



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI KINERJA *FLUIDIZED BED COMBUSTION* DENGAN
DIVERSIFIKASI BAHAN BAKAR CANGKANG KELAPA KE-
PEMANFAATAN LIMBAH BIOMASA DAUN KERING DI
LINGKUNGAN KAMPUS UNIVERSITAS INDONESIA**

SKRIPSI

EGGI IKHSAN PERMATA

0806330011

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

DEPOK

Juli 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI KINERJA *FLUIDIZED BED COMBUSTION* DENGAN
DIVERSIFIKASI BAHAN BAKAR CANGKANG KELAPA KE-
PEMANFAATAN LIMBAH BIOMASA DAUN KERING DI
LINGKUNGAN KAMPUS UNIVERSITAS INDONESIA**

SKRIPSI

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

EGGI IKHSAN PERMATA

0806330011

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

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

**STUDI KINERJA *FLUIDIZED BED COMBUSTION* DENGAN DIVERSIFIKASI
BAHAN BAKAR CANGKANG KELAPA KE-PEMANFAATAN LIMBAH BIOMASA
DAUN KERING DI LINGKUNGAN KAMPUS UNIVERSITAS INDONESIA**

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi sarjana teknik pada program studi Teknik Mesin, Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia. Sejauh yang saya ketahui skripsi ini bukan tiruan atau duplikasi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di perguruan tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 14 Juni 2012



EGGI IKHSAN PERMATA

NPM : 0806330011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Name : Eggi Ikhsan Permata
NPM : 08106530011
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Studi Kinerja *Fluidized Bed Combustion* dengan Diversifikasi Bahan Bakar Cangkang Kelapa Ke-Pemanfaatan Limbah Biomasa Daun Kering di Lingkungan Kampus 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 Sutrisno, M.Eng

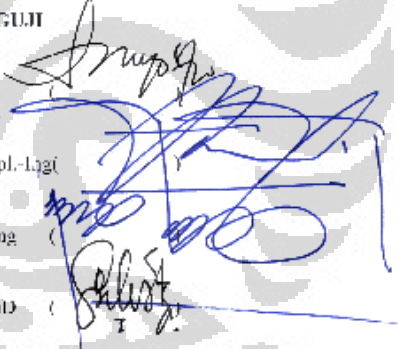
Penguji : Prof. Dr. I Made Kartika Dhiputra Dipl.-Ing

Penguji : Prof. Dr. Ir Bambang Soegiarto, M.Eng

Penguji : Prof. Ir. Yulianto S Nugroho, MSc, PhD

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 16 Juni 2012



KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Syukur Alhamdulillah saya ucapkan atas semua rahmat dan karunia ALLAH SWT beserta nabi Muhammad ,SWA yang menjadi suri tauladan umat manusia sehingga saya dapat menyelesaikan salah satu dari dari tahap kehidupan saya Mengerjakan tugas akhir/skripsi sebagai syarat mendapatkan gelar Sarjan Teknik, Jurusan Teknik Mesin Universitas Indonesia. Kedua Orang tua saya **Zam Syahrul** dan **Nevertiti,Spd** beserta adik-adik **Mutiara Ikhsani, Erki Putra, Zaverindo Adine, Dewinda Adine** yang telah memberikan semua yang ada untuk kebahagiaan dunia dan akhirat kita bersama.

1. Keluarga besar **Saoejah**, dan **Keluarga besar DTM 2008**.
2. **Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M.Eng**, selaku Dosen pembimbing dalam pelaksanaan skripsi ini, dan **Dr.Ir Nassrudin, M.Eng** terima kasih atas semua bantuan, ilmu, pengalaman beserta pola pikir yang telah bapak tanamkan kepada kami.
3. Seluruh dosen, mahasiswa, staf pengajar, dan karyawan DTM FTUI yang secara langsung atau tidak langsung memberikan pelajaran, wawasan dan informasi.
4. **Arya Yuwana, M Wiweko** selaku anggota penelitian kali ini, terima kasih atas usaha dan anggota muda penelitian **Sabrizal, Prayudi, dan Denis** ini hasil kita bersama teman
5. Keluarga kecil dilingkungan kontrakan **Rifki F dan Puji Akbar, CHP** dan teman teman **SMA terutam XE dan XII IA5**.
6. Seluruh pihak yang tidak dapat saya ucapkan satu persatu. Saya ucapkan terima kasih banyak atas segala hal

Akhir kata, saya berharap ALLAH SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu.

Depok , Juni 2012

Penulis

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

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

Nama : Eggi Ikhsan Permata
NPM : 0506330011
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

**STUDI KINERJA FLUIDIZED BED COMBUSTION DENGAN DIVERSIFIKASI BAHAN
BAKAR CANGKANG KELAPA KE-PEMANFAATAN LIMBAH BIOMASA DAUN
KERING DI LINGKUNGAN KAMPUS UNIVERSITAS INDONESIA**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : Juni 2012

Yang menyatakan,


(Eggi Ikhsan Permata)

ABSTRACT

Name : Eggi Ikhsan Permata
NPM : 0806330011
Study Program : Mechanical Engineering
Title : Fluidized Bed Combustion Performance Studies With Biomass
Fuel Diversification from Coconut Shell to Utilization Leaf Dry Around
University of Indonesia and Compared Both of Fuel After Self Sustain Take
Place

Fluidized bed combustion one of alternative to produce a thermal energy for drying and power generation, at the working condition of reactor, when the bed can continuously burn by its self and there are no flame in the bed. Coconut shell used for ignition pre-heating of the chamber and after self sustain combustion take place a fuel change into dry leaves to showed the characteristics between of a biomass and performances using a different fuel, result showed the temperature difference when using a both of fuel, Used a leaves dry biomass showed temperature drop after burner shut off but at several minute temperature increase with constant period and the temperature uniform, when using a coconut shell there are no temperature drop but after feeding a fuel a temperature drop highly increase and need more time to fuel react with bed

Key word : *Fluidized bed combustor, bed, Biomass, Coconut shell, leaf dry, proximate and ultimate*

ABSTRAK

Nama : Eggi Ikhsan Permata

NPM : 0806330011

Program studi : Mechanical Engineering

Judul : Studi Kinerja *Fluidized Bed Combustion* dengan Diversifikasi Bahan Bakar Cangkang Kelapa Ke-Pemanfaatan Limbah Biomasa Daun Kering yang Berada di Lingkungan Kampus Universitas Indonesia

Fluidized bed combustion merupakan salah satu alternatif untuk menghasilkan energi panas yang digunakan untuk pembangkitan energi maupun pengeringan, ketika suhu partikel pasir dari *bed* mencapai kondisi kerja suhu 500-800 derajat C maka keadaan ini disebut *self sustain combustion* dimana pasir dapat memberikan panas terhadap bahan bakar. Pada penelitian kali ini biomasa cangkang kelapa digunakan sebagai media pemanasan awal dan setelah kondisi kerja tercapai bahan bakar akan diganti dengan daun kering, ketika bahan bakar diganti akan terlihat karakteristik bahan bakar daun yang akan dibandingkan dengan cangkang kelapa pada penelitian sebelumnya, dengan demikian diversifikasi bahan bakar di sistem Fluidized bed combustion dapat dilakukan tanpa penurunan performa, sifat dari setiap bahan bakar akan didata menggunakan data akuisisi

Kata Kunci : *Fluidized bed combustor, hamparan, Biomasa, cangkang kelapa, daun kering proximate and ultimate,*

DAFTAR ISI

COVER	i
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 JUDUL PENELITIAN	1
1.2 LATAR BELAKANG MASALAH	1
1.3 PERUMUSAN MASALAHAN	3
1.4 TUJUAN PENELITIAN	4
1.5 BATASAN MASALAH	4
1.6 METODOLOGI PENELITIAN	5
1.7 SISTEMATIKA PENULISAN	6
BAB 2. LANDASAN TEORI	7
2.1 BAHAN BAKAR BIOMASA	7
2.1.1 KLASIFIKASI BIOMASA	8

2.2 TEKNOLOGI KONVERSI BIOMASA	15
2.2.1 PROSES BIOLOGIS.....	16
2.2.2 PROSES TERMAL.....	18
2.3 REAKSI PEMBAKARAN.....	22
2.3.1 FAKTOR-FAKTOR DALAM PROSES PEMBAKARAN.....	24
2.3.2 SEGIT TIGA UTAMA REAKSI PEMBAKARAN.....	24
2.4 FLUIDIZED BED COMBUSTION TECHNOLOGY.....	27
2.4.1 SISTEM PADA FLUIDIZED BED COMBUSTOR.....	29
2.4.2 PRINSIP KERJA FLUIDIZED BED COMBUSTION.....	32
2.5 KOMPONEN FLUIDIZED BED COMBUSTION.....	34
2.5.1 FLUIDIZATION VESSEL.....	34
2.5.2 SISTEM FEEDER.....	38
2.5.3 BURNER.....	39
2.5.4 BED MATERIAL.....	40
2.5.5 CYCLONE SEPARATOR.....	42
2.5.6 BLOWER.....	43
2.5.7 INSTRUMENTATION.....	44
2.6 SIFAT FLUIDISASI.....	46
2.6.1 Proses Fluidisasi.....	46
2.6.2 Kondisi Fluidisasi.....	47
2.6.3 Jenis-Jenis Fluidisasi.....	48
2.6.4 Parameter-Parameter Fluidisasi.....	50
BAB 3 PERSIAPAN DAN PROSEDUR PENGUJIAN.....	63
3.1 OUTLINE PENELITIAN.....	63
3.1.1 Bahan Bakar Biomassa.....	65
3.1.2 Pasir.....	69

3.1.3 Perlengkapan Dan Peralatan.....	73
3.2 STANDAR OPERASI ALAT PENGUJIAN.....	77
3.2.1 Sistem Feeder.....	77
3.2.2 Ring Blower.....	78
3.2.3 Sirocco Blowe.....	81
.3.2.3 Sistem Burner.....	81
3.3 PROSEDUR PENGUJIAN BAHAN BAKAR.....	85
.3.3.1 Rangkaian Alat Pengujian.....	86
.3.3.2 Prosedur Pengambilan Data Pembakaran.....	86
BAB 4 PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA.....	89
4.1 HASIL.....	89
4.1.1 Perbandingan Pembakaran murni cangkang kelapa dengan pembakaran menggunakan daun kering ketika self sustain terjadi dengan percobaan yang berbeda.....	89
4.1.2 Perbandingan Pembakaran murni cangkang kelapa dengan pembakaran menggunakan daun kering ketika self sustain terjadi dengan percobaan yang berbeda.....	97
4.1.3 Perbandingan Pembakaran murni cangkang kelapa dengan pembakaran menggunakan daun kering ketika self sustain terjadi dengan percobaan yang berbeda.....	103
.4.2 Analisa Karakteristik Daun yang Digunakan setelah kondisi self sustain...	111
4.2.1 Analisa karakteristik pembakaran daun kering sebagai bahan bakar ketika proses self sustain telah terjadi	111
4.2.2 Analisa karakteristik pembakaran daun kering sebagai bahan bakar ketika proses self sustain telah terjadi	116
4.3 Analisa.....	122
4.3.1 Analisa kondisi awal sebelum terjadinya kondisi Self Sustain.....	123

4.3.2	Analisa perbandingan bahan bakar daun dan cangkang percobaan 1 dengan penilitan Desember 2011.....	127
4.3.3	Analisa perbandingan bahan bakar daun dan cangkang percobaan 1 dengan penilitan Mei.....	137
4.3.4	Analisa perbandingan bahan bakar daun dan cangkang percobaan 1 dengan penilitan Desember 2011.....	141
4.3.5	Analisa perbandingan bahan bakar daun dan cangkang percobaan 1 dengan penilitan Desember 2011.....	151
4.3.6	Analisa Perbedaan Pembakaran cangkang kelapa dan daun kering	151
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....		153
5.1	KESIMPULAN.....	153
5.2	SARAN.....	154
DAFTAR PUSTAKA.....		156
LAMPIRAN.....		158

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	<i>Sistem Transportasi Biomasa</i>	7
Gambar 2.2	Diagram Teknologi konversi Biomasa.....	16
Gambar 2.3	Anaerobic Digestion.....	17
Gambar 2.4	Rangkaian Instalasi Biogas	17
Gambar 2.5	<i>Proses Gasifikasi</i>	21
Gambar 2.6	Proses Pergerakan Partikel Pada Bed.....	29
Gambar 2.7	Pengaruh Penurunan tekanan Terhadap Kecepatan Minimal	30
Gambar 2.8	Tipe Fluidisasi yang digunakan	31
Gambar 2.9	Tahapan Kerja Sistem Fluidized Bed Combustor.....	34
Gambar 2.10	<i>Ruang Bakar Utama Sistem Fluidized bed Combustor</i>	36
Gambar 2.11	Perilaku Gelembung Setip Jenis Distributor	37
Gambar 2.12	Distributor yang Digunakan Pada Fluidized bed Combustor UI	37
Gambar 2.13	Jenis Feeder yang Digunakan	38
Gambar 2.14	Screw Feeder yng digunakan	39
Gambar 2.15	Burner yang digunakan Pada Fluidized Bed Combustor	42
Gambar 2.16	Cyclone Separator Pada Fluidized Bed Combustor	43
Gambar 2.17	Ring Blower yang Digunakan pada Fluidized Bed Combustor	44
Gambar 2.18	Inverter	44
Gambar 2.19	Termokopel	45
Gambar 2.20	DAQ	46
Gambar 2.21	Skematik Fluidisasi	47
Gambar 2.22	Hubungan Penurunan Tekanan Terhadap Kecepatan Superfisial	48
Gambar 2.23	Kecepatan pada Fluidisasi	50
Gambar 2.24	Penurunan Tekanan terhadap Kecepatan Fluidisasi Minimum	51
Gambar 2.25	Proses Fluidisasi Pada Percobaan	51
Gambar 2.26	Jenis Gerakan Fluida Pada Setiap Jenis Reaktor.....	54
Gambar 2.27	Proses Fluidisasi dari Berbagai jenis regime.....	57
Gambar 2.28	Proses Fluidisasi dari Berbagai Jenis Regimes	58
Gambar 2.29	Daerah Batas Fluidisasi.....	62
Gambar 3.1	Tempurung Kelapa.....	66

Gambar 3.2	Daun Kering	69
Gambar 3.3	Pasir Silika dengan mesh tertentu	73
Gambar 3.4	Generator Set yang Digunakan	74
Gambar 3.5	Konfigurasi Termokopel	75
Gambar 3.6	Data Acquisition.....	75
Gambar 3.7	Timbangan dengan Nilai Maksimum 5 Kg.....	76
Gambar 3.8	Inverter IDF Blower.....	76
Gambar 3.9	Sistem Feeder pada Fluidized Bed Combustor	77
Gambar 3.10	Ring Blower	79
Gambar 3.11	IDF Blower(sirocco)	81
Gambar 3.12	Bagian -bagian Temperatur Hi-tempmixed	84
Gambar 4.1	Grafik Pembakaran Cangkang untuk Pemanasan Awal (mei 2011).....	91
Gambar 4.2	Grafik Pembakaran Cangkang untuk Pemanasan Awal (Mei 2012)	92
Gambar 4.3a	Grafik Keadaan Self Sustain Menggunakan Cangkang (mei 2011)	93
Gambar 4.3b	Grafik Pembakaran Daun setelah Self Sustain tercapai (Mei 2012).....	93
Gambar 4.4a	Grafik Rata-Rata Temperatur Self Sustain T2 dan T3(mei 2011)	94
Gambar 4.4b	Grafik Rata-Rata Temperatur T2,T3,dan T4 self Sustain(Mei 2012).....	95
Gambar 4.5a	Grafik Pemanasan Awal Mengguankan cangkang(21 Mei 2012).....	98
Gambar 4.5b	Grafik Pemanasan Awal Mengguankan cangkang Untuk Daun Kering.....	99
Gambar 4.6a	Grafik Temperatur Self Sustain menggunakan Cangkang (21Mei 2012).....	100
Gambar 4.6b	Grafik Temperatur Self Sustain menggunakan Daun Kering (Mei 2012).....	100
Gambar 4.7a	Grafik Rata-Rata Temperatur T2, T3, dan T4 self Sustain menggunakan daun kering (Mei 2012).....	101
Gambar 4.7b	Grafik Rata-Rata Temperatur T2, T3, self Sustain Menggunakan Cangkang (Mei 2012).....	102
Gambar 4.8a	Grafik Pemanasan Awal Menggunakan Cangkang Kelapa (Mei 2012)	104

Gambar 4.8b	Grafik Pemanasan Awal Daun Kering Menggunakan Cangkang (Des 2011).....	105
Gambar 4.9a	Proses Self Sustain Menggunakan Cangkang Kelapa (des 2011).....	106
Gambar 4.9b	Proses <i>Self Sustain</i> Menggunakan Daun Kering (Mei 2012).....	107
Gambar 4.10a	Grafik temperatur T2,T3,dan T4 Cangkang Kelapa (des 2011).....	108
Gambar 4.10b	Grafik temperatur T2,T3,dan T4 Self Sustain Menggunakan Cangkang Kelapa(des 2011).....	108
Gambar 4.11a	Grafik Pembakaran menggunakan cangkang setelah Self Sustain (des 2011).....	109
Gambar 4.11b	Grafik Pembakaran menggunakan Daun Kering setelah Self Sustain (Mei 2012).....	110
Gambar 4.12	Grafik Pembakaran menggunakan daun kering setelah tercapai kondisi self sustain dengan cangkang kelap untuk pemanasan awal.....	112
Gambar 4.13a	Grafik Pembakaran menggunakan daun kering setelah tercapai kondisi self sustain dengan cangkang kelap untuk pemanasan awal (percobaan 1).....	113
Gambar 4.13b	Grafik Pembakaran menggunakan daun kering setelah tercapai kondisi self sustain dengan cangkang kelap untuk pemanasan awal(Percobaan 2).....	114
Gambar 4.14	Grafik Pembakaran menggunakan daun kering setelah tercapai kondisi self sustain dengan cangkang kelap untuk pemanasan awal(Percobaan 2).....	116
Gambar 4.15	Grafik Pembakaran menggunakan daun kering setelah tercapai kondisi self sustain dengan cangkang kelap untuk pemanasan awal(Percobaan 4).....	117
Gambar 4.16	Grafik Pembakaran pemanasan awal pada percobaan 2 dan percobaan 4.....	119
Gambar 4.17	Grafik Pembakaran menggunakan daun kering setelah tercapai kondisi self sustain dengan cangkang kelap untuk pemanasan awal Percobaan 4 dan Percobaan2.....	120
Gambar 4.18	Kondisi Kerja FBC UI.....	122
Gambar 4.19	Pengaruh Mesh Terhadap waktu Untuk mencapai kondisi self Sustain.....	122

Gambar 4.20	Pengaruh Mesh terhadap temperatur relase.....	124
Gambar 4.21	Grafik Pembakaran Diversifikasi cangkang ke daun kering ketiks self sustain tercapai.....	127
Gambar 4.22	Grafik Pembakaran Cangkang kelapa tanpa diverisifikasi bahan bakar.....	128
Gambar 4.23	Grafik Temperatur(T2,T3,T4) 20 menit sebelum terjadi kondisi self sustin mengukan cangkang kelapa.....	129
Gambar 4.24	Grafik Temperatur (T2,T3,T4) 20 menit ketika dilakukan diversifikasi cangkang ke daun kering sebelum kondisi self sustain tercapai.....	129
Gambar 4.25	Grafik Temperatur(T2,T3,T4) 20 menit sebelum terjadi kondisi self sustin mengukan cangkang kelapa.....	130
Gambar 4.26	Grafik Temperatur (T2,T3,T4) 20 menit ketika dilakukan diversifikasi cangkang ke daun kering setelah kondisi self sustain tercapai.....	130
Gambar 4.27	Grafik Temperatur(T2,T3,T4) 5 menit sebelum terjadi kondisi self sustin mengukan cangkang kelapa.....	132
Gambar 4.28	Grafik Temperatur (T2,T3,T4) 5 menit ketika dilakukan diversifikasi cangkang ke daun kering sebelum kondisi self sustain tercapai.....	133
Gambar 4.29	Grafik Temperatur(T2,T3,T4) 5 menit Setelah terjadi kondisi self sustin mengukan cangkang kelapa.....	133
Gambar 4.30	Grafik Temperatur (T2,T3,T4) 5 menit ketika dilakukan diversifikasi cangkang ke daun kering setelah kondisi self sustain tercapai.....	134
Gambar 4.31	Perbandingan rata-rata temperatur raung bakar cangkang kelapa vs daun kering.....	135
Gambar 4.32	Perbandingan rata-rata temperatur raung bakar cangkang kelapa vd daun kering ketika self sustain tercapai.....	135
Gambar 4.33	Grafik Pembakaran Cangkang kelapa tanpa diverisifikasi bahan bakar.....	136
Gambar 4.34	Grafik Pembakaran Diversifikasi cangkang ke daun kering ketiks self sustain tercapai.....	137
Gambar 4.35	Grafik Temperatur (T2,T3,T4) 20 menit ketika dilakukan diversifikasi cangkang ke daun kering sebelum kondisi self sustain tercapai.....	138

Gambar 4.36	Grafik Temperatur(T2,T3,T4) 20 menit sebelum terjadi kondisi self sustain menggunakan cangkang kelapa	139
Gambar 4.37	Grafik Temperatur (T2,T3,T4) 20 menit ketika dilakukan diversifikasi cangkang ke daun kering setelah kondisi self sustain tercapai.....	139
Gambar 4.38	Grafik Temperatur (T2,T3,T4) 20 menit ketika cangkang setelah kondisi self sustain tercapai.....	140
Gambar 4.39	Grafik Pembakaran Cangkang kelapa tanpa diversifikasi bahan bakar	142
Gambar 4.40	Grafik Pembakaran Diversifikasi cangkang ke daun kering ketiks self sustain tercapai	143
Gambar 4.41	Grafik Temperatur(T2,T3,T4) 20 menit sebelum terjadi kondisi self sustain mengunakan cangkang kelapa(desemebr 2011).....	144
Gambar 4.42	Grafik Temperatur (T2,T3,T4) 20 menit ketika dilakukan diversifikasi cangkang ke daun kering sebelum kondisi self sustain tercapai.....	145
Gambar 4.43	Grafik Temperatur(T2,T3,T4) 20 menit Seetelah terjadi kondisi self sustain mengukan cangkang kelapa	145
Gambar 4.44	Grafik Temperatur (T2,T3,T4) 20 menit ketika dilakukan diversifikasi cangkang ke daun kering setelah kondisi self sustain tercapai.....	146
Gambar 4.45	Grafik Temperatur(T2,T3,T4) 5 menit sebelum terjadi kondisi self sustain mengukan cangkang kelapa.....	148
Gambar 4.46	Grafik Temperatur (T2,T3,T4) 5 menit ketika dilakukan diversifikasi cangkang ke daun kering sebelum kondisi self sustain tercapai.....	148
Gambar 4.47	Temperatur Ruang Bakar 5 menit Setelah <i>Self Sustain</i> (Cangkang dan Daun).....	149
Gambar 4.48	Temperatur Ruang Bakar 5 menit Setelah <i>Self Sustain</i> (Cangkang).....	149
Gambar 4.49	Temperatur Rata - Rata Ruang Bakar Daun vs Cangkang.....	150
Gambar 4.50	Temperatur Rata - Rata Setelah <i>Self Sustain</i> Daun vs Cangkang.....	150

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Analisa Proksimat dn Ultimat Drying pine residu.....	9
Tabel 2.2	Element Analyzer Equipment.....	9
Tabel 2.3	Data Analisa Proksimat	11
Tabel 2.4	<i>Perkiraan Kadar Kelembapan Biomasa</i>	12
Tabel 2.5	<i>Efek Kadar kelembapan terhadap efisiensi pembakaran</i>	12
Tabel 2.6	Ultimate Analisis Beberapa Jenis Biomasa	13
Tabel 2.7	Proximate Analisis Beberapa Jenis Biomasa.....	13
Tabel 2.8	<i>Nilai LHV Beberapa Jenis Biomasa</i>	14
Tabel 2.9	Jenis-Jenis Bahan Bakar	25
Tabel 2.10	<i>Perbedaan sitem BFBC dan CFBC</i>	32
Tabel 2.11	Increasing Size and density	61
Tabel 3.1	Potensi Biomasa Indonesia.....	66
Tabel 3.2	Sifat Biomasa Indonesia	68
Tabel 3.3	Panas spesifik dari Berbagai Subatansi	70
Tabel 3.4	Sifat Fisik, Thermal dan Mekanika Pasir Silikia.....	71
Tabel 3.5	Distibusi Ukuran Pengayakan Pasir	72
Tabel 3.6	Spesifikasi Motor Feeder.....	77
Tabel 3.7	Spesifikasi Teknik Ring Blower.....	80
Tabel 3.8	Spesifikasi Teknis Hi-Temperature Premixed Buner.....	85
Tabel 4.1	Rata-Rata Temperatur Pembakaran Cangkang Kelapa.....	96
Tabel 4.2	Rata-Rata Temperatur pembakaran Daun Kering.....	96
Tabel 4.3	Rata-Rata Temperatur pembakaran Daun Kering.....	102
Tabel 4.4	Rata-Rata Temperatur pembakaran Cangkang Kelapa.....	102
Tabel 4.5	Rata-Rata Temperatur pembakaran Daun Kering	109
Tabel 4.6	Rata-Rata Temperatur pembakaran Daun Kering	110

Tabel 4.7	Feeding Bahan Bakar Pada Percobaan 2	111
Tabel 4.8	Feeding Bahan Bakar Pada Percobaan 1	111
Tabel 4.9	Rata-Rata Temperatur pembakaran Daun Kering Percobaan 2.....	115
Tabel 4.10	Rata-Rata Temperatur pembakaran Daun Kering Percobaan 1.....	115
Tabel 4.11	Rata-Rata Temperatur pembakaran Daun Kering Percobaan 4.....	121
Tabel 4.12	Rata-Rata Temperatur pembakaran Daun Kering Percobaan 2.....	121
Tabel 4.13	Analisa Ultimate dan Proximate dari Berbagai Sumber.....	126
Tabel 4.14	Analisa Ultimate dan Proximate dari Berbagai Sumber tekMira.....	127
Tabel 4.15	Temperatur Rata-Rata Sebelum dan sesudah Self Sustain (Cangkang)	131
Tabel 4.16	Temperatur Rata-Rata Sebelum dan sesudah Self Sustain (Daun).....	131
Tabel 4.17	Temperatur dite Rata-Rata Sebelum dan sesudah Self Sustain (Cangkang) 140	
Tabel 4.18	Temperatur egi Rata-Rata Sebelum dan sesudah Self Sustain (Daun).....	140
Tabel 4.19	Temperatur Rata-Rata Sebelum dan sesudah Self Sustain (Daun 2).....	147
Tabel 4.20	Temperatur Rata-Rata Sebelum dan sesudah Self Sustain (Cangkang M).....	147

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Judul Penelitian

Studi Kinerja *Fluidized Bed Combustion* dengan Diversifikasi Bahan Bakar Cangkang Kelapa Ke-Pemanfaatan Limbah Biomasa Daun Kering yang Berada di Lingkungan Kampus Universitas Indonesia

1.2 Latar Belakang Masalah

Potensi biomasa yang terdapat di lingkungan Universitas Indonesia dapat dimanfaatkan untuk mengembangkan barang yang selama ini tidak bernilai dan tidak dimanfaatkan menjadi suatu yang dapat menghasilkan energi ataupun suatu pengolahan biomasa lanjutan yang dapat memberikan alternatif dan tambahan untuk penyediaan energi yang telah ada, dalam hal ini energi panas yang dapat dihasilkan dari reaksi kimia biomasa dengan udara dan percikan dapat menghasilkan energi panas yang dapat digunakan sebagai media pengering dan pembangkitan daya.

Biomasa seperti sampah organik dan hasil hutan seperti ranting kayu, daun, rumput, dan semak belukar yang terdapat di lingkungan kampus Universitas Indonesia merupakan masalah jika tidak ditangani dengan serius, namun jika kita mengetahui bahwa potensi dari sampah tersebut dapat dimanfaatkan dan diolah untuk menghasilkan suatu produk ataupun energi maka nilai sampah yang selama ini ada dapat dikomersilkan.

Energi biomasa merupakan energi yang ramah lingkungan dan dapat diperbaharui dapat digunakan sebagai energi tambahan dan jika digunakan dengan skala besar dapat menggantikan energi fosil yang telah ada. Adanya nilai kalor yang terkandung didalam biomasa tersebut merupakan pemicu untuk mengembangkan suatu sistem yang dapat mendukung pengembangan penggunaan biomasa tersebut di lingkungan kampus yang terdapat beberapa hutan kota dan

hutan kampus yang dapat dimanfaatkan untuk pengolahan dan pemanfaatan energi biomasa tersebut. Potensi itu harus dikembangkan dan diproses secara berkelanjutan sehingga tujuan konversi energi tersebut dapat tercapai.

Fluidized Bed Combustion adalah suatu reaktor pembakaran yang dikembangkan untuk pemanfaatan biomasa dengan berbagai jenis karakteristik bahan bakar yang dapat digunakan dalam teknologi ini. Perkembangan FBC ini diperkenalkan pertama kali oleh Skinner pada tahun 1970. Perkembangan kemampuan teknologi ini adalah memanfaatkan media pemanas dalam hal ini pasir kuarsa/ silika yang dibakar terlebih dahulu menggunakan *burner* dimana pasir ini mengalami turbulensi seolah-olah pasir ini bergerak seperti fluida dengan bantuan sebuah *FD fan blower*, dengan bantuan bahan bakar pemicu sehingga ketika temperatur dari pasir suhu 500-600 derajat maka *burner* akan dimatikan dan bahan bakar akan dimasukkan secara berkala sesuai dengan penurunan temperaturnya dan terjadi pembakaran sendiri oleh pasir dimana *heat transfer* akan terjadi pada reaksi ini.

Keuntungan menggunakan teknologi FBC adalah bahan bakar dengan nilai LHV rendah, *moisture content* tinggi dan *Volatile matter* yang tinggi, dapat ditampung dalam sistem ini, dikarenakan adanya pasir yang memiliki suhu tinggi dan udara yang bergerak secara turbulensi sehingga proses *heat* dan *mass transfer* sangat cepat terjadi pada sistem ini, selain itu luas area reaksi antara bahan bakar akan mempengaruhi reaksi pembakaran ditambahn sistem *burner* yang digunakan hanya bersifat sementara dimana bekerja sampai kondisi kerja pasir tercapai, selain itu pengoperasian sistem FBC ini tidak sesulit pemanfaatan reaktor yang lain, dengan kontrol yang tepat dan pengumpanan yang teratur, maka teknologi ini merupakan teknologi *realible* yang wajib digunakan, disamping itu emisi yang ditimbulkan dari penggunaan biomasa dengan teknik BFC bisa dikatakan *zero emission* dikarenakan suhu tinggi pada reaktor akan memutus senyawa S, dan mengurangi senyawa N ditambah bantuan gas *cylone* akan membantu mengurangi emisi apalagi jika sistem menggunakan *water scrubber* sehingga partikel pengotor akan jatuh bersama air.

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

1.3 Perumusan Masalah

Pemanfaatan energi terbarukan sudah saatnya digunakan di Indonesia yang memiliki potensi energi terbarukan seperti Biomasa yang besar, untuk melestarikan energi fosil sembari mengembangkan energi terbarukan yang dapat menggantikan bahan bakar fosil yang memiliki nilai LHV yang besar dan memiliki fleksibilitas tinggi yang selama ini menjadi tantangan untuk mengembangkan biomasa, hal ini diharapkan dapat mengurangi penggunaan bahan bakar konvensional dan sebagian kebutuhan akan energi tersebut dapat diganti dengan energi terbarukan seperti biomasa.

Dalam masalah ini FBC menawarkan teknologi yang dapat menggantikan penggunaan batu bara dan diesel untuk pembangkit listrik dan penggunaan bahan bakar listrik sebagai media pengering, teknologi ini tidak untuk menggantikan peran dari Bahan Bakar Minyak, oleh karena itu diperlukan penelitian dan pengembangan terhadap teknologi ini untuk mengetahui performa dan karakteristik dari bahan bakar yang digunakan hal ini diharapkan nantinya akan memberikan pengaruh terhadap penggunaan alat ini, dalam hal ini kami akan menguji karakteristik dari batok kelapa yang digunakan sebagai bahan bakar pemanasan awal dan Daun Kering setelah kondisi *self sustain* tercapai dan menghitung panas buang yang akan dimanfaatkan untuk pengeringan ataupun sistem boiler.

Universitas Indonesia (UI) memiliki potensi untuk mengembangkan energi mandiri dengan memanfaatkan limbah biomasa dan plastik yang terdapat dalam lingkungan kampus, untuk itu kami berinisiatif menggunakan biomasa daun kering yang terdapat dalam kampus, potensi daun kering yang didukung dengan keadaan topografi UI yang dikelilingi oleh pohon- pohon penghasil energi, energi ini dapat digunakan sebagai pembangkit energi mandiri kampus ketika kapasitas reaktor ditingkatkan.

1.4 TUJUAN PENELITIAN

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

1. Mengetahui karakteristik aktual pembakaran biomasa dengan menggunakan *fluidized bed combustor* yang ada di Universitas Indonesia, setelah dilakukan optimalisasi perangkat percobaan, berdasarkan evaluasi penelitian sebelumnya.
2. Mengetahui karakteristik pembakaran menggunakan daun kering dimana pemanasan awal menggunakan tempurung kelapa.
3. Menguji performa *Induceed fan blower* yang digunakan untuk menghisap udara hasil pembakaran yang digunakan untuk pengeringan dan mengurangi tekanan negatif yang terjadi pada sistem *feeder*.
4. Menggunakan *exhaust* gas pada reaktor untuk sistem pengering bahan bakar.

1.5 BATASAN MASALAH

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

1. Penelitian yang dilakukan hanya mencakup eksperimental pembakaran yang tujuannya untuk mengetahui karakteristik pembakaran dengan bahan bakar biomasa (pemanasan awal serta *self sustained combustion*), sedangkan penghitungan nilai *heat rate output* dari proses pembakaran, perhitungan efisiensi alat, dan emisi gas buang yang dihasilkan tidak akan dibahas secara mendalam dalam tulisan ini.

2. Bahan bakar biomasa yang digunakan adalah tempurung kelapa dengan ukuran yang bervariasi di setiap percobaan yang hanya digunakan sebagai pemanas awal dan selanjutnya bahan bakar daun akan digunakan sebagai bahan bakar primer, daun yang digunakan berasal dari limbah yang terdapat di lingkungan Universitas Indonesia.
3. Perbandingan dilakukan didasarkan pada perbandingan kondisi reaktor ketika menggunakan daun kering dan dibandingkan dengan penggunaan cangkang kelapa

1.6 METODOLOGI PENELITIAN

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

1. Persiapan
 - 1.1. Identifikasi masalah yang akan dibahas
 - 1.2. Penelusuran literatur
2. Pemilihan bahan bakar yang akan digunakan serta menentukan variasi umpan bahan bakar daun kering dan variasi waktu percobaan
3. Set Up Preparation
 - 2.1. Instalasi Laboratorium
 - 2.2. Penentuan dimensi bahan bakar
 - 2.3. Kalibrasi Instrumentasi
 - 2.4. Instalasi Instrumentasi laboratorium
4. Pengujian dan Pengambilan Data
 - 3.1. Pengukuran massa dan ukuran jenis bahan bakar lewat mekanisme sortir manual dan ayakan, sebelum memasuki *feeding*
 - 3.2. Pengukuran variasi putaran pada *blower*
5. Pengolahan Data dan Grafik
 - 4.1. Perhitungan laju aliran massa bahan bakar pada *feeding* terhadap perubahan temperatur yang dihasilkan.
 - 4.3. Interpretasi grafik perbandingan dari berbagai kondisi dari hasil pengolahan data
6. Analisa dan Kesimpulan

- 5.1. Menganalisa kestabilan dari proses pembakaran dengan pemasukan bahan bakar yang terkontrol
- 5.2. Menganalisa korelasi dan pengaruh dari jenis bahan bakar dan temperatur yang dicapai.
- 5.2. Menganalisa korelasi dan pengaruh dari laju aliran massa bahan bakar dan temperatur yang dicapai.
- 5.3. Menarik kesimpulan dari keseluruhan proses penelitian yang dilakukan

1.7 SISTEMATIKA PENULISAN

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

- BAB 1** PENDAHULUAN, berisi :
- Latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.
- BAB 2** TINJAUAN PUSTAKA, berisi :
- Bab ini berisi dasar-dasar teori yang digunakan mengenai energi biomasa, sistem reaksi pembakaran, *fluidized bed combustor*, fenomena fluidisasi, dan *solid feeder*.
- BAB 3** PENGUJIAN DAN PENGUKURAN, berisi :
- Skematik pengujian, metodologi pengujian, dan metodologi pengambilan data.
- BAB 4** HASIL DAN ANALISA, berisi :
- Pengolahan data hasil perhitungan, grafik – grafik hasil pengukuran, dan analisa hasil perhitungan.
- BAB 5** KESIMPULAN DAN SARAN, berisi :
- Kesimpulan dan saran.

BAB 2

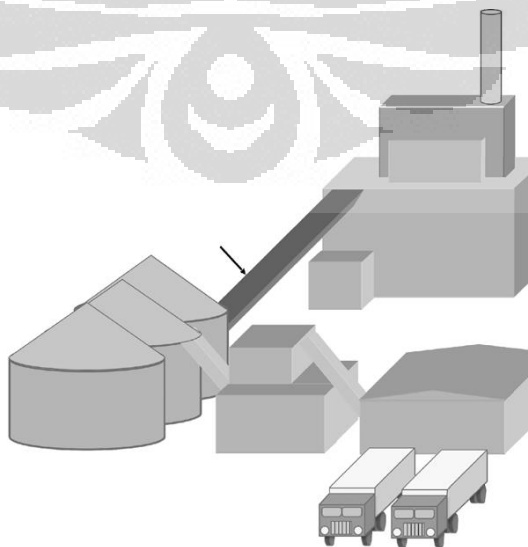
Landasan Teori

2.1 Bahan Bakar Biomasa

Biomasa menurut (UNFCCC, 2005) jenis non-fosil yang berasal dari material organik seperti hewan, tumbuhan, mikroorganisme, ataupun berupa sampah dari produk agrikultur, hasil hutan, industri organik, dan materi yang tidak dapat mengalami degradasi sendiri. Biomasa sendiri terbentuk dari interaksi CO_2 , udara, air, tanah dan sinar matahari dimana ketika benda organik itu mati, mikroorganisme menguraikan biomasa itu menjadi H_2O , CO_2 hal inilah yang menguntungkan karena disinilah terletak prinsip terbarukan dimana CO_2 akan diserap oleh benda organik lainnya sehingga organik lain akan terus berkembang.

Biomasa merupakan sumber energi yang berasal dari ikatan atom yang dimiliki oleh suatu benda organik, ketika ikatan kimia ini tidak diberi gaya maka tidak akan memberikan pengaruh namun ketika ikatan ini diberikan perlakuan panas maka ikatan dalam biomasa akan memberikan energi keluar seperti panas dan reaksi kimia lain, energi panas inilah yang akan dimanfaatkan ketika peluruhan pada ikatan biomasa ini terjadi.

Agar penggunaan biomasa dapat berlangsung secara tepat maka perlu dibentuk sistem untuk mengkoordinir proses penggunaan biomasa seperti :



Gambar 2. 1 Sistem Tranportasi Biomasa

- Penerimaan (*Receiving*)

Ketika biomasa hendak dibawa dari suatu sumber ke tempat penampungan maka diperlukan suatu tempat penyimpanan biomasa.

- Penampungan

Agar kualitas bahan bakar biomasa dapat terjaga maka diperlakukan penanganan khusus terhadap posisi penyimpanan, dimana biomasa harus terhindar dari hujan, es dan debu lainnya hal ini bertujuan menjaga kualitas dari bahan bakar itu sendiri.

2.1.1 Klasifikasi Biomasa

Berdasarkan bentuk fisik dan karakteristik baik sifat mekanikal dan sifat panasnya maka biomasa diklasifikasi menjadi :

- Biogas : merupakan biomasa yang mengalami proses pengolahan terlebih dahulu seperti fermentasi, ataupun pembakaran sehingga biomasa berubah menjadi gas mampu bakar.
- *Biofuel* : jenis biomasa yang dapat dihasilkan dari pengolahan biomasa dari hasil ekstraksi jenis organik baik tumbuhan maupun hewan, ekstraksi biomasa akan menghasilkan suatu fluida cair yang memiliki karakteristik mirip bahan bakar.
- Biosolid : jenis bahan bakar yang dapat dibakar langsung untuk menghasilkan energi termal, dengan kata lain padatan ini merupakan bahan bakar siap pakai, hanya dibutuhkan beberapa penanganan

Untuk mengetahui karakteristik dari suatu biomasa maka diperlukan sebuah analisa dan eksperimen untuk menentukan sifat yang dimiliki oleh biomasa ini, peninjauan tersebut biasanya dilakukan beberapa analisa terhadap biomasa itu, beberapa analisa yang biasa dilakukan adalah analisa proksimat dan analisa ultimat. Analisa ini telah dikembangkan untuk jenis batubara dan digunakan secara luas untuk laboratorium. Analisa ini telah mendapat tinjauan langsung dari

ASTM (*American Society for Testing Materials*), seperti yang tergambar pada tabel di bawah ini.

Tabel 2.1 Analisa Proksimat dan Ultimat untuk daun berdasarkan drying pine residues

Table 2. Chemical and Fuel Properties of Forest Residue Fractions

Biomass	Pine forest residues	Leaves	Small particles	Small stems	Barks	Chips
Proximate Analysis^a (% dry basis)						
Volatile	80.5 (0.4)	78.3 (0.3)	79.3 (0.6)	79.6 (1.4)	72.9 (0.2)	85.4 (0.2)
Ash	2.4 (0.1)	3.87 (0.2)	3.44 (0.2)	2.9 (0.4)	4.3 (0.2)	1.5 (0.2)
Fixed Carbon	17.1 (0.3)	17.9 (0.2)	17.3 (0.4)	17.4 (1.0)	22.9 (0.2)	13.1 (0.2)
HHV (MJ/kg)	19.6 (0.2)	20.2 (0.2)	19.4 (0.1)	19.1 (0.1)	19.1 (0.1)	19.5 (0.1)
Ultimate Analysis^a (% dry basis)						
Carbon	45.9 (0.5)	49.6 (0.3)	47.9 (0.4)	47.0 (0.6)	47.9 (0.4)	47.7 (0.5)
Hydrogen	5.9 (0.2)	6.9 (0.1)	6.4 (0.1)	6.4 (0.2)	5.9 (0.1)	6.7 (0.1)
Oxygen	43.5 (0.6)	35.2 (1.0)	39.6 (0.5)	40.8 (0.8)	38.9 (0.2)	41.0 (1.4)
Nitrogen	2.3 (0.4)	4.5 (0.8)	2.7 (0.2)	2.9 (0.3)	3.0 (0.3)	3.0 (1.0)
Sulfur	-	0.1	-	-	-	0.1

Untuk peralatan yang dibutuhkan dalam analisa secara elemen dapat dilihat pada tabel 2. Analisa proksimat relatif mudah dan bisa dilakukan dengan menggunakan oven pengering, dan untuk analisa ultimat membutuhkan keahlian di bidang kimia.

Tabel 2.2 Elemental Analyzer Equipment

Table 3-2. Elemental Analyzer Equipment

Instrument	Oxidant	Capability	Detection ^a
Carlo Erba 1104	oxygen	C,H,N,O	FID & TC
Chemical Data Systems (CDS 1200)	oxygen	C,H,N,O,S and functional groups	FID & TC
Hewlett-Packard HP-185	MnO ₂ added	C,H,N	FID & TC
Perkin Elmer 240	oxygen	C,H,N,O,S	TC

^aFID—Flame ionization detector
TC—Thermal conductivity

Source: Reed 1981

Analisa proksimat mengidentifikasi Kelembaban (*M-Moisture*), *Volatile Matter* (VM), Abu (*A-Ash*), dan *Fixed Carbon* (FC) bahan bakar, menggunakan ASTM prosedur. Kelembaban dianalisa dari kadar berat pada suhu 110°C.

Volatile matter didapat dari pemanasan yang lambat pada suhu sampai 950°C dan sampelnya ditimbang lagi. Analisa proksimat untuk beberapa biomasa dan bahan bakar solid dapat dilihat pada tabel 7. Dalam analisa proksimat biasanya terdapat kadar kelembaban dalam berat basah (*moisture content on a wet basis*) MCW, dimana

$$\text{MCW} = (\text{wet weight} - \text{dry weight})/\text{wet weight}. \quad (3-1)$$

Dan terkadang kadar kelembaban juga dilaporkan dalam bentuk berat kering (*moisture content on a dry basis*) MCD, dimana

$$\text{MCD} = (\text{wet weight} - \text{dry weight})/\text{dry weight}. \quad (3-2)$$

Dan nilai yang satu dapat dikonversi ke nilai yang lain dengan rumus,

$$\text{MCD} = \text{MCW}/(1 - \text{MCW}), \text{ and} \quad (3-3)$$

$$\text{MCW} = \text{MCD}/(1 + \text{MCD}). \quad (3-4)$$

Tabel 2.3 Data Analisa Proksimat

Table 3-3. Proximate Analysis Data for Selected Solid Fuels and Biomass Materials (Dry Basis, Weight Percent)

	Volatle Matter (VM)	Fixed Carbon (FC)	Ash	Reference
Coals				
Pittsburgh seam coal	33.9	55.8	10.3	(1)
Wyoming Elkol coal	44.4	51.4	4.2	(1)
Lignite	43.0	46.6	10.4	(1)
Oven Dry Woods				
Western hemlock	84.8	15.0	0.2	(2)
Douglas fir	86.2	13.7	0.1	(2)
White fir	84.4	13.1	0.5	(2)
Ponderosa pine	87.0	12.8	0.2	(2)
Redwood	83.5	16.1	0.4	(2)
Cedar	77.0	21.0	2.0	(2)
Oven Dry Barks				
Western hemlock	74.3	24.0	1.7	(2)
Douglas fir	70.6	27.2	2.2	(2)
White fir	73.4	24.0	2.6	(2)
Ponderosa pine	73.4	25.9	0.7	(2)
Redwood	71.3	27.9	0.8	(2)
Cedar	86.7	13.1	0.2	(2)
Mill Woodwaste Samples				
-4 mesh redwood shavings	76.2	23.5	0.3	(3)
-4 mesh Alabama oakchips	74.7	21.9	3.3	(3)
Municipal Refuse and Major Components				
National average waste	65.9	9.1	25.0	(4)
Newspaper (9.4% of average waste)	86.3	12.2	1.5	(4)
Paper boxes (23.4%)	81.7	12.9	5.4	(4)
Magazine paper (6.8%)	69.2	7.3	23.4	(4)
Brown paper (5.6%)	89.1	9.8	1.1	(4)
Pyrolysis Chars				
Redwood (790° to 1020°F)	30.0	67.7	2.3	(2)
Redwood (800° to 1725°F)	23.9	72.0	4.1	(2)
Oak (820° to 1135°F)	25.8	59.3	14.9	(2)
Oak (1060°F)	27.1	55.6	17.3	(2)

(1) Bituminous Coal Research, Inc. 1974. *Gas Generator Research and Development, Phase II. Process and Equipment Development*. OCR-20 F; PB-235530/3GI.

(2) Howlett, K. and Gamache, A. 1977. *Forest and Mill Residues as Potential Sources of Biomass*. Vol. VI. Final Report. McLean, VA; The Mitre Corporation/Metrek Division; ERDA Contract No. E (49-18) 2081; MTR 7347.

(3) Boley, C. C. and Landers, W. S. 1969. *Entrainment Drying and Carbonization of Wood Waste*. Washington, D.C.; Bureau of Mines; Report of Investigations 7282.

(4) Klass, D. L. and Ghosh, S. 1973. "Fuel from Organic Wastes." *Chemical Technology*, p. 689.

Source: Reed 1981

Kadar kelembaban untuk beberapa jenis biomasa dapat dilihat pada tabel 4 dan efek kadar kelembaban terhadap panas tahanan dan efisiensi pembakaran dapat dilihat pada tabel 5. Panas yang dapat tertahan turun drastis dengan meningkatnya kelembaban karena panas penguapan air tidak terikat dengan normal selama proses pembakaran. Karena biomasa berbeda propertisnya dari hari ke hari dan berat ke berat maka disarankan untuk melakukan analisa terhadap berat kering (*dry basis*). Lebih mudah memperkirakan propertis yang lainnya dari kondisi ini.

Tabel 2.4 Perkiraan kadar kelembaban biomasa

Table 3-4. Approximate Moisture Contents of Typical Biomass Fuels

Biomass Fuel	Moisture Content		Reference
	(wt % Wet Basis)	(wt % Dry Basis)	
Woody biomass, green	40-60	67-150	(1)
Woody biomass, dried	15	17	(1)
Straws	15	17	(1)
Stalks, cobs, hulls	15	17	(1)
Bagasse	70	230	(1)
Municipal refuse	35	55	(2)
Peat	90	900	(1)
Air dry feedlot waste	11	12	(2)

(1) Miles 1982

(2) Reed 1981

Tabel 2.5 Efek Kadar kelembaban terhadap efisiensi pembakaran

Table 3-5. Effect of Moisture Content on Heat Recovery and Combustion Efficiency^a

Moisture (wt %)		Recoverable Heat ^b (Btu/lb)	Combustion Efficiency (%)
Dry Basis	Wet Basis		
0.00	0.00	7097	82.5
4.76	4.54	7036	81.8
9.09	8.33	6975	81.1
13.04	11.54	6912	80.4
16.67	14.29	6853	79.7
20.00	16.67	6791	78.9
23.08	18.75	6730	78.3
28.57	22.22	6604	76.8
33.33	25.00	6482	75.4
42.86	30.00	6178	71.8
50.00	33.33	5868	68.2
60.00	37.50	5252	61.1
66.67	40.00	4639	53.9
71.43	41.67	4019	46.7

^aFrom Bliss, C. and Black, D. O. 1977. *Silvicultural Biomass Farms, Vol. 5, Conversion Processes and Costs*. McLean, VA: Mitre Corporation; ERDA Contract No. EX-76-C-01-2081.

