



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI KINERJA FLUIDIZED BED COMBUSTOR DENGAN
DIVERSIFIKASI BAHAN BAKAR CANGKANG KELAPA KE
PEMANFAATAN LIMBAH BIOMASSA DAUN KERING DI
LINGKUNGAN KAMPUS UI DEPOK**

SKRIPSI

ARYA YUWANA

0806329861

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

DEPOK

JULI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI KINERJA FLUIDIZED BED COMBUSTOR DENGAN
DIVERSIFIKASI BAHAN BAKAR CANGKANG KELAPA KE
PEMANFAATAN LIMBAH BIOMASSA DAUN KERING DI
LINGKUNGAN KAMPUS UI DEPOK**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

ARYA YUWANA

0806329861

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

DEPOK

JULI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Arya Yuwana

NPM : 0806329861

Tanda Tangan :

Tanggal : 4 Juli 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Arya Yuwana

NPM : 0806329861

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Skripsi : STUDI KINERJA *FLUIDIZED BED*

COMBUSTOR DENGAN DIVERSIFIKASI
BAHAN BAKAR CANGKANG KELAPA KE
PEMANFAATAN LIMBAH BIOMASSA DAUN
KERING DI LINGKUNGAN KAMPUS UI
DEPOK

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

DEWAN PENGUJI

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

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

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

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

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 4 Juli 2012

KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

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

1. Ayah dan Ibu tercinta, Supratmin B.Sc dan Siti Fauziah, yang telah memberikan pengertian, perhatian serta kasih sayangnya yang begitu besar kepada saya. Saya sangat beruntung karena hal yang paling indah di dunia ini adalah memiliki kedua orang tua seperti ayah dan ibu saya. Serta kedua orang kakak saya, Vidya Ayuningtyas S.Si dan Indri Fitrianty S.E, yang telah banyak membagi pengalaman kuliahnya serta membantu dalam akomodasi saya selama kuliah
2. Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M.Eng, selaku dosen pembimbing yang telah bersedia untuk meluangkan waktu, tenaga, pikiran dan segala perhatiannya kepada saya di tengah kesibukan beliau yang juga luar biasa sehingga saya selalu termotivasi dan mendapatkan semangat baru untuk dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Saya pribadi ingin meminta maaf jika selama ini saya ada kesalahan selama masa bimbingan ini. Bapak adalah sosok yang menjadi panutan bagi saya.
3. Seluruh dosen, staf pengajar dan karyawan Departemen Teknik Mesin FTUI yang secara langsung atau tidak langsung memberikan pelajaran, wawasan dan informasi.
4. Kedua teman seperjuangan skripsi saya Eggi Ikhsan yang menjadi motor dari tim ini dengan semangatnya dan M. Wiweko S yang dengan kedewasaannya mengarahkan laju dari tim ini serta penerus lab FBC selanjutnya Dennis Adriansyah, Prayudi Satriavi dan Sabrizal Nasution yang telah bercanda tawa, suka duka, senang dan sedih bersama selama

pengerjaan skripsi. Serta kepada senior-senior di lab FBC (Azmi, Riza, Nanda) yang telah banyak mengajarkan dalam segala hal mengenai FBC ini. Tak lupa teman-teman mahasiswa bimbingan Pak Adi lab gasifikasi updraft (Arдын H. G, Guswendar R, Irvan N, Priza K) yang saling membagi pengalaman selama pengerjaan skripsi ini. Terima kasih untuk kalian semua yang sudah banyak membantu dalam pengerjaan skripsi ini.

5. Seluruh teman-teman Mesin Angkatan 2008 yang banyak sekali mendukung saya baik secara langsung maupun tidak langsung. Terima kasih untuk semuanya. Terutama kepada teman-teman Termonator (Arдын, Hadid, Ono, Reka, Fikri, Guswe, Priza, Irvan, Ario, Andri, Riandhika, Afif, Fajardo) yang selalu bersama dalam mengarungi 4 tahun dunia perkuliahan ini, semoga persahabatan kita akan selalu kompak dan tetap abadi.
6. Seluruh pihak yang tidak dapat saya ucapkan satu persatu. Saya ucapkan terima kasih banyak atas segala hal yang begitu berarti dalam setiap perjalanan hidup saya.

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

Depok, 4 Juli 2012

Penulis

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

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

Nama : Arya Yuwana
NPM : 0806329861
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

**STUDI KINERJA FLUIDIZED BED COMBUSTOR DENGAN DIVERSIFIKASI
BAHAN BAKAR CANGKANG KELAPA KE PEMANFAATAN LIMBAH
BIOMASSA DAUN KERING DI LINGKUNGAN KAMPUS UI DEPOK**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 4 Juli 2012

Yang menyatakan,



(Arya Yuwana)

ABSTRAK

Nama : Arya Yuwana
Npm : 0806329861
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Studi Kinerja Fluidized Bed Combustor Dengan Diversifikasi Bahan Bakar Cangkang Kelapa Ke Pemanfaatan Limbah Biomassa Daun Kering Di Lingkungan Kampus UI Depok

Potensi biomassa berupa daun kering di sekitar hutan kota kampus UI Depok sangatlah besar. Oleh karena itu, diperlukan suatu teknologi tepat guna pemanfaatan limbah daun kering ini salah satunya adalah dengan *fluidized bed combustor*. *Fluidized bed combustor* mengonversikan energi biomassa menjadi energi panas yang pemanfaatannya dapat dikembangkan untuk berbagai keperluan lainnya, misalnya pembangkitan daya dan proses pengeringan. Pada penelitian ini, kinerja *fluidized bed combustor* diukur dari temperatur sebelum dan setelah penggunaan blower hisap (*induced draft fan*). Hasil yang didapat pada pengujian pembakaran menggunakan bahan bakar daun pada *self sustained combustion* 1 dan 2 jam adalah setelah penggunaan *induced draft fan* temperatur pengoperasian lebih meningkat dengan kisaran 100-150°C. Pengujian daya tahan pembakaran menggunakan bahan bakar daun juga dilakukan dan menghasilkan *self sustained combustion* selama 3 jam.

Kata kunci: biomassa, daun kering, *fluidized bed combustor*, *induced draft fan*, *self sustained combustion*

ABSTRACT

Name : Arya Yuwana
NPM : 0806329861
Study Program : Mechanical Engineering
Title : Study Performance of Fluidized Bed Combustor With Coconut Shell Fuel Diversification Into Biomass Waste Utilization Dried Leaves In Campus Environment Of UI Depok

The potential of biomass in the form of dried leaves around the forest town of UI campus Depok has been great. Therefore, it is required an appropriate waste utilization technology of dry leaves which one of them is a fluidized bed combustor incinerator. Fluidized bed combustor convert biomass energy into heat energy that utilization can be developed for various other purposes, such as power generation and the drying process. In this study, the performance of fluidized bed combustor incinerator temperature measured before and after use of the suction blower (induced draft fan). The results obtained on testing burning using leaves as fuel in self sustained combustion 1 and 2 hours after application is induced draft fan operating temperature further increased the range of 100-150°C. Durability testing using fuel burning leaves was tested and produce self sustained combustion for 3 hours

Keyword : biomass, dried leaves, fluidized bed combustor, induced draft fan, self sustained combustion

