



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISA VARIASI PENGGUNAAN SUPLAI UDARA PADA
FLUIDIZED BED COMBUSTOR UNIVERSITAS INDONESIA**

SKRIPSI

ADHIKA A. TAMA

0706266790

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

DEPOK

JULI 2011



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISA VARIASI PENGGUNAAN SUPLAI UDARA PADA
FLUIDIZED BED COMBUSTOR UNIVERSITAS INDONESIA**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

ADHIKA A. TAMA

0706266790

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

DEPOK

JULI 2011

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Adhika A. Tama

NPM : 0706266790

Tanda Tangan : 

Tanggal : 4 Juli 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Adhika A. Tama

NPM : 0706266790

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Skripsi : ANALISA VARIASI PENGGUNAAN SUPLAI UDARA PADA
FLUIDIZED BED COMBUSTOR UNIVERSITAS INDONESIA

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

DEWAN PENGUJI

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

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

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

Penguji : Prof. Ir. Yulianto Sulistyo N, M.Sc., Ph.D

Three handwritten signatures in black ink are present. The top signature is for the supervisor, Dr. Ir. Adi Surjosatyo. The middle signature is for Prof. Dr. I Made K Dhiputra. The bottom signature is for Prof. Ir. Yulianto Sulistyo N, with a small '2' written below it. The signatures are written over a large, faint watermark of the Universitas Indonesia logo.

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 4 Juli 2011

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT hanya karena berkah dan rahmat-Nya lah skripsi ini dapat diselesaikan. Penulisan skripsi ini ditujukan untuk dapat memenuhi syarat mendapatkan gelar sarjana dari Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia. Penulis berharap agar skripsi yang berjudul ‘Analisa Variasi Penggunaan Suplai Udara pada Fluidized Bed Combustor Universitas Indonesia’ ini dapat memberikan manfaat pada perkembangan teknologi Fluidized Bed Combustion di Indonesia. Penulis sadar, skripsi ini tidak akan dapat terselesaikan tanpa bantuan dari banyak pihak, oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

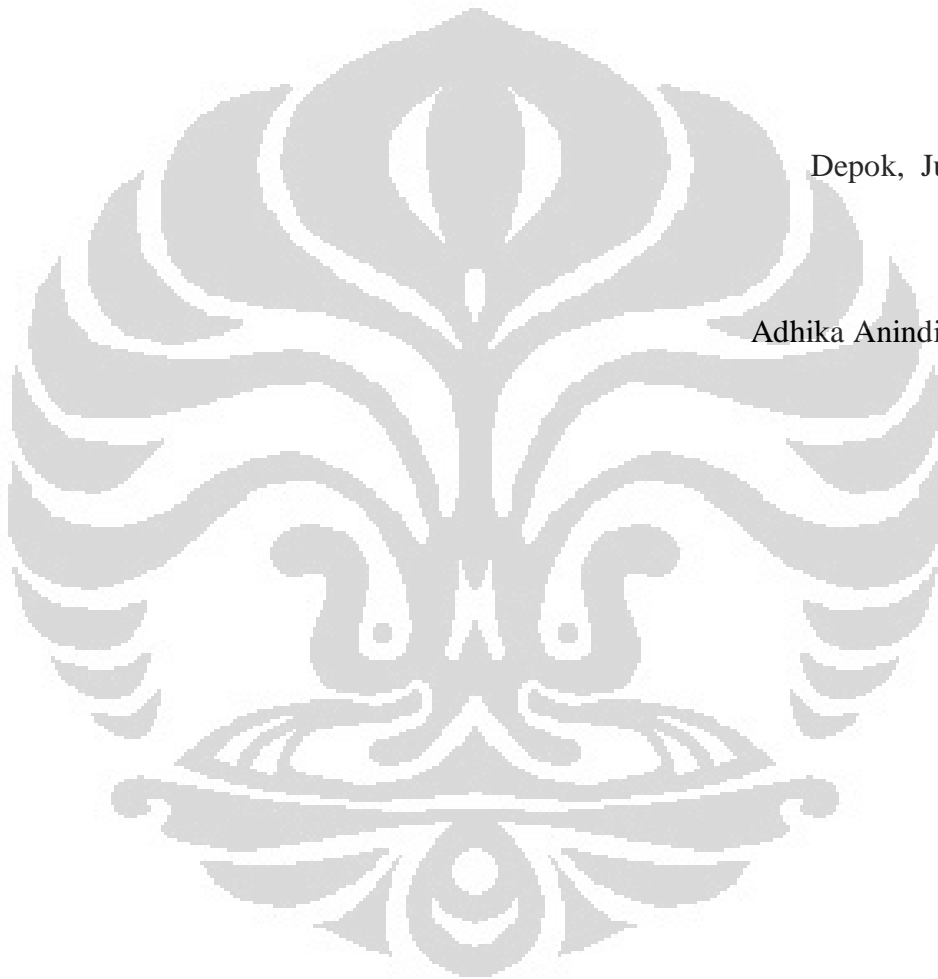
1. Dr. Ir. Adi Surjasatyo, M.Eng, selaku dosen pembimbing yang mengenalkan penulis pada teknologi ini sekaligus menyediakan waktu, tenaga dan selalu memompa semangat kami dalam menyelesaikan skripsi ini.
2. Kedua orang tua penulis, Imam Parikesit dan Poppy Mahargijani yang senantiasa selalu memberikan dukungan baik secara moral, material dan doa yang tidak mungkin penulis balas.
3. Seluruh jajaran dosen dan karyawan DTM terutama mas Syarif dan mas Boan yang memberikan waktu, pikiran dan tenaganya di sela-sela kesibukannya untuk membantu kami dalam banyak hal.
4. Dr. Ir. Muhammad Idrus Alhamid, yang telah membantu dalam realisasi desain distributor fbc secara cuma-cuma dan mengajak berkunjung ke perusahaan beliau. Semoga bapak semakin sukses dunia akhirat pak.
5. Teman-teman FBC, A. Nurlatif, Alwin Nurman dan Satriawan Wiguna. Semoga penelitian dan perjuangan kita akan memberikan manfaat di masa mendatang.
6. Teman-teman TU DELFT dan MIT yang telah memberikan ide dan semangat dalam menyelesaikan skripsi ini, Sabdo Waluyo, Gilang AIV, Hamdalah Hazhar, Iman Rizki Utama, Kapa Cossa, M. Fariz, M. Iqbal Bimo, Rian Saputra, dan lainnya yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

7. Ibu Pratiwi Utami Putri yang telah memberikan semangat, doa dan tujuan untuk tetap pada jalurnya menyelesaikan skripsi ini.
8. Seluruh pihak lain yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu yang telah membantu dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, penulis memohon maaf jika terdapat kesalahan baik yang disengaja maupun tidak yang terdapat dalam skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat membawa manfaat bagi semua pembacanya.

Depok, Juni 2011

Adhika Anindita Tama



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

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

Nama : Adhika A. Tama
NPM : 0706266790
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 :

ANALISA VARIASI PENGGUNAAN SUPLAI UDARA PADA FLUIDIZED
BED COMBUSTOR UNIVERSITAS INDONESIA

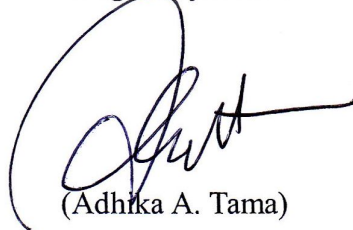
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 4 Juli 2011

Yang menyatakan



(Adhika A. Tama)

ABSTRAK

Nama : Adhika A. Tama

Npm : 0706266790

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : Analisa Variasi Penggunaan Suplai Udara Pada *Fluidized Bed Combustor* Universitas Indonesia

Pada penelitian ini, variasi suplai udara dan banyaknya umpan pembakaran dianalisa bagaimana mereka memengaruhi *fluidized bed combustor* Universitas Indonesia (FBC UI). Suplai udara yang digunakan pada penelitian ini adalah 0,085 m³/s dan 0,095 m³/s. Kedua suplai udara tersebut dijalankan pada FBC UI dengan menggunakan cangkang kelapa sebagai bahan bakar. Kedua kondisi tersebut dites untuk mendapatkan waktu dan jumlah bahan bakar yang diperlukan untuk mendapatkan kondisi kerja pembakaran. Setelah kondisi kerja pembakaran didapatkan, jumlah penggunaan bahan bakar dan efeknya terhadap perubahan temperatur dianalisa. Pada penelitian ini ditemukan bahwa percobaan dengan suplai udara 0,095 m³/s memberikan temperatur keluaran yang lebih tinggi pada area *freeboard*.

Kata kunci : *Fluidized bed combustor*, Suplai Udara, biomassa, Cangkang Kelapa,

ABSTRACT

Name : Adhika A. Tama

NPM : 0706266790

Study Program: Mechanical Engineering

Title : Analysis of Gas Flow Rate Variation on Fluidized Bed Combustor in University of Indonesia.

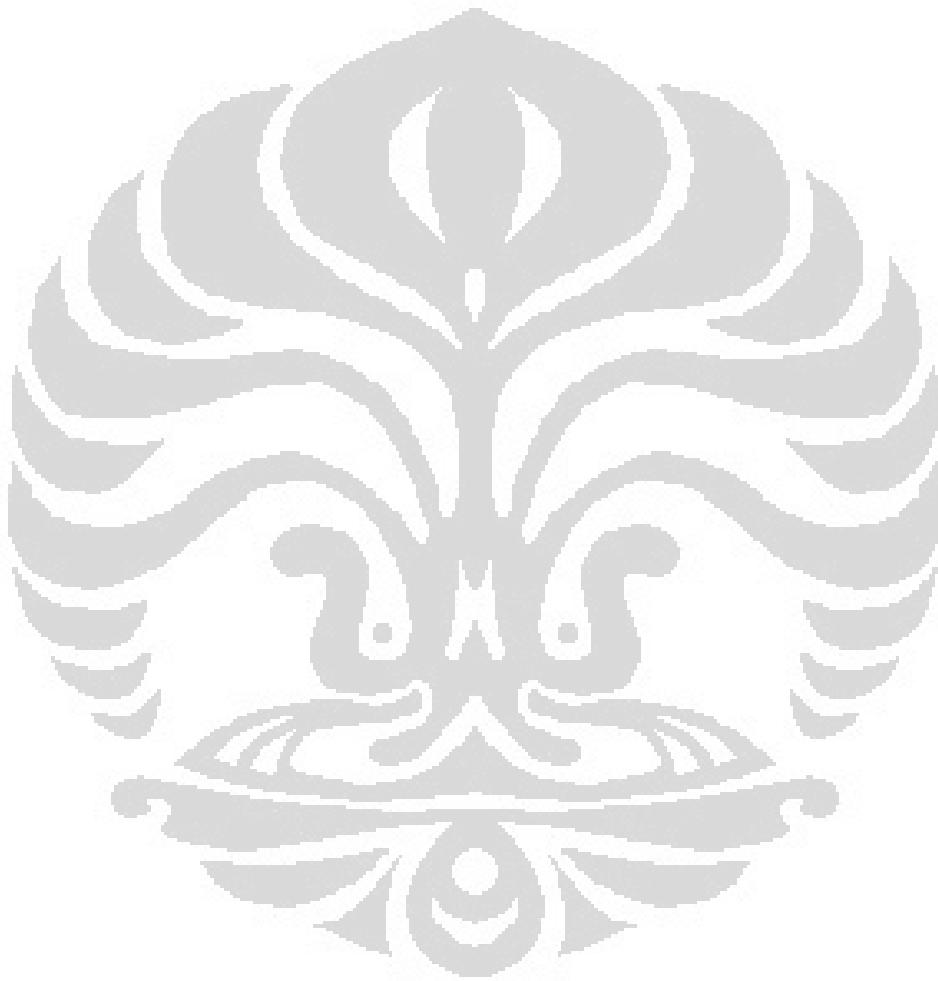
In this study, the flow rate variation and the combustion feed were analyzed how they gave effects on fluidized bed combustor in University of Indonesia. The air supplies used for this experiment were 0,085 and 0,095 m³/s. Both air supply used with coconut shell as the bio fuel. Both condition tested to find the time and the fuel needed to achieve the self-sustaining combustion state. After the self-sustaining combustion achieved, the feed rate and its effect for the temperature are analyzed. It was found that the experiment with higher air supply gave higher output temperature in the freeboard area.

Key word : Fluidized bed combustor, Biomass, Coconut shell, air supply.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vi
ABSTRAK.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Judul Penelitian.....	1
1.2 Latar Belakang Masalah.....	1
1.3 Pokok Permasalahan.....	5
1.4 Tujuan Penulisan.....	5
1.5 Batasan Masalah.....	5
1.6 Metodologi Penelitian.....	6
1.7 Sistematika Penulisan.....	7
2. LANDASAN TEORI.....	8
2.1 Energi Biomassa.....	8
2.2 Karakteristik Biomassa.....	14
2.3 Sistem Reaksi Pembakaran.....	18
2.4 Fluidized Bed Combustor.....	23
2.5 Fenomena Fluidisasi.....	40
3. PERSIAPAN DAN PROSEDUR PENGUJIAN.....	54
3.1 Metodologi Pengujian.....	54
3.2 Persiapan Pengujian.....	56
3.3 Standar Operasi Alat Pengujian.....	67
3.4 Prosedur Pengujian Pembakaran.....	75
4. HASIL DAN ANALISA.....	79

4.1 Hasil	79
4.2 Analisa	80
5. KESIMPULAN DAN SARAN	98
5.1 Kesimpulan	98
5.2 Saran	99
DAFTAR REFERENSI	100

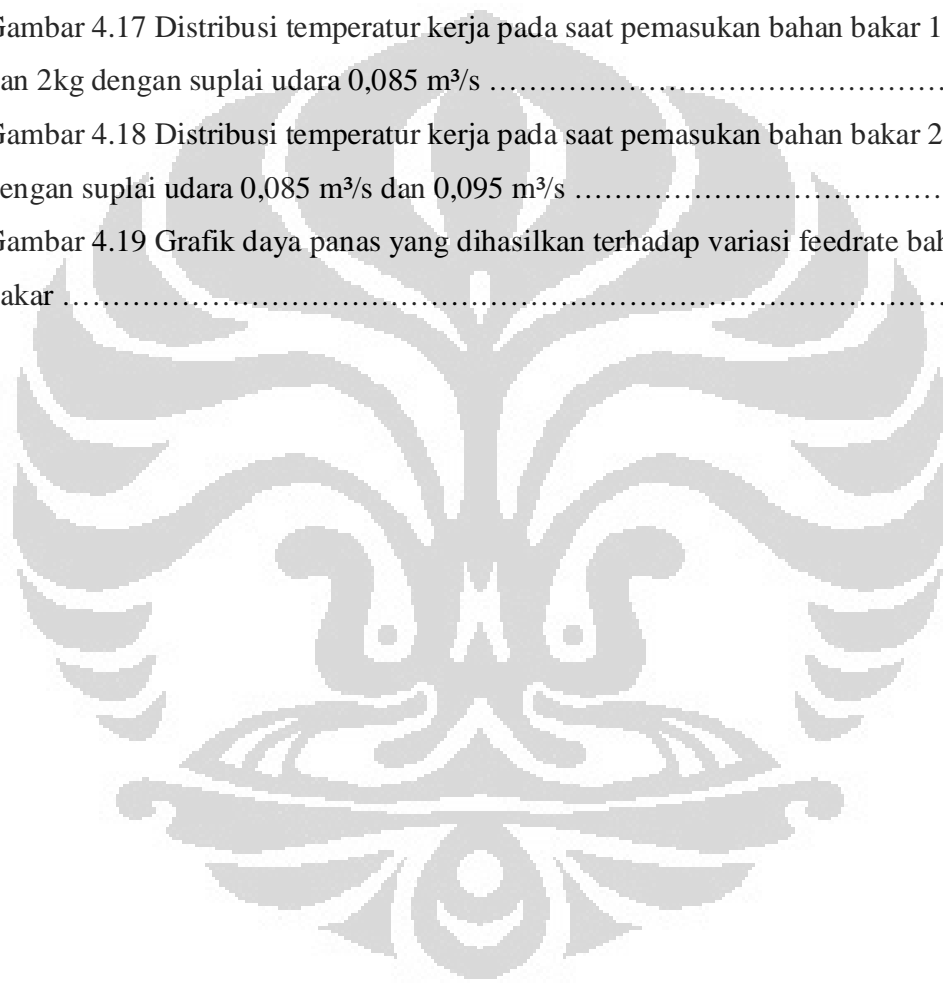


DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Penggunaan Energi Dunia.....	1
Gambar 2.1 Chart Teknologi Konversi Biomassa	9
Gambar 2.2 Direct Combustor	10
Gambar 2.3 Proses Gasifikasi	11
Gambar 2.4 Anaerobic Digester	13
Gambar 2.5 Rangkaian Instalasi Biogas	13
Gambar 2.6 Analisis Proximat untuk Beberapa Jenis Bahan Bakar Padat	16
Gambar 2.7 Definisi Analisis Ultimat dan Proximat	17
Gambar 2.8 Skematis Fluidized Bed Combustor	25
Gambar 2.9 Diagram Proses Pencampuran dalam Fluidized Bed Combustor	26
Gambar 2.10 Tahapan Proses Kerja Fluidized Bed Combustor	29
Gambar 2.11 Ruang Bakar Utama Fluidized Bed Combustor UI	30
Gambar 2.12 Perilaku Gelembung Setiap Jenis Distributor	31
Gambar 2.13 Distributor yang digunakan pada Fluidized Bed Combustor UI	32
Gambar 2.14 Jenis-jenis solid flow control	33
Gambar 2.15 Screw Feeder	34
Gambar 2.16 Burner yang digunakan pada FBC UI	35
Gambar 2.17 Cyclone Separator Fluidized Bed Combustor UI	37
Gambar 2.18 Blower Sentrifugal FBC UI	38
Gambar 2.19 Control Panel	39
Gambar 2.20 Data Logger	39
Gambar 2.21 Skematik Fluidisasi	40
Gambar 2.22 Hubungan Tinggi Hampan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hampan Zat Padat	41
Gambar 2.23 Hubungan Penurunan tekanan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam hampan Zat Padat	42
Gambar 2.24 Diagram Klasifikasi Jenis-jenis Pasir	49
Gambar 2.25 Daerah Batas Fluidisasi	53

Gambar 3.1 Metodologi Penelitian FBC UI	54
Gambar 3.2 Cangkang Kelapa	58
Gambar 3.3 Cangkang Kelapa Partikel Kecil	59
Gambar 3.4 Pasir Silika mesh 40-50 yang digunakan di FBC UI	63
Gambar 3.5 Generator set yang digunakan	64
Gambar 3.6 Konfigurasi Termokopel	65
Gambar 3.7 Temperature Data Logger.....	66
Gambar 3.8 Timbangan dengan skala maksimum 5 kg	66
Gambar 3. 9 Control Panel yang digunakan untuk feeder dan blower	67
Gambar 3.10 Sistem Feeder pada FBC UI	68
Gambar 3.11 Ring blower pada FBC UI	70
Gambar 3.12 bagian hi-temp premixed burner	74
Gambar 3.16 Rangkaian seluruh alat untuk melakukan pengujian pembakaran	76
Gambar 4.1 Grafik pembakaran dengan suplai udara 0,095 m ³ /s	79
Gambar 4.2 Grafik pembakaran dengan suplai udara 0,085 m ³ /s	80
Gambar 4.3 Kondisi kerja FBC UI pada suplai udara 0,095 m ³ /s	81
Gambar 4.4 Grafik Pemanasan dengan suplai udara 0,095 m ³ /s	82
Gambar 4.5 Grafik Pemanasan dengan suplai udara 0,085 m ³ /s	82
Gambar 4.6 Distribusi Temperatur pada saat kondisi pemanasan	83
Gambar 4.7 Kondisi Kerja dengan suplai udara 0,085 m ³ /s.....	84
Gambar 4.8 Kondisi Kerja dengan Suplai udara 0,095 m ³ /s	85
Gambar 4.9 Distribusi temperatur pada saat kondisi kerja	86
Gambar 4.10 Temperatur kerja pada saat pemasukan bahan bakar 1kg dengan suplai udara 0,095 m ³ /s	87
Gambar 4.11 Temperatur Kerja pada saat pemasukan bahan bakar 1,25 kg dengan suplai udara 0,095 m ³ /s.....	88
Gambar 4.12 Temperatur kerja pada saat pemasukan bahan bakar 2kg dengan suplai udara 0,095 m ³ /s	89
Gambar 4.13 Distribusi temperatur kerja pada saat pemasukan bahan bakar 1; 1,5; dan 2kg dengan suplai udara 0,095 m ³ /s	90

Gambar 4.14 Temperatur kerja pada saat pemasukan bahan bakar 1,5 kg dengan suplai udara 0,085 m ³ /s	91
Gambar 4.15 Temperatur kerja pada saat pemasukan bahan bakar 1,75 kg dengan suplai udara 0,085 m ³ /s	92
Gambar 4.16 Temperatur kerja pada saat pemasukan bahan bakar 2kg dengan suplai udara 0,085 m ³ /s	93
Gambar 4.17 Distribusi temperatur kerja pada saat pemasukan bahan bakar 1,5; 1,75 dan 2kg dengan suplai udara 0,085 m ³ /s	94
Gambar 4.18 Distribusi temperatur kerja pada saat pemasukan bahan bakar 2kg dengan suplai udara 0,085 m ³ /s dan 0,095 m ³ /s	95
Gambar 4.19 Grafik daya panas yang dihasilkan terhadap variasi feedrate bahan bakar	96



DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Energi Fosil di Indonesia	2
Tabel 1.2 Potensi Energi Terbarukan Indonesia	3
Tabel 2.1 Ultimate Analysis Beberapa Jenis Biomassa	17
Tabel 2.2 Proximate Analysis Beberapa Jenis Biomassa	18
Tabel 2.3 Nilai LHV Beberapa Jenis Biomassa	18
Tabel 2.4 Jenis-jenis Bahan Bakar	21
Tabel 2.5 Increasing Size and Density	52
Tabel 3.1 Potensi Biomassa di Indonesia	58
Tabel 3.2 Specific Heat Berbagai Substansi	60
Tabel 3.3 Sifat fisik, termal dan mekanik pasir silika	61
Tabel 3.4 Distribusi ukuran pengayakan pasir silika	62
Tabel 3.5 Spesifikasi motor feeder	68
Tabel 3.6 Spesifikasi teknis ring blower	70
Tabel 3.7 Spesifikasi teknis hi temp premixed burner	74
Tabel 4.1 Temperatur Pemanasan dengan suplai udara 0,085 dan 0,095 m ³ /s	83
Tabel 4.2 Temperatur Kondisi kerja dengan suplai udara 0,085 dan 0,095 m ³ /s.....	85
Tabel 4.3 Temperatur rata-rata pembakaran bahan bakar 1kg pada 0,095 m ³ /s	88
Tabel 4.4 Temperatur pembakaran bahan bakar 1,25kg pada 0,095 m ³ /s.....	88
Tabel 4.5 Temperatur pembakaran bahan bakar 2kg pada 0,095 m ³ /s	89
Tabel 4.6 Temperatur pembakaran bahan bakar 1,5 kg pada 0,085 m ³ /s	91
Tabel 4.7 Temperatur Pembakaran Bahan Bakar 1,75 kg pada 0,085 m ³ /s	92
Tabel 4.8 Temperatur pembakaran bahan bakar 2kg pada 0,085 m ³ /s	93
Tabel 4.9 daya panas berbanding feed rate	96

BAB I

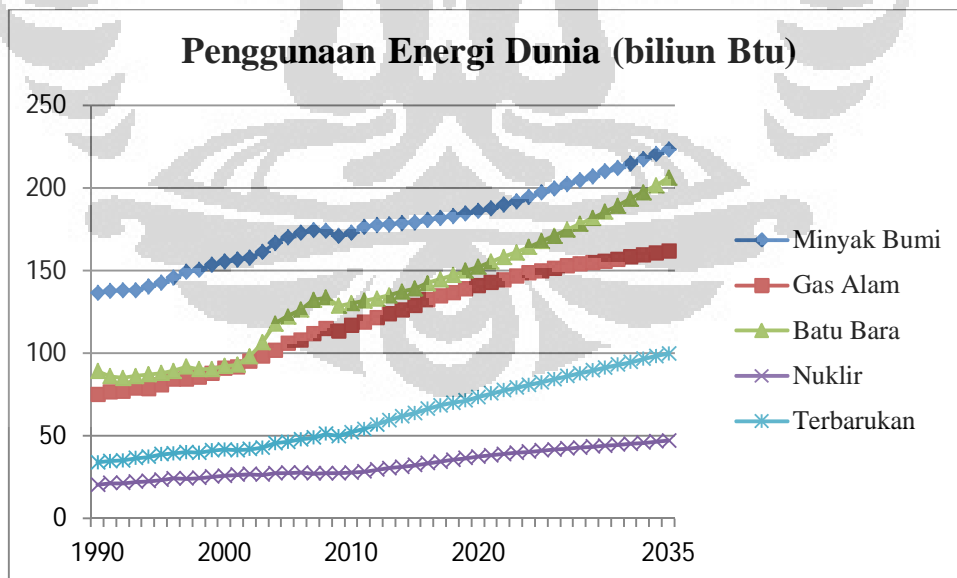
PENDAHULUAN

1.1 Judul Penelitian

Analisa variasi penggunaan suplai udara pada fluidized bed combustor Universitas Indonesia

1.2 Latar Belakang Masalah

Energi merupakan kebutuhan yang sangat penting dan harus dipenuhi dalam kehidupan manusia. Keberlangsungan kegiatan sehari-hari manusia, tidak dapat lepas dari kebutuhannya akan energi. Mulai dari kegiatan membaca yang membutuhkan penerangan lampu hingga kegiatan manufaktur yang membutuhkan pergerakan ribuan komponen pada satu waktu, semuanya membutuhkan energi yang akumulasinya sangat besar. Oleh karena itu energi memegang peran penting dalam kehidupan sosial dan ekonomi. Sayangnya, ketersediaan suatu energi tidak selalu melimpah setiap saat dan waktu. Saat ini, umat manusia paling banyak menggunakan energi fosil sebagai sumber utama cadangan energi.