^bTheoretical values based on a maximum heating value of 8600 Btu/lb, an initial wood temperature of 62°F, a flue gas temperature of 450°F, an initial air temperature of 62°F and 50% excess air.

Source: Reed 1981

Heat release pada sebuah bahan bakar akan menunjukkan energi yang tersimpan dalam bahan bakar tersebut dalam hal ini jika HHV bereaksi dengan oksigen maka energi maksimum akan tergambar sedangkan dengan LHV kita dapat menghitung energi yang telah dihasilkan/diberikan.

Panas pembakaran dapat dihitung melalui komposisi biomasa dan dapat dihitung dengan hubungan

$$\text{HHV} = [34.1 \text{ C} + 132.2 \text{ H} + 6.8 \text{ S} - 1.53 \text{ A} - 12.0 (\text{O} + \text{N})] \text{ kJ/g} \quad (3-5)$$

$$\text{HHV} = [146.6 \text{ C} + 568.8 \text{ H} + 29.4 \text{ S} - 6.6 \text{ A} - 51.5 (\text{O} + \text{N})] \times 10^2 \text{ Btu/lb} \quad (3-6)$$

dimana C, H, O, S, N, dan A dalam persen berat (% *weight*) dari karbon, hidrogen, oksigen, sulfur, nitrogen dan abu pada bahan bakar. Kalkulasi tersebut menurut riset menggunakan *absolut error* 2,1 % untuk sebagian besar material biomasa (Reed, 1981).

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

Tabel 2.6 Ultimate Analysis Beberapa Jenis Biomasa

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

(Sumber: Walter R. Niesse)

Tabel 2.7 Proximate Analysis Beberapa Jenis Biomassa

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

(Sumber: Walter R. Niessen. 1994)

Tabel 2.8 Nilai LHV Beberapa Jenis Biomassa

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

Potensi biomassa yang melimpah merupakan solusi energi masa depan karena dapat dikategorikan sebagai “*green and sustainable energy*” yaitu pemanfaatan energi 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), yang artinya untuk setiap kg biomassa hanya mampu menghasilkan energi 2/3 dari energi 1 kg batubara dan 1/2 dari energi 1 kg *gasoline*. Nilai kalor berhubungan langsung dengan kadar C dan H yang dikandung oleh bahan bakar padat. Semakin besar kadar keduanya akan semakin besar nilai kalor yang dikandung. Menariknya dengan proses *charing* (pembuatan arang), nilai kalor arang yang dihasilkan akan meningkat cukup tajam. Sebagai gambaran, dari hasil proses pembuatan arang batok kelapa pada temperatur 750°C dapat dihasilkan arang dengan nilai kalor atas (HHV) 31 MJ/kg. Nilai ini setara dengan nilai kalor batubara kelas menengah ke atas.

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

Dalam Reaksi pembakaran nilai HHV merupakan panas yang dihasilkan dari reaksi pembakaran dimana air menjadi hasil dari reaksi pembakaran tersebut,

Sedangkan pada LHV hasil dari reaksi pembakaran berupa uap, Nilai HHV dapat diukur secara experimental dengan menghitung perubahan entalpi antara reaktan dan produk, dalam nilai *proximate* dan *ultimate* dapat dijadikan rujukan dari hasil yang heating value yang didapat

Table 1
HHV correlations and their evaluations^a

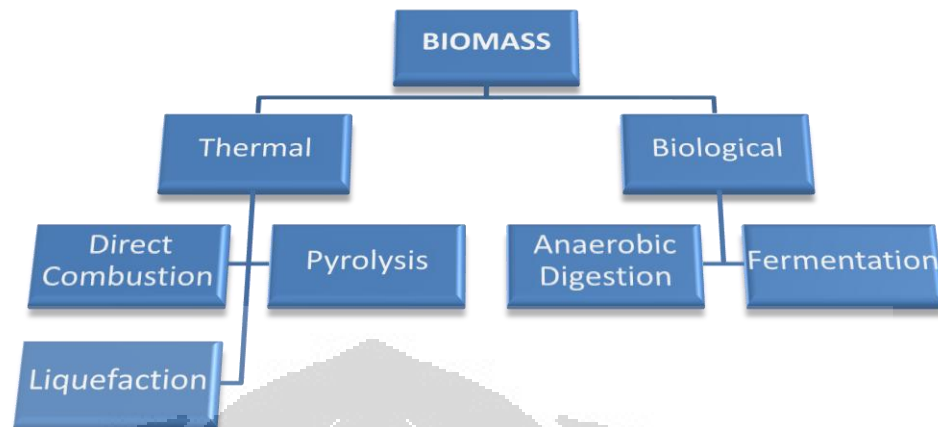
Number	Name of author	Correlation (HHV, MJ/kg)	AAE (%)	ABE (%)	Coefficient, R ²
<i>Based on proximate analysis</i>					
(1)	Jimenez and Gonzalez [5]	HHV = -10.81408 + 0.3133 (VM + FC)	4.43	1.16	0.533
(2)	Current authors	HHV = 19.914 - 0.2324 Ash	3.78	0.30	0.625
(3)	Demirbas [7]	HHV = 0.196 ^a FC + 14.119	8.85	-5.60	-0.647
(4)	Demirbas [7]	HHV = 0.312 ^a FC + 0.1534 ^a VM	7.69	-6.97	-0.306
(5)	Cordero et al. [6]	HHV = 0.3543 ^a FC + 0.1708 ^a VM	5.68	4.23	0.247
(6)	Current authors	HHV = -3.0368 + 0.2218VM + 0.2601FC	3.65	0.26	0.617
<i>Based on ultimate analysis</i>					
(7)	Tillman [8]	HHV = 0.4373 C - 1.6701	3.73	0.49	0.666
(8)	Current authors	HHV = 0.3259 C + 3.4597	3.16	0.19	0.758
(9)	Boie [11]	HHV = 0.3516 C + 1.16225 H - 0.1109 O + 0.0628 N + 0.10465 S	3.51	-0.59	0.720
(10)	IGT [9]	HHV = 0.341 C + 1.322 H - 0.12 O - 0.12 N + 0.0686 S - 0.0153 Ash	3.55	-1.18	0.695
(11)	Graboski and Bain [10]	HHV = 0.328 C + 1.4306 H - 0.0237 N + 0.0929 S - (1 - Ash/100)(40.11 H/C) + 0.3466	4.26	2.85	0.647
(12)	Channiwala and Parikh [12]	HHV = 0.3491 C + 1.1783 H + 0.1005 S - 0.1034 O - 0.0151 N - 0.0211 Ash	3.47	0.11	0.733
(13)	Demirbas [7]	HHV = 0.335 C + 1.423 H - 0.154 O - 0.145 N	6.73	-1.67	0.081
(14)	Jenkins [13]	HHV = -0.763 + 0.301 C + 0.525 H + 0.064 O	2.95	1.78	0.792
(15)	Current authors	HHV = -1.3675 + 0.3137 C + 0.7009 H + 0.0318 O ^{a,b}	2.59	0.07	0.834
<i>Based on chemical composition^c</i>					
(16)	Shafizadeh and Degroot [15]	HHV = 0.1739 Ce + 0.2663 L + 0.3219 E	7.62	6.90	-0.503
(17)	Jimenez and Gonzalez [5]	HHV = [1 - Ash/(100 - Ash)](0.1739 Ce + 0.2663 L + 0.3219 E)	7.41	1.92	-0.451
(18)	Tillman ^d [8]	HHV = 0.1739 Ce + 0.2663(1 - Ce ^e)	9.24	4.10	-1.068
(19)	Demirbas ^f [14]	HHV = 0.0889 L + 16.8218	10.96	-8.50	-0.875

C. Sheng, J.L.T. Azeredo / Biomass and Bioenergy 28 (2005) 499–507

Biomasa mempunyai kadar *volatile* yang tinggi (sekitar 60–80%) dibanding kadar *volatile* pada batubara, maka biomas lebih reaktif dibanding batubara. Perbandingan bahan bakar (FR) dinyatakan sebagai perbandingan kadar karbon dengan kadar volatil. Untuk batubara, FR ~ 1 – 10, gambut, FR ~ 0.3, biomasa, FR ~ 0.1, plastik, FR ~ 0.

2.2 Teknik Konversi Energi pada Biomasa

Terdapat 2 metode untuk mengkonversi energi pada biomasa, proses yang biasanya digunakan adalah proses *biological* dan *thermal*.



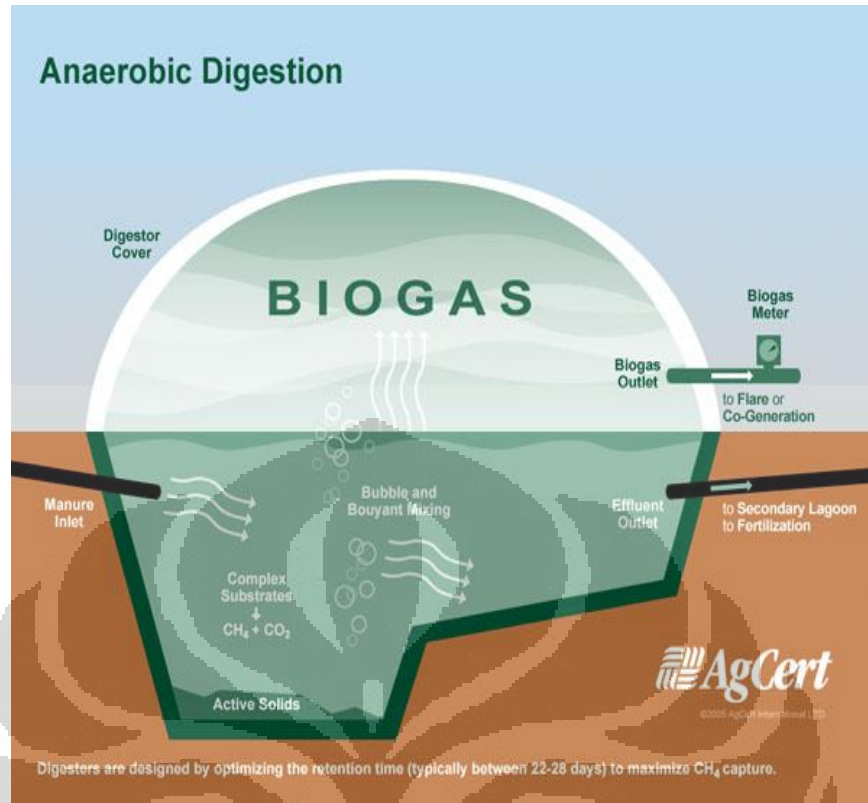
Gambar 2. 2 Diagram Teknologi Konversi Biomassa

2.2.1 Proses Biologis

Ada 2 proses yang dapat menghasilkan bahan bakar gas melalui proses biologis, yaitu : Agen biologi seperti mikroorganisme, bakteri yang dapat menguraikan biomasa tersebut menjadi beberapa karakteristik sesuai dengan karakteristik yang kita inginkan

1. *Anaerobic degistion*

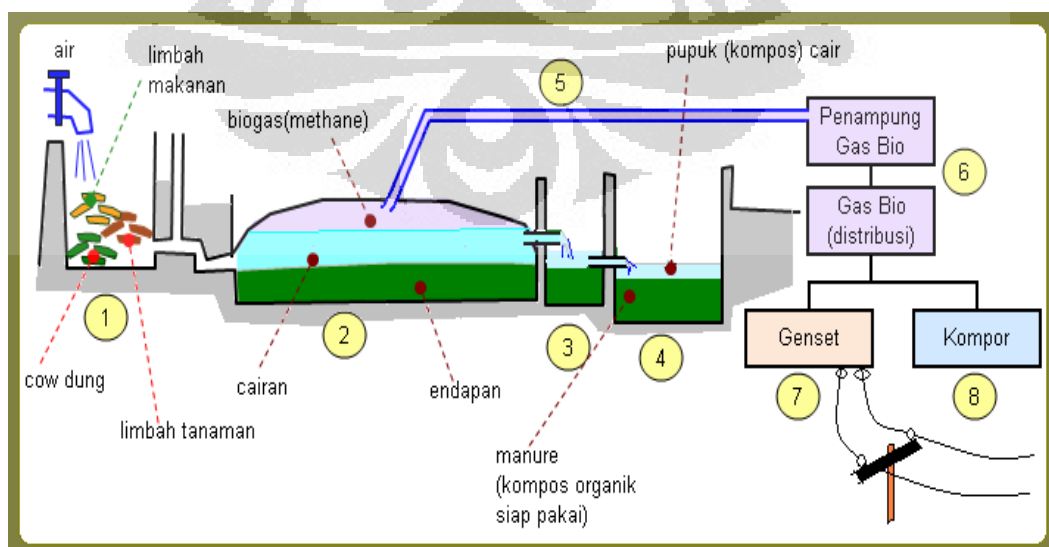
Dalam *anerobic degistion* digunakan mikroorganisme yang mampu mengurai biomasa menjadi biomasa senyawa lain. Proses ini dapat digunakan pada sampah organik dan juga kotoran hewan. *Anaerobic digestion* merupakan proses yang kompleks. Pertama-tama, mikro organisme mengubah material organik kedalam bentuk asam organik. Bakteri *anaerob (methanorganic)* akan mengubah asam ini dan menyelesaikan proses dekomposisi dengan menghasilkan metana.



Gambar 2. 3 Anaerobic Digestion

(sumber:http://www.agcert.com/global/index?page=agriculture_overview&&view=agcert&locale=en)

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



Gambar 2. 2 Rangkaian Instalasi Biogas (Pembangkit Listrik)

(sumber: <http://penemuananakbangsa1.blogspot.com/2011/01/biogas.html>)

Gas metana 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 metana dengan bantuan bakteri metanogenik.

5. *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.

2.2.2. Proses Termal

Proses konversi termal biomasa meliputi :

- *Pyrolysis* : Biomasa + Panas → minyak, gas, arang

Pirolisis merupakan suatu proses pengolahan biomasa dengan sistem penghancuran menggunakan panas tanpa adanya bantuan oksigen, ketika pembakaran diberikan kepada biomasa akan terjadi proses pemanasan dimana ketika suhu telah mencapai 350 derajat maka akan terbentuk gas mampu bakar dan arang.

- Gasifikasi : Biomasa + Oksigen yang dibatasi → Bahan bakar gas

Proses konversi biomasa menjadi gas mampu bakar dengan bantuan oksigen yang sesuai dengan FAR, dalam kasus ini bahan bakar diberikan termal energi sehingga ketika biomasa ini mencapai suhu 650-800 derajat akan muncul gas mampu bakar yang akan dimanfaatkan kemudian.

- Pembakaran : Biomasa + Stoikiometri oksigen → Produk pembakaran

Pembakaran langsung dengan komposisi bahan bakar dan udara sehingga memicu terjadinya panas. Pada proses konversi termal biomassa terdapat beberapa tahap pembakaran pada gasifier, tahapan ini menggambarkan secara tidak langsung proses dari pembakaran yang berlangsung pada gasifier. Penentuan tahapan ini berdasarkan dengan jenis dan karakteristik gasifier.

Tahapan pembakaran tersebut terdiri dari:

- *Heating* (Pemanasan)

Bahan bakar akan mengalami proses pemanasan terlebih dahulu untuk mengurangi kadar air didalam bahan bakar hingga terjadi penguapan

- *Drying* (pengerinan)

Biomasa mengandung kadar air tertentu sehingga ketika diberikan panas maka akan terjadi penyerapan panas terlebih dahulu dari biomasa setelah tekanan uap jenuh sama dengan tekanan didalam biomasa maka akan terjadi penguapan secara konstan dan dengan waktu yang terus bertambah maka penguapan terus menerus akan terjadi hingga tekanannya setara

- *Pyrolysis and reduction* (pirolisis dan reduksi)

Tahap ini merupakan proses termal dari perubahan bahan bakar menjadi volatil gas.

- *Pembakaran gas volatil diatas fuel bed*

Volatil gas diproduksi pada tahap pirolisis dan reduksi pembakaran dibawah *fuel bed* mengindikasikan api yang kuning.

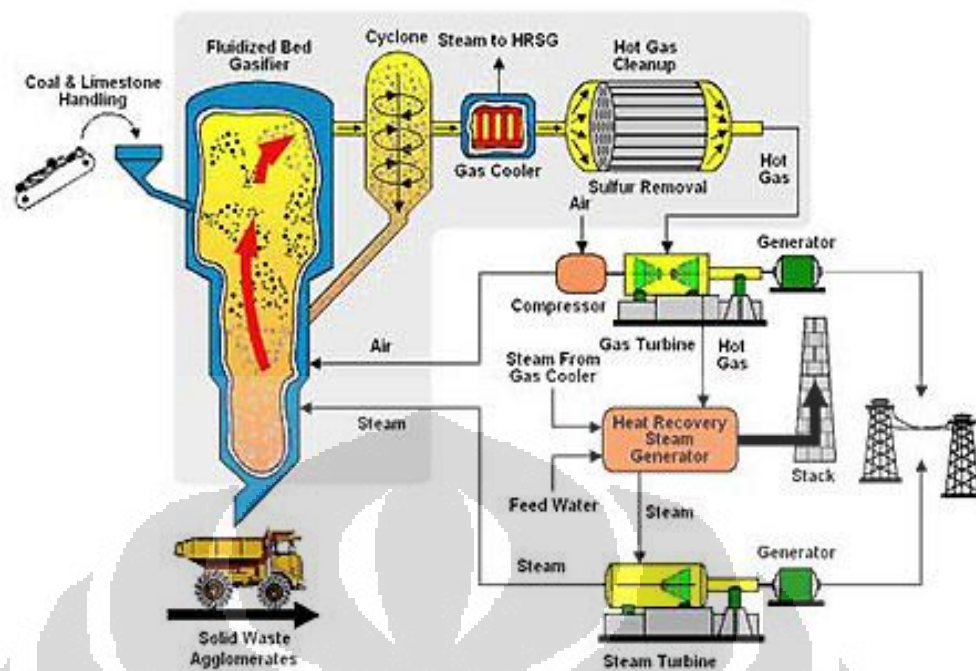
- *Pembakaran arang di fuel bed.*

Arang yang padat terbakar di atas *grate*, dan terbakar dengan menghasilkan api biru yang kecil atau bara api pada arang tersebut.

Dalam proses termal terdapat 3 proses utama yang dapat mengkonversi energi seperti :

1. *Gasification*

Gasifikasi merupakan sistem pengolahan biomasa yang memanfaatkan gas hasil pembakaran yang terjadi pada biomasa, bahan bakar dipanaskan dan dibakar dengan keadaan oksigen 1/3 dari jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk pembakaran penuh. Pembakaran dilakukan dengan sistem udara *supply* dibatasi/dikurangi yang disebut pirolisis. Proses ini menghasilkan gas yang dapat dibakar seperti H₂, CH₄, CO, N₂ dan gas-gas lain yang tak dapat terbakar.



Gambar 2.5 Proses Gasifikasi

Gasifikasi dapat berfungsi sebagai sistem *after burn* dimana gas buang mampu bakar ini akan digunakan untuk kegiatan pembangkitan energy, pengeringan dan penguapan. Dalam pembangkitan energi sendiri gas buang dapat digunakan untuk *burner* atau untuk motor pembakaran dalam sedangkan pada *boiler* digunakan untuk menghasilkan uap yang mampu melakukan aksi terhadap sudu turbin, sedangkan panas buang yang keluar dari gasifier dapat kita manfaatkan untuk pengeringan biomasa sebagai bahan bakar.

2. Pembakaran Langsung

Pada proses ini material organik (biomasa) melakukan 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.

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 biomasa untuk membentuk substansi lain.

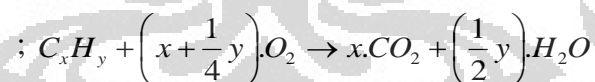
Produk dari *pyrolysis* tergantung dari temperatur, tekanan, dan lain lain. Pada suhu 200°C , air akan terpisah dan dibuang, *pyrolysis* sesungguhnya terjadi pada suhu antara $280 - 500^{\circ}\text{C}$, pirolisis menghasilkan banyak karbondioksida, tar, dan sedikit metil alkohol. Antara $500 - 700^{\circ}\text{C}$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

4. *Liquefaction*

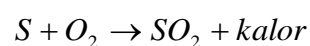
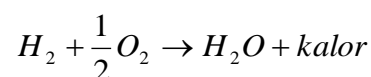
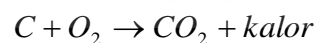
Merupakan teknologi yang perlu dikembangkan karena masalah biomasa yang tidak fleksibel dapat diatasi dengan pencairan, sehingga bahan bakar jenis ini mudah untuk ditransportasikan, hal ini memang membutuhkan proses yang panjang dengan proses yang rumit yang menyebabkan harga dari bahan bakar ini kurang kompetitif dibandingkan bahan bakar fosil, namun dengan perkembangan teknologi kedepan tidak menutup kemungkinan produk likuid ini merupakan bahan bakar masa depan.

2.3 REAKSI PEMBAKARAN

Reaksi pembakaran terjadi ketika segi tiga api telah tercapai dimana dalam kondisi tersebut terdapat bahan bakar, udara dan pemicu reaksi antra ketiga jenis tersebut akan menghasilkan panas dan gas-gas lain, secara umum reaksi pembakaran dapat ditulis sebagai berikut :

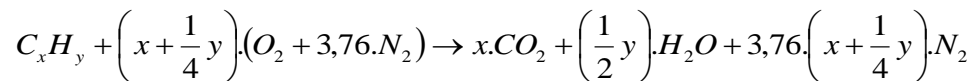


Hasil sampingan dari reaksi pembakaran adalah timbulnya kalor yang disebabkan oleh reaksi kimia dari ikatan atom dan reaksi kimia bahan bakar dengan oksigen, hal ini tergambar dari persamaan berikut :



Tiga senyawa dan panas yang dihasilkan tersebut disebut juga sebagai hasil pembakaran. Dalam reaksi pembakaran terdapat berbagai jenis sistem seperti pembakaran sempurna, *lean combustion*, *rich combustion*, dan penggunaan *excess air*. Pembakaran sempurna adalah pembakaran dengan rasio bahan bakar dengan

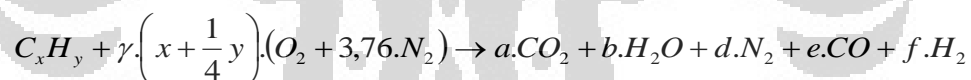
oksigen memenuhi kaidah stokiometri. Pada pembakaran yang lebih banyak oksigen dari pada bahan bakar, campuran tersebut dinamakan sebagai campuran kaya. Begitu juga sebaliknya, apabila bahan bakar yang digunakan lebih banyak dari pada oksigen, maka campurannya disebut campuran miskin. Reaksi untuk pembakaran sempurna adalah :



Nilai dari x dan y di atas bergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan. Nilai x adalah fraksi masa untuk kandungan karbon, dan y fraksi masa untuk kandungan hidrogen dalam bahan bakar. Namun, kandungan dari udara bebas sepenuhnya bukan mengandung oksigen, karena bercampur dengan nitrogen (N_2). Sehingga reaksi stokiometrinya juga sedikit berbeda dari dasar reaksi pembakaran sempurna.

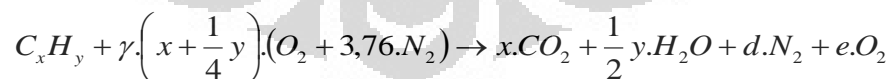
Namun, ada kalanya juga proses pembakaran tidak terjadi pada komposisi ideal antara bahan bakar dengan udara. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, proses yang tidak pada kondisi ideal ini bisa terbagi menjadi dua, yaitu pembakaran kaya dan pembakaran miskin.

- 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 Faktor – Faktor 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 reaksi pembakaran terjadi sempurna maka diperlukan pencampuran sehingga jumlah bahan bakar dapat dibakar seluruhnya, hal ini dapat dilakukan dengan melakukan prinsip turbulensi pada fluida yang akan dicampurkan, pencampuran yang baik akan menghasilkan efisiensi pembakaran yang baik.

2. Udara

Pemilihan udara dan penanganan udara merupakan faktor yang dapat menentukan keberhasilan pembakaran ketika udara yang digunakan sedikit maka bahan bakar tidak terbakar secara sempurna, namun teknologi pada masa sekarang menggunakan lebih banyak udara *excess air* untuk pembakaran agar bahan bakar habis, pemanasan udara juga akan membantu reaksi ketika bertemu bahan bakar

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 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 Segitiga 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 9.

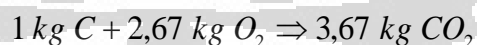
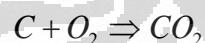
Tabel 2.9 Jenis-Jenis Bahan Bakar

Padat	Cair	Gas
Kayu + Ranting	Solar	LNG
Ampas Tebu	Minyak	LPG
Tempurung + Sabut	Tanah	DII
Kelapa	Bensin, dll	
Daun dan Ranting kelapa		

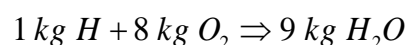
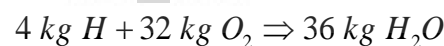
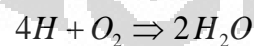
2. Zat yang membakar

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

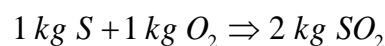
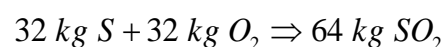
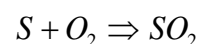
- Karbon terbakar sempurna akan membentuk CO_2 menurut persamaan :



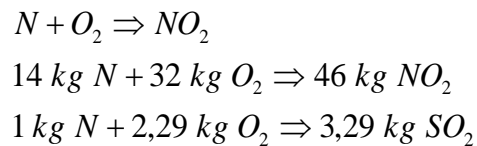
- Hidrogen terbakar sempurna akan membentuk H_2O menurut persamaan :



- Belerang terbakar akan membentuk SO_2 menurut persamaan :



- Nitrogen terbakar membentuk NO_2 menurut persamaan :



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

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

Kebutuhan udara dalam proses pembakaran dapat diklasifikasikan menjadi sebagai berikut :

- Udara primer
Udara yang langsung bereaksi dengan bahan bakar, ketika bahan bakar dan udara dicampur maka terjadi reaksi pembakaran.
- Udara sekunder
Udara yang berasal dari lingkungan sekitar reaktor pembakaran
- Udara tersier
Udara yang menembus celah pada ruang bakar.

Udara yang dibutuhkan selama proses pembakaran memiliki hubungan dengan jumlah bahan bakar yang dibutuhkan hal ini untuk mengetahui jenis campuran bahan bakar yang digunakan, namun dalam kenyataan jumlah udara harus lebih besar dibanding dengan udara teoritis, hal ini bertujuan untuk mencegah terjadinya pembakaran tidak sempurna. Selisih antara jumlah udara aktual dan udara teoritis ini disebut juga sebagai *excess air*. Nilai *excess air* ini selalu merupakan persentase antara selisih jumlah udara aktual dengan udara teoritis, yang berbanding dengan jumlah udara aktual.

Nilai *excess air* ini dapat ditulis sebagai berikut :

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

keterangan : $m = excess\ air$

$A_o =$ jumlah udara teoritis

$A =$ jumlah udara aktual

3. Zat yang dihasilkan dari pembakaran

Berat gas asap yang terbentuk dari hasil pembakaran 1 kg 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 CO₂, H₂O, SO₂, N₂, dan O₂. Komponen-komponen tersebut disebut juga sebagai hasil pembakaran (*combustor product*), atau biasa disebut juga sebagai gas buang.

2.4 FLUIDIZED BED COMBUSTION TECHNOLOGY

Fluidized bed combustor bersumber dari hamparan dari material pasir ataupun batuan yang dilewati dari bawah oleh udara yang bersumber dari *blower* tekan, dengan tekanan yang dimiliki *blower* dapat untuk menghilangkan gaya statis dari berat material seolah-olah udara ini dipompakan untuk mendorong partikel pasir untuk bergerak sehingga partikel tersebut bertindak seolah-olah bersifat fluida, pada bagian tungku pembakaran yang terdapat rongga sehingga terjadi penurunan kecepatan ketika bahan bakar dimasukkan, ketika api dihidupkan untuk memanasi hamparan pasir dibutuhkan bahan bakar awal yang dapat meningkatkan temperatur dari *bed*, setelah temperatur *bed* naik maka bahan bakar biomasa yang ingin digunakan boleh digunakan dalam tungku bakar, sistem ini yang akan menghasilkan panas.

Prinsip dasar ketika udara yang didistribusikan melewati hamparan pasir, hal ini menyebabkan bahan bakar yang terdapat diatas hamparan akan mendapat kecepatan dari *blower* namun dengan kecepatan yang rendah, namun secara perlahan kecepatan itu akan meningkat seiring dengan telah tercapainya kondisi seimbang dimana kecepatan gerak bahan bakar akan meningkat, fenomena ini yang disebut dengan fluidisasi, proses ini akan menimbulkan formasi *bubling*, turbulensi pada partikel bahan bakar, pecampuran udara dan bahan bakar, pada akhirnya terjadinya perpindahan panas dari hamparan ke pasir. Fluidisasi ini sangat bergantung dengan diameter partikel dan kecepatan partikel, ketika kecepatan *bubling* lebih tinggi dibandingkan dengan kecepatan udara disebut

kecepatan slip, nilai kecepatan slip sangat menentukan untuk mengetahui periode perpindahan panas yang baik dan kontak antar bahan bakar dan udara terjadi jika hampan pasir dipanaskan menggunakan bahan bakar sebagai pemanas awal, dan setelah itu bahan bakar itu dimasukan secara berkelanjutan, maka dapat menjaga temperatur dari *bed*.

Fluidized bed combustor dapat bekerja pada kondisi operasi 840-950°C, sedangkan suhu hampan pasir bisa mencapai 1000°C, akan tetapi suhu tersebut merupakan pencampuran udara dan biomasa, hal inilah yang dapat menghilangkan efek dari penurunan kadar karbon dapat diatasi karena telah meleleh dahulu sebelum terbuang keluar. Dalam hal ini penggunaan temperatur rendah bisa diandalkan karena dengan keadaan tersebut terjadi pencampuran secara cepat dan perpindahan panas yang efektif.

Hampan fluidisasi (*fluidized bed*) membantu penyebaran umpan bahan bakar yang datang dengan pemanasan yang cepat sampai temperatur pengapiannya (*ignition*) serta waktu kontak dengan bahan bakar yang singkat dan kondisi pencampuran secara turbulensi untuk pembakaran sempurna. Pembakaran normalnya sendiri terjadi, sehingga bahan bakar hancur dengan cepat, kering dan terbakar di dalam hampan. Laju pembakaran akan meningkat seiring dengan meningkatnya laju pirolisis dari bahan bakar padat karena kontak langsung dengan partikel hampan yang panas.

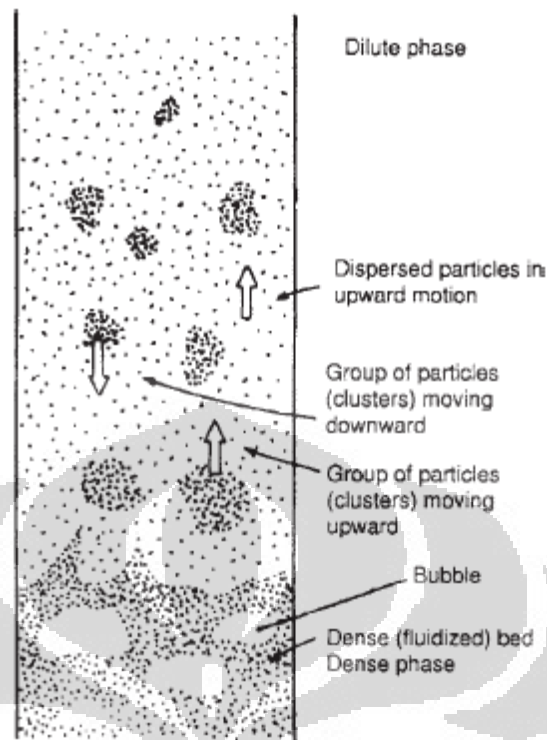


Figure 2.19. Particle motion in vicinity and above the bubbling fluidized bed surface

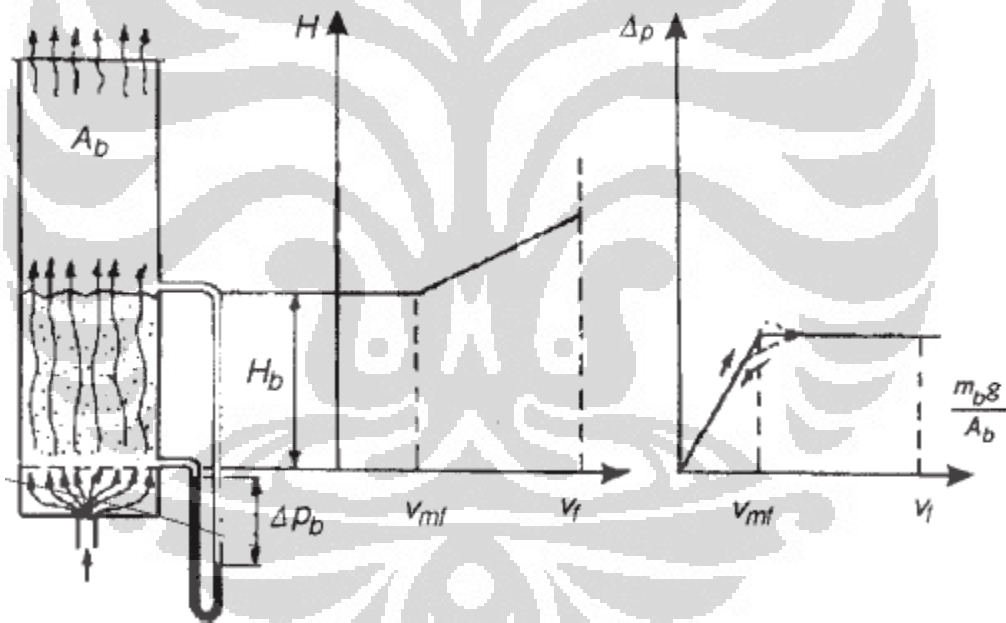
Gambar 2. 6 Proses Pergerakan Partikel pada bed (Simeon N.Oka)

Aplikasi teknologi FBC merupakan solusi alternatif terbaik untuk memanfaatkan bahan bakar yang memiliki *moisture content* tinggi, nilai *caloric* kecil dan bahan bakar yang dianggap limbah, disamping itu bahan sistem FBC ini dapat menampung berbagai jenis karatersitik dari bahan bakar baik yang memiliki nilai kalor tinggi seperti batu bara atupun batang kayu yang memiliki kadar air yang tinggi, namun untuk digunakan dalam rekator FBC ini perlu penangan khusus seperti bahan bakar harus didimensi ulang dengan cara dihancurkan atau dibagi menjadi partikel berukuran kecil tergantung dari besar reaktor yang akan digunakan.

2.4.1 Sistem pada *Fluidized Bed Combustor*

- BFBC(*bubling fluidized bed combustion*)

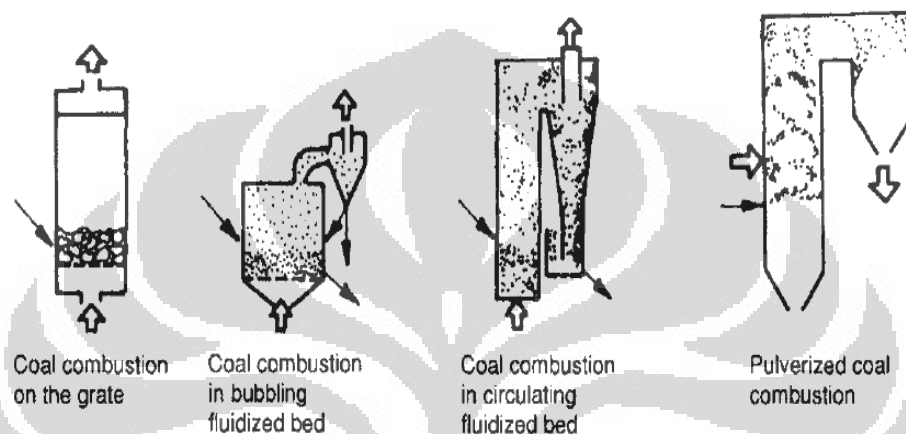
Pada keadaan *bubbling* bahan bakar diletakan diatas pasir akan bereaksi dengan oksigen diatas hamparan, dimana bagian bawah dari zona biomasa akan memiliki densitas yang sangat tinggi, bereaksi dengan pasir dan terbakar ketika bercampur dengan udara yang berasal dari bawah *bed* yang dipengaruhi oleh temperatur sekitar *bed*, ciri utama dari sistem BFBC adalah ukuran partikel hamparan yang digunakan berkisar antara 0.3-2 mm beroperasi dengan 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 yang rendah berhubungan dan waktu tinggal partikel yang relatif lebih lama, dengan masa jenis dari partikel yang kita gunakan.



Gambar 2. 7 Pengaruh Penurunan Tekanan terhadap Kecepatan Minimal
(Simeon N.Oka)

Tipe BFBC ini tidak terlalu sensitif dengan perubahan *moisture content* sangat cocok untuk digunakan pada pembakaran biomasa dan pembakaran sisa sampah, sistem dapat menampung partikel dengan dimensi besar, pembakaran dapat berlangsung dalam beberapa periode, dimana air sekunder ditambahkan pada daerah pembakaran yang bertujuan untuk merancang rasio udara dan bahan

bakar yang berhubungan dengan efisiensi pembakaran, namun dengan partikel yang besar maka kita harus mempertimbangkan sistem pengumpulan abu atupun materil yang tidak terbakar sempurna, penggunaan siklon yang berfungsi untuk memisahkan material yang berat dengan udara ringan setelah itu untuk memastikan bahwa udara yang dibuang bersih digunakan gas *water scrubber* untuk mengurangi kadar karbondioksida.



Gambar 2. 8 Tipe Fluidisasi yang digunakan (Simeon N.Oka)

- **CFBC (*Circulating Fluidized Bed Combustion*)**

Prinsip CFBC merupakan *suksesor* dari BFBC dimana udara melewati hampan diwaktu persentase udara yang masuk, ketika kecepatan udara meningkat maka bahan bakar akan dimasukan bersamaan dengan peningkatan kecepatan, dengan kontak secara turbulen antara bahan bakar dan udara maka akan terjadi kondisi seimbang pada hampan pasir, kemampuan untuk turbulensi dan sirkulasi sehingga bahan bakar yang dapat kembali ke *burner* inilah yang menandai era baru dari jenis *bed combustion*.

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.

Perbedaan dasar yang menunjukkan bahwa sistem ini memiliki sistem yang berbeda terletak pada kecepatan dan ukuran partikel *bed* yang digunakan.

Tabel 2. 10 Perbedaan antara Sistem BFB dan CFB

Table 1
Design parameters BFB and CFB [3,12-14,79,80,81]

Design parameter	BFB	CFB
Combustion temperature (°C)	760-870	800-900
Fuel particle size (mm)	0-50	0-25
Fluidization velocities (m/s)	1-3	3-10
Solids circulation	No ^a	Yes
Particle concentration	High in bottom, low in freeboard	Gradually decreasing along furnace height
Limestone ^b particle size (mm)	0.3-0.5	0.1-0.2
Average steam parameters ^c		
Steam flow (kg/s) (range)	36 (13-139)	60 (12-360)
Steam temperature (°C) (range)	466 (150-543)	506 (180-580)
Steam pressure (bar) (range)	72 (10-160)	103 (10-275)

- **PFBC (*Pressured Fluidized Bed Comsbution*)**

Sistem ini sama dengan BFBC namun ruang reaktor pembakaran berada pada bajana bertekanan yang bekerja dengan tekanan tinggi lebih tinggi dibanding tekanan atmosfer, dengan nilai oksigen yang dibawa dengan jumlah besar dan intensitas pembakaran yang tinggi, namun dibutuhkan sistem kompleks untuk memasukan bahan bakar, menyerap abu dan pemberian bahan bakar salah satu faktor yang menguntungkan dari proses ini adalah gas buang yang keluar dari reaktor memiliki tekanan dan temperatur tinggi.

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

Kondisi persiapan dimana pasir telah mengisi hamparan yang tersedia sesuai dengan ketinggian yang ingin diuji, pada keadaan ini kondisi masih dalam temperatur ruang dan tekanan atmosfer belum ada reaksi dan proses fluidisasi, persiapan ini digunakan mempersiapkan *burner*, *setting-an blower* yang digunakan, fungsi *feeder* dan persiapan semua perangkat pendukung.

2. Proses pemanasan

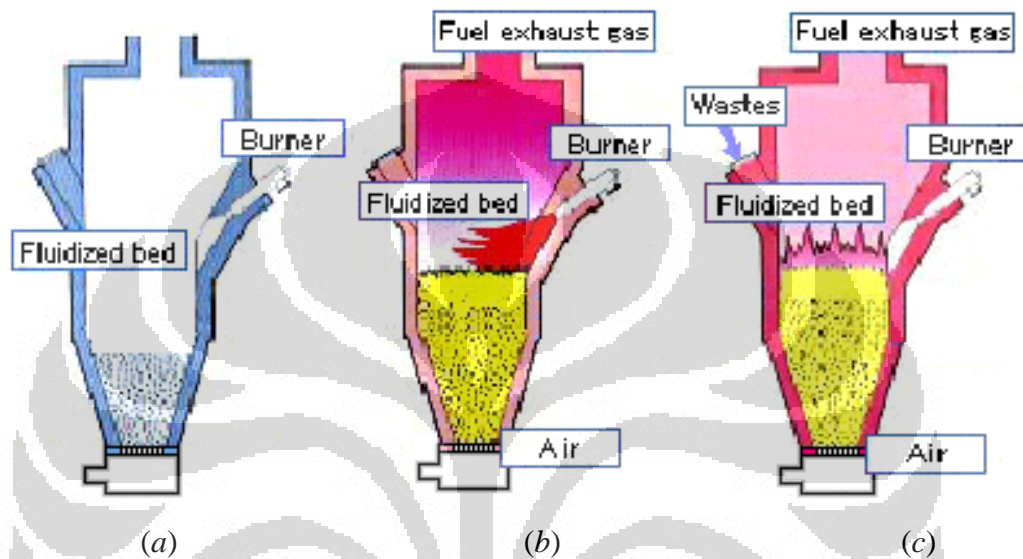
Pada tahap ini *burner* yang telah dihidupkan menyemburkan api, disinilah awal mula terjadinya pemanasan hamparan, sebelum *burner* hidup terlebih dahulu *blower* dihidupkan agar fluidisasi dan bubbling terjadi pada hamparan untuk mempercepat proses pemanasan *bed* dimasukan bahan bakar sehingga reaksi berlangsung lebih cepat dan panas yang diinginkan tercapai, setelah temperatur hamparan mencapai 500-800 derajat *burner* dimatikan namun tetap bahan bakar diisi secara terus menerus

3. Kondisi operasi

Ketika temperatur *bed* telah mencapai kondisi operasi yang diinginkan maka *burner* dimatikan, hal ini menandakan telah terjadi pembakaran sendiri oleh bahan bakar yang bereaksi dengan hamparan, untuk menjaga temperatur dalam ruang bakar maka perlu dilakukan kontrol terhadap suhu *bed* dengan cara menambah bahan bakar ketika temperatur turun dan mengaduk pasir

agar pemanasan berlangsung merata. Selain itu agar pencampuran berlangsung dengan cepat kecepatan *blower* perlu ditingkatkan agar *heat transfer* dan pencampuran dapat berlangsung dengan baik dan cepat.

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



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

2.5 Komponen *Fluidized Bed Combustion*

Fluidized bed combustion 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*.

2.5.1. *Fluidization Vessel*

Fluidization vessel merupakan reaktor utama pembakaran yang dengan rangka dalam adalah semen/beton untuk menyimpan panas dan diselimuti oleh

baja dengan diameter 9 – 34ft. Secara umum *fluidization vessel* terdiri dari 3 bagian utama yaitu :

1. Ruang Bakar

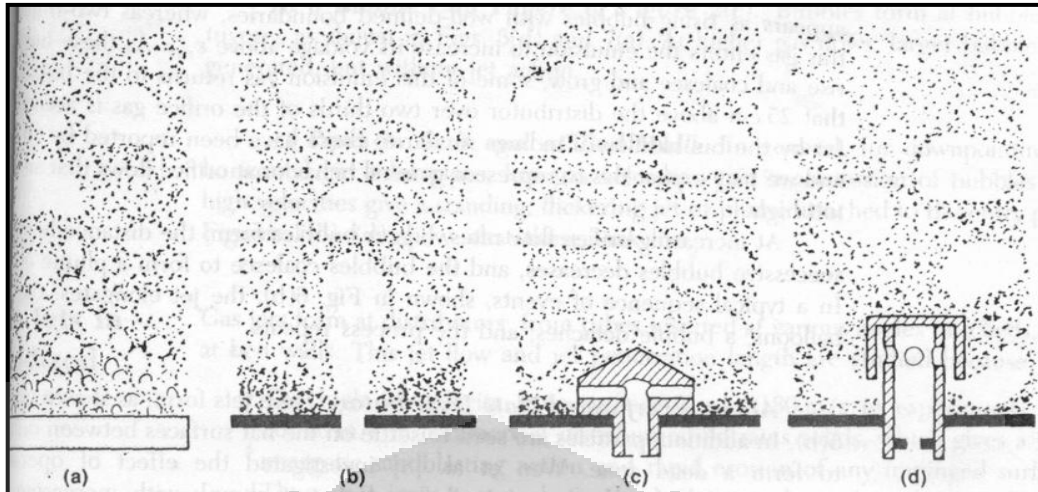
Ruangan ini berfungsi sebagai wadah menempatkan pasir, bahan bakar dan kasa. Pada ruang bakar ini akan terjadi proses fluidisasi, *heat transfer* antara bahan bakar dan pasir beserta pecampuran udara dengan bahan bakar. Temperatur operasi maksimum pada wilayah ini mencapai 1000 derajat. Ketika sistem 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.



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

2. Distributor

Distributor berfungsi untuk mengalirkan udara pada hamparan yang setelah diberi celah aliran sehingga udara menyebar merata pada bagian *bed*, tujuan ini selain mendistribusikan udara adalah membentuk fenomena fluidisasi ketika udara bergerak *bubbling* yang berperilaku seolah-olah fluida. 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 2.11.



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



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

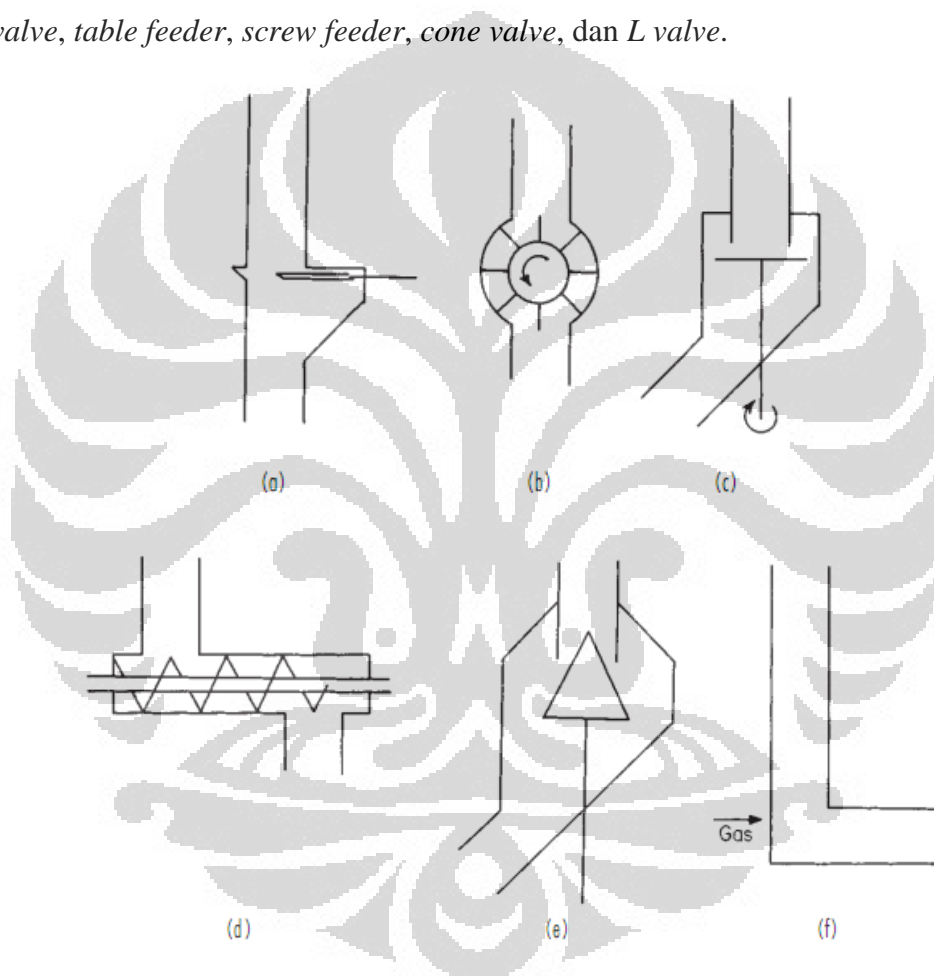
3. *Plenum*

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

kecepatan aliran udara. Hal ini disebabkan adanya perbesaran ukuran penampang saluran pada *plenum*.

2.5.2. Sistem Feeder

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



Gambar 2. 13 Jenis-Jenis Solid Flow Control; (a) Slide Valve (b) Rotary Valve; (c) Table Feeder; (d) Screw Feeder; (e) Cone Valve; (f) L Valve

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

ingin dipindahkan, masa jenis material, tingkat abrasifitas material, kecepatan aliran, dan lain-lain.

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



Gambar 2. 14 Screw Feeder

2.5.3. 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 $750-800^{\circ}\text{C}$. Dalam pengoperasiannya, *burner* bersifat tempori. *Burner* tidak digunakan selamanya selama pengoperasian alat berlangsung seperti halnya *blower*, namun *burner* hanya digunakan pada proses awal saat proses pemanasan pasir dilakukan

sampai temperatur operasi. Ketika hamparan pasir sudah mencapai temperatur yang diinginkan, maka *burner* ini akan berhenti bekerja.