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	i
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL.....	ixiii
DAFTAR GAMBAR	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Judul Penelitian.....	1
1.2. Latar Belakang Masalah.....	1
1.3. Perumusan Masalah.....	5
1.4. Tujuan Penelitian	5
1.5. Batasan Masalah	5
1.6. Metodologi Penelitian	6
1.7. Sistematika Penulisan.....	7
BAB II LANDASAN TEORI.....	8
2.1 Energi Biomassa	8
2.1.1 Jenis-Jenis Biomassa.....	8
2.1.1.1 <i>Solid Biomass</i>	8
2.1.1.2 <i>Biogas</i>	9
2.1.1.3 <i>Liquid Biofuel</i>	9

2.1.2	Teknologi Pengkonversian Energi Biomassa.....	10
2.1.2.1	Proses Thermal.....	10
2.1.1.2	Proses <i>Biochemical</i>	13
2.1.3	Kelebihan dan Kekurangan Biomassa.....	15
2.2	Karakteristik Biomassa.....	16
2.3	Sistem Reaksi Pembakaran.....	19
2.3.1	Hal-Hal Yang Harus Diperhatikan Dalam Proses Pembakaran.....	20
2.3.2	Komponen-Komponen Utama Reaksi Pembakaran	21
2.4	<i>Fluidized Bed Combustor</i>	24
2.4.1	Jenis-Jenis <i>Fluidized Bed Combustor</i>	28
2.4.2	Pinsip Kerja <i>Fluidized Bed Combustor</i>	29
2.4.3	Bagian-Bagian <i>Fluidized Bed Combustor</i>	31
2.4.3.1	<i>Fluidization Vessel</i>	31
2.4.3.2	<i>Solid Feeder</i>	33
2.4.3.3	<i>Burner</i>	35
2.4.3.4	<i>Bed Material</i>	36
2.4.3.5	<i>Cyclone Separator</i>	37
2.4.3.6	Blower Tiup (<i>Forced Draft Fan</i>)	38
2.4.3.7	Blower Hisap (<i>Induced Draft Fan</i>).....	39
2.4.3.8	<i>Instrumentation</i>	40
2.5	Fenomena Fluidisasi	42
2.5.1	Proses Fluidisasi	42
2.5.2	Kondisi Fluidisasi.....	43
2.5.3	Jenis-Jenis Fluidisasi	44
2.5.3.1	Fluidisasi Partikulat (<i>Particulate Fluidization</i>)	44
2.5.3.2	Fluidisasi Gelembung (<i>Bubbling Fluidization</i>)	45
2.5.4	Parameter-Parameter Fluidisasi.....	46
2.5.4.1	Ukuran Partikel	46
2.5.4.2	Massa Jenis Padatan.....	46
2.5.4.3	<i>Sphericity</i>	47
2.5.4.4	<i>Bed Voidage</i>	47

2.5.4.5 Kecepatan Fluidisasi Minimum.....	47
2.5.4.6 Penurunan Tekanan Melintas Hampan.....	48
2.5.4.7 Penurunan Tekanan Melintas Distributor.....	49
2.5.4.8 Klasifikasi Pasir.....	50
2.5.4.9 Daerah Batas Fluidisasi (<i>Fluidization Regimes</i>).....	55
2.6 Sifat Fisik dari Partikulat Padatan.....	56
BAB III PERSIAPAN DAN PROSEDUR PENGUJIAN	59
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	59
3.2 Persiapan Pengujian.....	61
3.2.1 Bahan Bakar Biomassa.....	61
3.2.2 Pasir.....	64
3.2.3 Perlengkapan dan Peralatan.....	69
3.3 Standar Operasi Alat Pengujian.....	73
3.3.1 Sistem <i>Feeder</i>	73
3.3.2 <i>Blower</i>	75
3.3.2.1 <i>Blower Tiup (Forced Draft Fan)</i>	75
3.3.2.2 <i>Blower Hisap (Induced Draft Fan)</i>	77
3.3.3 Sistem <i>Burner</i>	79
3.4 Prosedur Pengujian Pembakaran.....	82
3.4.1 Rangkaian Alat Pengujian.....	82
3.4.2 Prosedur Pengambilan Data Pembakaran.....	84
BAB IV HASIL DAN ANALISIS	86
4.1 Hasil.....	86
4.1.1. Hasil Pengujian Pembakaran Sebelum Modifikasi Penambahan <i>Induced Draft Fan</i>	87
4.1.1.1 Hasil Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained</i> <i>Combustion</i> selama 1 Jam.....	88
4.1.1.2 Hasil Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained</i> <i>Combustion</i> selama 2 Jam.....	90

4.1.2. Hasil Pengujian Pembakaran Setelah Modifikasi Penambahan <i>Induced Draft Fan</i>	92
4.1.2.1 Hasil Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> selama 1 Jam	92
4.1.2.2 Hasil Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> selama 2 Jam	94
4.1.3. Hasil Pengujian Daya Tahan Pembakaran Daun Setelah Modifikasi Penambahan <i>Induced Draft Fan</i> pada <i>Self Sustained Combustion</i> selama 3 Jam.....	97
4.2 Analisis	100
4.2.1. Analisis Perbandingan Grafik Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> selama 1 Jam.....	100
4.2.1.1 Analisis Perbandingan Grafik Pemanasan Awal.....	101
4.2.1.2 Analisis Perbandingan Grafik <i>Self Sustained Combustion</i>	105
4.2.1.3 Analisis Perbandingan Grafik Distribusi Temperatur Beberapa Termokopel.....	109
4.2.2. Analisis Perbandingan Grafik Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> selama 2 Jam	112
4.2.2.1 Analisis Perbandingan Grafik Pemanasan Awal.....	113
4.2.2.2 Analisis Perbandingan Grafik <i>Self Sustained Combustion</i>	118
4.2.2.3 Analisis Perbandingan Grafik Distribusi Temperatur Beberapa Termokopel.....	122
4.2.3. Analisis Grafik Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> selama 3 Jam	125
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	130
5.1 Kesimpulan.....	130
5.2 Saran.....	132
DAFTAR PUSTAKA	133
LAMPIRAN	135

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Potensi Energi Terbarukan Indonesia	1
Tabel 2.1	<i>Ultimate Analysis</i> Beberapa Jenis Biomassa	18
Tabel 2.2	<i>Proximate Analysis</i> Beberapa Jenis Biomassa	18
Tabel 2.3	Nilai LHV Beberapa Jenis Biomass	19
Tabel 2.4	Jenis-Jenis Bahan Bakar	22
Tabel 2.5	<i>Increasing Size and Density</i>	54
Tabel 2.6	<i>Bulk Density</i> dari Beberapa Partikulat Padat	57
Tabel 3.1	Potensi Biomassa di Indonesia.....	62
Tabel 3.2	<i>Specific Heat</i> Berbagai Substansi.....	65
Tabel 3.3	Sifat Fisik, Termal dan Mekanik Pasir Silika.....	66
Tabel 3.4	Distribusi Ukuran Pengayakan Pasir Silika	67
Tabel 3.5	Spesifikasi Motor <i>Feeder</i>	74
Tabel 3.6	Spesifikasi Teknis <i>Ring Blower</i>	76
Tabel 3.7	Spesifikasi Teknis <i>Centrifugal Blower</i>	78
Tabel 3.8	Spesifikasi Teknis <i>Hi Temp Premixed Burner</i>	81
Tabel 4.1	<i>Feed Rate</i> Bahan Bakar Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> 1 Jam (Tanpa IDF)	89
Tabel 4.2	Temperatur Rata-Rata Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> 1 Jam (Tanpa IDF)	89
Tabel 4.3	<i>Feed Rate</i> Bahan Bakar Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> 2 Jam (Tanpa IDF)	91

