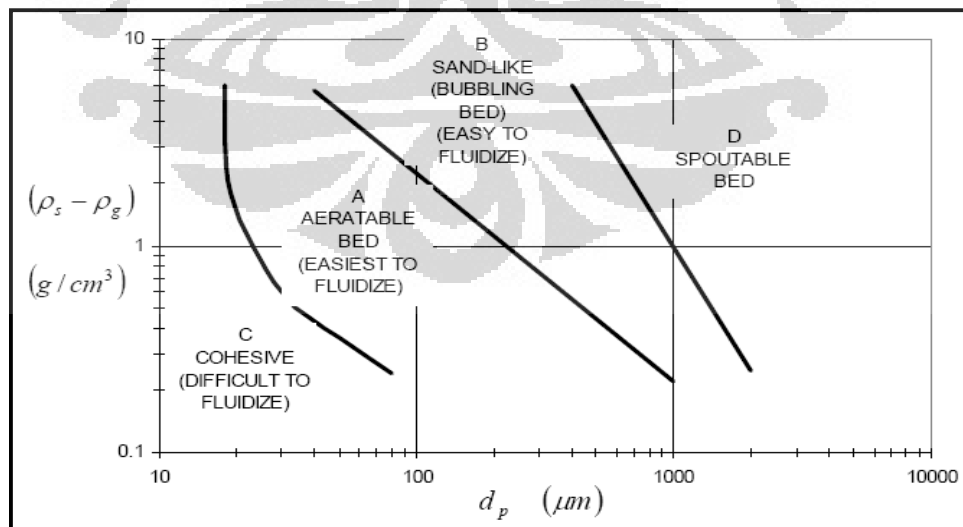
Keterangan :

- 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 = *Orrifice discharge coefficient*
- t = tebal plat distributor (m)
- d_{or} = diameter orifis pada distributor (m)

2.5.4.8 Klasifikasi pasir

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

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



Gambar 2.24 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 $100 \mu\text{m}$. Hamparan 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 hamparan (*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 hamparan mengempis kembali sehingga pada keadaan kurang mengembang yang kira-kira pada tingkat mengembangnya hamparan di bawah kondisi fluidisasi minimum dan kebanyakan udara berlebih akan mengalir melalui hamparan seperti fase gelembung, yakni yang sering disebut dengan fluidisasi agregatif. Kecepatan udara pada saat yang mana hamparan mengempis terjadi merupakan kecepatan minimum gelembung (*minimum bubbling velocity*, U_{mb}).

b) *Group B*

Pasir *group B* menurut Geldart cenderung 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. Hamparan tersebut akan mengempis dengan sangat cepat ketika suplai udara dihentikan. Kebanyakan gelembung naik lebih cepat dari pada kecepatan udara *interstitial* dan ukuran gelembung meningkat seiring dengan peningkatan tinggi hamparan dan kecepatan udara berlebih ($U - U_{mf}$). Pasir jenis ini memperlihatkan pengembangan hamparan yang kurang stabil; gelembung (fluidisasi agregatif) terjadi pada kecepatan fluidisasi minimum atau sedikit lebih di atasnya. Gelembung cenderung berkembang sampai diameter gelembungnya terbatas oleh ukuran dari hamparan (*bed*) pasir *group B*.

c) *Group C*

Pasir *group C* merupakan pasir yang ukuran rata-ratanya lebih kecil dibandingkan yang lainnya ($<30 \mu\text{m}$) dan atau massa jenis yang lebih kecil juga sehingga gaya-gaya antar partikel mempunyai pengaruh yang lebih besar daripada gaya gravitasi. Pasir jenis ini sangat sulit untuk terfluidisasi. 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 tubulensi meningkat.

Pada pasir yang lebih halus dan kurang padat (*group A*), ukuran gelembung stabil maksimum jauh lebih kecil daripada pasir yang lebih kasar dan lebih padat (*group B*) sehingga distribusi ukuran gelembung yang stabil dapat dicapai pada 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 ϕ_p decreases	Properties improve as size decreases	Properties improve as size decreases
	Particle size distribution ^b	Not known	Increasing <45 μm fraction improves properties	None
	Increasing pressure, temperature, viscosity, density of gas	Probably improves	Definitely improves	Uncertain, some possibly

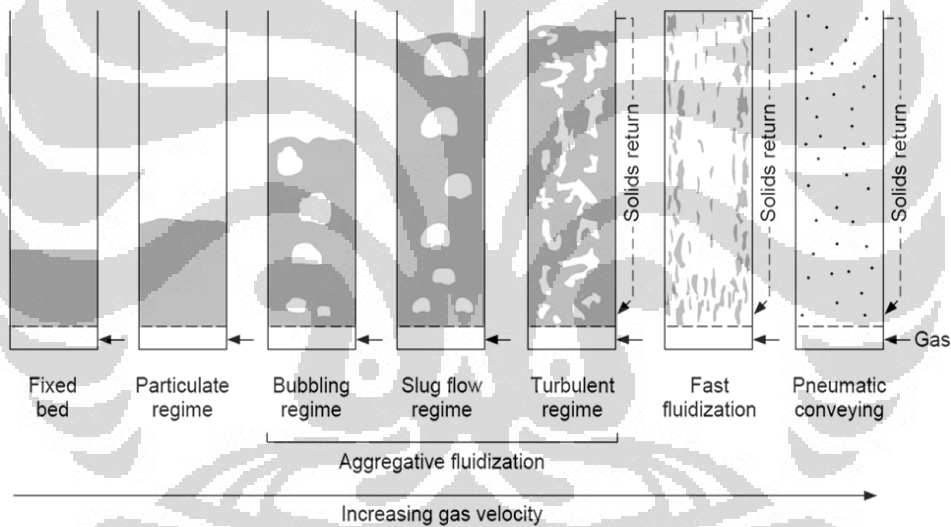
^aAt equal $U-U_{mf}$

^bAt equal ϕ_p .

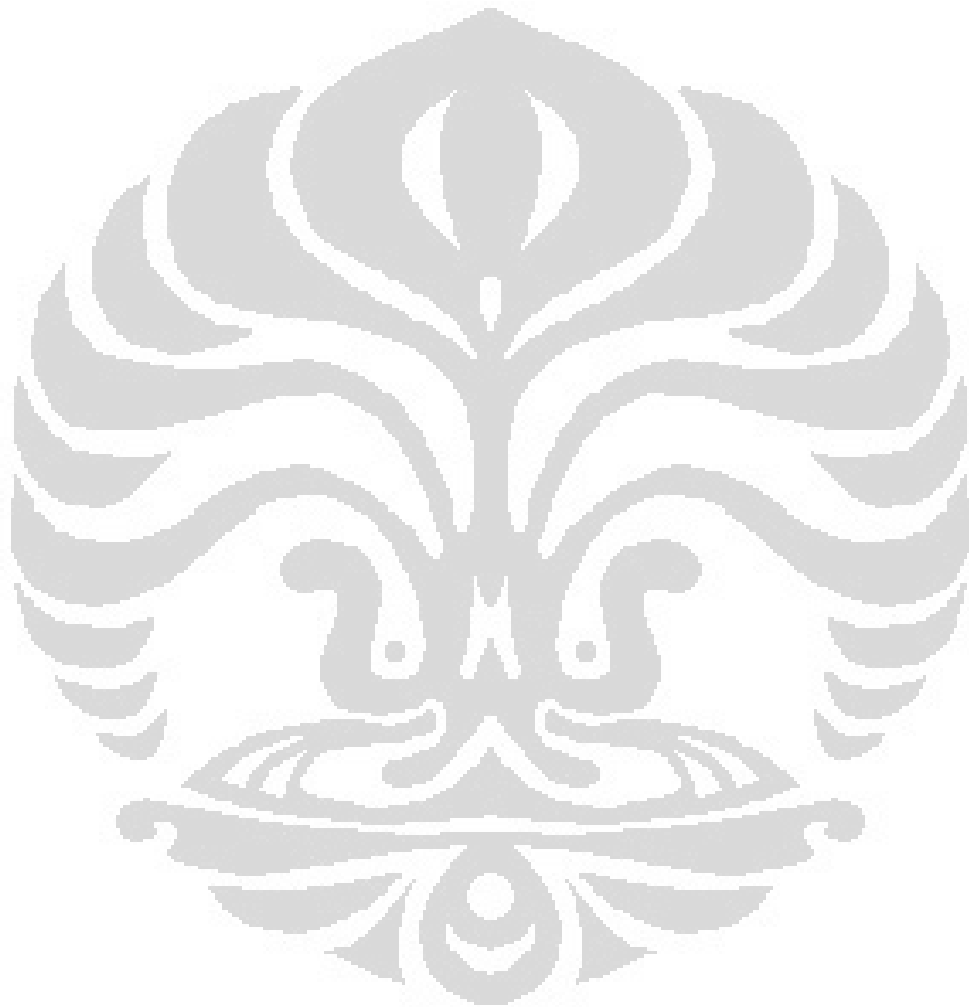
2.5.4.9 Daerah batas fluidisasi (fluidization regimes)

Pada kecepatan gas rendah, suatu padatan dalam tabung hamparan fluidisasi akan berada dalam keadaan konstan atau tetap. Seiring dengan

bertambahnya kecepatan gas, gaya seret mengimbangi berat hamparannya sehingga hamparan secara menyeluruh ditopang oleh aliran gas tersebut. Pada fluidisasi minimum, hamparan memperlihatkan pergerakan yang minimal dan akan sedikit mengembang. Kemudian hamparan 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 hamparan 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 III

PERSIAPAN DAN PROSEDUR PENGUJIAN

Sebelum melakukan pengoperasian pada *fluidized bed combustor* UI tersebut secara baik dan benar, maka perlu dilakukan pengujian alat ini secara keseluruhan. Dalam melakukan suatu pengujian pada alat, maka diperlukan persiapan dan prosedur pengujian yang sesuai dengan kondisi dari alat tersebut. Hal ini dimaksudkan agar dalam melakukan proses pengujian agar lebih efektif, efisien, dan mendapatkan hasil yang semaksimal mungkin. Demikian juga dengan persiapan yang harus dilakukan sebelum melakukan pengujian pada FBC yang ada di Universitas Indonesia. Agar persiapan dan proses operasi pengambilan data berlangsung dengan baik dan benar, maka diberikan juga SOP (*Standard Operational Procedure*) pada setiap alat, komponen, dan instrumen yang ada di FBC UI. Pengujian yang dilakukan adalah karakteristik pembakaran terfluidisasi menggunakan bahan bakar biomassa (cangkang kelapa).

3.1 PERSIAPAN PENGUJIAN

3.1.1 Bahan Bakar Biomassa

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

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

Tabel 3.1 Potensi biomassa di Indonesia

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

Proses pengolahan 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 = 5 – 10 mm
 lebar = 5 – 10 mm
 tebal = 3 – 5 mm



Gambar 3.2 Tempurung kelapa partikel kecil

3.1.2 Pasir

Pasir yang digunakan akan sangat berpengaruh terhadap berhasil tidaknya proses fluidisasi dan pembakaran yang akan dilakukan. Dalam menentukan jenis pasir yang akan digunakan pada alat FBC UI ini sebaiknya menggunakan pasir silika atau pasir kuarsa untuk tujuan mendapatkan fluidisasi yang baik dengan densitas partikelnya kurang lebih sebesar 2600 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 temperturnya.

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

Tabel 3.2 *Specific Heat* berbagai substansiSumber : <http://apollo.lsc.vsc.edu/>

<i>Substansi</i>	<i>Specific Heat</i> (<i>cal/gram.°C</i>)	<i>Specific Heat</i> (<i>J/kg.°C</i>)
air (murni)	1,00	4186
lumpur basah	0,60	2512
es (0 °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>	2600
<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 300 μm sampai 500 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 3.3 yang mana terdapat ukuran lubang ayakan (*mesh*) menurut standar di Amerika. Berdasarkan tabel tersebut maka partikel pasir yang berkisar antara 300 μm sampai 500 μm adalah partikel pasir dengan ukuran diameter partikel pasir antara *mesh 35* sampai *mesh 50*.

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 mesh 15-20 masih terlalu besar dari yang diinginkan dan bila menggunakan pasir silika dengan ukuran mesh 40-70 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) = 2600 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 di sini adalah termokopel tipe K. Lima termokopel yang ada sebelumnya sudah dikalibrasi oleh mahasiswa peneliti untuk keperluan skripsi di lab gasifikasi. Termokopel itu dimasukkan satu persatu pada reaktor FBC dengan konfigurasi ketinggian yang berbeda-beda diukur dari batas tengah distributor FBC yang ada (T2 paling dekat dengan hamparan pasir dan T5 paling jauh dari hamparan pasir. Sedangkan T1 berada di bawah distributor), yaitu

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

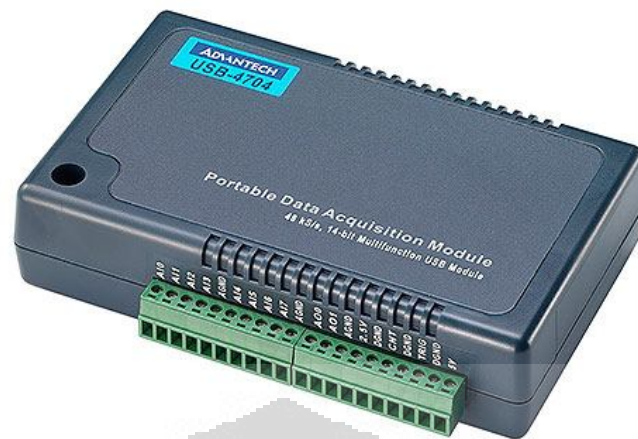


Gambar 3.5 Konfigurasi termokopel (a). T1 - T3, dan (b). T4 – T5

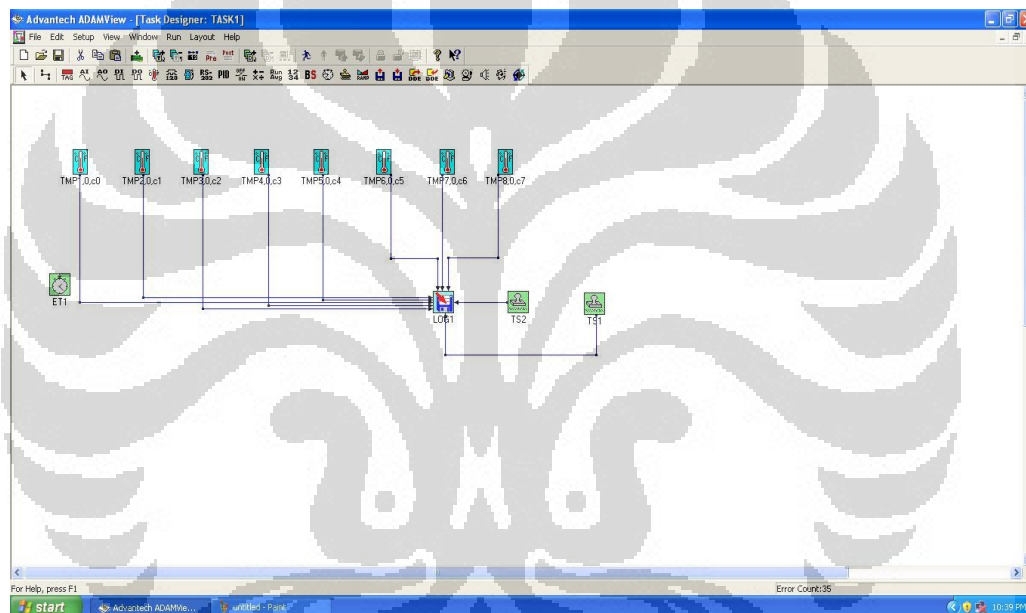
3. *Portable Data Acquisition Module*

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 *chanel* termokopel, yang berarti dapat digunakan maksimal untuk 8 termokopel, karena setiap termokopel membutuhkan 2 *chanel* 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 baik cangkang kelapa ataupun ranting pohon yang digunakan untuk pembakaran dan untuk mengukur massa hamparan pasir yang akan digunakan.