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



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

2.5.4 Bed Material

Material hamparan (*Bed Material*) yang digunakan pada *fluidized bed combustor* adalah pasir silika . Pasir silika yang telah panas memindahkan panas

tersebut ke bahan bakar. Salah satu persyaratan yang harus dimiliki oleh pasir adalah nilai konduktivitas termal yang baik dan kalor jenis yang rendah dimana hanya membutuhkan energi yang sedikit untuk meningkatkan temperatur. 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 - 50 *mesh* pemilihan pasir berdasarkan tipe FBC yang akan digunakan. 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 - 100 μm 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 40-500 μm dan densitasnya berkisar antara 1400 sampai 4000 kg/m^3 .
- *Group C*
Kelompok ini memiliki ukuran rata-rata diameter partikel yang lebih kecil (<30 μm) 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 μm 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 μm . Pasir jenis ini

diklasifikasikan diantara grup B. Pasir kuarsa dan pasir silica 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 pentransfer panas.

2.5.5 Cyclone separator

Cyclone separator merupakan salah satu alat untuk mengurangi emisi yang ditimbulkan dari reaksi pembakaran, fungsi ini biasanya disebut *cleaning system* dari hasil proses pembakaran yang terjadi. *Cyclone separator* berfungsi sebagai alat pemisah partikel padat dengan gas, karena dalam pembakaran tidak semua partikel padat yang terbakar karena adanya kecepatan fluidisasi sehingga bahan bakar belum sempat terbakar langsung menuju *cyclone*. Pada komponen ini, yang dipisahkan adalah partikel-partikel hasil dari proses pembakaran. Akibat yang dihasilkan dari proses pembakaran yang terjadi, terutama pembakaran dengan *fluidized bed combustor*, akan menghasilkan partikel-partikel padat besar dan partikel-partikel padat kecil beserta dengan partikel gas.

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



Gambar 2. 16 Cyclone Separator Fluidized Bed Combustor UI

2.5.6. Blower

Blower merupakan komponen utama menjalankan proses fluidisasi, udara *blower* yang bertekanan yang dapat melawan tekanan statik pada *bed*, dengan tekanan tersebut udara dialirkan melalui distributor dan menuju hamparan. Reaksi udara dengan hamparan pasir akan menimbulkan fenomena fluidisasi dimana pasir bersifat seolah-olah seperti fluida, sebagai tolak ukurnya dapat dilihat dari kecepatan fluidisasi minimum. Selain harus dapat mengalirkan udara dengan kecepatan udara setidaknya sebesar kecepatan fluidisasi minimumnya, *blower* harus juga dapat memberikan cukup tekanan yang lebih besar dari pada nilai *pressure drop* (penurunan tekanan) yang melewati hamparan pasir. Pada saat proses pemilihan *blower* yang akan digunakan pada *fluidized bed combustor* UI, parameter-parameter yang digunakan dalam pemilihan tersebut adalah besar debit aliran maksimum *blower*, besar tekanan maksimum *blower*, dan besar daya yang dibutuhkan *blower*.



Gambar 2. 17 Ring Blower yang Digunakan pada FBC

2.4.7. Instrumentation

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

1. Inverter

Berfungsi untuk mengontrol putaran *feeder* dan putaran *blower*.



Gambar 2. 18 Inverter

2. Termokopel

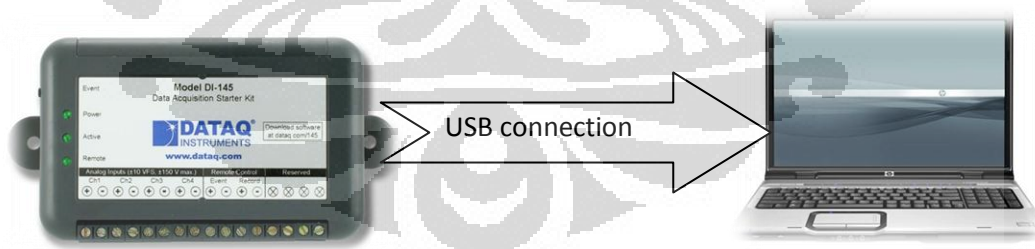
Berfungsi untuk mengukur temperatur di dalam ruang bakar.



Gambar 2. 19 Termokopel

3. *Data logger(DAQ)*

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





Gambar 2. 20 DAQ

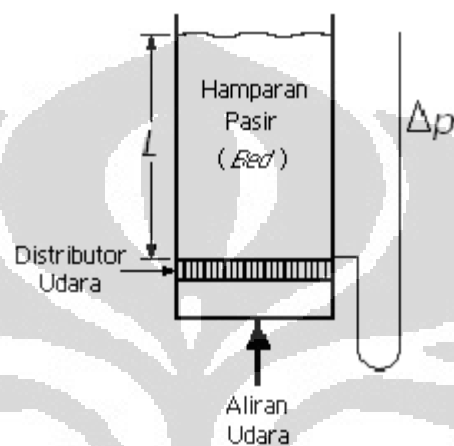
2.6 SIFAT FLUIDISASI

2.6.1 Proses Fluidisasi

Suatu aliran fluida jika melewati partikel solid/padat ada 3 kemungkinan yang terjadi, pertama, fluida tersebut tidak bisa melewati partikel tersebut, melewati partikel dan mengangkat partikel tersebut. Fenomena ini dipengaruhi oleh kecepatan dan tekanan yang dimiliki oleh fluida tersebut, jika fluida tersebut memiliki tekanan yang tinggi dan dapat melawan jatuh tekan yang terdapat pada partikel solid maka partikel tersebut dapat melayang secara berskala, namun jika aliran tersebut tidak memiliki tekanan dan kecepatan yang cukup untuk melawan penurunan tekanan pada hamparan dan distributor maka partikel tersebut akan tetap diam.

Kecepatan fluida yang tinggi dan tekanan yang cukup, 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 horizontal, 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 fluidisasi ini merupakan keuntungan utama dari penggunaan fluidisasi untuk menangani zat padat.



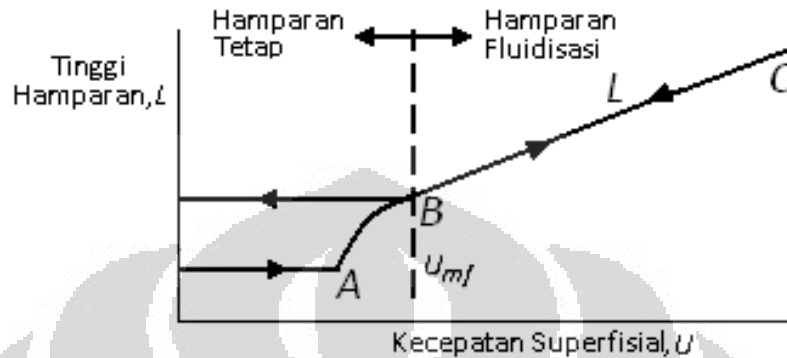
Gambar 2. 21 Skematik Fluidisasi

2.6.2 Kondisi Fluidisasi

Sebuah reaktor *fluidized bed* yang telah diisi hamparan pasir dengan ketinggian tertentu, ketika diberikan energi yang berasal dari *blower* yang melewati dan plat berpori untuk menopang pasir dan melewati distributor sehingga aliran udara mengalir merata diseluruh hamparan partikel, pada *start* awal udara mengalir dengan laju lambat sehingga tidak terjadi pergerakan pada pasir, namun jika ukuran hamparan kecil dan tekanan yang diberikan cukup untuk menggerakkan pasir maka partikel akan bergerak secara laminar, setelah itu jika keadaan telah konstan dimana pasir dapat bergerak, setelah itu kecepatan *blower* perlahan ditingkatkan efek dari kenaikan tersebut adalah nilai *pressure drop* pada pasir dan distributor meningkat walupun tinggi *bed* tidak berubah.

Pada kecepatan fluidisasi dimana tekanan yang melintasi hamparan hampir sama bahkan lebih dari gaya statis hamparan dan bahan bakar maka partikel akan bergerak, hal ini dijelaskan oleh gambar dibawah, semakin tinggi kecepatan maka

partikel akan berfluidisasi dengan adanya turbulensi dimana ada gerakan menjauh dan mendekat antar partikel dan posisi akan berpindah, jika kecepatan fluidisasi telah konstan maka diimbangi dengan penurunan tekanan yang konstan namun jika kecepatan terus dinaikan maka tinggi *bed* akan mengalami perubahan.



Gambar 2. 3 Hubungan Tinggi Hamparan Terhadap Kecepatan Superfisial

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 menetap 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

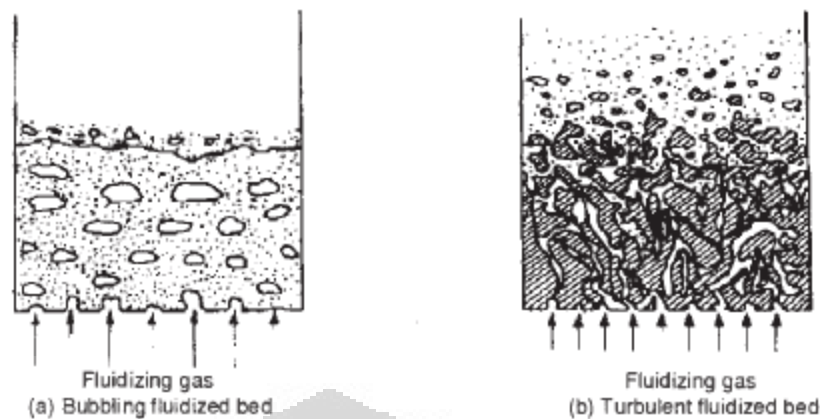
- **Fluidisasi partikulat (*particulate fluidization*)**

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

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

- **Fluidisasi gelembung (*bubbling fluidization*)**

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



Gambar 2. 23 Jenis *Fluidized bed*

Perilaku hamparan fluidisasi gelembung sangat bergantung pada banyaknya dan besarnya gelembung gas dan ini tidak mudah meramalkannya. Ukuran rata-rata gelembung itu bergantung pada jenis dan ukuran partikel, jenis plat distributor, kecepatan superfisial, dan tebalnya hamparan. Gelembung-gelembung cenderung bersatu, dan menjadi besar pada waktu naik melalui hamparan fluidisasi (*fluidized bed*) itu dan ukuran maksimum gelembung stabil berkisar antara beberapa inci sampai beberapa kaki diameternya. Gelembung-gelembung yang beriringan lalu bergerak ke puncak terpisah oleh zat padat yang seakan-akan sumbat. Peristiwa ini disebut “penyumbatan” (*slugging*) dan biasanya hal ini tidak dikehendaki karena mengakibatkan adanya fluktuasi tekanan di dalam hamparan, meningkatkan zat padat yang terbawa ikut, dan menimbulkan kesulitan jika kita ingin memperbesar skalanya (*scale up*) ke unit-unit yang lebih besar.

2.6.4 Parameter-Parameter Fluidisasi

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

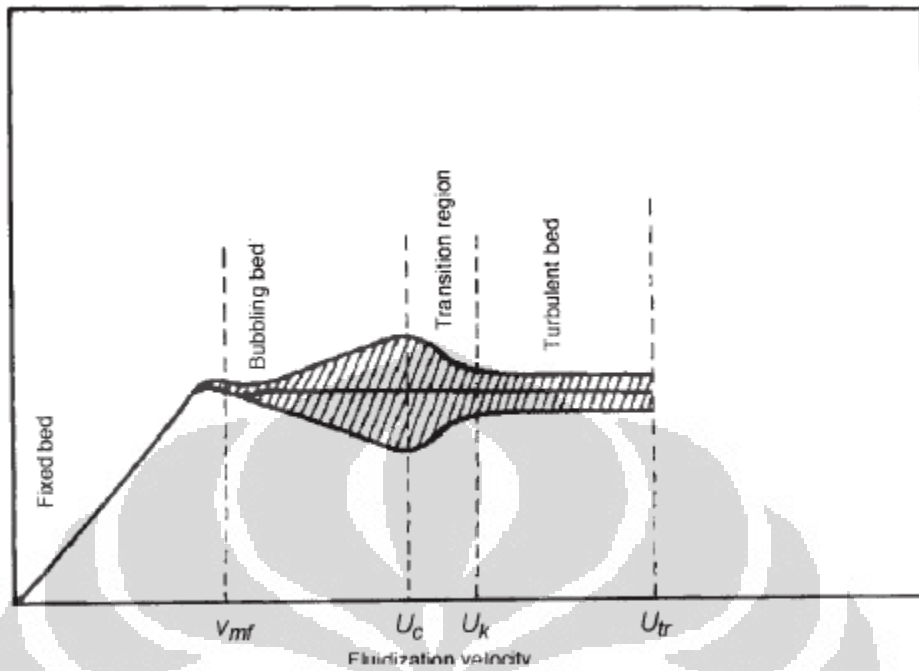


Figure 2.8. *Pressure drop oscillations in transition from bubbling to fast fluidization*

Gambar 2. 24 *Pressure drop vs Minimum fluidization*



Gambar 2. 25 *Proses Fluidisasi*

- **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} .

- **Masa jenis padatan**

Masa jenis padatan dapat dibedakan dalam tiga jenis, yaitu *bulk*, *skeletal*, dan *particle density*. Masa 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

Bulk density merupakan sifat dari senyawa padat yang terbagi dimana masa dari semua partikel solid itu dibagi dengan total volume yang ditempati oleh partikel tersebut volume dalam pengertian ini termasuk volume antara kekosongan dari setiap partikel solid, volume partikel tersebut dan pori dari partikel tersebut.

Bulk density bukan sifat utama yang dimiliki oleh suatu partikel dalam hal ini bahan bakar, nilai *bulk density* tergantung terhadap penanganan yang dilakukan terhadap partikel tersebut

- **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.

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

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

- **Bed voidage**

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

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

- **Kecepatan fluidisasi minimum**

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

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

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

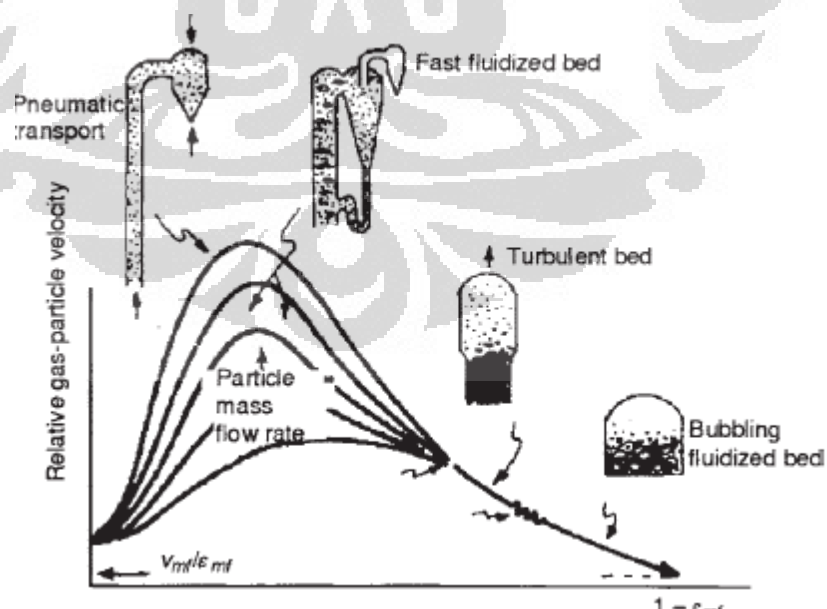
$$Re_{mf} = \frac{\bar{d}_p \rho_f U_{mf}}{\mu_f}$$

bilangan *Archimedes* (Ar):

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

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

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



Gambar 2. 26 Jenis Gerakan Fluida pada Setiap Jenis Reaktor

- **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_p) akan kurang lebih sama dengan berat hamparan per satuan luas.

Sehingga persamaan penurunan tekanan melalui *bubling* adalah:

$$\Delta p_p = \left[150 \frac{(1 - \varepsilon)^2 \mu \cdot v_s}{\varepsilon^2 (\varphi d_m)^2} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon) \rho v_s^2}{\varepsilon^3 \cdot \varphi \cdot d_m} \right] \cdot L$$

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)

- **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 bukan pada aliran udara yang melewati distributor) adalah f_{oa} , maka kecepatan udara rata-rata melewati orifis adalah:

$$\Delta p_d = \frac{L \cdot g}{\rho_u} \left(\frac{\dot{m}_u}{3600 \cdot \beta^2 \cdot d_o^2 \cdot v_o} \right)^2$$

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

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

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

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

Keterangan :

- 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)

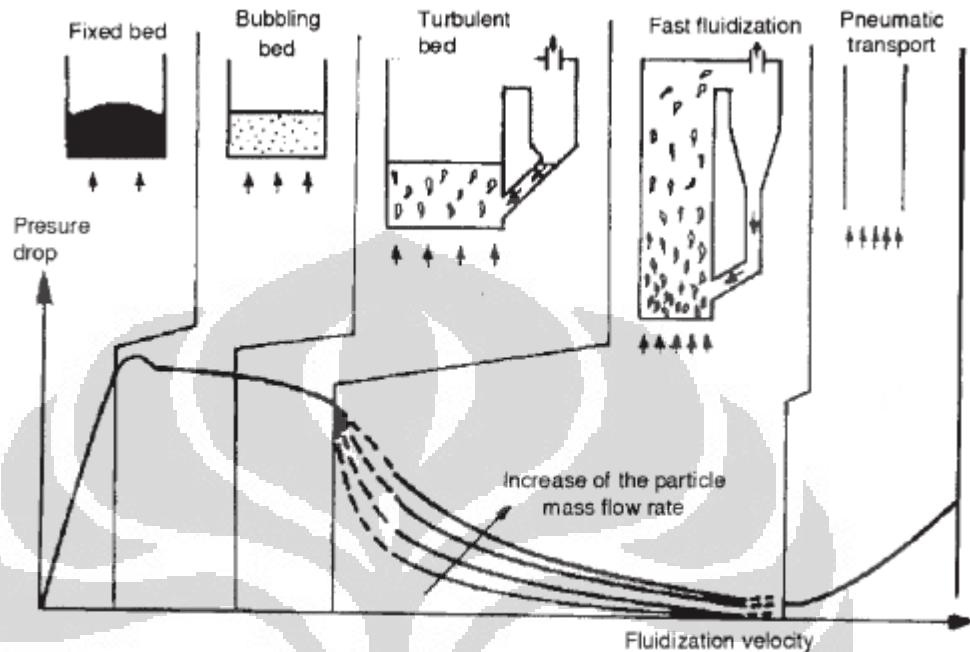


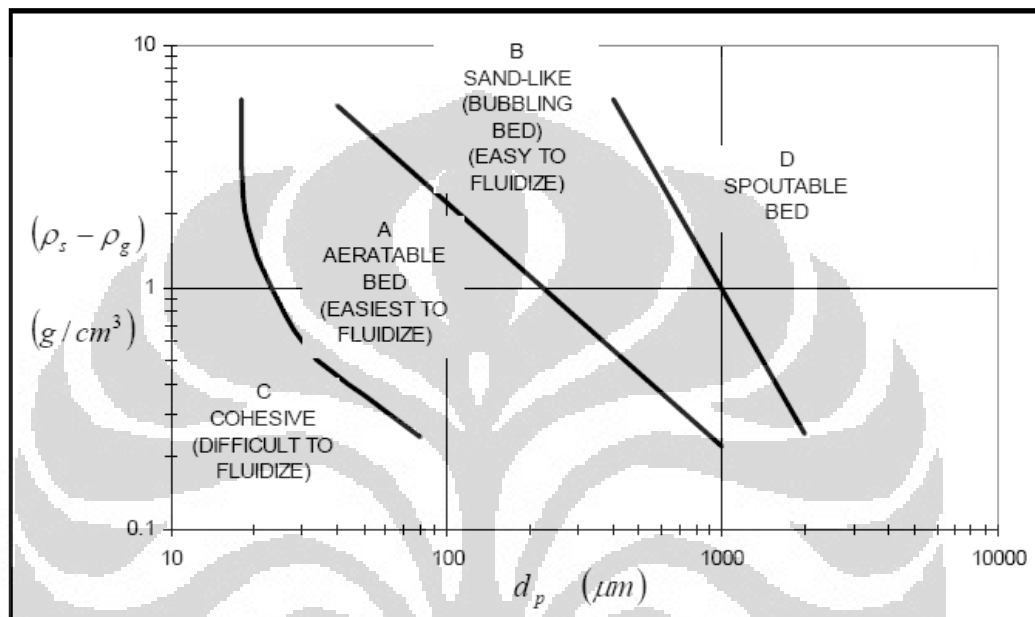
Figure 2.6. Pressure drop in dependence of fluidization velocity for different fluidization regimes

Gambar 2. 27 Proses Fluidisasi dari Berbagai Jenis Regim

- **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 masa 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 masa jenis partikel pasir dengan masa jenis udara. Diagram klasifikasi jenis-jenis pasir yang dikelompokkan oleh Geldart dapat dilihat pada gambar.



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 masa jenis kurang dari 1400 kg/m^3 dan memiliki ukuran berkisar antara $20 - 100 \mu\text{m}$. Para peneliti telah menunjukkan dengan meyakinkan bahwa terdapat gaya antar partikel bahkan pada pasir seperti *cracking catalyst* yang menunjukkan pada kelompok ini. Hambaran pasir pada kelompok ini sangat mengembang pada kecepatan udara antara U_{mf} dan kecepatan yang mana gelembung mulai terjadi, U_{mb} , karena pasir seperti itu sedikit kohesif.

Pasir jenis ini memperlihatkan suatu peningkatan hambaran (*bed*) nyata yang mengembang stabil ketika kecepatan fluidisasi minimum terlampaui dahulu, dan fluidisasi dapat terjaga seragam atau fluidisasi partikulat seperti itu bahkan

sampai kecepatan fluidisasi minimum telah terlampaui dua sampai tiga kalinya. Tetapi, dengan memperbesar lagi kecepatan udara sampai pada suatu titik yang mana terjadinya hamparan mengempis kembali sehingga pada keadaan kurang mengembang yang kira kira pada tingkat mengembangnya hamparan di bawah kondisi fluidisasi minimum dan kebanyakan udara berlebih akan mengalir melalui hamparan seperti fase gelembung, yakni yang sering disebut dengan fluidisasi agregatif. Kecepatan udara pada saat yang mana hamparan mengempis terjadi merupakan kecepatan minimum gelembung (*minimum bubbling velocity*, U_{mb}).

b) *Group B*

Pasir *group B* menurut Geldart cenderung untuk memiliki ukuran berkisar antara 40 - 500 μm dan masa jenis berkisar antara 1400 - 4000 kg/m^3 . Berkebalikan dengan pasir *group A*, gaya antar partikel diabaikan dan gelembung-gelembung mulai terbentuk pada kecepatan fluidisasi minimum atau sedikit lebih di atasnya. Berkembangnya hamparan kecil dan hamparan tersebut mengempis dengan sangat cepat ketika suplai udara dihentikan. Kebanyakan gelembung naik lebih cepat daripada kecepatan udara interstisial dan ukuran gelembung meningkat dengan keduanya yakni tinggi hamparan dan kecepatan udara berlebih ($U - U_{mf}$). Pasir jenis ini memperlihatkan pengembangan hamparan yang kurang stabil; gelembung (fluidisasi agregatif) terjadi pada kecepatan fluidisasi minimum atau sedikit lebih di atasnya. Gelembung cenderung berkembang sampai diameter gelembungnya terbatas oleh ukuran dari hamparan (*bed*) pasir *group B*.

c) *Group C*

Pasir *group C* merupakan pasir yang ukuran rata-ratanya lebih kecil dibandingkan yang lainnya ($<30 \mu m$) dan atau masa jenis yang lebih kecil juga sehingga gaya-gaya antar partikel mempunyai pengaruh yang lebih besar daripada gaya gravitasi. Pasir jenis ini sangat sulit untuk terfluidisasi. Tidak mungkin terjadi pada pasir jenis ini yang mana besar penurunan tekanan sama dengan berat per unit luas. Hal ini menunjukkan bahwa peranan dari berat, bahkan jika hamparan menunjukkan sifat-sifat tampaknya seperti fluida, disokong oleh gaya antar partikel dan persinggungan permukaan partikel. Pada pasir jenis ini, *channelling* sangat mudah terjadi. Sekali hal ini terjadi, maka cenderung

memperbesar jalurnya ketika meningkatkan kecepatan udara sehingga udara tidak terdistribusi dengan baik yang mana tidak pernah terjadi benar-benar fluidisasi.

d) *Group D*

Pasir *group D* biasanya memiliki ukuran lebih besar dari pada $600 \mu\text{m}$ dan atau masa 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 bermasa 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. 11 Increasing Size and Density

Group	C	A	B	D
Most obvious characteristic	Cohesive, difficult to fluidize	Bubble-free range of fluidization	Starts bubbling at U_{mf}	Coarse solids
Property	Flour, cement	Cracking catalyst	Building sand, table salt	Crushed limestone coffee beans
1. Bed expansion	Low when bed channel, can be high when fluidized	High	Moderate	Low
2. Deaeration rate	Initially fast, exponential	Slow, linear	Fast	Fast
3. Bubble Properties	No bubbles. Channels, and cracks	Splitting/recoalescence predominate, maximum size exist, large wake	No limit on size	No known upper size; small wake
4. Solids mixing ^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
Effect on properties 1 to 7 of	Particle size distribution ^b	Not known	Increasing <45 μm fraction improves properties	None
	Increasing pressure, temperature, viscosity, density of gas	Probably improves	Definitely improves	Uncertain, some possibly

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

^b At equal d_p

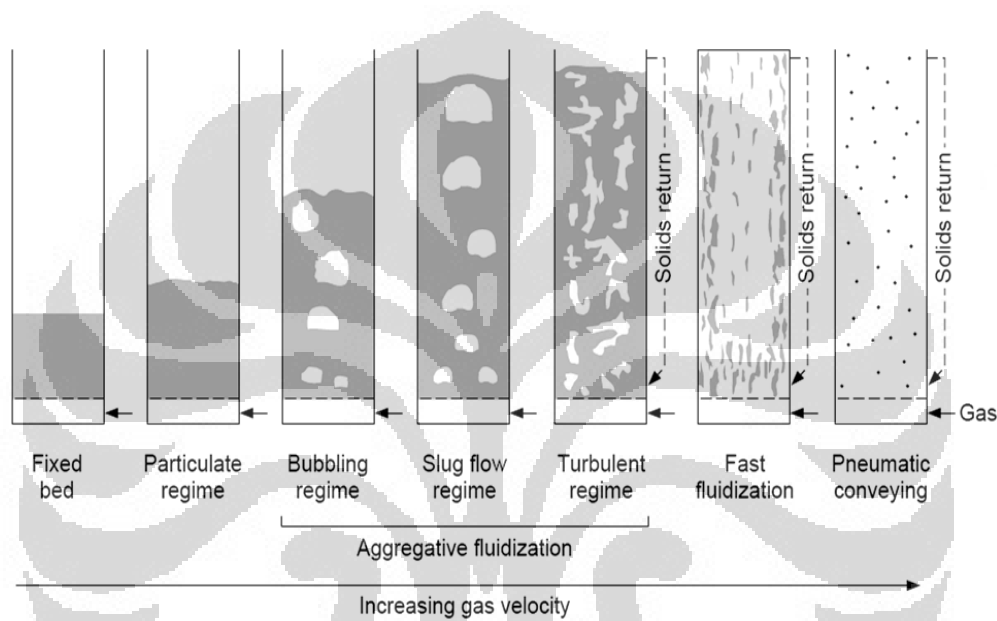
(Sumber: Geldart, 1991)

- **Daerah batas fluidisasi (*fluidization regimes*)**

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

mengembang saat kecepatan aliran gas dinaikkan pula dan mengalami daerah batas fluidisasi dari *fixed bed* sampai *pneumatic conveying*.

Untuk daerah batas fluidisasi turbulen dan di atasnya beroperasi di atas kecepatan terminal dari beberapa atau bahkan semua partikel, maka pengembalian kembali partikel (*solids return*) adalah perlu untuk mempertahankan hamparan. Cara setiap daerah batas fluidisasi tampil berbeda-beda menurut kecepatan aliran gas (gambar 2.29).



Gambar 2. 29 Daerah Batas Fluidisasi [sumber: Grace. 1986]

Jadi daya motor listrik untuk memutar *induced draft fan* (P_{in}) dapat diperoleh dari persamaan sebagai berikut:

$$P_{in} = \frac{\Delta p_{in} \dot{m}_g}{75 \rho_g \cdot \eta_{in} \eta_{m2}} \quad (15)$$

Agar tekanan gas buang di dalam ruang bakar negatif, maka tekanan operasi *induced draft fan* disyaratkan $\Delta p_{in} < \Delta p_{st}$ dan $P_{in} < P_{m2}$.

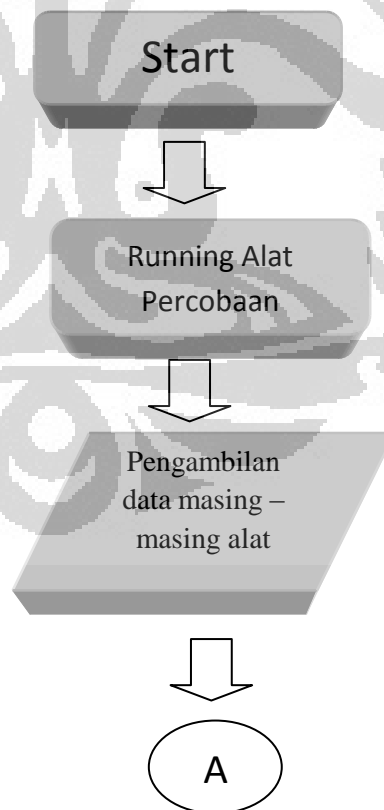
BAB 3

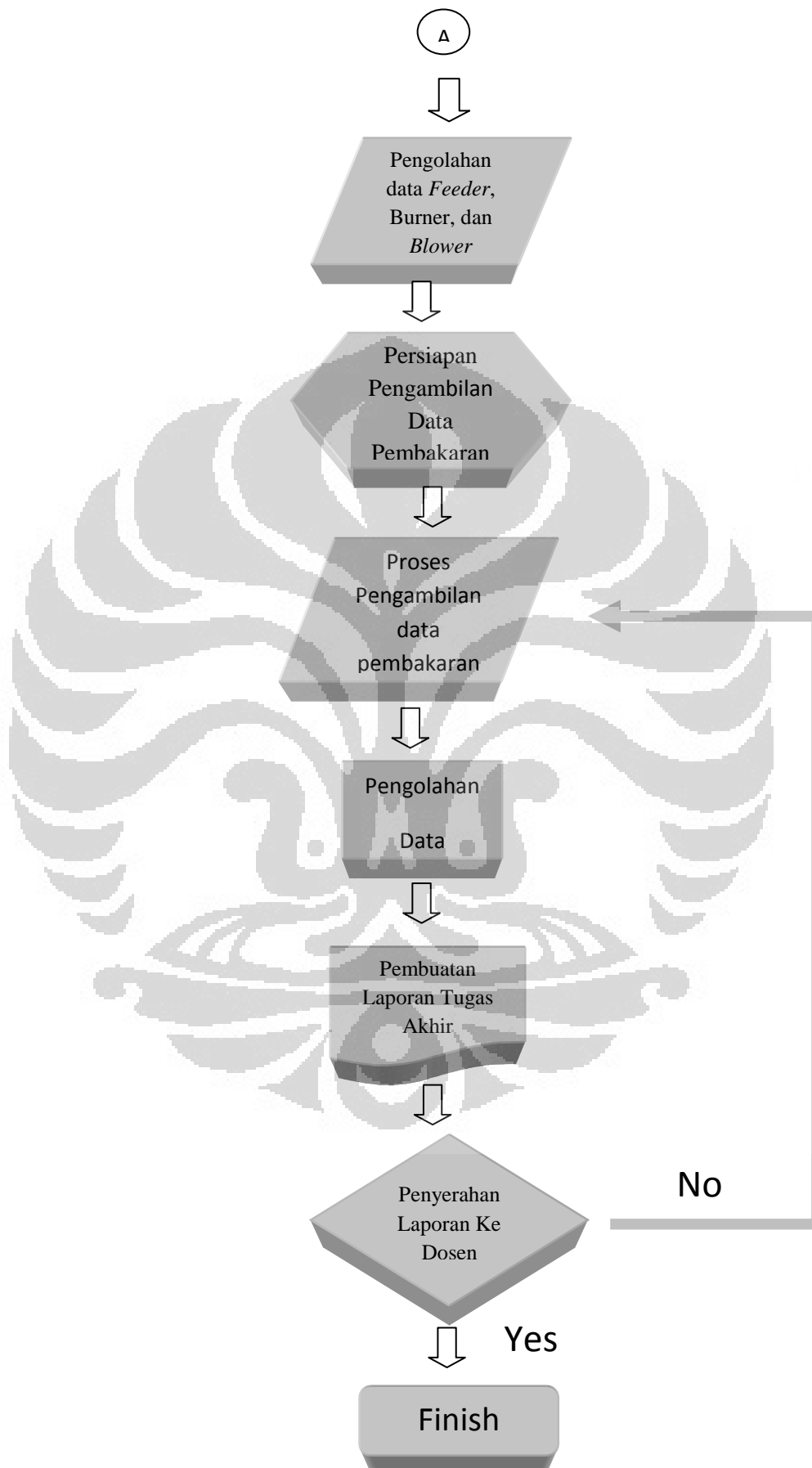
PERSIAPAN DAN PROSEDUR PENGUJIAN

3.1 *OUTLINE* PENELITIAN

Dalam sistem *fluidized bed combustor* perlu dilakukan persiapan dan pengecekan terhadap fungsional dari setiap alat dari sistem mayor hingga sistem pendukung agar hasil pengujian yang didapat akurat, berlangsung secara efektif dan hasil yang didapat menggambarkan proses real yang terjadi sebenarnya, untuk itu perlu dibuat suatu regulasi dari cara kerja dan pengoperasi alat dimana terdapat SOP (*Standard Operational Procedure*) pada setiap alat, komponen, dan instrumen yang ada di FBC UI.

Berikut ini ditampilkan uraian proses kegiatan yang dilakukan dalam penelitian ini dalam bentuk *flow-chart*.





Pengujian yang dilakukan adalah karakteristik pembakaran terfluidisasi menggunakan bahan bakar biomasa tempurung kelapa dan ukuran 1x1 cm dan 1,5x1,5 cm setelah kondisi *self sustain* terjadi, diversifikasi bahan bakar diganti dengan daun – daun kering yang terdapat di Universitas Indonesia.

3.1.1 Bahan Bakar Biomasa

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

1. Sisa hasil industri pertanian dan perkebunan (tandan kelapa sawit, limbah kelapa, sampah, daun dan lain - lain)
2. Tumbuhan pertanian yang khusus ditujukan untuk kepentingan energi dan juga limbah agrikultur.
3. Limbah pegunungan, kayu olahan yang sudah tidak digunakan
4. Kotoran binatang yang memiliki nilai *fix* karbon tinggi
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)

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



Gambar 3.1 Tempurung Kelapa

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

Tabel 3.1 Potensi Biomassa di Indonesia

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

Penggunaan tempurung kelapa sebagai bahan bakar memerlukan perlakuan dan penanganan khusus seperti pemisahan cangkak dengan serabut yang menempel pada kelapa, setelah itu dilakukan proses pencacahan bahan bakar menggunakan mesin dan pengeringan bahan bakar menggunakan sinar matahari yang bertujuan mengurangi kadar air dalam bahan bakar dalam sistem FBC.

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

Partikel kecil	:	panjang = 10 mm dan 15 mm
		lebar = 10 mm dan 15 mm
		tebal = 3 – 5 mm

Untuk mendapatkan ukuran yang demikian, potongan tempurung kelapa yang sudah melewati mekanisme *crushing*, disortir secara manual dan dengan bantuan pengayak, sehingga terpisah sesuai ukuran yang diinginkan.

Daun merupakan contoh biomassa yang langsung dapat kita dapatkan di Lingkungan kampus Universitas Indonesia, dengan kapasitas yang ada biomassa ini dapat kita manfaatkan untuk energi mandiri dari Universitas, disamping itu pemanfaatan daun dapat menjadi pionir untuk mengembangkan bahan bakar baru yang tersedia dalam jumlah besar dan tidak memiliki harga, potensi bahan bakar daun itu sendiri di Indonesia berdasarkan survei.

Tabel 3.2 Sifat biomassa di Indonesia

Table 1. Dimensions of Forest Residue Components

Residue fractions	Thickness ^a (mm)	Length ^a (mm)	Width ^a (mm)
Chips	6.3 (0.8)	26.1 (8.3)	18.5 (0.0)
Barks	4.4 (1.2)	32.0 (0.9)	15.0 (0.8)
Small stems	4.7 (0.5)	124.9 (98.3)	4.6 (0.2)
Leaves	0.5 (0.1)	93.0 ^b (28.2)	—
Small particles ^c	<4.8		

^aNumbers in the parenthesis are standard deviation with five replications.

^bThe length of the leaves ranges from 36.1 to 124.1 mm.

^cThe size of small particles represents particles that are smaller than 4.8 mm screen size.

Table 2. Chemical and Fuel Properties of Forest Residue Fractions

Biomass	Pine forest residues	Leaves	Small particles	Small stems	Barks	Chips
Proximate Analysis^a (% dry basis)						
Volatile	80.5 (0.4)	78.3 (0.3)	79.3 (0.6)	79.6 (1.4)	72.9 (0.2)	85.4 (0.2)
Ash	2.4 (0.1)	3.87 (0.2)	3.44 (0.2)	2.9 (0.4)	4.3 (0.2)	1.5 (0.2)
Fixed Carbon	17.1 (0.3)	17.9 (0.2)	17.3 (0.4)	17.4 (1.0)	22.9 (0.2)	13.1 (0.2)
HHV (MJ/kg)	19.6 (0.2)	20.2 (0.2)	19.4 (0.1)	19.1 (0.1)	19.1 (0.1)	19.5 (0.1)
Ultimate Analysis^a (% dry basis)						
Carbon	45.9 (0.5)	49.6 (0.3)	47.9 (0.4)	47.0 (0.6)	47.9 (0.4)	47.7 (0.5)
Hydrogen	5.9 (0.2)	6.9 (0.1)	6.4 (0.1)	6.4 (0.2)	5.9 (0.1)	6.7 (0.1)
Oxygen	43.5 (0.6)	35.2 (1.0)	39.6 (0.5)	40.8 (0.8)	38.9 (0.2)	41.0 (1.4)
Nitrogen	2.3 (0.4)	4.5 (0.8)	2.7 (0.2)	2.9 (0.3)	3.0 (0.3)	3.0 (1.0)
Sulfur	-	0.1	-	-	-	0.1



Gambar 3.2 Daun Kering

Dari analisa *proximate* dan *ultimate* maka kita dapat mengetahui nilai panas yang dapat dihasilkan oleh daun kering, nilai *fixed* karbon beserta komposisi penyusun dengan nilai ini yang lebih besar dibandingkan dengan tempurung kelapa namun kekurangan dari daun kering adalah banyaknya sifat penyusun yang tidak terbakar, namun dalam daun tidak terdapat sulfur namun kandungan nitrogen yang tinggi sehingga bahan bakar ini perlu penanganan yang serius.

3.1.2 Pasir

Pasir merupakan bagian utama dari sistem FBC dimana fluidisasi dan proses pembakaran akan terjadi pada pasir, penentuan diameter pasir, masa jenis pasir dan kalor jenis akan menentukan reaksi yang akan terjadi pada reaktor. Jika masa pasir terlalu kecil/diameter besar maka dibutuhkan daya yang lebih besar dari *blower* agar proses fluidisasi minimum dapat terjadi namun adanya batasan *pressure drop* yang dapat ditampung oleh *blower* maka pemilihan pasir yang sesuai akan mengoptimalkan penggunaan sistem FBC. Penggunaan pasir silika yang memiliki nilai kalor jenis yang kecil sehingga untuk menaikkan temperatur pasir dibutuhkan energi yang lebih sedikit dan pasir dapat menyimpan panas lebih baik.

Sebagai perbandingan nilai *specific heat* untuk substansi-substansi yang lain dapat dilihat pada tabel 3.2. 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 3.3 *Specific Heat* Berbagai Substansi

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

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

Tabel 3.4 Sifat fisik, termal, dan mekanik pasir silika

<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>

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

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 300-500 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 3.5 yang mana terdapat ukuran lubang ayakan (*mesh*) menurut standar di Amerika. Berdasarkan tabel tersebut maka partikel pasir yang berkisar antara 300-500 μm adalah partikel pasir dengan ukuran diameter partikel pasir antara 35 - 50 *mesh*.

Tabel 3.5 Distribusi Ukuran Pengayakan Pasir Silika

Sumber: AGSCO Silica Sand Technical Data Sheet

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

Oleh karena itu, digunakanlah pasir silika dengan ukuran mesh 20 hingga 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 3.3 Pasir silika mesh 30-40 yang digunakan pada FBC UI

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

- masa jenis partikel pasir (ρ_p) = 2600 kg/m^3
- masa jenis borongan pasir (ρ_b) = 1300 kg/m^3
- diameter hambaran pasir (d_b) = $63,5 \text{ cm} = 0,635 \text{ m}$
- tinggi hambaran pasir (*bed height*) = $7,5 \text{ cm} = 0,075 \text{ m}$

3.1.3 Perlengkapan dan Peralatan

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

1. *Generator Set*

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



Gambar 3.4 Generator set yang digunakan

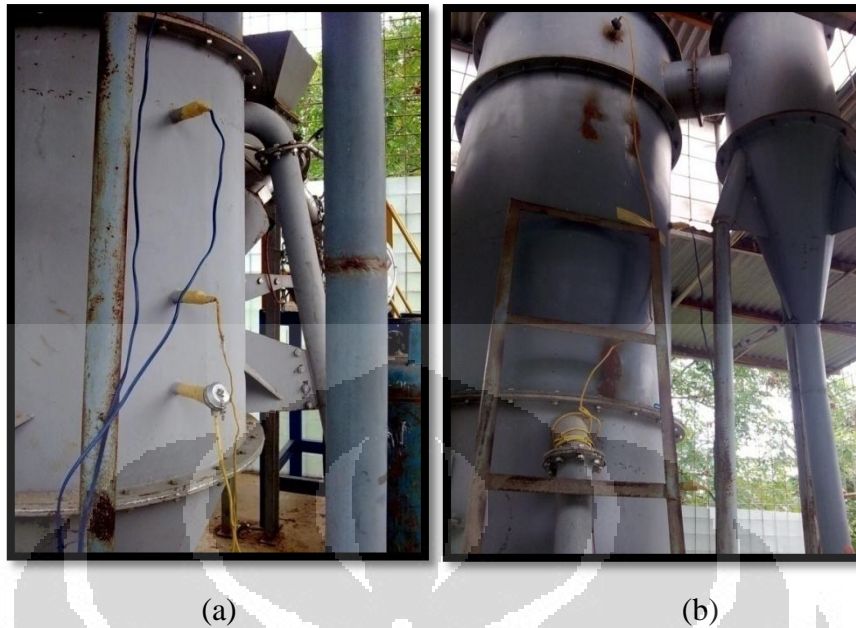
Berikut ini spesifikasi dari genset dengan merk Starke GFH 6900 LXE

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

2. Termokopel

Jenis termokopel yang digunakan disini adalah termokopel tipe K. Lima termokopel yang ada sebelumnya sudah dikalibrasi oleh mahasiswa peneliti untuk keperluan skripsi di lab gasifikasi. Termokopel itu dimasukkan satu persatu pada reaktor FBC dengan konfigurasi ketinggian yang berbeda-beda diukur dari batas tengah distributor FBC yang ada (T2 paling dekat dengan hamparan pasir dan 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 3.5 Konfigurasi Termokopel (a). T1 - T3, dan (b). T4 – T6

3. *Data Acquisition (DAQ)*

Untuk mendapatkan data-data keluaran dari distribusi temperaturnya digunakan *Data Acquisition (DAQ)* sebagai pengkonversi suhu dari data analog (temperatur) ke data digital yang kemudian akan ditampilkan pada layar *display* yang ditampilkan pada *laptop*



Gambar 3.6 *Data Acquisition*

4. Timbangan (*weight scale*)

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



Gambar 3.7 Timbangan dengan skala maksimum 5 kg

5. 2 Unit *Inverter*

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 5,4hp.



Gambar 3.8 *Inverter IDF Blower*

3.2 STANDAR OPERASI ALAT PENGUJIAN

3.2.1 Sistem *Feeder*

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



Gambar 3.9 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 3.6 Spesifikasi motor *feeder*

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

- CHENTA gear speed reducer type MHFI :

- Size : 37
- Ratio : 30

- Rasio *sprocket* : - jumlah gigi pada motor = 16
- jumlah gigi pada *screw feeder* = 24

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

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

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

3.2.2 Ring Blower

Blower digunakan sebagai alat untuk menyuplai udara yang dibutuhkan agar terjadi proses fluidisasi dan juga terjadi reaksi pembakaran secara terus menerus selama pengoperasian alat berlangsung. *Blower* tersebut berfungsi untuk mengalirkan udara ke reaktor dengan debit tertentu sehingga pasir silika yang

ditopang dengan plat distributor tersebut terfluidisasi. *Blower* harus dapat memberikan aliran udara dengan kecepatan aliran yang mencukupi sehingga terjadi fluidisasi, dan sebagai tolok ukurnya dapat dilihat dari kecepatan fluidisasi minimum. Selain harus dapat mengalirkan udara dengan kecepatan udara setidaknya sebesar kecepatan fluidisasi minimumnya, *blower* harus juga dapat memberikan tekanan yang lebih besar dari pada nilai *pressure drop* (penurunan tekanan) saat melewati distributor dan hamparan pasir.



Gambar 3.10 Ring Blower pada Fluidized bed Combustor UI

Spesifikasi dari *blower* yang digunakan adalah sebagai berikut ini

Tabel 3.7 Spesifikasi Teknis Ring Blower

<i>Phase</i>	3 Ø
<i>Frequency (Hz)</i>	50 / 60
<i>Power (kW)</i>	2,2
<i>Voltage (V)</i>	220
<i>Current (A)</i>	8
<i>Pressure (max)(mm H₂O)</i>	2800
<i>Air Flow (max)(m³/min)</i>	6,2
<i>Inlet / Outlet Pipe</i>	2"
<i>Weight (kg)</i>	35

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

1. Pastikan bahwa kabel dari *blower* sudah terhubung dengan tepat ke panel kontrol untuk *blower*, sambungkan setiap kabel sesuai dengan warnanya.
2. Sambungkan konektor dari panel kontrol ke generator set yang sudah menyala untuk mendapatkan sumber tegangan. Gunakan *test pen* untuk memastikan sisi konektor terhubung dengan sisi *generator set* yang benar.
3. Lalu aktifkan *switch* utama dan *circuit breaker* dengan menekan ke arah atas, lampu di pintu panel akan menyala.
4. Tekan *switch* berwarna hitam sebelah kanan ke arah bawah agar *inverter blower* menyala.
5. Tekan tombol atas ataupun bawah untuk mencari set untuk putaran (*rpm*), lalu tekan tombol *enter* di bagian tengah.
6. Tekan tombol di pintu panel sebelah kanan agar menyala hijau, kemudian atur besarnya *rpm* yang diinginkan dengan memutar-mutar pengendali *blower* yang ada di pintu panel di atas tombol berwarna hijau tersebut.

7. Jika sudah selesai dan ingin mematikan *blower*, putar pengendali ke nol lagi dan matikan semua *switch* pada panel kontrol.

3.2.3 *Sirroco Blower*

Blower yang berfungsi untuk meng-*induceed*/menghisap udara hasil pembakaran pada reaktor agar udara panas tersebut dapat digunakan untuk pengeringan bahan bakar yang diletakan setelah posisi *blower* hisap, selain itu fungsi *blower* hisap untuk mengurangi terjadi negatif *pressure* yang terjadi pada ruang bakar dan *feeder*, dalam eksperimen sebelumnya terjadi tekanan negatif pada sistem *feeder* dimana bahan bakar langsung bereaksi pada sistem tersebut karena tekanan yang terlalu kecil sehingga api menyembur ke sistem *feeder*, fungsi lain penggunaan *blower* jenis ini dapat mensirkulasi udara hasil pembakaran sehingga dapat dibuang ketempat yang telah ditentukan dan tidak mengganggu lingkungan.