Gambar 1.1 Penggunaan Energi Dunia

Sumber : International Energy Outlook 2010 Highlights, U.S Energy Information Administration (<http://www.eia.gov/oiaf/ieo/highlights.html>)

Sesuai dengan data yang dipaparkan oleh Administrasi Informasi Energi Amerika Serikat pada artikelnya yang bertajuk *International Energy Outlook 2010*, saat ini penggunaan bahan bakar fosil dengan bentuk cair 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.

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

Tabel 1.1 Energi Fosil di Indonesia

Energi Fosil	Sumber Daya	Cadangan	Produksi tahun	Rasio* $\frac{\text{Cadangan}}{\text{Produksi}}$
Minyak bumi	56,6 Milyar Barel	8,4 Milyar Barel **	348 Juta Barel	24 tahun
Gas bumi	334,5 TSCF	165 TSCF	2,79 TSCF	59 tahun
Batubara	90,5 Milyar Ton	18,7 MilyarTon	201 Juta Ton	93 tahun
CBM (Gas)	453 TSCF	-	-	-

* Tidak ada temuan cadangan baru;

** Termasuk blok Cepu

Sumber: Presentasi Menteri ESDM, 11 April 2008
(http://www.wwf.or.id/about_wwf/whatwedo/climate/oursolution/mitigation22/renewable_energy.cfm)

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

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

Tabel 1.2 Potensi energi terbarukan Indonesia

Energi Non Fosil	Sumber Daya	Setara	Kapasitas Terpasang
Tenaga Air	845 Juta SBM	75,67 GW	4,2000 GW
Panas Bumi	219 Juta SBM	27,00 GW	1,0400 GW
Mini/Mikro Hidro	0,45 GW	0,450 GW	0,0840 GW

Biomassa	49,81 GW	49,81 GW	0,3000 GW
Tenaga Surya	-	4,80 kWh/m ² /day	0,0080 GW
Tenaga Angin	9,29 GW	9,290 GW	0,0005 GW

Sumber: Presentasi Menteri ESDM, 11 April 2008
(http://www.wwf.or.id/about_wwf/whatwedo/climate/oursolution/mitigation222/renewable_energy.cfm)

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

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

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

1.3 Pokok Permasalahan

Fluidized bed combustion merupakan teknologi yang masih dapat dikembangkan secara maksimal di berbagai aspek. Pada alat FBC Universitas Indonesia, pemanasan pasir awal menggunakan burner membutuhkan waktu yang cukup lama. Hal ini disebabkan oleh jauhnya jarak antara burner dan pasir. Oleh karena itu, dilakukan modifikasi terhadap alat ini. Modifikasi yang dilakukan adalah penyempurnaan desain distributor menjadi lebih tinggi, sehingga dapat menaikkan tinggi pasir sehingga semakin dekat dengan burner.

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

1.4 Tujuan Penulisan

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

1.5 Batasan Masalah

Pembatasan masalah pada penelitian ini yaitu:

- a. Variasi suplai udara yang digunakan adalah $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ dan $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$.
- b. Analisa mengenai perbedaan temperatur kerja pada saat pemanasan menuju kondisi kerja *self sustaining combustion* pada suplai udara yang berbeda.
- c. Analisa mengenai perbedaan temperatur kerja pada saat kondisi kerja *self sustaining combustion* di masing-masing percobaan dengan suplai udara yang berbeda.

- d. Analisa pembakaran cangkang kelapa pada kondisi kerja *self sustaining combustion* di masing-masing percobaan dengan suplai udara yang berbeda.

1.6 Metodologi Penelitian

Uji pembakaran dengan bahan bakar cangkang kelapa

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

1.7 Sistematika Penulisan

Penulisan skripsi ini akan dibagi menjadi enam bab, yaitu :

Bab I Pendahuluan

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

Bab II Landasan Teori

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

Bab III Persiapan dan Prosedur Pengujian

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

Bab IV Hasil & Analisa

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

Bab V Kesimpulan & Saran

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

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 Energi Biomassa

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

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

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

2.1.1 Jenis-Jenis Biomassa

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

2.1.1.1 Solid Biomassa

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

a) Temperate Regions (wilayah beriklim sedang)

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

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

Menghasilkan sedikit vegetasi untuk sumber energi.

c) Humid Tropical Regions (wilayah beriklim lembab)

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

2.1.1.2 Biogas

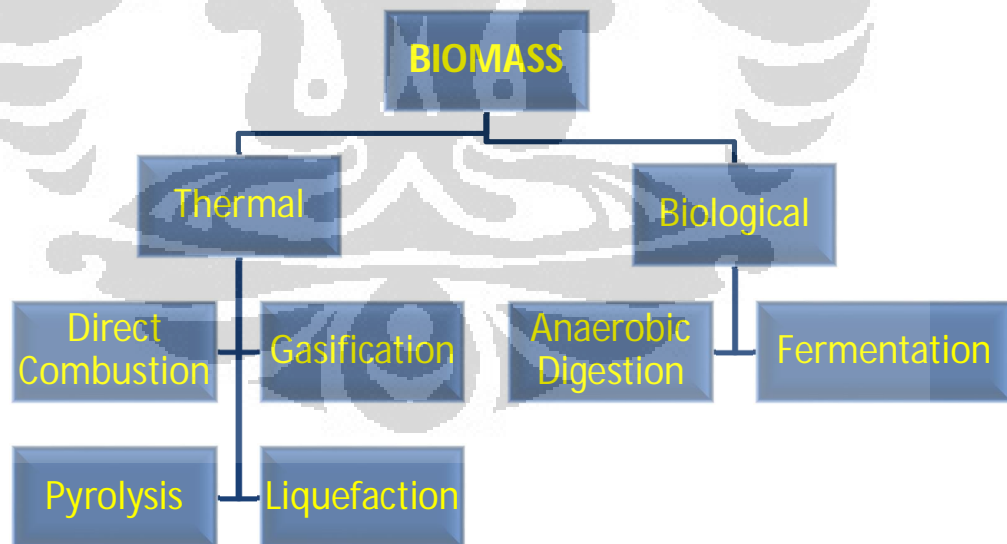
Biogas berasal dari material organik yang telah melewati proses fermentasi atau anaerob digesting oleh bakteri pada koindisi udara kekurangan oksigen yang kemudian menghasilkan gas yang dapat terbakar (combustible gas).

2.1.1.3 Liquid Biofuel

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

2.1.2 Teknologi Pengkonversian Energi Biomassa

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



Gambar 2.1 Chart Teknologi Konversi Biomassa

2.1.2.1 Proses Thermal

Ada 3 proses pemanasan dalam menghasilkan energi biomassa, yaitu:

1. *Direct Combustor*

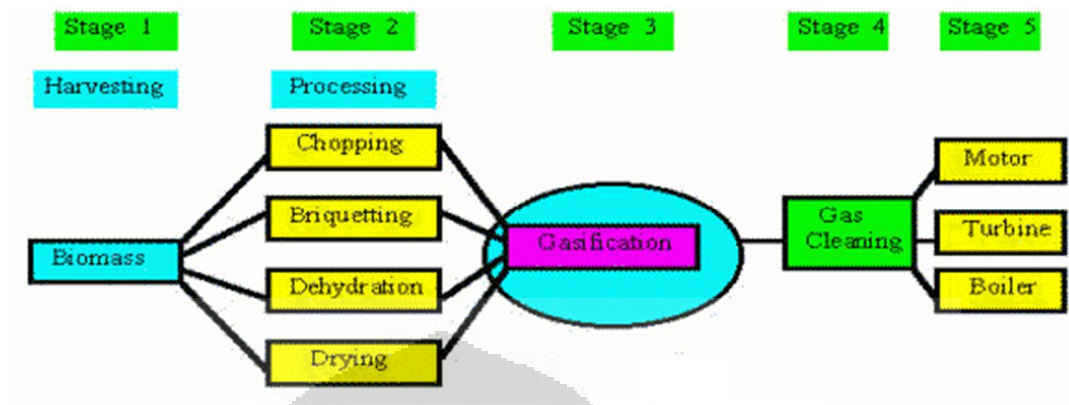
Pada proses ini material organik (biomassa) dilakukan pembakaran secara langsung. Agar efisiensi pembakaran baik, dilakukan pengeringan (drying) untuk menghilangkan kadar air pada material organik. Salah satu aplikasi dari direct combustor adalah kompor masak yang menggunakan kayu bakar.



Gambar 2.2 *Direct Combustor*

2. *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 $\frac{1}{3}$ dari jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk pembakaran penuh. Pembakaran dengan keadaan kekurangan oksigen inilah yang disebut dengan *pyrolysis*. Proses ini menghasilkan gas yang dapat terbakar seperti H_2 , CH_4 , CO , N_2 , dan gas-gas lain yang tak dapat terbakar.



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

Secara umum ada 3 sesi proses gasifikasi biomassa:

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

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

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

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

3. Pyrolysis

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

Produk dari *Pyrolysis* tergantung dari temperatur, tekanan, dan lain lain. Pada suhu 200°C , air akan terpisah dan dibuang, *Pyrolysis* sesungguhnya terjadi pada suhu antara 280 sampai 500°C , *Pyrolysis* menghasilkan banyak karbon dioksida, tar, dan sedikit metil alkohol. Antara 500 sampai 700°C produksi gas mengandung hidrogen. Secara umum *Pyrolysis* menghasilkan $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5 = 5\text{CO} + 5\text{H}_2 + \text{C}$.

4. *Liquefaction*

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

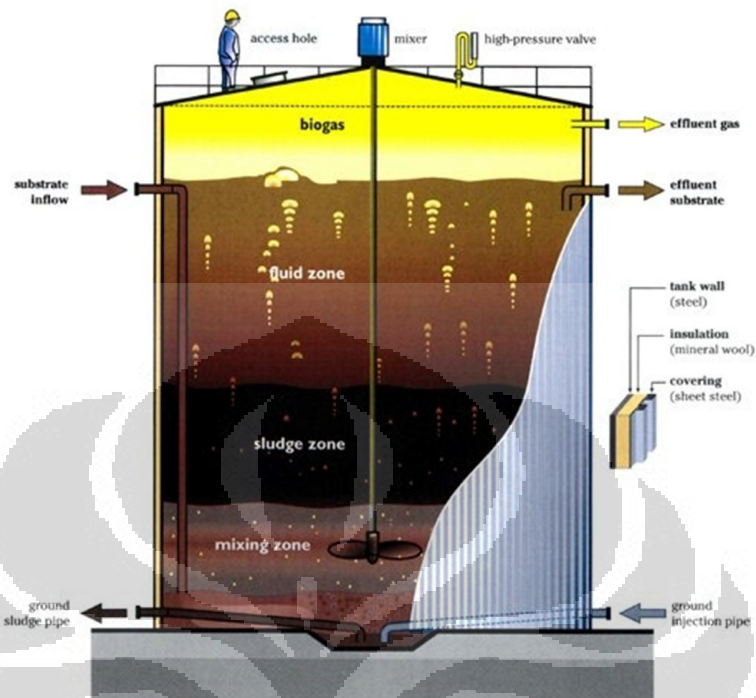
2.1.2.2 Proses Biologis

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

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

1. *Anaerobic Digestion*

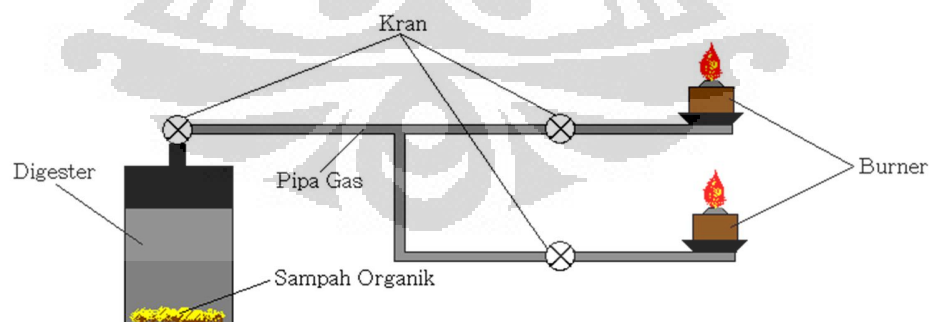
Proses ini adalah proses yang mengikutsertakan mikroorganisme untuk menguraikan material dengan kondisi tanpa oksigen. Proses ini dapat digunakan pada sampah organik dan juga kotoran hewan. *Anaerobic digestion* merupakan proses yang kompleks. Pertama-tama, mikro organisme mengubah material organik kedalam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



Gambar 2.4 *Anaerobic Digester*

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

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



Gambar 2.5 Rangkaian Instalasi Biogas

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

1. *Hydrolysis*

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

2. *Fermentasi*

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

3. *Acetogenesis*

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

4. *Methanogenesis*

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

2. Fermentasi

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

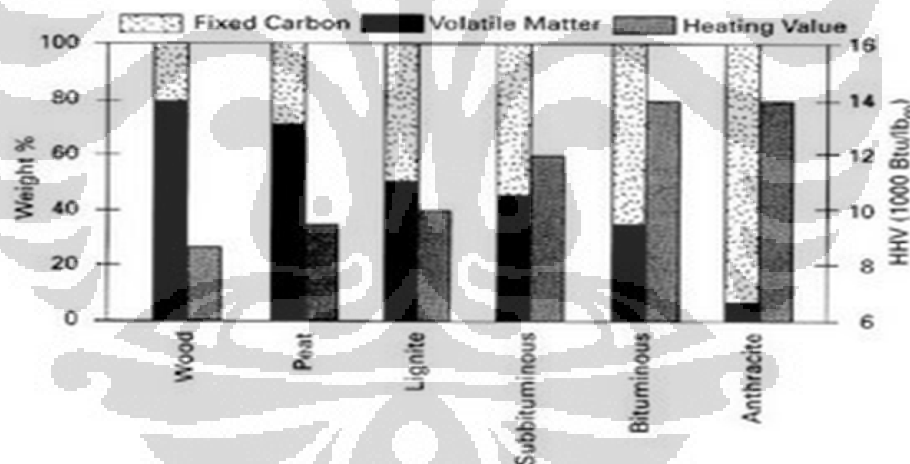
2.2 Karakteristik Biomassa

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) biomassa (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.

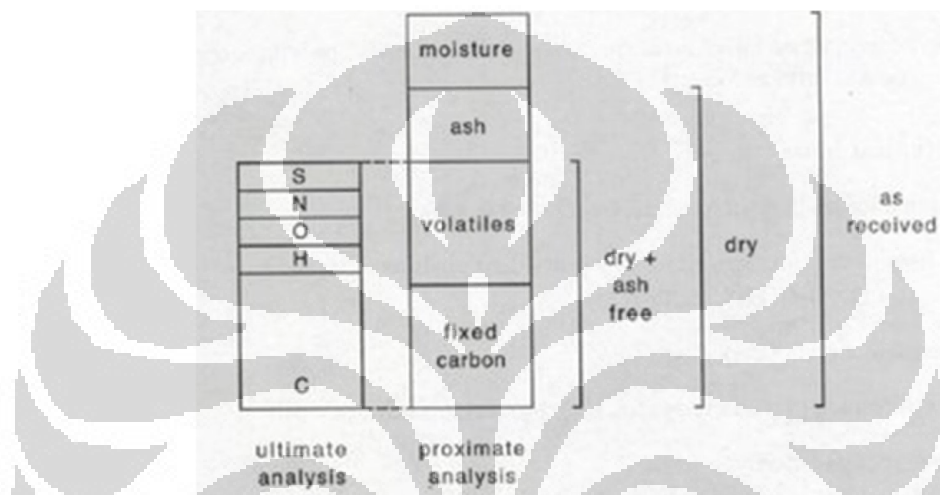
Biomassa mempunyai kadar *volatile* yang tinggi (sekitar 60-80%) dibanding kadar *volatile* pada batubara, maka biomas lebih reaktif dibanding batubara. Perbandingan bahan bakar (FR) dinyatakan sebagai perbandingan kadar karbon dengan kadar volatil. Untuk batubara, FR $\sim 1 - 10$. Untuk gambut, FR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



Gambar 2.6 Analisis Proximat untuk Beberapa Jenis Bahan Bakar Padat.

Pada analisis *proximate* biomassa juga mengandung abu dan air (lihat Gambar di bawah). Massa biomassa awal umumnya diistilahkan sebagai *as received* (mengandung air, abu, volatil, dan karbon). Kadar abu dari biomassa berkisar dari 1% sampai 12% untuk kebanyakan jerami-jeramian 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 Anaysis* 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)

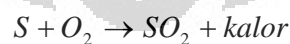
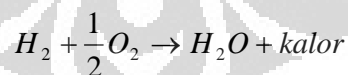
<i>Solid Waste</i>	<i>Moisture</i>	<i>Volatile</i>	<i>Fixed Carbon</i>	<i>Non Comb.</i>
Daun	9.97	66.92	19.29	3.82
Cangkang Kelapa	7,8	80,8	18,8	0,4
Ranting Pohon	20	67.89	11.31	0.8
Kertas	10.24	75.94	8.44	5.38

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

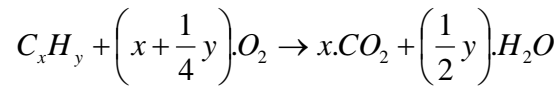
Pembakaran adalah sebuah reaksi antara oksigen dan bahan bakar yang menghasilkan panas. Oksigen diambil dari udara yang berkomposisi 21 % oksigen serta 79 % nitrogen (persentase volume), atau 77 % oksigen serta 23 % nitrogen (persentase massa). Unsur terbanyak yang terkandung dalam bahan bakar adalah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



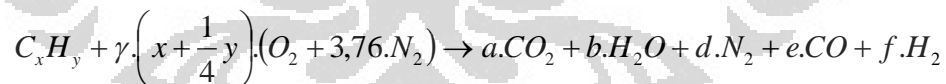
Nilai dari x dan y di atas bergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan. Nilai x adalah fraksi massa untuk kandungan *Carbon*, dan y fraksi massa untuk kandungan *Hydrogen* dalam bahan bakar.

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.



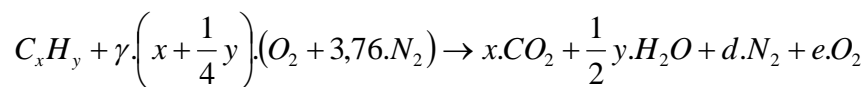
Namun, ada kalanya juga proses pembakaran tidak terjadi pada komposisi ideal antara bahan bakar dengan udara. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, proses yang tidak pada kondisi ideal ini bisa terbagi menjadi dua, yaitu pembakaran kaya dan pembakaran miskin.

- 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.

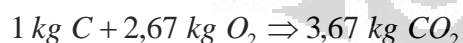
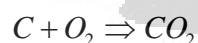
Tabel 2.4 Jenis-Jenis Bahan Bakar

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

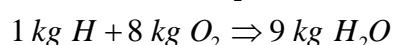
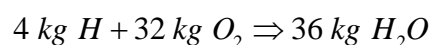
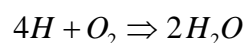
2. Zat yang membakar

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

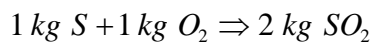
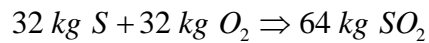
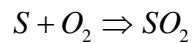
- Karbon terbakar sempurna akan membentuk CO_2 menurut persamaan :



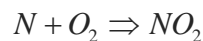
- Hidrogen terbakar sempurna akan membentuk H_2O menurut persamaan :



- Belerang terbakar akan membentuk SO_2 menurut persamaan :



- Nitrogen terbakar membentuk NO_2 menurut persamaan :



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

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

Kebutuhan udara dalam proses pembakaran dapat diklasifikasikan menjadi sebagai berikut :

- Udara primer

Udara yang bercampur dengan bahan bakar dalam ruang bakar.

- Udara sekunder

Udara yang masuk dari sekeliling ruang bakar.

- Udara tersier

Udara yang menembus celah pada ruang bakar.

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

Nilai *excess air* ini dapat ditulis sebagai berikut :

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

keterangan : $m = excess\ air$

$A_o =$ jumlah udara teorits

$A =$ jumlah udara aktual

3. Zat yang dihasilkan dari pembakaran

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

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

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

2.4 Fluidized Bed Combustor

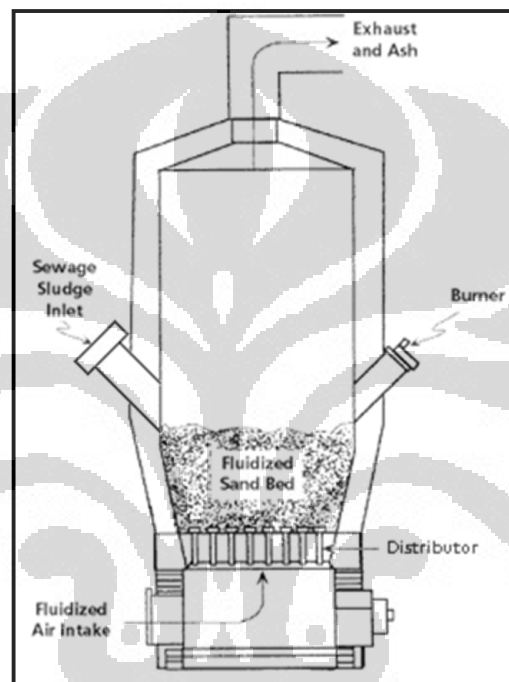
Fluidized bed combustor adalah sebuah tungku pembakar yang menggunakan media pengaduk berupa pasir seperti pasir kuarsa dan silika, tujuannya agar terjadi pencampuran (*mixing*) yang homogen antara udara dengan butiran-butiran pasir tersebut. *Mixing* yang konstan antara partikel-partikel mendorong terjadinya 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*.

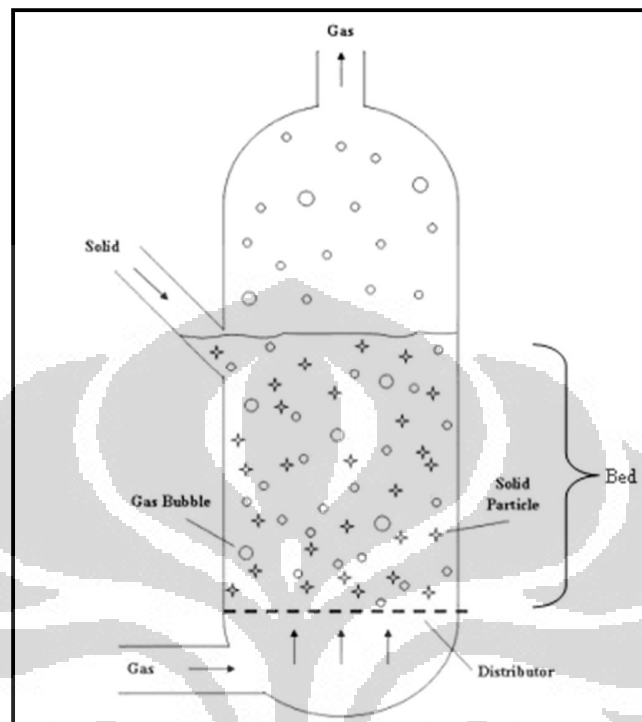
Pembakaran dengan teknologi *fluidized bed* merupakan satu rancangan alternatif untuk pembakaran limbah padat. Teknologi ini telah diaplikasikan untuk berbagai macam bahan bakar padat seperti biofuel, batu bara, serta limbah, baik itu limbah organik maupun anorganik. Bahan bakar padat yang sudah dalam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



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

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

2.4.1 Jenis-Jenis *Fluidized Bed Combustor*

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

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

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

2.4.2 Pinsip Kerja *Fluidized Bed Combustor*

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

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

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

1. Kondisi awal

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

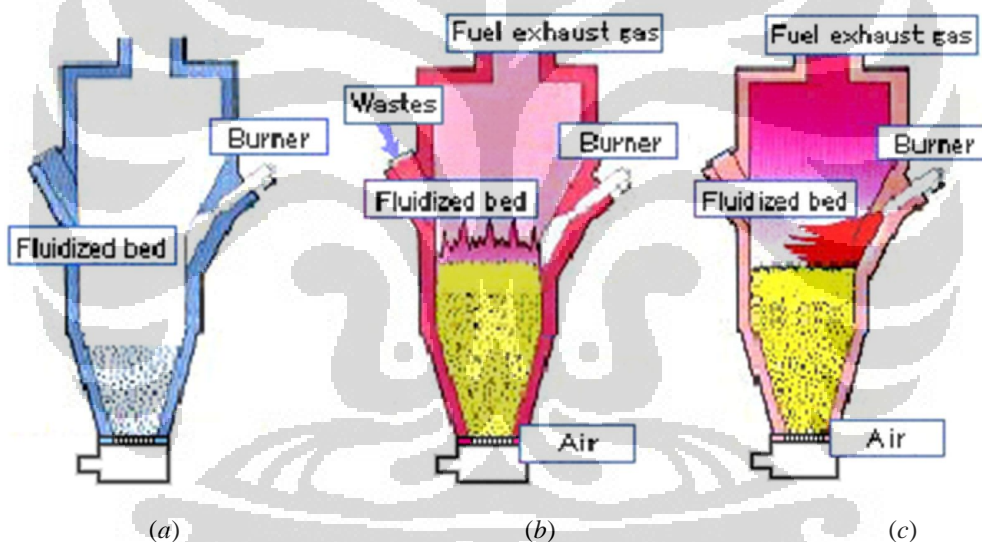
2. Proses pemanasan

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.