Gambar 3.7 Timbangan dengan skala maksimum 5 kg

5. Control Panel

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



Gambar 3.8 Control panel yang digunakan untuk feeder dan blower

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 3.9 *Coconut Shell Crusher*

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

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

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

3.2.2 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 tolok ukurnya dapat dilihat dari kecepatan fluidisasi minimum. Selain harus dapat mengalirkan udara dengan kecepatan udara setidaknya sebesar kecepatan fluidisasi minimumnya, blower harus juga dapat memberikan tekanan yang lebih besar dari pada nilai *pressure drop* (penurunan tekanan) saat melewati distributor dan hamparan pasir.



Gambar 3.11 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 untuk blower, sambungkan setiap kabel sesuai dengan warnanya.

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

3.2.3 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 H₂O).
3. Putar saklar *burner control* ke posisi *on* untuk mengaktifkan *burner control*. Pada tahap awal, *burner control* melakukan pengecekan status awal apakah ada tekanan udara palsu dan apakah ada api yang terdeteksi *UV sensor*. Bila gejala ini ditemukan, maka indikator burner *misfire* dan lampu merah reset akan menyala.

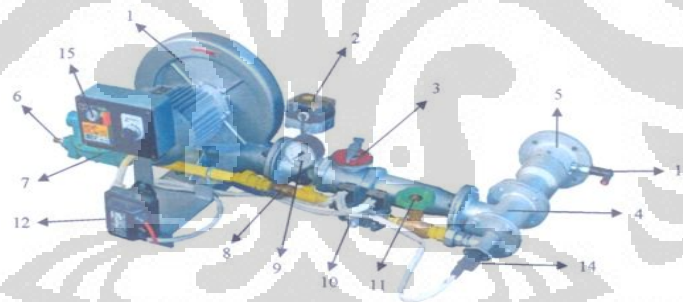
4. Blower akan berputar untuk menghasilkan tekanan yang stabil. Apabila tekanan blower di bawah nilai setting dari *air pressure switch* maka sistem akan di *cut-off* dan indikator *cut-off* akan menyala.
5. Setelah 10 detik proses *pre-purge* yang berguna untuk mengusir gas yang terperangkap (bila ada),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

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

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

- b. Atur manual *air damper* pada posisi buka setengah yaitu skala nomor 5. Posisi ini bisa diatur lebih lanjut untuk mendapatkan komposisi udara dan gas yang tepat untuk membentuk mutu nyala api yang bagus. Kencangkan baut pengunci supaya posisi *damper* tidak berubah.
- Penyetelan panjang api :
 - a. Atur *gas regulator* sehingga tekanan kerja antara 20~30 *mbar* (200~300 *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 *damper* udara untuk mendapatkan mutu nyala api yang bagus.

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



Gambar 3.12 Bagian-bagian *hi-temp premixed 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 V; 0,75 <i>kW</i>

3.3 PROSEDUR PENGUJIAN PEMBAKARAN

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

3.3.1 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*). Penjelasanannya adalah sebagai berikut :

- Panel kontrol dihubungkan ke generator set untuk mendapatkan sumber tegangan yang cukup.
- Sistem feeder terhubung ke panel kontrol agar dapat diatur putarannya.
- Blower juga terhubung ke panel kontrol agar dapat diatur putarannya.
- Burner terhubung ke generator set agar dapat memutar blower burner dan menyalakan busi.
- Blower dihubungkan ke area di bawah distributor dan pasir (area *plenum*) menggunakan selang untuk mengalirkan udara.

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



Gambar 3.13 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.

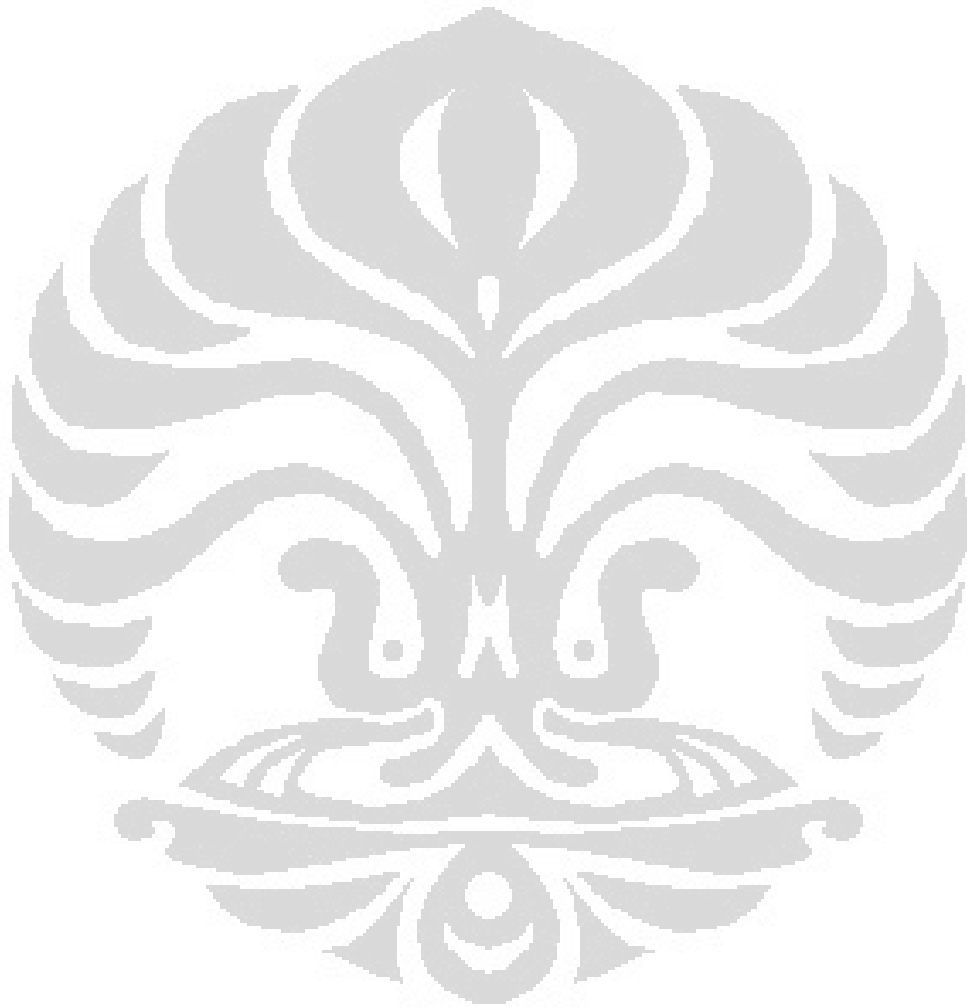
3.3.2.1 *Prosedur pemanasan awal pembakaran*

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 sekitar 400 °C.
4. Setelah itu memasukkan solid fuel berupa cangkang kelapa ke dalam ruang bakar sampai temperatur *bed* mencapai suhu sekitar 750 – 800 °C. Temperatur pada *data logger* dicatat setiap menitnya.
5. Kemudian burner dimatikan secara perlahan dan temperatur bed akan perlahan menurun dan ditunggu hingga suhunya stabil (kondisi steady) berada diantara 700 – 750 °C. Pada temperatur ini bahan bakar cangkang kelapa maupun ranting pohon sudah dapat terbakar dengan sendirinya (self-sustained combustion). Temperatur dicatat setiap menitnya.

3.3.2.2 *Prosedur pengambilan data pembakaran*

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

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 (jika dilihat putarannya, yang kedua ialah 3250 rpm).





BAB IV

HASIL DATA DAN ANALISA

4.1 HASIL

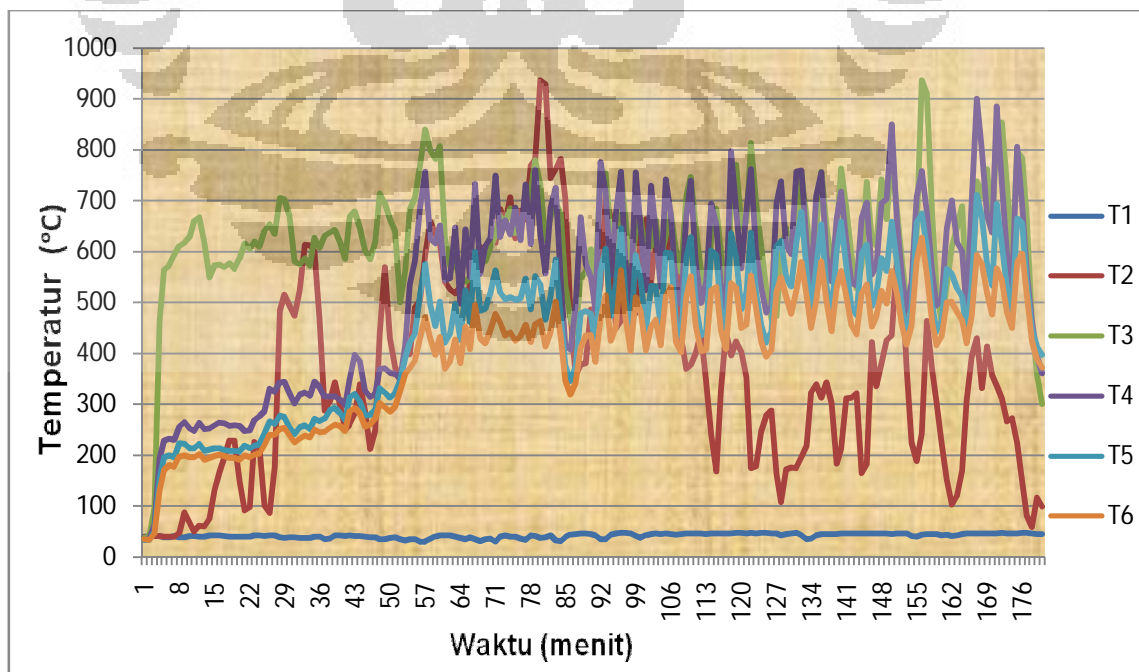
Dari percobaan yang telah dilakukan diperoleh dua hasil pembakaran yang menggunakan hamparan pasir berukuran *mesh* 20- 30 dan 20-40.

4.1.1. Hasil pembakaran dengan hamparan pasir *mesh* 20 - 30

Data hasil pembakaran adalah hasil dari percobaan (November 2011).

Parameter-parameter yang digunakan dalam percobaan:

- Suplai udara blower menuju ruang bakar $0,093 \text{ m}^3/\text{s}$
- Menggunakan bahan bakar Tempurung kelapa dengan nilai kalor 5500 kcal/kg . (Julian A. Banzon, 1980)
- Menggunakan hamparan dengan ukuran partikel *mesh* 20- 30
- 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)

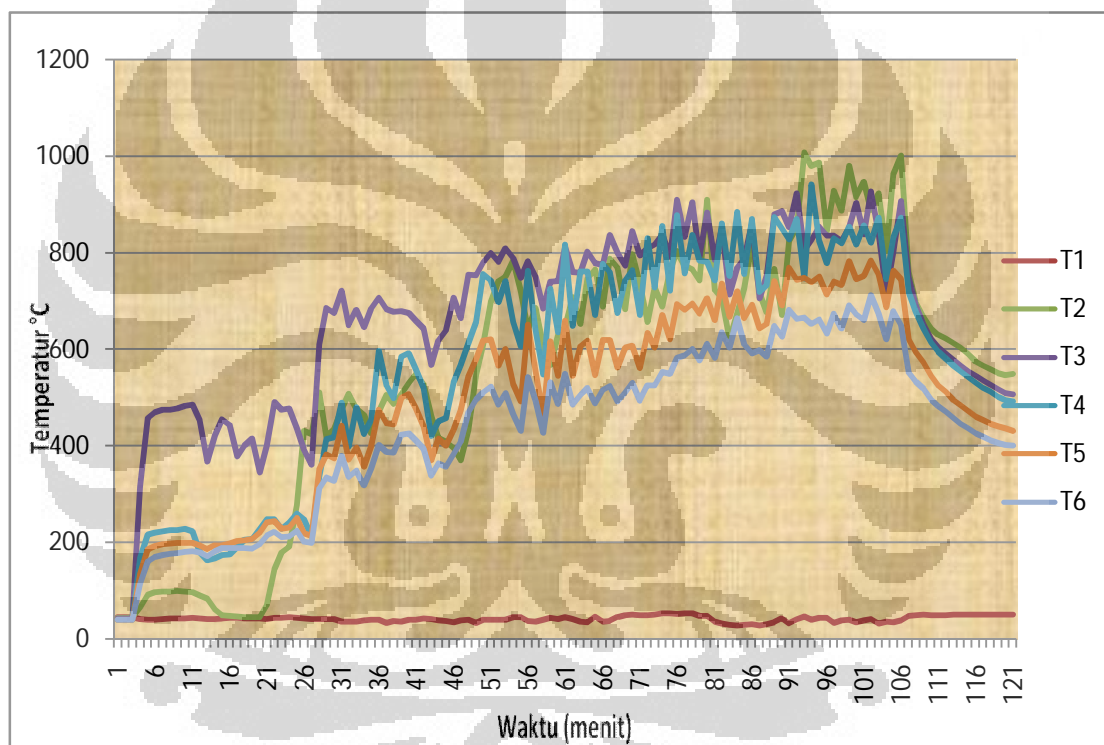


Gambar 4.1 Grafik pembakaran dengan *mesh* 20- 30

4.1.2. Hasil Pembakaran dengan hampan pasir *mesh* 20-40

Data hasil pembakaran adalah hasil dari percobaan (November 2011). Parameter-parameter yang digunakan dalam percobaan:

- Suplai udara blower menuju ruang bakar $0,093 \text{ m}^3/\text{s}$
- Menggunakan bahan bakar Tempurung kelapa dengan nilai kalor 5500 Kcal/Kg. (Julian A. Banzon, 1980)
- Menggunakan hampan dengan ukuran partikel *mesh* 20-40
- 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 *mesh* 20-40

4.2 ANALISA

Pada percobaan yang telah dilakukan, fluidisasi yang terjadi pada hampan dengan ukuran *mesh* 20 - 40 terlihat lebih baik, karena tidak ada asap berlebih yang keluar dari cyclone dan feeder. Hal ini berkaitan dengan ukuran partikel rata-rata hampan pasir yang digunakan. Hampan *mesh* 20 -30 memiliki diameter rata-rata

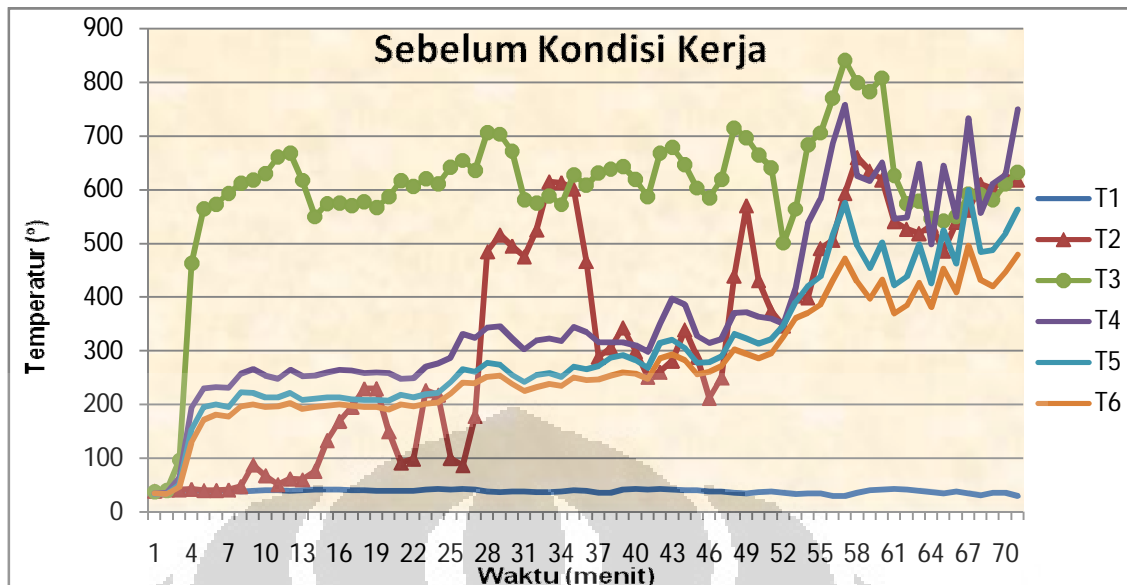
partikel pasir sebesar 725 μm dan partikel *mesh* 20-40 memiliki diameter rata-rata partikel pasir sebesar 593,75 μm . Sehingga mediasi penyimpan panas pada fluidisasi pasir *mesh* 20-40 lebih baik. Massa hamparan pasir yang digunakan untuk tiap jenis pasir ditentukan sebesar 30 kg dan suplai udara dari blower sebesar 0,093 m^3/s . Pada kedua percobaan, setelah *burner* dimatikan, temperatur T2 dan T3 dapat mencapai temperatur yang cukup tinggi yang memungkinkan bahan bakar yang dimasukkan dapat dengan cepat bereaksi dan terbakar, masing-masing pada menit ke 64 untuk hamparan pasir *mesh* 20-30 dan pada menit ke 62 untuk hamparan pasir *mesh* 20-40. Namun *self sustained* pada hamparan pasir *mesh* 20-40 hanya dapat bertahan sekitar 59 menit, sedangkan pada hamparan pasir *mesh* 20-30 dapat bertahan hingga 105 menit, Namun temperature rata - rata *mesh* 20-40 lebih stabil dibandingkan *mesh* 20-30 fenomena ini berkaitan dengan partikel, fenomena *Heat transfer* dan *Mass transfer* bahan bakar untuk partikel pasir *mesh* 20-40 lebih baik dari *mesh* 20-30, karena dapat lebih banyak mentransfer dan menyerap kalor dari bahan bakar.

Analisa yang akan dilakukan dari hasil percobaan pada FBC UI meliputi :

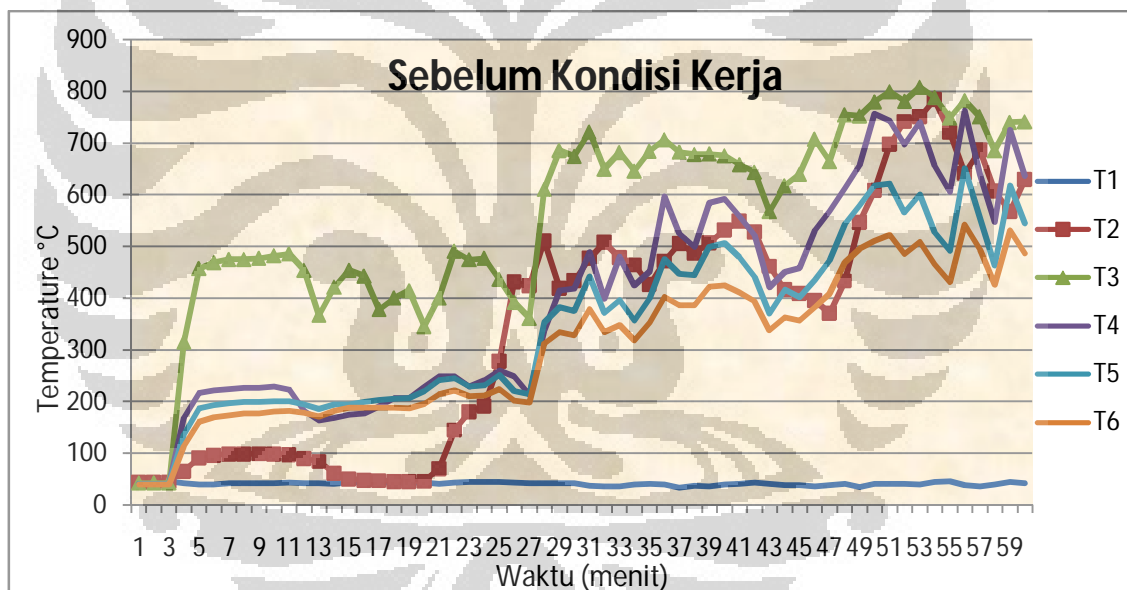
- a. Kondisi sebelum kondisi kerja tercapai
- b. Analisa kondisi kerja
- c. Analisa pembakaran biomassa pada kondisi kerja
- d. Distribusi temperatur pada kondisi kerja
- e. Daya panas biomassa pada kondisi kerja

4.2.1 Sebelum Kondisi Kerja

Pada percobaan yang menggunakan hamparan pasir dengan ukuran partikel *mesh* 20-30, dibutuhkan waktu sekitar 71 menit hingga dapat mencapai kondisi kerja. Sedangkan pada percobaan yang menggunakan hamparan pasir *mesh* 20-40 kondisi kerja tercapai pada menit ke 86.



Gambar 4.3 Grafik pemanasan dengan ukuran hamparan *mesh* 20-30



Gambar 4.4 Grafik pemanasan dengan ukuran hamparan *mesh* 20-40

Pada percobaan dengan hamparan pasir *mesh* 20-40 dan *mesh* 20-40 distributor yang digunakan telah dinaikannya sebesar 17 cm sehingga letak Termokopel T2 hanya berada 3,5 cm dari permukaan distributor. Penambahan ketinggian ini dimaksudkan agar letak termokopel T2 terletak tepat pada hamparan pasir agar pembacaan temperatur hamparan pasir menjadi lebih presisi. Karena pada percobaan sebelumnya, letak termokopel T2 terletak pada ketinggian 20,5 cm, sedangkan ketinggian hamparan pasir hanya sekitar 7,5 cm. Akibatnya menjadi

sangat sulit untuk membaca perubahan temperatur pada T2 dengan tepat. Sedangkan temperatur T2 digunakan untuk melihat keadaan pencampuran dan pembakaran bahan bakar yang terjadi pada hampan pasir.

Selain itu penambahan tinggi distributor juga dimaksudkan agar pemanasan awal menggunakan *gas burner* dapat berjalan lebih cepat. Karena letak hampan pasir setelah distributor dinaikkan berada tepat dibawah lubang *burner* sehingga diharapkan api yang dihasilkan oleh *burner* dapat langsung mengenai hampan pasir. Namun pada percobaan, api yang dihasilkan oleh *burner* tidak sampai mengenai hampan pasir. Hal ini disebabkan api *burner* tertiuip oleh udara dari blower yang melewati hampan pasir. Namun jarak antara lidah api dengan hampan pasir pada percobaan yang menggunakan distributor yang telah ditinggikan jauh lebih kecil bila dibandingkan dengan percobaan sebelumnya.

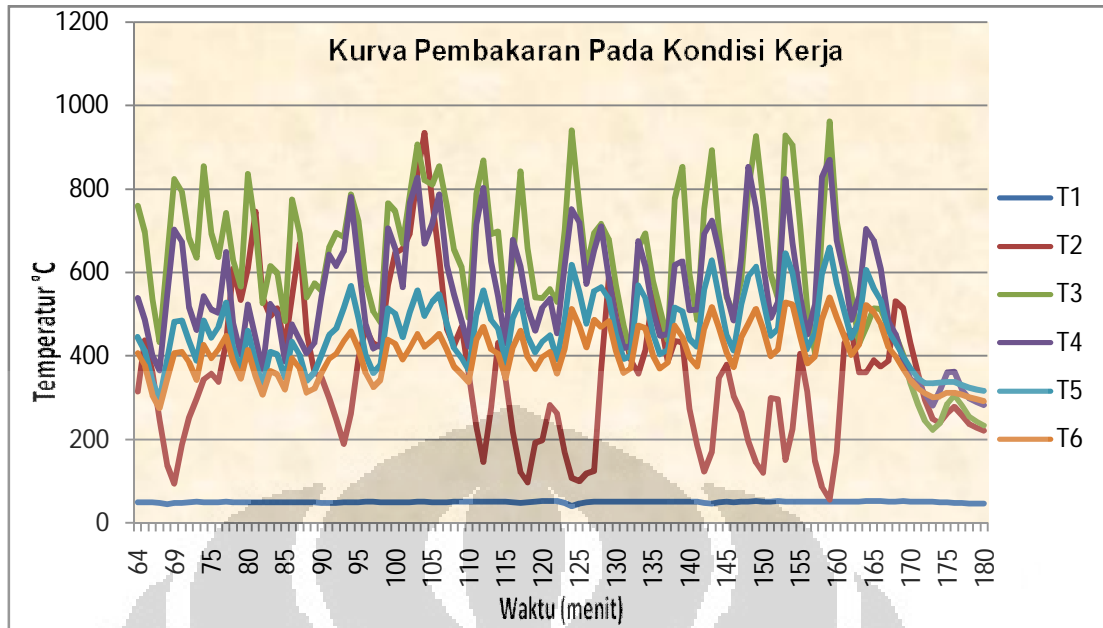
Rata-rata suhu yang dicapai selama 30 menit pertama proses pemanasan tidak terlalu berbeda jauh pada tiap percobaan yang menggunakan hampan pasir yang berbeda. Hanya saja temperatur rata-rata T3 pada percobaan yang menggunakan hampan pasir *mesh* 20-30 lebih besar dibandingkan dengan percobaan yang menggunakan hampan pasir *mesh* 20-40. Temperatur pada T4 dan T5 pada kedua percobaan tidak terlalu jauh berbeda. Namun temperatur dari T2 pada hampan pasir *mesh* 20-30 lebih rendah dibanding *mesh* 20-40 Hal ini disebabkan oleh penerimaan panas dari api *burner* lebih cepat diserap oleh partikel pasir *mesh* 20-40 .

Tabel 4.1 Temperatur rata-rata pemanasan 30 menit pertama

<i>mesh</i>	T1	T2	T3	T4	T5	T6
20-40	46.28745	47.74793	606.1513	296.0209	247.3871	224.2086
40-50	44.03672	145.2783	490.8847	248.3635	245.1224	222.0753

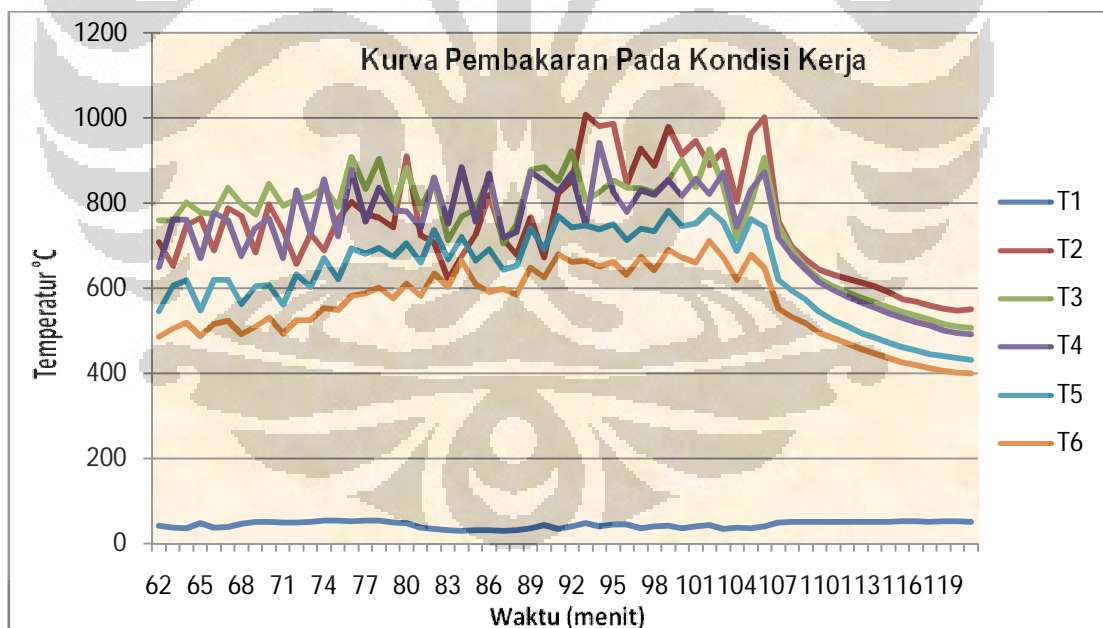
4.2.2 Analisa Saat Kondisi Kerja

Pada percobaan menggunakan hampan pasir *mesh* 20-40, kondisi kerja tercapai pada menit ke 64 dan seterusnya seperti yang terlihat pada grafik berikut.