Tabel 4.4	Temperatur Rata-Rata Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> 2 Jam (Tanpa IDF)	91
Tabel 4.5	<i>Feed Rate</i> Bahan Bakar Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> 1 Jam (Dengan IDF).....	94
Tabel 4.6	Temperatur Rata-Rata Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> 1 Jam (Dengan IDF).....	94
Tabel 4.7	<i>Feed Rate</i> Bahan Bakar Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> 2 Jam (Dengan IDF).....	96
Tabel 4.8	Temperatur Rata-Rata Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> 2 Jam (Dengan IDF).....	96
Tabel 4.9	<i>Feed Rate</i> Bahan Bakar Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> 3 Jam (Dengan IDF).....	99
Tabel 4.10	Temperatur Rata-Rata Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> 3 Jam (Dengan IDF).....	99
Tabel 4.11	Perbandingan Temperatur Rata-Rata Pemanasan Awal Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> 1 Jam	105
Tabel 4.12	Perbandingan Temperatur Rata-Rata <i>Self Sustained Combustion</i> Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> 1 Jam.....	109
Tabel 4.13	Perbandingan Temperatur Rata-Rata Pemanasan Awal Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> 2 Jam	117
Tabel 4.14	Perbandingan Temperatur Rata-Rata <i>Self Sustained Combustion</i> Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> 2 Jam.....	121
Tabel 4.15	Temperatur Rata-Rata <i>Self Sustained Combustion</i> Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> 3 Jam	128

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	<i>Solid Biomass</i>	8
Gambar 2.2	<i>Chart</i> Teknologi Konversi Biomass.....	10
Gambar 2.3	Pemanfaatan Tungku Kayu Bakar untuk Memasak (<i>Direct Combustor</i>).....	11
Gambar 2.4	Proses Gasifikasi.....	11
Gambar 2.5	<i>Anaerobic Digester</i>	13
Gambar 2.6	Rangkaian Instalasi Biogas.....	14
Gambar 2.7	Analisis Proximat untuk Beberapa Jenis Bahan Bakar Padat.....	17
Gambar 2.8	Definisi Analisis Ultimat dan Proximat.....	18
Gambar 2.9	Skematis <i>Fluidized Bed Combustor</i>	26
Gambar 2.10	Proses Pencampuran (<i>Mixing</i>) dalam <i>Fluidized Bed Combustor</i> ..	27
Gambar 2.11	Tahapan Proses Kerja <i>Fluidized Bed Combustor</i>	30
Gambar 2.12	Ruang Bakar Utama <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI	31
Gambar 2.13	Perilaku Gelembung Setiap Jenis Distributor.....	32
Gambar 2.14	<i>Distributor</i> yang Digunakan <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI	33
Gambar 2.15	Jenis-Jenis <i>Solid Flow Control</i>	34
Gambar 2.16	<i>Screw Feeder</i>	35
Gambar 2.17	<i>Burner</i> yang Digunakan pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI.....	36
Gambar 2.18	<i>Cyclone Separator</i> yang Digunakan <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI	38
Gambar 2.19	<i>Blower</i> Tiup (<i>Forced Draft Fan</i>)	39
Gambar 2.20	<i>Blower</i> Hisap (<i>Induced Draft Fan</i>)	40
Gambar 2.21	<i>Control Panel 1</i>	40
Gambar 2.22	<i>Control Panel 2</i>	41
Gambar 2.23	Termokopel.....	41
Gambar 2.24	<i>Data Acquisition</i>	42

Gambar 2.25	Skematik Fluidisasi	42
Gambar 2.26	Hubungan Tinggi Hampan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hampan Zat Padat	43
Gambar 2.27	Hubungan Penurunan Tekanan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hampan Zat Padat	44
Gambar 2.28	Diagram Klasifikasi Jenis-Jenis Pasir	51
Gambar 2.29	Daerah Batas Fluidisasi	55
Gambar 2.30	Grafik Penurunan Tekanan Terhadap Kecepatan Fluidisasi Untuk Perbedaan Daerah Batas Fluidisasi	56
Gambar 3.1	Tempurung Kelapa	61
Gambar 3.2	Persiapan Bahan Bakar Tempurung Kelapa	63
Gambar 3.3	Daun Kering yang Digunakan Sebagai Bahan Bakar	64
Gambar 3.4	Pasir Silika <i>Mesh</i> 20-40 yang Digunakan pada FBC UI	68
Gambar 3.5	Generator Set yang Digunakan	69
Gambar 3.6	Konfigurasi Termokopel.....	70
Gambar 3.7	<i>Data Acquisition</i> (DAQ).....	71
Gambar 3.8	Timbangan dengan Skala Maksimum 5 kg	71
Gambar 3.9	<i>Control Panel 1</i> yang Digunakan untuk <i>Feeder</i> dan <i>Blower Tiup (Forced Draft Fan)</i>	72
Gambar 3.10	<i>Control Panel 2</i> yang Digunakan untuk <i>Blower Hisap (Induced Draft Fan)</i>	72
Gambar 3.11	Sistem <i>Feeder</i> pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI	73
Gambar 3.12	<i>Ring Blower</i> untuk <i>Forced Draft Fan</i>	75
Gambar 3.13	<i>Centrifugal Blower</i> untuk <i>Induced Draft Fan</i>	77
Gambar 3.14	Bagian-Bagian Hi Temp Premixed Burner.....	81
Gambar 3.15	Rangkaian Seluruh Alat untuk Melakukan Pengujian Pembakaran	83
Gambar 4.1	Skematik Letak Termokopel pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI...	87
Gambar 4.2	Grafik Hasil Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> 1 Jam (Tanpa IDF) terhadap Waktu (menit).....	88

Gambar 4.3	Grafik Hasil Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> 2 Jam (Tanpa IDF) terhadap Waktu (menit).....	90
Gambar 4.4	Grafik Hasil Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> 1 Jam (Dengan IDF) terhadap Waktu (menit).....	93
Gambar 4.5	Grafik Hasil Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> 2 Jam (Dengan IDF) terhadap Waktu (menit).....	95
Gambar 4.6	Grafik Hasil Pengujian Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> 3 Jam (Dengan IDF) terhadap Waktu (menit).....	98
Gambar 4.7	Kondisi Saat Pemanasan Awal (<i>Burner</i> Hidup).....	101
Gambar 4.8	Grafik Pemanasan Awal Pembakaran Daun 1 Jam Sebelum Penambahan <i>Induced Draft Fan</i> terhadap Waktu (menit).....	102
Gambar 4.9	Grafik Pemanasan Awal Pembakaran Daun 1 Jam Setelah Penambahan <i>Induced Draft Fan</i> terhadap Waktu (menit).....	102
Gambar 4.10	Kondisi Saat <i>Self Sustained Combustion</i> (<i>Burner Fully Off</i>)	106
Gambar 4.11	Grafik <i>Self Sustained Combustion</i> Pembakaran Daun 1 Jam Sebelum Penambahan <i>Induced Draft Fan</i> terhadap Waktu (menit)	107
Gambar 4.12	Grafik <i>Self Sustained Combustion</i> Pembakaran Daun 1 Jam Setelah Penambahan <i>Induced Draft Fan</i> terhadap Waktu (menit)	107
Gambar 4.13	Grafik Perbandingan Distribusi Temperatur T2 terhadap Waktu (menit)	110
Gambar 4.14	Grafik Perbandingan Distribusi Temperatur T3 terhadap Waktu (menit)	111
Gambar 4.15	Kondisi Saat Pemanasan Awal (<i>Burner</i> Hidup).....	113
Gambar 4.16	Grafik Pemanasan Awal Pembakaran Daun 2 Jam Sebelum Penambahan <i>Induced Draft Fan</i> terhadap Waktu (menit).....	114
Gambar 4.17	Grafik Pemanasan Awal Pembakaran Daun 2 Jam Setelah Penambahan <i>Induced Draft Fan</i> terhadap Waktu (menit).....	114
Gambar 4.18	Kondisi Saat <i>Self Sustained Combustion</i> (<i>Burner Fully Off</i>)	118
Gambar 4.19	Grafik <i>Self Sustained Combustion</i> Pembakaran Daun 2 Jam Sebelum Penambahan <i>Induced Draft Fan</i> terhadap Waktu (menit)	119