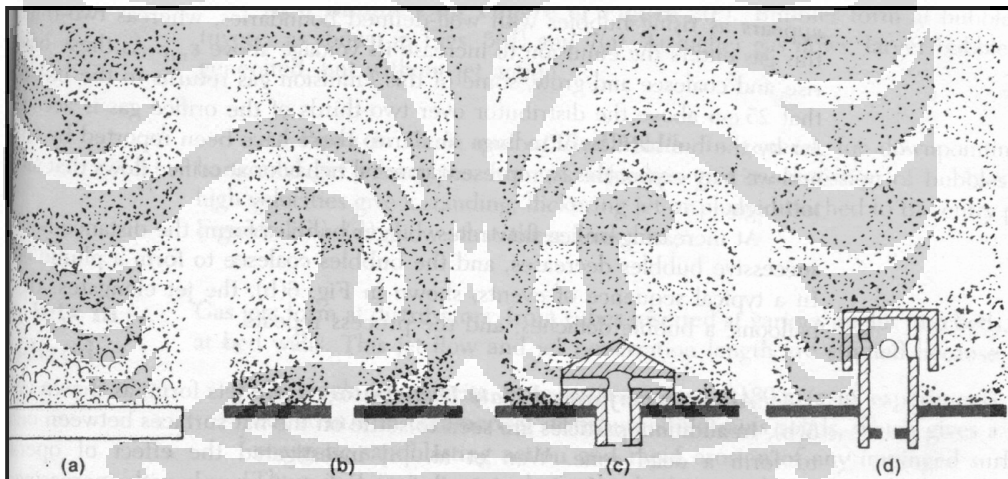
Gambar 2.11 Ruang Bakar Utama *Fluidized Bed Combustor* UI

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

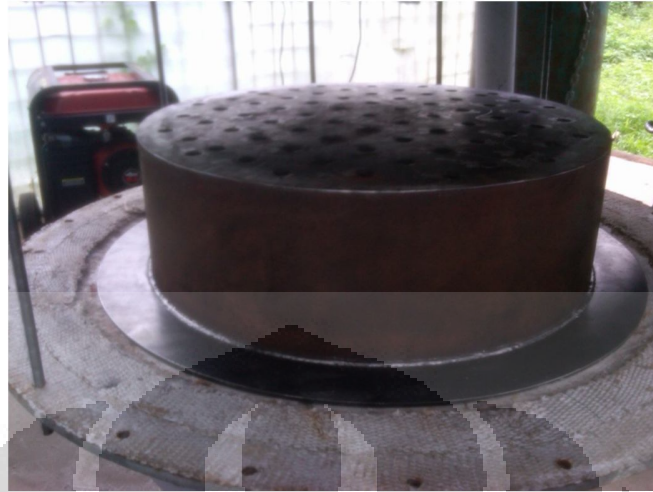
membantu dalam proses pirolisa terhadap bahan bakar padat, dan juga dapat membantu peningkatan stabilitas termal di dalam ruang bakar.

2. Distributor

Distributor digunakan untuk 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*.



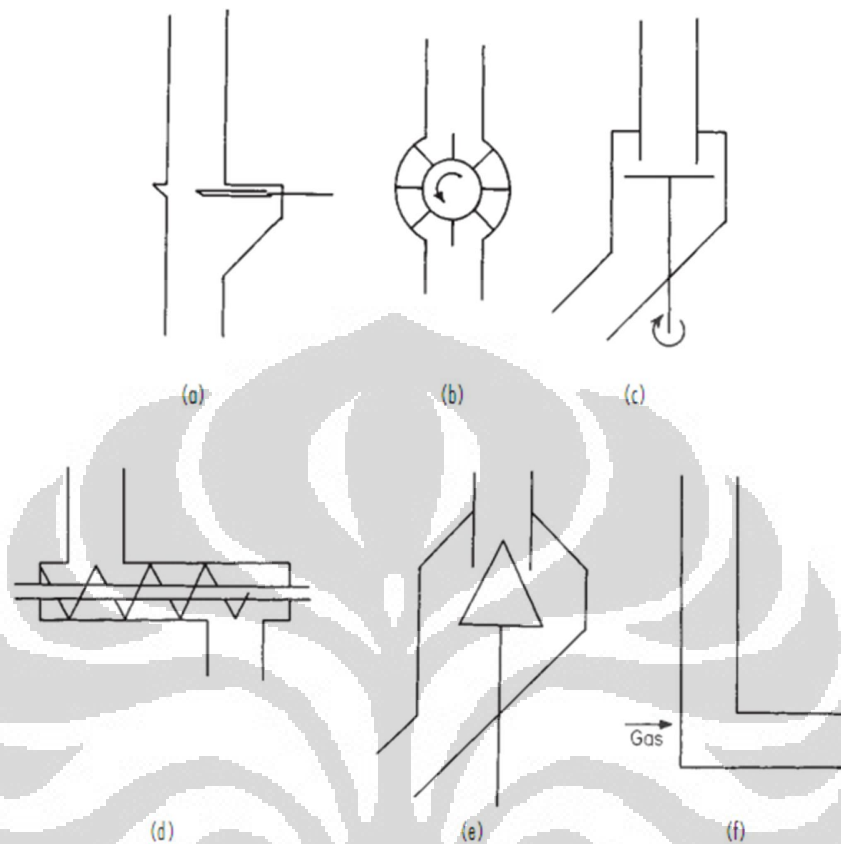
Gambar 2.13 Distributor yang Digunakan pada *Fluidized Bed Combustor* UI

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.

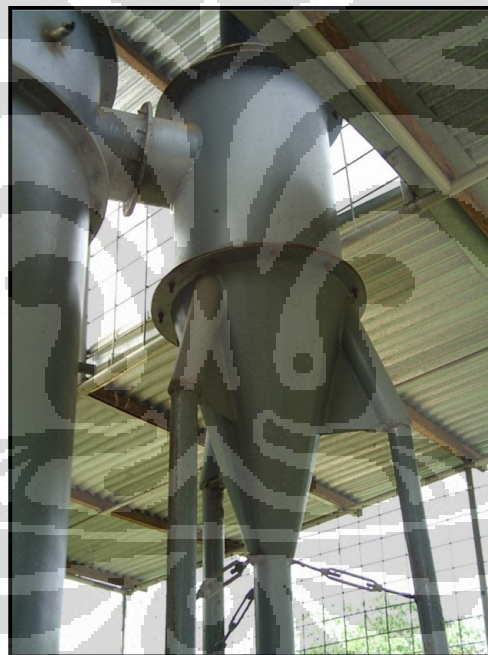
Untuk tujuan fluidisasi yang baik, sebaiknya menggunakan pasir silika atau pasir kuarsa dengan ukuran diameter $400 - 600 \mu m$. Pasir jenis ini diklasifikasikan diantara grup B. Pasir kuarsa dan pasir silika tidak jauh berbeda kandungannya, keduanya sama-sama memiliki kandungan SiO_2 . Kedua pasir 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. *Data logger*
Berfungsi membaca temperatur yang disensing oleh termokopel dan menampilkannya secara digital.

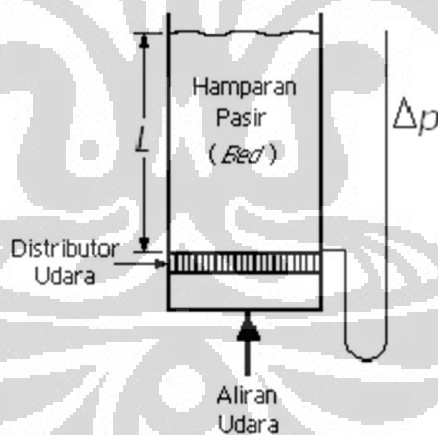


Gambar 2.20 Data Logger

2.5 Fenomena Fluidisasi

2.5.1 Proses Fluidisasi

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



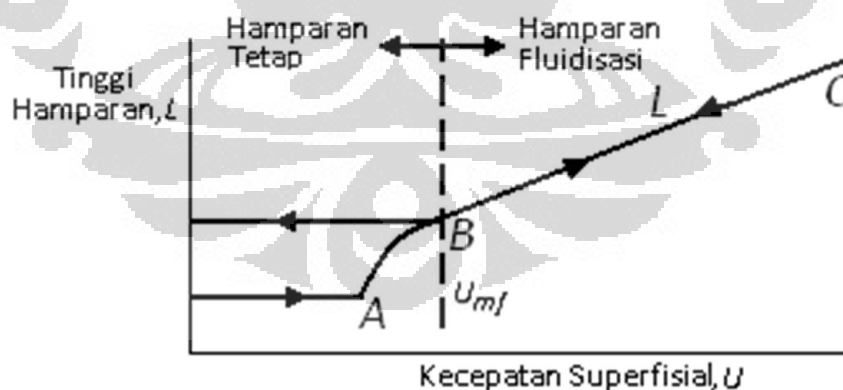
Gambar 2.21 Skematik Fluidisasi

2.5.2 Kondisi Fluidisasi

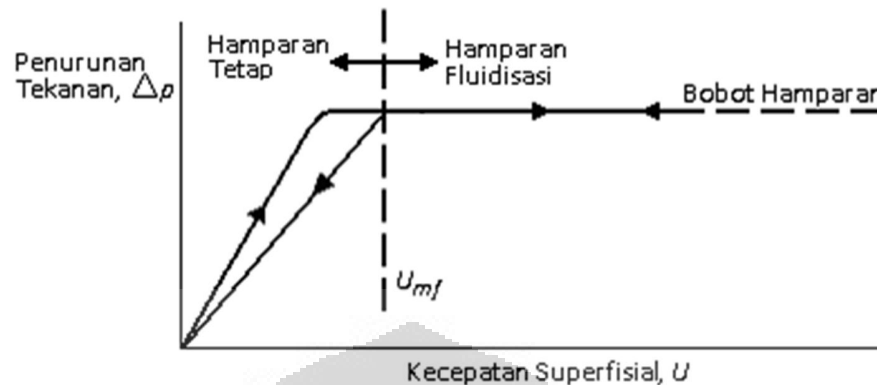
Perhatikan suatu tabung vertikal yang sebagian berisi dengan bahan butiran, sebagaimana terlihat dalam skema gambar. Tabung itu turbulen pada bagian atas, dan mempunyai plat berpori pada bagian bawah untuk menopang pasir di atasnya serta

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

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



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



Gambar 2.23 Hubungan Penurunan Tekanan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam 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 hampan 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 hampan. Seiring dengan bertambahnya kecepatan fluida dan penurunan tekanan, maka hampan 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 hampan akan meningkat pula. Ekspansi dari hampan 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*)

Hampan 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 hampan dalam bentuk gelembung atau rongga-rongga kosong yang tidak berisikan zat padat, dan hanya sebagian kecil gas itu mengalir dalam saluran-saluran yang terbentuk di antara partikel. Partikel itu bergerak tanpa aturan dan didukung oleh fluida, tetapi dalam ruang-ruang di antara gelembung fraksi kosong kira-kira sama dengan pada kondisi awal fluidisasi. Gelembung yang terbentuk berperilaku hampir seperti gelembung udara di dalam air atau gelembung uap di dalam zat cair yang mendidih, dan karena itu fluida jenis ini kadang-kadang dinamai dengan istilah "hampan didih" (*boiling bed*).

Perilaku hampan fluidisasi gelembung sangat bergantung pada banyaknya dan besarnya gelembung gas dan ini tidak mudah meramalkannya. Ukuran rata-rata gelembung itu bergantung pada jenis dan ukuran partikel, jenis plat distributor, kecepatan superfisial, dan tebalnya hampan. Gelembung-gelembung cenderung bersatu, dan menjadi besar pada waktu naik melalui hampan fluidisasi (*fluidized*

bed) itu dan ukuran maksimum gelembung stabil berkisar antara beberapa inci sampai beberapa kaki diameternya

2.5.4 Parameter-Parameter Fluidisasi

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

2.5.4.1 Ukuran partikel

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

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

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

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

2.5.4.2 Massa jenis padatan

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

2.5.4.3 Sphericity

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

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

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

2.5.4.4 Bed voidage

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

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

2.5.4.5 Kecepatan fluidisasi minimum

Bila gas dilewatkan melalui lapisan hamparan partikel padat pasir pada kecepatan rendah, partikel-partikel itu tidak bergerak. Jika kecepatan fluida berangsur-angsur dinaikkan, partikel-partikel pasir itu akhirnya akan mulai bergerak dan melayang di dalam fluida, dan gesekan (*friction*) menyebabkan terjadinya penurunan tekanan (*pressure drop*). Ketika kecepatan gas dinaikkan, penurunan tekanan meningkat sampai besar penurunan tekanan tersebut sama dengan berat hamparannya dibagi dengan luas penampangnya. Kecepatan gas ini disebut kecepatan fluidisasi minimum, U_{mf} . Kecepatan fluidisasi minimum adalah kecepatan 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 superficial 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*.

Orrifice 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 :

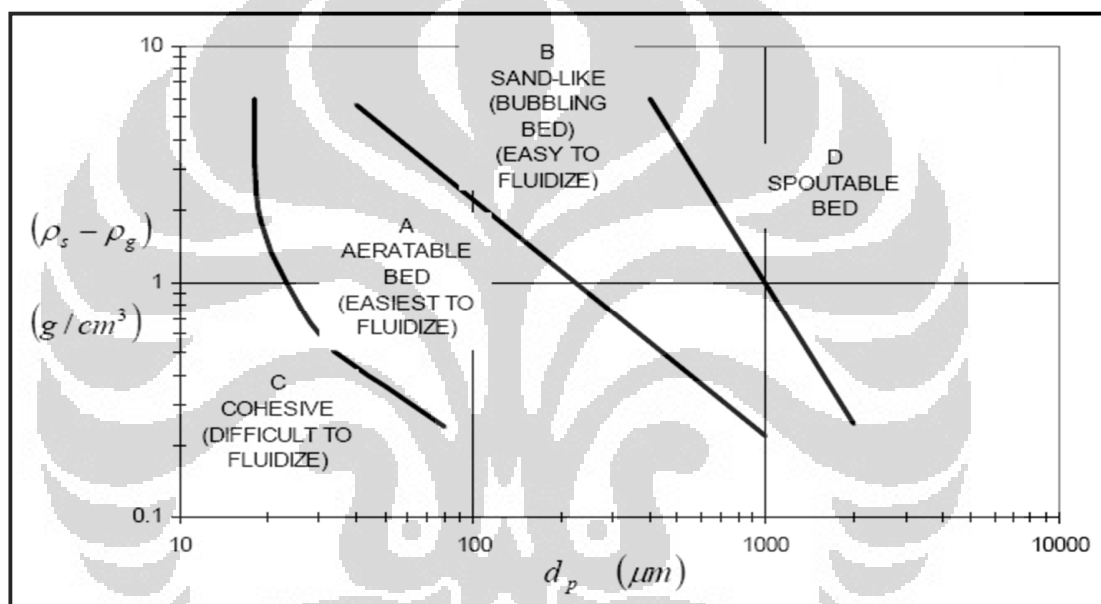
- ΔP_d = penurunan tekanan melewati distributor (N/m^2)
- U_o = kecepatan udara superfisial (m/s)
- U_{or} = kecepatan udara rata-rata melewati orifis (m/s)
- f_{or} = *fractional open area* (m^2)
- ρ_f = massa jenis fluida udara (kg/m^3)
- C_D = *Orrifice discharge coefficient*
- t = tebal plat distributor (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 mengategorikan klasifikasi ini dengan cara membuat plot grafik diameter partikel pasir terhadap selisih antara massa jenis partikel pasir dengan massa jenis udara. Diagram klasifikasi jenis-jenis pasir yang dikelompokkan oleh Geldart dapat dilihat pada gambar.



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

Klasifikasi jenis-jenis pasir menurut Geldart, yaitu :

a) *Group A*

Pasir yang dikategorikan dalam *group A* menurut Geldart biasanya memiliki massa jenis kurang dari 1400 kg/m^3 dan memiliki ukuran berkisar antara 20 sampai $100 \mu\text{m}$. 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 μm 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 ($<30 \mu m$) dan atau massa jenis yang lebih kecil juga sehingga gaya-gaya antar partikel mempunyai pengaruh yang lebih besar daripada gaya gravitasi. Pasir jenis ini sangat sulit untuk terfluidisasi. Hal ini dikarenakan besar penurunan tekanan sama dengan berat per unit luas. Hal ini menunjukkan bahwa peranan dari berat, bahkan jika hamparan menunjukkan sifat-sifat tampaknya seperti fluida, disokong oleh gaya antar partikel dan persinggungan permukaan

partikel. Pada pasir jenis ini, *channelling* sangat mudah terjadi. Sekali hal ini terjadi, maka cenderung memperbesar jalurnya ketika meningkatkan kecepatan udara sehingga udara tidak terdistribusi dengan baik yang mana tidak pernah terjadi benar-benar fluidisasi.

d) *Group D*

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

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

B, *C*, dan *D*) ketika kecepatan gas dinaikkan lagi, densitas hamparan akan berkurang dan turbulensi meningkat.

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

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

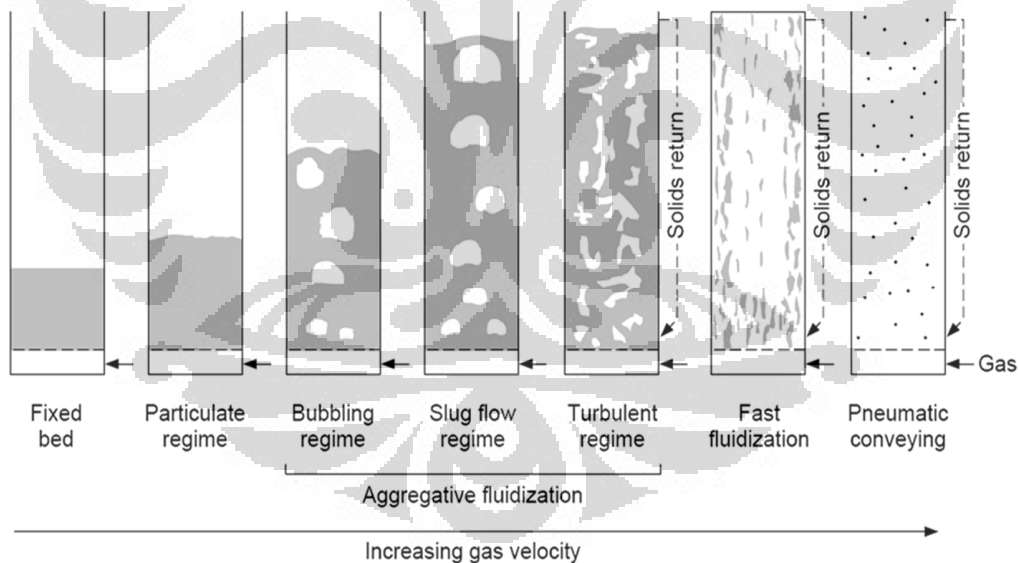
Group	C	A	B	D	
Most obvious characteristic	Cohesive, difficult to fluidize	Bubble-free range of fluidization	Starts bubbling at U_{mf}	Coarse solids	
Typical solids	Flour, cement	Cracking catalyst	Building sand, table salt	Crushed limestone coffee beans	
Property					
1. Bed expansion	Low when bed channel,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

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

^b At equal d_p .

2.5.4.9 Daerah batas fluidisasi (*fluidization regimes*)

Pada kecepatan gas rendah, suatu padatan dalam tabung hampan fluidisasi akan berada dalam keadaan konstan atau tetap. Seiring dengan bertambahnya kecepatan gas, gaya seret mengimbangi berat hamparannya sehingga hampan secara menyeluruh ditopang oleh aliran gas tersebut. Pada fluidisasi minimum, hampan memperlihatkan pergerakan yang minimal dan akan sedikit mengembang. Kemudian hampan akan mengembang saat kecepatan aliran gas dinaikkan dan mengalami daerah batas fluidisasi dari *fixed bed* sampai dengan *pneumatic conveying*. Bila kecepatan aliran gas melewati batas fluidisasi turbulen, maka pengembalian kembali partikel (*solids return*) perlu untuk digunakan untuk mempertahankan hampan karena kecepatan gas berada di atas kecepatan terminal dari beberapa atau bahkan semua partikel. Cara setiap daerah batas fluidisasi tampil berbeda-beda menurut kecepatan aliran gas (gambar 2.25).

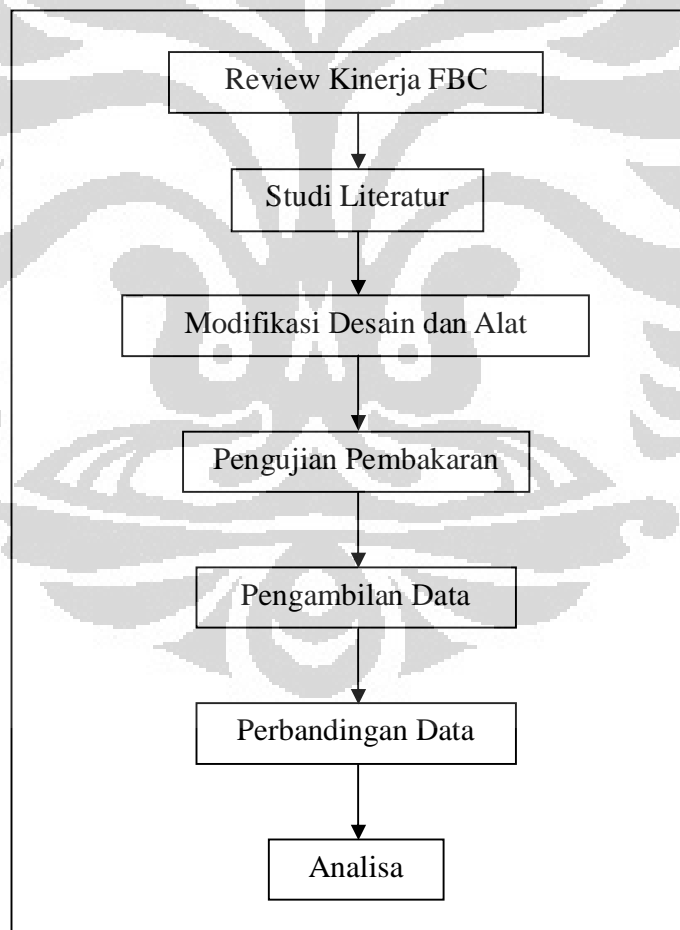


Gambar 2.25 Daerah batas fluidisasi (sumber: Grace, 1986)

BAB 3 METODOLOGI & PERSIAPAN PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian erat kaitannya dengan alat, prosedur, serta desain penelitian yang dipergunakan dalam melaksanakan penelitian. Tahapan penelitian ini mengalir sesuai dengan alur yang logis. Tujuannya adalah memberikan petunjuk yang jelas, teratur dan sistematis. Susunan tahapan ini sangat memengaruhi mutu dan hasil penelitian. Tahapan pada penelitian ini disajikan dalam bentuk diagram agar lebih mudah dipahami.



Gambar 3.1 Metodologi Penelitian FBC UI

3.1.1 Review Kinerja FBC

Pada awal penelitian, kinerja fbc versi paling mutakhir (Februari 2011) dievaluasi. Peninjauan ulang kinerja ini termasuk memerhatikan fenomena fluidisasi dengan pasir mesh 30 yang digunakan, serta letak distributor yang relatif jauh dari burner.

3.1.2 Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan adalah melalui skripsi-skripsi yang pernah ditulis sebelumnya mengenai proyek fluidized bed combustor ini. Selain itu, dilakukan pula pendalaman materi melalui referensi-referensi buku teks.