Gambar 4.5 Grafik pembakaran pada kondisi kerja dengan ukuran hamparan *mesh* 20-30

Sedangkan pada percobaan yang menggunakan hamparan pasir *mesh* 20-40, kondisi kerja baru bisa tercapai pada menit ke 86 dan seterusnya.



Gambar 4.6 Grafik pembakaran pada kondisi kerja dengan ukuran hamparan *mesh* 20-40

Pada kondisi kerja dengan hamparan pasir *mesh* 20-40 dapat terlihat rata-rata temperatur kondisi operasi pada kedua percobaan adalah sebagai berikut.

Tabel 4.2 Temperatur rata-rata kondisi kerja

<i>mesh</i>	T1	T2	T3	T4	T5	T6
20-30	49.5345	354.8351	619.8335	551.0894	458.9699	403.7739
20-40	43.21128	765.2435	732.5135	719.1894	635.123	570.387

Dari tabel di atas, terlihat bahwa rata-rata temperatur pada percobaan yang menggunakan hampan pasir *mesh* 20-40 cenderung lebih besar dibandingkan dengan percobaan dengan menggunakan hampan pasir *mesh* 20-30. Hal ini disebabkan oleh penerimaan panas dari api *burner* lebih cepat diserap oleh partikel pasir *mesh* 20-40 sehingga temperatur lebih stabil dan lebih besar.



Gambar 4.7 Asap yang keluar dari feeder pada percobaan dengan hampan pasir *mesh* 20-30



Gambar 4.8 kondisi kerja percobaan dengan hampan pasir *mesh* 20-40

Pada percobaan menggunakan hamparan pasir *mesh* 20-40, bahan bakar terfluidisasi dengan baik dan tidak terjadi keluar asap dari *feeder* seperti pada percobaan menggunakan hamparan pasir *mesh* 20-30. Keadaan hamparan yang terfluidisasi dengan baik memungkinkan bahan bakar (tempurung kelapa) terbakar ketika dimasukkan, meskipun pada temperatur yang tidak terlalu tinggi.

4.2.3 Pembakaran biomassa pada kondisi kerja

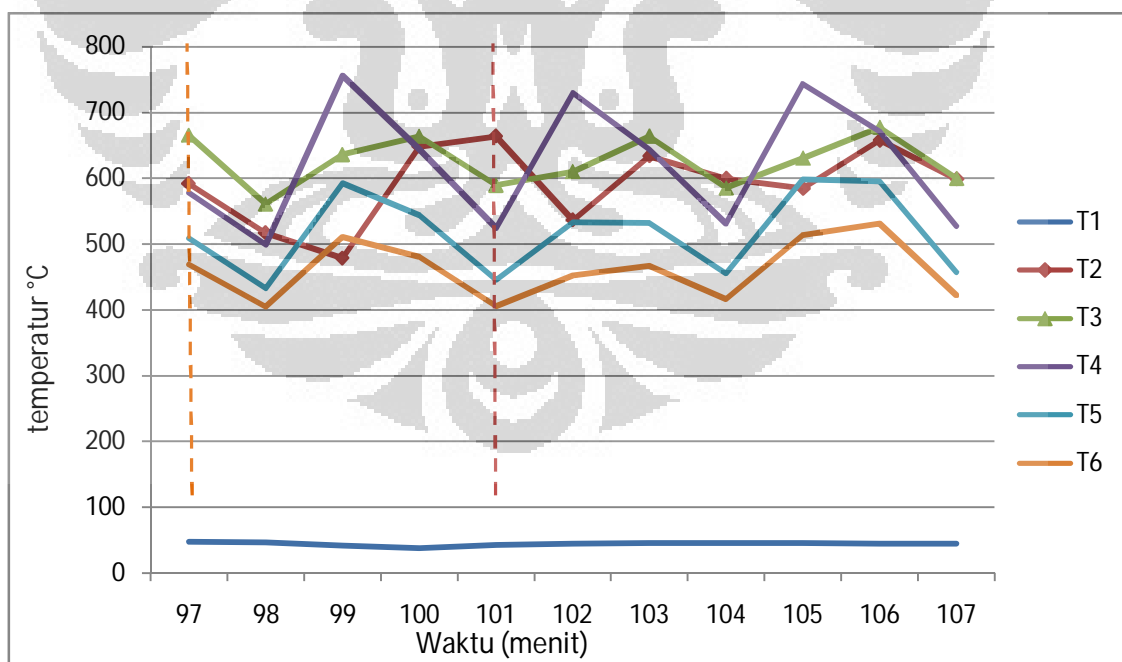
Pada bagian ini akan dianalisa mengenai pengaruh banyaknya bahan bakar yang dimasukkan pada sekali masuk terhadap perubahan temperatur. Data ini diambil pada saat kondisi dan temperatur mencapai kondisi kerja FBC di masing-masing percobaan.

4.2.3.1. Pembakaran pada percobaan dengan hamparan pasir *mesh* 20-30

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

a. Pembakaran 1 kg

Feeding 1 kg tempurung kelapa dilakukan pada menit ke 97 dan 101



Gambar 4.9 Grafik distribusi temperatur terhadap waktu kondisi kerja dengan *feeding* 1 kg

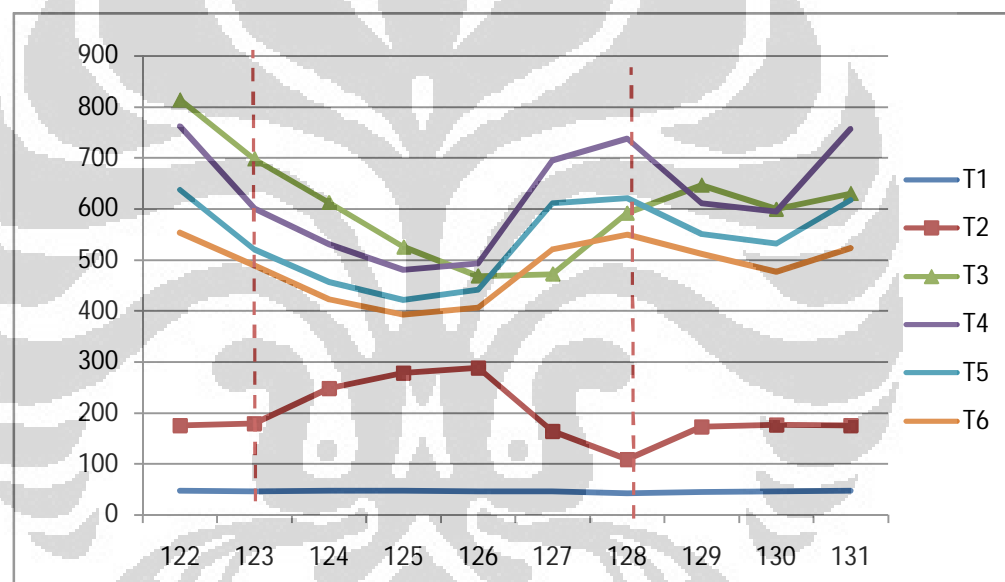
Pada *feeding* 1kg tempurung kelapa, *feeding* pertama menaikkan temperatur T2, namun tidak lama kemudian kembali turun. Pemberian *feeding* 1 kg yang kedua juga tidak dapat secara signifikan menaikkan temperatur dan cenderung terus menurun.

Tabel 4.3 Temperatur rata-rata *feeding* 1 kg di menit 97 dan 101.

T1	T2	T3	T4	T5	T6
44.3313	494.4459	631.1384	617.9034	521.31	463.5212

b. Pembakaran 1,25 kg

Feeding 1.25 kg tempurung kelapa dilakukan pada menit ke 124 dan 129



Gambar 4.10 Grafik distribusi temperatur terhadap waktu kondisi kerja dengan *feeding* 1,25 kg

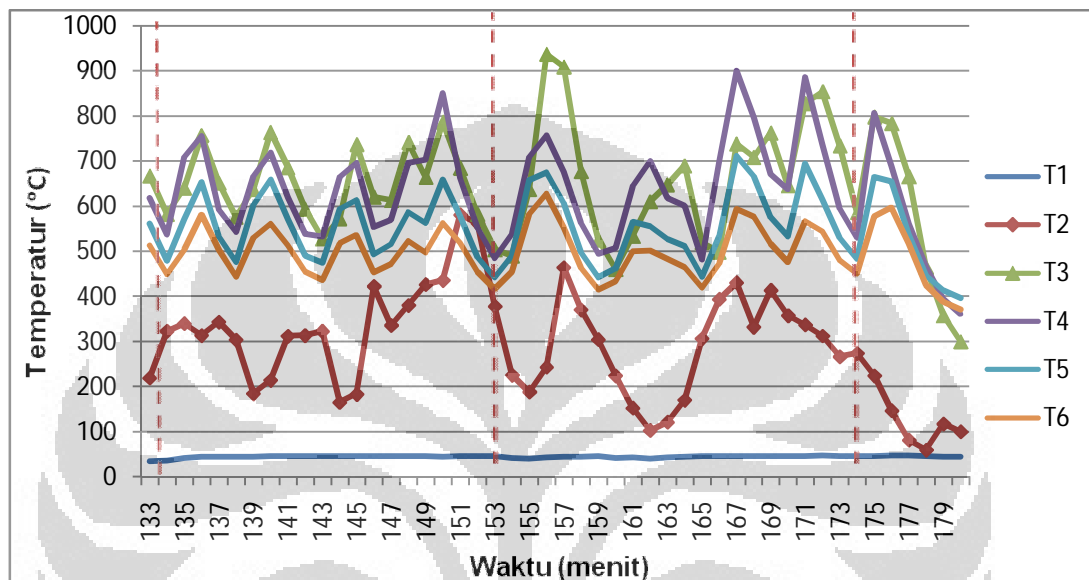
Hasil yang didapat saat *feeding* 1.25 kg yang pertama, temperatur *bed* meningkat dengan baik pada menit 123. Namun setelah menit ke 128 temperatur T2 kembali menurun. Pemberian *feeding* 1,25 kg yang kedua juga tidak dapat menaikkan temperatur T2 dan temperatur dalam ruang bakar cenderung menurun.

Tabel 4.4 Temperatur rata-rata *feeding* 1,25 kg di menit 124 dan 129.

T1	T2	T3	T4	T5	T6
46.28356	195.8882	605.649	626.5126	540.7613	484.4603

c. Pembakaran 1,5 kg

Feeding 1,5 kg cangkang kelapa dilakukan pada menit 133, 153, dan 174.



Gambar 4.11 Grafik distribusi temperatur terhadap waktu kondisi kerja dengan *feeding* 1,5kg

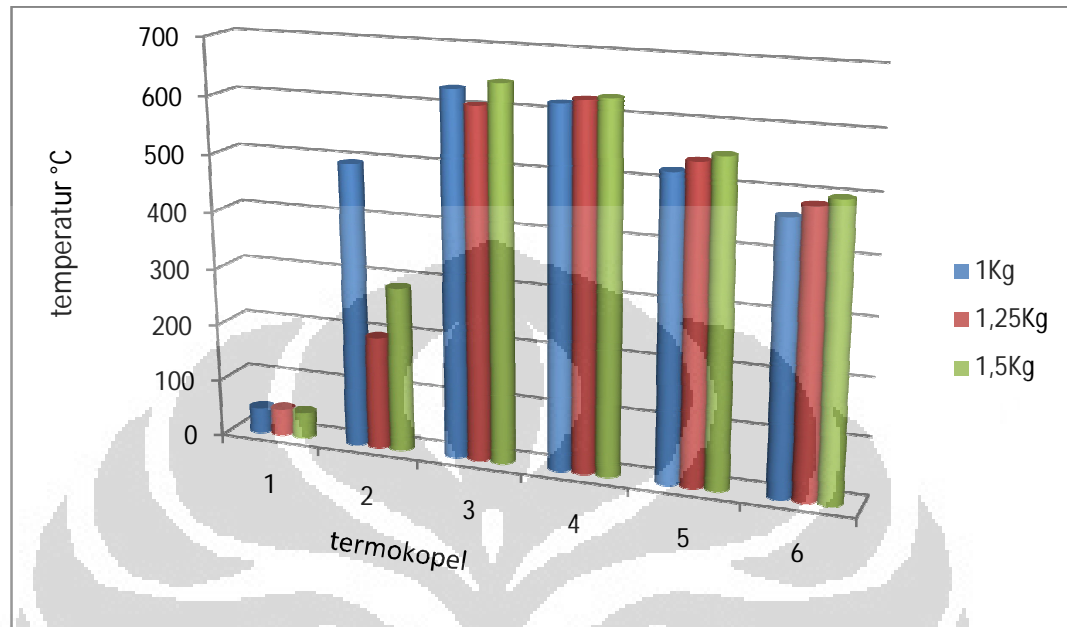
Temperatur pembakaran *feeding* 1,5 kg pada kondisi kerja menunjukkan hasil yang baik. Sesaat setelah bahan bakar dimasukkan, temperatur sempat meningkat. Namun setelah itu, temperatur mulai menurun. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh bahan bakar 1,5 kg tidak dapat terfluidisasi dengan baik, sehingga cangkang kelapa menumpuk dan membutuhkan waktu yang lama untuk terbakar. Rata-rata temperatur pembakaran cangkang kelapa 1,5kg dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4.5 Temperatur rata-rata *feeding* 1,5 kg di menit 133, 153, 174.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
T _{AVG}	45.04306	286.9316	644.9553	631.0548	552.2518	497.9048

Perbandingan temperatur rata-rata

Rata-rata temperatur untuk umpanan bahan bakar 1 kg, 1,25kg dan 1,5 kg :



Gambar 4.12 Grafik Distribusi temperatur kerja pada saat pemasukan bahan bakar 1, 1,25 dan 1,5 kg dengan *mesh* 20-30

Pada akhir distribusi temperatur kerja yang ditunjukkan pada gambar 4.12, 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 *mesh* 20-30. 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.