Gambar 4.20	Grafik <i>Self Sustained Combustion</i> Pembakaran Daun 2 Jam Setelah Penambahan <i>Induced Draft Fan</i> terhadap Waktu (menit)	119
Gambar 4.21	Grafik Perbandingan Distribusi Temperatur T2 terhadap Waktu (menit)	122
Gambar 4.22	Grafik Perbandingan Distribusi Temperatur T3 terhadap Waktu (menit)	124
Gambar 4.23	Kondisi Saat <i>Self Sustained Combustion (Burner Fully Off)</i>	125
Gambar 4.24	Grafik Pembakaran Daun pada <i>Self Sustained Combustion</i> 3 Jam Setelah Penambahan <i>Induced Draft Fan</i> terhadap Waktu (menit)	126
Gambar 4.25	Grafik Distribusi Temperatur T2 terhadap Waktu (menit)	128
Gambar 4.26	Proses Pengadukan Manual agar <i>Bed</i> Kembali <i>Bubbling</i>	129



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Judul Penelitian

Studi Kinerja *Fluidized Bed Combustor* Dengan Diversifikasi Bahan Bakar Cangkang Kelapa Ke Pemanfaatan Limbah Biomassa Daun Kering Di Lingkungan Kampus UI Depok

1.2. Latar Belakang Masalah

Penggunaan energi fosil yang terus tumbuh tidak diimbangi dengan pertumbuhan produksinya. Kondisi ini akan menyebabkan krisis energi dan perlu dicari solusi untuk mengatasinya. Melihat kondisi tersebut, pemerintah telah mengeluarkan “Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional” untuk mengembangkan sumber energi alternatif sebagai pengganti BBM. Walaupun kebijakan tersebut menekankan penggunaan batu bara dan gas sebagai pengganti BBM, tetapi juga menetapkan sumber daya yang dapat diperbaharui untuk memenuhi kebutuhan energi nasional. Peraturan tersebut juga menjelaskan sasaran komposisi energi primer Indonesia pada tahun 2025. Sasaran itu meliputi: 17%, terdiri dari 5% biofuel, 5% tenaga panas bumi, energi baru dan terbarukan lainnya (khususnya biomassa, nuklir, tenaga air skala kecil, tenaga surya dan tenaga angin) menjadi lebih dari 5% serta bahan bakar lain yang berasal dari pencairan batubara menjadi lebih 2%.

Data yang dikeluarkan oleh ESDM menunjukkan Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang cukup besar dan dapat diandalkan untuk menggantikan energi fosil secara bertahap

Tabel 1.1 Potensi Energi Terbarukan Indonesia

Energi Non Fosil	SumberDaya	Setara	Kapasitas Terpasang
Tenaga Air	845 Juta BOE	75,67 GW	4,2 GW

PanasBumi	219 Juta BOE	27,00 GW	0,8 GW
Mini/Mikro Hidro	0,45 GW	0,45 GW	0,206 GW
Biomassa	49,81 GW	49,81 GW	0,3 GW
Tenaga Surya	-	4,80 kWh/m ² /day	0,01 GW
Tenaga Angin	9,29 GW	9,290 GW	0,0006 GW

(Sumber: *Blueprint Pengelolaan Energi Nasional 2006-2025 Tanggal 10 November 2007*)

Dari data tersebut dapat dilihat bahwa potensi energi biomassa di Indonesia memiliki potensi kedua terbesar setelah tenaga air yaitu sebesar 49,81 GW. Akan tetapi, potensi tersebut belum dimanfaatkan secara optimal hanya 0,3 GW saja yang sudah dimanfaatkan atau sekitar 0,6% dari seluruh potensi yang ada. Oleh karena itu, pengembangan bioenergi merupakan salah satu agenda utama pengembangan energi baru dan energi terbarukan di Indonesia. Melalui pemanfaatan teknologi bioenergi, Indonesia tidak hanya dapat meningkatkan ketahanan energinya akan tetapi dapat pula mempunyai kesempatan yang besar di dalam memberikan kontribusi terhadap penyediaan energi bersih kepada masyarakat dunia.

Energi biomassa menjadi penting bila dibandingkan dengan energi terbarukan karena proses konversi menjadi energi listrik memiliki investasi yang lebih murah bila di bandingkan dengan jenis sumber energi terbarukan lainnya. Hal inilah yang menjadi kelebihan biomassa dibandingkan dengan energi lainnya. Bila kita maksimalkan potensi yang ada dengan menambah jumlah kapasitas terpasang, maka akan membantu bahan bakar fosil yang selama ini menjadi tumpuan dari penggunaan energi. Hal ini akan membantu perekonomian yang selama ini menjadi boros akibat dari anggaran subsidi bahan bakar minyak yang jumlahnya melebihi anggaran sektor lainnya.

Di Indonesia upaya pemanfaatan biomassa berasal dari limbah industri pertanian, perkebunan, dan kehutanan berupa serat kelapa sawit, cangkang sawit, tempurung kelapa, sabut kelapa, sekam padi, kayu, ranting, daun dan lain-lain.

Limbah kelapa sawit seperti serat dan cangkangnya sudah mulai dimanfaatkan sebagai energi biomassa. Sedangkan potensi energi biomassa yang lain seperti tempurung dan sabut kelapa, sekam padi, limbah kayu, ranting serta daun masih belum banyak dilirik sebagai sumber energi

Jika kita melihat kondisi lingkungan kampus Universitas Indonesia Depok, sampah daun merupakan suatu hal yang lumrah dan wajar mengingat kondisi lingkungan kampus yang memiliki banyak sekali pepohonan. Selain itu, faktor musim kemarau yang melanda sebagian besar wilayah Indonesia bagian barat pun menjadikan pohon-pohon besar meranggas daun-daunnya untuk mengurangi penguapan, sehingga yang terjadi adalah jumlah sampah daun di sekitar lingkungan kampus UI bertambah banyak. Tanpa disadari sampah daun di lingkungan kampus UI ini merupakan potensi biomassa yang sangat besar dan belum termanfaatkan dengan baik.

Oleh karena itu, perlu dilakukan pengolahan agar dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi. Pemanfaatan biomassa biasanya dilakukan dengan cara membakarnya sehingga menghasilkan kalor yang nantinya digunakan untuk memanaskan boiler. Pembakaran biomassa secara langsung memiliki kelemahan yakni efisiensi yang dihasilkan sangat rendah. Oleh karena itu perlu diterapkan beberapa teknologi untuk meningkatkan manfaat biomassa sebagai bahan bakar. Teknologi pembakaran yang digunakan harus simpel, efisien, tidak menimbulkan gangguan terhadap lingkungan sekitar, serta biaya instalasinya relatif tidak terlalu mahal. Teknologi yang memenuhi kriteria tersebut adalah *Fluidized bed combustor (FBC)*.