3.1.3 Modifikasi Desain dan Alat

Setelah melakukan tinjauan ulang dan studi literatur, dilakukan beberapa modifikasi dan pergantian alat. Pasir dengan mesh 30 dirubah menjadi pasir dengan partikel lebih kecil yaitu dengan ukuran mesh 40-50. Hal ini dilakukan melihat fluidisasi yang lebih baik dengan pasir dengan partikel lebih kecil. Selain itu juga dilakukan pergantian desain distributor pada fbc. Desain distributor yang baru memiliki diameter lubang yang sama, namun ditinggikan, sehingga hamparan pasir bisa menjadi lebih dekat dengan burner sehingga diharapkan pemanasan awal dapat dicapai dengan lebih cepat. Pada penelitian ini, percobaan lebih fokus pada pengaruh suplai udara,

3.1.4 Pengujian Pembakaran & Pengambilan Data

Pengujian dilakukan beberapa kali, namun tidak semua diambil datanya sebagai bahan penelitian. Sebagian pengujian ditujukan untuk melihat pengaruh fluidisasi, sebagian lagi hanya untuk memastikan semua alat berjalan dengan benar sebelum pengujian dilakukan. Pengujian yang diambil datanya dilakukan tiga kali, masing masing dengan variasi sendiri-sendiri. Pengujian variasi pertama dilakukan

pada tanggal 21 Mei 2011, pengujian ini dilakukan dengan fluidisasi maksimum yaitu pada suplai udara 0,095 m³/s. Pengujian kedua dilakukan pada tanggal 29 Mei 2011, pengujian ini dilakukan dengan suplai udara yang lebih kecil yaitu 0,085 m³/s. Pengujian terakhir dilakukan pada tanggal 2 Juni 2011, pengujian kali ini tidak melakukan variasi pada suplai udara, melainkan variasi pada jenis bahan bakar yang digunakan. Pada percobaan ini, suplai udara yang digunakan adalah 0,095 m³/s. Setelah pemanasan awal menggunakan batok kelapa, proses *self combustion* dilanjutkan dengan mencampur ranting ke dalam ruang bakar sedikit demi sedikit. Awalnya ranting yang dimasukkan sebanyak 20% berbanding 80% cangkang kelapa. Namun lama kelamaan komposisi ranting bertambah hingga pada akhirnya menggunakan bahan bakar 100% ranting.

3.1.6 Perbandingan Data & Analisa

Sesuai judul penelitian, data yang diambil sebagai bahasan pada penelitian ini adalah percobaan pertama dan percobaan kedua. Kedua percobaan ini menggunakan suplai udara yang berbeda, sehingga dalam penelitian ini dianalisis pengaruh suplai udara pada kedua percobaan tersebut.

3.2 Persiapan 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).

3.2.1 Bahan Bakar Biomassa

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

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

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



Gambar 3.2 Cangkang kelapa

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

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

Tabel 3. 1 Potensi biomassa di Indonesia

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

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

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



Gambar 3.3 Cangkang kelapa partikel kecil

3.2.2 Pasir

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

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

Tabel 3.2 *Specific Heat* berbagai substansi

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

<i>Substansi</i>	<i>Specific Heat</i> (<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 40-50, karena bila menggunakan pasir silika dengan ukuran mesh 30 masih terlalu besar dari yang diinginkan dan bila menggunakan pasir silika dengan ukuran mesh 40-70 akan terlalu halus.



Gambar 3.4 Pasir silika mesh 40-50 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*) = $7,5 \text{ cm} = 0,075 \text{ m}$

3.2.3 Perlengkapan dan Peralatan

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

1. *Generator Set*

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



Gambar 3.5 Generator set yang digunakan

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

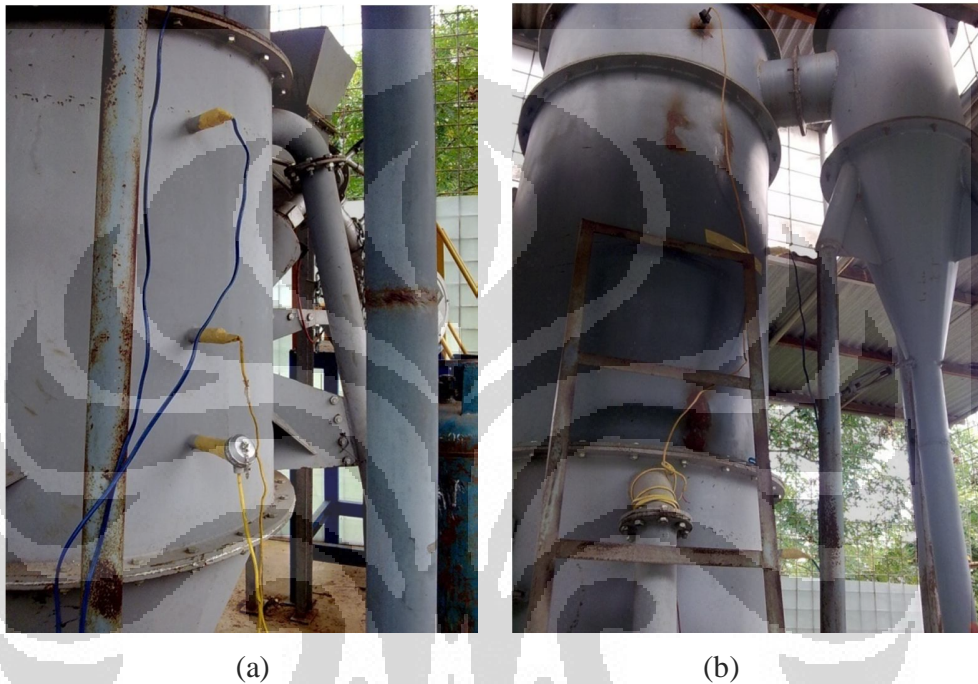
- *rated voltage* : 220 V
- *rated frequency* : 50 Hz
- *peak power* : 4 kVA
- *rated power* : 3,5 kVA
- *power factor* : 1,0
- *fuel consumption* : 2 litre / hour (bensin)

2. Termokopel

Jenis termokopel yang digunakan 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 :

- T1 = 31,5 cm di bawah distributor = 0,315 m
- T2 = 3,5 cm = 0,035 m

- T3 = 24,5 cm = 0,245 m
- T4 = 63,5 cm = 0,635 m
- T5 = 144,5 cm = 1,445 m



Gambar 3.6 Konfigurasi termokopel (a). T1 - T3, dan (b). T4 – T5

3. *Temperature Data Logger*

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



Gambar 3.7 *Temperature data logger*

4. Timbangan (*weight scale*)

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



Gambar 3.8 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 3.9 *Control panel* yang digunakan untuk feeder dan blower

3.3 STANDAR OPERASI ALAT PENGUJIAN

3.3.2 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.

3.3.2 Blower

Blower digunakan sebagai alat untuk menyuplai udara yang dibutuhkan agar terjadi proses fluidisasi dan juga terjadi reaksi pembakaran secara terus menerus selama pengoperasian alat berlangsung. Blower tersebut berfungsi untuk mengalirkan udara ke reaktor dengan debit tertentu sehingga pasir silika yang ditopang dengan plat distributor tersebut terfluidisasi. Blower harus dapat memberikan aliran udara dengan kecepatan aliran yang mencukupi sehingga terjadi fluidisasi, dan sebagai tolak ukurnya dapat dilihat dari kecepatan fluidisasi minimum. Selain harus dapat mengalirkan udara dengan kecepatan udara setidaknya sebesar kecepatan fluidisasi

minimumnya, blower harus juga dapat memberikan tekanan yang lebih besar dari pada nilai *pressure drop* (penurunan tekanan) saat melewati distributor dan hamparan pasir.



Gambar 3.11 Ring blower pada *fluidized bed combustor* UI

Spesifikasi dari blower yang digunakan adalah sebagai berikut ini :

Tabel 3.5. Spesifikasi teknis ring blower

<i>Phase</i>	3 Ø
<i>Frequency (Hz)</i>	50 / 60
<i>Power (kW)</i>	2,2
<i>Voltage (V)</i>	220
<i>Current (A)</i>	8
<i>Pressure (max) (mm 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.

3.3.3 Sistem Burner

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

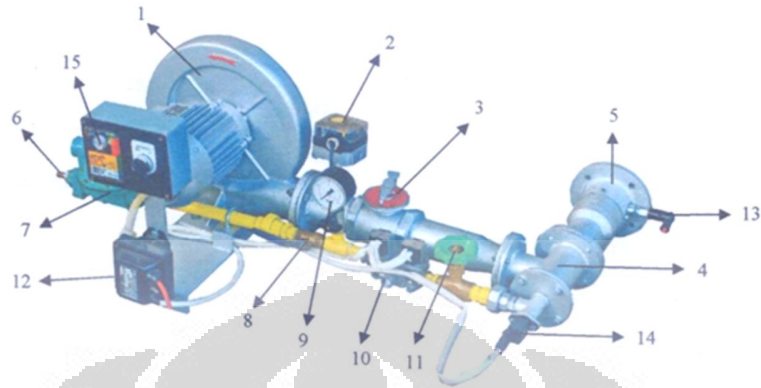
1. Buka *ball valve* utama gas masuk.

2. 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 3.5 Spesifikasi teknis *Hi-Temp Premixed Burner*

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

3.4 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.

3.4.1 Rangkaian Alat Pengujian

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

- Panel kontrol dihubungkan ke generator set untuk mendapatkan sumber tegangan yang cukup.
- Sistem feeder terhubung ke panel kontrol agar dapat diatur putarannya.
- Blower juga terhubung ke panel kontrol agar dapat diatur putarannya.
- Burner terhubung ke generator set agar dapat memutar blower burner dan menyalakan busi.
- Blower dihubungkan ke area di bawah distributor dan pasir (*area plenum*) menggunakan selang 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 3.16 Rangkaian seluruh alat untuk melakukan pengujian pembakaran

3.4.2 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.

3.4.2.1 Prosedur pemanasan awal pembakaran

1. Pastikan semua persiapan, rangkaian dan posisi alat sudah dilakukan dengan benar sesuai dengan yang sudah disebutkan sebelumnya.
2. Menyalakan blower sebagai penyedia udara saat menyalakan burner dan saat proses pembakaran berlangsung, serta untuk proses fluidisasi pasir agar

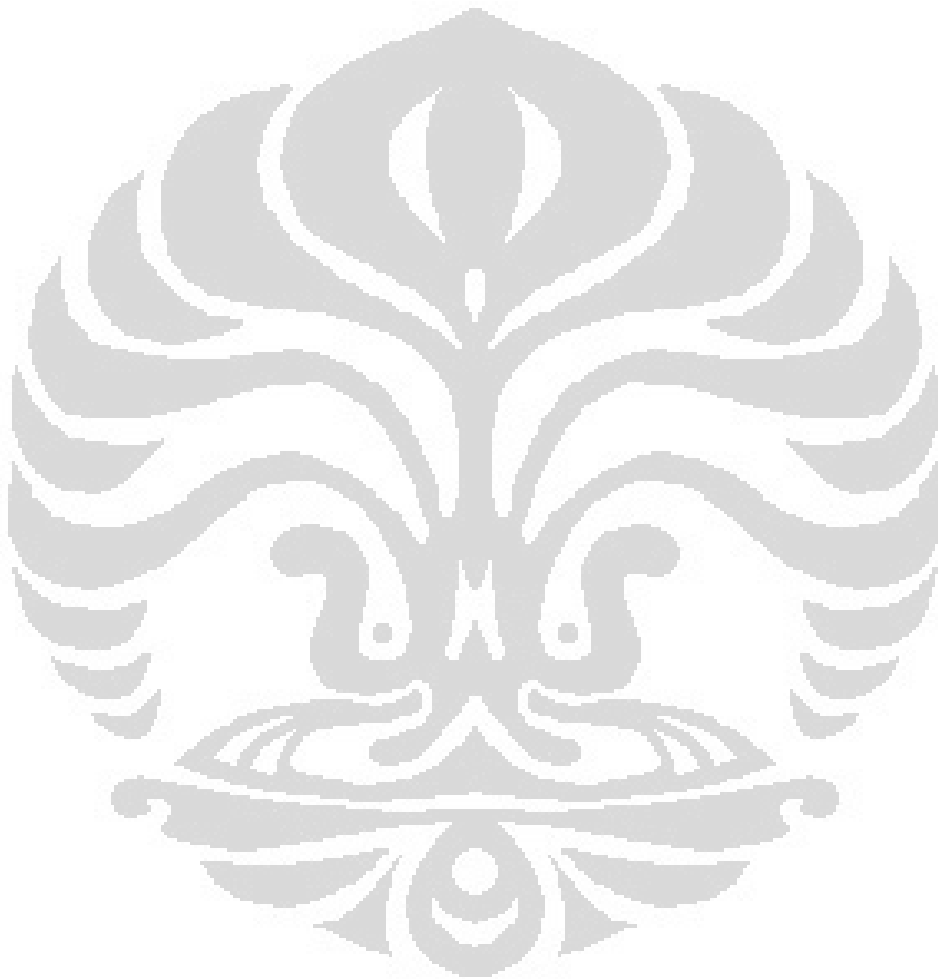
panasnya tersebar merata di seluruh pasir. Digunakan dua flow rate udara yang berbeda (jika dilihat putarannya, yang pertama ialah 3000 rpm).

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.

3.4.2.2 *Prosedur pengambilan data pembakaran*

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

4. Kemudian setelah suhu ruang bakar mencapai suhu ambient, langkah pemanasan awal 1-5 dan pengambilan data 1-3 diatas diulang kembali tetapi dengan flow rate udara yang berbeda.



BAB 4

Hasil dan Analisa

4.1 Hasil

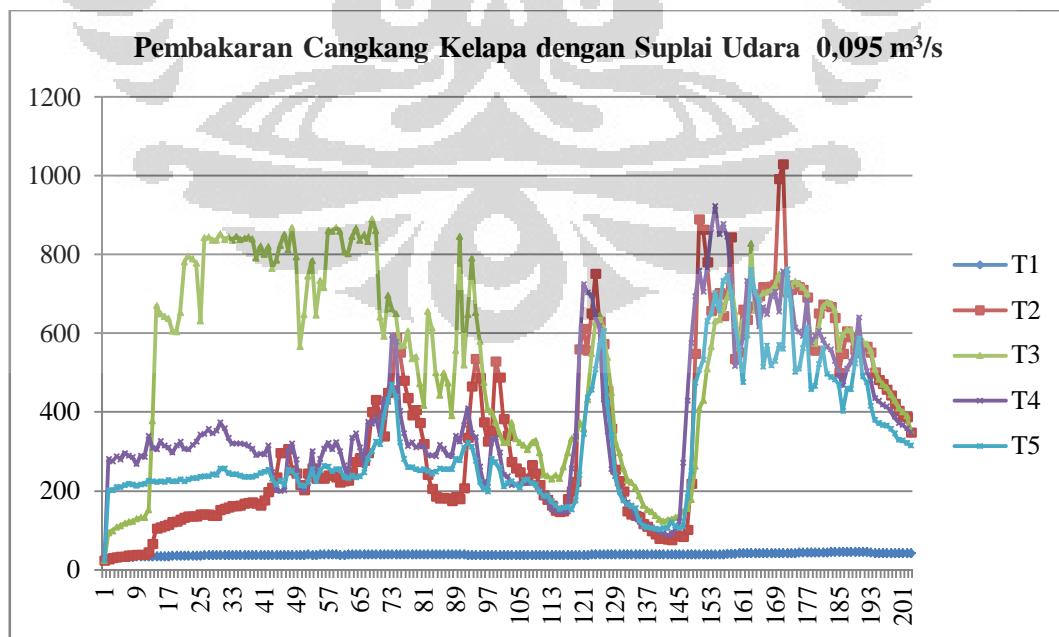
Hasil dari percobaan ini dibagi menjadi dua bagian yaitu kurva pembakaran dengan nilai suplai udara blower yang berbeda: $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ dan $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.1.1 Pembakaran dengan suplai udara $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$

Beberapa parameter dalam melakukan percobaan:

- Suplai udara blower ke ruang bakar $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$
- Menggunakan bahan bakar cangkang kelapa dengan Heating Value 5535 kcal/kg (Julian A. Banzon, 1980)
- Ketinggian Termokopel (T1= (dibawah distributor) 31,5 cm; T2= di atas 3,5 cm; T3=24,5 cm; T4=63,5cm; T5=144,5cm)

Dari data pada tabel pembakaran cangkang kelapa dengan suplai udara $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$, menghasilkan grafik pembakaran seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik pembakaran dengan suplai udara $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$

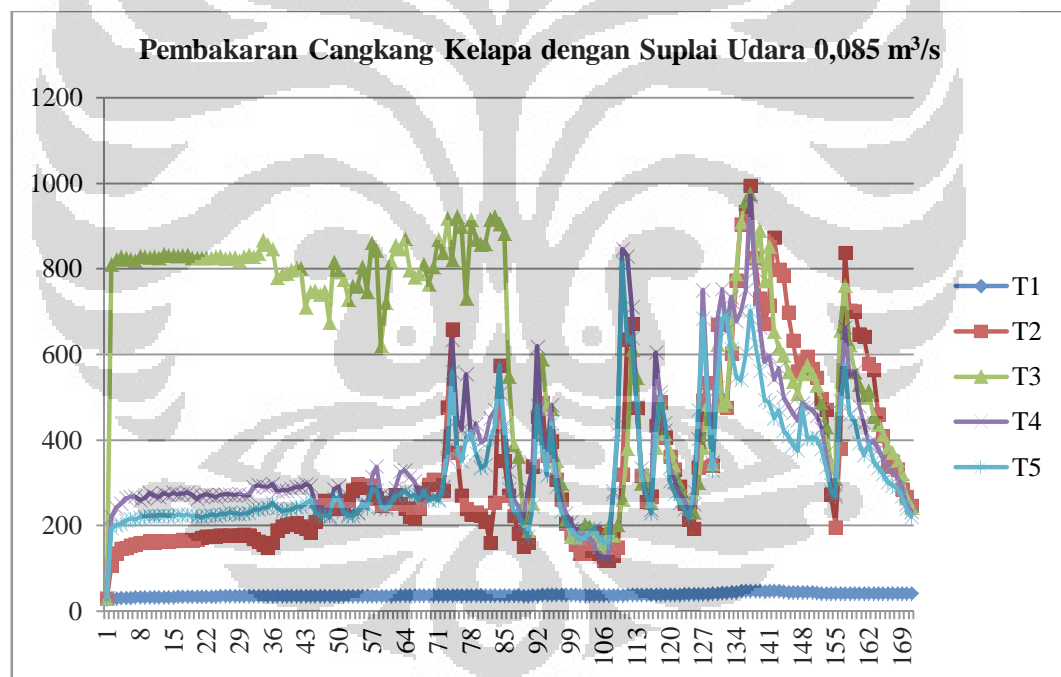
4.1.2 Pembakaran dengan suplai udara 0,085 m³/s

Beberapa parameter dalam melakukan percobaan:

- Suplai udara blower ke ruang bakar 0,085 m³/s
- Menggunakan bahan bakar cangkang kelapa dengan Heating Value 5535 kcal/kg (Julian A. Banzon, 1980)
- Ketinggian Termokopel (T1=31,5 cm; T2=3,5 cm; T3=24,5 cm; T4=63,5cm; T5=144,5cm)

Tabel 4.2 Pembakaran cangkang kelapa dengan suplai udara 0,085 m³/s

Dari data pada pembakaran cangkang kelapa dengan suplai udara 0,085 m³/s, menghasilkan grafik pembakaran seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.2.

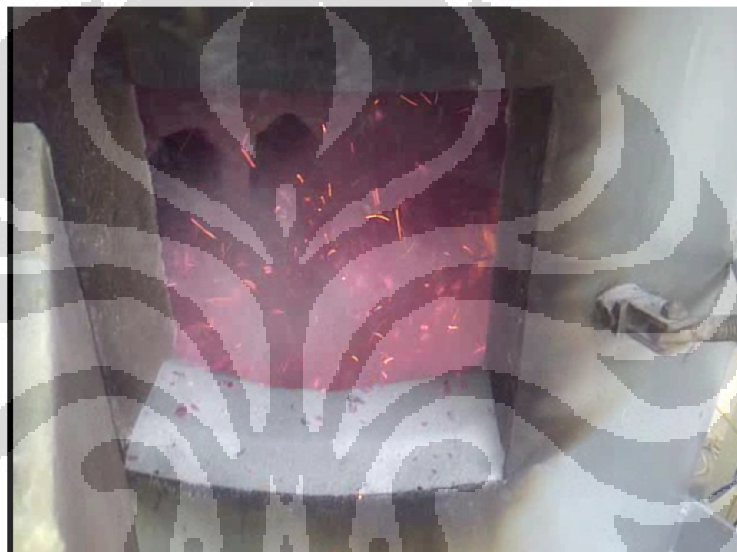


Gambar 4.2 Grafik pembakaran dengan suplai udara 0,085 m³/s

4.2 Analisa

Pada kedua percobaan yang dilakukan, baik menggunakan suplai udara 0,085 m³/s ataupun 0,095 m³/s; secara visual menunjukkan keadaan fluidisasi yang serupa pada akhir percobaan. Kondisi tersebut muncul ketika suhu T2 hingga T5 berada di atas 600°C. Kondisi tersebut memiliki fluidisasi baik lebih stabil

serta memiliki warna merah kekuningan. Selain itu, pada kondisi tersebut, biasanya bahan bakar biomassa yang dimasukkan akan cepat beraksi sehingga dapat dengan cepat meningkatkan temperatur rata-rata T2 hingga T5 pada FBC. Oleh karena itu, pada percobaan tersebut, kondisi ini diasumsikan sebagai Kondisi Kerja FBC UI. Jika dianalisa pada grafik percobaan dan observasi menggunakan video, didapatkan kondisi kerja percobaan dengan suplai udara $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ dimulai di menit 126 dan pada percobaan dengan suplai udara $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$ dimulai pada menit ke 149.



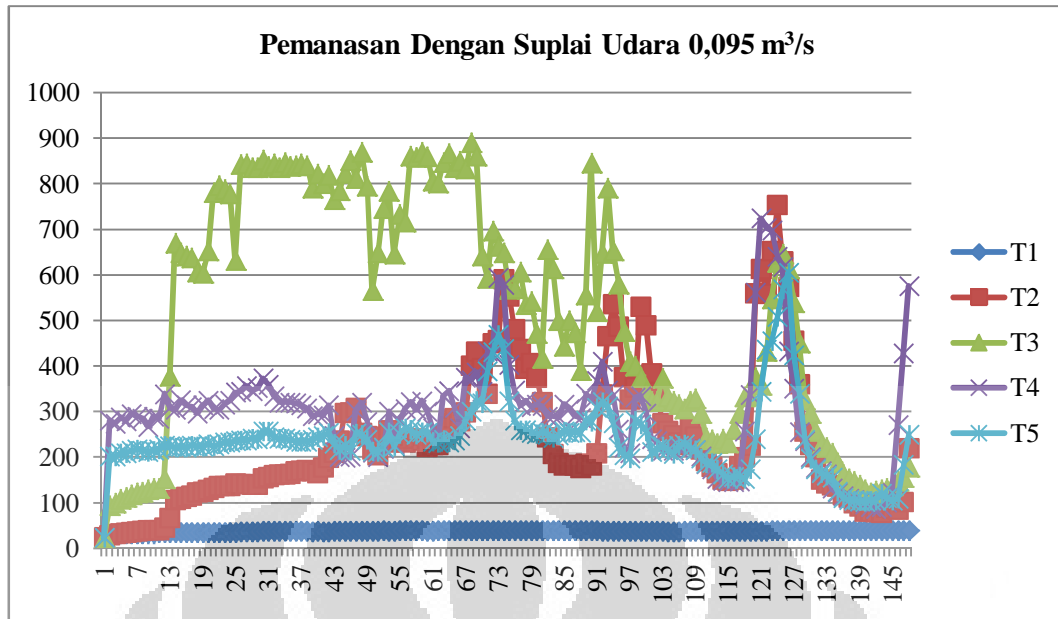
Gambar 4.3 Kondisi kerja FBCUI pada suplai udara $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$

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

- a. Kondisi pemanasan menuju kondisi kerja
- b. Analisa kondisi kerja
- c. Analisa pembakaran biomassa pada kondisi kerja
- d. Daya panas cangkang kelapa pada kondisi kerja

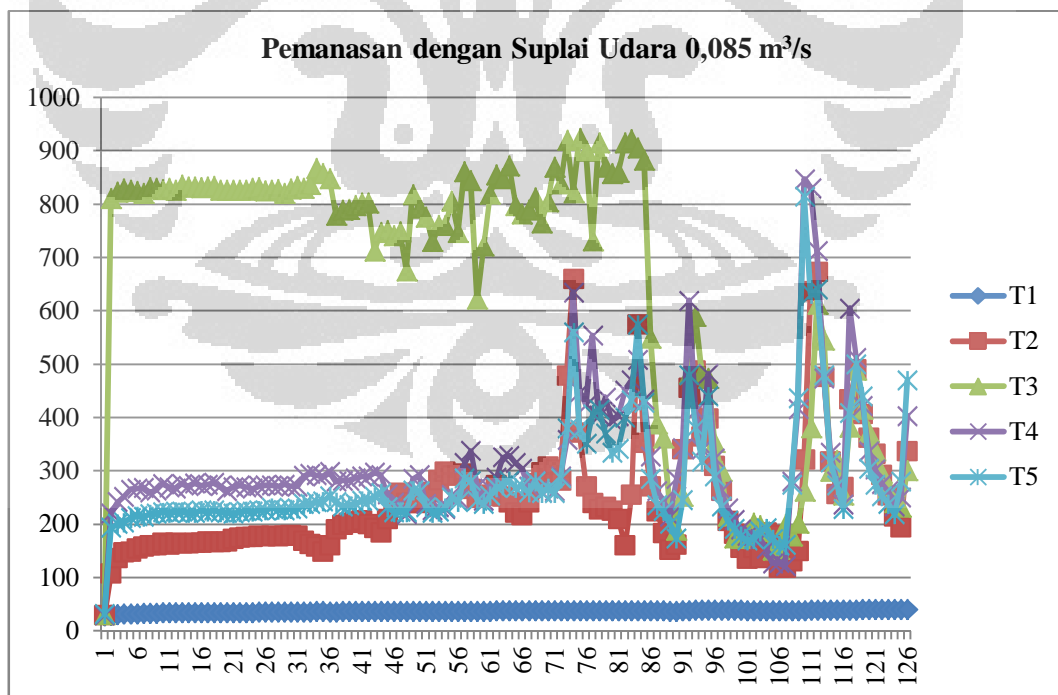
4.2.1 Kondisi Pemanasan Menuju Kondisi Kerja

Kondisi pemanasan sebelum kondisi kerja pada percobaan dengan suplai udara $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$ berlangsung dari menit pertama hingga menit ke 148.