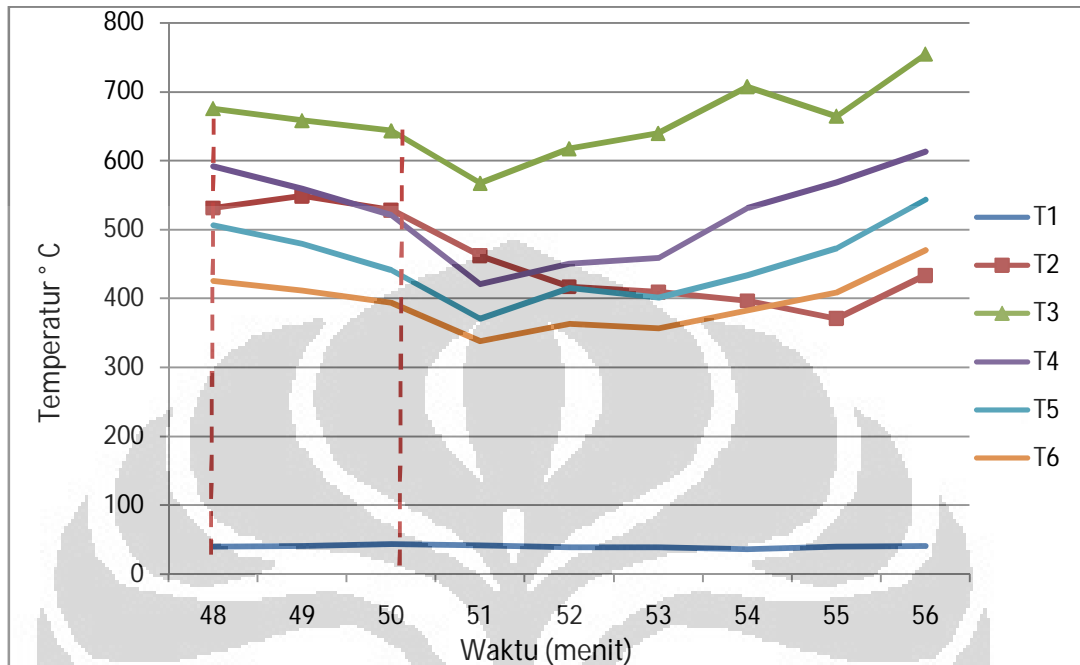
4.2.3.2. Pembakaran pada percobaan dengan hamparan pasir *mesh* 20-40

Pada percobaan ini sebelum kondisi kerja dan setelah kondisi kerja, dilakukan percobaan dengan 0,5 kg, 1 kg dan 1,5kg.

a. Pembakaran 0,5 kg

Pembakaran bahan bakar 0,5 kg ini dilakukan pada menit ke 48 dan ke 50.

Grafik perubahan temperaturnya adalah sebagai berikut:



Gambar 4.13 Grafik distribusi temperatur terhadap waktu sebelum kondisi kerja dengan *feeding* 0,5 kg dengan hamparan *mesh* 20-40

Pembakaran tempurung kelapa 0,5 kg pada kondisi kerja menunjukkan hasil yang baik pada awalnya. Temperatur T2 naik pada menit 48 setelah bahan bakar dimasukkan dalam ruang bakar namun segera turun kembali pada menit 50.

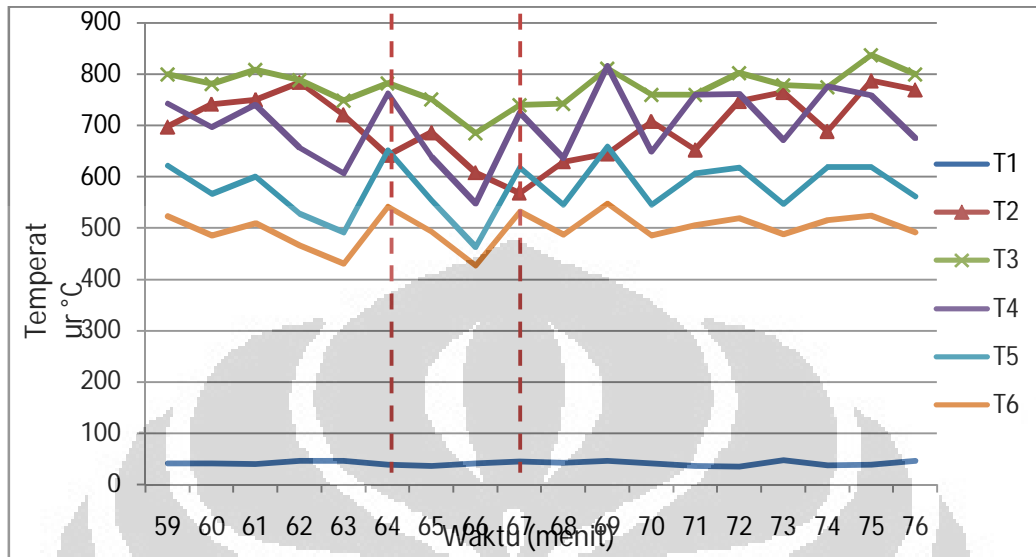
Rata-rata temperatur dari grafik di atas kemudian diterjemahkan ke dalam tabel. Tabel di bawah menunjukkan rata-rata temperatur T1 hingga T2 pada saat pembakaran umpan tersebut.

Tabel 4.6 Temperatur rata-rata *feeding* 0,5 kg sebelum kondisi kerja di menit 48 dan 50 dengan hamparan *mesh* 20-40.

T1	T2	T3	T4	T5	T6
38.69454	529.724	762.5079	675.3529	580.2408	491.891

a. Pembakaran 1 kg

Pembakaran dengan bahan bakar sebesar 1 kg ini dilakukan pada menit 64 dan menit 67.



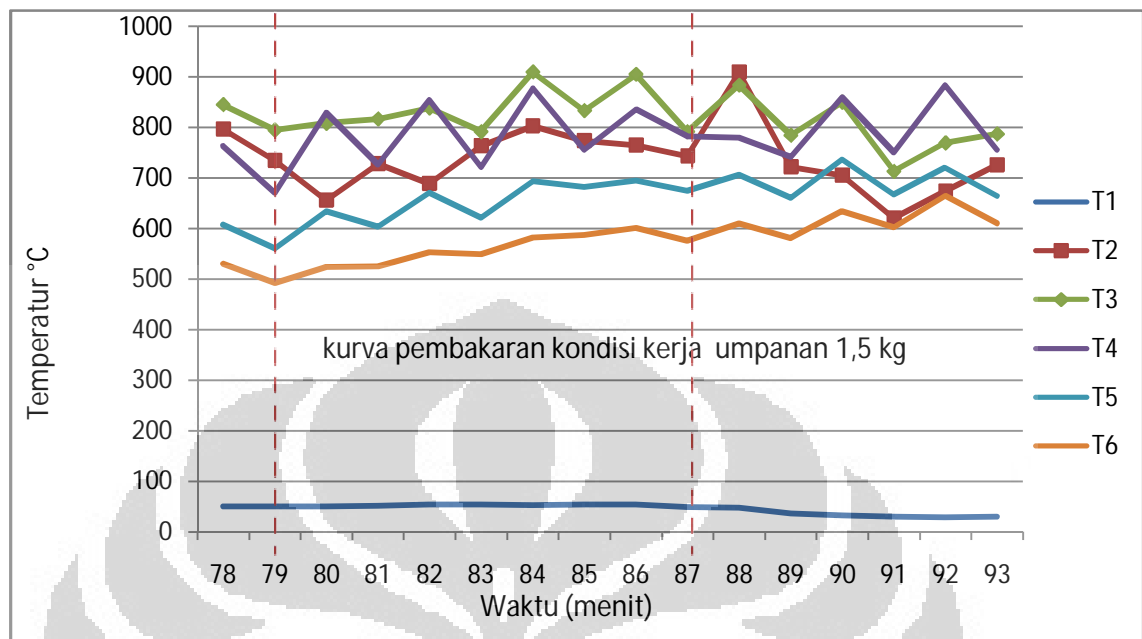
Gambar 4.14 Grafik distribusi temperatur terhadap waktu pada kondisi kerja dengan *feeding* 1kg dengan hamparan *mesh* 20-40

Pembakaran bahan bakar 1kg juga terjadi dengan baik. Pada *feeding* pertama temperatur langsung naik. Namun setelah *feeding* kedua temperatur kembali turun. Bertahan 3 menit setelah *feeding* yang kedua.

Tabel 4.7 Temperatur rata-rata *feeding* 1 kg kondisi kerja di menit 64 dan 67 dengan hamparan *mesh* 20-40

T1	T2	T3	T4	T5	T6
39.3566	746.9993	797.8902	742.1265	600.9967	511.704

b. Pembakaran 1,5 kg

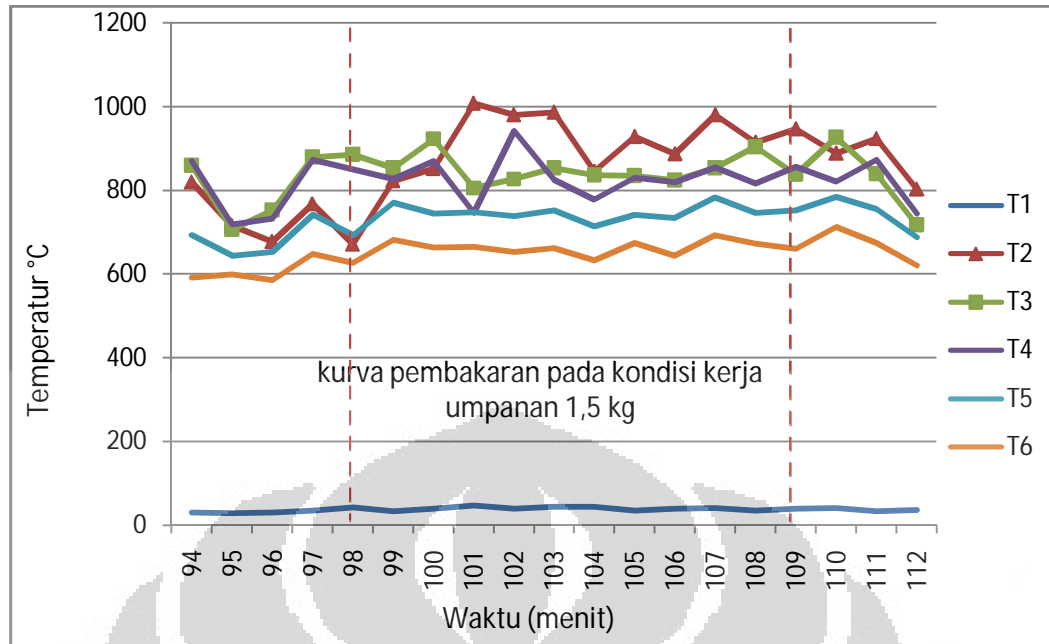


Gambar 4.15 Grafik distribusi temperatur terhadap waktu pada kondisi kerja dengan *feeding* 1,5 kg dengan hamparan *mesh* 20-40

Pembakaran dengan bahan bakar sebanyak 1,5kg dilakukan pada menit ke 79 dan 87. Pembakaran 1,5 kg bahan bakar tempurung kelapa terjadi dengan baik. Terlihat bahwa temperatur dalam ruang bakar cenderung meningkat sesaat setelah bahan bakar dimasukkan. Temperatur pembakaran relatif stabil dan dapat bertahan selama lebih dari 6 menit. Pada grafik di atas, rata-rata temperatur dari T1 hingga T5 dimasukkan ke dalam satu tabel.

Tabel 4.8 Temperatur rata-rata *feeding* 1,5 kg kondisi kerja di menit 79 dan 87 dengan hamparan *mesh* 20-40

T1	T2	T3	T4	T5	T6
34.97066	737.6435	794.0245	793.9682	685.037	607.8391



Gambar 4.16 Grafik distribusi temperatur terhadap waktu kondisi kerja dengan *feeding* 1,5 kg dengan hamparan *mesh* 20-40

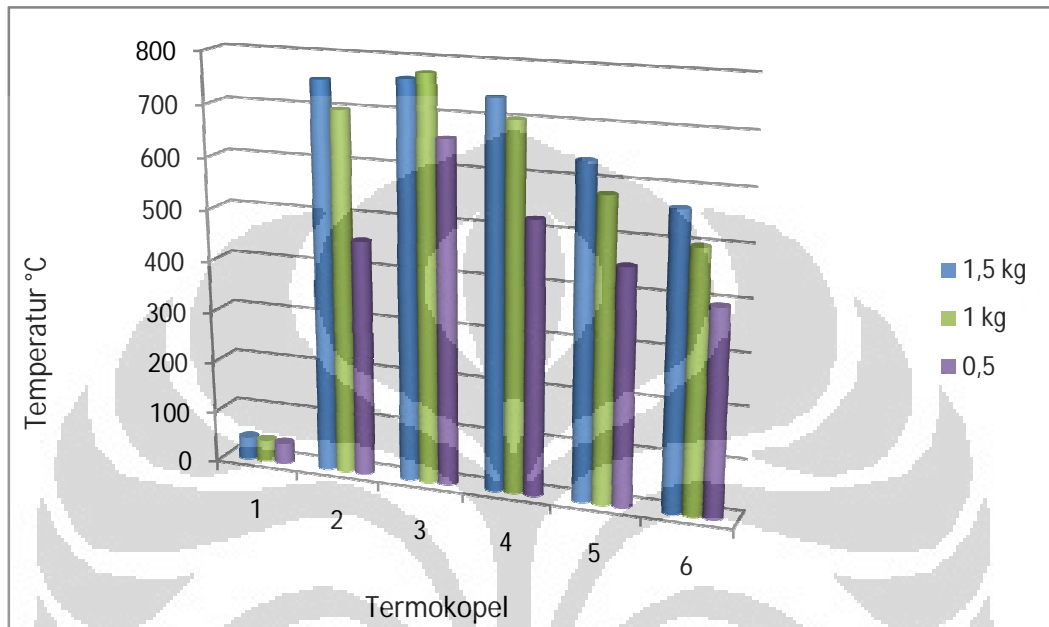
Temperatur pembakaran *feeding* 1,5 kg pada kondisi kerja di menit 98 dan 109, menunjukkan hasil yang baik. Sesaat setelah bahan bakar dimasukkan, temperatur sempat meningkat. Namun setelah itu, temperatur mulai menurun. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh bahan bakar 1,5 kg tidak dapat terfluidisasi dengan baik, sehingga cangkang kelapa menumpuk dan membutuhkan waktu yang lama untuk terbakar. Namun temperatur cukup stabil. Dapat dilihat dari grafik diatas.