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

Fluidized Bed Combustor (FBC) memiliki bentuk seperti sebuah tungku pembakar biasa, namun memiliki media pengaduk berupa pasir. Pasir yang digunakan bisa pasir kuarsa ataupun pasir silika. Fungsi pasir ini berfungsi sebagai penyimpan dan pendistribusi panas, sehingga panas yang dihasilkan dapat merata. *Fluidized Bed Combustor (FBC)* memiliki temperatur pengoperasian antara 600 sampai 900°C sehingga bahan bakar seperti limbah dapat habis terbakar hingga menjadi abu yang tidak berbahaya bagi lingkungan.

Teknologi ini dapat menjadi salah satu teknologi pembakaran limbah partikel atau padatan dalam jumlah yang relatif besar secara cepat. Emisi yang dihasilkan pembakaran juga relatif kecil sehingga menekan polusi udara yang mungkin timbul akibat pembakaran yang kurang sempurna. Teknologi *Fluidized Bed Combustor (FBC)* ini juga lebih baik bila dibandingkan dengan teknologi pembakaran biomassa yang konvensional, karena laju pembakaran yang cukup tinggi, dan juga dapat membakar limbah biomassa yang berkadar air tinggi.

Fluidized Bed Combustor (FBC) di Universitas Indonesia merupakan unit teknologi pemanfaatan limbah yang masih dalam pengembangan. Teknologi *Fluidized Bed Combustor (FBC)* ini masih dapat dikembangkan secara maksimal dalam berbagai aspek. Dalam pengembangannya terdapat masalah-masalah yang membutuhkan penyelesaian demi menunjang kinerja *Fluidized Bed Combustor (FBC)* menjadi lebih baik. Salah satu masalah yang terjadi pada periode sebelumnya (Desember 2011) adalah *pressure drop* yang terjadi di *furnace* akibat gas sisa hasil pembakaran tidak seluruhnya keluar melalui cerobong. Gas sisa hasil pembakaran tersebut lebih banyak keluar melalui *feeder* maupun *cyclone*. Hal inilah salah satu penyebab dari kurang optimalnya kinerja *Fluidized Bed Combustor (FBC)* Universitas Indonesia ini. Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah blower hisap (*induced draft fan*) sebagai solusi dari permasalahan tersebut. Fungsi dari blower hisap (*induced draft fan*) adalah membentuk aliran udara kontinu yang diperlukan dalam jumlah sesuai bagi pembakaran sehingga tekanan di *furnace* tetap terjaga serta menghisap dan membuang gas sisa hasil produk pembakaran.

1.3. Perumusan Masalah

Fluidized Bed Combustor (FBC) adalah salah satu teknologi pemanfaatan limbah yang dapat menjadi unggulan di Universitas Indonesia. Penggunaan bahan bakar yang baru digunakan pada *Fluidized Bed Combustor (FBC)* UI seperti daun kering serta pemasangan blower hisap (*induced draft fan*) membutuhkan studi lebih lanjut mengenai kinerjanya. Oleh karena itu, pengukuran kinerja dari insinerator *Fluidized Bed Combustor (FBC)* Universitas Indonesia dilakukan melalui perbandingan karakteristik pembakaran biomassa sebelum dan setelah pemasangan *Induced Draft Fan*. Selain itu, dilakukan pula uji daya tahan pembakaran menggunakan bahan bakar daun untuk melihat waktu ketahanan dari pembakaran tersebut.

1.4. Tujuan Penelitian

Penulisan ini dimaksudkan sebagai salah satu syarat untuk kelulusan Sarjana Strata 1 Teknik Mesin Universitas Indonesia. Sesuai perumusan masalah yang telah diuraikan di atas, maka tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui kinerja dari insinerator *Fluidized Bed Combustor* Universitas Indonesia melalui perbandingan karakteristik pembakaran biomassa sebelum dan setelah pemasangan *Induced Draft Fan*.
2. Mengetahui daya tahan serta karakteristik pembakarannya menggunakan bahan bakar daun pada *self sustained combustion* selama 3 jam pada *Fluidized Bed Combustor (FBC)*.
3. Dalam pengembangannya *Fluidized Bed Combustor (FBC)* diharapkan menjadi teknologi unggulan Universitas Indonesia dalam memanfaatkan sampah daun yang banyak terdapat di lingkungan Universitas Indonesia.

1.5. Batasan Masalah

Batasan masalah yang ditetapkan dalam penelitian ini adalah:

1. Penelitian yang dilakukan hanya mencakup eksperimental pembakaran yang tujuannya untuk mengetahui karakteristik pembakaran dengan bahan bakar

Universitas Indonesia

biomassa (pemanasan awal serta *self sustained combustion*). Sedangkan penghitungan nilai *heat rate* output dari proses pembakaran, perhitungan efisiensi alat serta emisi gas buang yang dihasilkan tidak akan dibahas secara mendalam dalam tulisan ini.

2. Bahan bakar biomassa yang digunakan pada pemanasan awal adalah tempurung kelapa dan pada *self sustained combustion* adalah daun.
3. Kinerja dari insinerator *Fluidized Bed Combustor (FBC)* diketahui melalui perbandingan karakteristik pembakaran biomassa sebelum dan setelah pemasangan *Induced Draft Fan*.
4. Pengujian daya tahan pembakaran pada *self sustained combustion* selama 3 jam menggunakan bahan bakar daun serta analisis karakteristik pembakarannya.

1.6. Metodologi Penelitian

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

1. Persiapan
 - 1.1. Identifikasi masalah yang akan dibahas
 - 1.2. Penelusuran literatur
 - 1.3. Pemilihan bahan bakar dan pasir yang akan digunakan serta menentukan ukurannya
2. Set Up Preparation
 - 2.1. Instalasi Laboratorium
 - 2.2. Persiapan bahan bakar (tempurung kelapa dan daun)
 - 2.3. Kalibrasi Instrumentasi
 - 2.4. Instalasi Instrumentasi laboratorium
3. Pengujian dan Pengambilan Data
 - 3.1. Penggunaan tempurung kelapa sebagai pemanasan awal dan daun kering pada saat *self sustained combustion*
 - 3.2. Pengambilan data dilakukan sebelum dan setelah pemasangan *Induced Draft Fan*

- 3.3. Pengujian daya tahan pembakaran daun dilakukan dengan target *self sustained combustion* selama 3 jam
4. Pengolahan Data dan Grafik
 - 4.1. Interpretasi grafik perbandingan dari kondisi pengujian yang dilakukan sebelum dan setelah pemasangan *Induced Draft Fan* dari hasil pengolahan data
 - 4.2. Interpretasi grafik dari kondisi pengujian daya tahan pembakaran
5. Analisis dan Kesimpulan
 - 5.1. Menganalisis korelasi dan pengaruh pemasangan *Induced Draft Fan*
 - 5.2. Menganalisis daya tahan pembakaran menggunakan bahan bakar daun
 - 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 biomassa, sistem reaksi pembakaran, *fluidized bed combustor*, fenomena fluidisasi serta tentang fluidisasi.
- BAB 3** PENGUJIAN DAN PENGUKURAN, berisi :
- Skematik pengujian, metodologi pengujian, dan metodologi pengambilan data.
- BAB 4** HASIL DAN ANALISIS, 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 Energi Biomassa

Energi Biomassa adalah energi yang merujuk pada bahan biologis yang hidup atau baru mati yang dapat digunakan sebagai sumber bahan bakar dan merupakan salah satu bentuk energi kimia, dimana energi yang terkandung disimpan dalam bentuk ikatan atom dan molekul, yang nantinya dapat dikonversikan dan digunakan untuk kesejahteraan manusia.

Pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi sudah dimulai semenjak manusia mengenal bahan bakar fosil. Contohnya adalah dengan memakai kayu atau kotoran hewan untuk memasak. Sebagai bahan bakar, seperti yang juga diterapkan pada bahan bakar fosil, biomassa harus melalui mekanisme pengolahan terlebih dulu agar dapat dengan mudah dimanfaatkan, yang dikenal sebagai konversi biomassa.

2.1.1 Jenis-Jenis Biomassa

Berdasarkan bentuk dan wujudnya, biomassa dibagi menjadi tiga kategori, yaitu:

2.1.1.1 *Solid Biomass*



Gambar 2.1 *Solid Biomass*

(Sumber: http://www.evergreenenergy.ie/index.php?main_page=index&cPath=1)

Bahan dasar yang digunakan berasal dari material organik kering seperti misalnya pohon, sisa-sisa tumbuhan, hewan, kotoran manusia, sisa-sisa industri dan rumah tangga. Bahan-bahan tersebut kemudian dibakar secara langsung untuk menghasilkan panas (*heat*).

Wilayah penghasil biomassa, secara umum dibagi menjadi tiga daerah geografis, yaitu:

a) *Temperate Regions (wilayah beriklim sedang)*

Pada wilayah ini biomassa yang dihasilkan antara lain kayu, sisa tumbuhan, serta kotoran manusia dan hewan.

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

Wilayah ini memiliki vegetasi untuk sumber energi yang sedikit.

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

Wilayah paling bagus dalam hal ketersediaan bahan bakar biomassa, di mana persediaan kayu dan sisa – sisa tumbuhan yang sangat berlebih serta kotoran manusia dan hewan.

2.1.1.2 *Biogas*

Biogas berasal dari material organik yang telah melewati proses fermentasi atau *anaerob digesting* oleh bakteri pada kondisi udara yang menalami kekurangan oksigen, dan proses ini menghasilkan gas yang dapat terbakar (*combustible gas*). Beberapa keuntungan yang didapat dari pemrosesan biogas antara lain :

- a) biaya pengolahannya relatif lebih murah jika dibandingkan dengan bahan bakar minyak;
- b) sisa pemrosesannya dapat dimanfaatkan untuk pupuk dengan nilai nutrisi lebih tinggi daripada kotoran ternak segar;
- c) dapat mengurangi kerusakan hutan; dan
- d) bebas asap.

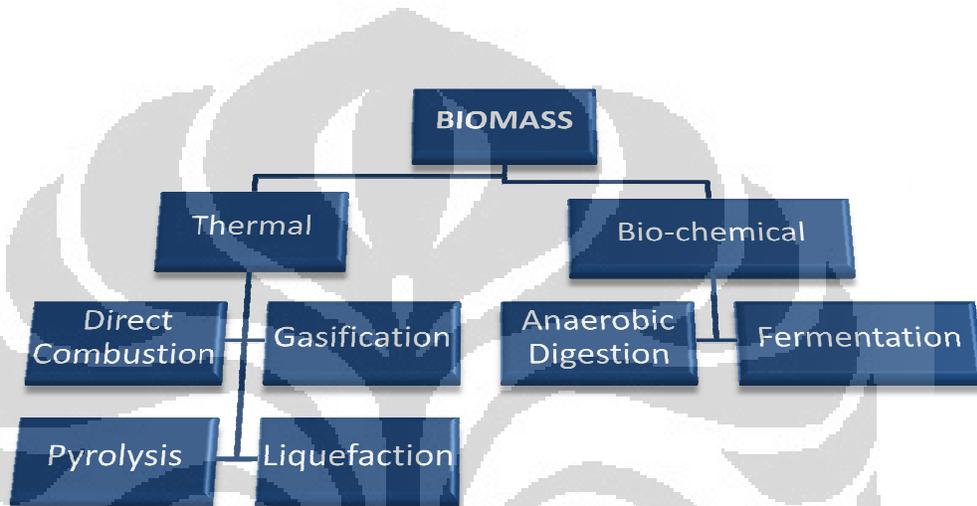
2.1.1.3 *Liquid Biofuel*

Biofuel berasal dari minyak nabati (ethanol) maupun hewani. Biofuel ini didapat dari proses reaksi kimia atau fisika pada material organik, menghasilkan

minyak yang dapat digunakan untuk melakukan proses pembakaran, sama seperti yang digunakan pada konsumsi bahan bakar fosil.

2.1.2 Teknologi Pengkonversian Energi Biomassa

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



Gambar 2.2 *Chart* Teknologi Konversi Biomassa

2.1.2.1 Proses Thermal

Ada tiga proses pemanasan dalam menghasilkan energi biomassa, yaitu:

1. *Direct Combustor*

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

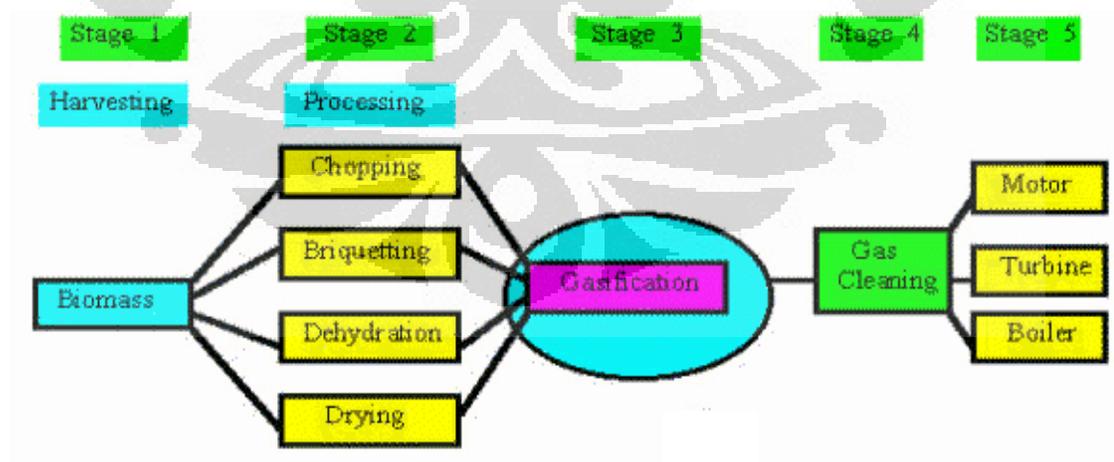


Gambar 2.3 Pemanfaatan Tungku Kayu Bakar untuk Memasak (*Direct Combustor*)

(Sumber: <http://www.hd.co.id/pojok/kayu-bakarpun-bisa-membunuh-jutaan-manusia>)

2. *Gassification*

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



Gambar 2.4 Proses Gasifikasi

(sumber : <http://www.w3.org>)

Secara umum ada 3 sesi proses gasifikasi biomassa:

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

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

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

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

3. *Pyrolysis*

Pyrolysis adalah pemanasan dan pembakaran dengan keadaan tanpa oksigen. *Pyrolysis* merupakan salah satu bagian dari proses gasifikasi, akan memecah secara kimiawi biomassa untuk membentuk substansi lain. Produk dari *pyrolysis* tergantung dari temperatur, tekanan, dan lain lain. Pada suhu 200^0 C, air akan terpisah dan dibuang. *Pyrolysis* sesungguhnya terjadi pada suhu antara 280 sampai 500^0 C, *pyrolysis* menghasilkan banyak karbon dioksida, tar, dan sedikit metil alkohol. Antara 500 sampai 700^0 C produksi gas mengandung hidrogen. Secara umum *Pyrolysis* menghasilkan $C_6H_{10}O_5 = 5CO + 5H_2 + C$.