Gambar 4.4 Grafik Pemanasan dengan suplai udara 0,095 m³/s

Sedangkan, pada percobaan dengan suplai udara 0,085 m³/s, pemanasan sebelum kondisi kerja berlangsung dari menit pertama hingga menit 125.

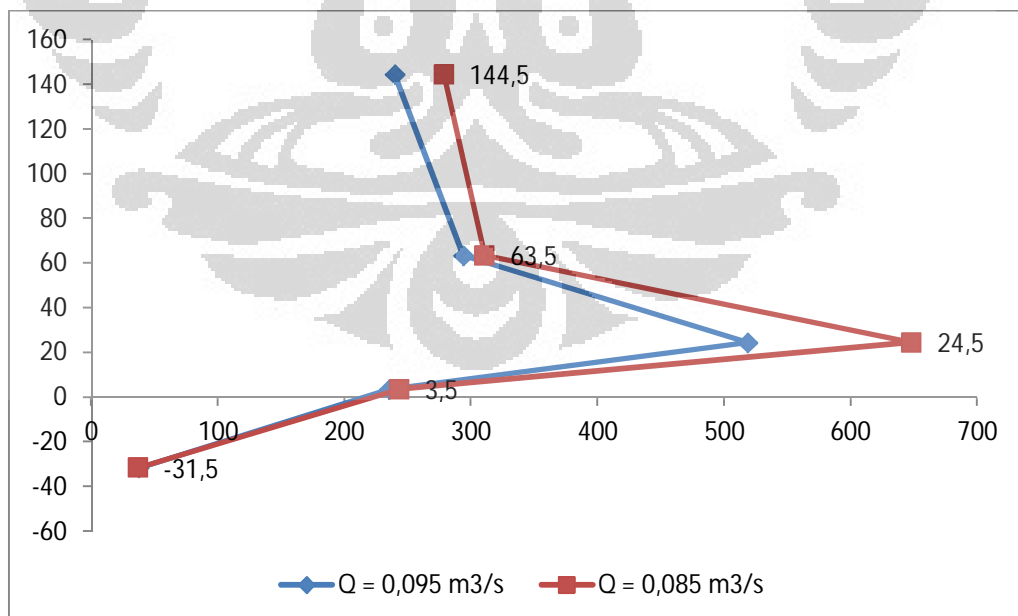


Gambar 4.5 Grafik Pemanasan dengan Suplai udara 0,085 m³/s

Dari kedua grafik di atas, waktu yang dibutuhkan untuk pemanasan pada suplai udara $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ lebih cepat dibanding dengan pemanasan dengan suplai udara $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$. Namun, sesuai dengan data yang telah dijabarkan sebelumnya, pemanasan dengan suplai udara $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ membutuhkan bahan bakar cangkang kelapa total lebih banyak dalam proses pemanasan ini yaitu sebanyak 15 kg cangkang kelapa, sedangkan pada suplai udara $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$ hanya membutuhkan 8,5 kg cangkang kelapa. Hal ini menunjukkan bahwa percobaan dengan $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ tidak maksimal dalam melakukan pembakaran cangkang kelapa yang disebabkan oleh kurangnya suplai udara (dalam hal ini oksigen) untuk melakukan proses pembakaran. Sehingga, proses ini akan meninggalkan banyak cangkang kelapa yang belum terbakar sempurna.

Tabel 4.1 Temperatur Pemanasan dengan Suplai Udara $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ dan $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$

Rata-rata pemanasan dengan Suplai Udara $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$				
T1	T2	T3	T4	T5
37,03175	243,4603	648,1905	310,8095	278,6349
Rata-rata pemanasan dengan Suplai Udara $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$				
T1	T2	T3	T4	T5
37,79054	235,4459	518,6622	293,7635	239,6824

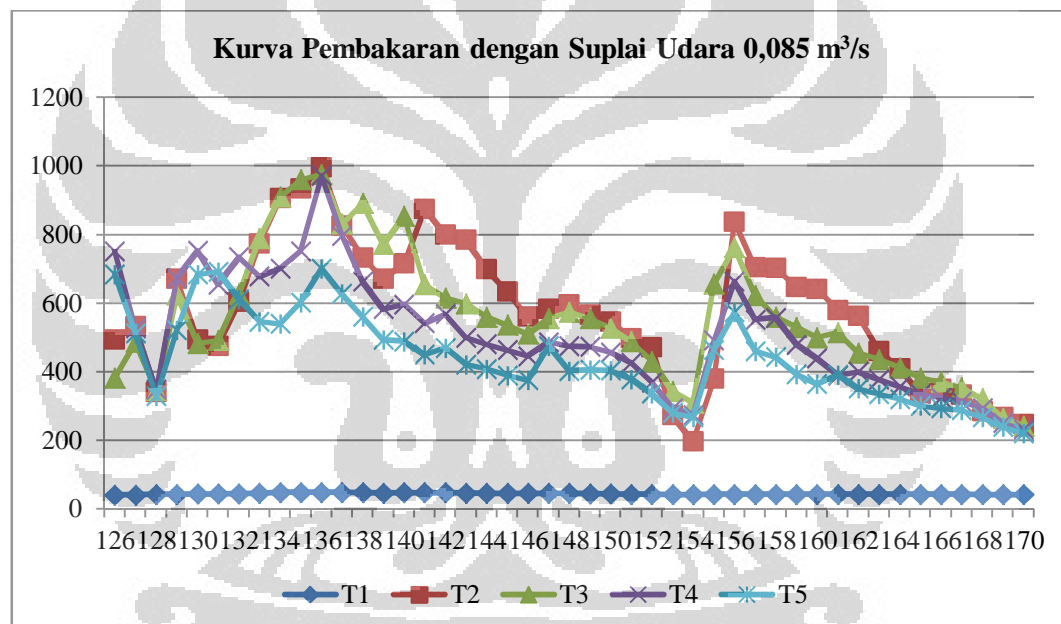


Gambar 4.6 Distribusi Temperatur pada saat kondisi pemanasan

Namun, jika membandingkan temperatur kerja pada saat kondisi pemanasan, suplai udara $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ memiliki temperatur rata-rata yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan pemanasan dengan suplai udara $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$ hal ini disebabkan oleh jumlah total fuel yang terdapat pada pemanasan dengan suplai udara $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ dua kali lebih banyak jika dibanding pemanasan dengan suplai udara $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$ walaupun pembakaran di pemanasan suplai udara $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$ tidak sempurna.

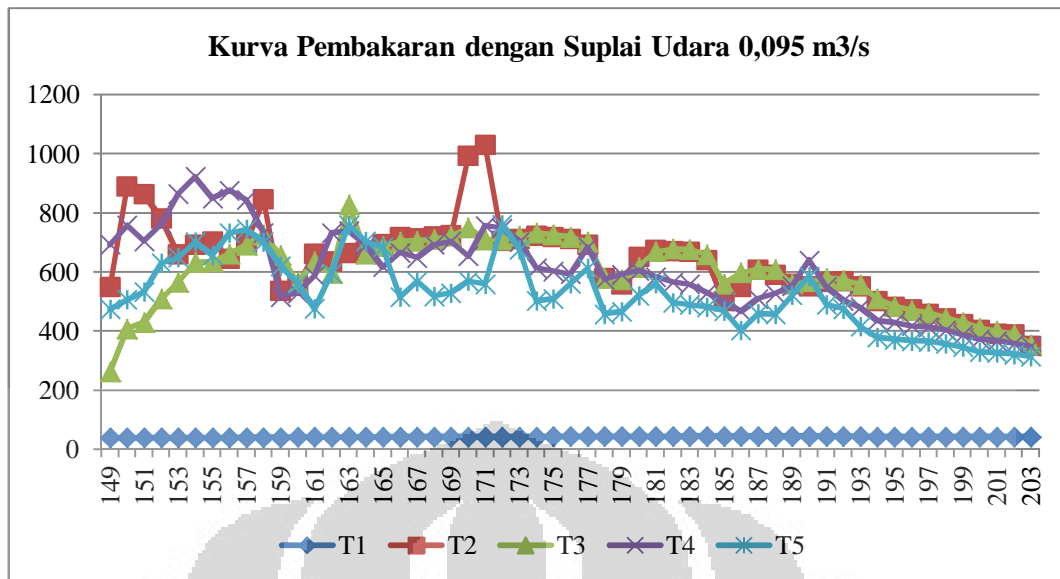
4.2.2 Analisa Kondisi Kerja

Kondisi kerja pada percobaan dengan suplai udara $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ dimulai dari menit ke 126 hingga percobaan selesai.



Gambar 4.7 Kondisi kerja dengan suplai udara $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$

Kondisi kerja pada percobaan dengan suplai udara $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$ dimulai dari menit ke 149 hingga percobaan selesai



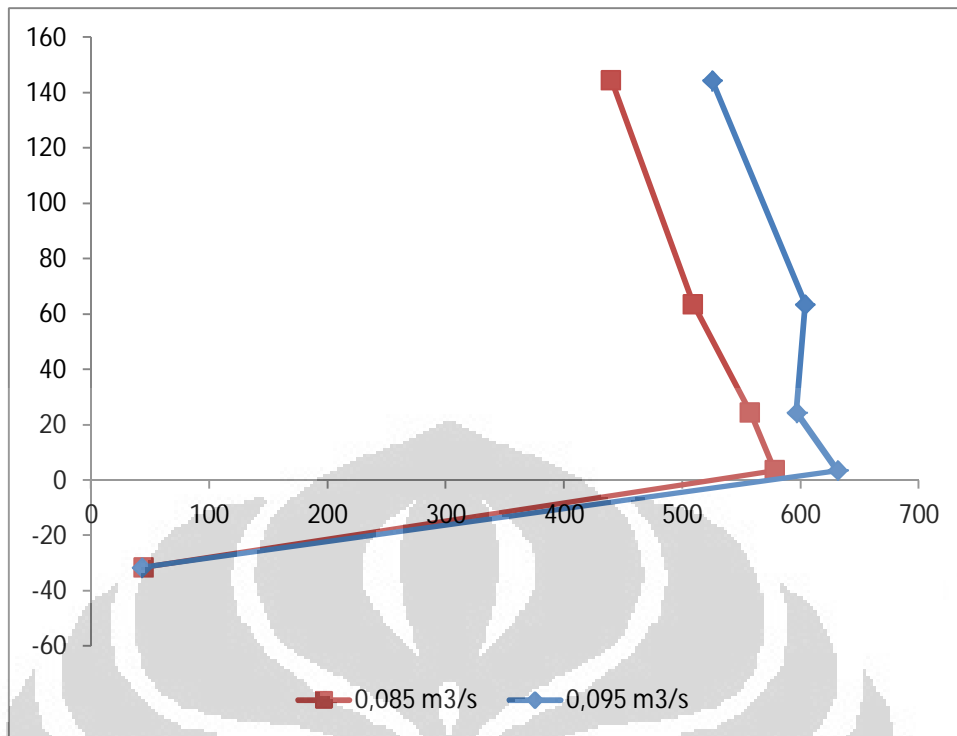
Gambar 4.8 Kondisi kerja dengan suplai udara 0,095 m³/s

Dari kedua grafik di atas, dapat dijabarkan sebagai berikut. Kurva pembakaran pertama, dengan suplai udara 0,085 memiliki lama waktu kondisi yang lebih cepat yaitu hanya sekitar 44 menit. Sedangkan, kurva kedua dengan suplai udara 0,095 mempertahankan kondisi kerjanya selama 54 menit. Kondisi ini terjadi dikarenakan keterbatasan bahan bakar yang tersedia pada saat percobaan, sehingga percobaan terpaksa berhenti karena kehabisan bahan bakar cangkang kelapa.

Dari sisi pembakaran bahan bakar, kurva kedua dengan suplai udara 0,095 membakar 8,5 kg cangkang kelapa pada kondisi kerja ini, sedangkan percobaan pertama dengan suplai udara 0,085 hanya membakar total 7 kg cangkang kelapa saja pada proses ini. Hal ini menyebabkan temperatur rata-rata pada kondisi kerja percobaan dengan suplai udara 0,095 m³/s memiliki nilai yang lebih tinggi. Selain itu, suplai udara yang lebih tinggi juga membuat pembakaran lebih sempurna dan membuat temperatur yang dihasilkan lebih tinggi.

Tabel 4.2 Temperatur Kondisi kerja dengan Suplai Udara 0,085 m³/s dan 0,095 m³/s

T1	T2	T3	T4	T5
Rata-rata temperatur kondisi kerja 0,085 m ³ /s				
44,51111	578,1333	557,2667	509,0667	439,7333
Rata-rata temperatur kondisi kerja 0,095 m ³ /s				
42,76364	631,0545	596,5636	603,7273	525,1273



Gambar 4.9 Distribusi temperatur pada saat kondisi kerja

Gambar 4.9 menunjukkan distribusi temperatur pada saat kondisi kerja di FBC UI menggunakan dua suplai udara, $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ dan $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$. Pada titik T1 baik percobaan pertama dan kedua memperlihatkan data yang jauh lebih rendah dibandingkan temperatur termokopel lainnya. Hal ini disebabkan data pada T1 terletak di bawah distributor dan hamparan pasir. Temperatur T1 mengukur temperatur udara masuk menuju ruang bakar, yang berkisar tidak jauh dari $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Pada data dengan suplai udara $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ menunjukkan angka rata-rata sebesar $44,5 \text{ }^\circ\text{C}$ sedangkan pada data dengan suplai udara $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$ memiliki angka rata-rata sebesar $42,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Hal ini disebabkan oleh pressure drop yang diberikan pasir di percobaan dengan suplai udara $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$ lebih kecil dikarenakan suhu rata-rata pada T2 hingga T5 lebih besar dan membuat partikel pasir lebih mudah diangkat oleh tiupan udara blower.

Nilai rata-rata T2 hingga T5 pada percobaan dengan suplai udara $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$ memiliki temperatur rata-rata lebih tinggi dibanding percobaan dengan suplai udara lebih rendah dikarenakan pada percobaan dengan suplai udara lebih rendah terdapat penurunan suhu pada menit 154. Kondisi ini disebabkan oleh bahan bakar baru sebanyak 2kg yang dimasukkan pada percobaan dengan suplai udara $0,085$

m^3/s seakan membuat kondisi kerja FBC berhenti sesaat untuk memanaskan dan membakar bahan bakar tersebut. Ketika bahan bakar tersebut sudah kering dan terbakar maka secara simultan kondisi kerja kembali tercapai.

4.2.3 Analisa Pembakaran Biomassa pada Kondisi Kerja

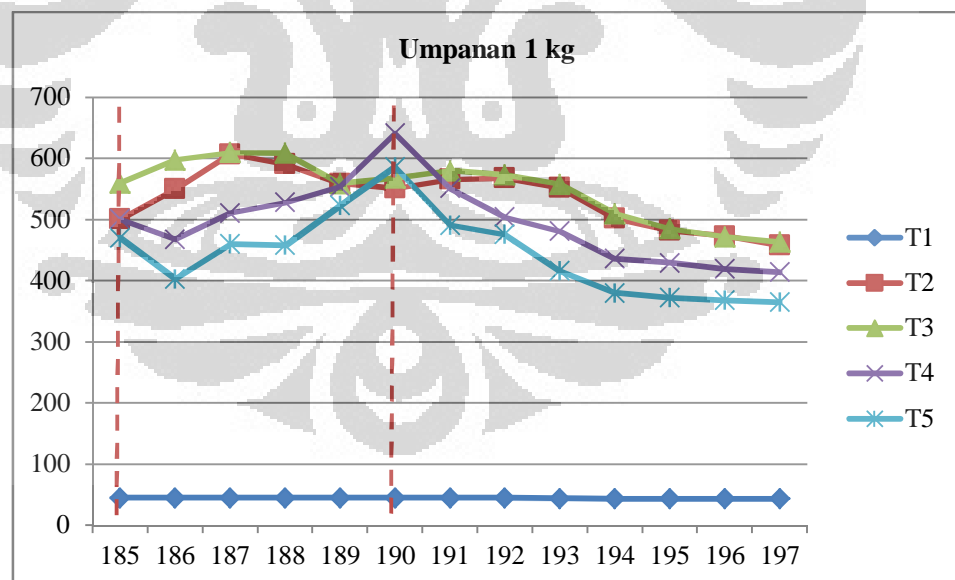
Pada bagian ini akan dianalisa mengenai pengaruh banyaknya bahan bakar yang dimasukkan pada sekali masuk terhadap perubahan temperatur. Data ini diambil pada saat kondisi dan temperatur mencapai kondisi kerja FBC di masing-masing percobaan.

4.2.3.1 Pembakaran pada percobaan dengan suplai udara $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$

Pada percobaan ini di kondisi kerja, dilakukan percobaan dengan 1 kg, 1,25 kg dan 2 kg.

a. Pembakaran 1 kg

Pembakaran bahan bakar 1 kg ini dilakukan pada menit ke 185 dan ke 190. Grafik perubahan temperaturnya adalah sebagai berikut:



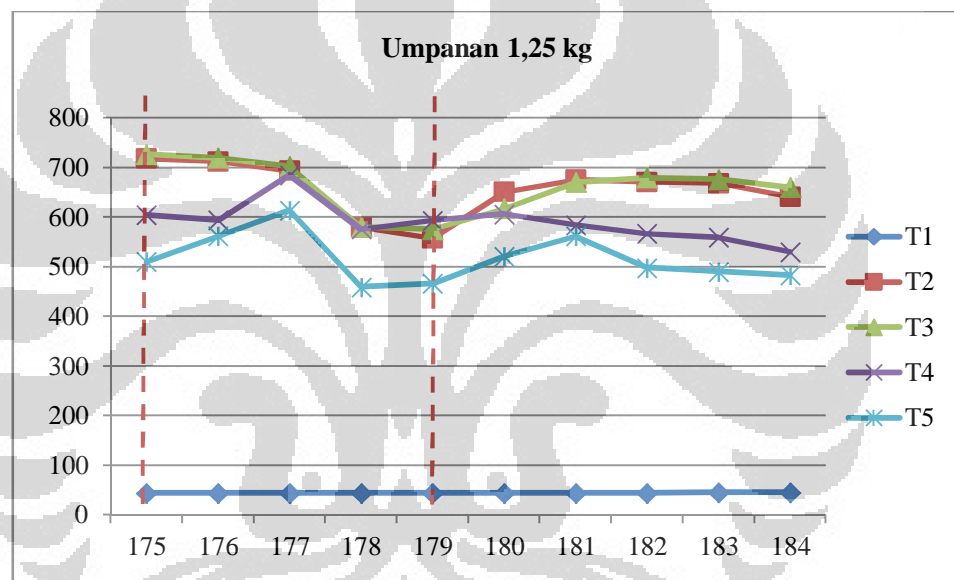
Gambar 4.10 Temperatur kerja pada saat pemasukan bahan bakar 1 kg dengan suplai udara $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$

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 4.3 Temperatur pembakaran bahan bakar 1kg pada 0,095 m³/s

Rata-rata temperatur bahan bakar 1 kg pada 0,095				
T1	T2	T3	T4	T5
44,30769	535,3846	549,6154	495,1538	443,6923

b. Pembakaran 1,25 kg



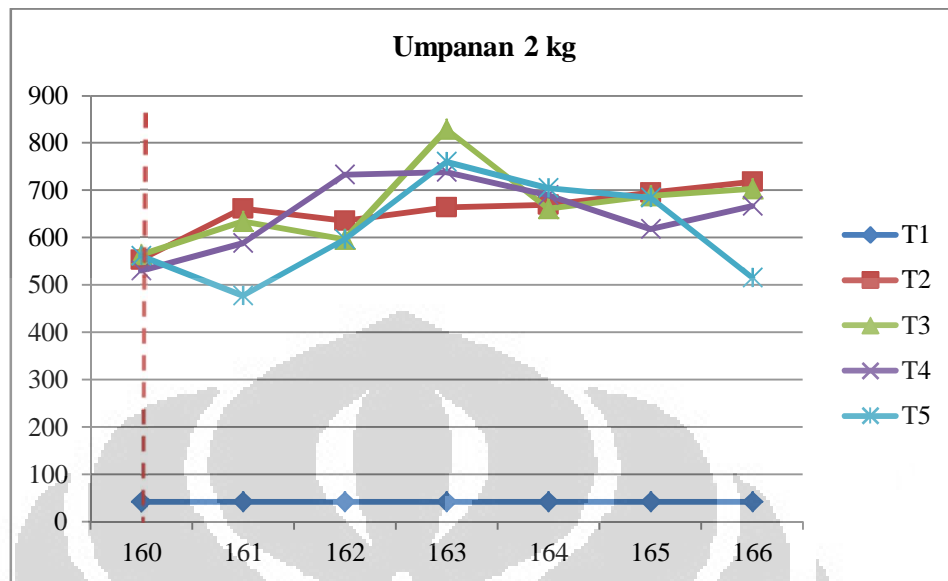
Gambar 4.11 Temperatur kerja pada saat pemasukan bahan bakar 1,25 kg dengan suplai udara 0,095 m³/s

Pembakaran dengan bahan bakar sebesar 1,25 kg ini dilakukan pada menit 175 dan menit 179. Grafik di atas menunjukkan temperatur kerja pada pembakaran bahan bakar 1,25 kg. Temperatur tersebut kemudian dirata-ratakan dan dimasukkan pada tabel 4.6

Tabel 4.4 Temperatur pembakaran bahan bakar 1,25kg pada 0,095 m³/s

Rata-rata temperatur bahan bakar 1,25 kg pada 0,095				
T1	T2	T3	T4	T5
44,2	656,5	660,4	589,8	516,5

c. Pembakaran 2 kg



Gambar 4.12 Temperatur kerja pada saat pemasukan bahan bakar 2 kg dengan suplai udara $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$

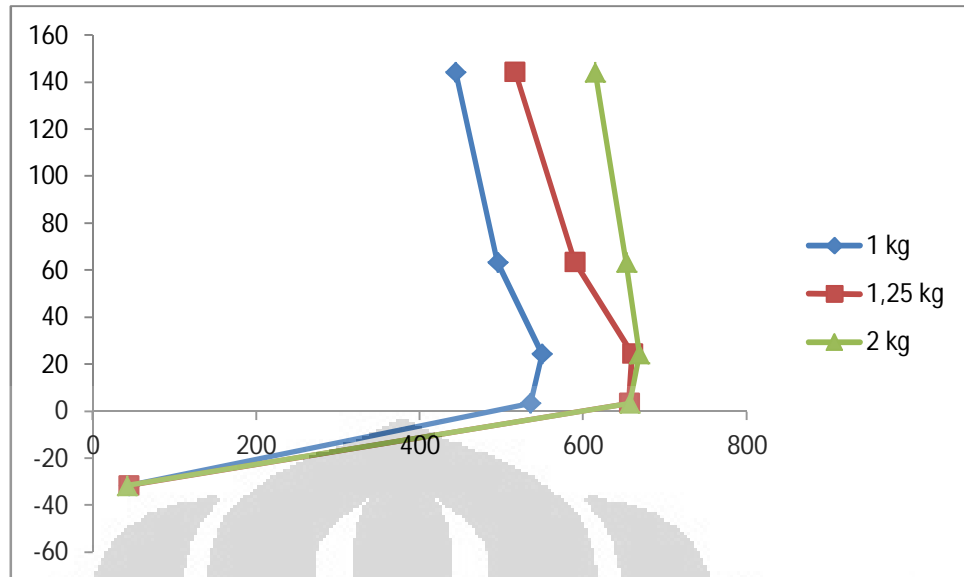
Pembakaran dengan bahan bakar sebanyak 2 kg dilakukan pada menit ke 160. Pada grafik di atas, rata-rata temperatur dari T1 hingga T5 dimasukkan ke dalam satu tabel

Tabel 4.5 Temperatur pembakaran bahan bakar 2kg pada $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$

Rata-rata temperatur bahan bakar 2 kg pada $0,095$				
T1	T2	T3	T4	T5
42,14286	656,7143	668,2857	652,2857	614,5714

d. Perbandingan temperatur rata-rata

Dari tabel rata-rata temperatur untuk bahan bakar 1 kg, 1,25kg dan 2 kg dibandingkan persebarannya terhadap tinggi termokopel.