Tabel 4.9 Temperatur rata-rata *feeding* 1,5 kg kondisi kerja dengan hamparan *mesh* 20-40 di menit 98 dan 109

T1	T2	T3	T4	T5	T6
40.8746	869.0839	808.176	793.8399	711.2933	633.5866

Perbandingan temperatur rata-rata

Tabel rata-rata temperatur untuk umpanan bahan bakar 0,5 kg, 1kg dan 1,5 kg sesudah dan sebelum kondisi kerja.



Gambar 4.17 Grafik Distribusi temperatur kerja pada saat pemasukan bahan bakar 1; 1,25 dan 1,5 kg dengan *mesh* 20-40

Pada akhir distribusi temperatur kerja yang ditunjukkan pada gambar 4.18, bahan bakar tempurung kelapa dengan berat 0,5 kg adalah bahan bakar yang paling rendah temperatur rata-ratanya, hal ini menunjukkan bahwa pemasukan bahan bakar dengan berat 0,5 kg kurang efektif pada kondisi kerja dengan *mesh* 20-40. 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 729 °C dan 650 °C.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari pengujian kali ini adalah:

1. Fluidisasi yang terjadi pada hampan pasir *mesh* 20-40 lebih baik dibandingkan dengan hampan pasir *mesh* 20-30.
2. Rata-rata temperatur pada kondisi kerja pada percobaan dengan menggunakan hampan pasir *mesh* 20-40 lebih stabil dibandingkan dengan percobaan dengan hampan pasir *mesh* 20-30 karena ada asap yang keluar dari *feeder* .
3. Temperatur agar bahan bakar dapat terbakar pada kondisi kerja menggunakan hampan pasir *mesh* 20-40 adalah sekitar 768°C. Temperatur ini lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan hampan pasir *mesh* 20-30, yaitu sekitar 539°C.
4. Pengaruh variasi massa bahan bakar (1kg , 1,25kg, dan 1,5kg) terhadap distribusi temperatur menggunakan hampan pasir *mesh* 20-30, temperatur hasil pembakaran cenderung tidak stabil dengan distribusi. Sedangkan pada percobaan menggunakan hampan pasir *mesh* 20-40, variasi bahan bakar (0,5kg , 1 kg, dan 1,5kg) temperatur pembakaran cenderung lebih stabil. *feeding* optimal pada kedua percobaan adalah 1,5 kg.

5.2 Saran

Agar performa *Fluidize Bed Combuster UI* dapat meningkat untuk keperluan penelitian lebih lanjut. Saya merekomendasikan beberapa hal untuk kepentingan penelitian kedepannya.

1. Perbaiki performa feeder dengan menambahkan Indus fan agas tekanan pada feeder vacuum, sehingga tidak ada asap yang keluar dari feeder.
2. Perlunya pengadaan instalasi jaringan listrik dan air bersih pada laboratorium pengujian FBC, karena hal ini sangat dibutuhkan untuk praktikan laboratorium di masa mendatang.
3. Penambahan alat keamanan berupa gembok atau sejenisnya untuk kenyamanan dan keamanan pada saat laboratorium di tinggal.



DAFTAR PUSTAKA

1. Bruce R. Munson, Donald F. Young, *Mekanika Fluida*, terj. Harinaldi, Budiarmo (Jakarta: Erlangga, 2003).
2. Christian, Hans. "Modifikasi Sistem Burner dan Pengujian Aliran Dingin *Fluidized Bed Incinerator* UI." Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2008.
3. "Experimental Operating & Maintenance Manual – Fluidisation and Fluid Bed Heat Transfer Unit H692," P. A. Hilton Ltd.
4. Geldart, D., *Gas Fluidization Technology*, (New York: John Wiley & Sons, 1986).
5. Howard, J. R., *Fluidized Beds – Combustion and Applications*, (London: Applied Science Publishers, 1983).
6. Kunii, Daizo & Octave Levenspiel, *Fluidization Engineering*, (New York: Butterworth-Heinemann, 1991).
7. Robert H. Perry, Don W. Green, *Perry's Chemical Engineers' Handbook* 7th Ed., (Singapore: McGraw-Hill Int., 1997).
8. Surjosatyo, Adi. "Fluidized Bed Incineration of Palm Shell & Oil Sludge Waste." Tesis, Program Magister Engineering Universiti Teknologi Malaysia, 1998.
www.uneptie.org/energy.
9. Kunii, Daizo & Octave Levenspiel, *Fluidization Engineering*, (New York: Butterworth-Heinemann, 1991).
10. AGSCO corporation, *AGSCO silica sand*, (New jersey: Hasbrouck heights, 2011)
11. <http://www.kemlu.go.id/Pages/IssueDisplay.aspx?IDP=6&l=id>
12. <http://www.GARNETsales.com>



Lampiran table uji coba

Pembakaran Tempurung Kelapa dengan *mesh* 20- 30

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	KETERANGAN
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	

Pembakaran cangkang kelapa dengan *mesh* 20-40

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	KETERANGAN
1	45.42175	44.37088	42.62644	40.74022	40.70397	40.05919	
2	45.68303	44.645	42.71794	41.17075	40.95291	40.23038	
3	45.83691	45.167	42.99969	41.26972	41.01922	40.20384	
4	41.88063	65.07356	315.0871	167.6534	136.658	114.6518	
5	40.59456	91.84703	457.1824	216.3556	186.1927	160.745	
6	40.05216	96.84003	469.0264	220.9649	192.9153	170.2348	
7	42.38219	98.96572	474.9891	223.762	196.5148	173.5007	
8	42.5945	99.318	475.0482	226.0391	198.9093	176.905	0.25kg
9	42.69641	99.50647	477.1895	225.8668	198.9942	177.8162	

10	42.98972	98.489	482.2992	228.5512	199.9149	180.9076	
11	44.29891	97.52944	485.4847	223.3017	200.101	182.2925	0.25kg
12	42.98341	90.729	454.0784	181.6133	194.6972	178.6614	
13	42.42216	84.62422	367.1525	163.7241	185.9005	170.6053	
14	41.59822	61.71244	421.331	168.1257	194.7108	182.1269	0.25kg
15	43.39138	50.27503	454.4336	173.9498	194.0874	188.4362	
16	44.37859	48.66653	443.0447	176.3758	198.8982	188.1989	
17	44.67684	47.49438	378.3895	191.0324	203.1976	188.3901	0.25kg
18	43.07016	45.80859	400.5562	206.4853	204.9277	188.1801	
19	43.17572	45.65556	414.5091	207.1889	207.0751	187.7522	
20	43.094	46.25894	345.2764	228.7576	220.6602	196.0893	
21	41.62166	70.24675	400.9674	248.7878	241.8977	214.1225	
22	44.03672	145.2783	490.8847	248.3635	245.1224	222.0753	
23	44.69228	180.0569	474.3099	228.7686	228.9378	210.475	
24	45.35213	191.7773	477.2352	241.3652	231.7184	212.3813	0.25kg
25	44.79588	277.8173	436.5686	260.4653	250.9014	224.3093	0.25kg
26	43.07544	431.2259	392.3164	248.3493	219.891	202.1488	
27	41.94381	424.177	361.3188	213.0738	214.3963	198.6609	
28	41.96678	510.976	610.5572	335.4993	352.4231	312.2486	
29	42.21494	419.5398	686.099	414.1256	381.9223	334.1376	
30	42.45013	433.8768	674.5814	418.6913	374.6322	327.8487	0.25kg
31	36.97722	476.8158	721.4451	488.8987	442.4415	379.6233	
32	36.84188	508.4233	649.4873	398.5327	371.2624	334.9424	0.25kg
33	36.14041	478.0524	682.064	480.0712	396.4178	348.2283	
34	39.62697	464.4268	645.7058	424.3612	356.6906	318.9072	0.25kg
35	40.92928	426.2294	684.4012	452.2808	400.1911	352.4588	
36	40.23241	471.7105	706.8827	596.1508	475.1508	402.3677	0.25kg
37	33.79431	505.3098	682.5281	525.3831	447.0635	386.7236	
38	37.87153	486.8484	677.9618	498.3439	444.3975	385.9725	0.25kg
39	36.81478	507.2415	678.9113	583.7474	499.164	422.3694	
40	39.9845	531.3733	675.5163	591.8034	506.6671	425.2917	0.5kg
41	41.13984	548.7279	658.4356	558.7776	479.0044	411.6572	0.5kg
42	43.63234	528.4538	643.5361	520.6294	440.8831	394.1261	
43	41.54413	461.8758	567.3622	420.8098	370.129	338.1944	0.5kg
44	38.87797	416.7338	617.3607	450.8416	415.3453	363.2358	
45	38.37981	409.212	639.7576	458.3867	401.2068	357.1063	
46	35.70206	396.1868	707.4419	531.3811	433.9568	382.6994	
47	39.29688	370.5622	664.6628	568.306	473.2268	408.7726	0.5kg
48	40.88556	433.4281	754.576	612.7885	543.7353	469.7668	0.5kg
49	34.49506	546.9728	752.8087	657.0124	579.1448	495.7118	

50	40.703	608.7711	780.1391	756.2579	617.8423	510.1946	
51	41.00366	697.2179	799.8802	742.9788	620.9773	522.9968	1kg
52	40.82325	741.475	780.9979	697.0004	566.1063	485.6608	1kg
53	40.19066	750.3045	808.3499	740.4947	600.8114	508.9537	
54	45.43838	784.1563	788.4216	656.0482	527.6929	465.8425	1kg
55	46.16572	720.4404	748.4854	605.8213	491.7508	430.7646	
56	38.3185	641.1583	782.3684	762.4891	651.1329	542.337	
57	36.75488	685.8695	750.7802	638.6411	554.0608	493.7125	
58	40.44738	607.365	684.8918	547.3163	462.7743	426.6567	1kg
59	45.01013	567.6812	739.7662	725.5307	617.5098	531.4684	
60	42.28009	629.3681	741.7848	635.6906	545.1656	487.0685	
61	45.23063	644.7398	811.0682	816.671	659.1028	548.2779	
62	41.34359	707.7581	759.7269	648.9231	545.7842	485.7085	1kg self sustained
63	35.95356	652.1225	759.1593	760.5027	606.5181	505.7768	
64	35.03975	746.9804	801.6318	761.0145	618.4	519.5755	
65	46.84859	765.1119	778.0638	671.2038	546.8437	487.7887	1kg
66	37.03538	688.4674	774.882	776.7175	619.5852	515.3749	
67	38.50269	787.4373	836.9832	759.5701	619.1577	524.0769	
68	45.51216	769.6783	799.3519	674.7541	562.1625	491.7624	1kg
69	50.26	683.4131	773.7206	741.8339	604.1864	510.0496	
70	50.53578	796.8486	845.1283	763.7818	607.5278	530.4225	1.5kg
71	49.55622	735.2089	794.6255	670.9416	560.6625	492.9211	
72	49.40828	656.6234	808.3537	829.6054	633.4903	524.9973	
73	51.33356	728.1895	816.7125	727.3183	603.5488	525.3667	
74	53.38988	689.0088	838.4916	855.01	670.85	553.3651	1.5kg
75	53.35744	763.3949	791.9091	721.7584	620.8182	549.3462	
76	52.346	803.557	909.298	877.5221	693.8973	582.627	
77	53.50022	773.5668	833.1433	756.5723	681.8977	587.8806	
78	53.70941	764.6275	904.8323	836.3173	694.3823	601.1733	1.5kg
79	48.31491	743.2369	791.7346	783.4043	674.048	576.3622	
80	47.97128	909.3129	883.4065	780.5034	705.8565	610.7221	
81	36.51459	722.6498	784.8608	741.8738	660.4128	581.6095	1.5kg
82	32.93491	706.1698	849.9615	860.4163	736.5838	634.6773	
83	29.88734	621.0008	713.6935	751.0424	667.4267	602.7322	
84	29.09572	674.263	769.5579	884.4809	720.0559	664.5088	1.5kg
85	30.45647	726.2619	787.2604	756.254	664.9341	609.8176	
86	30.86316	819.8529	859.7396	869.3733	692.616	591.6117	1.5kg
87	28.69756	716.0438	706.0055	718.3651	643.3992	598.51	
88	30.81978	677.1348	751.583	732.264	653.0508	585.0025	1.5kg
89	35.2695	766.7549	879.0947	873.034	741.1129	648.2114	

90	42.69469	671.0015	885.4823	850.2273	691.6444	626.3159	1.5kg
91	33.25288	822.9912	852.8739	826.8888	769.8253	680.9239	
92	40.03522	851.4105	922.899	869.657	743.4703	662.7627	
93	47.54522	1007.78	805.0761	746.5307	747.3876	665.0268	
94	40.22347	979.9842	826.4105	940.9979	738.1216	652.2463	1.5kg
95	44.88925	986.4349	853.449	824.9068	750.971	661.6169	
96	44.58944	844.8381	835.9978	778.1197	713.6175	631.8066	1.5kg
97	34.5855	927.8329	835.3566	829.9832	740.3508	674.0302	
98	39.71278	887.2122	824.4859	819.5418	734.0643	643.2105	
99	41.06538	979.893	852.6401	853.803	781.8349	691.31	1.5kg
100	34.83897	914.4926	903.4781	815.9217	745.6972	672.1319	
101	39.3165	946.7125	837.4365	856.2517	752.2988	660.1515	
102	41.99228	888.5222	926.8596	821.0544	783.7709	711.8812	
103	32.62769	923.0897	838.9641	872.4283	754.5631	673.1913	
104	36.35863	803.1004	716.5783	744.6984	687.5658	620.5439	1.5kg
105	35.64775	962.0764	800.6388	831.0711	762.6386	679.0909	
106	39.57294	1001.038	907.016	872.3793	745.2543	649.118	1.5kg
107	48.33097	758.4944	747.4665	718.9039	620.3723	551.4591	
108	50.23894	697.6848	691.3782	676.8934	593.783	532.8684	1.5kg
109	50.79244	666.6902	651.1697	643.1318	573.6766	518.0828	
110	50.32825	642.7371	622.4325	613.3439	544.6948	495.6406	1.5kg
111	50.02903	630.5418	605.2806	595.6297	525.4532	482.4713	
112	50.30906	621.7388	590.6624	580.6805	511.996	470.5316	
113	50.60406	613.3174	577.9169	566.4971	495.6036	457.472	1.5kg
114	50.70484	603.86	566.8895	554.5591	483.8609	445.9215	
115	50.77394	590.1417	554.8196	541.9352	472.6221	436.7728	
116	51.62263	573.8147	544.757	531.1225	461.2125	425.9798	1.5kg
117	51.64097	567.0932	535.5827	520.6077	453.5771	419.2401	
118	51.2105	558.0848	526.6705	512.2872	445.5902	411.2804	1.5kg
119	51.68606	550.7672	516.7579	501.3078	440.8217	405.395	
120	51.41103	546.6208	509.4896	494.6486	436.1685	402.1657	1.5kg
121	51.32473	548.9841	507.1479	491.7723	431.74	399.9577	1.5kg