Gambar 3.11 *Siroco blower*

3.2.4 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:

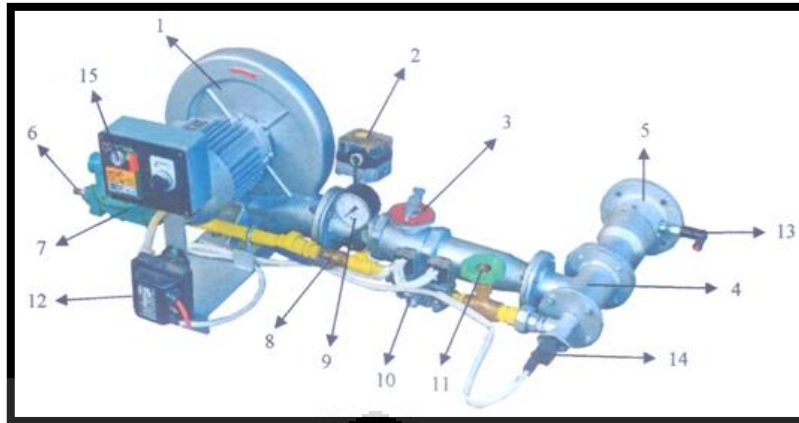
1. Buka *ball valve* utama gas masuk.
2. Atur tekanan kerja gas pada 20~30 mbar (200 ~ 300 mm H₂O).
3. Putar saklar *burner control* ke posisi *on* untuk mengaktifkan *burner control*. Pada tahap awal, *burner control* melakukan pengecekan status awal apakah ada tekanan udara palsu dan apakah ada api 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. <i>Blower</i> | 9. <i>Gas pressure gauge</i> |
| 2. <i>Air pressure switch</i> | 10. <i>Combination solenoid valve</i> |
| 3. <i>Air damper</i> | 11. <i>Gas needle valve</i> |
| 4. <i>Premixer</i> | 12. <i>Ignition trafo</i> |
| 5. <i>Head burner</i> | 13. <i>Spark plug</i> |
| 6. <i>Gas inlet</i> | 14. <i>UV sensor</i> |
| 7. <i>Gas second regulator</i> | 15. <i>Burner control</i> |
| 8. <i>Gas main valve</i> | |

Tabel 3.8 Spesifikasi Teknis *Hi-Temp Premixed Burner*

<i>Burner</i>	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
<i>Blower</i>	Tekanan Statik	200-300 mmH_2O
	Debit Aliran	2,5 m^3/min
Sumber Daya	Sistem <i>Burner</i>	220 V; 0,75 <i>kW</i>

3.3 Prosedur Pengujian Bahan Bakar

Bahan bakar yang akan digunakan berupa biomasa yang terdiri dari cangkang kelapa yang digunakan pada pemanasan awal, biomasa tempurung kelapa digunakan sampai keadaan pasir/*bed* mencapai kondisi *self sustain* yang diindikasikan dengan bahan pasir berwarna merah setelah proses kondisi kerja pasir tercapai maka dilakukan pergantian bahan bakar dengan melakukan pengumpanan menggunakan daun kering, dari kondisi *self sustain* akan diketahui karakteristik bahan bakar daun kering dan perbedaannya ketika menggunakan cangkang kelapa. Dengan adanya data temperatur maka kita dapat menarik hubungan antara tebal pasir, kecepatan *blower* dan ukuran bahan bakar yang digunakan, untuk mendapatkan karakteristik pembakaran yang baik maka diperlukan persiapan khusus dan waktu pemberian bahan bakar, pemilihan kecepatan udara dan tebal/ukuran pasir yang kita gunakan faktor ini yang akan membantu optimalisasi hasil pembakaran.

3.3.1 Rangkaian Alat Pengujian

Setiap proses yang dilakukan dalam *Fluidized Bed Combustor* telah diatur dengan baik tentang prinsip pengoperasiannya dan tata cara pengoperasian. Hal ini telah diatur dalam SOP (*standart of procedure*) yang telah disusun oleh penelitian sebelumnya hal ini tertulis dalam hal seperti berikut :

1. *Generator set* telah siap dengan bahan bakar yang cukup
2. Panel inverter telah dihubungkan ke generator set
3. Sistem *feeder* telah dihubungkan dengan panel inverter
4. Sistem *blower* telah dihubungkan dengan panel inverter
5. Sistem *start up burner* telah disambungkan dengan generator set via *stabilizer*
6. Termokopel telah terhubung dengan data *logger* yang terletak di beberapa area *fluidized bed combustor*
7. Semua posisi perangkat disusun dengan baik dan teratur sehingga memudahkan pengoperasian sehingga tidak terdapat masalah ketika alat telah dijalankan

3.3.2 Prosedur Pengambilan Data Pembakaran

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

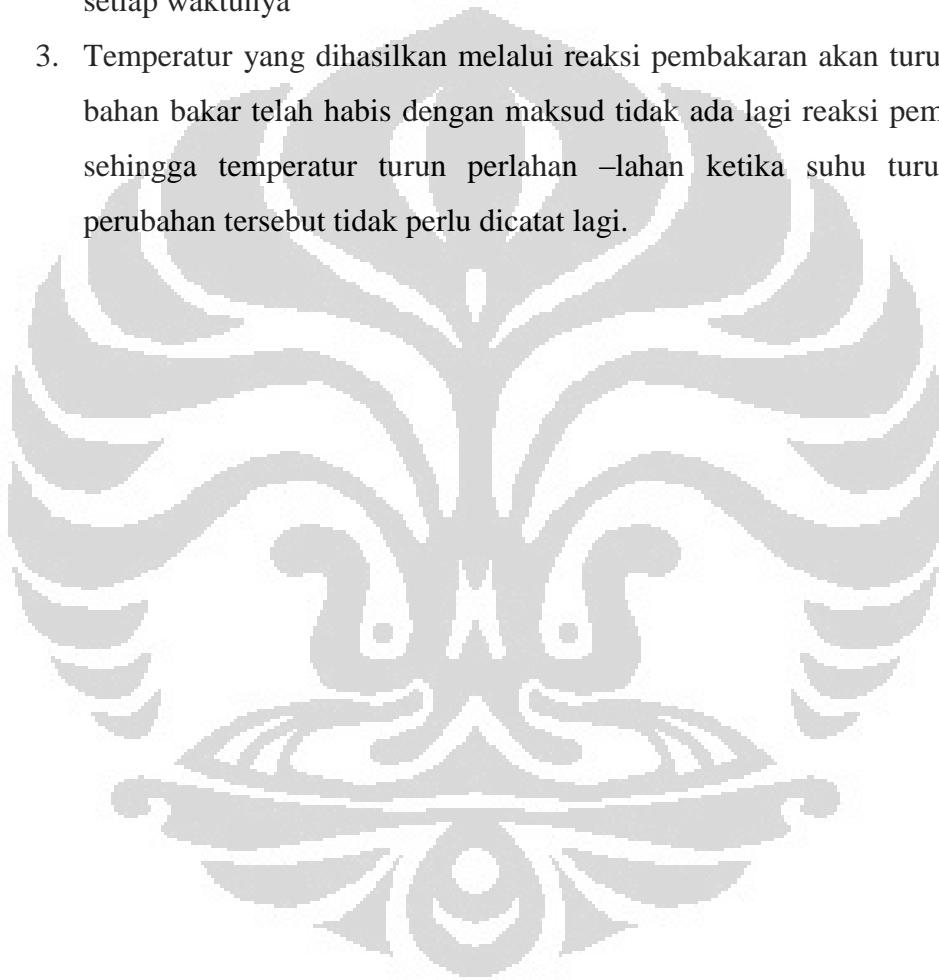
Prosedur Pemanasan Awal

1. Persiapan pada proses sebelumnya dengan keadaan alat dapat berfungsi dengan baik
2. Melakukan *start-up* pada generator set
3. *Blower* dinyalakan bersamaan dengan penyalaan *burner*, hal ini bertujuan mencapai pemanasan merata pada pasir
4. Menyalakan *burner* untuk pemanasan awal dengan pengumpanan bahan bakar, hal ini bertujuan untuk memanaskan pasir hingga mencapai kondisi kerja pasir di FBC UI
5. Setelah pemanasan awal menggunakan *burner* maka dilakukan pengumpanan bahan bakar tergantung kondisi temperatur kerja, hal ini dilakukan secara kontinu hingga suhu pasir/*bed* mencapai suhu 500-800 derajat
6. Ketika temperatur *bed* telah mencapai suhu 400-800 dimana kondisi ini disebut kondisi *self sustain*/pembakaran dapat terjadi dengan sendiri dimana ditandai dengan pasir berwarna merah dan mengeluarkan api maka *burner* akan dimatikan
7. Setelah kondisi *self-sustained* tercapai maka bahan bakar akan diganti dengan daun kering, hal ini digunakan untuk memanfaatkan potensi daun kering yang terdapat pada kampus Universitas Indonesia
8. Penggunaan daun kering setelah kondisi *self-sustained* dilakukan karena ketika daun digunakan sebagai bahan bakar pemanasan awal suhu *bed* tidak tercapai karena laju pembakaran dari daun sangat cepat, namun ketika telah mencapai kondisi *self sustained* bahan bakar ini dapat memberikan energi yang baik dengan digabungkan dengan ranting

Prosedur Pengambilan data pembakaran

1. Ketika temperatur *bed* mencapai 400-800 derajat dan cenderung untuk stabil maka bahan bakar daun kering dimasukkan dengan takaran 0.25 kg/30 detik per setiap terjadinya penurunan temperatur *freeboard* dan *bed*, yang dimasukkan dalam waktu tertentu melalui pintu masuk bahan bakar

2. Bahan bakar yang telah dimasukkan akan bereaksi dengan *bed* pasir yang memiliki suhu tinggi, reaksi tersebut mengakibatkan perubahan temperatur pada *bed* dan ruang bakar, ketika terjadi reaksi temperatur akan turun terlebih dahulu dan beberapa detik kemudian temperatur akan naik kembali ketika bahan bakar telah habis maka terjadi penurunan temperatur kembali, perubahan temperatur ini akan dicatat setiap menitnya melalui data logger/DAQ. Jumlah bahan bakar yang digunakan terus ditambah setiap waktunya
3. Temperatur yang dihasilkan melalui reaksi pembakaran akan turun ketika bahan bakar telah habis dengan maksud tidak ada lagi reaksi pembakaran sehingga temperatur turun perlahan –lahan ketika suhu turun maka perubahan tersebut tidak perlu dicatat lagi.



BAB 4

Pengolahan Data dan Analisa

4.1 Hasil

Hasil dari percobaan ini dibagi menjadi 2 bagian, perbandingan antara pembakaran cangkang kelapa dengan daun kering pada keadaan *self sustain*, analisa pengujian dan karakteristik daun kering digunakan dalam reaktor *Fluidized bed combustion*

4.1.1 Perbandingan Pembakaran Murni Cangkang Kelapa dengan Pembakaran Menggunakan Daun Kering Ketika *Self sustain* Terjadi

A. Pembakaran dengan 100 % Cangkang Kelapa

Beberapa parameter dalam melakukan percobaan: (data berdasarkan skripsi Adhika A Tama)

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

B. Pembakaran dengan Cangkang Kelapa dan Diganti dengan Daun Kering Ketika Kondisi Kerja Pasir telah Dicapai

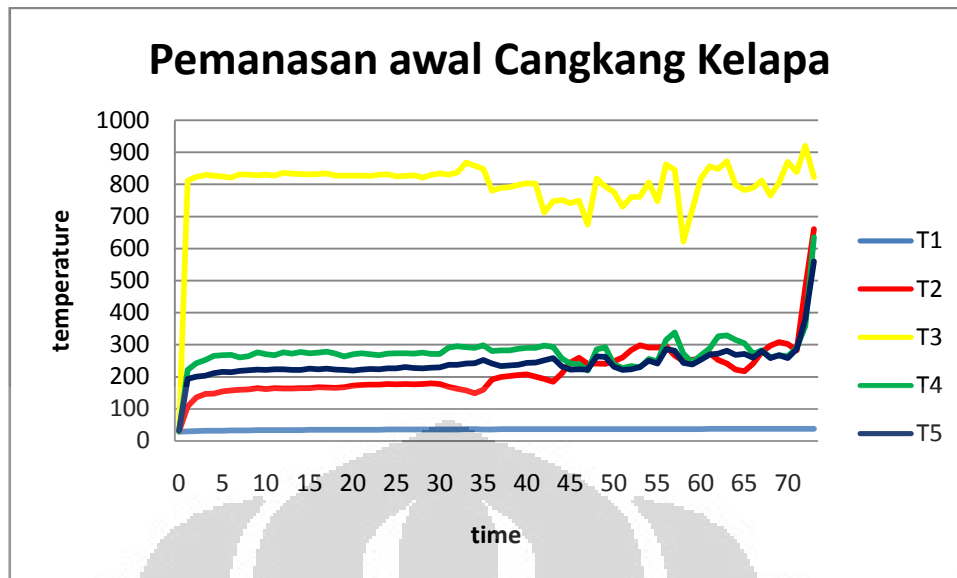
- 1) Suplai udara *blower* ke ruang bakar $0,092\text{m}^3/\text{s}$
- 2) Menggunakan bahan bakar cangkang kelapa dengan Heating Value 5535 kcal/kg (Julian A. Banzon, 1980), daun kering dengan Heating Value 4334 kcal/kg(laboratorium tek Mira)

- 3) Ketinggian Termokopel (T1= (dibawah distributor) 31,5 cm; T2= di atas 3,5 cm; T3=24,5 cm; T4=63,5cm; T5=144,5cm)

Dalam hal ini akan dilakukan analisa pembakaran menggunakan dua bahan bakar, daun kering dan cangkang kelapa. Cangkang kelapa digunakan sebagai pemanas awal, sedangkan daun kering digunakan ketika kondisi kerja pasir tercapai/*self sustain combustion*. Dalam penelitian kali ini kita akan melihat karakteristik pembakaran daun setelah proses *self sustain combustion* yang terjadi dan akan dibandingkan dengan proses pembakaran menggunakan cangkang kelapa sepenuhnya dan akan ditampilkan karakteristik setiap bahan bakar sebagai bahan analisa terhadap hasil yang didapat.

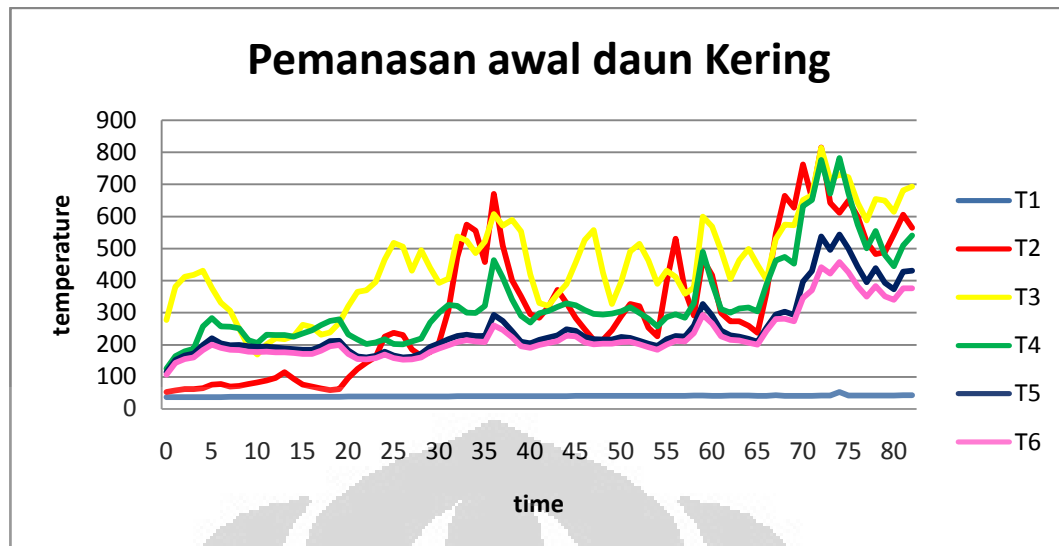
Data yang digunakan pada penelitian ini adalah karakteristik dari pembakaran cangkang kelapa, seperti terlihat dalam gambar 1, terlihat grafik pemanasan awal pasir menggunakan cangkang kelapa, grafik ini berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh peneliti FBC UI 2011, sedangkan pada gambar 2 hampir sama dengan gambar pertama merupakan pemanasan awal menggunakan cangkang kelapa. Hasil yang didapat di antara kedua grafik ini berbeda hal ini ditentukan oleh laju pengumpanan bahan bakar, karakteristik pasir, suplai udara, kecepatan fluidisasi, tinggi pasir dan panjang api.

Pada grafik pertama digunakan parameter pasir mesh 40-50 kg dengan masa yang digunakan 30 kg, dengan suplai udara sebesar 0.0693, sedangkan gambar kedua digunakan pasir dengan mesh 20-40 dengan masa pasir 25 kg.



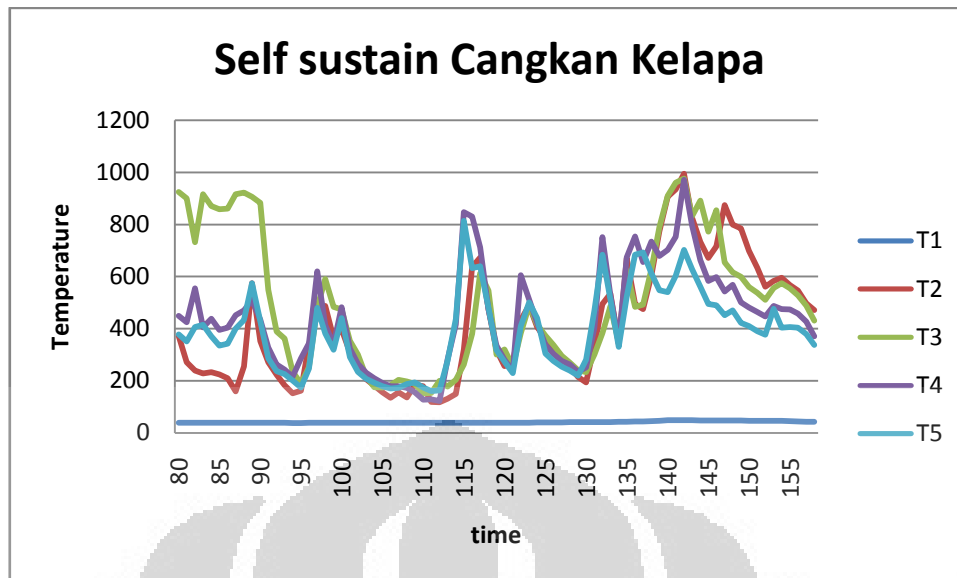
Gambar 4.1 Grafik Pembakaran Pemanasan Awal menggunakan Cangkang (Mei 2011)

Pada grafik pertama terlihat bahwa suhu pasir mulai dipanaskan menggunakan *burner*, sehingga terjadi kenaikan temperatur pada pemanasan awal. Penggunaan bahan bakar ini tidak langsung digunakan untuk pemanasan awal sehingga terlihat dari grafik temperatur *bed* naik secara konstan dan perlahan, ketika diberikan bahan bakar untuk pemanasan awal pada menit ke 31 terjadi penurunan temperatur *bed* karena *bed* harus memanaskan terlebih dahulu bahan bakar sebelum bahan bakar itu dapat bereaksi dengan oksigen sehingga terjadi proses pembakaran. Sedangkan, setelah itu pada menit ke 47 ditambahkan kembali bahan bakar sehingga terjadi penurunan sementara sebelum terjadi kenaikan temperatur *bed*, pada menit ke 57 diberikan kembali bahan bakar sehingga terjadi perpindahan panas, pada menit ke 73 terjadi kondisi kerja pasir *self susatain* sehingga *burner* bisa dimatikan dan bahan bakar akan bereaksi dengan pasir/*bed* sehingga terjadi proses fluidisasi dan pembakaran .

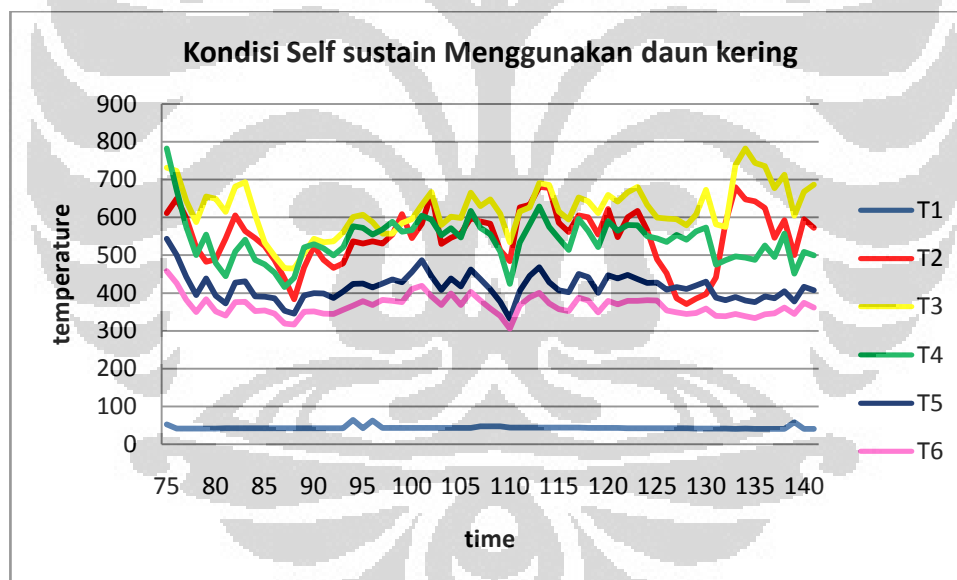


Gambar 4.2 Grafik Pembakaran Pemanasan Awal menggunakan Cangkang (daun)

Pada percobaan yang kami lakukan parameter yang digunakan adalah pasir dengan mesh 20-40, dan masa pasir 25 kg, percobaan ini langsung menggunakan bahan bakar serbuk untuk pemanasan awal pada menit ke 3 sehingga terlihat pada grafik terjadi peningkatan suhu diruang bakar dan *bed* perlahan turun. Namun, setelah terjadi reaksi kembali, naik pada menit ke 14 kembali diberikan bahan bakar karena ketika diberikan bahan bakar pada menit ke 7 tidak terjadi kenaikan temperatur 26 35 40, selanjutnya sistem pengumpanan bahan bakar dilakukan ketika temperatur *freebord* dan *bed* turun secara bersamaan namun jika salah satu dari kedua parameter tersebut maka laju pengumpanan tidak diberikan, pada menit ke 73 ketika diberikan bahan bakar terjadi peningkatan suhu diruang bakar dan *bed*, ketika di telaah secara visual kondisi kerja pasir hampir tercapai, ketika menit 82 *burner* dimatikan menandakan telah terjadi proses *self sustain*.



Gambar 4.3.a Grafik Pembakaran *Self sustain* Cangkang



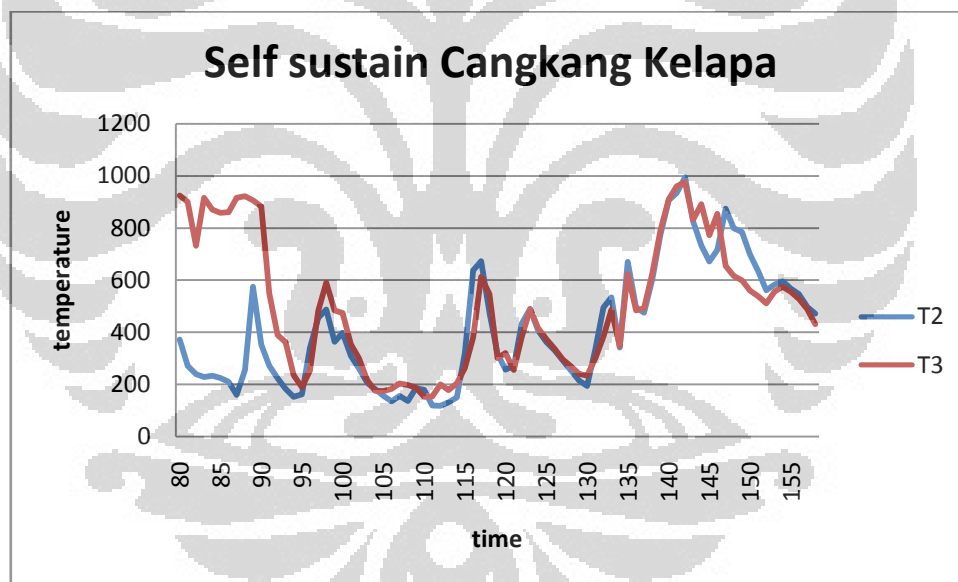
Gambar 4.3.b Grafik Pembakaran Daun Setelah Kondisi *Self sustain* Tercapai

Dari grafik 4.3.a dan 4.3.b kita dapat membandingkan karakteristik ketika kita menggunakan bahan bakar cangkang kelapa dengan daun, terlihat tidak terjadi temperatur drop yang amat besar ketika *burner* hidup dan setelah *burner* dimatikan, sedangkan pada pembakaran daun ketika *burner* dimatikan dan bahan

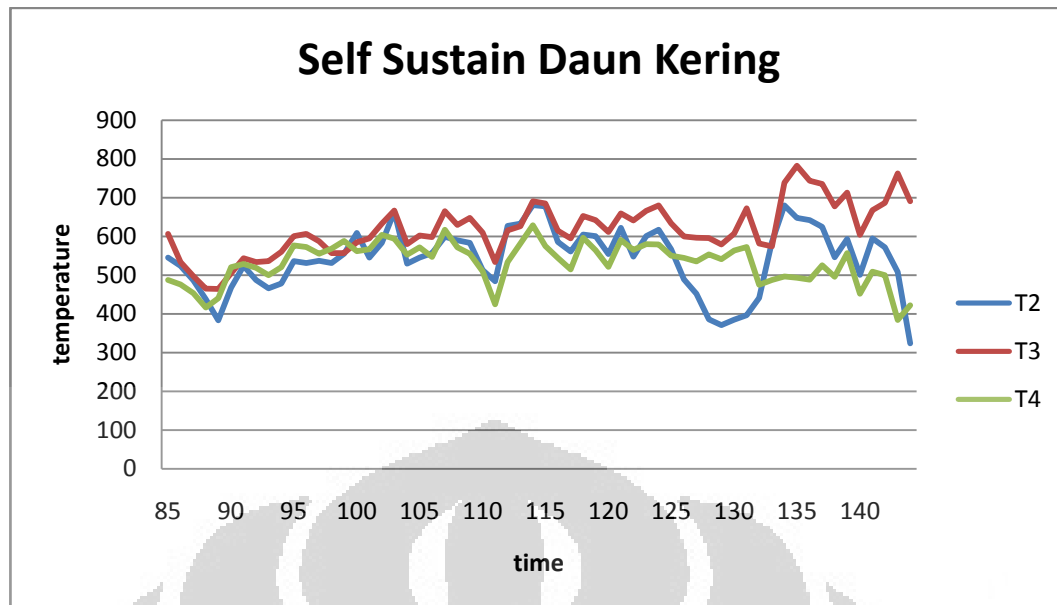
bakar diganti dengan daun kering terjadi penurunan temperatur di hampir seluruh termokopel yang terdapat pada reaktor pembakaran.

Hal ini terjadi karena adanya perbedaan karakteristik dari bahan bakar, dibutuhkan analisa *ultimate* dan *proximate* dalam menganalisa fenomena tersebut, selain itu dalam grafik kita dapat membandingkan perubahan temperatur pada daun yang cenderung berubah secara konstan dan perbedaan suhu tidak terlalu jauh sedangkan ketika menggunakan cangkang terjadi perubahan suhu secara drastic. Hal ini perlu dianalisis lebih dalam karakteristik fisika dan kimia agar dapat menggambarkan fenomena yang terjadi dalam reaksi pembakaran, disamping itu jenis pasir yang digunakan akan berpengaruh terhadap percobaan yang akan kita dapat.

Percobaan 1 daun dan percobaan (Adhik A Tama) 29 mei 2011



Gambar 4.4.a Grafik Temperatur T2 dan T3 *Self sustain* Cangkang



Gambar 4.4.b Grafik Temperatur *Self sustain* Daun

Proses setelah kondisi kerja pasir terjadi, dalam penelitian sebelumnya menggunakan cangkang ketika proses *self sustain* terjadi dapat digambarkan dalam temperatur kerja pasir dan *freeboard* dalam percobaan ini menghasilkan opini bahwa penggunaan cangkang grafik yang didapat cenderung berubah-ubah perubahan tidak secara konstan, hal ini terjadi karena ukuran dari bahan bakar itu sendiri ketika partikel bahan bakar besar maka nilai perpindahan masa akan meningkat sedangkan proses perpindahan panas akan berlangsung lebih lama dan panas akan tersimpan lebih banyak hal ini yang menyebabkan laju pengumpanan bahan bakar dari cangkang sangat berbeda dengan daun dimana laju pengumpanan pada daun lebih cepat dibandingkan dengan cangkang, hal ini yang mengakibatkan terjadi penurunan temperatur yang lebih lama dibandingkan dengan daun, ketika bahan bakar dimasukkan terjadi proses pengeringan terlebih dahulu namun dengan densitas yang lebih besar dibutuhkan waktu yang lebih lama agar *volatile matter* dari cangkang keluar dan ketika *devolatization* terjadi maka akan dimulai proses *ignition* percikan pada bahan bakar.

Hal ini yang mengakibatkan waktu untuk bahan bakar memberikan panas kepada *bed* dan ruang bakar lebih lama dibandingkan dengan daun, daun dengan nilai densitas lebih kecil dibandingkan dengan cangkang, sehingga daun lebih

mudah dikeringkan dan berekasi lebih cepat sehingga proses transfer panas lebih cepat dan panas juga cepat terbuang sehingga laju pengumpanan daun lebih sering dibandingkan dengan cangkang.

Tabel 4.1 Rata-Rata Temperatur Cangkang Kelapa

Temperatur Rata - Rata Ruang Bakar						
pemanasan	T1	T2	T3	T4	T5	T6
awal	35.8	213.8	798.4	275.7	241.6	
<i>Self sustain</i>	T1	T2	T3	T4	T5	T6
	41.0	413.2	501.5	438.3	389.2	

Tabel 4.2 Rata-Rata Temperatur Daun Kering

Temperatur rata rata ruang bakar						
pemanasan	T1	T2	T3	T4	T5	T6
awal	39.42425	312.096	452.0052	335.2734	249.6984	227.8671
<i>Self sustain</i>	T1	T2	T3	T4	T5	T6
	43.3438	541.7562	618.5991	531.904	410.2078	360.9493

Dari temperatur rata-rata yang ditunjukkan oleh tabel 1 dan 2 dapat kita gambarkan bahwa energi yang diberikan oleh bahan bakar cangkang dan daun, dalam hal ini kita akan membandingkan ketika proses *self sustain* terjadi, temperatur ketika menggunakan daun lebih tinggi dibanding cangkang kelapa dan temperatur dari pembakaran daun kering hampir seragam, sedangkan pada cangkang persebaran suhu merata, rata-rata temperatur daun lebih tinggi dibandingkan dengan cangkang dikarenakan jumlah pengumpanan daun 22,75 kg sedangkan daun hanya 19.5 kg dalam waktu yang sama, nilai panas yang dirilis sangat bergantung dengan bahan bakar yang direaksikan.

4.1.2 Perbandingan Pembakaran Murni Cangkang Kelapa dengan Pembakaran menggunakan Daun Kering ketika *Self Sustain* Terjadi dengan Percobaan yang Berbeda

A. Pembakaran dengan 100 % Cangkang Kelapa

Beberapa parameter dalam melakukan percobaan: (data berdasarkan skripsi Adhika A Tama)

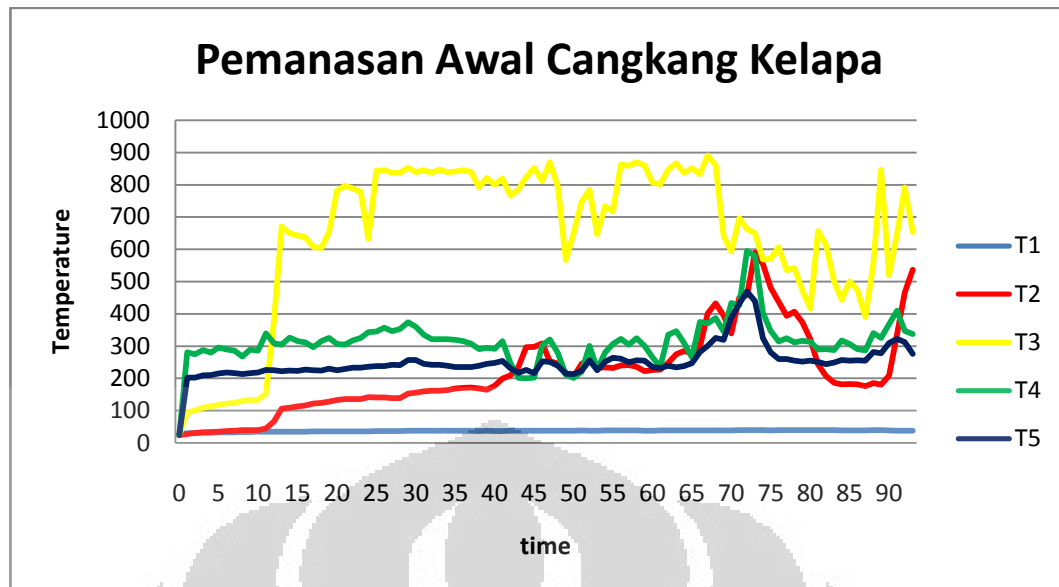
- 1) Suplai udara *blower* ke ruang bakar $0,085\text{m}^3/\text{s}$, mesh pasir 40-50
- 2) Menggunakan bahan bakar cangkang kelapa dengan *Heating Value* 5535 kcal/kg (Julian A. Banzon, 1980)
- 3) Ketinggian Termokopel (T1= (dibawah distributor) 31,5 cm; T2= di atas 3,5 cm; T3=24,5 cm; T4=63,5cm; T5=144,5cm)

B. Pembakaran dengan Cangkang Kelapa dan Diganti dengan Daun Kering ketika Kondisi Kerja Pasir telah dicapai

Beberapa parameter dalam melakukan percobaan :

- 1) Suplai udara *blower* ke ruang bakar $0,092\text{m}^3/\text{s}$, mesh pasir 20-40
- 2) Menggunakan bahan bakar cangkang kelapa dengan *Heating Value* 5535 kcal/kg (Julian A. Banzon, 1980), daun kering dengan Heating Value 4334 kcal/kg(laboratorium tek Mira)
- 3) Ketinggian Termokopel (T1= (dibawah distributor) 31,5 cm; T2= di atas 3,5 cm; T3=24,5 cm; T4=63,5cm; T5=144,5cm)

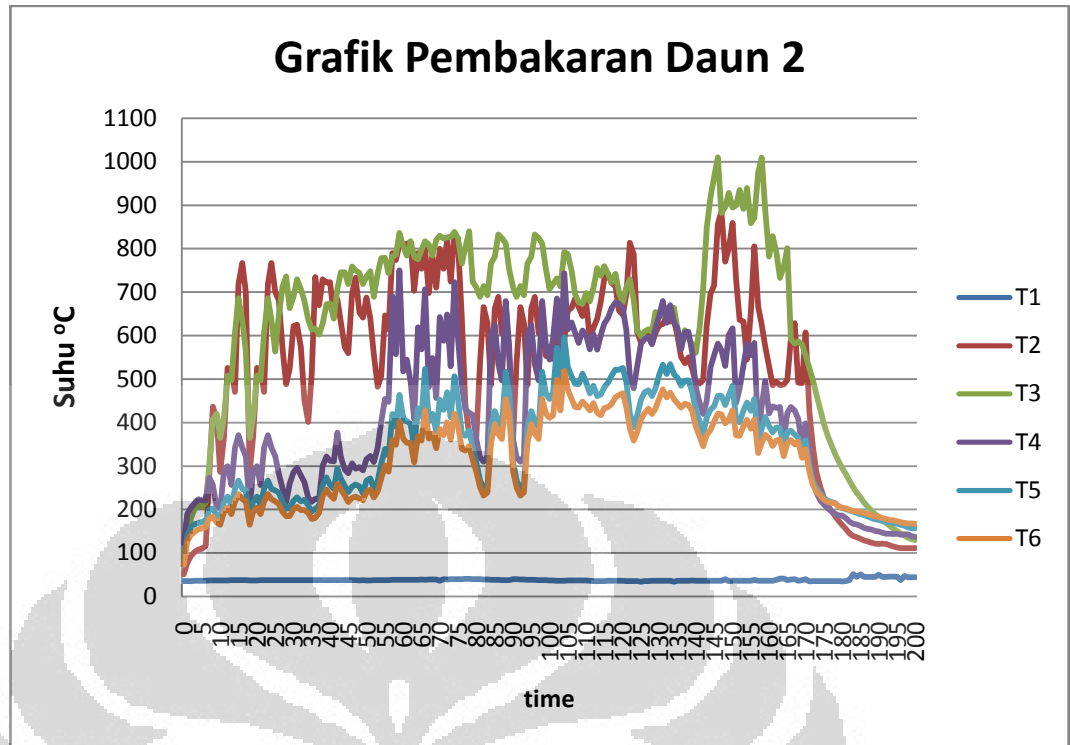
Pada penelitian selanjutnya akan diteliti karakteristik pembakaran dengan aliran udara $0.095\text{ m}^3/\text{s}$, dalam proses kali ini kita kembali menguji karakteristik daun kering yang digunakan ketika proses *self sustain* telah terjadi begitu juga dengan perbandingan nilai yang dihasilkan dalam pembacaan *data aquicision*.



Gambar 4.5.a Grafik Pemanasan Awal Menggunakan Cangkang

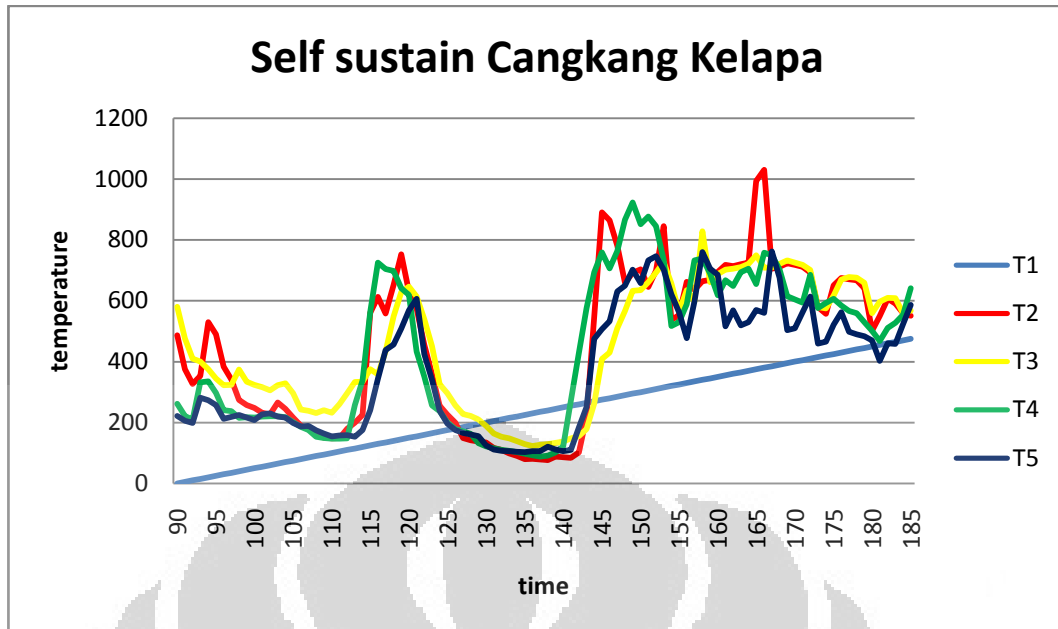
Pada percobaan yang dilakukan oleh peneliti FBC pada tanggal 21 Mei 2011, hampir sama dengan proses yang dilakukan pada tanggal 29 Mei 2012, dimana pada proses pemanasan awal hanya *burner* yang berfungsi untuk memberikan panas, hingga menit ke 30 diberikan pengumpanan bahan bakar pemanasan awal.

Terlihat pada grafik bahwa temperatur ruang bakar naik dan pasir/*bed* mengalami peningkatan temperatur, dan proses pengumpanan dilakukan ketika temperatur dari ruang bakar dan *bed* mengalami penurunan pada menit ke 89 kondisi kerja telah tercapai dan *burner* dimatikan pada menit ke 93 dan proses dilanjutkan dengan reaksi pembakaran tanpa *burner*

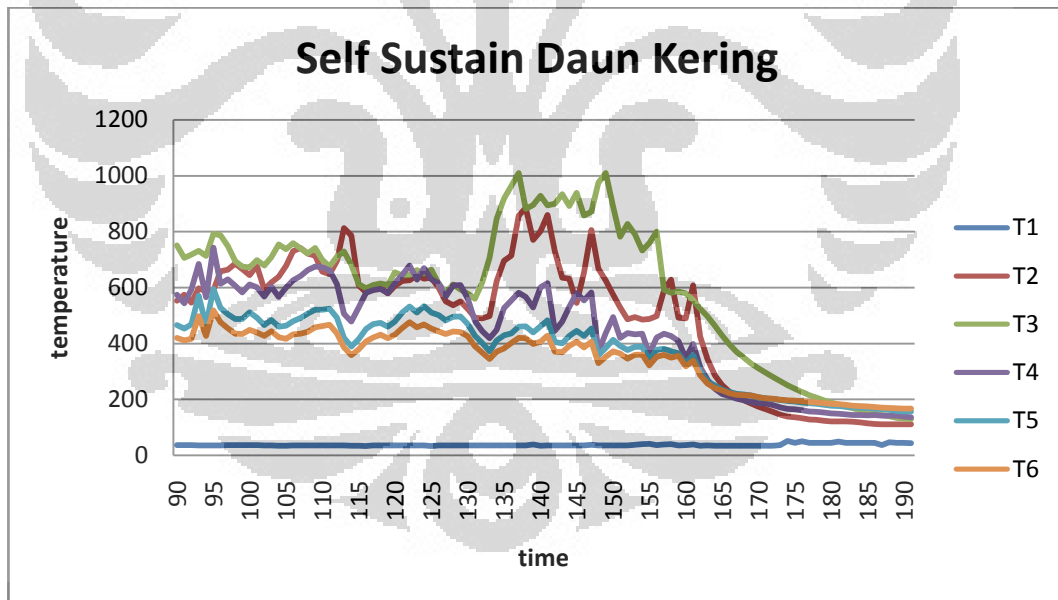


Gambar 4.5.b Grafik Pemanasan Awal Menggunakan Cangkang untuk Daun Kering

Pada percobaan ini, pemanasan awal menggunakan *burner* hingga menit ke 7 dan setelah itu diberikan pengumpanan bahan bakar dengan sistem ketika temperature *bed* dan *freeboard* mengalami penurunan maka dilakukan pengumpanan. Hal ini dilakukan untuk menjaga temperatur yang stabil di ruang bakar dan proses pemanasan pasir berlangsung efektif, hingga proses *self sustain* terjadi pada menit ke 97 *heater* dari gas dimatikan dan bahan bakar daun dimasukkan, dari proses kerja pasir ini akan diteliti karakteristik daun sebagai bahan bakar.



Gambar 4.6.a Grafik Kondisi *Self sustain* Menggunakan Cangkang

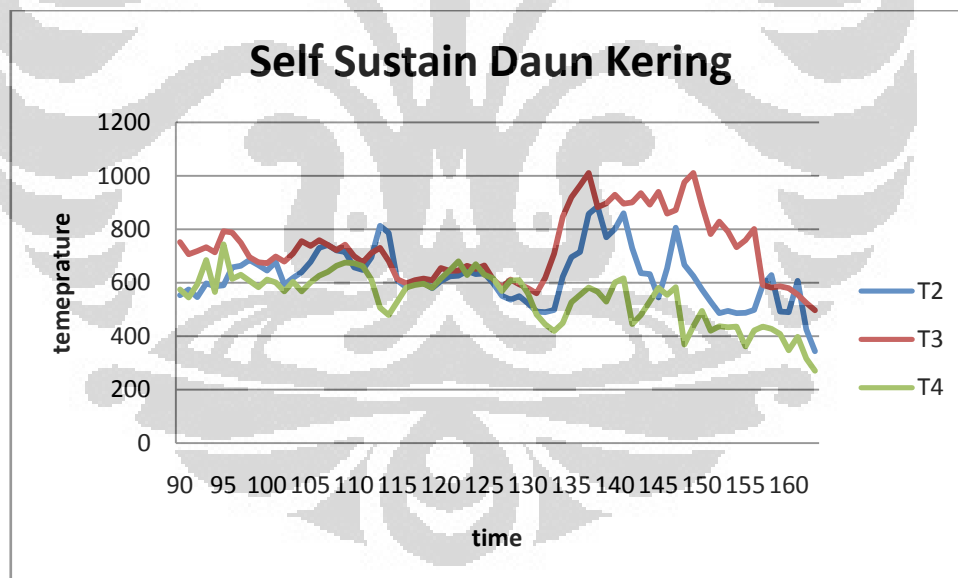


Gambar 4.6.b Grafik Kondisi *Self sustain* Menggunakan Daun Kering

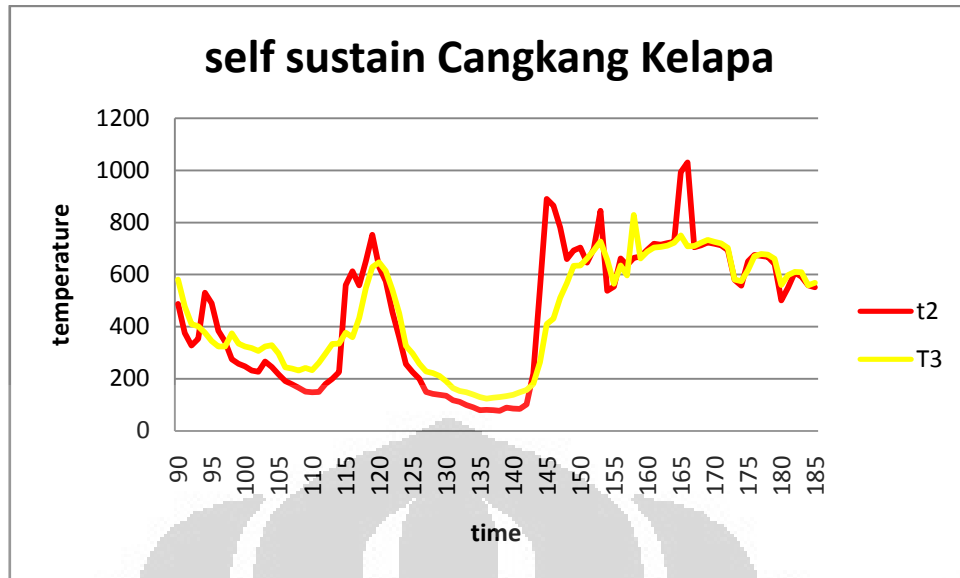
Ketika *burner* dimatikan pada percobaan ini bahan bakar akan diganti dengan daun kering, dari grafik dapat kita gambarkan ketika daun dimasukan

terjadi penurunan temperatur ruang bakar, dan pada suatu titik temperatur tersebut akan konstan dan kemungkinan terjadi penurunan temperatur hanya terjadi ketika laju pengumpanan terlambat sehingga suhu jatuh, jika hal ini bisa dijelaskan dari karakteristik kimia bahan bakar dimana cangkang memiliki nilai LHV yang lebih besar dibandingkan dengan daun kering. Selain itu *bulk density* yang dimiliki akan mempengaruhi proses perpindahan panas pada ruang bakar, temperatur dapat bertahan lama karena volume yang dimiliki cangkang lebih besar sehingga panas dapat diserap sebelum panas itu dilepaskan

Total bahan bakar yang digunakan setelah kondisi kerja pasir dicapai, untuk daun 20 kg, sedangkan cangkang yang digunakan 15,25 kg dengan waktu percobaan setelah *self sustain* selama satu jam dengan menggunakan bahan bakar yang berbeda. Laju pengumpanan daun lebih banyak dan waktu pengumpanan lebih singkat karena daun mudah bereaksi dan langsung terbakar ketika dimasukkan ruang bakar.



Gambar 4.7.a Grafik Temperatur T2 dan T3 Daun Setelah *Self sustain* Tercapai



Gambar 4.7.b Grafik Temperatur Cangkang di 2 Titik Pembacaan

Tabel 4.3 Temperatur Rata - Rata Penggunaan Daun Kering

Temperatur Rata - Rata Ruang Bakar						
Pemanasan	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Awal	37.4	578.2	662.0	385.4	297.3	266.6
<i>Self sustain</i>	T1	T2	T3	T4	T5	T6
	35.9	593.0	705.3	519.3	431.8	392.2

Tabel 4.4 Temperatur Rata - Rata Penggunaan Cangkang Kelapa

Temperatur Rata - Rata Ruang Bakar						
pemanasan	T1	T2	T3	T4	T5	T6
awal	37.4	215.7	641.6	312.9	250.7	
<i>Self sustain</i>	T1	T2	T3	T4	T5	T6
	40.2	450.7	449.8	435.3	374.1	

Sama dengan penelitian sebelumnya diketahui bahwa bahan daun kering memiliki rata-rata temperatur lebih tinggi dibandingkan dengan cangkang kelapa. Jika kita lihat dari nilai *fix* karbon dan *volatile meter, moisture* yang terdapat dalam bahan bakar, daun kering yang memiliki *fixed* karbon lebih besar persatuan masa akan menghasilkan nilai energi *release* yang lebih besar dibanding cangkang *fix* karbon menjelaskan nilai yang akan dibakar ketika reaksi berlangsung, cangkang memiliki *volatile meter* yang lebih besar dibandingkan daun sehingga temperatur bisa berubah turun naik secara drastic, karena sebagai gas yang belum terbakar akan bereaksi setelah *freebord* sehingga panas yang ditransfer ke *bed*/pasir akan berkurang, *moisture* dan *ash* akan menentukan lama waktu pembakaran dan ampas yang tersisa ketika reaksi pembakaran telah selesai. ASH akan tinggal di ruang bakar, sebagian akan terbawa oleh udara panas dan selebihnya akan bereaksi dengan pasir, *moisture* akan mengakibatkan proses evaporasi pada bahan bakar terlebih dahulu sehingga panas diserap oleh proses ini.