Gambar 4.13 Distribusi temperatur kerja pada saat pemasukan bahan bakar 1; 1,5 dan 2 kg dengan suplai udara $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$

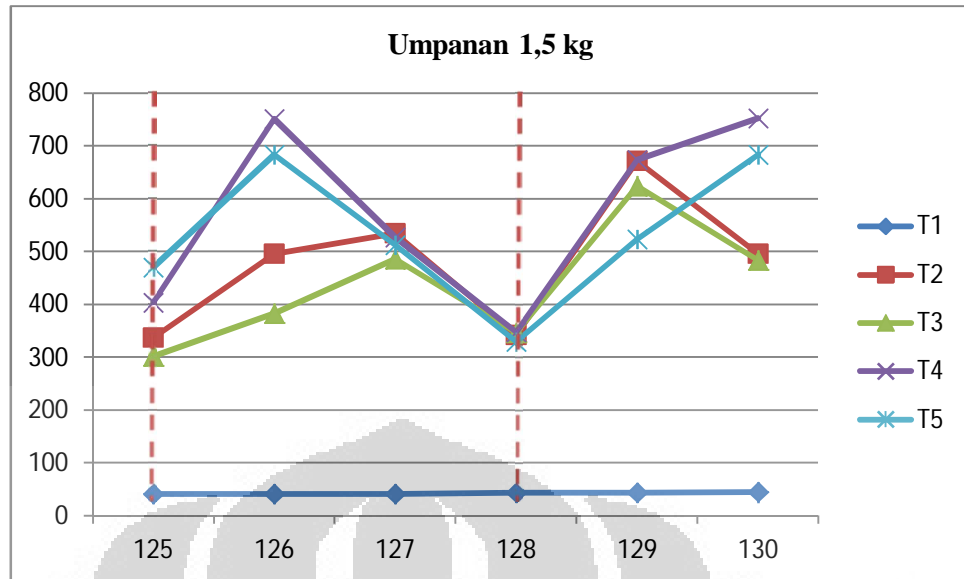
Pada distribusi temperatur kerja yang ditunjukkan pada gambar 4.13, bahan bakar cangkang kelapa dengan berat 1 kg adalah bahan bakar yang paling rendah temperatur rata-ratanya, hal ini menunjukkan bahwa pemasukan bahan bakar dengan berat 1 kg kurang efektif pada kondisi kerja dengan suplai udara $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$. Sedangkan temperatur rata-rata pada pembakaran cangkang kelapa dengan berat 2 kg menunjukkan kinerja paling efektif. Temperatur pada T4 dan T5 atau area freeboard menunjukkan rata-rata tertinggi pada $652 \text{ }^\circ\text{C}$ dan $614 \text{ }^\circ\text{C}$.

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

Pada percobaan ini dilakukan percobaan dengan bahan bakar 1,5 kg; 1,75 kg dan 2 kg.

a. Pembakaran 1,5 kg

Pembakaran dengan bahan bakar cangkang kelapa seberat 1,5 kg dilakukan dua kali. Pertama di menit 125 dan kedua di menit 128.



Gambar 4.14 Temperatur kerja pada saat pemasukan bahan bakar 1,5 kg dengan suplai udara $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$

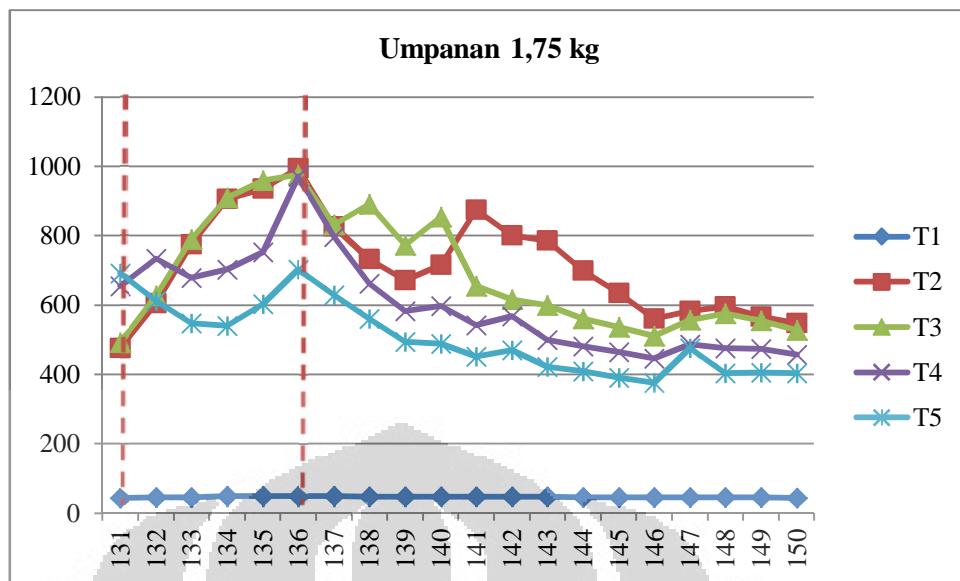
Gambar 4.14 menunjukkan temperatur kerja yang diberikan pada percobaan dengan suplai udara $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ disaat membakar bahan bakar cangkang kelapa dengan berat 1,5 kg. Pada saat bahan bakar tersebut dimasukkan, secara langsung temperatur langsung meningkat, namun peningkatan temperatur tersebut tidak bertahan lama. Dengan kecenderungan penurunan temperatur di setiap menitnya.

Tabel 4.6 Temperatur pembakaran bahan bakar 1,5kg pada $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$

Rata-rata temperatur bahan bakar 1,5 kg pada $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$				
T1	T2	T3	T4	T5
42,16667	479	437,1667	576	533,8333

b. Pembakaran 1,75 kg

Pada pembakaran cangkang kelapa menggunakan berat 1,75kg ketika kondisi kerja, dilakukan pada menit ke 131 dan menit ke 136.



Gambar 4.15 Temperatur kerja pada saat pemasukan bahan bakar 1,75 kg dengan suplai udara $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$

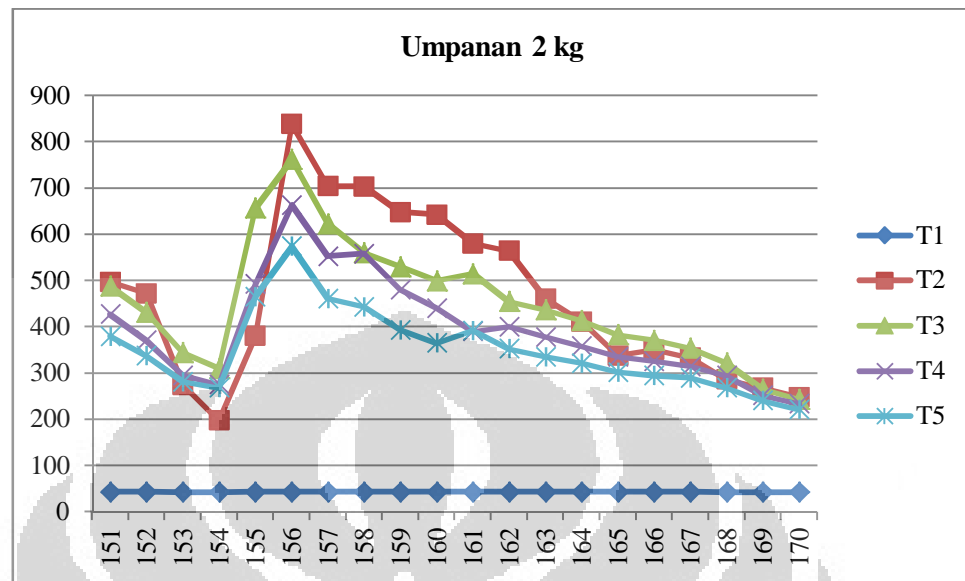
Pada pembakaran cangkang kelapa dengan berat 1,75 kg pada suplai udara $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ menunjukkan temperatur yang cukup tinggi. Pada pemasukan pertama di menit 131 membuat temperatur di T2 hingga T4 menunjukkan angka tertinggi di percobaan dengan suplai udara $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$. Temperatur ini terjadi di menit ke 136, yaitu lima menit setelah bahan bakar dimasukkan. Namun tren tersebut tidak berulang di pemasukan kedua di menit 136 dikarenakan pada kondisi tersebut banyak bahan bakar yang masih belum siap bakar sehingga menyerap panas kerja di FBC. Walaupun menurun, namun rata-rata temperatur yang ditunjukkan pada bagian ini memiliki angka yang cukup tinggi seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.9.

Tabel 4.9 Temperatur pembakaran bahan bakar 1,75kg pada $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$

Rata-rata temperatur bahan bakar 1,75 kg pada $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$				
T1	T2	T3	T4	T5
46,8	714,25	689,6	601,25	503,75

c. Pembakaran 2 kg

Pembakaran dengan bahan bakar cangkang kelapa seberat 2 kg dilakukan pada menit ke 151.



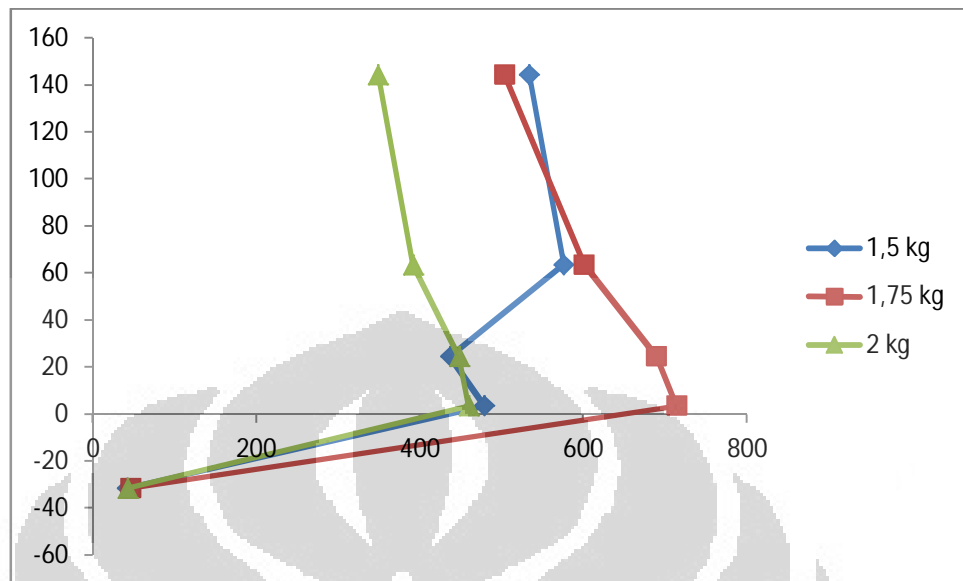
Gambar 4.16 Temperatur kerja pada saat pemasukan bahan bakar 2 kg dengan suplai udara $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$

Pada gambar 4.16 grafik menunjukkan temperatur kerja pada saat bahan bakar 2kg dimasukkan. Pada bagian ini terjadi hal penting yaitu penurunan temperatur secara signifikan ketika bahan bakar dimasukkan. Penurunan ini terjadi selama empat menit. Setelah penurunan tersebut, terjadi kenaikan kembali hingga menit ke-157 yang kemudian diikuti dengan penurunan suhu secara perlahan. Hal ini menggambarkan bahwa bahan bakar baru yang masuk ke dalam ruang bakar membutuhkan waktu untuk mengurangi kelembabannya sendiri kemudian meningkatkan suhunya sehingga kemudian terbakar dan ikut meningkatkan temperatur di ruang bakar FBC. Penurunan suhu ini juga menggambarkan performa suplai udara $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ dengan reaksinya terhadap bahan bakar seberat 2 kg untuk menyuplai udara agar terjadi pembakaran.

Tabel 4.8 Temperatur pembakaran bahan bakar 2 kg pada $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$

Rata-rata temperatur bahan bakar 2 kg pada $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$				
T1	T2	T3	T4	T5
42,75	459,7	448,15	391,5	349

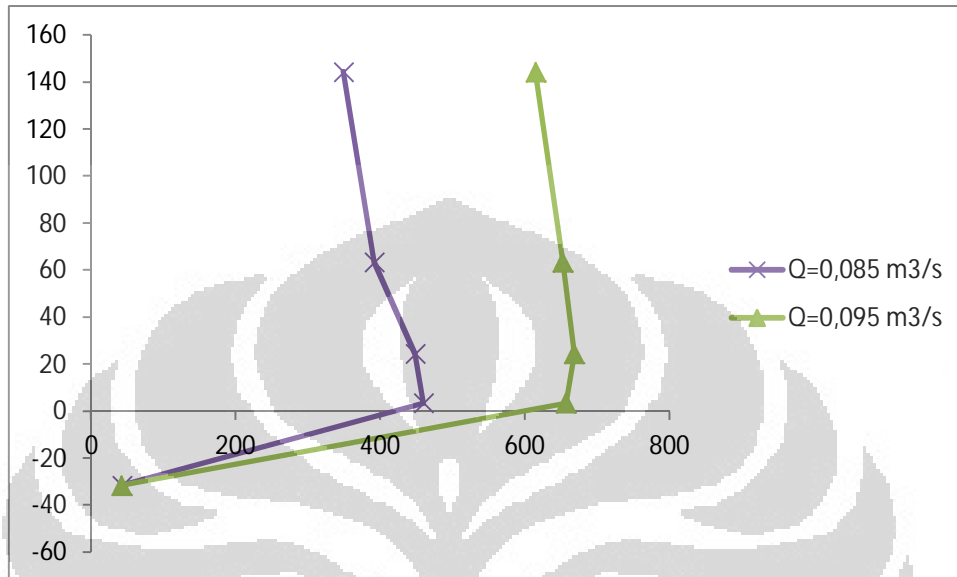
d. Perbandingan temperatur rata-rata



Gambar 4.17 Distribusi temperatur kerja pada saat pemasukan bahan bakar 1,5; 1,75 dan 2 kg dengan suplai udara $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$

Perbandingan distribusi temperatur rata-rata pada pembakaran bahan bakar cangkang kelapa dengan berat 1,5 kg; 1,75 kg dan 2kg dengan suplai udara $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ ditunjukkan pada gambar 4.17. Tidak seperti percobaan sebelumnya dengan suplai udara $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$ setiap kenaikan berat bahan bakar maka secara umum akan terjadi pula kenaikan temperatur rata-rata, pada percobaan dengan suplai udara lebih rendah di $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ menunjukkan hal yang berbeda. Kenaikan temperatur rata-rata hanya terlihat pada grafik berat 1,5 kg ke 1,75 kg. Pada grafik 2 kg terlihat temperatur rata-rata yang ditunjukkan adalah temperatur paling rendah. Bahkan rata-rata temperatur 2 kg lebih rendah dibandingkan dengan berat 1,5 kg. Rata-rata temperatur paling tinggi ditunjukkan oleh grafik berat bahan bakar 1,75 kg. Area freeboard di T4 menunjukkan temperatur rata-rata paling tinggi di angka $601,25 \text{ }^\circ\text{C}$. Sedangkan, temperatur T5 paling tinggi ditunjukkan oleh pembakaran cangkang kelapa seberat 1,5 kg di angka $533 \text{ }^\circ\text{C}$. Hal ini menunjukkan bahwa untuk pembakaran di kondisi kerja, suplai udara $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ kurang efektif dan tidak menunjukkan performa yang stabil.

4.2.3.3 Perbandingan Pembakaran Cangkang Kelapa 2kg di Kedua Percobaan



Gambar 4.18 Distribusi temperatur kerja pada saat pemasukan bahan bakar 2 kg dengan suplai udara 0,085 m³/s dan 0,095 m³/s

Gambar 4.17 menunjukkan perbandingan distribusi temperatur ketika bahan bakar 2kg di kedua percobaan dengan suplai udara berbeda, yaitu 0,085 m³/s dan 0,095 m³/s. Pada grafik dapat dengan jelas diperhatikan bahwa terdapat perbedaan rata-rata temperatur yang signifikan antara kedua percobaan. Pada percobaan dengan menggunakan suplai udara 0,085 m³/s menunjukkan bahwa rata-rata temperatur T4 di area freeboard hanya 391,5 °C hampir setengah kali dari temperatur T4 pada percobaan dengan suplai udara 0,095 m³/s yaitu 652,3 °C. Perbandingan angka yang serupa juga terlihat dari rata-rata temperatur pada T2, T3 dan T5 kecuali T1, karena T1 hanya mengukur temperatur udara yang memasuki ruang bakar di area plenum. Perbedaan temperatur dari T2 hingga T5 ini menunjukkan bahwa pada kondisi kerja, penggunaan suplai udara 0,095 m³/s lebih efisien jika dibandingkan dengan suplai udara 0,085 m³/s. Hal ini disebabkan oleh jumlah udara dan oksigen yang masuk ke dalam ruang bakar lebih banyak, sehingga bahan bakar lebih banyak terbakar jika dibandingkan dengan pembakaran dengan suplai udara lebih rendah.

4.2.4 Daya Panas Cangkang Kelapa

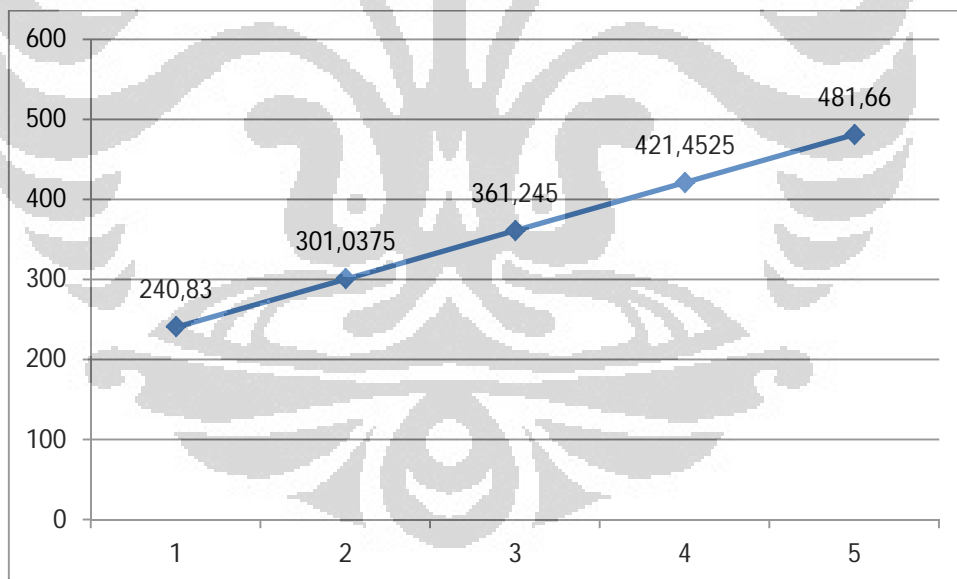
Daya panas cangkang kelapa dapat dihitung dengan memasukkan efisiensi FBC, feed rate dan nilai LHV atau lower heating value ke dalam perhitungan.

$$\text{daya panas} = \eta_{FBC} \times \text{feed rate} \times LHV$$

Sehingga semakin banyak cangkang kelapa yang dimasukkan, maka semakin tinggi pula daya panas yang bisa digunakan. Berikut merupakan perbandingan hasil perhitungannya:

Tabel 4.9 Daya panas berbanding feed rate

feed rate	
1	240,83
1,25	301,0375
1,5	361,245
1,75	421,4525
2	481,66

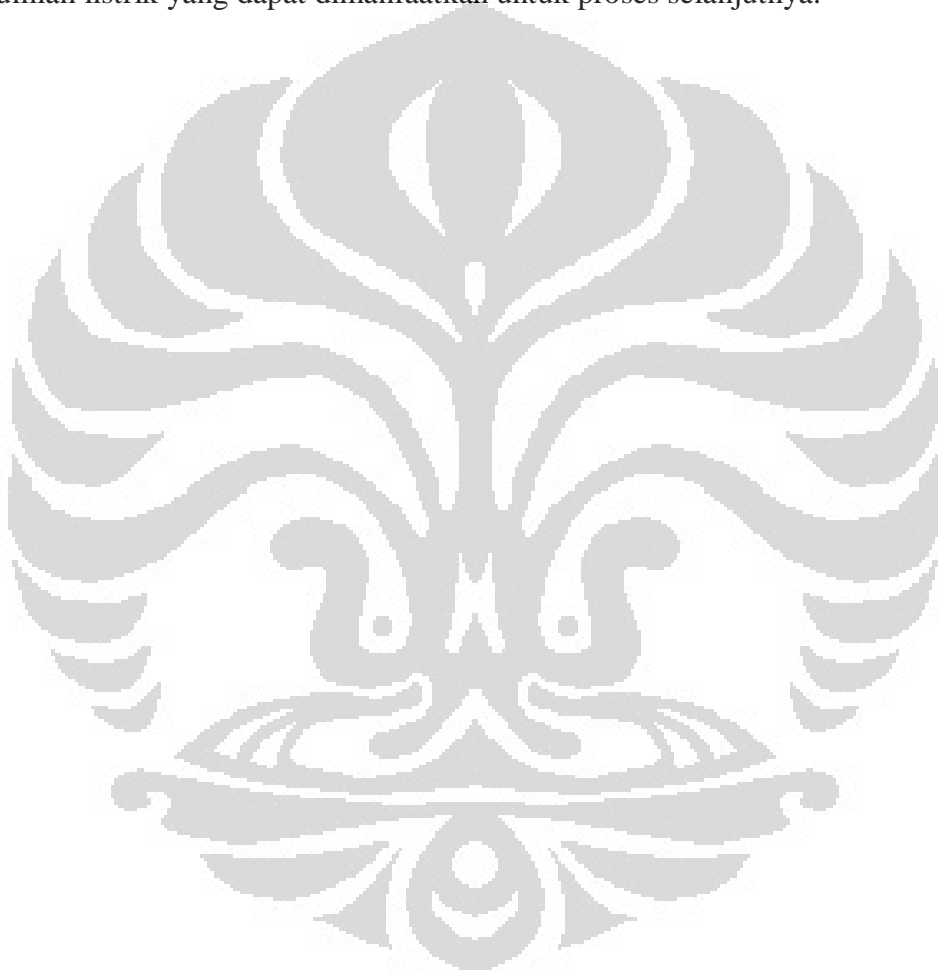


Gambar 4.19 Grafik Daya Panas yang Dihasilkan terhadap variasi feedate bahan bakar

Daya Panas yang dihasilkan merupakan nilai feed rate yang dikalkulasikan dengan lower heating value cangkang kelapa dan efisiensi FBC UI. Nilai efisiensi FBC UI diasumsikan sebesar 85%. Nilai ini diambil dengan pertimbangan nilai tersebut lebih kecil dari nilai yang diambil dari literatur sebesar 88-90%. Laju

feed rate diambil dari jumlah masukan bahan bakar selama percobaan di kondisi kerja, yaitu 1kg; 1,25kg; 1,5kg; 1,75 kg; dan 2kg. Lower heating vale diambil dari literatur adalah sebesar 17000 kJ/kg.

Dari gambar 4.17 dapat dilihat bahwa pembakaran cangkang kelapa dengan variasi feed rate yang berbeda menghasilkan daya panas yang berbeda. Untuk feed rate 1kg/menit menghasilkan 240,83 kW dan untuk feed rate sebesar 2 kg/menit akan menghasilkan daya panas 481,6 kW. Hal ini menggambarkan jumlah listrik yang dapat dimanfaatkan untuk proses selanjutnya.