AGSCO SILICA SAND

TYPICAL PHYSICAL PROPERTIES

FUSION POINT	3135 °F
HARDNESS	Knoop - 820; Mohs - 7
GRAIN SHAPE	Spherical
SPECIFIC GRAVITY	2.65 g/cm ³
LOOSE PACK BULK DENSITY	1.60 g/cm ³ (100 lbs/ft ³)
pH	6.8 to 7.2

TYPICAL CHEMICAL PROPERTIES

#16-30 and Coarser Sizes		#12-20 and Finer Sizes	
SiO ₂	98.2 %	SiO ₂	99.8 %
Fe ₂ O ₃	0.14	Fe ₂ O ₃	0.016
Al ₂ O ₃	0.49	Al ₂ O ₃	0.034
TiO ₂	0.02	TiO ₂	0.007
CaO	0.02	CaO	0.011
MgO	0.01	MgO	0.007
K ₂ O	0.21	Loss on Ignition	0.094
Na ₂ O	0.06		
Loss on Ignition	0.40		

TYPICAL SCREEN ANALYSIS (Percent Retained)

US SIEVE	#4-8	#8-12	#10-20	#12-20	#16-30
6	1.0%				
7	38.6				
8	53.5	6.0%			
10	6.4	54.0	1.0%		
12	0.5	35.3	15.0	2.1%	
14		4.7	24.3	20.9	
16		T	31.4	29.6	1.1%
18			21.4	28.6	28.4
20			3.5	13.3	40.2
25			3.4	5.0	18.6
30				0.5	7.0
40					4.3
Pan					0.4
	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Effective Size (mm)	2.36	1.70	1.00	.85	.60

(continued)

AGSCO SILICA SAND
 TYPICAL SCREEN ANALYSIS ... (continued)
 (Percent Retained)

US SIEVE	<u>12-20</u>	<u>16-30</u>	<u>20-40</u>	<u>(#1) 35-50</u>	<u>(#2) 40-70</u>	<u>50-80</u>	<u>(#7) 70-100</u>	<u>(#10) 100-140</u>	<u>(#16) 140-270</u>
12	0.1								
14	1.3								
16	10.3								
18	44.2	1.4							
20	40.4	35.7	2.3						
25	3.5	58.0	19.7	0.3					
30	0.2	4.7	28.0	2.0	0.3				
35		0.2	30.3	20.5	5.2				
40			15.8	35.3	16.5	2.7			
50			3.6	32.7	37.0	39.3	8.2		
60			0.3	4.7	14.2	23.8	16.3	3.2	
70				2.2	9.3	16.2	22.3	4.6	
80				2.3	5.5	9.1	24.0	11.6	
100					4.8	5.4	13.5	19.8	
120					7.2	3.5	9.3	20.3	5.1
140							3.6	23.9	22.7
170							2.5	7.0	26.5
200							0.3	5.3	24.4
230								3.5	13.4
270								0.8	5.9
325									2.0
	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

AFS Grain Number	10	16	25	35	47	50	66	94	144
Effective Size (mm)	.85	.71	.43	.30					

SILICA FLOUR
 (Percent Retained)

US SIEVE	<u>140</u>	<u>200</u>	<u>325</u>
100	T		
140	1	T	
200	6	3	
270	10	7	T
325	8	7	2
Passing 325	<u>75</u>	<u>83</u>	<u>98</u>
	100	100	100

SPECIFICATION

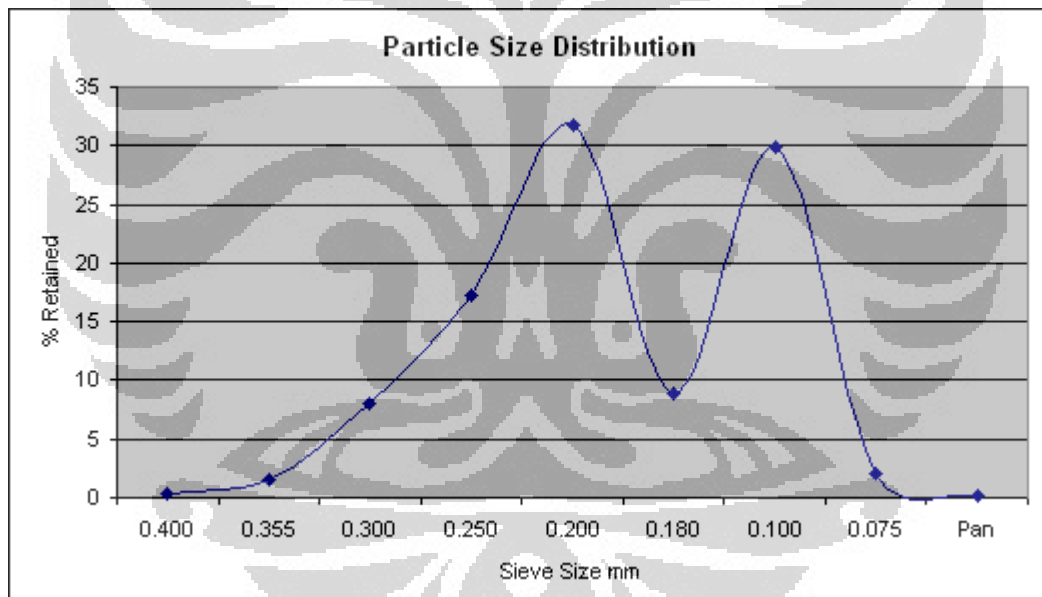
MATERIAL : Industrial Silica Sand

GRADE : <0.3 mm Fine Sand

(Spec. Code: 03 - 03)

Chemical Analysis	
Parameters	Result
SiO ₂	>99.3 %
Fe ₂ O ₃	300 ppm Max
Al ₂ O ₃	2500 ppm Max
CaO	250 ppm Max
MgO	50 ppm Max
Clay	0.3 % Max
CaCO ₃	0.5 % Max
Moisture	<0.1 % Max
Loss on Ignition	<0.3 % Max
pH	Neutral
Bulk Density	1.56 Appr.
Density	2.65 gm/cc

Typical Sieve Analysis		
MESH	Sieve Size mm	%Retained
40	0.400	0.29
45	0.355	1.60
50	0.300	8.01
60	0.250	17.23
70	0.200	31.83
80	0.180	8.94
140	0.100	29.93
200	0.075	2.01
Pan	Pan	0.16



SPECIFICATION

MATERIAL : Industrial Silica Sand

GRADE : <0.5 mm Fine Sand

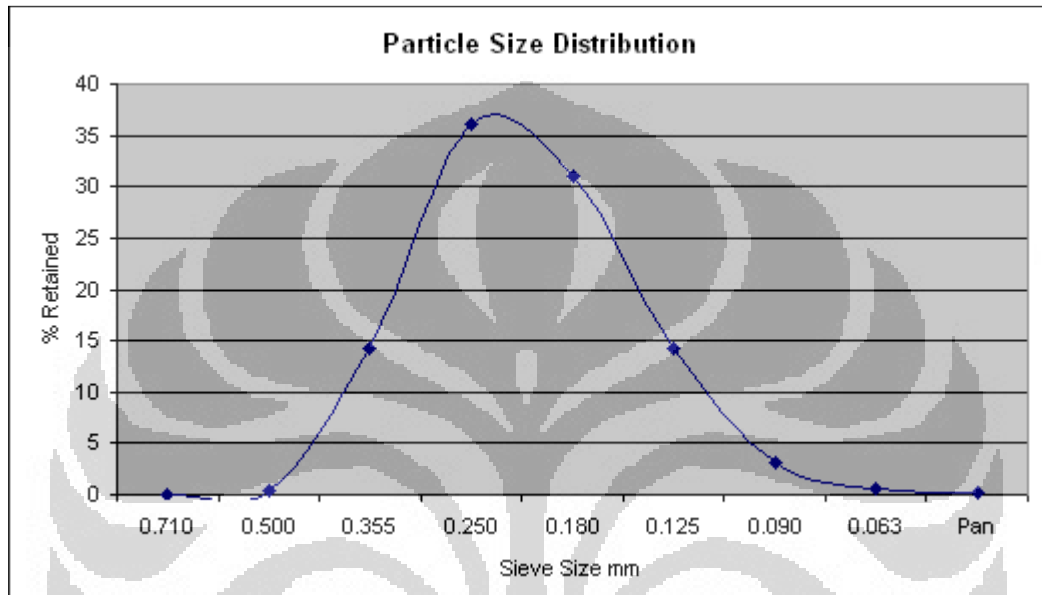
(Spec. Code: 03 - 04)

Chemical Analysis	
Parameters	Result
SiO ₂	>99.3 %
Fe ₂ O ₃	300 ppm Max
Al ₂ O ₃	2500 ppm Max

Typical Sieve Analysis		
MESH	Sieve Size mm	%Retained

CaO	250 ppm Max
MgO	50 ppm Max
Clay	0.3 % Max
CaCO ₃	0.5 % Max
Moisture	<0.1 % Max
Loss on Ignition	<0.3 % Max
pH	Neutral
Bulk Density	1.56 Appr.
Density	2.65 gm/cc

25	0.710	0.04
35	0.500	0.41
45	0.355	14.32
60	0.250	36.12
80	0.180	30.98
120	0.125	14.30
170	0.090	3.19
230	0.063	0.53
Pan	Pan	0.11

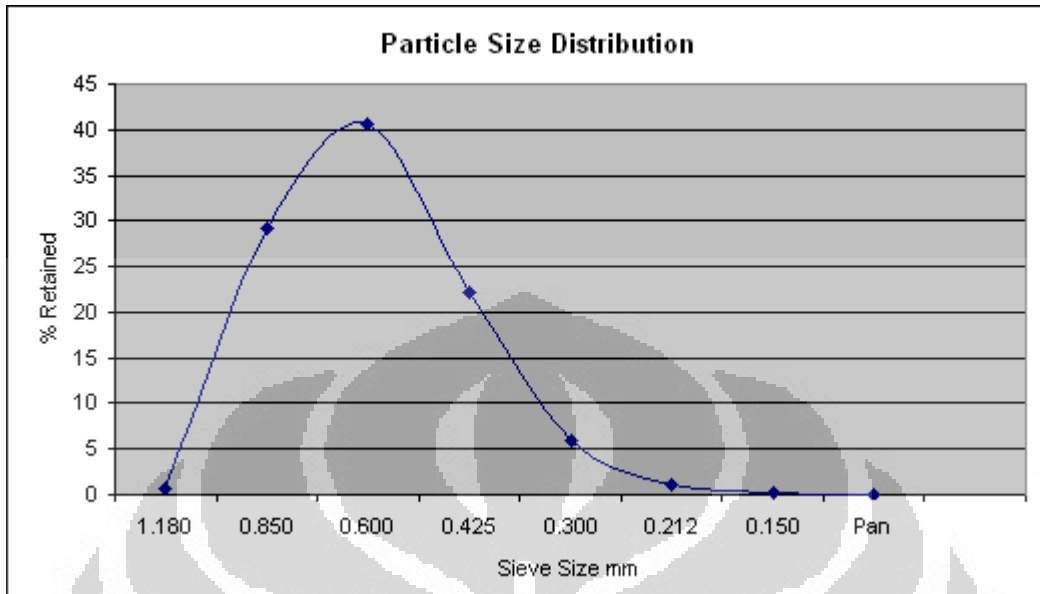


SPECIFICATION

MATERIAL : Industrial Silica Sand
GRADE : (0.212 - 1.18) mm Medium Sand

Chemical Analysis	
Parameters	Result
SiO ₂	>99.3 %
Fe ₂ O ₃	300 ppm Max
Al ₂ O ₃	2500 ppm Max
CaO	250 ppm Max
MgO	50 ppm Max
Clay	0.3 % Max
CaCO ₃	0.5 % Max
Moisture	<0.1 % Max
Loss on Ignition	<0.3 % Max
pH	Neutral
Bulk Density	1.56 Appr.
Density	2.65 gm/cc

Typical Sieve Analysis		
MESH	Sieve Size mm	%Retained
16	1.180	0.59
20	0.850	29.20
30	0.600	40.67
40	0.425	22.13
50	0.300	6.02
70	0.212	1.15
100	0.150	0.19
Pan	Pan	0.05

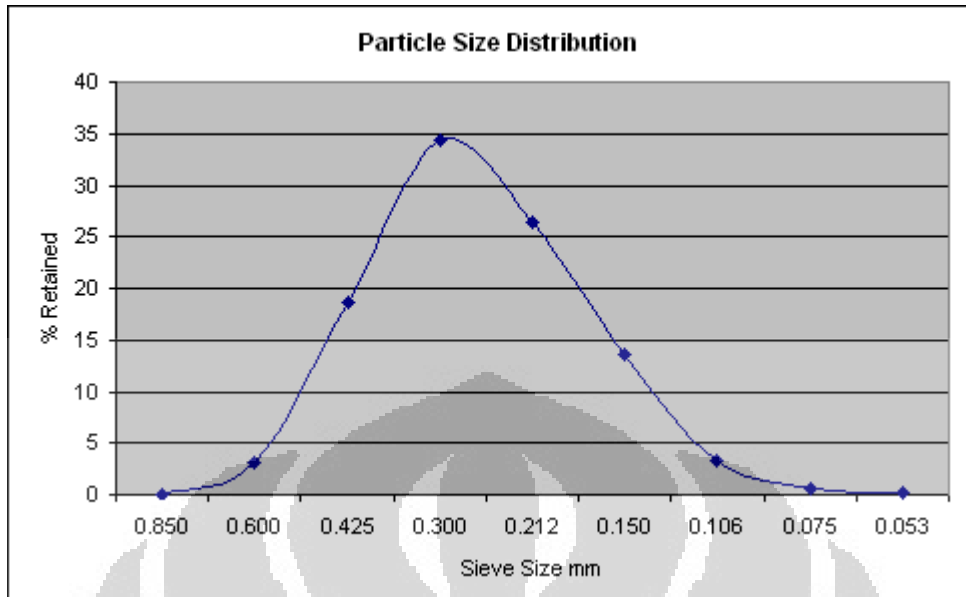


SPECIFICATION

MATERIAL : Industrial Silica Sand
GRADE : (0.2 - 0.5) mm Fine Sand
(Spec Code : 02 - 05)