4.1.3 Perbandingan Pembakaran Murni Cangkang Kelapa dengan Pembakaran Menggunakan Daun Kering ketika *self Sustain* terjadi dengan Percobaan yang berbeda

A. Pembakaran dengan 100 % Cangkang Kelapa

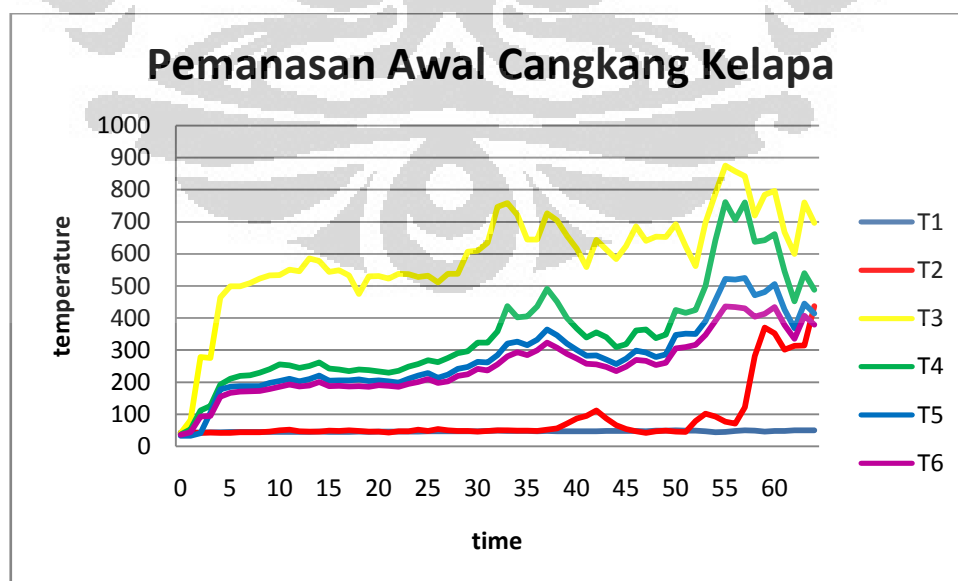
Beberapa parameter dalam melakukan percobaan: (data berdasarkan skripsi Nanda Prima)

- 1) Suplai udara *blower* ke ruang bakar $0,092\text{m}^3/\text{s}$, mesh pasir 20-40
- 2) Menggunakan bahan bakar cangkang kelapa dengan *Heating Value* 5535 kcal/kg (Julian A. Banzon, 1980)
- 3) Ketinggian Termokopel (T1= (dibawah distributor) 31,5 cm; T2= di atas 3,5 cm; T3=24,5 cm; T4=63,5cm; T5=144,5cm)

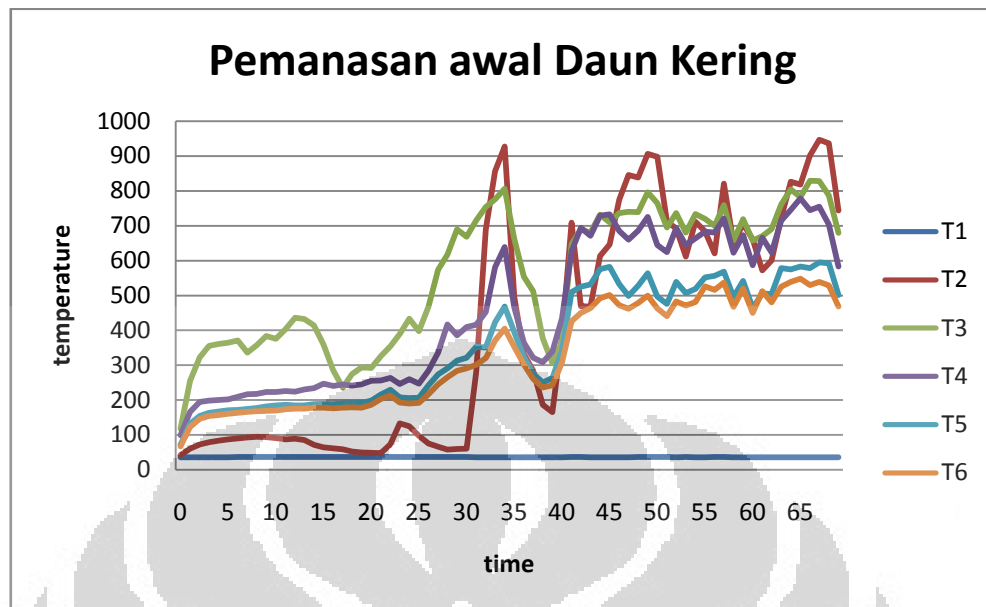
B. Pembakaran dengan Cangkang Kelapa dan Diganti dengan Daun Kering Ketika Kondisi Kerja Pasir telah dicapai

- 1) Suplai udara *blower* ke ruang bakar $0,090\text{m}^3/\text{s}$, mesh pasir 20-40
- 2) Menggunakan bahan bakar cangkang kelapa dengan *Heating Value* 5535 kcal/kg (Julian A. Banzon, 1980), daun kering dengan *Heating Value* 4334 kcal/kg (laboratorium tekMira)
- 3) Ketinggian Termokopel (T1= dibawah distributor) 31,5 cm; T2 = di atas 3,5 cm; T3=24,5 cm; T4=63,5cm; T5=144,5cm)

Pada percobaan selanjutnya kita akan membandingkan percobaan yang telah dilakukan pada bulan Desember tahun lalu dengan ukuran mesh pasir sama, namun dengan ukuran bahan bakar cangkang 1,5 x1,5 akan kita bandingkan dengan pembakaran daun kering ketika *self sustain combustion* telah terjadi. Pada percobaan ini akan menunjukkan perbedaan dan karakteristik masing masing bahan bakar yang akan kita gunakan. Proses yang diberlakukan hampir sama dimana ketika *burner* dinyalakan bahan bakar pemanas awal belum dimasukkan sampai kondisi dimana temperatur bd tidak bisa meningkat ketika hanya *burner* yang memberikan panas, maka diberikan reaksi pembakaran dengan memasukan bahan bakar. Laju pengumpanan digunakan ketika terjadi penurunan temperatur pada ruang bakar

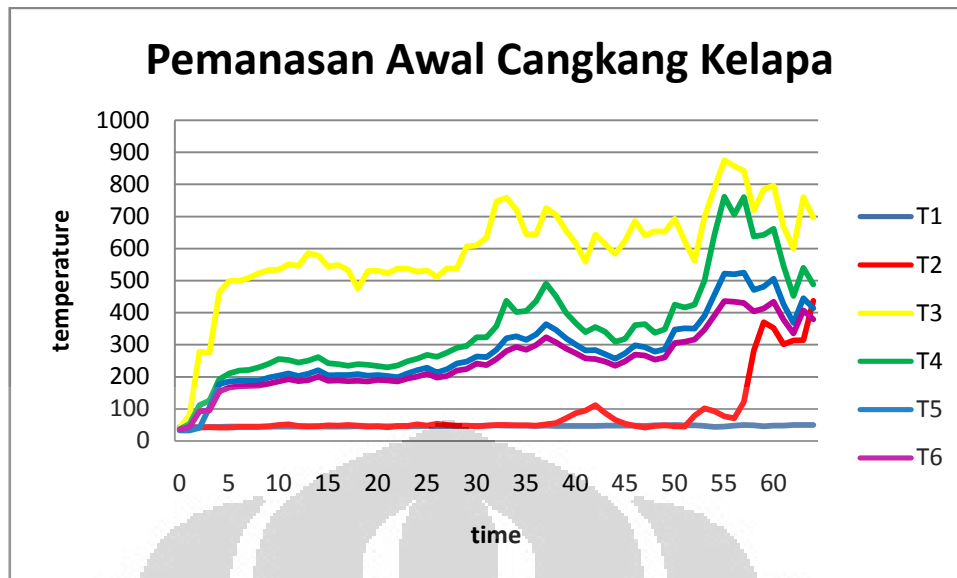


Gambar 4.8.a Pemanasan Awal Menggunakan Cangkang



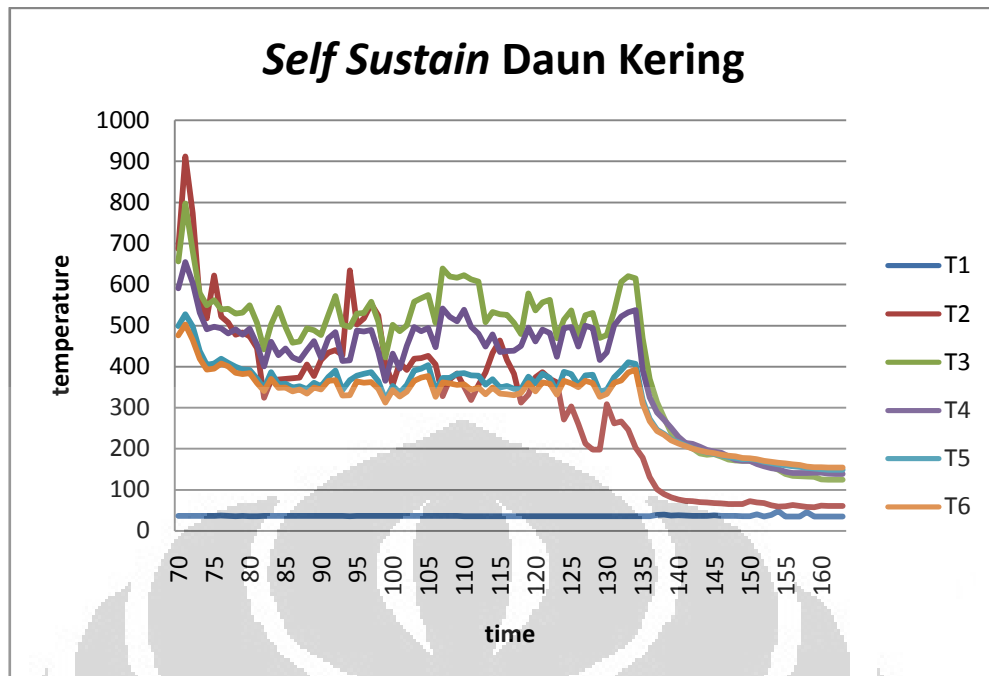
Gambar 4.8.b Pemanasan Awal Daun Kering Menggunakan Cangkang

Ukuran mesh pasir akan berpengaruh terhadap nilai masa transfer semakin besar partikel pasir maka perpindahan masa akan berlangsung cepat namun efek dari partikel yang besar kecepatan fluidisasi akan berpengaruh terhadap fluidisasi bahan bakar dan pasir sehingga nilai perpindahan panas akan kecil. Pada percobaan mesh pasir pada 21 Mei, 40-50 lebih halus sehingga masa transfer pada ukuran pasir ini akan berkurang, sedangkan percobaan dengan mesh pasir 20-40 dimana pasir lebih besar perpindahan masa akan baik sedangkan untuk koefisien perpindahan panas akan berkurang.



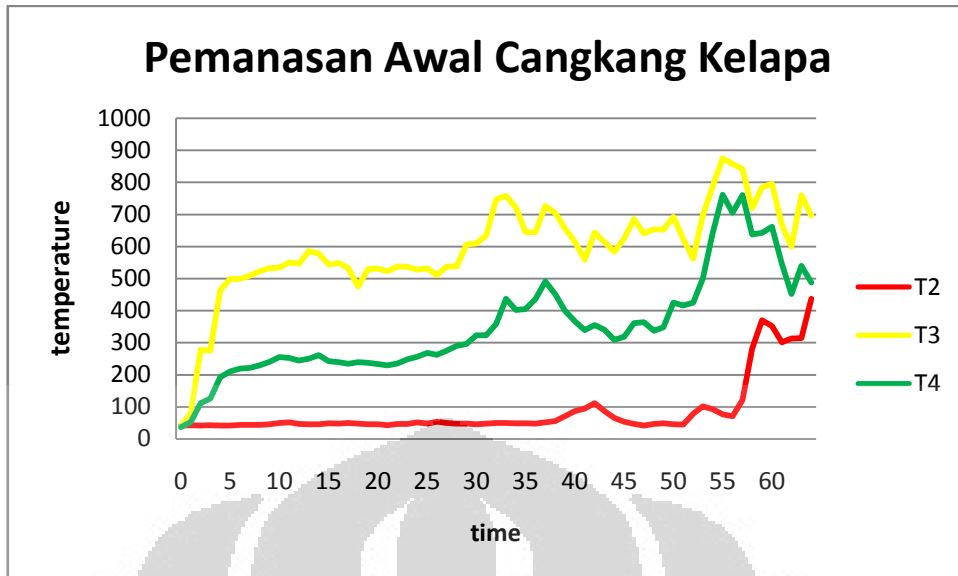
Gambar 4.9.a Proses *Self Sustain* cangkang

Pada grafik 2 ini terlihat bahwa ketika bahan bakar diganti dengan daun kering terjadi penurunan temperatur yang berlangsung secara konstan hingga tidak diberikan pengumpanan, namun secara garis besar temperatur pada pembakaran daun lebih konstan karena laju pengumpanan yang dilakukan dan mudah bereaksi ketika masuk kedalam ruang bakar sehingga pembacaan temperatur cepat naik dan turun maka diperlukan kontrol yang tepat untuk menjaga temperatur *bed* dan ruang bakar, namun secara umum terjadi penurunan suhu yang diakibatkan pasir yang tidak terfluidisasi maksimum sehingga berpengaruh terhadap kecepatan fluidisasi minimum mengakibatkan nilai perpindahan panas berkurang karena koefisien perpindahan panas terbesar terjadi secara konveksi dan diikuti dengan kontak bahan bakar dengan pasir dan udara.

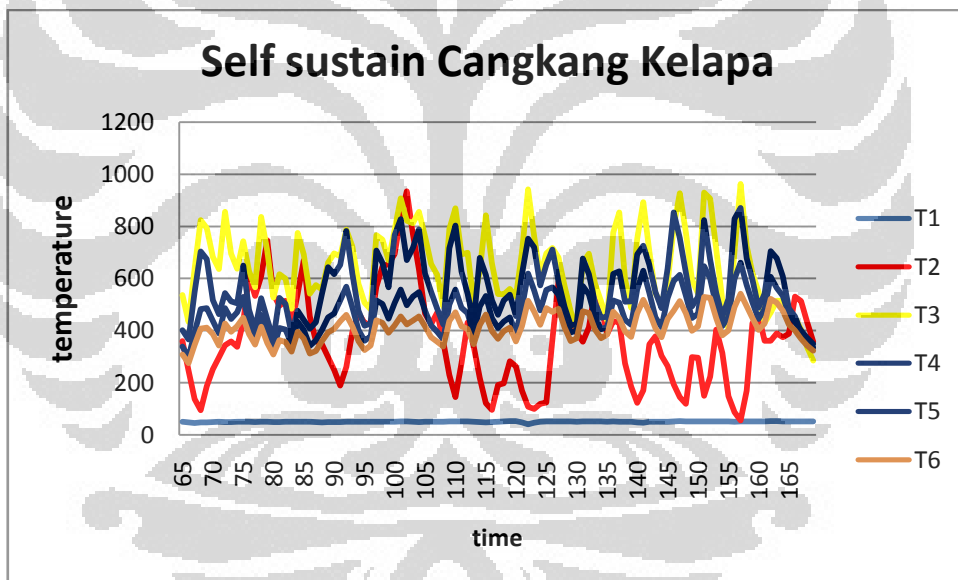


Gambar 4.9.b Proses *Self Sustain* Menggunakan Daun Kering

Dari grafik reaksi pembakaran setelah kondisi kerja pasir tercapai, terlihat reaksi pembakaran berlangsung konstan tidak terdapat temperatur *drop* kecuali pada bagian bed/pasir penurunan yang terjadi penurunan temperatur hal ini bisa dianalisa karena pasir yang tidak terfluidisasi maksimum akibat adanya penumpukan bahan bakar dan partikel kimia yang menumpuk pada *bed* akibatnya reaksi pembakaran berlangsung lama tidak bereaksi spontan hal ini akibat dari tidak adanya campuran antara bahan bakar dan pasir namun temperatur *bed* tidak mempengaruhi pembacaan nilai ruang yang lain. Ini terbukti bahwa reaksi pembakaran bergerak konstan seperti yang ditunjukkan pada grafik diatas, namun dari 3 analisa sebelumnya dapat dibuktikan *heat release* dari dari daun kering dan cangkang.



Gambar 4.10.a Grafik Temperatur Cangkang di 3 Titik Pembacaan

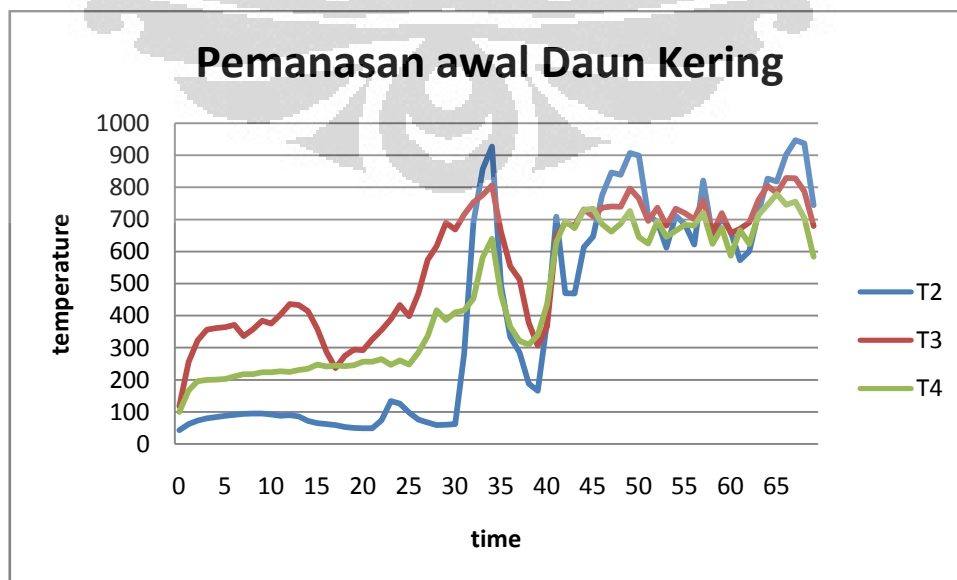


Gambar 4.10.b Grafik Temperatur Cangkang di 3 Titik Pembacaan

Tabel 4.5 Temperatur Rata - Rata Penggunaan Cangkang Kelapa

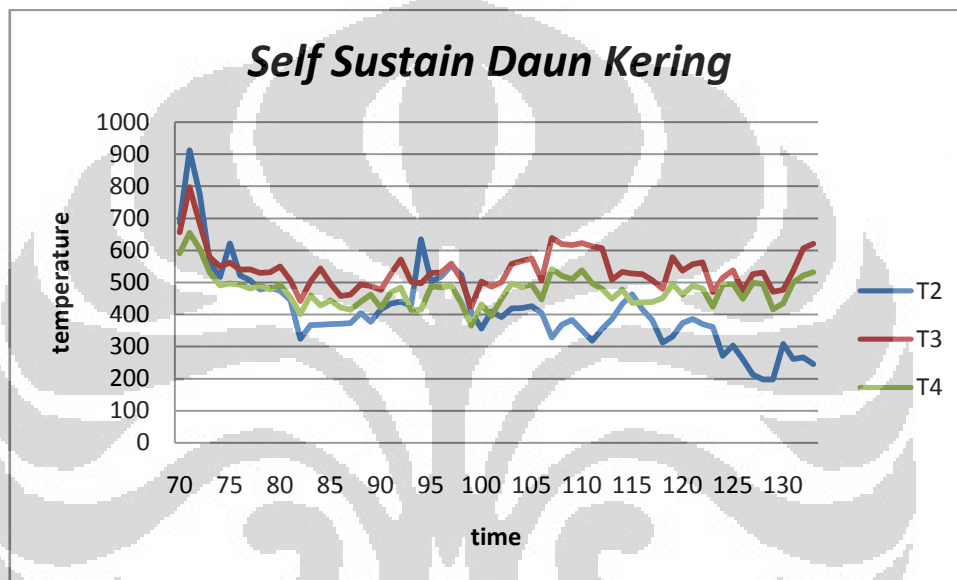
Temperatur Rata - Rata Ruang Bakar						
pemanasan	T1	T2	T3	T4	T5	T6
awal	38.7	324.9	601.0	371.0	301.6	272.8
<i>Self sustain</i>	T1	T2	T3	T4	T5	T6
	44.0	412.1	644.6	633.1	535.4	476.7

Temperatur rata-rata setelah *burner* dan sebelum proses *self sustain* tidak terjadi penurunan signifikan antara kedua keadaan tersebut dengan demikian cangkang kelapa dapat dijadikan bahan bakar pada reaktor pembakaran FBC, namun ketika di bawah bakar diganti dengan daun kering pada percobaan kedua ini suhu sebelum *self sustain* akan mengalami penurunan ketika diberikan pengumpanan daun kering, hal ini terjadi karena daun cepat bereaksi namun dengan LHV yang lebih rendah dan proses *heat transfer* berlangsung lebih cepat maka proses perpindahan panas tidak sempat terjadi *heat capacity* yang dimiliki pasir harus dipenuhi untuk menaikkan sejumlah temperature, namun perbedaan antara suhu *freebord* dan *bed* cenderung serupa pada pembakaran dengan daun dan perbedaan antara temperatur 2 dan temperatur 6 tidak terlalu signifikan, dapat dilihat dari grafik rata-rata setelah *burner* dimatikan dan daun dimasukkan ke dalam ruang bakar.



Gambar 4.11a Grafik Temperatur Cangkang di 3 Titik Pembacaan

Pada saat pemanasan awal mendekati proses *self sustain* suhu *bed* dan ruang bakar dapat dilihat dari grafik berkisar 900 hingga 700 namun ketika diberikan daun terjadi penurunan temperatur dari 600 ke 400.



Gambar 4.11.b Grafik Temperatur Daun Kering di 3 titik Pembacaan

Table 4.6 Temperatur Rata - Rata Cangkang

<i>Temperatur Rata - Rata Ruang Bakar</i>						
<i>pemanasan</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>T3</i>	<i>T4</i>	<i>T5</i>	<i>T6</i>
<i>awal</i>	36.3	401.0	555.4	453.3	359.4	329.8
<i>Self</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>T3</i>	<i>T4</i>	<i>T5</i>	<i>T6</i>
<i>sustain</i>	35.9	416.1	537.8	473.2	377.6	360.9

4.2 Analisa Karakteristik Daun yang Digunakan setelah Kondisi *Self Sustain* Terjadi

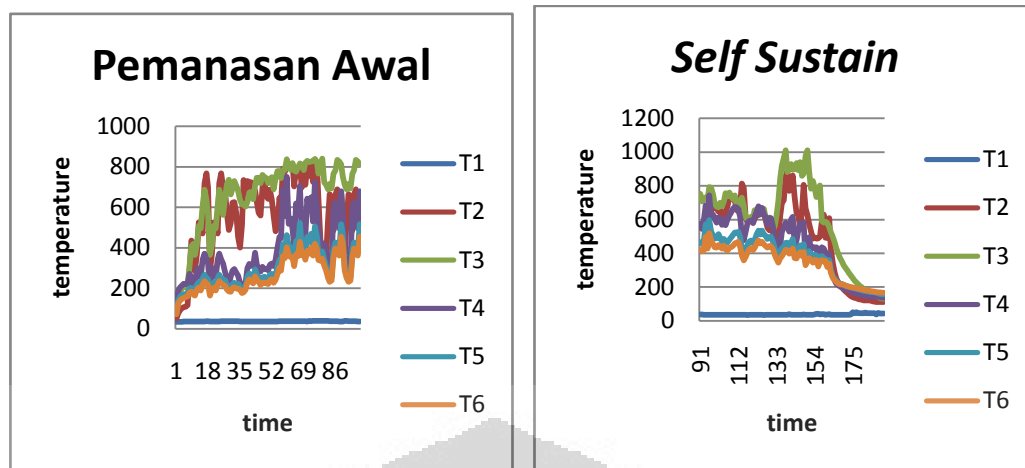
4.2.1 Karakteristik Pembakaran Daun Kering sebagai Bahan Bakar ketika Proses *Self Sustain* telah Terjadi

Table 4.7 Feeding Bahan Bakar Percobaan Daun 2

<i>Feeding Bahan Bakar</i>	<i>Feed Rate</i>	Total Bahan Bakar	35,25 kg
Serbuk + Serabut 0,5 kg	0,5 kg/5 menit	Serbuk + Serabut	2 kg
Tempurung Kelapa 0,25 kg	0,25 kg/4 menit	Tempurung Kelapa	13,25 kg
Tempurung Kelapa 0,5 kg	0,5 kg/2,5 menit	Daun	20 kg
Tempurung Kelapa 0,75 kg	0,25 kg/3,3 menit		
Daun 0,25 kg	0,25 kg/0,5 menit		

Table 4.8 Feeding Bahan Bakar Percobaan Daun 1

<i>Feeding Bahan Bakar</i>	<i>Feed Rate</i>	Total Bahan Bakar	30 kg
Serbuk + Serabut 0,5 kg	0,5 kg/6 menit	Serbuk + Serabut	3 kg
Tempurung Kelapa 0,25 kg	0,25 kg/5 menit	Tempurung Kelapa	4,25 kg
Tempurung Kelapa 0,5 kg	0,5 kg/3 menit	Daun	22,75 kg
Daun 0,25 kg	0,25 kg/0,5 menit		



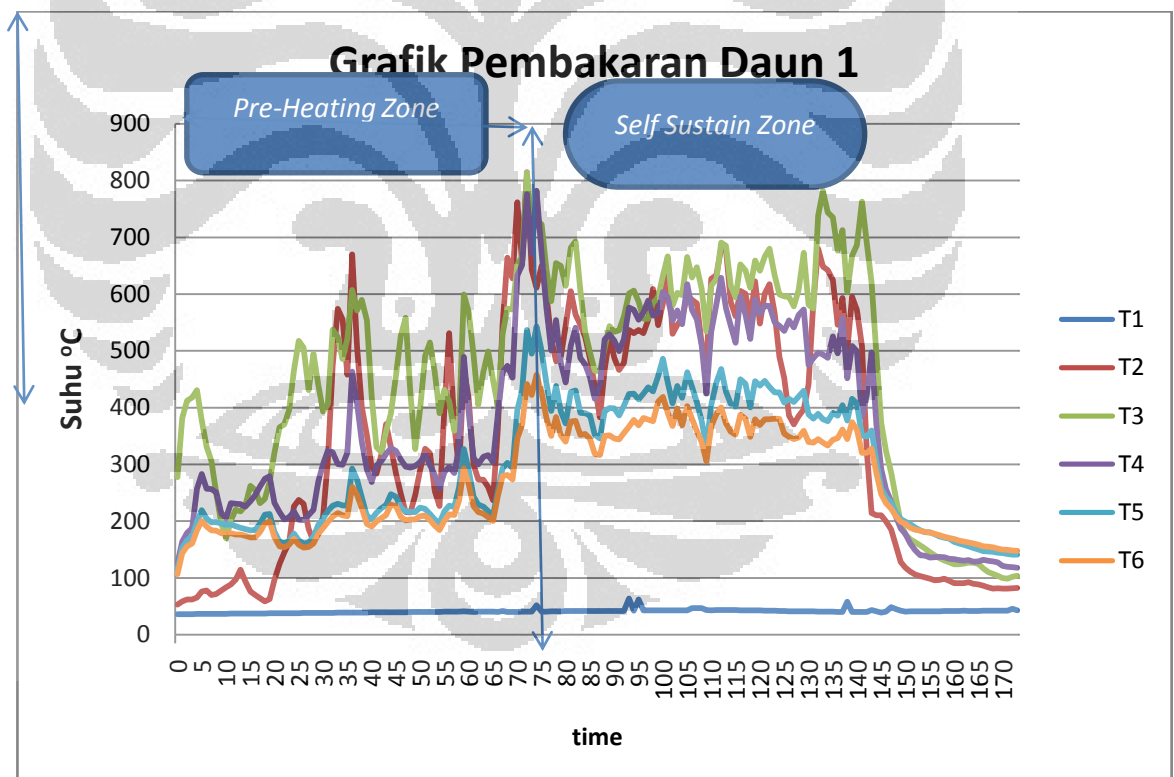
Gambar 4.12. Grafik Hasil Pembakaran Cangkang dan Daun Kering

Pada percobaan kedua menggunakan dual *fuel* cangkang kelapa dan daun kering, akan kita bandingkan sistem pemanasan awal yang digunakan pada percobaan pertama dengan percobaan kedua, dimana pada keadaan kedua bahan bakar tidak diberikan ketika pemanasan awal hanya *burner* dan *blower* yang dinyalakan, dari grafik waktu untuk meningkatkan suhu pasir ketika *burner* dinyalakan selama 7 menit mencapai 100 derajat, ketika diberikan bahan bakar pemanas awal serabut dan serbuk cangkang kelapa mengakibatkan temperatur *bed* naik secara drastis begitu juga dengan temperatur *freeboard*.

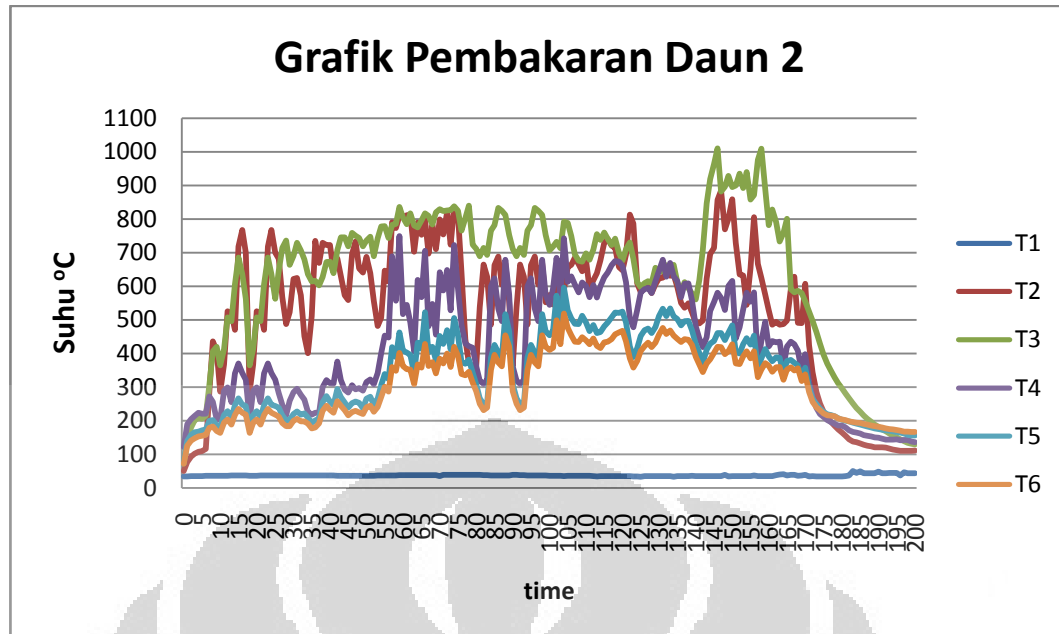
Dalam waktu 15 menit temperatur *bed* hampir sama dengan temperatur *freeboard*, hal ini terjadi karena temperatur *bed* yang dipanaskan terlebih dahulu dan kualitas pasir yang digunakan fluidisasi yang merata sehingga kondisi optimum operasi dapat dicapai, namun pada menit ke 71 terjadi penurunan temperatur yang drastis pada *bed*, hal ini terjadi karena penumpukan bahan bakar sehingga tidak terjadi reaksi dan pencampuran yang baik. Hal ini berdampak kepada suhu *bed* karena tidak terjadi *heat transfer* dan fluidisasi pada ruang bakar ketika kondisi kerja FBC bernilai konstan yang menandakan proses *self sustain combustion* akan terjadi, maka *burner* siap untuk dimatikan dengan melihat gejala fisik yang terjadi pada ruang bakar dan *bed* pasir.

Setelah kondisi kerja dari temperatur *bed* pasir tercapai bahan bakar diganti dengan daun kering, dalam penggunaan daun seperti pada percobaan pertama terjadi penurunan temperatur ketika bahan bakar diganti. Hal ini

dikarenakan oleh nilai *caloric value* yang dikandung oleh daun lebih kecil dibandingkan dengan cangkang kelapa, namun setelah proses perpindahan panas terjadi, suhu ruang bakar daun meningkat kembali dikarenakan kualitas pasir, sehingga pencampuran bahan bakar terjadi sempurna. Hal ini mengakibatkan temperatur daun naik kembali dalam rentang waktu 105 - 129 menit, namun setelah itu temperatur turun kembali dikarenakan pasir yang tidak mengaduk karena adanya penumpukan bahan bakar, dimana bahan bakar tidak terbakar dan proses fluidisasi tidak terjadi. Pada menit ke 145 setelah diberikan pengadukan manual temperatur ruang bakar *bed* meningkat dan setelah diberikan *feeding* bahan bakar terjadi perubahan suhu.



Gambar 4.13.a Grafik Hasil Pembakaran Cangkang dan Daun Kering Percobaan 1 dan 2



Gambar 4.13.b Grafik Hasil Pembakaran Cangkang dan Daun Kering Percobaan 1 dan 2

Dalam hal ini kita akan membandingkan proses yang terjadi dari kedua percobaan. Pasir yang digunakan sangat memengaruhi proses pemanasan awal. Terlihat jenis pasir yang digunakan pada percobaan pertama berbeda dengan pasir pada percobaan kedua. Untuk meningkatkan temperatur T2 percobaan pertama membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan percobaan kedua, pada percobaan pertama dengan tinggi pasir 25 kg, dengan ketinggian pasir sekitar 11 cm seharusnya proses pengadukan bahan bakar dengan *bed* dapat berlangsung sempurna. Namun, karena kualitas *bed* pasir yang digunakan, kerja *burner* menjadi lebih berat.

Ketika bahan bakar pemanasan awal dimasukan terjadi penumpukan pada *bed* sehingga tidak terjadi proses pemanasan yang mengakibatkan temperatur *bed* yang awal dipanaskan menggunakan *burner* meningkat, namun ketika diberikan bahan bakar panas *bed* diserap oleh bahan bakar namun tidak terjadi pembakaran. Dalam percobaan kedua menggunakan pasir yang lebih bagus nilai *heat capacity*-nya, perubahan temperatur *bed* dapat berlangsung lebih cepat dari percobaan pertama, terbukti dalam waktu 15 menit temperatur *bed* telah mencapai suhu 400

derajat, sehingga bisa dikatakan pasir ini cepat menyerap panas dan memberikan panas kepada bahan bakar sehingga suhu ruang bakar 46 menit mendekati temperatur operasi.

Namun pada menit ke 80 terjadi penumpukan sehingga proses fluidisasi tidak terjadi, namun ketika diaduk secara manual kondisi pasir dan ruang bakar kembali stabil sehingga proses *self sustaining* yang terjadi terlihat juga pada grafik. Terdapat temperatur yang stabil antara *bed* dan ruang bakar, pada percobaan kedua ini temperatur setelah menggunakan bahan bakar daun tidak mengalami temperatur *drop* yang begitu besar walaupun memang terjadi penurunan temperatur pada ruang bakar

Table 4.9 Temperatur Rata - Rata Menggunakan Daun Percobaan 2

Temperatur Rata - Rata Ruang Bakar						
pemanasan	T1	T2	T3	T4	T5	T6
awal	37.4	578.2	662.0	385.4	297.3	266.6
<i>Self sustain</i>	T1	T2	T3	T4	T5	T6
	35.9	593.0	705.3	519.3	431.8	392.2

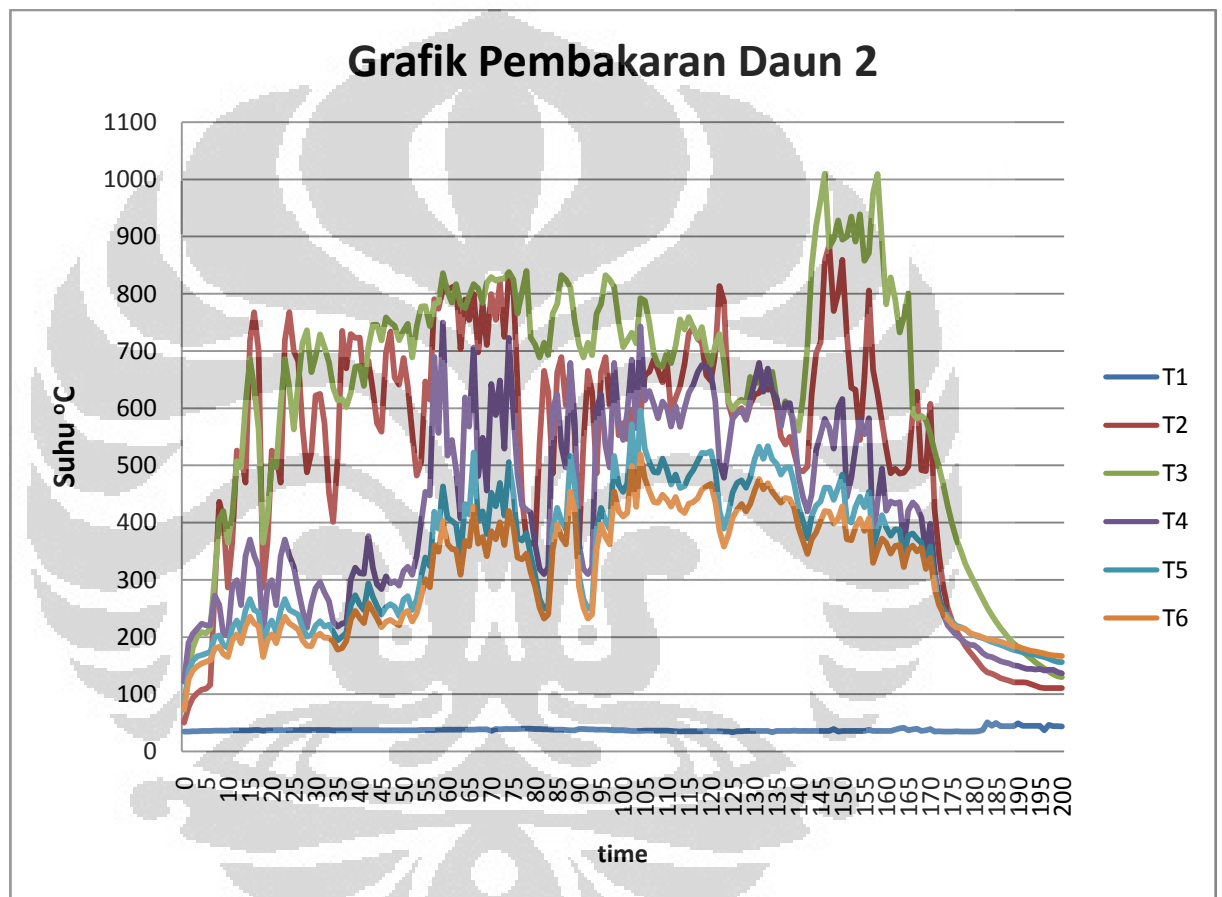
Table 4.10 Temperatur Rata - Rata Menggunakan Daun Percobaan 1

Temperatur Rata - Rata Ruang Bakar						
Pemana-	T1	T2	T3	T4	T5	T6
san awal	39.4	312.0	452.0	335.2	249.6	227.8
<i>Self sustain</i>	T1	T2	T3	T4	T5	T6
	43.3	545.4	617.3	533.7	411.2	361.6

Dari hasil rata-rata temperatur, keluaran yang terbaca dalam percobaan dapat kita simpulkan bahwa reaksi *fluidized bed combustion* pada percobaan kedua dapat dikatakan berhasil yang ditunjukkan dengan nilai suhu *bed* dan temperatur yang didapat dari hasil pembakaran. Temperatur yang dihasilkan pada

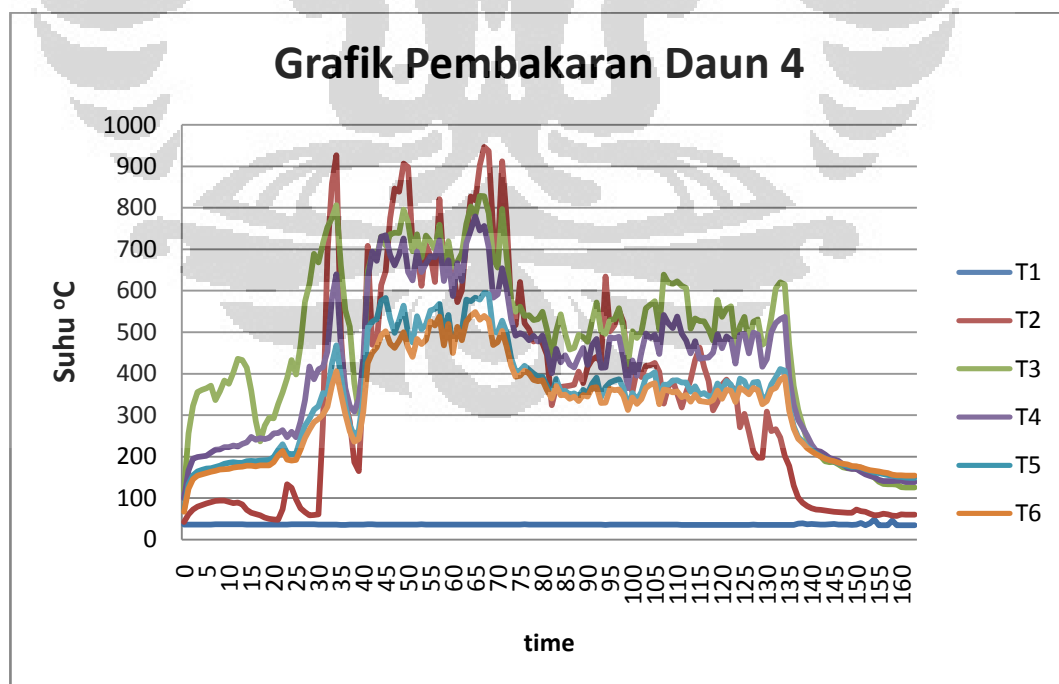
percobaan 2 lebih tinggi dibandingkan dengan dengan percobaan 1, hal ini dikarenakan oleh faktor pasir dan ukuran pasir yang digunakan, selain itu tinggi pasir dan panjang api *burner* akan memengaruhi proses pemanasan awal.

4.2.2 Karakteristik Pembakaran Daun Kering Sebagai Bahan Bakar Ketika Proses *Self Sustain* Telah Terjadi



Gambar 4.14. Grafik Hasil Pembakaran Cangkang dan Daun Kering

<i>Feeding Bahan Bakar</i>	<i>Feed Rate</i>
Serbuk + Serabut 0,25 kg	0,25 kg/3,1 menit
Tempurung Kelapa 0,25 kg	0,25 kg/2 menit
Tempurung Kelapa 0,5 kg	0,5 kg/2 menit
Daun 0,25 kg	0,25 kg/0,5 menit
Total Bahan Bakar	34,25 kg
Serbuk + Serabut	2,25 kg
Tempurung Kelapa	10,75 kg
Daun	21,25 kg

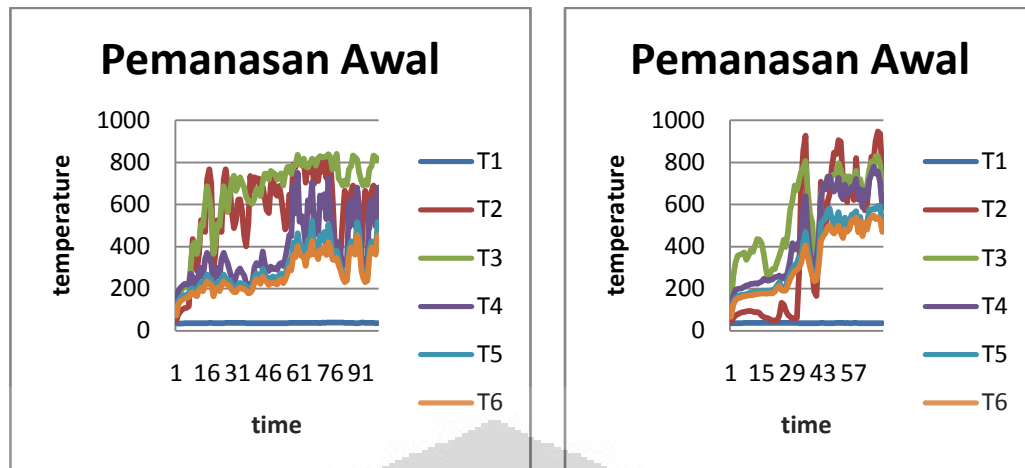


Gambar 4.15. Grafik Hasil Pembakaran Cangkang dan Daun Kering

Feeding Bahan Bakar	Feed Rate
Serbuk + Serabut 0,5 kg	0,5 kg/5 menit
Tempurung Kelapa 0,25 kg	0,25 kg/4 menit
Tempurung Kelapa 0,5 kg	0,5 kg/2,5 menit
Tempurung Kelapa 0,75 kg	0,25 kg/3,3 menit
Daun 0,25 kg	0,25 kg/0,5 menit

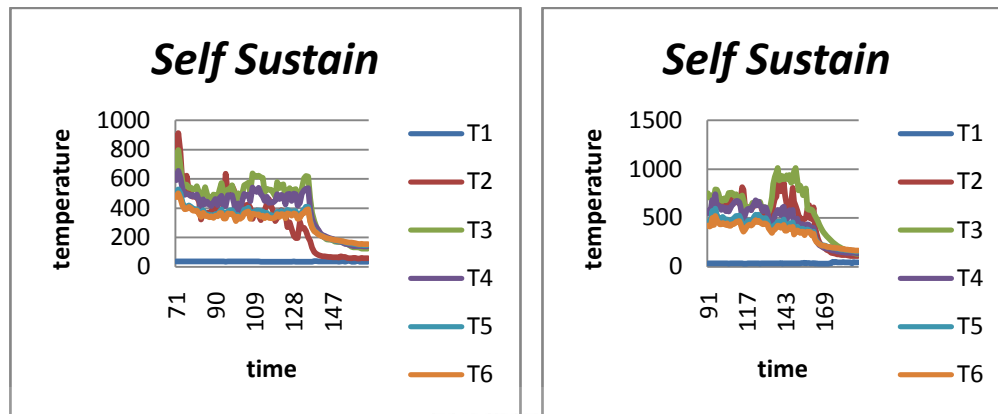
Total Bahan Bakar	35,25 kg
Serbuk + Serabut	2 kg
Tempurung Kelapa	13,25 kg
Daun	20 kg

Pada analisa kali ini kita akan membandingkan percobaan ke 2 dan ke 4 dimana parameter yang terdapat didalam percobaan ini sama, hanya terdapat pada perbedaan pasir yang yang digunakan. Pada percobaan 2 pasir yang digunakan adalah pasir silika bewarna gelap, mirip pasir yang ada di pantai, sedangkan pada percobaan 4 pasir yang digunakan adalah pasir siliki berwarna agak putih. Pada percobaan 4 dibutuhkan proses pengadukan, karena pasir yang tidak dapat terfluidisasi dengan bahan bakar sehingga temperatur turun walupun telah diberikan bahan bakar untuk pembakaran awal. Hal ini terjadi karena adanya penumpukan bahan bakar terlihat nilai temperatur *freeboard* turun walupun telah diberikan umpan bahan bakar, namu ketika dilakukan pengadukan manual temperatur *bed* langsung naik drastis, hal ini membuktikan bahwa tidak terjadi fluidisasi karena adanya penumpukan bahan bakar.



Gambar 4.16. Grafik Proses Pemanasan Awal Percobaan 2 dan 4

Pada percobaan kedua digunakan 35,25 kg bahan bakar dan waktu untuk mencapai kondisi *self sustaining* 91 menit sedangkan pada percobaan 4 digunakan 34,25 kg bahan bakar waktu mencapai kondisi *self sustain* 69 menit. Waktu pada percobaan 4 umpan pemanasan awal diberikan 0.25 kg setiap terjadi penurunan temperatur *freeboard*, sedangkan pada percobaan 2 diberikan pengumpanan 0.5 kg setiap penurunan temperatur, dengan *feeding* bahan bakar yang lebih besar temperatur ruang bakar dan *bed* lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan umpan 0.25 kg. Hal ini berkaitan dengan panas yang dirilis dari bahan bakar tersebut, namun ketika bahan bakar yang digunakan banyak maka ini akan berhubungan dengan waktu mencapai kondisi *self sustain* lebih lama karena bahan bakar yang lebih banyak sedangkan pada penggunaan bahan bakar 0.25 kg untuk mencapai kondisi *self sustain* lebih cepat karena bahan bakar tersebut mudah terbakar dan perpindahan panas berlangsung lebih cepat, namun temperatur yang dihasilkan memang lebih kecil dibandingkan dengan *feeding* 0.5 kg. Percobaan Pemanasan Awal Percobaan 2 dan 4



Gambar 4.17. Grafik *Self Sustain Combustion* Awal Percobaan 4 dan 2

Setelah kondisi *sustain* penggunaan bahan bakar daun akan kita analisa antara percobaan 2 dan 4. Pada percobaan 4 ketika diberikan daun terjadi penurunan temperatur dari 900 derajat menuju 400 derajat hal ini terjadi karena pengumpanan yang terlambat setelah *burner* dimatikan. Faktor lain yang menyebabkan temperatur yang rendah ketika digunakan daun temperatur *bed* yang tidak cukup panas dan menumpuk sehingga pembacaan memang tinggi namun tidak seluruh pasir yang dapat dibaca oleh termokopel, pada percobaan 2 perubahan temperatur lebih konstan dikarenakan suhu *bed* dari proses pemanasan hingga keadaan *self sustain* relatif konstan, sehingga ketika diberikan bahan bakar yang berbeda tidak terjadi perubahan temperatur yang signifikan dan grafik lebih konstan dimana suhu rata rata digambarkan dalam tabel dibawah ini :

Table 4.11 Temperatur Rata - Rata Percobaan Daun 4

<i>Temperatur Rata - Rata Ruang Bakar</i>						
<i>pemanasan</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>T3</i>	<i>T4</i>	<i>T5</i>	<i>T6</i>
<i>awal</i>	36.3	401.1	555.4	453.3	359.4	329.8
<i>Self</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>T3</i>	<i>T4</i>	<i>T5</i>	<i>T6</i>
<i>sustain</i>	521.4	638.2	549.1	434.6	396.1	329.8

Table 4.12 Temperatur Rata-Rata Percobaan Daun 2

Temperatur Rata - Rata Ruang Bakar						
Pemana-san	T1	T2	T3	T4	T5	T6
awal	37.4	578.2	662.0	385.4	297.3	266.6
Self sustain	T1	T2	T3	T4	T5	T6
	35.9	593.0	705.3	519.3	431.8	392.2

Temperatur yang dihasilkan oleh percobaan 2 lebih tinggi dibandingkan percobaan 4. Hal ini menunjukkan kondisi pemanasan awal pada pasir akan mempengaruhi proses setelah terjadinya *self sustain* walaupun *self sustain* dapat tercapai dengan cepat, hal ini tidak menunjukkan proses yang benar namun proses yang benar adalah *bed* pasir ketika pemanasan awal cenderung meningkat ketika diberikan pemanasan awal dan bahan bakar awal jika hal ini berdampak pada proses pembakaran selanjutnya, namun jika temperatur *bed* cenderung fluktuatif bisa dikatakan terjadi penurunan ketika pemanasan diberikan dapat dipastikan bahwa pasir tidak mengalami proses fluidisasi yang baik sehingga dibutuhkan proses pengadukan pasir, jadi dapat disimpulkan proses pemanasan awal sangat berpengaruh terhadap reaksi pembakaran ketika proses *self sustain* telah terjadi, temperatur *bed* harus dijaga konstan dan terjadi *bubling* fluidisasi agar terjadi pencampuran bahan bakar yang sempurna antara bahan bakar dan udara.