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

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

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

1. Rasio udara dan bahan bakar pada proses ini berpengaruh pada berubahnya temperatur kerja FBC.
2. Untuk mendapatkan kondisi kerja FBC atau self sustaining combustion diperlukan dilakukan pemanasan awal dengan burner sekaligus pemasukan bahan bakar hingga mencapai temperatur 600 – 800 °C.
3. Proses pemanasan awal menggunakan suplai udara lebih kecil, yaitu 0,085 m³/s menghabiskan waktu lebih cepat, sekitar 126 menit jika dibandingkan dengan pengoperasian dengan suplai udara 0,095 m³/s selama 148 menit.
4. Pada percobaan dengan suplai udara 0,085 m³/s bahan bakar cangkang kelapa seberat 1,75 kg menghasilkan temperatur paling baik, sedangkan pada pengoperasian menggunakan suplai udara 0,095 m³/s feed reate sebesar 2kg menghasilkan rata-rata temperatur kerja yang paling tinggi.
5. Pada pengoperasian dengan laju aliran udara 0,085 m³/s menghasilkan temperatur rata-rata pembakaran di daerah freeboard T4 pada kondisi kerja self sustaining combustion sebesar 509,06 °C; sedangkan pada pengoperasian dengan laju aliran udara 0,095 m³/s menghasilkan temperatur sebesar 603,73 °C. Hal ini berarti suplai udara 0,095 m³/s melakukan pembakaran dengan udara berlebih yang lebih baik daripada pengoperasian dengan suplai udara hanya 0,085 m³/s

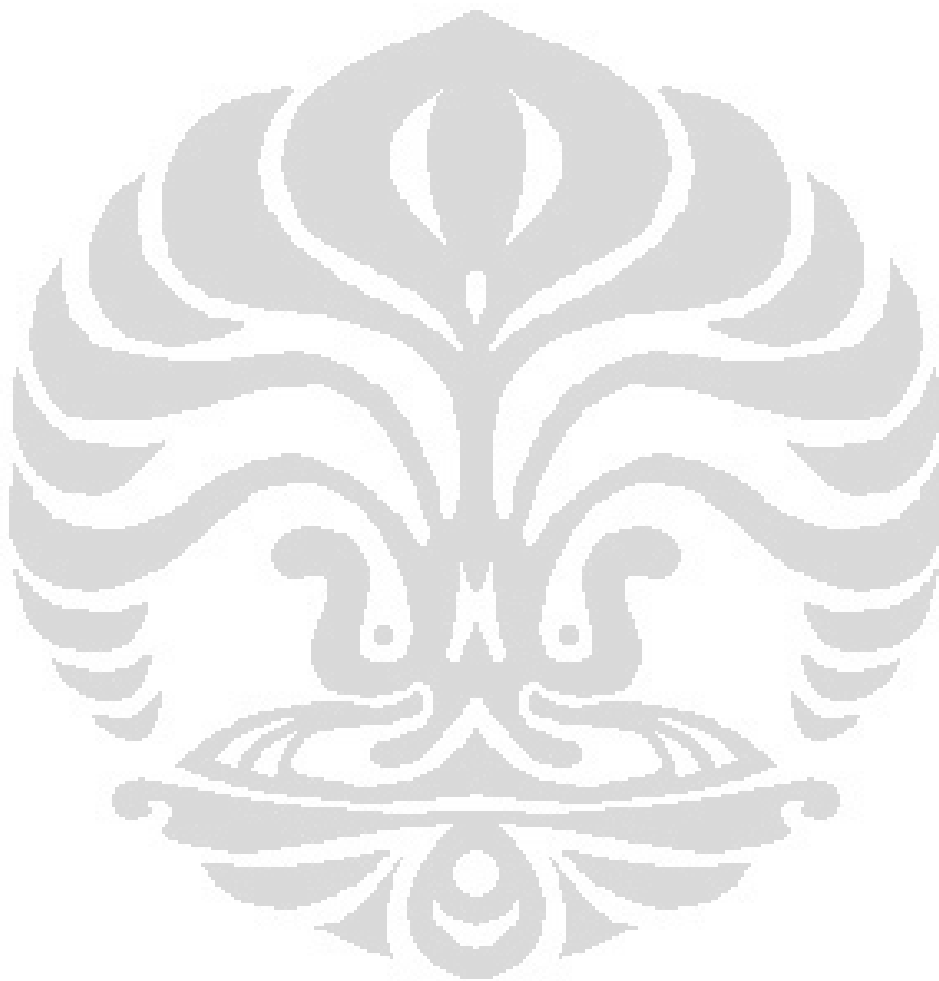
5.2 SARAN

Studi mengenai *Fluidized Bed Combustor* merupakan studi yang masih dapat berkembang di berbagai sisi, oleh karena itu penting dilakukan pengembangan prestasi dari alat FBC UI ini. Oleh karena itu, diberikan beberapa saran, agar penelitian ini dapat memiliki prestasi lebih baik lagi:

1. Peningkatan kapasitas burner dirasakan perlu agar pemanasan awal pasir dapat menjadi lebih cepat, sehingga kondisi kerja self sustaining combustion dapat dicapai dengan lebih cepat
2. Instalasi listrik pada laboratorium pengujian FBC sangat diperlukan untuk menjalankan peralatan FBC. Saat ini laboratorium menggunakan sumber listrik dari genset yang tidak stabil, sehingga terkadang tidak kuat untuk menalakan segala peralatan yang dibutuhkan sekaligus.
3. Sebelum dimasukkan ke dalam sistem FBC, cangkang kelapa dan ranting yang digunakan harus di potong-potong terlebih dahulu agar bisa mendapatkan ukuran lebih kurang sebesar 1 x 1 cm. Cara manual dengan palu dan golok yang biasa digunakan sangat memakan waktu yang tidak perlu, sehingga disarankan untuk menggunakan mesin pencacah yang sudah tersedia di pasaran.
4. Sistem mekanik feeder sudah baik, namun pada ujung lorong luncur feeder, terdapat bagian semen yang kasar, sehingga membuat umpanan biomassa yang diluncurkan tidak masuk ke dalam ruang pembakaran, namun tertahan di ujung luncuran tersebut. Diperlukan perhalusan di bagian tersebut.
5. Pencatatan data saat ini menggunakan data logger manual, salah satu data logger dari dua yang dimiliki saat ini sudah tidak berfungsi lagi, sehingga dari tujuh termokopel yang tersedia, hanya lima yang bisa digunakan. Pencatatan data dari lima termokopel tersebut dilakukan secara manual, sehingga membutuhkan konsentrasi tinggi peneliti untuk mencatat data tersebut setiap menit. Oleh karena itu disarankan agar digunakan alat pencatat otomatis seperti *Data Aquisition* yang dihubungkan ke komputer,

sehingga data dapat otomatis tercatat dan kesalahan pencatatan data dapat diminimalisir.

6. Diperlukannya fasilitas pemadam kebakaran dan peralatan P3K pada laboratorium ini, dikarenakan penelitian ini memerlukan analisis pada saat temperatur tinggi sehingga berpotensi kebakaran dan melukai.



DAFTAR PUSTAKA

1. Poeodiprodjo, Soetomo, *Sistem Fluidized Bed Untuk Pembangkit Energi Panas*, Media Teknik no 2 (1980) pp 29-35
2. Hedley, A.B., Garbett, E.S. & Bricki-Nigassa, M. *The Effect of Coal Particle Size on The Performance of Fluidized Bed Coal Combustor*. Sheffield Coal Research Unit, Department of Chemical Engineering and Fuel Technology, University of Sheffield.
3. Banzon, Julian. 1980 *The coconut as a Renewable Energy Source*. Philippine Journal of Coconut Studies.
4. Surjosatyo, Adi. 2010. *Evaluasi Kinerja Power Plant 30MW Dengan Teknologi Circulating Fluidized Bed Combustor Berbahan Bakar Batubara*. Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin 9, Palembang, 13-15 Oktober.
5. Najmi, Wan Ahmad. *Combustion Characteristics of Palm Shells and Palm Fibers Using an Inclined Grate Combustor*. Journal of Mechanical Engineering
6. Jamilatun, Siti. 2011. *Kualitas Sifat-sifat penyalaan dari Pembakaran Briket Tempurung Kelapa, Briket Serbuk Gergaji Kayu Jati, Briket Sekam Padi dan Briket Batu Bara*. Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Kejuangan, Yogyakarta, 22 Februari.
7. Hammad, M. 2006. *Fluidized Bed Combustion Unit for Oil Shale*. International Oil Shale Conference, Jordan, 7-9 November.
8. Basu, Prabir. "Combustion and Gasification in Fluidized Beds" (Taylor & Francis Group 2006).
9. Oka, Simeon N. "Fluidized Bed Combustion" (Marcel Dekker, Inc. 2004)
10. Bruce R. Munson, Donald F. Young, *Mekanika Fluida*, terj. Harinaldi, Budiarmo (Jakarta: Erlangga, 2003).
11. Surjosatyo, Adi. "Fluidized Bed Incineration of Palm Shell & Oil Sludge Waste." Tesis, Program Magister Engineering Universiti Teknologi Malaysia, 1998.
12. Howard, J. R., *Fluidized Beds – Combustion and Applications*, (London: Applied Science Publishers, 1983).

13. Kunii, Daizo & Octave Levenspiel, *Fluidization Engineering*, (New York: Butterworth-Heinemann, 1991).
14. Najmi, W. *Combustion Characteristics of Palm Kernel Shells Using an Inclined Grate Combustor*. Thermo-Fluids Department, University of Technology MARA, Malaysia.
15. Atmaja, Anton. “Modifikasi Feeder dan Uji Pembakaran Ranting dengan Feeding Bertahap Naik pada Fluidized Bed Combustor.” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2010.
16. Trisutrisno, R. arya. “Studi Karakteristik Pembakaran Biomassa (Tempurung Kelapa) *Fluidized Bed Combustor* UI dengan Kapasitas Maksimal.” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2010.
17. Hartono, Rudi. “Distribusi Temperatur Pembakaran Campuran Ranting Pohon dan Cangkang Kelapa pada Fluidized Bed Combustor UI”. Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2009.
18. Lintang, Arsyah. “Perbandingan Eksperimental Pembakaran Cangkang Kelapa Dan Ranting Pohon Dengan Menggunakan Fluidized Bed Combustor”. Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2009.
19. Darma, A.A Gde. “Pengujian Eksperimental Karakteristik Pembakaran Pada Fluidized Bed Combustor UI Menggunakan Bahan Bakar Ranting Pohon”. Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2009.
20. “Experimental Operating & Maintenance Manual – Fluidisation and Fluid Bed Heat Transfer Unit H692,” P. A. Hilton Ltd.
21. Christian, Hans. “Modifikasi Sistem Burner dan Pengujian Aliran Dingin *Fluidized Bed Incinerator* UI.” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2008.
22. Robert H. Perry, Don W. Green, *Perry’s Chemical Engineers’ Handbook 7th Ed.*, (Singapore: McGraw-Hill Int., 1997).

Lampiran

Lampiran 1 Hasil pembakaran cangkang kelapa dengan suplai udara 0,095 m³/s.

Tabel 1 Pembakaran Cangkang Kelapa dengan suplai udara 0,095 m³/s

min	T1	T2	T3	T4	T5	Bahan Bakar
1	28	24	24	24	24	
2	30	28	94	281	202	
3	31	31	100	275	202	
4	32	33	109	288	209	
5	32	34	113	280	210	
6	33	35	118	296	215	
7	33	37	122	290	218	
8	33	38	124	286	216	
9	34	40	130	268	213	
10	34	40	133	290	216	
11	35	40	133	286	218	
12	35	45	153	339	226	
13	35	67	378	309	225	
14	35	106	671	305	222	
15	35	109	650	326	224	
16	35	113	643	315	223	
17	35	116	638	311	227	
18	36	122	607	297	225	
19	36	124	604	315	224	
20	36	128	653	325	230	
21	36	133	782	307	225	
22	36	136	797	305	229	
23	36	136	789	317	233	
24	36	136	779	325	233	
25	36	142	633	343	236	
26	37	141	843	345	238	
27	37	141	845	357	238	
28	37	139	837	346	242	
29	37	139	837	353	241	
30	38	153	853	374	257	+0,25 kg
31	38	156	839	360	257	
32	38	160	845	335	245	
33	38	162	837	321	242	
34	38	162	847	321	242	
35	38	164	839	321	239	

36	38	169	841	319	235	
37	38	171	845	315	235	
38	38	172	840	308	235	+0,25 kg
39	37	169	792	291	239	
40	38	165	822	295	245	
41	37	178	801	292	248	
42	37	199	820	315	254	
43	38	209	766	247	231	
44	38	236	786	201	217	
45	38	297	824	200	226	
46	38	298	852	202	216	
47	38	308	812	303	253	
48	38	253	870	320	251	+0,5 kg
49	38	246	795	279	239	
50	38	217	567	211	214	
51	38	204	649	201	213	
52	39	245	746	220	223	
53	38	259	785	301	256	
54	38	232	647	228	225	
55	39	234	734	281	252	
56	39	232	717	307	264	
57	39	240	862	322	261	
58	39	241	859	305	250	
59	39	236	870	324	256	+0,75 kg
60	38	222	860	301	255	
61	38	226	807	265	235	
62	39	227	802	235	232	
63	39	248	847	335	239	
64	39	275	867	346	234	
65	39	285	837	310	238	
66	39	278	851	265	247	+0,5 kg
67	39	298	833	375	282	
68	39	401	891	370	301	
69	39	432	861	387	325	+0,75 kg
70	39	395	642	345	319	
71	39	339	593	433	389	
72	40	450	697	426	431	
73	40	457	663	595	469	
74	40	590	650	579	439	
75	40	553	569	403	324	
76	39	481	571	347	281	
77	40	437	607	314	260	
78	40	394	536	324	260	

79	40	407	542	311	255	+0,25 kg
80	40	374	473	316	252	
81	40	321	417	313	255	
82	40	243	657	290	251	
83	40	207	614	291	244	+0,5 kg
84	40	187	501	288	249	
85	39	182	444	317	257	
86	39	183	501	307	255	
87	39	182	474	291	256	
88	39	176	391	287	255	
89	40	186	557	340	282	
90	40	181	846	325	278	
91	39	208	520	368	309	
92	38	337	648	410	322	
93	38	466	792	347	312	
94	38	536	654	337	276	+0,5 kg (Burner dimatikan)
95	38	487	581	262	222	
96	38	375	477	222	206	
97	38	327	410	209	199	+0,25 kg
98	38	353	401	332	282	
99	38	530	376	335	273	
100	38	490	345	297	258	+0,25 kg
101	38	384	323	241	212	
102	38	342	324	237	219	
103	38	275	374	215	225	
104	37	258	334	217	217	+0,5 kg
105	37	248	324	216	208	
106	37	232	317	219	227	
107	38	227	306	221	230	
108	38	266	323	221	220	
109	38	245	329	217	217	+0,5 kg
110	38	217	297	202	199	
111	38	191	243	186	187	
112	38	179	239	175	189	
113	38	165	231	153	174	
114	38	151	241	149	164	
115	38	148	232	147	154	
116	38	150	261	147	158	
117	38	180	297	148	159	
118	38	200	333	257	153	
119	38	225	335	338	175	+0,75 kg
120	38	560	376	563	241	

121	38	613	359	725	344	
122	38	558	433	704	438	
123	39	652	549	698	456	
124	39	753	629	641	509	+0,75 kg
125	39	630	647	619	569	
126	39	574	614	433	606	
127	39	455	540	351	425	
128	39	360	451	256	341	
129	39	256	326	237	239	+0,75 kg
130	39	226	297	201	197	
131	39	200	257	178	175	
132	39	150	228	171	166	
133	39	142	222	163	161	
134	39	138	210	132	156	
135	39	135	189	122	125	
136	39	117	164	115	111	
137	39	111	153	110	107	
138	39	99	148	107	106	
139	39	91	139	103	104	
140	39	80	129	97	103	
141	39	81	123	92	106	
142	39	79	127	88	106	
143	39	77	129	91	121	
144	39	89	133	102	111	
145	39	86	138	122	106	
146	39	84	148	272	110	
147	39	102	156	429	184	+0,5 kg
148	39	219	179	576	251	
149	39	549	263	694	475	
150	39	890	409	759	507	+1,25 kg
151	39	864	430	706	533	
152	39	781	510	763	631	
153	39	659	567	866	650	+1,25 kg
154	39	692	633	923	702	
155	40	703	635	851	658	
156	40	645	662	877	733	+1,25 kg
157	41	699	693	845	746	
158	41	845	727	734	702	
159	41	537	657	517	621	
160	42	553	564	530	562	+2kg
161	42	662	635	589	477	
162	42	636	597	733	597	
163	42	664	829	739	760	

164	42	669	662	690	705	
165	42	695	688	618	685	
166	43	718	703	667	516	
167	43	714	706	649	569	+0,25 kg
168	43	720	711	694	519	
169	43	725	722	705	530	
170	43	993	750	655	570	
171	43	1030	709	758	560	
172	43	705	710	749	762	
173	43	712	722	703	676	
174	43	723	733	615	503	
175	44	718	726	604	510	+1,25 kg
176	44	712	719	594	562	
177	44	693	702	685	614	
178	44	579	580	576	459	
179	44	557	575	593	466	+1,25 kg
180	44	651	617	606	521	
181	44	675	670	584	562	
182	44	671	679	567	498	
183	45	668	676	559	490	
184	45	641	660	530	483	
185	45	501	560	501	470	+1 kg
186	45	550	598	468	403	
187	45	607	610	511	460	
188	45	591	609	528	458	
189	45	559	559	554	523	
190	45	551	568	641	586	+1 kg
191	45	566	580	551	491	
192	45	568	573	504	476	
193	44	552	558	481	416	
194	43	502	510	436	380	
195	43	482	485	429	372	
196	43	473	472	419	368	
197	43	458	463	414	365	
198	43	443	446	404	358	
199	43	423	430	388	347	
200	43	405	411	373	330	
201	43	390	401	368	328	
202	43	389	392	359	322	
203	43	350	355	349	315	

Lampiran 2 Hasil pembakaran cangkang kelapa dengan suplai udara 0,095 m³/s.

Tabel 2 Pembakaran cangkang kelapa dengan suplai udara 0,085 m³/s

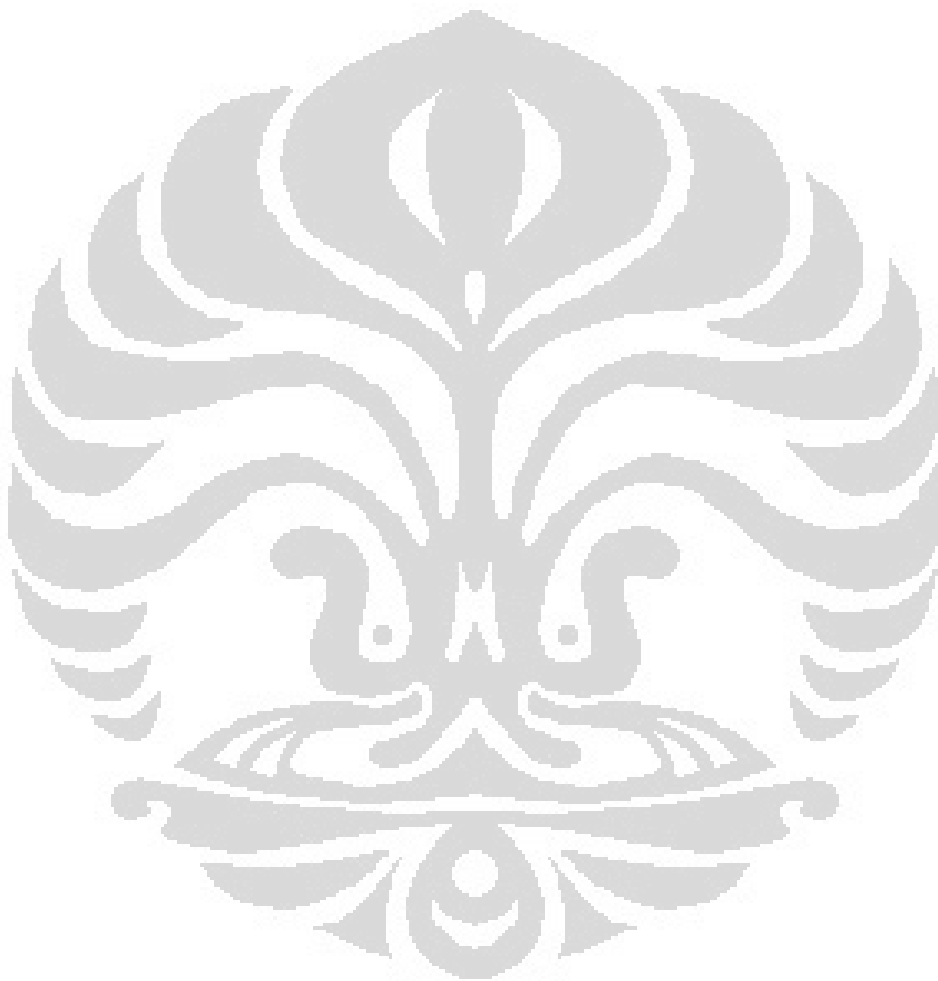
M enit	T1	T2	T3	T4	T5	Bahan Bakar
0	29	30	31	30	32	
1	30	108	811	221	194	
2	31	136	823	242	201	
3	32	147	829	252	204	
4	32	148	827	265	212	
5	32	155	824	267	216	
6	33	158	821	268	215	
7	33	160	831	260	219	
8	33	161	830	264	221	
9	34	165	828	276	223	
10	34	162	830	270	222	
11	34	165	827	267	224	
12	34	164	836	276	224	
13	34	164	833	272	222	
14	34	165	832	277	222	
15	35	165	831	273	226	
16	35	168	832	275	224	
17	35	167	834	278	226	
18	35	166	827	272	223	
19	35	168	827	263	222	
20	35	173	827	270	220	
21	35	175	827	273	223	
22	35	176	826	270	225	
23	35	176	830	267	224	
24	36	178	831	272	227	
25	36	177	825	273	227	
26	36	178	826	273	231	
27	36	177	828	272	228	
28	36	178	821	275	227	
29	36	180	829	271	229	
30	36	178	834	271	230	
31	36	169	830	291	238	+ 0,25 kg
32	36	163	837	295	238	
33	37	158	868	292	242	
34	37	149	858	290	243	
35	36	160	848	298	253	
36	36	191	780	280	242	
37	37	199	789	282	234	

38	37	202	791	282	236	
39	37	205	798	287	238	
40	37	207	803	290	244	
41	37	200	802	290	245	+0,25 kg
42	37	193	712	297	252	
43	37	185	747	293	259	
44	37	210	751	257	233	
45	37	244	741	241	223	
46	37	259	749	239	224	
47	37	240	675	219	223	+0,5 kg
48	37	241	818	285	264	
49	37	240	793	292	263	
50	37	248	776	238	232	
51	37	260	730	227	222	
52	37	283	760	233	224	
53	37	298	761	229	231	
54	37	291	806	255	251	
55	37	291	747	248	242	
56	37	295	862	315	287	
57	37	266	845	338	282	+0,75 kg
58	37	249	622	271	244	
59	37	253	722	245	239	
60	37	255	819	267	254	
61	38	273	856	288	270	
62	38	252	848	326	273	
63	38	241	872	329	282	
64	38	222	798	315	269	
65	38	217	782	304	272	+0,75 kg
66	38	241	789	271	260	
67	38	277	812	282	281	
68	38	297	765	260	259	
69	38	308	805	267	268	
70	38	302	870	263	259	
71	38	282	838	290	287	
72	38	478	920	358	380	
73	38	660	822	635	560	BURNER Dimatikan
74	38	372	924	449	378	
75	38	271	900	424	351	+1 kg
76	38	240	732	554	406	
77	38	228	916	404	415	
78	38	233	870	438	370	
79	38	225	858	395	335	

80	38	210	860	403	342	+1 kg
81	38	160	916	451	400	
82	38	255	922	470	433	
83	38	575	906	509	574	
84	38	352	883	434	428	
85	38	271	549	327	285	
86	38	224	389	262	236	+0,25 kg
87	38	183	362	243	225	
88	37	152	235	215	201	
89	37	162	189	285	174	+0,25 kg
90	38	340	253	343	246	
91	38	456	482	619	480	+0,25 kg
92	39	488	590	413	381	
93	39	364	484	340	318	+0,5 kg
94	39	398	474	482	440	
95	39	309	354	324	290	+0,5 kg
96	39	262	300	264	234	
97	39	206	216	230	207	
98	39	182	175	209	192	+0,75 kg
99	39	156	174	191	178	
100	38	135	183	178	170	
101	38	156	203	178	172	
102	38	137	198	172	187	
103	38	185	187	155	193	+0,75 kg
104	38	180	152	127	173	
105	38	119	153	128	160	
106	38	118	200	122	162	
107	38	131	178	280	275	+1 kg
108	38	150	203	416	437	
109	38	321	262	847	814	+1 kg
110	39	637	381	830	632	
111	39	673	613	712	640	
112	39	476	546	474	480	+1,25 kg
113	39	318	300	334	317	
114	39	257	320	280	273	
115	39	270	255	237	229	
116	39	434	383	605	409	
117	39	490	489	512	500	
118	40	407	416	422	440	+1,25 kg
119	40	362	373	337	304	
120	40	332	338	303	275	
121	40	292	296	276	253	
122	41	254	270	262	239	

123	41	215	241	234	219	+1,25 kg
124	41	194	233	251	281	
125	41	337	301	403	470	+1,5 kg
126	41	495	383	751	684	
127	41	534	486	527	512	
128	43	342	346	348	330	+1,5 kg
129	43	671	624	674	523	
130	44	495	483	753	684	
131	44	476	492	655	692	+1,75 kg
132	45	604	627	734	612	
133	46	774	789	678	547	
134	49	906	910	702	540	
135	49	935	960	752	603	
136	49	995	976	971	702	+1,75 kg
137	49	827	831	797	628	
138	48	733	891	663	561	
139	47	672	772	583	494	
140	48	716	854	597	489	
141	48	875	654	542	451	
142	48	800	616	568	470	
143	47	785	599	500	422	
144	46	699	560	481	409	
145	46	634	537	464	390	
146	46	561	510	446	376	
147	46	583	556	487	476	
148	46	596	575	475	403	
149	45	567	555	473	406	
150	44	547	528	457	404	
151	43	497	488	427	379	+2 kg
152	43	472	431	370	337	
153	42	274	344	295	281	
154	42	197	310	275	268	
155	43	380	657	492	465	
156	43	838	762	663	574	
157	43	704	623	552	461	
158	43	703	560	558	443	
159	43	648	530	480	393	
160	43	642	500	440	365	
161	43	580	515	390	392	
162	43	564	455	400	352	
163	43	461	437	378	335	
164	43	411	413	358	321	
165	43	338	383	335	302	

166	43	350	371	325	294	
167	43	333	354	314	289	
168	42	286	322	294	268	
169	42	268	265	251	240	
170	42	248	243	233	221	



Lampiran 3 Konversi Satuan

Massa

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

Panjang

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

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

$$1 \text{ kaki (ft)} = 3,048 \times 10^{-1} \text{ meter}$$

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

Waktu

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

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

Energi

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

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

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

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

Daya

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

$$1 \text{ kilowatt (kW)} = 1,00 \times 10^3 \text{ Watt}$$

$$1 \text{ megawatt (MW)} = 1,00 \times 10^6 \text{ Watt}$$

$$1 \text{ gigawatt (GW)} = 1,00 \times 10^9 \text{ Watt}$$

Tekanan

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

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

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

$$1 \text{ mm H}_2\text{O} = 9,795 \text{ Pa}$$

ANALYSIS OF AIR FLOW RATE VARIATION ON FLUIDIZED BED COMBUSTOR IN UNIVERSITY OF INDONESIA

Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M. Eng.; Adhika Anindita Tama

Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Engineering, University of Indonesia



Article Info

Revised on June 2011

Keywords:

Fluidized bed combustion
Biomass
Air supply

A B S T R A C T

In this study, the flow rate variation and the combustion feed were analyzed how they gave effects on fluidized bed combustor in University of Indonesia. The air supplies used for this experiment were 0,085 and 0,095 m³/s. Both air supply used with coconut shell as the bio fuel. Both condition tested to find the time and the fuel needed to achieve the self-sustaining combustion state. After the self-sustaining combustion achieved, the feed rate and its effect for the temperature are analyzed. It was found that the experiment with higher air supply gave higher output temperature in the freeboard area.