4. *Liquefaction*

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

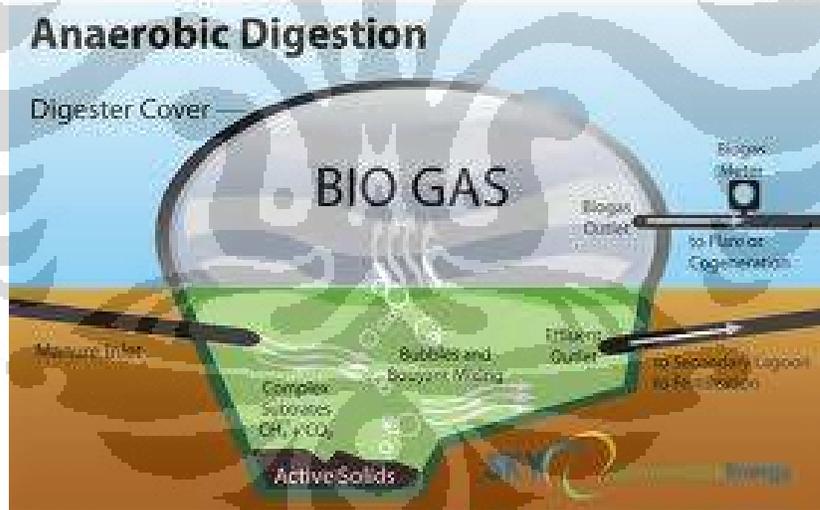
2.1.2.2 Proses *Biochemical*

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

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

1. *Anaerobic Digestion*

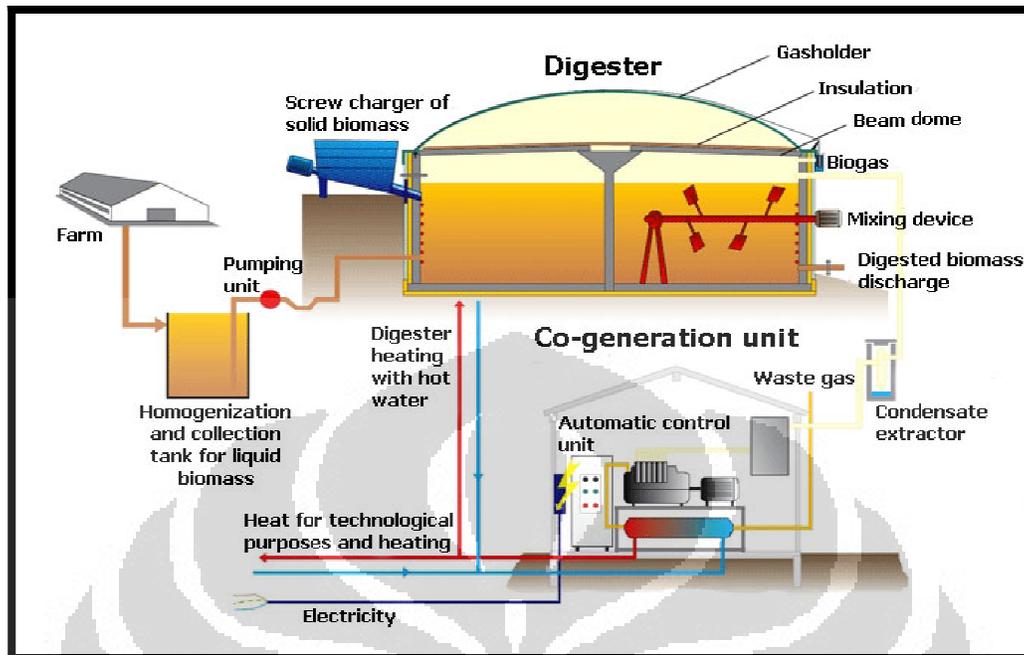
Proses ini adalah proses yang mengikutsertakan mikroorganisme untuk mengurai material dengan kondisi tanpa oksigen. Proses ini dapat digunakan pada sampah organik dan juga kotoran hewan. *Anaerobic digestion* merupakan proses yang kompleks. Pertama-tama, mikro organisme mengubah material organik kedalam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



Gambar 2.5 *Anaerobic Digester*

(Sumber: <http://www.skyrenewableenergy.com/renewable-energy/bio/>)

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



Gambar 2.6 Rangkaian Instalasi Biogas

(Sumber: <http://budibadibu.files.wordpress.com/2010/03/scheme.jpg>)

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

1. *Hydrolysis*

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*

Proses ini mengubah produk dari proses *acetogenesis* menjadi metana dengan bantuan bakteri metanogenik.

2. Fermentasi

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

2.1.3 Kelebihan dan Kekurangan Biomassa

Sama halnya dengan pada bahan bakar jenis lainnya, energi biomassa memiliki kelebihan dan kekurangan pada aplikasi penggunaannya, yang beberapa diantaranya adalah:

- Kelebihan energi biomassa :
 1. Merupakan contoh energi terbarukan
 2. Dapat diproduksi secara lokal
 3. Menggunakan bahan baku limbah yang murah
 4. Untuk penggunaan yang tanpa *direct combustor* efek buruk terhadap lingkungan yang tergolong kecil
- Kekurangan energi biomassa :
 1. Menghasilkan gas karbon dioksida untuk penggunaan *direct combustion* dan gas penyebab efek rumah kaca lain yang merupakan penyebab pemanasan global.
 2. Membutuhkan energi yang lebih banyak untuk memproduksi biomassa dan mengumpulkannya dari pada energi yang dapat dihasilkan.
 3. Masih merupakan sumber energi yang mahal dalam memproduksi, mengumpulkan, dan mengubahnya kedalam bentuk energi yang lain

Universitas Indonesia

2.2 Karakteristik Biomassa

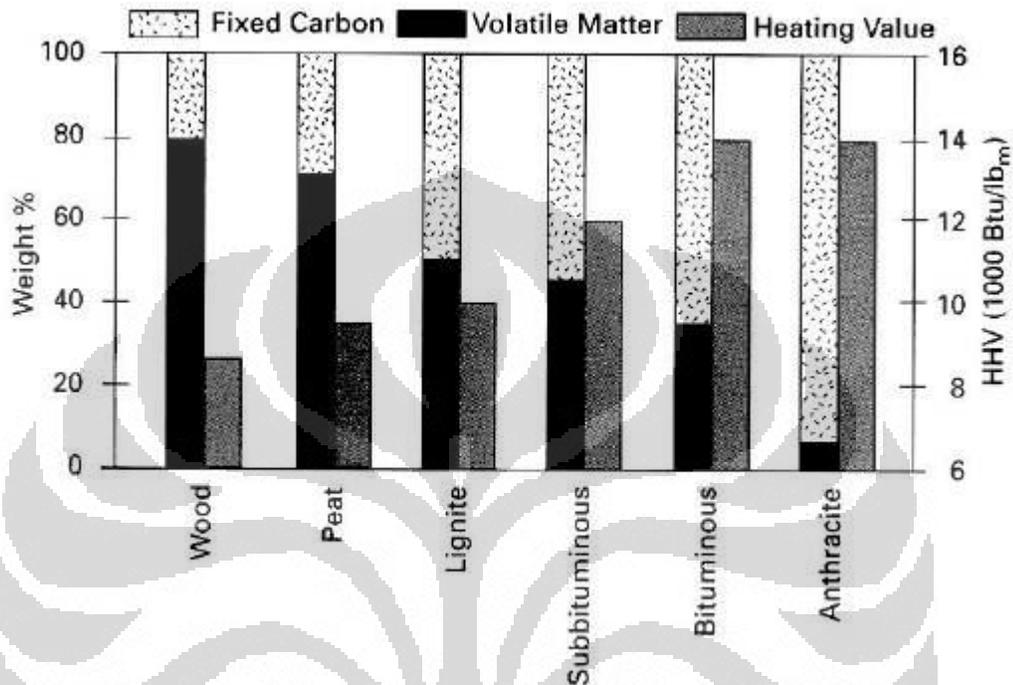
Potensi biomassa yang melimpah merupakan solusi energi masa depan karena dapat dikategorikan sebagai “*green and sustainable energi*” yaitu pemanfaatan energi yang bersifat ramah lingkungan dan keberadaannya melimpah di dunia khususnya di Indonesia. Untuk pemanfaatan dengan *caraindirect combustor*, 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 fasa uap. Jika jumlah kalor laten uap air diperhitungkan atau setelah terbakar, temperatur gas pembakaran dibuat 25°C, maka akan diperoleh nilai kalor atas (HHV, *higher heating value*). Pada temperatur ini, air akan berada dalam kondisi fasa cair.