4.3 Analisa

Pada 3 percobaan yang dilakukan akan dibandingkan dengan percobaan pada penelitian sebelumnya pada bulan Mei 2011 dan Desember 2011, tujuan dari penelitian ini melihat karakteristik diversifikasi dari cangkang kelapa ke pemanfaatan daun kering yang digunakan pada reaktor *fluidized bed combustion* ketika temperatur kerja *bed* telah tercapai, dimana terjadi proses *bubling* fluidisasi maksimal dimana pasir berwarna kemerahan dan tidak terdapat api ketika proses ini terjadi. Oleh karena itu, pada percobaan tersebut, kondisi ini diasumsikan sebagai Kondisi Kerja FBC UI.



Gambar 4.18 Kondisi kerja FBC UI (*Self sustain*)

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

- a. Analisa kondisi awal sebelum terjadinya kondisi kerja

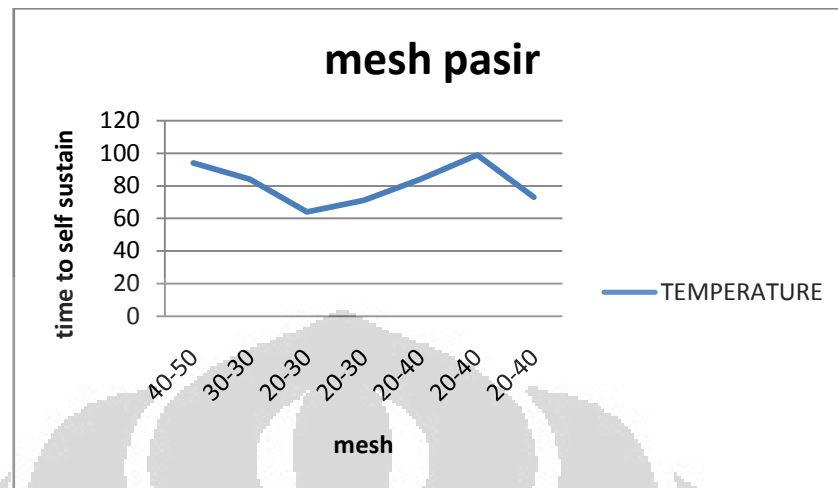
- b. Analisa terjadinya *self sustain* (kondisi kerja)
- c. Analisa perbandingan bahan bakar daun dan cangkang
- d. Analisa karakteristik geometri pembakaran daun dan cangkang
- e. Daya panas cangkang kelapa pada kondisi kerja

4.3.1 Analisa Kondisi Awal Sebelum Terjadinya Kondisi Kerja

Pada penilitan kali ini kita akan membandingkan karakteristik pembakaran menggunakan 100 % cangkang dengan bahan bakar daun kering yang digunakan ketika kondisi kerja telah tercapai. Secara umum proses pemanasan awal hingga tercapai kondisi kerja pasir sama dengan percobaan sebelumnya. Terdapat beberapa parameter yang perlu diperhatikan dalam percobaan seperti :

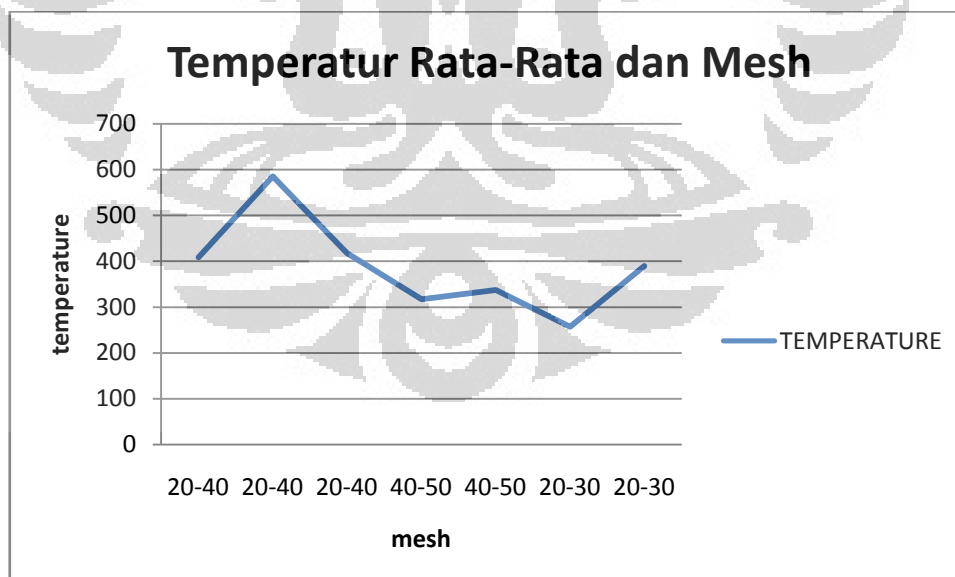
1. Mesh pasir
2. *Flow Rate blower*
3. Laju Pengumpanan bahan bakar/*feed rate*
 - Mesh pasir

Ukuran pasir akan berpengaruh terhadap proses perpindahan masa dan kecepatan dari fluidisasi, dengan partikel yang berukuran lebih besar maka nilai perpindahan masa akan meningkat, hal ini akan berdampak terhadap proses pemanasan awal ketika bahan bakar dimasukkan, proses perpindahan masa dari bahan bakar akan berlangsung lebih cepat ketika partikel dari *bed* lebih besar, sedangkan dengan partikel *bed* yang lebih kecil/halus maka nilai masa transfer akan berkurang. Hal ini didukung dengan partikel yang lebih besar memiliki nilai *boundary layer* yang besar, dengan demikian kecepatan fluidisasi tidak berpengaruh dengan masa transfer, namun kecepatan hanya berpengaruh terhadap partikel *inert bed*. Dalam hal ini terdapat beberapa jenis mesh yang telah digunakan, pada skripsi 29 dan 21 Mei 2011, digunakan pasir dengan mesh 30 dan 40-50, sedangkan pada penelitian terbaru digunakan pada Desember 2011 digunakan mesh dengan ukuran 20-40 dalam penelitian terbaru digunakan juga pasir dengan mesh 20-40 dalam hal ini kita dapat membandingkan waktu pemanasan awal sampai terjadi kondisi *self sustain*.



Gambar 4.19 Pengaruh Mesh Pasir Terhadap Waktu untuk Mencapai *Self sustain*

Dari hasil percobaan didapat pengaruh mesh terhadap waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi kerja pasir/*self sustain*, semakain besar partikel maka waktu untuk mencapai kondisi *self sustain* akan lebih cepat dibandingkan dengan partikel yang memiliki ukuran lebih kecil



Gambar 4.20 Pengaruh Mesh Pasir Terhadap Temperatur Release

Pasir yang digunakan pada pembakaran daun kering memiliki ukuran 20-40 memiliki temperatur rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar cangkang, hal ini dapat dipengaruhi oleh proses kerja dan ukuran mesh itu sendiri yang akan berpengaruh terhadap panas yang dihasilkan oleh bahan bakar.

- *Flow Rate blower*

Suplai udara akan menentukan *Air Fuel Ratio* (AFR) dari reaksi pembakaran pada reaktor FBC, suplai udara akan menentukan nilai fluidisasi minimum, kecepatan fluidisasi akan memengaruhi nilai *heat transfer* yang terjadi. Semakin meningkat kecepatan fluidisasi nilai *heat transfer* akan lebih besar. Dari kedua grafik di atas, waktu yang dibutuhkan untuk pemanasan pada suplai udara 0,085m³/s lebih cepat dibanding dengan pemanasan dengan suplai udara 0,095m³/s. Namun, sesuai dengan data yang telah dijabarkan sebelumnya, pemanasan dengan suplai udara 0,085m³/s membutuhkan bahan bakar cangkang kelapa total lebih banyak dalam proses pemanasan ini yaitu sebanyak 15 kg cangkang kelapa, sedangkan pada suplai udara 0,095m³/s hanya membutuhkan 8,5 kg cangkang kelapa. Hal ini menunjukkan bahwa percobaan dengan 0,085m³/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.

Sedangkan pada penelitian bulan Desember juga ditemukan hasil bahwa dengan nilai *flow rate* udara 0.085 m³/s untuk meningkatkan temperatur hingga kondisi *self sustain* lebih cepat dibandingkan dengan dengan *flow rate* 0.092 m³/s, namun dengan *flow rate* lebih sedikit, dibutuhkan bahan bakar yang lebih banyak dibandingkan dengan dengan *flow rate* yang lebih kecil hal ini sangat berpengaruh terhadap nilai perpindahan panas .

- Laju Pengumpanan bahan bakar/*feed rate*

4.3.2 Analisa Perbandingan Bahan Bakar Daun dan Cangkang

Table 4.13 Analisa *Ultimate* dan *Proximate* dari Berbagai Sumber

Waste component	Proximate analysis (as-received) weight %				Ultimate analysis (dry) weight %						Higher heating value (kcal/kg)		
	Moisture	Volatile matter	Fixed carbon	Non-comb.	C	H	O	N	S	Non-comb.	As received	Dry	Moisture and ash free
Demolition Softwood	7.70	77.62	13.93	0.75	51.0	6.2	41.8	0.1	<.1	0.8	4056	4398	4442
Waste Hardwood	12.00	75.05	12.41	0.54	49.4	6.1	43.7	0.1	<.1	0.6	3572	4056	4078
Furniture Wood	6.00	80.92	11.74	1.34	49.7	6.1	42.6	0.1	<.1	1.4	4083	4341	4411
Evergreen Shrubs	69.00	25.18	5.01	0.81	48.51	6.54	40.44	1.71	0.19	2.61	1504	4853	4978
Balsam Spruce	74.35	20.70	4.13	0.82	53.30	6.66	35.17	1.49	0.20	3.18	1359	5301	5472
Flowering Plants	53.94	35.64	8.08	2.34	46.65	6.61	40.18	1.21	0.26	5.09	2054	4459	4700
Lawn Grass I	75.24	18.64	4.50	1.62	46.18	5.96	36.43	4.46	0.42	6.55	1143	4618	4944
Lawn Grass II	65.00	—	—	2.37	43.33	6.04	41.68	2.15	0.05	6.75	1494	4274	4583
Ripe Leaves I	9.97	66.92	19.29	3.82	52.15	6.11	30.34	6.99	0.16	4.25	4436	4927	5150
Ripe Leaves II	50.00	—	—	4.10	40.50	5.95	45.10	0.20	0.05	8.20	1964	3927	4278
Wood and Bark	20.00	67.89	11.31	0.80	50.46	5.97	42.37	0.15	0.05	1.00	3833	4785	4833
Brush	40.00	—	—	5.00	42.52	5.90	41.20	2.00	0.05	8.33	2636	4389	4778
Mixed Greens	62.00	26.74	6.32	4.94	40.31	5.64	39.00	2.00	0.05	13.00	1494	3932	4519
Grass, Dirt, Leaves	21-62	—	—	—	36.20	4.75	26.61	2.10	0.26	30.08	—	3491	4994
<i>Domestic Wastes</i>													
Upholstery	6.9	75.96	14.52	2.62	47.1	6.1	43.6	0.3	.1	2.8	3867	4155	4272
Tires	1.02	64.92	27.51	6.55	79.1	6.8	5.9	0.1	1.5	6.6	7667	7726	8278

Table 2. Chemical and Fuel Properties of Forest Residue Fractions

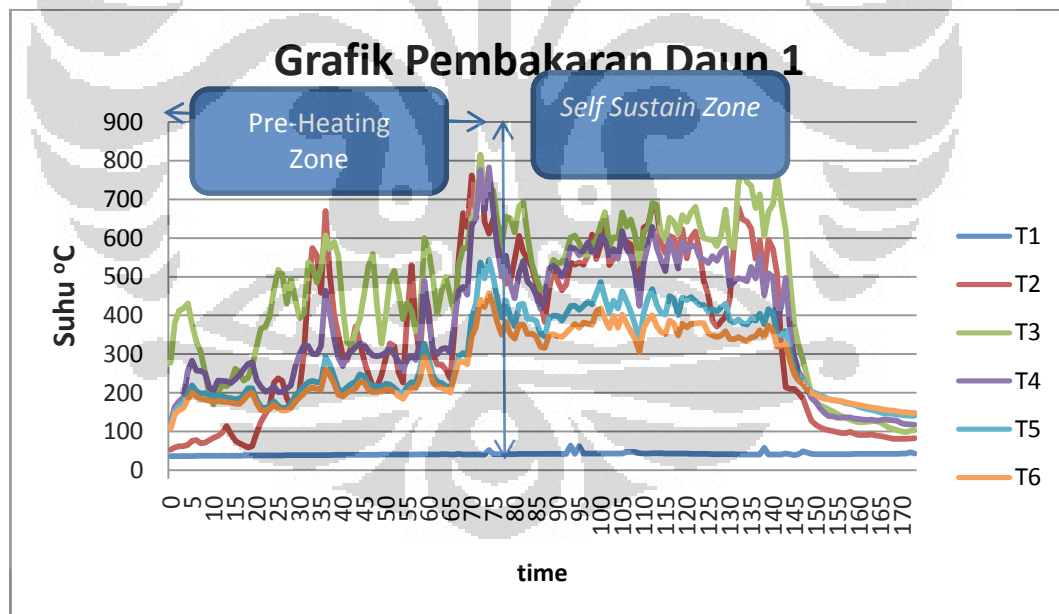
Biomass	Pine forest residues	Leaves	Small particles	Small stems	Barks	Chips
Proximate Analysis^a (% dry basis)						
Volatile	80.5 (0.4)	78.3 (0.3)	79.3 (0.6)	79.6 (1.4)	72.9 (0.2)	85.4 (0.2)
Ash	2.4 (0.1)	3.87 (0.2)	3.44 (0.2)	2.9 (0.4)	4.3 (0.2)	1.5 (0.2)
Fixed Carbon	17.1 (0.3)	17.9 (0.2)	17.3 (0.4)	17.4 (1.0)	22.9 (0.2)	13.1 (0.2)
HHV (MJ/kg)	19.6 (0.2)	20.2 (0.2)	19.4 (0.1)	19.1 (0.1)	19.1 (0.1)	19.5 (0.1)
Ultimate Analysis^a (% dry basis)						
Carbon	45.9 (0.5)	49.6 (0.3)	47.9 (0.4)	47.0 (0.6)	47.9 (0.4)	47.7 (0.5)
Hydrogen	5.9 (0.2)	6.9 (0.1)	6.4 (0.1)	6.4 (0.2)	5.9 (0.1)	6.7 (0.1)
Oxygen	43.5 (0.6)	35.2 (1.0)	39.6 (0.5)	40.8 (0.8)	38.9 (0.2)	41.0 (1.4)
Nitrogen	2.3 (0.4)	4.5 (0.8)	2.7 (0.2)	2.9 (0.3)	3.0 (0.3)	3.0 (1.0)
Sulfur	-	0.1	-	-	-	0.1

^a Numbers in the parenthesis are standard deviation with three replications.

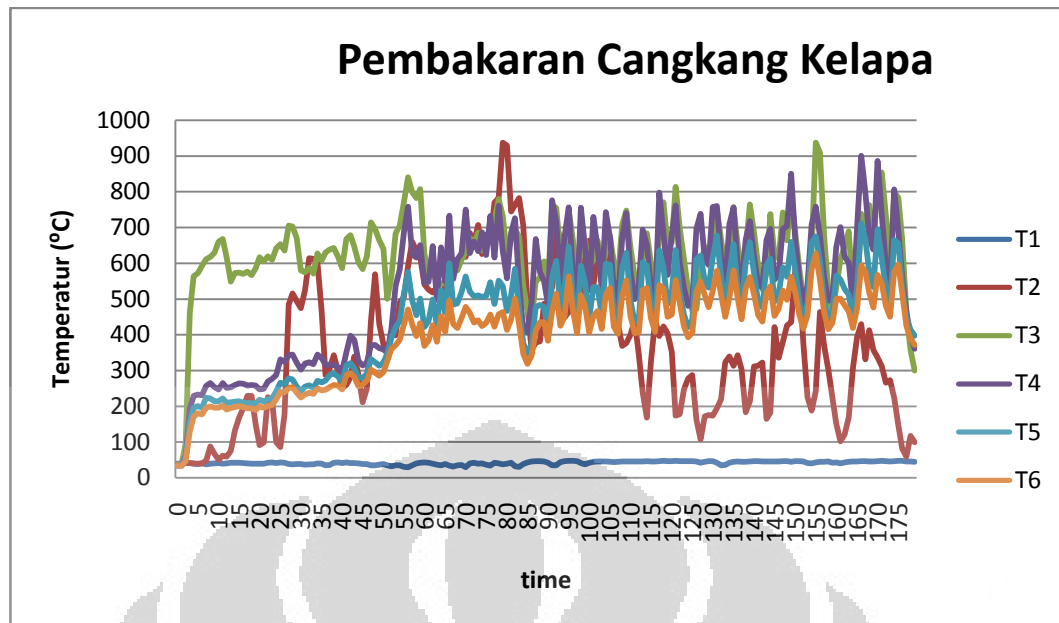
Table 4.14 Analisa *Ultimate* dan *Proximate* berdasarkan pengujian laboratorium tekMIRA

dry leave s	% proximate and ultimate analysis								
	biomass fuel properties								
	Volatil e	ash	fixed carbo n	moistur e content	sulphu r	Carbo n	Oxyge n	Nitroge n	Hydroge n
	62,31	6,5 1	20,05	11,13	0,17	58,07 9	14,48	0,8538	5,68

4.3.2. Analisa Perbandingan Bahan Bakar Daun dan Cangkang Percobaan 1 dengan Penilitan Desember 2011



Gambar 4.21 Grafik Pembakaran Cangkang Kelapa dan Penggunaan Daun Setelah *Self Sustain*



Gambar 4.22 Grafik Pembakaran Cangkang Kelapa

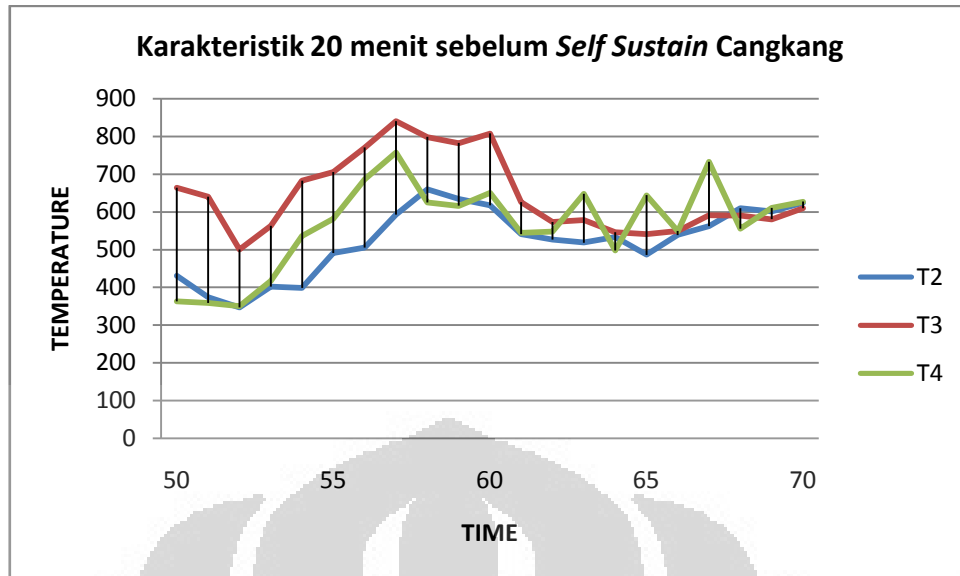
Pada analisa kali ini kita akan membandingkan karakteristik bahan bakar daun dan cangkang ketika terjadi kondisi kerja pasir FBC UI, pada percobaan pembanding diperoleh data sebagai berikut :

Data pembanding (cangkang kelapa) :

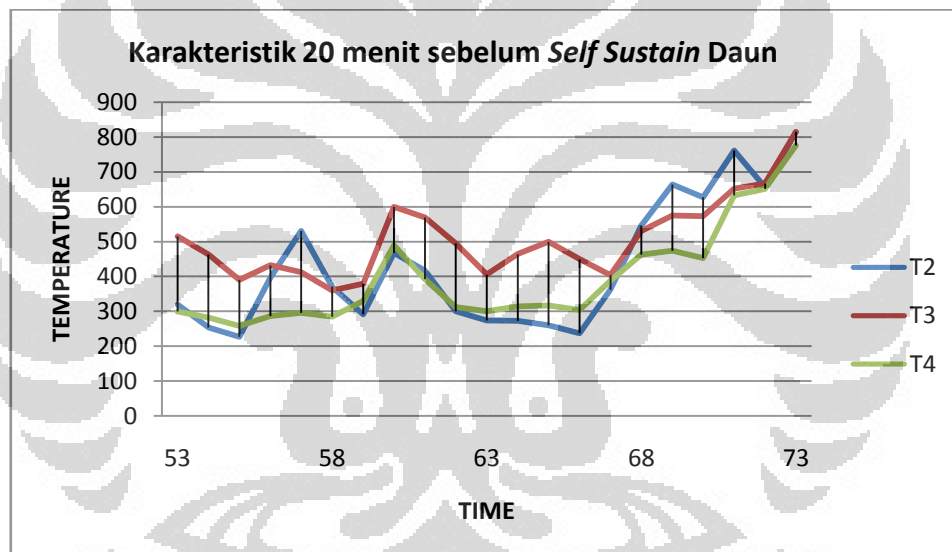
- a) Mesh 30-40
- b) *Flow rate* 0.085 m³/s
- c) Total bahan bakar 38 kg, 6 kg untuk pemanasan awal, 32 setelah *self sustain*
- d) Waktu untuk *self sustain* 71 menit, dengan durasi pengumpanan 90 menit setelah *self sustain*

Data percobaan(daun kering)

1. Mesh 20-40
2. *Flow rate* 0.092 m³/s
3. 30 kg, 7,25 kg cangkang untuk pemanasan awal, 22,75 setelah *self sustain*
4. Waktu untuk *Self sustain* 83 menit, dengan durasi pengumpanan daun 60 menit

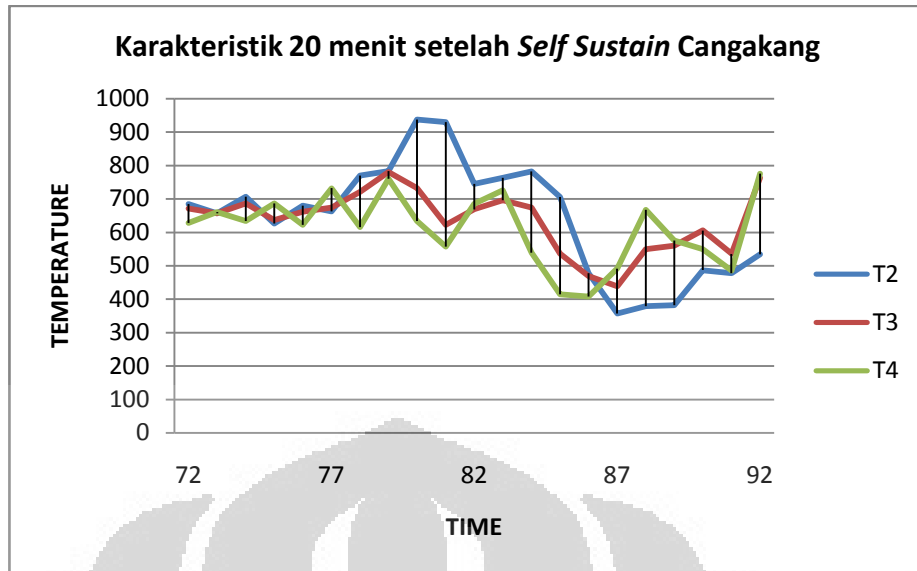


Gambar 4.23 Temperatur Ruang Bakar 20 menit Sebelum *Self Sustain* (Cangkang)

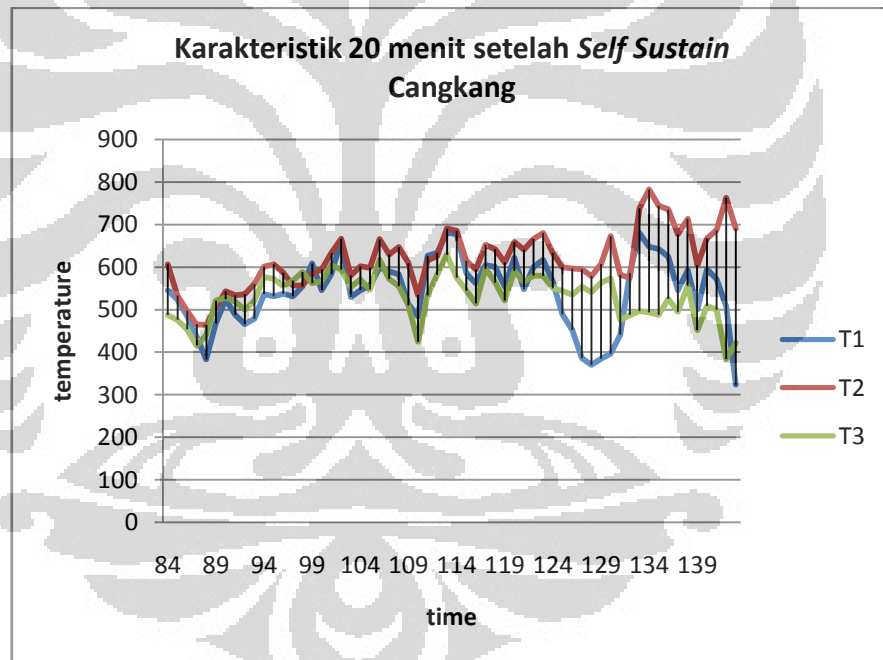


Gambar 4.24 Temperatur Ruang Bakar 20 menit Sebelum *Self Sustain* (Daun Kering)

Dari perbandingan grafik 20 menit sebelum dan sesudah terjadinya *self sustain* terlihat bahwa ketika digunakan daun kering setelah kondisi kerja pasir tercapai terjadi penurunan temperatur dibandingkan



Gambar 4.25 Temperatur Ruang Bakar 20 menit setelah *Self Sustain* (Cangkang)



Gambar 4.26 Temperatur Ruang Bakar 20 menit setelah *Self Sustain* (daun)

Table 4.15 Temperatur Rata – Rata 20 menit Sebelum dan Sesudah *Self Sustain*(cangkang)

Temperatur Rata - Rata Ruang Bakar			
20 BEFORE	T2	T3	T4
	523.4	644.8	566.7
20 AFTER	T2	T3	T4
	644.1	634.9	611.9

Table 4.16 Temperatur Rata – Rata 20 menit Sebelum dan Sesudah *Self Sustain* (Daun)

Temperatur Rata - Rata Ruang Bakar			
20 BEFORE	T2	T3	T4
	430.6	506.7	395.0
20 AFTER	T2	T3	T4
	520.4	591.9	527.0

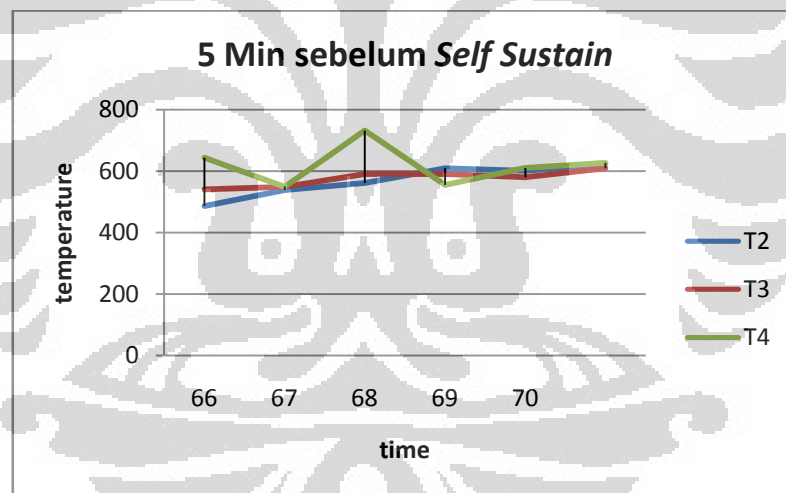
Dari perbandingan grafik 20 menit sebelum dan sesudah terjadinya *self sustain* terlihat bahwa ketika digunakan daun kering setelah kondisi kerja pasir tercapai terjadi penurunan temperatur, hal ini bisa kita lihat dari nilai *proximate* berupa *fixed carbon* dan *volatile matter* dari kedua jenis bahan bakar ini, daun memiliki *fixed carbon* yang lebih tinggi sehingga memungkinkan terjadinya nilai panas yang didapat dibandingkan dengan cangkang, namun, dalam segi *volatile mater* nilai daun lebih tinggi sehingga panas akan menumpu di suatu tempat (I) sehingga terjadi temperatur tinggi di suatu tempat.

Selain itu nilai dari jumlah bahan bakar yang tidak bisa terbakar lebih banyak dikandung daun sehingga kemungkinan terjadi penumpukan pada pasir material yang tidak terbakar akan mempengaruhi efektifitas pembakaran, selain itu dalam analisa proksimat juga dapat kita lihat kandungan karbon dan pemberian suplai udara yang tepat kepada bahan bakar dengan kandungan oksigen pada daun

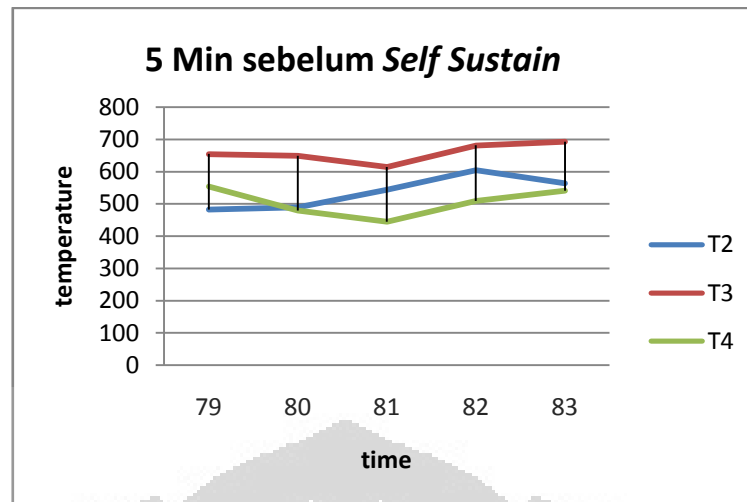
yang banyak udara pembakaran dapat dikurangi dan pada cangkang yang oksigen lebih kecil dapat diberikan udara lebih.

Analisa lain yang dapat dijadikan pertimbangan adalah dengan volume/densitas dari cangkang yang lebih besar dibanding daun akan menyebabkan nilai perpindahan masa akan cepat, sehingga proses dapat menghasilkan panas lebih dan reaksi biasanya berlangsung lebih lama dibandingkan daun kering yang sangat reaktif ketika dimasukkan ke ruang bakar, selain itu analisa fisik seperti porositas, *bulk density* dan *boundary layer* akan menentukan *heat release* dari suatu bahan bakar.

Nilai HHV yang terkandung dalam biomasa menggambarkan energi yang terkandung dalam ikatan kimia yang terdapat dalam suatu bahan bakar dengan nilai HHV yang lebih tinggi dibandingkan dengan cangkang kelapa dapat menerbitkan energi lebih dibandingkan dengan daun kering.

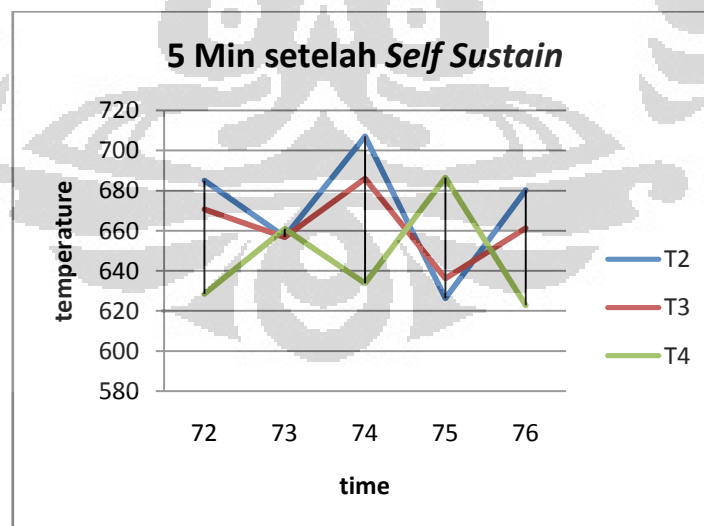


Gambar 4.27 Temperatur Ruang Bakar 5 menit Sebelum Kondisi Kerja Daun

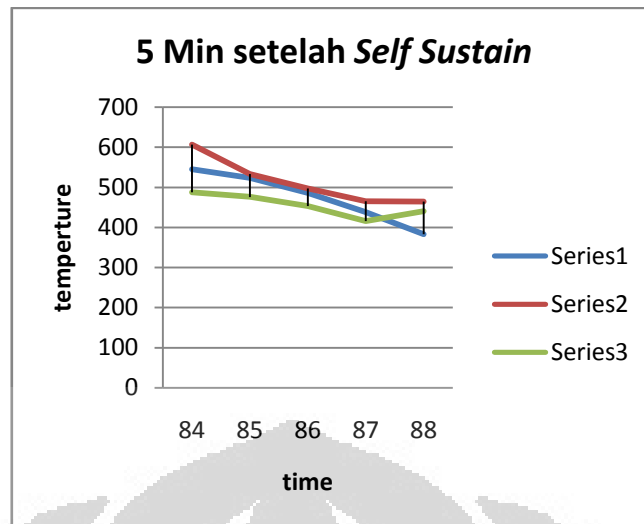


Gambar 4.28 Temperatur Ruang Bakar 5 menit Sebelum Kondisi Kerja Cangkang

Temperatur rata-rata sebelum terjadi kondisi kerja pasir hampir sama karena menggunakan cangkang kelap sebagai media pemanas. Awal perbedaan terjadi karena laju pengumpanan yang diberikan dan kondisi *burner*, namun ketika keadaan mendekati proses *self sustain* dari setiap percobaan hampir sama dimana temperatur *bed* berada pada temperatur 500-800 derajat, dan warna pasir kemerahan.

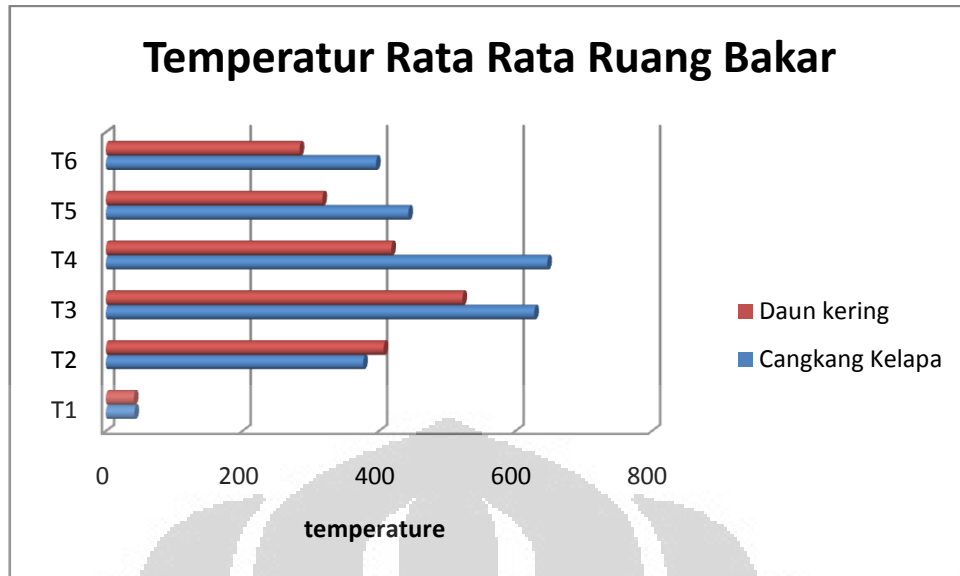


Gambar 4.29 Temperatur Ruang Bakar 5 menit Setelah Kondisi Kerja Cangkang



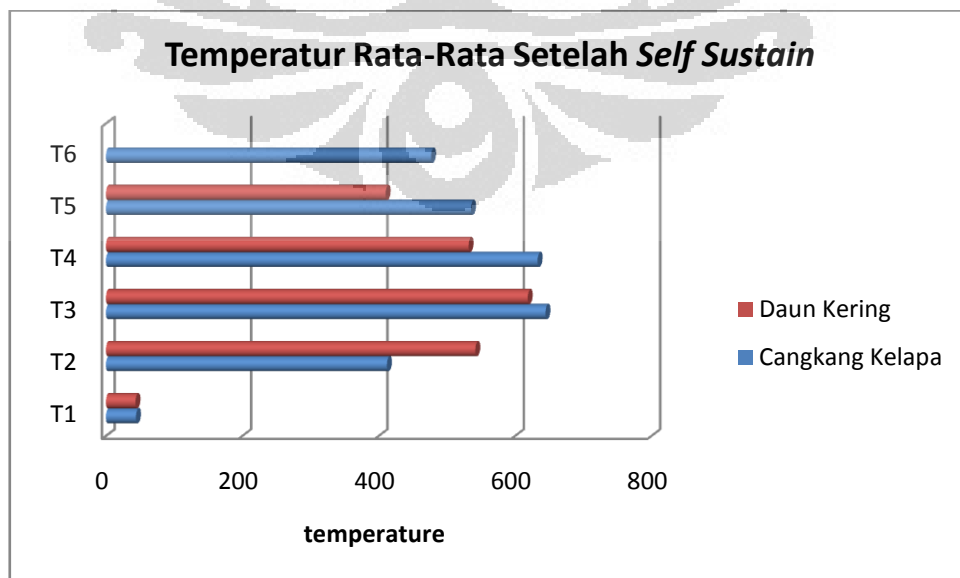
Gambar 4.30 Temperatur Ruang Bakar 5 menit Setelah Kondisi Kerja Daun

Kondisi setelah *self sustain* terjadi dapat membedakan karakteristik dari bahan bakar yang digunakan pada percobaan pada grafik 4.29 dimana tetap menggunakan cangkang, temperatur cenderung konstan sedangkan pada grafik 4.30 terjadi penurunan temperatur ketika *burner* dimatikan, namun pada titik selanjutnya terjadi kenaikan temperatur kembali. Pada saat ini kita akan menganalisa efek yang menyebabkan terjadinya penurunan temperatur ketika bahan bakar daun kering diganti cangkang kelapa. Hal pertama yang menjadi alasan penurunan temperatur adalah laju pengumpanan $\frac{1}{4}$ Kg daun kering, karena sebelumnya diberikan laju pengumpanan menggunakan cangkang sebanyak $\frac{1}{2}$ kg sebelum kondisi *self sustain* terjadi. Bahan bakar dengan dimensi yang lebih besar dan memiliki ketebalan memiliki nilai panas yang tinggi ketika diganti dengan daun kering yang cenderung terbakar dan cepat habis mengakibatkan temperatur sulit untuk menjaga kondisi yang telah tercapai. Kondisi untuk memecahkan masalah ini adalah memberikan pengumpanan ketika temperatur dari *bed* dan *freeboard* mengalami penurunan, hal ini dibuktikan ketika setelah 20 menit terjadinya I penggunaan bahan bakar daun cenderung stabil dan konstan dibandingkan dengan pembakaran cangkang kelapa.



Gambar 4.31 Temperatur Rata-Rata Ruang Bakar Daun vs Cangkang

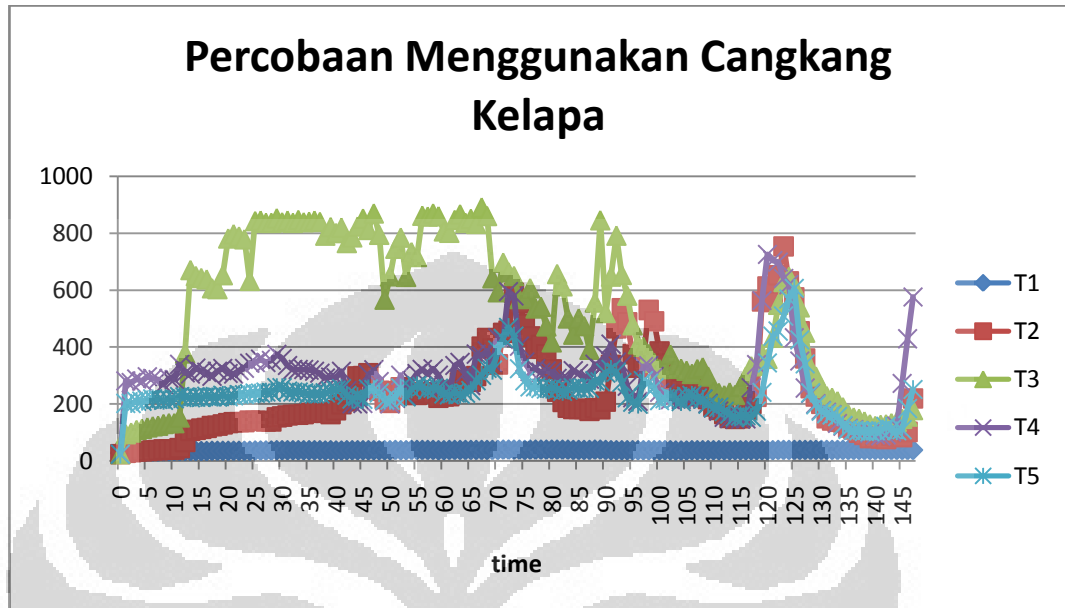
Secara keseluruhan temperatur rata-rata menggunakan cangkang kelapa lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan daun kering, hal ini dapat dimengerti dengan laju pengumpanan, *ash (non-combustible)* yang dimiliki dan daun kering cenderung lebih reaktif dibandingkan dengan cangkang kelapa, namun secara umum ketika daun kering telah digunakan temperatur rata-rata pada seluruh bagian ruang bakar cenderung konstan dan tidak terjadi penurunan temperatur yang terlalu jauh walaupun ketika terjadi pergantian bahan bakar penggunaan daun lebih cenderung turun.



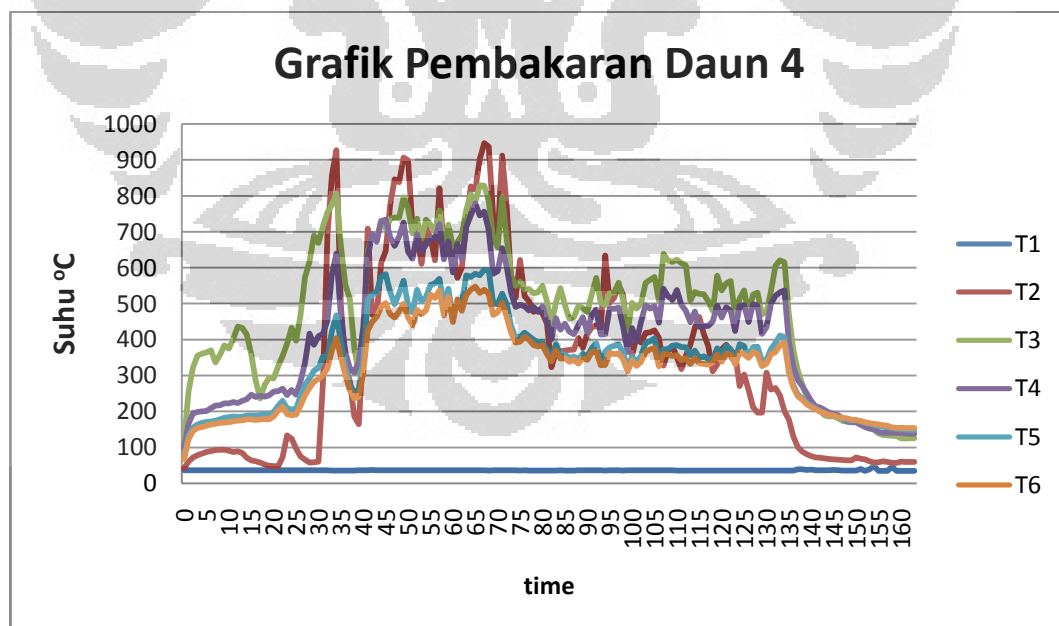
Gambar 4.32 Temperatur Rata-Rata Setelah *Self Sustain* Daun vs Cangkang

Dari bar grafik diatas dapat kita tarik kesimpulan bahwa temperatur cangkang kelapa lebih tinggi dibandingkan dengan daun kering, ketika penggunaan cangkang kelapa murni temperatur lebih stabil, pengertian stabil disini adalah perubahan temperatur setelah *burner* dimatikan tidak mengalami penurunan drastis dan cenderung konstan, namun terdapat penurunan ketika bahan bakar telah habis dan ketika pemasukan bahan bakar terjadi penurunan temperatur karena *bed* akan memberikan panas kepada bahan bakar setelah pemanasan dan pembentukan volatil baru terjadi pembakaran sehingga suhu naik kembali, berbeda dengan daun kering yang mengalami penurunan ketika dimasukan dalam keadaan *burner* mati , cenderung terjadi penurunan temperatur dari kondisi sebelum *self sustain*. Hal ini menunjukkan nilai kalor panas dari daun yang mudah terbakar sehingga proses perpindahan panas berlangsung sangat cepat dan mengakibatkan temperatur juga cepat, maka diperlukan laju pengumpanan yang tepat untuk mengontrol temperatur ruang bakar. Dari grafik terlihat bahwa penggunaan daun kering cenderung stabil secara umum, namun jika diteliti satu persatu maka grafik ini sangat dinamis naik turun.