1. Introduction

The use of renewable energy is a very important issue nowadays. The decreasing of fossil resources of the world has forced humans to find other sources of energy. The energy not only has to be adequate in quantity, but also has to be clean for the environment. One of the technologies that suited those conditions is fluidized bed combustion. Introduced since the beginning of the 20th centuries, this technology has advantage in processing low calorie biomass which relatively hard to be processed with other technologies. This technology uses turbulence on solid fuel combustion which will results in higher rate of mass and heat transfers.

Within the last decade, several researches studied the modification of this fluidized bed combustion process including using different bed material, particle sizes, and different type of biomass. Generally those researches have purpose to achieve stable and longer working temperatures with less time and fuel to achieve the working condition. The stable and longer working conditions relies on several things, such as the fluidization of the bed, which is the result from the combination of the bed material, size of the bed particles and the air supply to fluidized the bed. There are several materials that can be used as a bed in fluidized bed combustion: silica sands, crushed coal, mica flakes, alumina, limestone and several kinds of catalysts. The sizes of those materials will also made effect on the fluidization of the bed. Other than the particle's size, shape and materials, the air supply also made effect on how the fluidization of the bed will become. The higher air supply and

velocity will result in flying material of the bed. This situation being used to construct the circulating fluidized beds. The circulating fluidized bed will circulate the bed material right after the material captured by the cyclone, it will deliver the material back to the combustion chamber. Different with the circulating bed, the moderate fluidizing velocity will results the bed to have bubbling regimes. This kind of fluidizing is used in University of Indonesia's Fluidized Bed Combustor.

In this work, there are two amounts of air supply is used. The first is around 3000 RPM achieve air supply amount of 0,085 m³/s. The other is using 3400 RPM which has 0,095 m³/s of air supplied in the system. Both of the amounts are tested with the coconut shell as a biomass in the fluidized bed combustor. The temperature results and its distribution through the chamber then are analyzed as well.

2. Experimental

2.1 Biomass materials

The biomass used in this experiment is coconut shells. The reason why this type of biomass is chosen is because of the high availability in Indonesia. In a year, Indonesia produces 1,1 million tons of coconut shells which equivalent to 18,7 GJ of heat per year (R. Arya Sutrisno, 2010). The coconut shells that will be processed in FBC have got to be hammered into little size. The target size for this material is around 7 mm by 7 mm with 3-5 mm thick.



Figure 1 Coconut Shells

2.2 Bed Particles

The bed particles used in this experiment are silica sands which has density of 2600 kg/m^3 . This type of sand has small specific heat, so it will be easier to elevate the temperature of this material. Other than that, this type of sand has high melting points around $1800 \text{ }^\circ\text{C}$, so it is very suitable for the fluidized bed combustion operation.

Table 1 bed particle properties

Properties	Silica Sand
Particle density (kg/m^3)	2600
Bulk density (kg/m^3)	1300
Thermal conductivity (Wm^{-1}K)	1.3
Tensile strength (MPa)	55
Compressive strength (MPa)	2070
Melting point ($^\circ\text{C}$)	1830
Modulus of elasticity (GPa)	70
Thermal shock resistance	Excellent

The other important thing is the size of the bed particles. In this experiment, the sizes of the silica sand is around $300 - 425 \mu\text{m}$. This sizes is achieved with mesh 40-50 AGSCO standard sieve.



Figure 2 Silica sand used in FBC

2.3 Thermocouple

There are five thermocouples placed in this reactor. With respect to the distributor the thermocouples are placed with this configuration:

- T1 = 31,5 cm under the distributor
- T2 = 3,5 cm over of the distributor
- T3 = 24,5 cm over the distributor
- T4 = 63,5 cm over the distributor
- T5 = 144,5 cm over the distributor

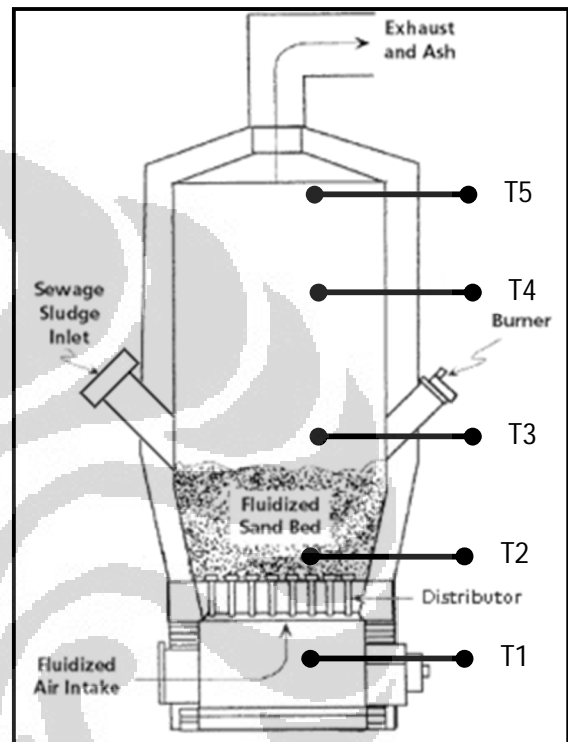


Figure 3 Fluidized Bed Combustion scheme

2.4 Analysis procedures

After all of the fuel are prepared and all of the appliances are correctly plugged in. The blower and burner can be turned on. After 30 minutes, the insertion of the biomass from the inlet can be started. The insertion of the biomass is slowly increased from the smaller weight to the higher weight. The weight of the biomass is around $0,25 \text{ kg} - 2 \text{ kg}$. After the bed temperature, which represented in T2 are showing the temperature around $400 \text{ }^\circ\text{C}$, the burner can be turned off. After this the insertion of the biomass still continued, but start over from the smaller weight again. This condition continues until there are no biomass supplies left. This set of actions are done twice, the first with air supply $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$ (3400 RPM) and second with air supply $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ (300 RPM). Right from the first minute, all of the temperatures data are have to be recorded manually with pen and paper.

3. Result and discussion

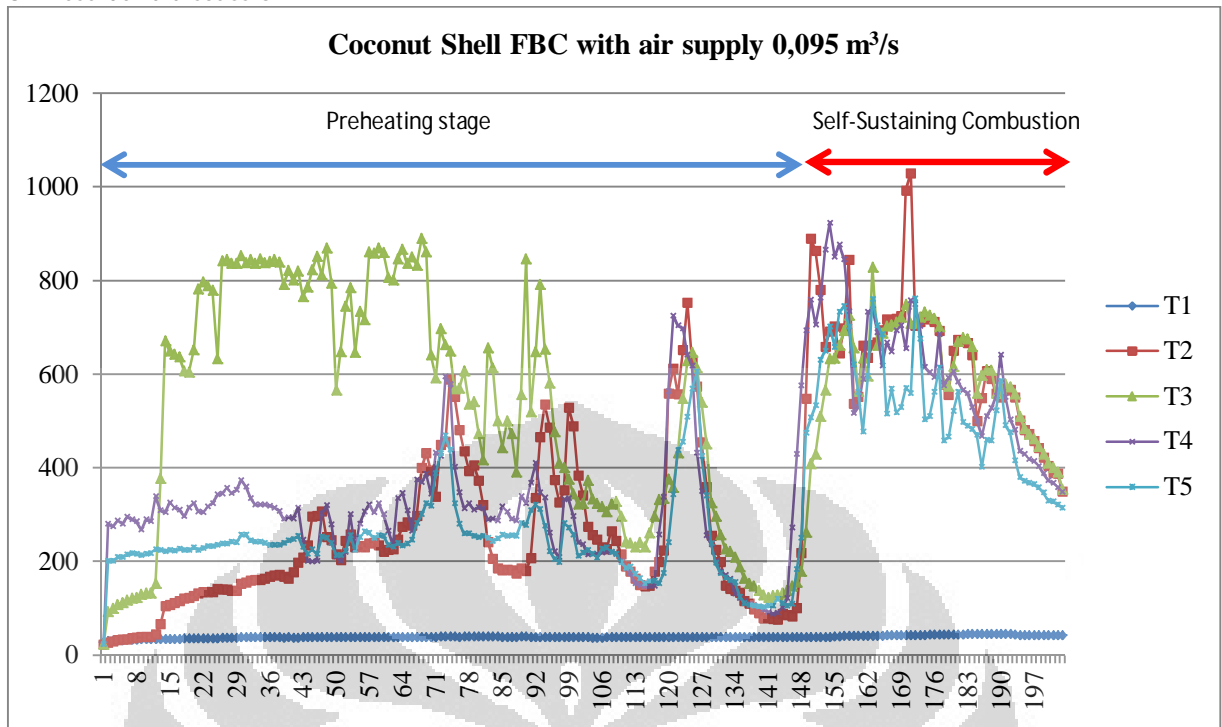


Figure 4 Coconut shell FBC with air supply 0,095 m³/s

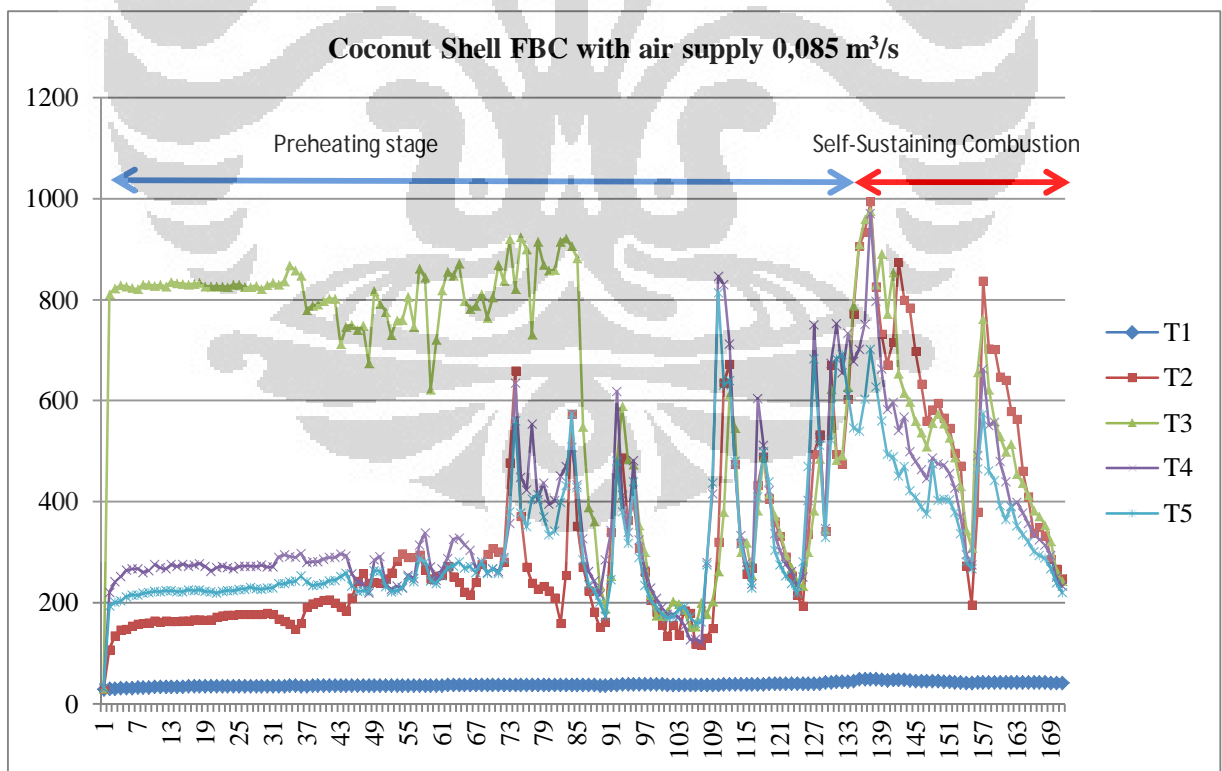


Figure 5 Coconut shell FBC with air supply 0,085 m³/s

On both experiment, in the last 40 minutes of the experiment showed the self-sustaining combustion state. This state usually works in the

temperatures over 500°C. In this state, the fluidization will be more balance and stable, that made the reaction of increasing average

temperature is immediate after it got fed with biomass. This state also showed a yellow-reddish color of the sand and smolder coconut shell. On experiment with air supply of 0,085 m³/s, this condition occurred starts from the 126th minute, and on the experiment with air supply of 0,095 m³/s, the condition started to occur from the 149th minute.

3.1 Preheating stage

The state before the self-sustaining combustion state are called preheating stage. This stage include 30 minutes of heating only with burners, and after that continued with biomass insertion as a supporting fuel with the burner still on until the bed temperatures reaches 400-500 °C. The insertion of the coconut shell are increasing slowly with multiplication of 0,25 kg from 0,25 kg to 1 kg. After the temperatures reached, the burners then turned off and continued with biomass insertion, slowly

increasing from 0,25 kg again to 2 kg amount of biomass. This stage of biomass insertion is continued until the self-sustaining combustion state reached.

Experiment with 0,085 m³/s air supplies finished the preheating stage in 125 minutes, while the experiment with 0,095 m³/s reached the self-sustaining combustion on 149th minute. Even though this data showed that using lower air supply made the self-sustaining combustion state reached faster, the amount of biomass insertion have to be made into considerations. The experiment with 0,085 m³/s need a lot more coconut shell in this process with 15 kg of this biomass, while the other experiment only need to use 8,5 kg of coconut shell. From this data we can learn that the process with 0,095 m³/s provide more excess air resulting more efficient reaction in this process. And the lack of excess air and oxygen in lower air supply will result in high amount of not yet fully burnt materials.

Table 2 Average temperatures in preheating stage

Average temperatures in preheating stage with 0,085 m ³ /s air supplied (°C)				
T1	T2	T3	T4	T5
37,03175	243,4603	648,1905	310,8095	278,6349
Average temperatures in preheating stage with 0,095 m ³ /s air supplied (°C)				
T1	T2	T3	T4	T5
37,79054	235,4459	518,6622	293,7635	239,6824

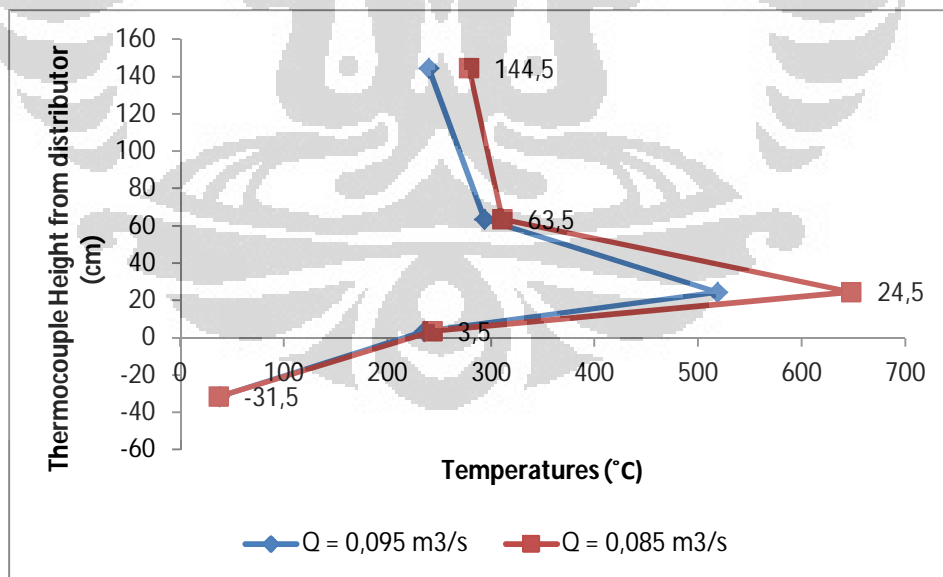


Figure 6 Temperature distribution in preheating stage

The graph above showed the average temperatures in preheating stage versus the thermocouple height placed in the FBC. With this graph, the distribution of the temperature will be easily seen. As shown on the graph, the average temperature of process with 0,085 m³/s turns

out to have higher temperature than the higher one. This condition occurred because there are more biomass used in the process with lower air supplied.

3.2 Self-sustaining combustion state

The self-sustaining combustion state in 0,085 m³/s air supplied experiment started from the 126th minute for 44 minutes, while the experiment with 0,095 m³/s lasted longer for 54 minutes started from the 149th. By the result of the experiment, this amount of time only limited only because of the limited amount of biomass provided in this project. In this project, there are no moments where the self-sustaining combustion state reaches its saturated point and cannot be fed anymore biomass.

From the amount of biomass consumed, the experiment with 0,095 m³/s used 8,5 kg of coconut shell in this whole self-sustaining combustion state, while the experiment with 0,085 m³/s only used 7 kg of coconut shells. This conditions made the average temperature of the self-sustaining combustion with 0,095 m³/s air supplied have higher temperatures. Other than that, the excess air provided by the air supplied made the combustion more complete and produced more heat rather than the experiment with 0,085 m³/s air supplied.

Table 3 Average temperatures in self-sustaining combustion state

T1	T2	T3	T4	T5
Average temperatures in self-sustaining combustion state with 0,085 m ³ /s air supplied (°C)				
44,51111	578,1333	557,2667	509,0667	439,7333
Average temperatures in self-sustaining combustion state with 0,095 m ³ /s air supplied (°C)				
42,76364	631,0545	596,5636	603,7273	525,1273

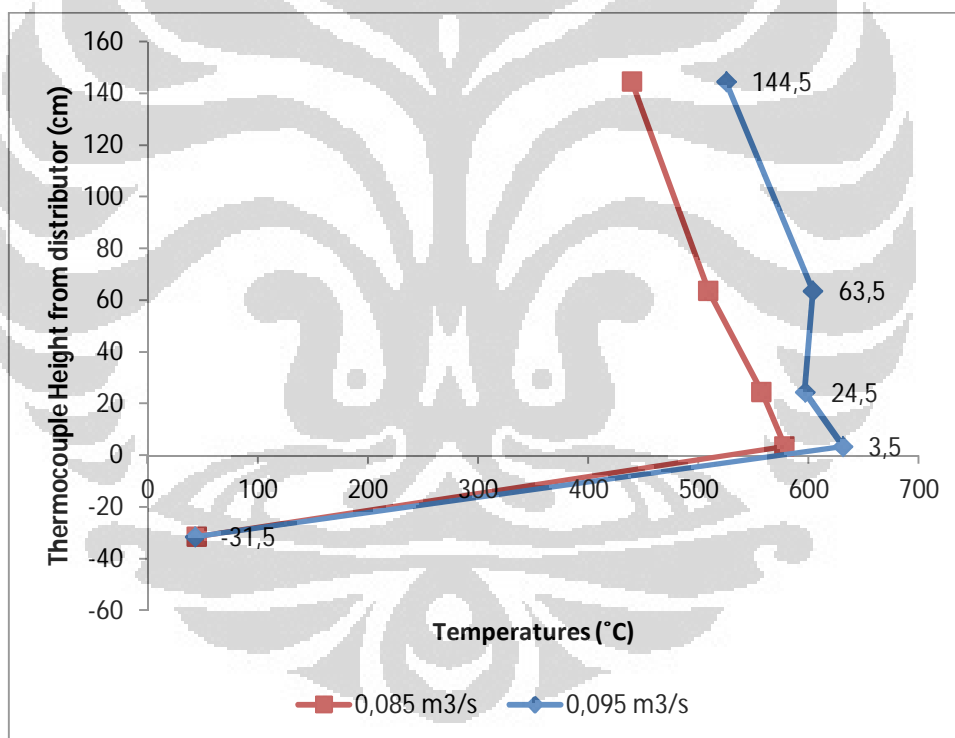


Figure 7 Temperature distribution in self-sustaining combustion state

The graph above showed the temperature distribution along the FBC in self-sustaining combustion state. The T1 data showed insignificant difference because this data only measure the temperature of the input air in the plenum area. On the experiment using 0,085 m³/s as supply air amount, the T1 temperature showed higher average temperature in 44,5 °C, rather than the other experiment in 42,7 °C. This condition happened because of the pressure of air when tries to penetrate the 'less fluidized' sand if compared to higher air supply value.

The average temperatures of T2 to T5 in 0,095 m³/s air supply experiment showed higher average temperatures rather than the experiment with 0,085 m³/s air supply. The average temperatures in 0,085 m³/s experiment are lower because at 154th minute the temperature decreased significantly. This happened because of the self-sustaining combustion state cannot handle the 2 kg of biomass insertion at that time. The time needed to dry and elevate the 2kg of biomass temperatures are longer with 0,085 m³/s air supplied.

3.3 Performance of self-sustaining combustion state.

When the self-sustaining combustion state reached, both experiment fed with 2kg insertion

of biomass coconut shells. The insertion happened on 160th minute in 0,095 m³/s experiment and happened on 151th minute in 0,085 m³/s experiment.

Table 4 Average temperature on 2kg of biomass combustion

Average temperature on 2kg of biomass combustion in 0,085 m ³ /s air supply				
T1	T2	T3	T4	T5
42,75	459,7	448,15	391,5	349
Average temperature on 2kg of biomass combustion in 0,095 m ³ /s air supply				
T1	T1	T1	T1	T1
42,14286	42,14286	42,14286	42,14286	42,14286

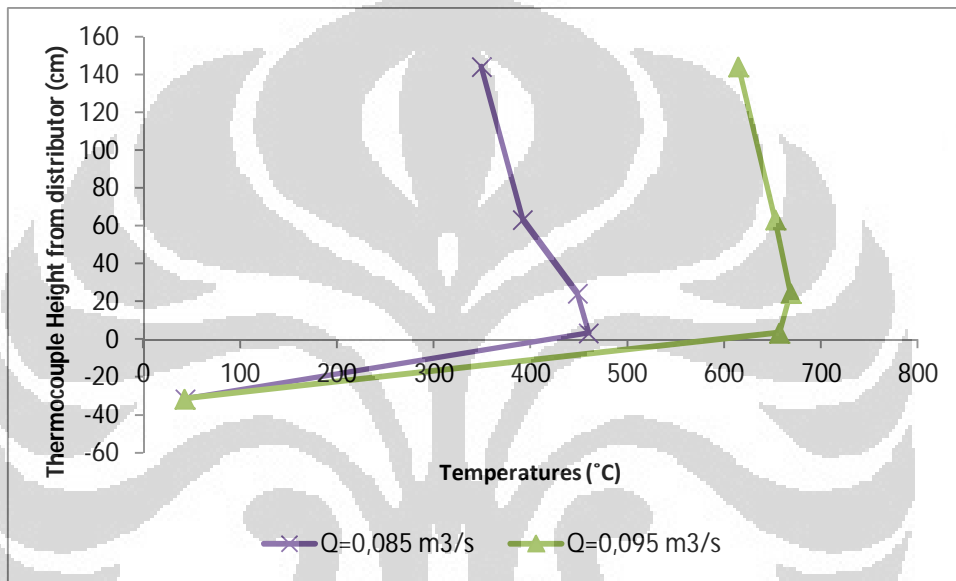


Figure 8 Average temperature distribution on 2kg of biomass combustion

The graph above showed the average temperature versus the height of thermocouple placed in FBC when both experiment reacts to the insertion of 2 kg of coconut shell biomass. The graphic showed significant difference between two air supply. On the experiment with 0,085 m³/s showed the average temperature in freeboard area (T4) is 391,5°C almost half of the experiment with 0,095 m³/s that showed 652,3°C. This similar trend also showed in the temperatures on other thermocouples. This difference showed that excess air from 0,095 m³/s air supply gave more excess air and oxygen which result in more complete combustion reacted and more heat produced rather than lower air supplied.

4. Conclusions

In our experimental work, gas flow rate variation was studied on its effect on the combustion process in fluidized bed combustor with coconut shell as a biomass fuel in University of Indonesia. The following results were concluded:

- The preheating stage using 0,085 m³/s achieved faster time but needs a lot more biomass. The time needed was recorded to be 126 minutes on lower air supply and 148 minutes on 0,095 m³/s air supply. The biomass needed is 8,5 kg for higher air supply and 15 kg for 0,085 m³/s air supply.
- With both experiment in the self-sustaining combustion state, 2kg of biomass insertions results in higher average temperature for 0,095 m³/s air supply.
- On average in self-sustaining combustion state, the average temperature of freeboard area (T4) showed highest in 603,73°C which used 0,095 m³/s air supply. The other experiment which used 0,085 m³/s only showed 509,6°C.

It could be stated that in our reactor system, the 0,095 m³/s air supply showed better performance rather than lower air supply. This condition happened because of the higher excess air resulted in more complete combustion which

achieved more heat produced and higher temperatures can be used.

5. Reference

- [1] Basu, Prabir. "Combustion and Gasification in Fluidized Beds" (Taylor & Francis Group 2006).
- [2] Oka, Simeon N. "Fluidized Bed Combustion" (Marcel Dekker, Inc. 2004)
- [3] Bruce R. Munson, Donald F. Young, *Mekanika Fluida*, terj. Harinaldi, Budiarto (Jakarta: Erlangga, 2003).
- [4] Surjosatyo, Adi. "Fluidized Bed Incineration of Palm Shell & Oil Sludge Waste." Tesis, Program Magister Engineering Universiti Teknologi Malaysia, 1998.
- [5] Howard, J. R., *Fluidized Beds – Combustion and Applications*, (London: Applied Science Publishers, 1983).
- [6] Kunii, Daizo & Octave Levenspiel, *Fluidization Engineering*, (New York: Butterworth-Heinemann, 1991).