Chemical Analysis	
Parameters	Result
SiO ₂	>99.3 %
Fe ₂ O ₃	300 ppm Max
Al ₂ O ₃	2500 ppm Max
CaO	250 ppm Max
MgO	50 ppm Max
Clay	0.3 % Max
CaCO ₃	0.5 % Max
Moisture	<0.1 % Max
Loss on Ignition	<0.3 % Max
pH	Neutral
Bulk Density	1.56 Appr.
Density	2.65 gm/cc

Typical Sieve Analysis				
Parameters	Sieve Size mm	%Retained	Multiplier	Total
20	0.85	0.01	10	0.1
30	0.600	3.13	20	62.6
40	0.425	18.72	30	561.6
50	0.300	34.34	40	1373.6
70	0.212	26.39	50	1319.5
100	0.150	13.53	70	947.1
140	0.106	3.26	100	326.0
200	0.075	0.49	140	68.6
270	0.053	0.10	200	20.0
Pan	Pan	0.03	300	9.0
TOTAL				4688.1
AFS =				46.88

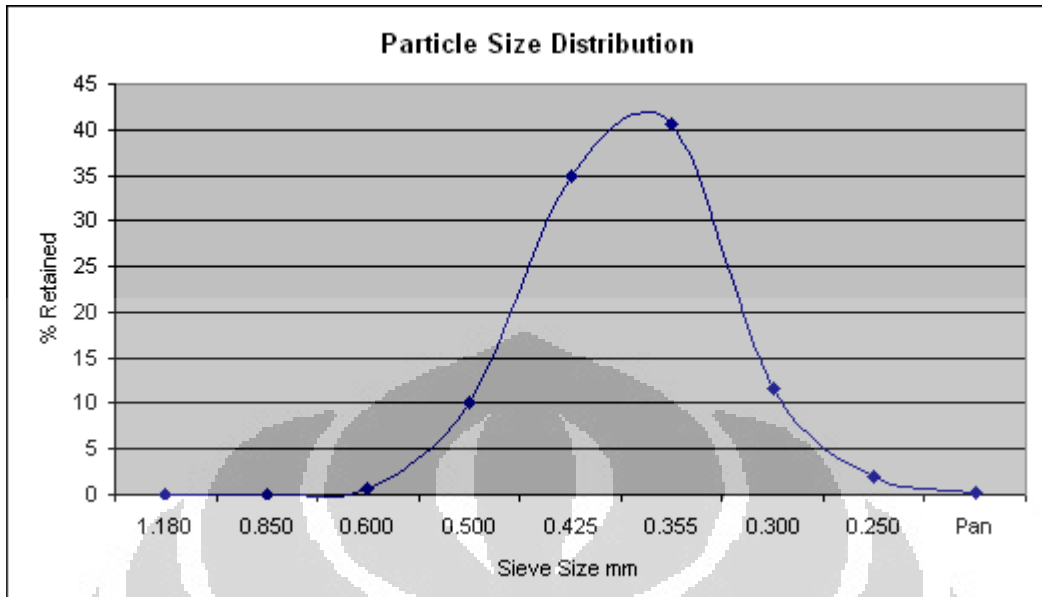


SPECIFICATION

MATERIAL : Industrial Silica Sand
GRADE : (0.3 - 0.6) mm Medium Sand

Chemical Analysis	
Parameters	Result
SiO ₂	>99.3 %
Fe ₂ O ₃	300 ppm Max
Al ₂ O ₃	2500 ppm Max
CaO	250 ppm Max
MgO	50 ppm Max
Clay	0.3 % Max
CaCO ₃	0.5 % Max
Moisture	<0.1 % Max
Loss on Ignition	<0.3 % Max
pH	Neutral
Bulk Density	1.56 Appr.
Density	2.65 gm/cc

Typical Sieve Analysis		
MESH	Sieve Size mm	%Retained
16	1.180	0.02
20	0.850	0.02
30	0.600	0.57
35	0.500	10.12
40	0.425	34.96
45	0.355	40.54
50	0.300	11.70
60	0.250	1.87
Pan	Pan	0.20

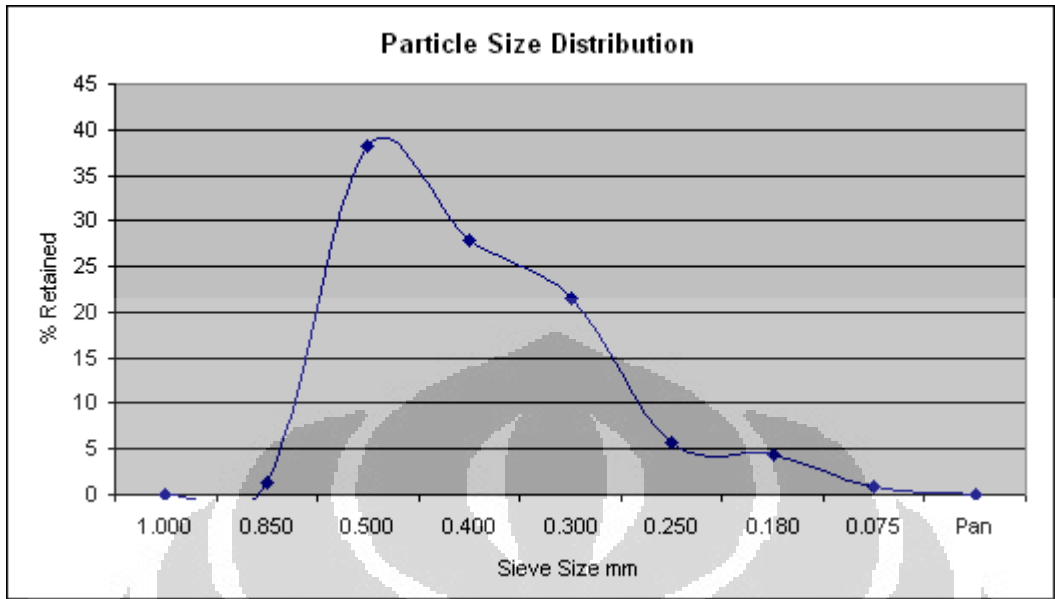


SPECIFICATION

MATERIAL : Industrial Silica Sand
GRADE : (0.3 - 0.8) mm Medium Sand
 (Spec Code : 04 - 03)

Chemical Analysis	
Parameters	Result
SiO ₂	>99.3 %
Fe ₂ O ₃	300 ppm Max
Al ₂ O ₃	2500 ppm Max
CaO	250 ppm Max
MgO	50 ppm Max
Clay	0.3 % Max
CaCO ₃	0.5 % Max
Moisture	<0.1 % Max
Loss on Ignition	<0.3 % Max
pH	Neutral
Bulk Density	1.56 Appr.
Density	2.65 gm/cc

Typical Sieve Analysis		
MESH	Sieve Size mm	%Retained
18	1.000	0.04
20	0.850	1.31
35	0.500	38.29
40	0.400	27.84
50	0.300	21.46
60	0.250	5.47
80	0.180	4.41
200	0.075	0.90
Pan	Pan	0.01

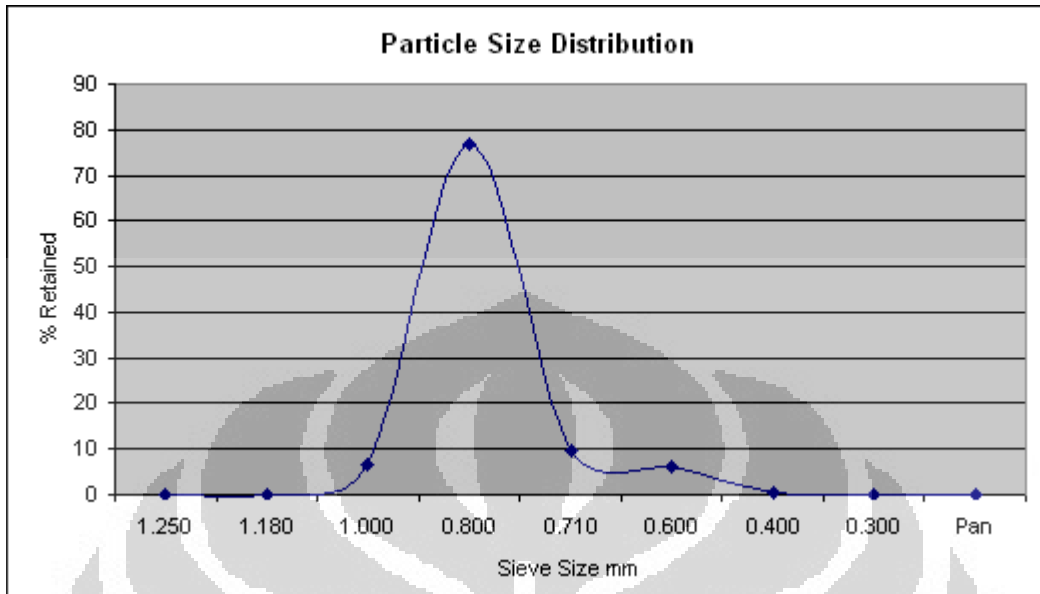


SPECIFICATION

MATERIAL : Industrial Silica Sand
GRADE : (0.7 - 1.2) mm Medium Sand
(Spec Code : 04 - 04)

Chemical Analysis	
Parameters	Result
SiO ₂	>99.3 %
Fe ₂ O ₃	300 ppm Max
Al ₂ O ₃	2500 ppm Max
CaO	250 ppm Max
MgO	50 ppm Max
Clay	0.3 % Max
CaCO ₃	0.5 % Max
Moisture	<0.1 % Max
Loss on Ignition	<0.3 % Max
pH	Neutral
Bulk Density	1.56 Appr.
Density	2.65 gm/cc

Typical Sieve Analysis		
Parameters	Sieve Size mm	%Retained
14	1.250	0.19
16	1.18	0.10
18	1.000	6.79
20	0.800	76.87
25	0.710	9.45
30	0.600	6.07
40	0.400	0.50
50	0.300	0.02
Pan	Pan	0.01

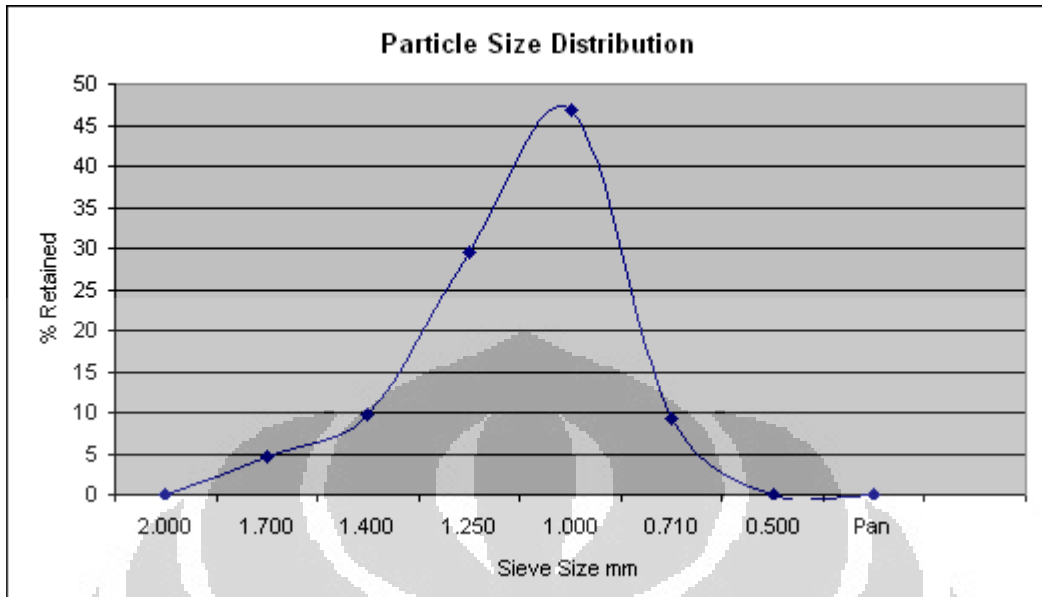


SPECIFICATION

MATERIAL : Industrial Silica Sand
GRADE : (1..0-2.0) mm Coarse Sand

Chemical Analysis	
Parameters	Result
SiO ₂	>99.3 %
Fe ₂ O ₃	300 ppm Max
Al ₂ O ₃	2500 ppm Max
CaO	250 ppm Max
MgO	50 ppm Max
Clay	0.3 % Max
CaCO ₃	0.5 % Max
Moisture	<0.1 % Max
Loss on Ignition	<0.3 % Max
pH	Neutral
Bulk Density	1.56 Appr.
Density	2.65 gm/cc

Typical Sieve Analysis		
MESH	Sieve Size mm	%Retained
10	2.000	0.07
12	1.700	4.70
14	1.400	9.64
16	1.250	29.55
18	1.000	46.76
25	0.710	9.23
35	0.500	0.04
Pan	Pan	0.01



SPECIFICATION

MATERIAL : Industrial Silica Sand
GRADE : (1..0-3.0) mm Coarse Sand

Chemical Analysis	
Parameters	Result
SiO ₂	>99.3 %
Fe ₂ O ₃	300 ppm Max
Al ₂ O ₃	2500 ppm Max
CaO	250 ppm Max
MgO	50 ppm Max
Clay	0.3 % Max
CaCO ₃	0.5 % Max
Moisture	<0.1 % Max
Loss on Ignition	<0.3 % Max
pH	Neutral
Bulk Density	1.56 Appr.
Density	2.65 gm/cc

Typical Sieve Analysis		
MESH	Sieve Size mm	%Retained
5	4.000	0.00
6	3.350	0.13
7	2.800	3.42
8	2.360	22.89
10	2.000	50.79
12	1.700	19.30
14	1.250	3.05
16	1.180	0.11
Pan	Pan	0.31