4.3.3 Analisa Perbandingan Bahan Bakar Saun dan Cangkang Percobaan 4 dengan Penilitan Mei 2011



Gambar 4.33 Grafik Pembakaran Cangkang Kelapa



Gambar 4.34 Grafik Pembakaran Cangkang Kelapa dan Daun

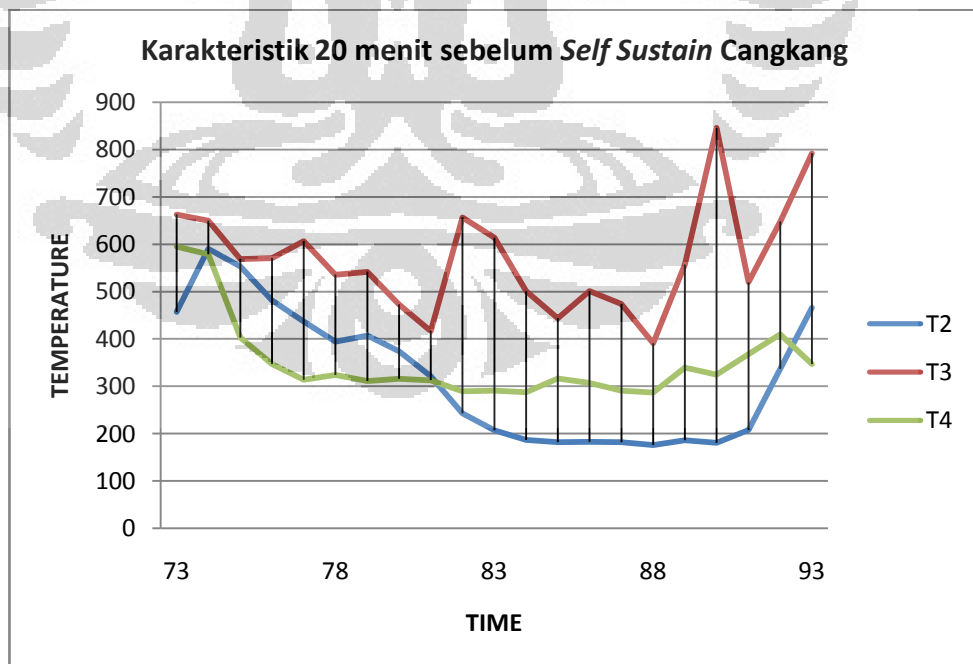
Pada analisa kali ini kita akan membandingkan karakteristik bahan bakar daun dan cangkang ketika terjadi kondisi kerja pasir FBC UI, pada percobaan pembanding diperoleh data sebagai berikut :

Data pembanding (cangkang kelapa) :

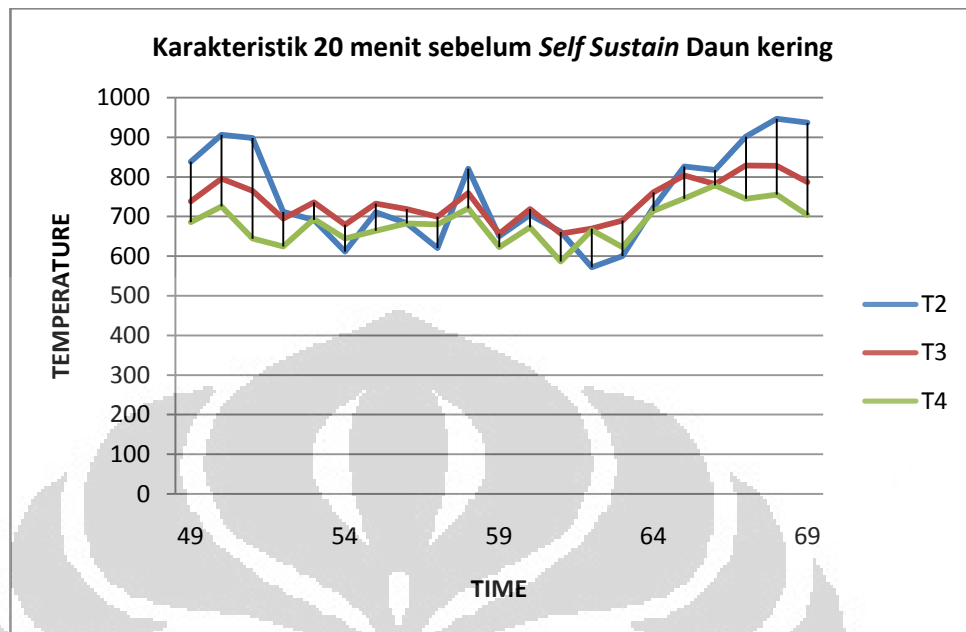
- a) Mesh 40-50
- b) *Flow rate* 0.085 m³/s
- c) Total bahan bakar 38 kg, 6 kg untuk pemanasan awal, 32 setelah *self sustain*
- d) Waktu untuk *self sustain* 94 menit, dengan durasi pengumpanan 100 menit setelah *self sustain*

Data percobaan(daun kering)

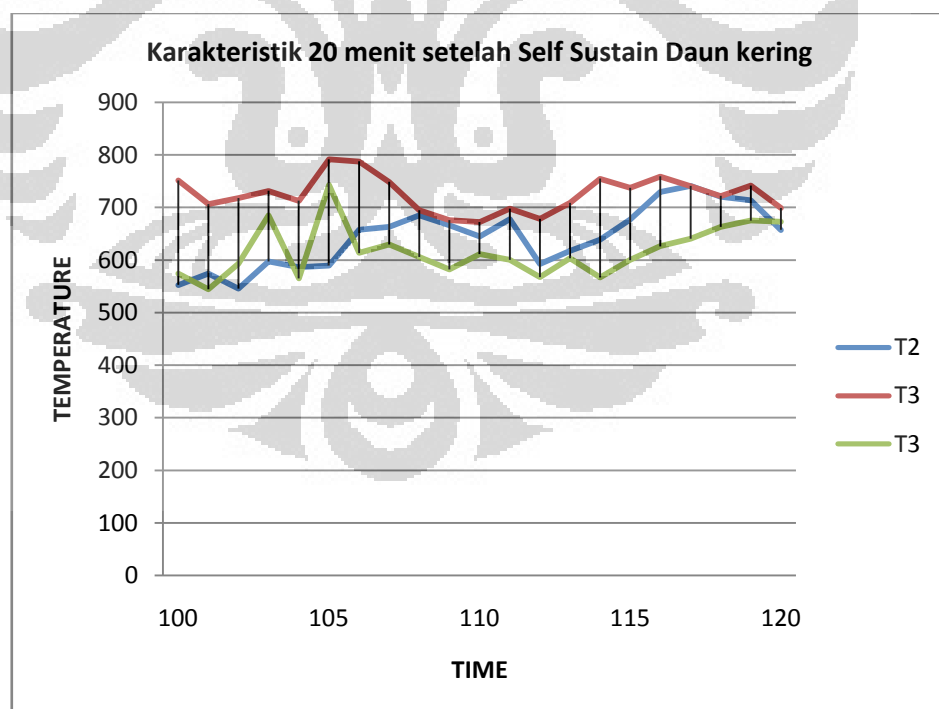
1. Mesh 20-40
2. *Flow rate* 0.091 m³/s
3. Total bahan bakar 35,25 kg, 15,25 kg cangkang untuk pemanasan awal, 20 kg daun setelah *self sustain*
4. Waktu untuk *self sustain* 70 menit, dengan durasi pengumpanan daun 60 menit



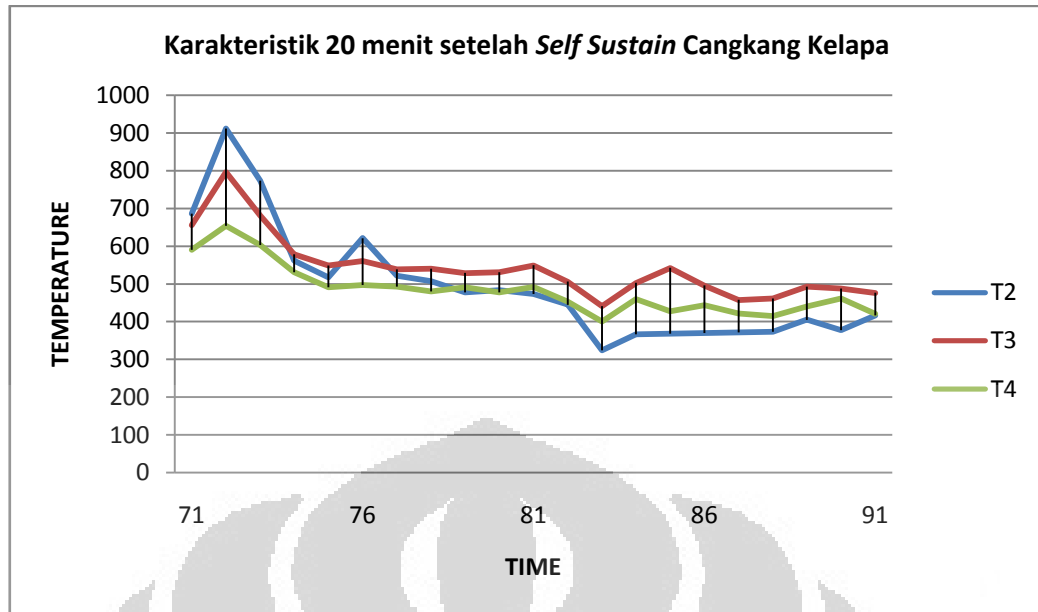
Gambar 4.35 Temperatur Ruang Bakar 20 menit Sebelum *Self sustain* (Cangkang)



Gambar 4.36 Temperatur Ruang Bakar 20 menit sebelum *Self sustain* (Cangkang/Daun)



Gambar 4.37 Temperatur Ruang Bakar 20 menit Setelah *Self Sustain* (Cangkang Daun)



Gambar 4.38 Temperatur Ruang Bakar 20 menit setelah *Self Sustain* (Cangkang)

Tabel 4.17 Temperatur Rata - Rata sebelum 20 menit dan sesudah *Self Sustain* (Cangkang)

Temperatur Rata - Rata Ruang Bakar			
20	T2	T3	T4
BEFORE	321.5	570.1	350.6
20	T2	T3	T4
AFTER	290	334.6	222.5

Tabel 4.18 Temperatur Rata - Rata sebelum 20 menit dan sesudah *Self Sustain* (Cangkang/Daun)

Temperatur Rata - Rata Ruang Bakar			
pemanasan	T2	T3	T4
awal	754.1	738.4	684.9
<i>Self sustain</i>	T2	T3	T4
	492.9	541.9	483.1

Pada data perbandingan yang kedua antara penelitian yang dilakukan Mei 2011 dengan percobaan yang dilakukan untuk daun, dapat kita tarik kesimpulan setelah kita lihat distribusi temperatur dimana terjadi penurunan pada cangkang ketika bahan bakar dimasukan ke ruang bakar, pada percobaan sebelumnya bahwa temperatur pembakaran cangkang kelapa cenderung konstan dan bisa naik, namun pada data yang kami gunakan sebagai perbandingan tidak bisa dijadikan rujukan karena temperatur yang terus turun, hal ini dikarenakan tidak terjadi proses fluidisasi, dimana *bed* tidak bisa bercampur dengan bahan bakar sehingga yang terjadi hanya reaksi pembakaran dan nilai konveksi saja yang bisa dimanfaatkan, namun kontak antar partikel bahan bakar dengan *bed* berkurang, hal ini dapat kita buktikan dari temperatur rata-rata 20 menit sebelum dan sesudah *self sustain combustion* maka perbandingan kedua data ini tidak bisa dijadikan suatu perbandingan .

4.3.4 Analisa Perbandingan Bahan Bakar Daun dan Cangkang Percobaan 2 dengan penilitan Desember 2011 (1,5 x1,5)

Pada analisa kali ini kita akan membandingkan karakteristik bahan bakar daun dan cangkang ketika terjadi kondisi kerja pasir FBC UI, pada percobaan perbandingan diperoleh data sebagai berikut :

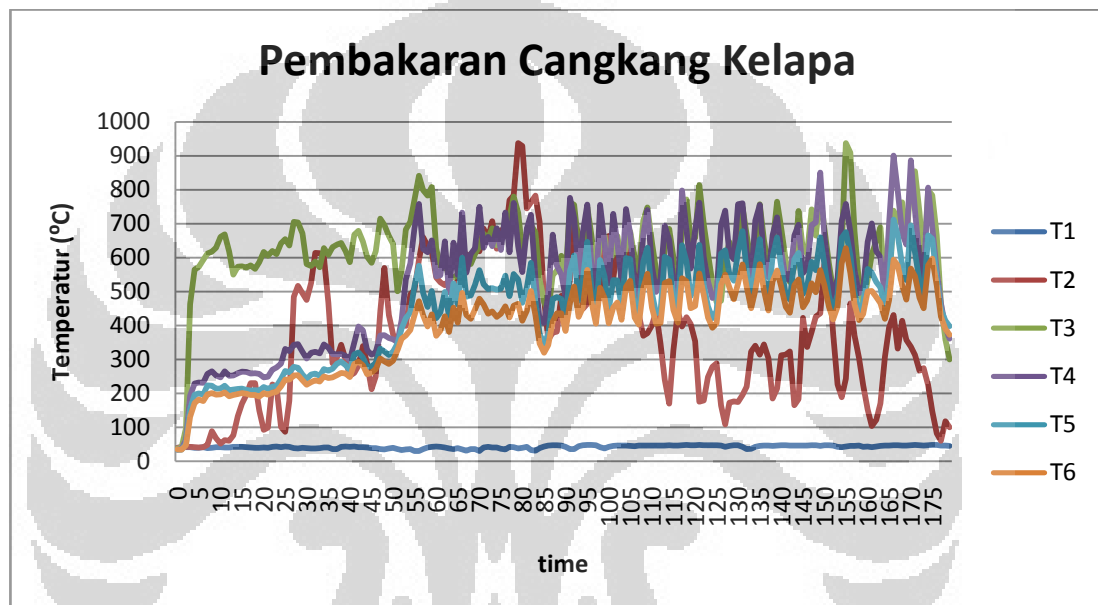
Data perbandingan(cangkang kelapa) :

- a) Mesh 20-40
- b) *Flow rate* 0.092 m³/s
- c) Total bahan bakar 38 kg; 5,25 kg untuk pemanasan awal; 22,75 setelah *self sustain*
- d) Waktu untuk *self sustain* 65 menit, dengan durasi pengumpanan 104 menit setelah *self sustain*

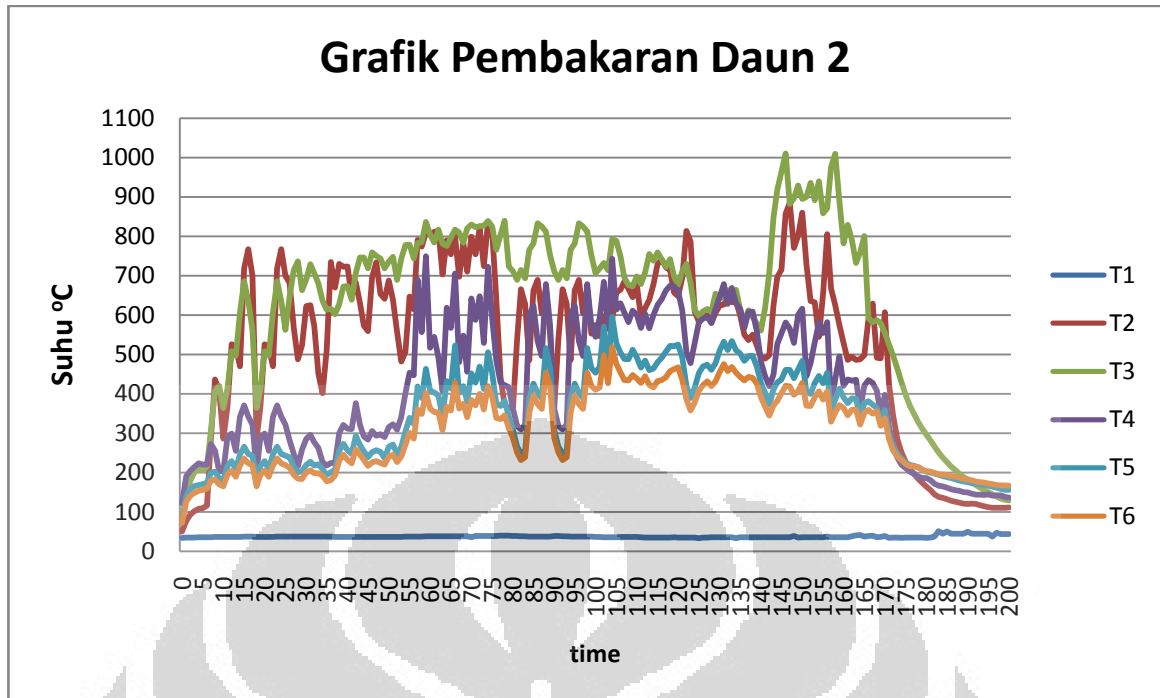
Data percobaan(daun kering)

- A. Mesh 20-40

- B. *Flow rate* 0.092 m³/s
- C. Total bahan bakar 35,25 kg; 15,25 kg cangkang untuk pemanasan awal, 20 kg daun setelah *self sustain*
- D. Waktu untuk *self sustain* 98 menit, dengan durasi pengumpanan daun 60 menit

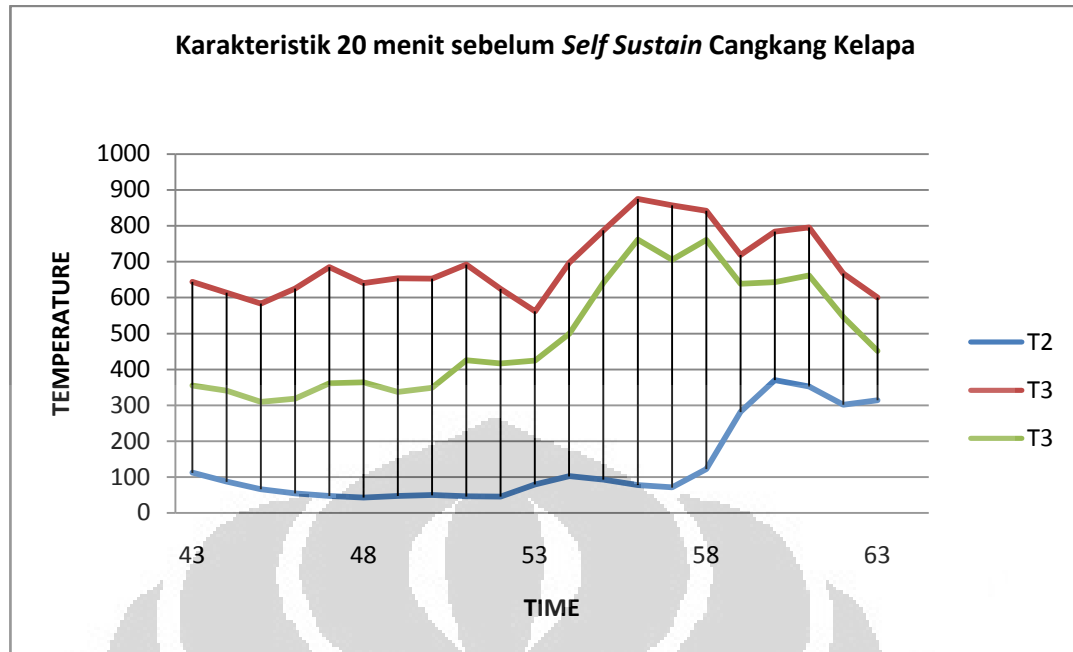


Gambar 4.39 Grafik Pembakaran Cangkang



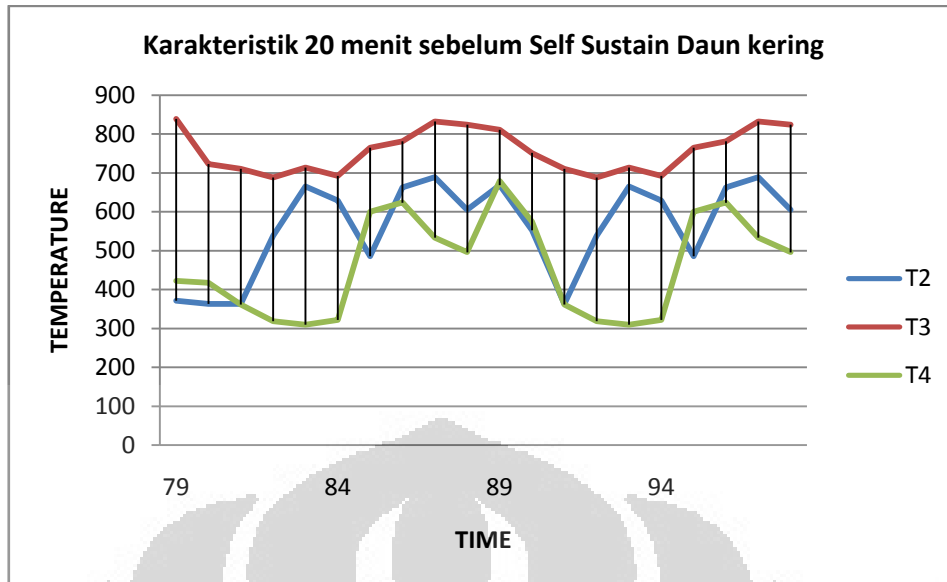
Gambar 4.40 Grafik Pembakaran Cangkang dan Daun

Pada analisa kali ini kita akan membandingkan percobaan menggunakan daun kering dengan cangkang kelapa dengan parameter *mesh* pasir dan *flow rate* dari *blower force draft* sama, namun yang membedakan adalah laju pengumpanan dan waktu untuk mencapai kondisi *self sustain*, pada pemanasan awal untuk daun kering digunakan laju pengumpanan cangkang kelapa untuk pemanasan awal 0,5 kg, pemberian bahan bakar dilakukan ketika temperatur dari *bed* dan *freeboard* urun ini mengindikasikan bahwa bahan bakar telah terbakar habis, sedangkan dalam percobaan untuk memanaskan daun digunakan laju pengumpanan 0,25 kg, dari masa partikel yang dimasukkan, kita dapat menyimpulkan bahwa laju perpindahan masa akan cepat terjadi pada laju pengumpanan $\frac{1}{2}$ kg namun membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mencapai kondisi kerja pasir dibandingkan dengan masa bahan bakar yang lebih kecil dengan nilai perpindahan masa yang kecil namun bahan bakar cepat bereaksi, dalam penelitian kali ini terlihat bahwa waktu untuk mencapai kondisi *self sustain* pada laju pengumpanan besar lebih lama dibandingkan dengan yang kecil, sehingga terdapat perbedaan waktu mencapai kondisi kerja pasir.



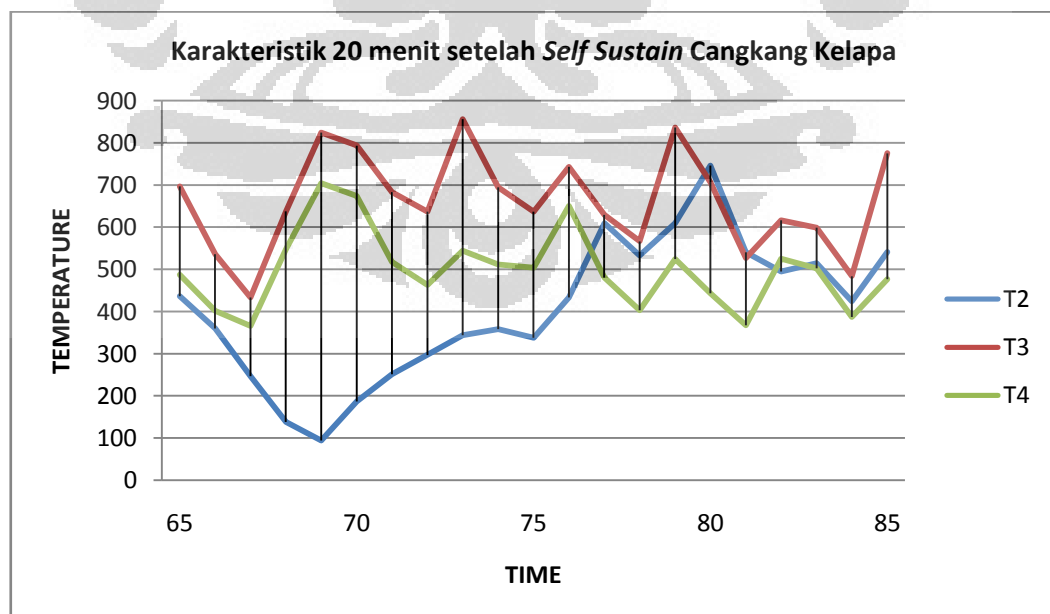
Gambar 4.41 Temperatur Ruang Bakar 20 menit sebelum *Self Sustain*(Cangkang)

Untuk mengetahui pergerakan temperatur, maka kita akan menganalisa temperatur ruang bakar 20 menit sebelum kondisi *self sustain*, pada gambar di atas terlihat suhu pasir pada percobaan menggunakan 100 % cangkang kelapa, terlihat pasir masih dibawah tercapainya kondisi kerja, namun 5 menit sebelum *self sustain* suhu pasir meningkat ke temperatur 400 derajat hal ini disebabkan oleh *bed* yang tidak teraduk dengan baik, bahan bakar tetap bereaksi namun pasir tidak mengalami fluidisasi sehingga temperatur *bed* tidak naik selama 56 menit.

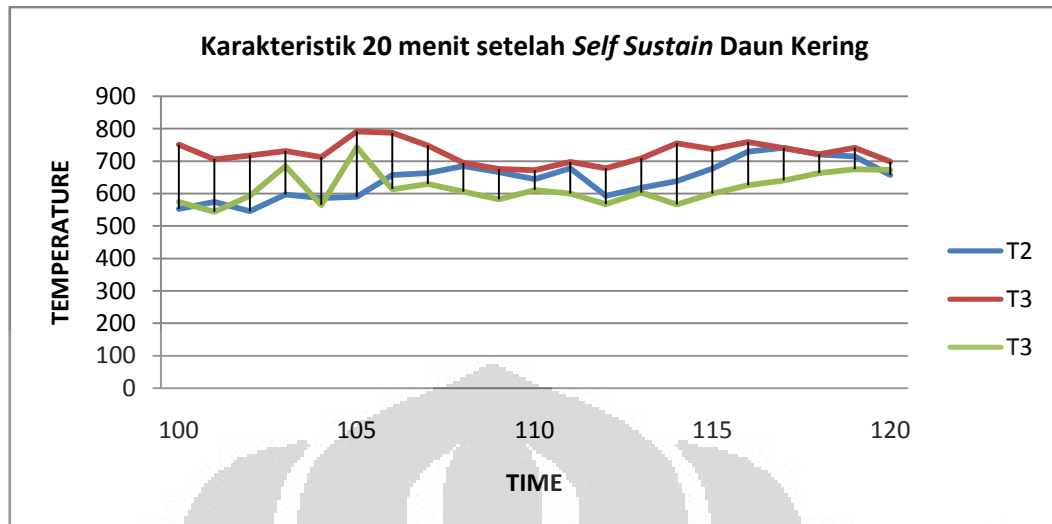


Gambar 4.42 Temperatur Ruang Bakar 20 menit Sebelum *Self Sustain* (Cangkang/Daun)

Pada pemanasan awal untuk penggunaan daun kering terlihat temperatur pasir mulai naik pada menit ke 80, pada percobaan ini waktu mencapai kondisi kerja pasir memang lebih lama dibandingkan dengan percobaan untuk cangkang, namun pada pemanasan awal ini cenderung konstan distribusi temperatur seragam hingga tercapai suhu kerja.



Gambar 4.43 Temperatur Ruang Bakar 20 menit setelah *Self sustain* (Cangkang)



Gambar 4.44 Temperatur Ruang Bakar 20 menit setelah *Self Sustain* (Cangkang dan Daun)

Pada kondisi *self sustain* penggunaan daun kering cenderung lebih stabil dimana terjadi penurunan temperatur ketika bahan bakar diganti dengan daun kering, namun setelah beberapa saat temperatur T2, T3, T4 kembali naik dan cenderung seragam dimana tidak terjadi temperatur drop yang begitu signifikan, sedangkan pada keadaan *burner* mati dan bahan bakar cangkang dimasukkan terjadi penurunan temperatur yang cukup jauh namun dapat kembali ke keadaan sebelum *burner* dimatikan. Hal ini terjadi karena panas dari pasir diserap oleh bahan bakar terlebih dahulu sehingga terjadi penurunan temperatur hal ini berbeda dengan daun yang ketika dimasukkan langsung cepat bereaksi dengan *bed* tidak butuh waktu yang lama untuk bereaksi sehingga penurunan temperatur tidak begitu terlihat.

Table 4.19 Temperatur Rata - Rata Sebelum 20 menit dan Sesudah *Self Sustain* (Cangkang dan Daun)

Temperatur Rata - Rata Ruang Bakar			
pemanasan	T2	T3	T4
awal	561.6	757.5	461.2
Self sustain	T2	T3	T4
	643.8	725.5	617.4

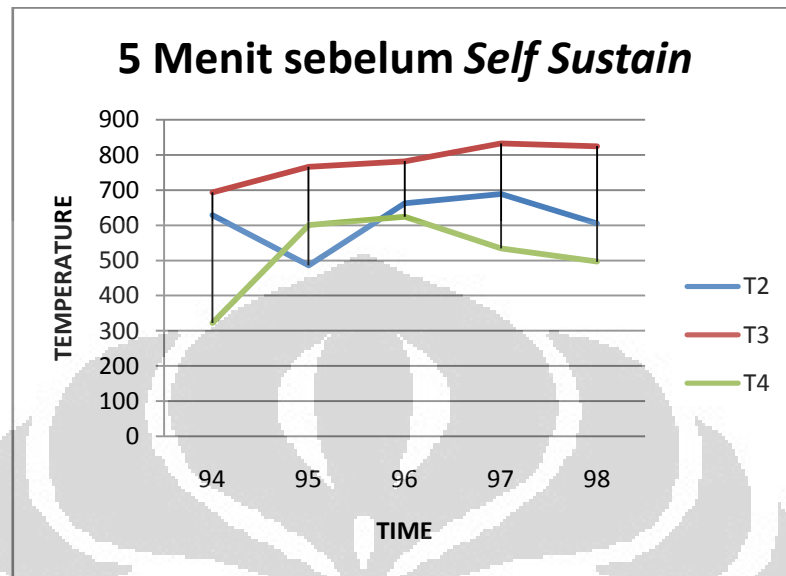
Table 4.20 Temperatur Rata – Rata sebelum 20 menit dan sesudah *Self Sustain* (Cangkang)

Temperatur Rata - Rata Ruang Bakar			
pemanasan	T2	T3	T4
awal	131.1	695.1	490.9
Self sustain	T2	T3	T4
	404.5	662.4	499.2

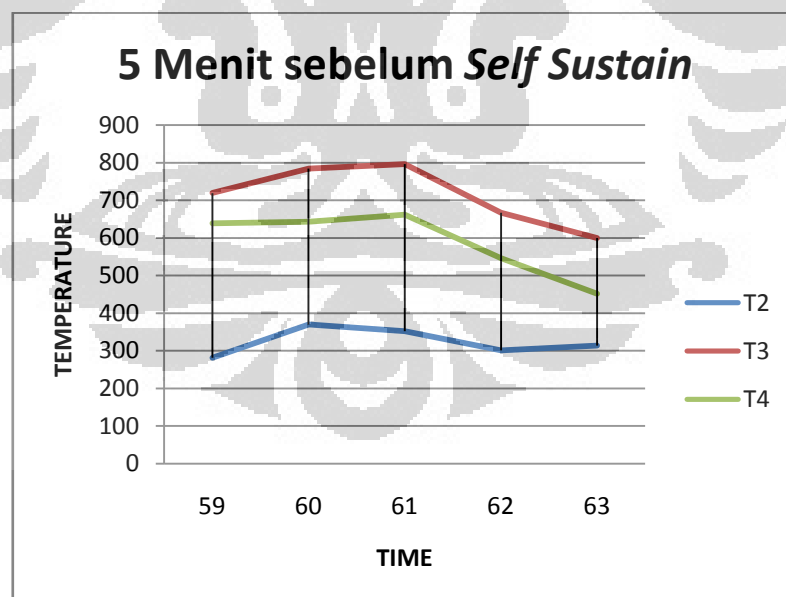
Dari 3 titik pembacaan (T2, T3, T4) terlihat jelas bahwa pada 20 menit sebelum dan sesudah *self sustain* terjadi temperatur daun lebih tinggi dibandingkan dengan cangkang karena volatil dari daun cepat dihasilkan sehingga gas mampu membakar, itu akan bereaksi diatas *freeboard* sehingga terlihat temperatur di atas *freeboard* dari penggunaan daun lebih besar dibandingkan cangkang kelapa.

Analisa lain yang bisa dilakukan bahwa pemanasan awal pasir akan menentukan prose setelah *self sustain*, hal ini terbukti ketika percobaan untuk cangkang pemanasan awal pasir tidak berjalan dengan baik ketika bahan bakar dan *burner* dihidupkan temperatur *bed* cenderung konstan dan tidak terjadi perpindahan panas dari bahan bakar ke hamparan, namun ketika diaduk terjadi perubahan temperatur tapi suhu dari pasir ini tidak seragam karena terjadi *overheating* di suatu tempat sehingga suhu naik secara drastis, hal ini yang menyebabkan temperatur yang dihasilkan dari reaksi cangkang kecil. Secara teoritis nilai kalor yang dihasilkan cangkang harus lebih besar dibandingkan daun,

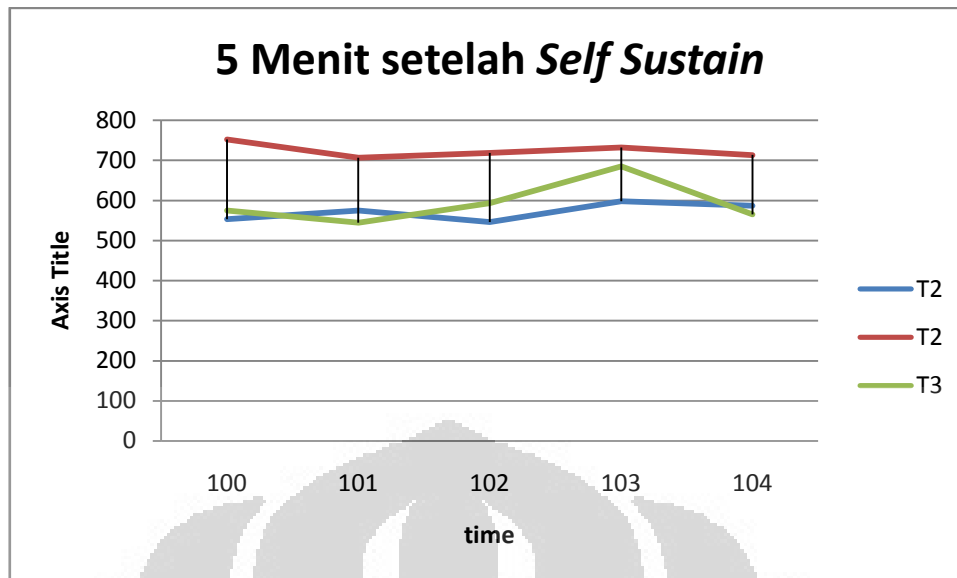
namun pengamatan ini hanya dilakukan selama 40 menit tidak menggambarkan kondisi keadaan reaksi pembakaran secara keseluruhan.



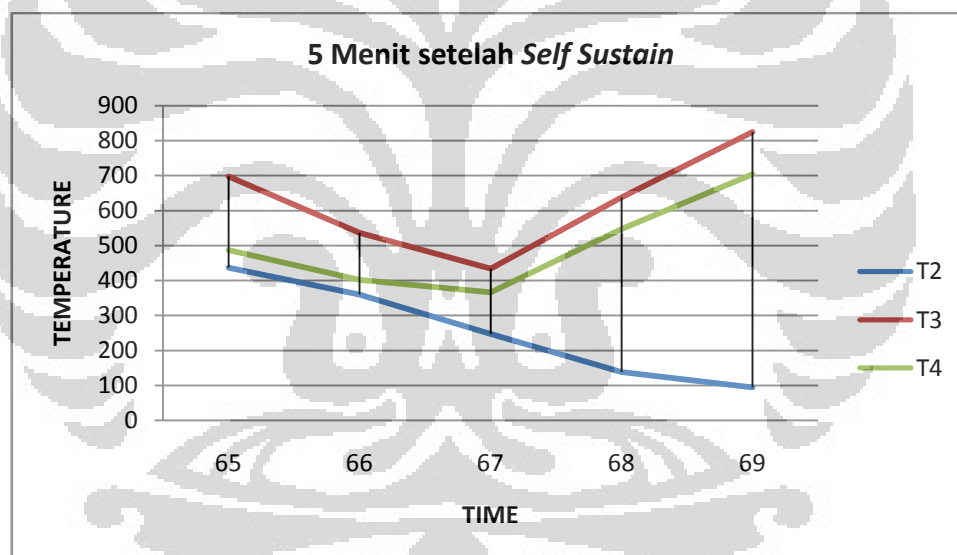
Gambar 4.45 Temperatur Ruang Bakar 20 menit Setelah *Self Sustain* (Sangkang dan Daun)



Gambar 4.46 Temperatur Ruang Bakar 5 menit Sebelum *Self Sustain* (Cangkang)



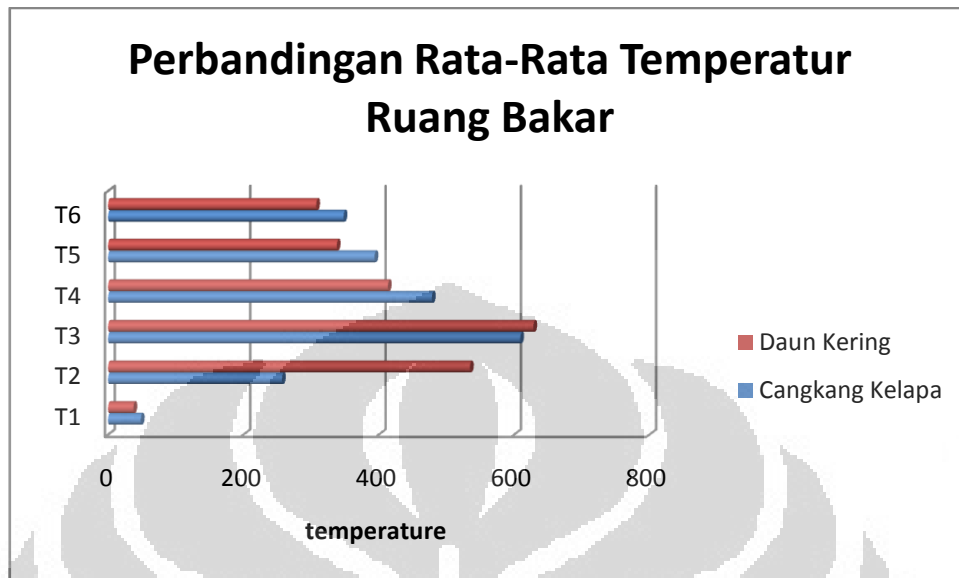
Gambar 4.47 Temperatur Ruang Bakar 5 menit Setelah *Self Sustain* (Cangkang dan Daun)



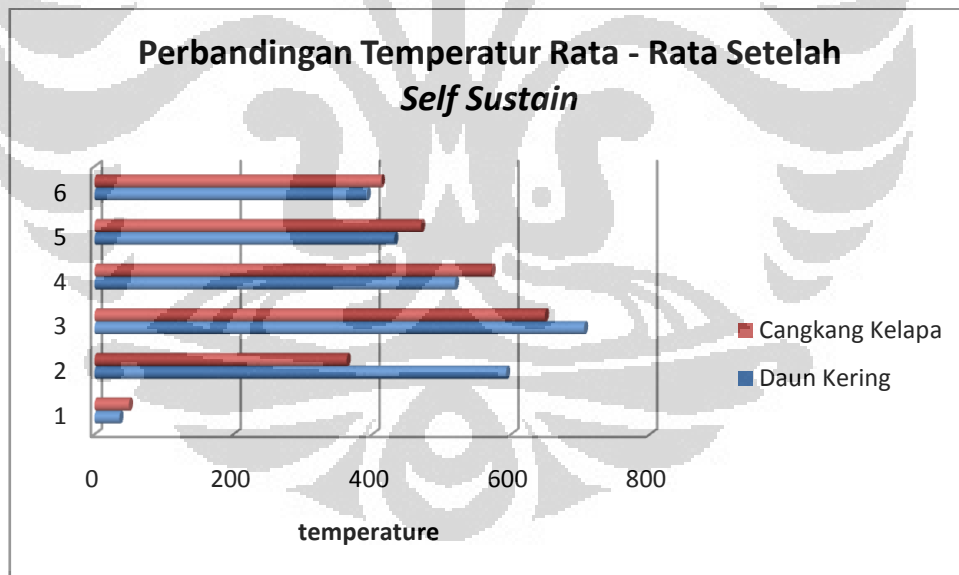
Gambar 4.48 Temperatur Ruang Bakar 5 menit Setelah *Self Sustain* (Cangkang)

Grafik 5 menit sebelum dan sesudah terjadi proses *self sustain* akan menggambarkan fluktuasi pada temperatur kerja ruang bakar di 3 titik pembacaan, dimana ketika bahan bakar daun dimasukkan ketika *burner* dimatikan tidak terjadi perubahan temperatur yang signifikan dan cenderung suhu konstan sedangkan pada penggunaan cangkang kelapa setelah api pemanasan awal dimatikan terjadi

penurunan temperatur yang besar namun pada menit ke 5 setelah *self sustain* temperatur di 3 titik pembacaan kembali meningkat.



Gambar 4.49 Temperatur Rata - Rata Ruang Bakar Daun vs Cangkang



Gambar 4.50 Temperatur Rata - Rata Setelah *Self Sustain* Daun vs Cangkang

Temperatur rata-rata selama percobaan daun kering maupun cangkang kelapa menunjukkan suhu pada *freeboard* cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan *bed*/hamparan hal ini dipengaruhi oleh sifat biomasa yang memiliki *fix carbon* yang rendah dimana *fix carbon* itu yang akan bereaksi di-*bed* namun, dengan *Volatile Meter* yang tinggi akan menghasilkan gas yang tidak terbakar di *bed* melainkan di *freeboard* dan ketinggian lainnya, dari bar digram dapat diketahui pengaruh ketinggian terhadap penurunan temperatur karena adanya jarak dan luas alas yang bertambah yang mengakibatkan temperatur berkurang jika ketinggian pembaan temokopel jauh dari ruang bakar.

4.3.5 Analisa pengaruh geometri bahan bakar terhadap hasil pembakaran pada FBC

Ukuran partikel bahan bakar akan berpengaruh terhadap nilai perpindahan panas yang ditentukan oleh pencampuran bahan bakar dengan pasir *residence time* dimana semakin kecil bahan bakar akan membatasi reaksi yang terjadi antara *bed* dan bahan bakar selain itu semakin kecil partikel suatu bahan bakar maka nilai *volatile matter* yang terkandung dalam suatu bahan bakar meningkat karena *fix carbon* yang tersedia semakin menipis dan *volatile* lebih mudah untuk terlepas dari bahan bakar.

Ukuran partikel bahan bakar akan berpengaruh terhadap nilai aspek rasio sifat fisik yang terkandung dalam bahan bakar, dimana partikel dengan diameter lebih besar akan mengalami penurunan nilai aspek rasio, yang akan berpengaruh terhadap percikan/*ignition ratio* dimana partikel dengan dimensi lebih kecil lebih cepat bereaksi namun zona reaksi pada diameter lebih besar dan lebih tebal memiliki area yang lebih luas.

Partikel yang memiliki diameter lebih besar laju pembakaraan akan lebih kecil dibandingkan dengan partikel dengan diameter lebih besar sehingga *flame*/api yang dihasilkan oleh bahan bakar dengan partikel lebih kecil lebih stabil dibandingkan dengan diameter partikel lebih besar, dalam sifat fisik *char*/arang pada partikel dengan diameter lebih kecil akan terbakar sempurna namun temperatur *release* dari partikel berdiameter besar akan lebih tinggi dibandingkan diameter kecil karena nilai kalor yang terkandung didalam bahan bakar tersebut

4.3.6 Analisa Perbedaan Pembakaran Daun Kering dan Cangkang Kelapa

Proses diversifikasi dari bahan bakar ke daun kering merupakan salah satu keunggulan yang terdapat dalam teknologi fbc, pada penelitian sebelumnya

menggunakan cangkang kelapa sebagai bahan bakar utama dalam penelitian kali ini digunakan daun kering sketika kondisi kerja pasir FBC UI tercapai, dalam hal ini dapat kita lihat perbedaan dari physical properties dari bahan bakar dan chemical properties, sifat fisika berupa bentuk dan ukuran terlihat jelas perbedaan selain itu kandungan yang terdapat pada bahan bakar akan mempengaruhi nilai panas yang dapat dihasilkan oleh bahan bakar, proximate dan ultimate analisis kedua jenis bahan bakar akan menjadi parameter yang membedakan hasil yang ketika reaksi dilakukan, Analisa yang akan disajikan pada kesempatan kali ini adalah perbandingan nilai ultimate dan proximate dari setiap bahan bakar, hal pertama yang menjadi bahan perbandingan adalah kandungan fixed carbon yang terdapat pada bahan bakar daun kering dengan kadar 20,05 %, harusnya dapat menghasilkan energi panas yang lebih besar dibandingkan dengan cangkang kelapa dengan nilai 18,8% karena nilai fixed carbon menggambarkan bahan bakar murni yang dapat bereaksi dengan udara dan api, namun dengan kandungan *non-combustible* yang dikandung oleh daun kering lebih banyak mengakibatkan banyak bahan bakar yang tidak

Volatle matter yang dikandung cangkang 80,8% lebih besar dibandingkan dengan daun 62,31% maka terlihat pada temperatur pada dan setelah *freeboard* pada reaksi cangkang lebih tinggi dibandingkan dengan daun kering karena *volatile matter* terbakar diatas bed sehingga terjadi pemanasan pada satu titik, *moisture content* akan mempengaruhi waktu untuk bahan bakar mengurangi kadar air karena jika kadar kelembapan tinggi dibutuhkan waktu untuk mengeringkan bahan bakar terlebih dahulu, dan setelah kering baru *volatile matter* dari bahan bakar dilepaskan, daun kering dengan kelembapan 11,4% sedangkan cangkang dengan kandungan 7,8% , namun dengan masa jenis dan bulk density yang lebih kecil dibandingkan dengan cangkang , daun kering sangat reaktif dan mudah terbakar waktu untuk mengurangi kadar air, berbeda dengan cangkang yang memiliki *boundary layer* yang besar sehingga *moisture* sangat berpengaruh terhadap reaksi pembakaran dari data terlihat dibutuhkan waktu lebih lama agar cangkang dapat terbakar sedangkan daun dapat langsung bereaksi ketika diberikan bahan bakar.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

1. Penggunaan daun kering setelah kondisi *self sustain* lebih stabil dibandingkan dengan penggunaan cangkang kelapa hal ini dapat digambarkan dari perbandingan beberapa penelitian, namun secara umum terjadi penurunan temperatur ketika bahan bakar diganti walaupun penurunan ini konstan di semua titik pembacaan termokopel, setelah kondisi pembakaran stabil penggunaan daun kering cenderung stabil dan terjadi peningkatan
2. Ukuran *mesh* dan jenis *bed* yang digunakan akan menentukan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi kerja pasir dan temperatur reaksi pembakaran setelah *self sustained combustion* tercapai.
3. Daun kering mudah bereaksi dengan reaktor sehingga diperlukan laju pengumpanan yang cepat dibandingkan dengan penggunaan daun kelapa.
4. Analisa proksimat dan ultimat dapat menentukan energi yang akan dihasilkan oleh suatu bahan bakar dengan *fixed carbon* yang lebih tinggi dibanding cangkang kelapa, namun kelapa memiliki *volatile meter* yang lebih baik sehingga wajar bila terjadi penurunan temperatur karena gas tidak bereaksi di *bed* melainkan di *freeboard*, selain itu nilai *ash* dari daun lebih tinggi sehingga tidak terbakar sempurna dan akhirnya menumpuk pada *bed* hal ini yang menyebabkan terjadi penurunan temperatur secara konstan, sedangkan nilai LHV cangkang kelapa lebih tinggi dibandingkan daun kering hal ini yang mengindikasikan temperatur cangkang selalu diatas daun kering.
5. *Bulk density*, *boundary layer*, dan masa jenis, porositas karakteristik fisik dari bahan bakar akan menentukan nilai panas yang akan diberikan dan waktu yang diperlukan untuk mencapai reaksi pembakaran.

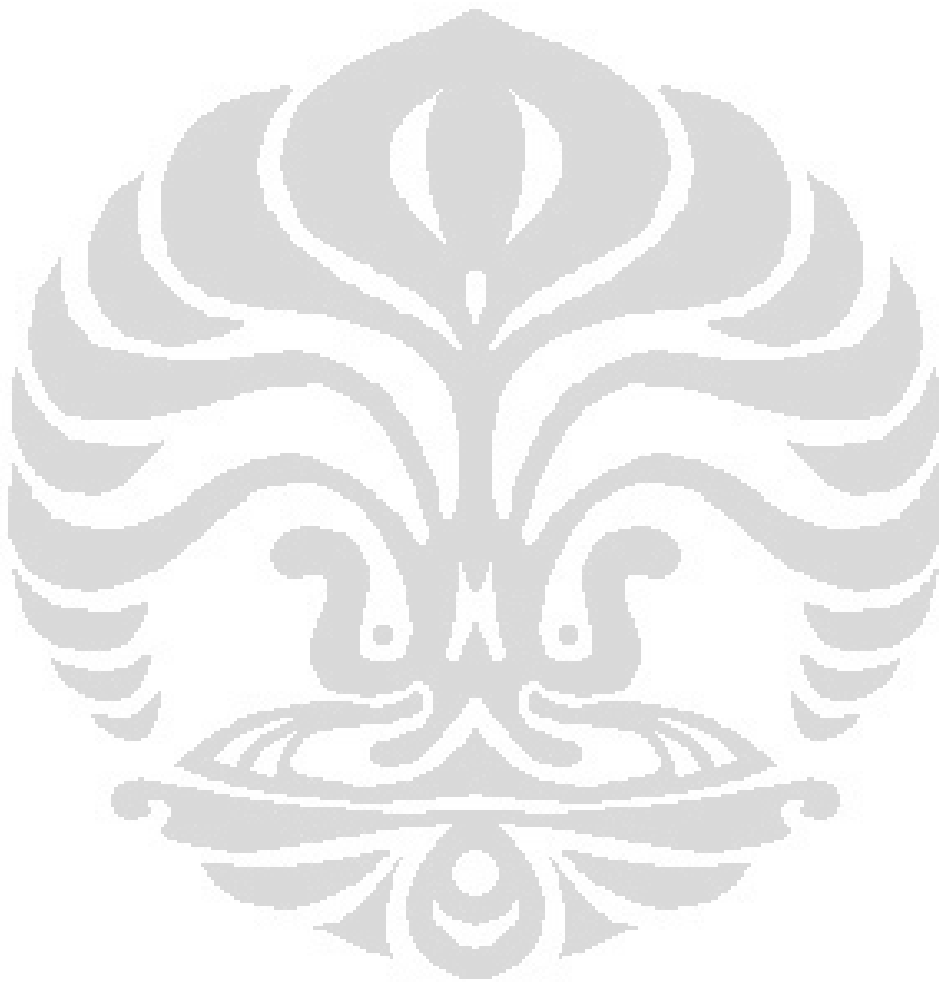
6. Penggunaan IDF (*induced fan*) untuk menghisap gas buang setelah pembakaran diperlukan untuk mengurangi asap debu yang bocor melewati reaktor selain itu penggunaan IDF dapat mengurangi tekanan negatif pada *feeder* sehingga bahan bakar tidak terbakar pada sistem pengumpanan
7. Penggunaan IDF dapat meningkatkan performa pembakaran terbukti dari percobaan yang saya lakukan bahwa ketika penggunaan IDF grafik temperatur pembakaran meningkat ketika pembakaran dilakukan di atas 2 jam pengumpanan.
8. Penggunaan *data acquisition* sangat membantu dalam upaya peningkatan keakuratan pengukuran data dalam percobaan, jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang masih menggunakan mekanisme pencatatan data secara manual menggunakan *data logger*.

5.2 SARAN

Studi mengenai *Fluidized Bed Combustor* merupakan solusi di masa yang akan datang, sehingga diharapkan performansi dari *Fluidize Bed Combuster UI* dapat meningkat untuk keperluan penelitian selanjutnya. Beberapa rekomendasi yang saya ajukan untuk kepentingan penelitian lebih jauh, yakni:

1. *Exhaust gas* dari reaksi pembakaran dapat digunakan untuk *engeneerated* energi panas lainnya seperti pengeringan dan pembuatan *steam*/uap sehingga tercipta energi mandiri di Universitas Indonesia
2. Penggunaan sistem *feeding* yang terintegrasi untuk mempermudah proses percobaan yang selama ini dilakukan manual karena ketika menggunakan sistem *feeder* bahan bakar jatuh di tinggi *bed* sehingga reaksi tidak berjalan dengan baik
3. Udara melalui distributor perlu dianalisa ulang agar fluidisasi terjadi pada semua bagian *bed*, pada saat ini pergerakan partikel hanya terbatas pada beberapa bagian saja tidak secara keseluruhan
4. Reaktor FBC secara umum perlu di-*maintanance* untuk menghilangkan *fouling* dan penyumbatan yang terjadi pada reaktor selain itu alat pendukung seperti termokopel, *blower*, sistem *burner* perlu dikalibrasi ulang agar mendapat hasil yang optimum

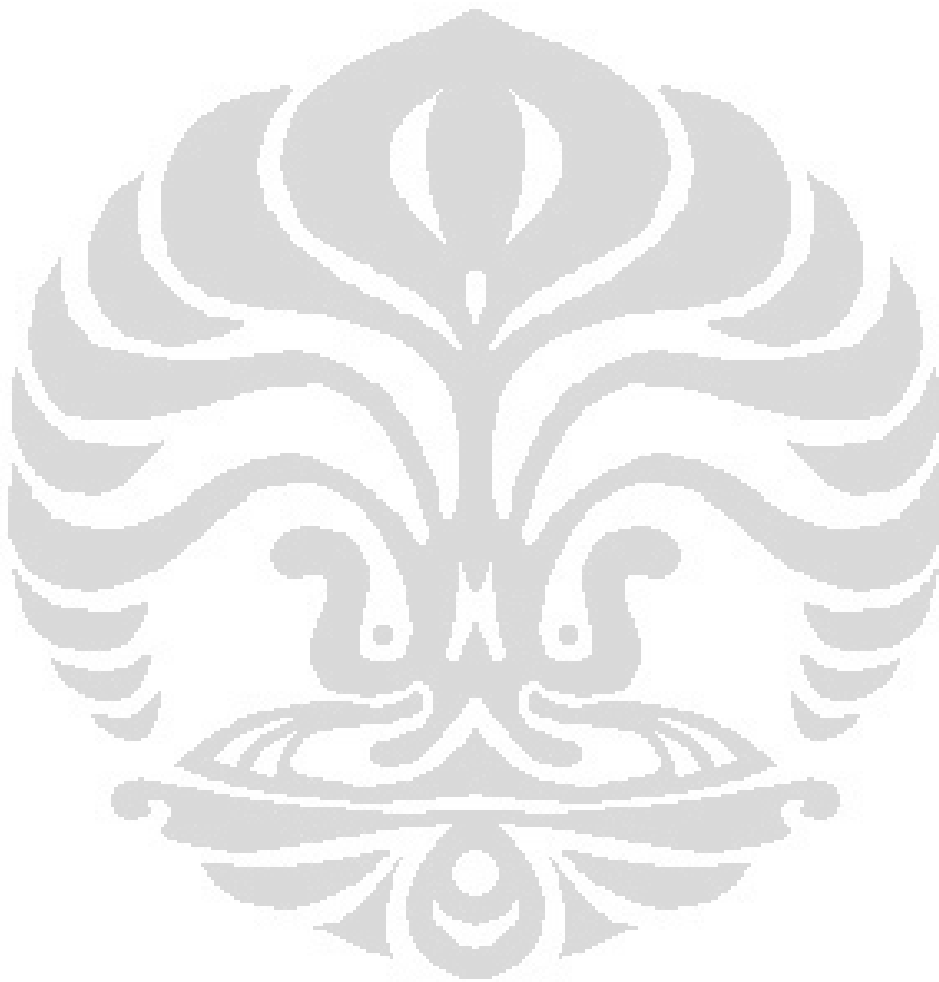
5. Perangkat kelistrikan yang terdapat di laboratorium *Fluidized Bed Combustor* UI masih menggunakan pasokan listrik dari *generator set*. Untuk penelitian yang akan datang, sangat diharapkan adanya pasokan listrik dari PLN, agar jalannya pengujian bisa berlangsung lebih optimal.



DAFTAR PUSTAKA

- Basu, Prabir. *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*. Taylor & Francis Group, 2006.
- Borman, G.L., dan Ragland, K.W.. *Combustion Engineering*. McGraw-Hill Book Co., Singapore, 1998
- Bruce R. Munson, Donald F. Young, *Mekanika Fluida*, terj. Harinaldi, Budiarmo. Jakarta: Erlangga, 2003.
- Bungay, H.R.. *Energy : The Biomass Options*. John Wiley & Sons, New York, 1981
- Energy Information Administration (EIA) - US, International Energi Annual 2006*
- Howard, J. R., *Fluidized Beds – Combustion and Applications*. London: Applied Science Publishers, 1983.
- Kunii, Daizo & Octave Levenspiel, *Fluidization Engineering*, New York: Butterworth-Heinemann, 1991.
- Lampiran II Keppres no.5/2006 tentang *Kebijakan Energi Nasional*
- Moerman, E. dan Prasad, K.K.(1995). *Clean Combustion and Excess Air Factors*, Selected Paper in Combustion Technologies for a Clean Environment, Gordon and Breach Publishers, Basel, pp. 467-477
- Oka, Simeon N. *Fluidized Bed Combustion* Marcel Dekker, Inc., 2004
- Shaha, A.K. *Combustion Engineering and Fuel Technology*. Oxford & IBH Publishing Company
- Surjosatyo, Adi. *Fluidized Bed Incineration of Palm Shell & Oil Sludge Waste*. Tesis. Program Magister Engineering Universiti Teknologi Malaysia, 1998.

LAMPIRAN

**1. Tabel Persebaran Temperatur Pengujian Pembakaran Bahan Bakar
Tempurung dan daun kering Percobaan 1**

No	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆		
1	36,31823776	52,92842	277,84213	125,5352	114,522	106,7189		
2	36,39610557	58,37382	381,73358	164,2888	152,853	143,8241		
3	36,47397338	62,072	412,60463	179,1143	166,2	155,8743	Serbuk + Serabut	0,5kg
4	36,55184119	61,95955	417,78755	187,4567	172,777	160,9212		
5	36,62970901	65,38482	431,09516	257,2839	199,13	183,9151		
6	36,70757682	75,89284	377,33497	283,1913	219,673	200,374		
7	36,78544463	77,65024	331,89321	257,0871	204,501	190,4231	Serbuk + Serabut	0,5kg
8	36,86331244	69,83658	306,19168	256,2816	197,832	184,1101		
9	36,94118026	71,462	250,78513	250,8585	198,777	183,0918		
10	37,01904807	77,50916	196,23926	213,8952	195,68	178,5806		
11	37,09691588	83,24339	169,86684	205,8348	193,241	177,5839		
12	37,1747837	88,44921	201,67755	231,4591	194,416	178,915		
13	37,25265151	96,86518	220,57729	230,6002	190,999	176,6737		
14	37,33051932	114,3461	217,49158	230,2848	188,283	176,3243	Serbuk + Serabut	0,5kg
15	37,40838713	93,99063	227,52105	225,249	186,127	174,2378		
16	37,48625495	75,91542	262,35847	235,2374	183,926	171,7557		
17	37,56412276	69,71839	255,18487	245,7526	184,546	171,4302		
18	37,64199057	64,25458	231,97097	260,9746	195,597	181,002	Serbuk + Serabut	0,5kg
19	37,71985839	58,59918	239,05176	274,5165	211,611	195,4407		
20	37,7977262	62,34295	269,08729	279,1879	212,364	199,8455		
21	37,87559401	96,42337	320,71882	232,5124	181,884	171,9294		
22	37,95346182	124,5167	365,635	215,8989	163,404	155,8617		
23	38,03132964	144,9331	370,85376	202,7602	160,609	154,2217		
24	38,10919745	162,1747	396,18061	206,9452	165,345	158,3133		
25	38,18706526	225,8524	465,79055	217,2049	178,14	169,2085		
26	38,26493307	237,3689	517,94976	202,4567	166,399	158,6643	Serbuk +	0,5kg

							Serabut	
27	38,34280089	230,4754	505,81079	201,8126	160,313	153,7434		
28	38,4206687	185,8593	430,9405	210,7784	162,663	154,5134		
29	38,49853651	165,3186	495,05516	219,7542	172,082	160,62		
30	38,57640433	177,0872	440,41945	269,4016	193,544	177,7475		
31	38,65427214	207,1926	393,28689	300,6211	204,708	188,015		
32	38,73213995	306,8692	405,87821	323,929	217,535	198,7298		
33	38,81000776	473,449	537,49039	321,1971	227,499	208,3771		
34	38,88787558	573,8691	524,73755	300,5773	230,827	214,3885		
35	38,96574339	554,9093	485,5745	299,4757	227,638	210,22	Serbuk + Serabut	0,5kg
36	39,0436112	457,7837	521,95992	320,8299	227,198	208,4089		
37	39,12147901	669,4674	607,26276	463,71	292,733	260,3491		
38	39,19934683	508,3362	571,37205	408,7774	273,608	246,6617		
39	39,27721464	401,0202	589,63355	340,7928	241,798	223,4213		
40	39,35508245	350,9655	553,88434	290,6615	209,242	195,3939	Tempurung Kelapa	0.25 kg
41	39,43295027	294,9789	419,25303	268,8456	203,812	190,5502		
42	39,51081808	283,6886	330,90024	298,2382	214,698	199,882		
43	39,58868589	316,7362	321,34982	305,3614	222,576	205,4534		
44	39,6665537	370,977	358,30468	318,3357	228,71	211,0349		
45	39,74442152	329,6668	389,64487	328,719	247,877	228,7604		
46	39,82228933	283,5346	457,59966	323,4362	243,274	226,5827		
47	39,90015714	247,8755	526,76597	308,5483	223,868	207,7869		
48	39,97802496	215,8651	558,25161	295,8894	217,284	201,5761	Tempurung Kelapa	0.25 kg
49	40,05589277	215,106	424,95026	294,2992	216,563	203,0368		
50	40,13376058	245,5788	327,15655	297,1127	215,943	203,1195		
51	40,21162839	288,9274	396,85429	303,6756	223,77	208,4311		
52	40,28949621	327,4846	491,23255	316,8521	221,528	209,5131		
53	40,36736402	319,7771	514,91771	299,0203	212,554	201,8545		

54	40,44523183	252,8134	462,68168	281,2358	203,013	192,2601	Tempurung Kelapa	0.25 kg
55	40,52309964	226,5622	390,19045	257,6725	196,55	184,674		
56	40,60096746	396,2423	431,54932	286,3026	216,896	200,5525		
57	40,67883527	530,7438	411,77276	295,1938	227,409	212,0097	Tempurung Kelapa	0.25 kg
58	40,75670308	370,2409	359,41626	284,5166	225,039	210,7264		
59	40,8345709	290,7474	378,60203	329,2343	259,456	236,1831		
60	41,11657895	466,9723	599,56955	489,5184	327,153	292,9635		
61	40,617	416,3631	569,05118	391,6682	290,597	265,7421	Tempurung Kelapa	0.25 kg
62	40,46560526	299,5932	494,3815	311,5478	243,847	226,8221		
63	40,82868421	273,1691	404,95458	299,9299	228,858	215,8713		
64	41,01213158	272,8013	463,73632	313,3811	225,499	213,1004		
65	41,10455263	259,5946	499,37274	316,1361	217,743	206,8577	Tempurung Kelapa	0.5 kg
66	40,58710526	236,8285	449,022	304,0355	208,943	200,4221		
67	40,52518421	361,6433	403,54545	387,576	253,349	243,488		
68	41,96531579	546,2319	530,01784	462,3732	293,495	279,7962		
69	40,44810526	663,8613	574,69347	473,8198	302,692	281,4802		
70	40,51213158	627,2457	572,81339	452,8413	293,288	273,6407	Tempurung Kelapa	0.5 kg
71	40,52847368	761,1767	651,81142	632,6932	396,179	345,6912	Tempurung Kelapa	0.5 kg
72	40,68107895	656,4203	666,23489	651,0174	429,566	370,0129		
73	40,80110526	814,4228	814,23279	775,8213	536,77	441,1764		
74	40,90728947	641,786	714,36005	670,8329	495,312	421,9394	Tempurung Kelapa	0.5 kg
75	52,24	610,7735	731,02951	782,0693	543,089	457,6156		
76	41,09092105	649,3835	722,91139	672,0413	499,613	425,2736		
77	41,089	598,8081	643,09897	574,8784	442,45	381,5068	Tempurung Kelapa	0.5 kg

78	41,31802632	520,7715	587,66382	500,5949	394,346	349,8048		
79	41,37234211	482,048	654,77637	554,2223	438,195	383,2045		
80	41,55673684	488,874	649,52495	479,4322	392,906	350,9936	Tempurung Kelapa	0.5 kg
81	41,73497368	544,1195	614,60632	444,4225	372,22	339,8382		
82	41,84334211	604,9909	681,71458	509,3301	427,444	375,5981	Tempurung Kelapa	0.5 kg
83	41,859	563,8779	693,18503	540,8356	430,372	376,3101		
84	41,859	545,4162	606,56992	487,3248	390,897	351,6044		
85	41,859	523,8728	533,40908	475,8742	390,213	353,6326		
86	41,859	486,1683	497,48758	453,4901	386,096	345,0925		
87	41,859	437,7043	465,39608	415,7701	352,472	318,7567		
88	41,859	382,6733	464,33874	440,5302	345,554	316,2193		
89	41,859	467,138	504,92295	520,5771	393,624	349,9449		
90	41,859	524,0402	543,51203	528,8281	399,268	351,29		
91	41,859	487,648	533,59639	518,3137	398,559	345,5943		
92	41,859	465,8063	536,40984	499,4799	386,283	344,0464		
93	41,859	478,4029	560,39647	520,4809	403,317	355,0278		
94	63,93297368	536,3855	600,97105	576,2686	424,004	366,5998		
95	42,42055263	531,0051	606,43095	572,4139	424,863	378,3626		
96	62,2097027	536,8041	587,07089	554,8128	414,309	368,4017		
97	43,07563158	530,827	556,76013	567,9978	424,541	381,5408		
98	43,20178947	554,7449	556,66255	588,5344	436,022	378,8924		
99	43,056	608,8302	584,66576	561,9835	428,376	375,6696		
100	42,88763158	545,2452	594,52245	566,3568	455,534	410,0672		
101	42,85084211	583,2144	632,95613	604,075	486,089	418,8033		
102	43,07007895	663,5657	666,67124	594,3506	444,498	390,8461		
103	43,10623684	529,6424	579,92518	553,0188	407,772	367,7314		
104	42,84331579	545,5263	602,06011	571,2404	437,922	398,5049		
105	42,82815789	556,7023	598,47366	546,7287	417,391	368,3544		
106	42,99	598,6198	665,36776	617,2802	462,184	402,5105		

107	46,98342105	589,4254	629,35987	571,8615	436,561	379,6896		
108	47,00360526	583,1728	647,25539	555,218	409,653	358,4226		
109	47,03507895	512,7591	609,40858	509,9643	376,661	339,2465		
110	43,44026316	483,9212	533,83021	424,6334	331,686	305,4918		
111	43,31297368	626,69	615,13832	533,6857	405,199	367,128		
112	43,38681579	633,1495	625,97021	581,7601	444,608	388,4826		
113	43,474	680,7191	690,52405	628,7156	468,026	400,195		
114	43,55718421	677,7568	685,18063	574,9445	427,851	372,0879		
115	43,50984211	585,5251	614,94442	544,3821	406,721	357,1319		
116	43,36873684	560,9982	594,44853	514,1903	401,841	352,0103		
117	43,29742105	605,0415	652,50084	596,1708	450,062	387,4468		
118	43,19324324	600,2854	641,93884	563,8247	441,986	380,0913		
119	43,15136842	554,5057	611,15374	521,2068	400,143	348,3705		
120	43,01913158	622,3774	659,04642	590,3223	446,464	379,3198		
121	42,86597368	547,7549	641,23284	564,7666	438,652	369,3084		
122	42,40084211	600,4784	665,74582	579,8342	447,46	379,092		
123	42,36328947	616,9434	680,21329	579,2514	436,697	379,3057		
124	42,25131579	566,6154	633,31092	550,2905	426,722	380,4429		
125	41,94565789	489,0939	599,40545	544,0492	427,008	379,9383		
126	41,84281579	451,8947	596,36576	534,9678	409,046	353,9992		
127	41,64557895	385,8492	595,25734	553,6148	415,669	348,2666		
128	41,60186842	370,2745	578,90037	541,054	409,975	344,308		
129	41,51852632	384,6875	607,20303	563,2633	419,777	347,1609		
130	41,52913158	396,6255	672,66111	572,8553	429,636	359,0261		
131	41,35197368	440,8778	581,54655	475,197	387,904	339,3627		
132	41,16286842	586,0338	574,50663	487,1567	380,964	338,2156		
133	40,74781579	679,9859	738,07903	496,5748	389,255	344,1609		
134	40,80236842	647,907	782,21695	493,4527	379,53	338,1717		
135	40,71110526	642,198	743,79968	487,8163	375,929	333,1546		
136	40,58423684	624,6303	735,29326	525,4012	390,848	343,3216		
137	40,48157895	545,6798	676,94895	495,3649	385,853	345,9024		

138	40,4215	592,7997	712,854	556,8384	404,404	361,2481		
139	58,01978947	500,4034	604,13929	451,5632	377,055	344,3554		
140	40,32865789	594,964	667,50089	508,4073	415,887	374,352		
141	40,32768421	571,7961	686,41926	499,7341	407,029	361,06		
142	40,38426316	508,0218	762,74255	383,9127	350,841	320,1224		
143	40,54328947	323,5461	690,32892	422,2649	349,081	320,0768		
144	43,38084211	214,071	620,12013	497,2231	360,014	327,6758		
145	41,49247368	210,0766	494,32995	370,0099	305,34	284,9273		
146	39,03531579	210,1936	373,61882	291,9134	258,577	247,7916		
147	41,04539474	199,5637	323,81476	255,6755	242,573	231,5324		
148	48,55418421	185,4566	285,95539	234,9031	232,869	222,1918		
149	45,58031579	156,6308	240,86334	207,7694	215,24	208,9417		
150	42,34923684	128,0795	197,50226	187,2219	203,727	199,1431		
151	41,06147368	117,572	177,03147	176,7485	198,957	195,0612		
152	41,21444737	110,7284	168,32621	160,9182	194,402	188,5861		
153	41,244	105,6509	163,12447	148,5317	188,866	184,7471		
154	41,29560526	103,1688	157,62197	139,9582	184,086	183,52		
155	41,27021053	100,9847	151,81245	139,0749	180,738	181,1595		
156	41,41526316	98,68937	145,90484	135,8379	180,591	179,858		
157	41,41678947	95,81561	139,8785	136,2214	177,154	177,5879		
158	41,62005263	96,17976	135,22134	136,9669	173,436	175,237		
159	41,72363158	98,81837	131,32647	136,5994	171,171	172,7646		
160	41,82260526	94,65889	127,45405	133,5571	168,953	170,5278		
161	41,99602632	90,66961	124,18263	132,9341	163,671	168,6487		
162	42,12589474	90,62303	124,29784	131,3891	160,779	166,0082		
163	42,24057895	90,79208	125,44674	130,2375	158,407	164,188		
164	42,17873684	92,24647	127,10729	131,1423	155,7	162,3318		
165	42,03539474	89,61226	127,10292	128,3013	153,023	160,9203		
166	42,19981579	88,19387	124,93263	129,0684	149,81	158,7414		
167	42,33855263	86,26192	116,83568	131,6297	147,005	155,9978		
168	42,50086842	83,38466	110,86384	130,2272	146,429	155,0984		

169	42,55373684	81,37437	107,46787	129,2278	145,858	153,8564		
170	42,58231579	81,42579	104,29645	127,4686	144,227	151,8403		
171	42,71457895	81,35653	100,30753	120,9618	143,704	149,8886		
172	42,78392105	81,31047	98,973658	119,2226	142,166	149,503		
173	45,94392105	81,95126	102,31295	118,8052	141,299	148,358		
174	43,0702	82,51	104,2952	117,7968	140,93	147,9834		

2. Tabel Persebaran Temperatur Pengujian Pembakaran Bahan Bakar Tempurung dan daun kering Percobaan 2

No	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	
1	34,69458974	50,59131	72,64369	121,7833	78,42669	73,02779	
2	34,85261538	77,19044	137,6305	189,7196	140,2891	125,8594	
3	35,11941026	93,40913	180,1459	204,9895	158,5913	141,3366	
4	35,37915385	102,205	201,5726	214,1108	166,24	148,5363	
5	35,66346154	108,0772	208,5156	223,3112	168,2374	153,7371	
6	35,85474359	109,7502	206,165	220,4384	171,3056	156,1451	
7	35,97023077	116,7028	215,2835	220,5271	174,2472	158,9061	Serbuk + Serabut
8	36,19976923	283,618	306,1988	272,3693	200,188	179,8776	
9	36,40976923	436,3549	406,9615	255,8896	202,3471	182,8952	
10	36,49317949	407,9313	420,3039	204,0588	185,7557	169,5324	Serbuk + Serabut
11	36,54087179	286,358	364,518	203,0391	181,5552	164,7154	
12	36,66623077	367,8417	413,7505	289,8608	217,1502	194,6964	
13	36,71035897	525,7217	507,7397	299,1316	229,096	204,4486	
14	36,92830769	520,0484	496,4093	255,4078	208,7191	189,0515	Serbuk + Serabut
15	37,06528205	470,191	605,7191	341,38	246,9283	217,8093	
16	37,17464103	718,2639	685,9171	370,4913	266,4387	235,3853	

17	37,31766667	767,4586	635,8545	342,149	247,2375	223,7174	Serbuk + Serabut
18	37,38858974	699,9267	562,6929	321,9004	243,6256	218,4555	
19	36,54087179	286,358	364,518	203,0391	181,5552	164,7154	
20	36,66623077	367,8417	413,7505	289,8608	217,1502	194,6964	
21	36,71035897	525,7217	507,7397	299,1316	229,096	204,4486	Tempurung Kelapa
22	36,92830769	520,0484	496,4093	255,4078	208,7191	189,0515	
23	37,06528205	470,191	605,7191	341,38	246,9283	217,8093	
24	37,17464103	718,2639	685,9171	370,4913	266,4387	235,3853	
25	37,31766667	767,4586	635,8545	342,149	247,2375	223,7174	
26	37,38858974	699,9267	562,6929	321,9004	243,6256	218,4555	Tempurung Kelapa
27	37,40661538	682,0219	646,1098	281,9068	239,1861	212,5794	
28	37,43910256	568,1092	713,5657	247,8043	216,4685	194,2025	
29	37,41133333	487,753	736,2077	215,8679	201,1179	184,5152	
30	37,42751282	523,2315	663,3055	258,6997	203,1326	184,0057	Tempurung Kelapa
31	37,3564359	622,3685	689,8258	285,0817	219,8514	200,4054	
32	37,32830769	624,7671	729,0852	295,6023	227,6922	205,7952	
33	37,30330769	573,2201	706,4769	277,4895	218,3568	198,2749	Tempurung Kelapa
34	37,26289744	451,3085	679,9006	262,4575	221,6216	198,5157	
35	37,16938462	401,4259	636,3861	226,7013	209,3869	192,0376	
36	37,15889744	511,304	613,8531	217,7918	194,3513	177,6574	
37	37,11435897	735,1095	615,8511	223,8656	201,0822	180,2424	Tempurung Kelapa
38	37,05251282	669,9337	602,2405	224,069	206,9954	192,6677	
39	37,06774359	729,6016	627,2472	300,1131	255,1961	230,0214	
40	37,06058974	722,6218	671,7304	321,2663	273,2564	245,3336	
41	37,01825641	723,2431	673,553	311,3552	256,7657	232,8792	Tempurung Kelapa
42	36,94230769	647,1836	639,1372	310,5049	247,1061	223,8471	

43	36,85325641	683,0589	707,2583	376,2094	293,9712	258,8704	
44	36,86015385	630,8197	745,7846	320,7768	270,4501	245,219	
45	36,81074359	573,2822	745,7428	292,0057	254,3035	232,2314	Tempurung Kelapa
46	36,80620513	559,2165	718,343	283,3704	239,2532	216,7514	
47	36,84523077	696,5591	758,7701	305,8279	252,211	226,0415	
48	36,82917949	733,5569	749,8928	293,6644	257,3164	229,5322	
49	36,78717949	653,3813	743,9377	297,3412	253,0764	224,6997	Tempurung Kelapa
50	36,82094872	640,9542	718,7655	289,7967	236,8762	220,2761	
51	36,74746154	687,4493	735,596	315,1997	265,745	240,6135	Tempurung Kelapa
52	36,75030769	639,0152	747,607	322,6134	271,4164	245,2806	
53	36,89805128	556,5975	688,9581	308,8668	247,5197	226,9918	Tempurung Kelapa
54	37,09935897	482,1155	743,0074	341,5961	265,5065	241,0162	
55	37,23441026	506,3932	777,9987	401,4375	305,2702	270,3902	Tempurung Kelapa
56	37,34287179	646,6274	778,5333	453,6567	338,9009	300,9293	
57	37,42784615	614,7839	743,7813	447,4838	323,8301	286,5653	Tempurung Kelapa
58	37,54105128	790,3649	782,9457	690,0033	418,9198	360,0471	
59	37,76176923	773,9578	785,1069	556,7879	389,3896	348,8487	
60	37,90361538	809,6083	835,8606	749,7303	463,0916	401,7798	Tempurung Kelapa
61	37,90782051	806,2916	804,7245	517,1479	408,5625	362,9447	
62	37,97225641	811,4546	784,2576	544,5827	403,0653	353,3705	Tempurung Kelapa
63	37,98817949	813,9601	816,9834	492,5419	396,4397	352,8705	
64	38,12525641	703,2364	780,9731	407,0656	341,3007	308,4318	Tempurung Kelapa
65	38,20310256	789,7657	775,0122	618,861	432,6365	367,7459	

66	38,27925641	753,8882	796,2892	567,805	413,7389	358,0708	Tempurung Kelapa
67	38,25430769	799,5856	816,7775	706,1182	522,5808	428,1672	
68	38,38733333	697,616	809,2477	480,8336	402,8494	362,9871	
69	38,43571795	782,8267	783,6987	547,9766	419,6883	374,7571	Tempurung Kelapa
70	38,50382051	710,5275	819,7787	455,9763	379,8663	340,8004	
71	35,6245641	799,2533	829,4744	642,4878	452,3186	384,5342	
72	39,13830769	754,2507	823,0959	587,9857	428,7468	370,5202	
73	38,87394872	819,8311	825,8345	648,3696	469,2391	400,0439	Tempurung Kelapa
74	39,09020513	724,2804	826,6992	529,1341	412,1417	360,5677	
75	39,19010256	835,398	838,2156	722,7299	505,7767	420,0028	
76	39,19297436	812,9168	824,5925	592,5987	453,8605	392,9598	Tempurung Kelapa
77	39,42438462	639,8092	765,297	484,4602	373,7552	338,868	
78	39,76471795	441,9629	802,5693	429,5203	368,9746	335,6195	
79	39,79864103	371,426	839,7415	422,0671	381,8126	345,6213	
80	39,70679487	363,0762	723,4324	417,3386	342,9964	313,0765	Tempurung Kelapa
81	39,18907692	363,1319	710,9917	361,8523	308,2151	287,6188	
82	39,03792308	538,7077	688,8698	318,8695	266,3796	250,8303	
83	38,60976923	665,406	714,3034	309,6948	249,3187	231,6191	Tempurung Kelapa
84	38,40402564	628,5776	692,8331	321,8625	253,4577	239,0023	
85	37,84915385	485,6115	765,5489	600,1692	387,9755	351,9455	
86	37,86858974	662,671	781,985	623,7477	425,8912	396,3507	Tempurung Kelapa
87	37,88533333	689,0862	832,7598	533,8505	402,9151	373,7764	
88	37,21082051	604,9321	824,7558	496,1313	388,7986	361,9143	
89	37,12435897	668,5319	811,7229	679,2391	516,5276	454,0157	Tempurung Kelapa

90	37,15012821	552,7644	751,6894	574,5042	465,8062	420,1177	
91	39,18907692	363,1319	710,9917	361,8523	308,2151	287,6188	
92	39,03792308	538,7077	688,8698	318,8695	266,3796	250,8303	Tempurung Kelapa
93	38,60976923	665,406	714,3034	309,6948	249,3187	231,6191	
94	38,40402564	628,5776	692,8331	321,8625	253,4577	239,0023	
95	37,84915385	485,6115	765,5489	600,1692	387,9755	351,9455	
96	37,86858974	662,671	781,985	623,7477	425,8912	396,3507	
97	37,88533333	689,0862	832,7598	533,8505	402,9151	373,7764	Tempurung Kelapa
98	37,21082051	604,9321	824,7558	496,1313	388,7986	361,9143	
99	37,12435897	668,5319	811,7229	679,2391	516,5276	454,0157	
100	37,15012821	552,7644	751,6894	574,5042	465,8062	420,1177	
101	36,69479487	574,2714	706,5847	544,433	453,7123	410,5493	
102	36,32964103	545,903	718,3184	593,2073	468,2008	416,7027	
103	36,00802564	597,4576	732,0192	685,0069	571,5399	498,55	
104	35,99117949	586,4704	713,1552	565,3071	464,7812	427,2832	
105	35,76448718	589,8903	792,0471	743,0729	595,7873	518,8678	
106	36,07976923	657,7643	787,9802	613,6639	528,4163	476,1613	
107	36,31066667	663,8224	749,0802	629,8795	504,929	454,2585	
108	36,38871795	685,3131	694,9548	606,2609	488,3494	435,2419	
109	36,31764103	666,3598	676,282	582,4329	487,4368	434,3652	
110	36,30884615	644,9644	672,7158	611,4962	511,8492	448,3636	
111	36,37102564	678,0324	698,0652	600,7395	492,4931	439,3535	
112	36,01266667	593,1324	678,8243	567,7062	466,3751	427,425	
113	35,19087179	617,9598	709,0384	603,5045	484,1451	444,7323	
114	34,80884615	639,0093	755,1251	567,0045	460,3189	422,4679	
115	35,05371795	677,6206	737,5706	600,2688	463,847	416,5884	
116	35,2434359	730,1671	759,4078	626,4378	480,3642	432,8953	
117	35,35284615	741,5499	740,9195	640,7923	491,8814	435,4557	
118	35,36271795	721,033	722,1691	663,0523	507,4751	442,5096	

119	35,44320513	714,3952	741,8747	675,2578	521,7149	457,5515		
120	35,572	657,6337	699,2356	673,0694	521,0165	462,765		
121	35,40805128	648,0845	675,9642	661,2156	524,9023	467,4249		
122	35,31787179	694,8724	710,6843	612,0479	492,5774	435,838		
123	35,18825641	813,2659	729,7985	505,9596	420,5979	385,856		
124	34,83438462	787,0761	681,3495	478,4008	389,1878	357,8627		
125	34,93051282	608,3981	612,4721	529,3525	416,1189	378,3892		
126	33,77176923	582,8139	597,3894	582,0518	452,6008	407,8319		
127	35,28415385	594,7057	609,5374	591,2098	469,5324	421,827		
128	35,32166667	600,2009	614,9504	595,7244	473,8622	431,9334		
129	35,53130769	579,7508	608,9976	580,5603	460,7323	419,4215		
130	35,66938462	605,7858	654,6166	615,6598	478,3792	432,0473		
131	35,76728205	624,0312	643,9853	646,0235	510,6856	455,8018		
132	35,83807692	626,3816	644,6311	679,2621	532,5899	475,9142		
133	35,94346154	643,7046	662,9155	628,7484	511,4259	457,8242		
134	35,92966667	632,0771	650,9635	669,2605	533,9282	468,5947		
135	33,51961538	634,7629	663,7459	629,7029	510,6509	453,4816		
136	35,86602564	599,1828	613,3832	616,3006	502,1918	443,6092		
137	35,89728205	550,3424	582,6425	567,9108	483,7042	434,1634		
138	35,88246154	536,3551	612,1565	607,904	495,9523	442,9703		
139	35,89715385	550,1188	593,797	608,6936	496,6737	440,6983		
140	36,19923077	522,7069	578,8809	559,5125	469,3877	426,0009		
141	35,894	491,9119	560,4377	481,066	428,0228	390,9598		
142	35,8004359	489,6151	618,2096	444,6542	402,1699	367,8434		
143	35,77735897	497,9116	708,1863	419,3232	372,5983	344,7211		
144	35,73551282	623,0228	846,4103	448,5259	411,3673	370,5768		
145	35,64794872	696,1991	918,5461	526,6963	429,5807	382,4675		
146	35,61330769	714,8873	963,6885	553,8259	436,7909	402,0336		
147	35,59792308	857,0822	1009,994	581,1751	460,9315	420,0725		
148	35,55107692	885,0158	881,7644	566,2366	461,1878	418,9182		
149	39,12641026	770,0591	896,0097	529,3759	439,6898	397,8615		

150	34,84187179	801,2608	928,5364	601,0137	461,6151	406,796	
151	35,59369231	859,5501	894,634	616,2021	483,8125	428,0187	
152	35,54253846	728,952	899,6091	444,9261	405,0517	370,3671	
153	35,54610256	635,8073	934,989	478,3078	400,2316	368,9139	
154	35,56823077	632,2996	891,6333	530,7505	427,3925	391,2721	
155	35,61217949	544,6263	939,1876	580,6188	445,6045	406,3092	
156	35,72961538	653,8482	857,9844	554,4447	426,8887	385,3095	
157	37,55994872	805,7936	871,1454	582,3066	453,5522	406,8954	
158	35,79461538	666,9473	975,626	369,3149	356,6083	329,3143	
159	35,81089744	625,0239	1009,447	437,3333	385,1362	352,2092	
160	35,74012821	574,9819	889,3339	494,7929	412,7853	371,6119	
161	35,75435897	529,1954	781,6641	420,6789	391,4505	364,2043	
162	35,80051282	486,1262	828,5371	436,9199	376,892	345,4252	
163	38,06697436	494,0061	790,8858	432,9961	388,4222	359,0216	
164	40,47174359	485,7798	732,6001	435,5804	387,7515	360,4258	
165	41,15120513	487,6019	758,9992	361,4198	340,7801	321,8832	
166	37,15802564	498,2598	800,6004	421,1889	377,6688	352,2452	
167	38,88512821	591,1581	591,5977	435,1422	381,0503	359,3889	
168	39,54866667	628,9405	581,6529	427,5354	372,236	349,5039	
169	36,05841026	491,7467	586,8679	408,3396	364,698	356,3529	
170	37,07769231	490,2016	579,7544	347,0805	328,2682	318,5323	
171	39,24051282	607,403	555,0387	397,9177	358,4992	338,2921	
172	34,53230769	424,9093	524,8724	316,2892	298,763	285,6813	
173	35,23692308	343,5185	496,8787	270,6613	264,9514	256,0906	
174	34,90407692	285,3975	464,1548	238,4761	249,3466	240,4287	
175	34,70989744	251,6141	429,4253	220,3782	236,0102	231,6108	
176	34,815	227,9438	397,4619	211,5198	226,3726	222,2934	
177	34,93817949	210,0274	369,7961	202,2394	219,5084	216,434	
178	34,77915385	197,1891	349,7272	196,4661	217,2071	215,406	
179	34,83697436	185,0109	328,4877	190,3044	213,8804	213,6126	
180	34,72366667	174,218	311,449	186,0904	207,3401	207,4592	

181	34,60941026	164,6402	295,8911	185,8277	203,0026	203,8061		
182	35,06220513	155,2366	281,3203	179,9542	200,6001	202,0721		
183	37,32592105	144,9909	266,3751	171,4774	197,9134	198,9581		
184	51,03439474	138,6512	251,1111	166,3876	194,5396	196,1707		
185	44,74482051	135,9182	238,3168	164,9716	191,6661	195,0969		
186	50,15474359	132,5683	227,267	161,6644	188,9829	193,4832		
187	44,29397436	128,3366	215,6489	157,3482	186,2681	191,343		
188	44,37707692	126,2521	206,3332	155,2604	183,4517	188,991		
189	44,47087179	123,7708	197,0385	153,5521	180,1084	186,5945		
190	44,45946154	120,9488	188,8875	150,3621	177,301	183,8152		
191	49,383	120,8701	182,1132	149,3309	175,5401	182,7439		
192	44,58338462	121,0635	174,8575	146,2364	173,4228	180,0219		
193	44,70271795	120,3426	168,3622	144,0774	171,4392	177,4124		
194	44,88615385	117,6179	162,2163	143,9077	170,2476	175,4749		
195	44,92471795	114,6658	155,6631	143,2738	168,9995	174,4547		
196	44,923	112,2012	150,2891	144,2249	166,9951	172,4682		
197	37,15092308	110,9572	144,6583	141,5963	164,8837	170,667		
198	46,70928947	110,9777	139,5901	142,4578	162,4849	168,4988		
199	44,09948718	110,7165	134,7517	142,3356	158,6884	167,6488		
200	43,98787179	110,8468	131,4726	138,3002	156,8001	167,2081		
201	43,91533333	111,1712	129,6822	136,278	156,3035	166,7002		

**3. Tabel Persebaran Temperatur Pengujian Pembakaran Bahan Bakar
Tempurung dan daun kering Percobaan 4**

No	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆		
1	36,23092	42,54837	117,5693	99,27067	72,12797	67,24342		
2	36,25503	61,26392	255,493	166,2948	132,93	122,9755		
3	36,25015	72,60418	322,543	194,8964	154,7075	146,1698		
4	36,22045	79,24202	355,6204	198,7897	164,04	154,441		
5	36,3072	83,66418	361,0056	200,4258	167,7982	157,4406		

6	36,39448	87,58162	364,3183	201,7769	170,6553	160,5306		
7	36,50442	90,16367	370,6697	209,7876	171,7718	163,8928		
8	36,581	93,17308	336,1468	216,6538	174,8858	166,0324		
9	36,67957	94,41817	356,8551	217,2867	177,6079	168,6067		
10	36,68838	94,25667	383,4527	223,0343	182,3891	169,4619	Serbuk + Serabut	0,25k
11	36,62448	91,05163	375,0992	222,9415	184,5077	170,4167		
12	36,61845	87,93417	402,7025	226,2262	186,3481	173,5035		
13	36,59748	89,77443	435,8236	223,8597	185,1474	175,2242	Serbuk + Serabut	0,25k
14	36,56975	85,3381	432,5674	230,467	184,8559	175,8199		
15	36,48195	71,9354	413,7446	234,3614	188,7076	178,5664	Serbuk + Serabut	0,25k
16	36,49665	64,58945	358,7868	247,3596	189,0938	178,2905	Serbuk + Serabut	0,25k
17	36,45915	61,69993	285,7277	240,5607	188,5411	176,7179		
18	36,4037	58,67658	236,1124	243,9933	190,2962	178,5836		
19	36,48005	53,00708	274,4457	241,611	191,1168	179,0597	Serbuk + Serabut	0,25k
20	36,44833	49,88347	293,6654	244,9483	191,7405	178,5756	Serbuk + Serabut	0,25k
21	36,51555	48,72277	292,1056	255,7983	198,5252	186,497		
22	36,52992	48,04775	325,9951	256,3385	215,6242	202,7437		
23	36,52903	73,30958	354,6307	263,8333	229,8996	213,3867		
24	36,52587	133,7709	388,8567	246,2854	208,1545	192,8635	Serbuk + Serabut	0,25k
25	36,5772	125,1378	432,7997	259,9095	205,7438	190,3076	Serbuk + Serabut	0,25k
26	36,65543	97,59207	397,5009	246,7712	207,0841	191,7088		
27	36,56747	75,89057	468,3487	284,448	242,5593	217,0771	Serbuk + Serabut	0,25k
28	36,59222	66,41602	573,6187	336,2439	273,9404	245,5786	Tempurung	0.25 k

							Kelapa	
29	36,6644	58,58613	616,5102	416,9012	291,5053	265,4909		
30	36,68192	59,83308	688,9282	385,8569	313,1977	283,3178	Tempurung Kelapa	0.25 k
31	36,45432	61,05735	668,3511	409,9271	321,3544	290,656	Tempurung Kelapa	0.25 k
32	36,23715	280,6052	714,861	415,7808	352,8055	301,356	Tempurung Kelapa	0.25 k
33	36,12533	689,7792	753,1775	453,0341	350,7189	320,2029	Tempurung Kelapa	0.25 k
34	36,01253	857,0436	775,6996	580,9687	423,0702	370,6688		
35	35,99313	926,9695	806,1327	638,9766	467,5554	405,1043		
36	35,63277	496,2426	661,5538	465,8611	394,3064	352,1407		
37	35,71892	332,9769	553,0981	364,8887	323,0427	301,9579	Tempurung Kelapa	0.25 k
38	35,84762	284,6412	512,5849	321,0948	275,1861	260,719	Tempurung Kelapa	0.25 k
39	35,94092	187,1133	376,8589	308,457	250,6677	236,2592		
40	36,03685	165,4503	305,8116	338,5762	262,3667	242,0535	Tempurung Kelapa	0.5 kg
41	36,1449	380,2101	365,8102	434,2592	341,9151	307,3268		
42	36,78143	708,6595	646,9714	627,7573	509,4945	425,662		
43	37,16908	469,693	688,935	694,3061	524,7686	450,0729	Tempurung Kelapa	0.5 kg
44	36,30702	468,5723	680,0072	671,7229	530,9404	463,3091		
45	36,07277	613,4958	731,0381	729,3308	575,0937	492,0045	Tempurung Kelapa	0.5 kg
46	36,10123	646,78	709,3119	733,2342	582,0599	501,4664		
47	36,23525	774,6248	736,0167	685,3078	531,8395	471,7505		
48	36,34652	846,0368	740,1147	660,7942	498,4093	461,3566	Tempurung Kelapa	0.5 kg
49	36,42457	838,4217	738,9209	686,1722	527,9234	478,6624		

50	36,4344	906,4133	795,8734	725,848	563,3908	499,4868		
51	36,42288	898,3364	764,7475	644,4233	496,1583	462,7026	Tempurung Kelapa	0.5 kg
52	36,53077	711,7965	694,9108	624,6333	475,0017	440,3829		
53	36,36393	692,0378	736,4715	693,8348	538,3292	483,2873	Tempurung Kelapa	0.5 kg
54	36,9189	611,5027	679,9464	644,6769	506,4335	471,0061	Tempurung Kelapa	0.5 kg
55	36,35948	711,3004	733,3042	664,3694	518,2353	480,9283		
56	36,3576	683,7787	719,2426	682,9875	551,7718	525,5384	Tempurung Kelapa	0.5 kg
57	36,42412	620,9868	699,6214	680,1719	556,1664	515,5176		
58	36,45065	821,1871	759,4476	721,0117	568,2525	537,2291	Tempurung Kelapa	0.5 kg
59	36,30718	650,2709	657,2242	622,7964	495,269	467,658		
60	36,31752	704,9065	718,9408	673,1979	541,3284	519,8141	Tempurung Kelapa	0.5 kg
61	36,28737	661,4062	657,5601	586,6591	463,8608	449,5065		
62	36,28338	572,2079	669,9868	666,0229	506,009	512,4713	Tempurung Kelapa	0.5 kg
63	36,28452	600,518	690,4034	623,396	504,019	480,0164	Tempurung Kelapa	0.5 kg
64	36,34845	722,447	761,1768	714,3411	578,042	524,666		
65	36,39378	826,8092	803,581	745,3949	574,425	539,1199	Tempurung Kelapa	0.5 kg
66	36,39043	817,8684	781,6933	778,8724	582,8138	547,9936	Tempurung Kelapa	0.5 kg
67	36,3053	901,8692	828,7657	745,0718	578,4233	529,8163	Tempurung Kelapa	0.5 kg
68	36,19965	946,6979	828,1646	755,4057	594,4708	539,0764	Tempurung Kelapa	0.5 kg
69	36,01147	936,7235	787,0107	704,0068	591,4653	528,353	Tempurung	0.5 kg

							Kelapa	
70	36,07915	743,9479	678,9892	583,0347	501,216	468,5226		
71	36,06017	686,1345	656,0885	590,5235	498,4208	475,5275		
72	36,05323	911,7988	796,7909	654,1175	527,5072	502,2394		
73	36,03653	773,9556	681,6605	603,4612	498,2209	464,5777		
74	36,0719	561,6321	578,561	530,9095	438,0097	419,2716		
75	36,07822	517,1631	549,453	490,9442	404,7651	392,5325		
76	36,02012	621,5068	561,3972	496,9874	407,174	394,9165		
77	36,69507	521,5878	539,0415	492,7855	418,8957	407,0592		
78	35,96687	507,2326	540,6715	480,6501	409,4427	400,3561		
79	35,846	477,6288	529,2345	490,9359	399,698	384,8336		
80	35,91007	483,3438	531,4541	477,6031	392,368	381,4046		
81	35,81217	473,5686	549,5872	492,269	392,0871	384,0625		
82	35,85742	444,9203	506,2358	453,4787	370,9751	360,0464		
83	35,89773	323,9652	441,6699	400,531	347,0692	339,9655		
84	35,86373	366,6209	502,8222	459,7985	386,7001	369,6953		
85	36,12897	368,2501	542,9329	427,479	357,0299	347,7719		
86	35,91068	369,8792	496,2657	444,091	358,6838	348,8771		
87	35,94398	371,5084	457,8827	421,7356	349,1179	339,0787		
88	36,01058	373,1376	461,6383	414,883	352,4235	344,4289		
89	36,11757	405,0909	493,3027	440,1275	345,4372	333,6973		
90	36,1193	377,3371	488,187	461,8616	360,8553	348,6293		
91	36,13818	416,2845	476,6497	421,1181	352,354	344,52		
92	36,22577	433,8798	525,9029	468,7355	375,1698	365,4837		
93	36,33847	440,3088	571,5683	483,436	390,2379	366,9048		
94	36,38365	427,5631	502,0318	413,8021	342,6194	329,2268		
95	35,20945	634,4769	496,2656	414,7549	367,098	329,7386		
96	36,38615	502,3763	529,2879	487,1798	378,2509	363,2838		
97	36,32198	517,3101	530,3366	484,9237	382,8892	360,1222		
98	36,04365	552,339	557,8301	489,1592	386,1749	361,8175		
99	36,0176	524,1176	509,5271	435,5987	364,424	345,896		

100	36,0271	407,5163	422,4744	364,8585	319,7454	312,3556		
101	36,11305	355,6826	502,0329	431,5613	352,6009	342,3303		
102	36,17988	409,1659	486,0415	394,6725	336,3169	326,8052		
103	36,15532	391,9391	499,9372	450,0543	355,1383	338,7536		
104	36,16148	418,8153	557,6528	496,1649	390,4694	365,2725		
105	36,12037	420,4016	566,2434	485,819	395,3303	372,9776		
106	36,14512	425,8307	574,4595	493,3722	403,4065	377,172		
107	36,09717	404,7199	506,4019	446,9907	340,762	326,4168		
108	36,22175	328,1779	638,4907	540,9673	372,8405	361,2049		
109	36,30503	368,0991	619,397	520,8762	372,7601	359,0377		
110	36,06972	383,2643	616,0969	509,9402	382,8815	354,8644		
111	35,85078	351,6046	622,2512	537,7724	384,1936	356,8476		
112	35,68393	318,4845	612,109	496,8725	378,7228	343,3529		
113	35,77625	355,004	606,6	479,6058	378,2366	348,5143		
114	35,77083	385,6761	508,2682	448,6871	355,8891	332,3508		
115	35,7236	433,0842	532,7402	477,8701	369,1093	349,1823		
116	35,65798	463,1618	527,0548	435,3624	349,1356	334,054		
117	35,58063	415,9303	525,7343	437,8378	352,9434	332,1919		
118	35,4992	382,5184	506,6184	438,4116	345,6255	330,3932		
119	35,53917	312,1512	479,4277	450,2956	345,4496	335,8415		
120	35,51468	331,5509	578,0328	494,6239	375,9198	359,5215		
121	35,54932	373,4531	536,7231	461,1827	359,2027	339,1659		
122	35,60125	386,2315	556,1054	489,9473	382,658	360,8801		
123	35,63793	369,675	562,4028	480,8887	372,6675	358,4196		
124	35,70152	361,2798	469,304	423,886	338,0732	331,7501		
125	35,74435	271,2537	514,0544	493,7849	387,5277	365,3866		
126	35,707	303,2236	536,9662	495,8136	381,6291	359,2543		
127	35,79108	260,3671	472,079	448,6778	354,6518	349,7858		
128	35,80217	212,4264	525,2764	498,8325	378,7217	365,2392		
129	35,75043	197,4772	530,5842	494,0381	379,911	359,995		
130	35,76045	197,6116	470,019	416,0719	339,3337	326,4153		

131	35,68048	308,4146	476,6187	434,708	343,9447	333,483		
132	35,60127	261,7123	534,983	499,9158	373,8057	360,5037		
133	35,54775	265,9306	605,6903	521,8416	390,8888	365,739		
134	35,60838	245,8322	620,3553	531,5753	410,7932	385,5092		
135	35,6797	202,2514	614,8203	536,9085	406,7775	392,0663		
136	35,71627	177,9258	469,2066	391,6253	319,2631	309,7491		
137	35,7639	130,6181	370,1671	324,2744	272,4332	267,1944		
138	38,84187	100,9166	312,9878	288,0085	246,2709	242,728		
139	39,47385	89,04672	274,8426	269,9128	236,1231	233,238		
140	37,09127	81,50025	239,3208	250,3641	223,0957	220,5341		
141	37,90592	76,03898	218,9877	228,9275	215,5174	212,8639		
142	36,91413	72,90713	211,1893	213,8963	208,0642	205,9566		
143	36,41577	72,16462	201,3431	211,6654	201,1075	200,1588		
144	36,10597	70,14757	188,7235	204,5994	195,3161	195,4599		
145	36,61338	68,64468	186,0035	196,7111	191,0544	191,2311		
146	37,60215	67,39772	186,843	193,2655	187,8437	189,0698		
147	36,31347	66,5414	181,0918	189,8534	183,5265	185,024		
148	35,88743	65,48232	173,6067	181,3353	180,2213	182,9907		
149	35,90553	65,10118	171,6885	172,5207	177,4262	181,431		
150	35,68408	64,92193	171,2217	170,5437	174,7553	177,6953		
151	35,79348	72,37608	170,886	170,2935	175,2954	176,891		
152	40,17348	68,91977	165,316	162,9406	172,96	174,4565		
153	34,90032	67,48175	160,1695	156,8931	168,2963	170,1012		
154	38,88115	62,2227	155,8625	152,9026	165,1343	167,7681		
155	48,52822	58,98988	148,8566	150,4339	161,9416	165,9706		
156	34,72585	59,38192	138,8711	143,9964	160,0485	164,3695		
157	34,90385	62,45957	134,1225	141,0335	157,4766	162,1356		
158	34,89442	60,76573	133,1764	141,0639	155,7107	160,4621		
159	46,33723	57,86595	133,0721	140,7728	153,6883	156,7018		
160	34,85113	57,30348	132,2225	141,5139	151,8246	154,9087		
161	34,80328	61,11328	125,9519	141,4117	150,744	155,2353		

162	34,70167	60,19968	124,9361	138,9266	149,1501	154,2953		
163	34,635	60,472	125,212	138,513	148,829	154,093		
164	34,635	60,472	125,212	138,513	148,829	154,093		