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

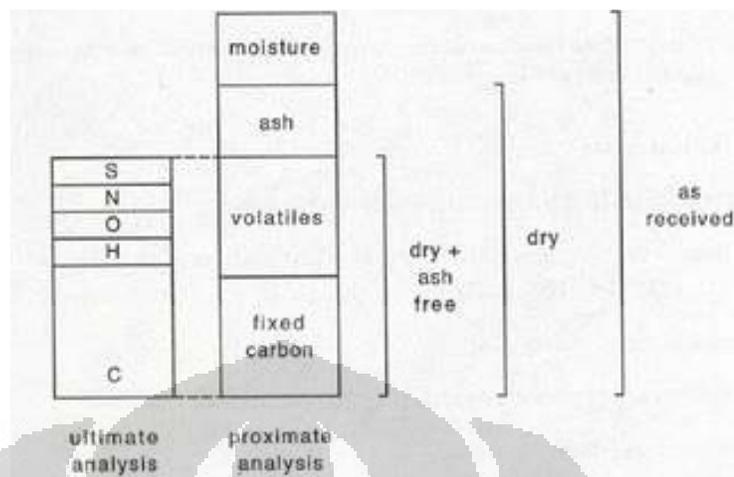
biomass, $FR \sim 0.1$. Untuk plastik, $FR \sim 0$. Analisis proximat untuk beberapa jenis bahan bakar padat dapat dilihat pada gambar di bawah.



Gambar 2.7 Analisis Proximat untuk Beberapa Jenis Bahan Bakar Padat.

(Sumber: <http://tinyurl.com/c7wkn55>)

Pada analisis *proximate* biomassa juga mengandung abu dan air. Massa biomassa awal umumnya diistilahkan sebagai *as received* (mengandung air, abu, volatil, dan karbon). Kadar abu dari biomassa berkisar dari 1% sampai 12% untuk kebanyakan jerami-jeramian dan bagas. Abu dari biomassa lebih ramah dibandingkan abu dari batubara karena banyak mengandung mineral seperti fosfat dan *potassium*. Pada saat pembakaran maupun gasifikasi, abu dari biomassa juga lebih aman dibandingkan abu dari batubara. Dengan temperatur operasi yang tidak lebih dari 950°C atau 1000°C, abu dari biomassa tidak menimbulkan terak. Abu biomassa mempunyai jumlah oksida keras (silica dan alumina) yang lebih rendah.



Gambar 2.8 Definisi Analisis Ultimat dan Proximat.

[Sumber: <http://tinyurl.com/cgzb6ds>]

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

Tabel 2.1 *Ultimate Anaysis* Beberapa Jenis Biomassa

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

(Sumber: Walter R. Niessen.)

Tabel 2.2 *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
Cangkang Kelapa	7,8	80,8	18,8	0,4

Ranting Pohon	20	67.89	11.31	0.8
Kertas	10.24	75.94	8.44	5.38

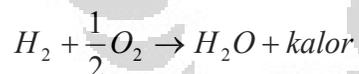
(Sumber: Walter R. Niessen. 1994)

Tabel 2.3 Nilai LHV Beberapa Jenis Biomassa

Jenis Bahan Bakar	LHV
Cangkang Kelapa	17230 kJ/kg
Ranting Pohon	15099 kJ/kg

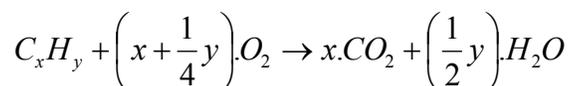
2.3 Sistem Reaksi Pembakaran

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



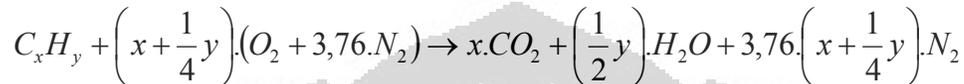
Tiga senyawa dan panas yang dihasilkan tersebut disebut juga sebagai hasil pembakaran.

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



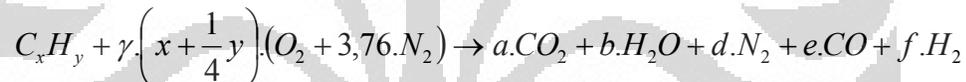
Nilai dari x dan y di atas bergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan. Nilai x adalah fraksi massa untuk kandungan *Carbon*, dan y fraksi massa untuk kandungan *Hydrogen* dalam bahan bakar.

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



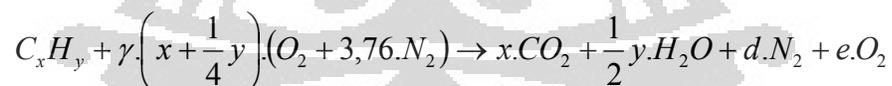
Namun, ada kalanya juga proses pembakaran tidak terjadi pada komposisi ideal antara bahan bakar dengan udara. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, proses yang tidak pada kondisi ideal ini bisa terbagi menjadi dua, yaitu pembakaran kaya dan pembakaran miskin.

- Proses pembakaran-kaya



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

- Proses pembakaran-miskin



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

2.3.1 Hal-Hal Yang Harus Diperhatikan Dalam Proses Pembakaran

Sebelumnya telah dibahas reaksi kimia pembakaran secara teoritis. Namun pada kenyataannya, proses pembakaran ini akan menghasilkan gas-gas atau sisa-sisa hasil pembakaran lainnya yang tidak disebutkan pada reaksi tersebut. Untuk

memperoleh hasil pembakaran yang baik, maka proses pembakaran harus memperhatikan parameter-parameter seperti *mixing* (pencampuran), udara, temperatur, waktu, dan kerapatan. Berikut ini merupakan hal-hal yang harus diperhatikan dalam proses pembakaran, yaitu :

1. *Mixing*

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

2. Udara

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

3. Temperatur

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

4. Waktu

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

5. Kerapatan

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

2.3.2 Komponen-Komponen Utama Reaksi Pembakaran

Suatu reaksi pembakaran memiliki 3 komponen utama, yaitu :

1. Zat yang dibakar

Unsur-unsur kimia pada bahan bakar yang berpotensi memberikan energi kalor adalah karbon, oksigen, hidrogen, dan sulfur. Setiap bahan bakar memiliki kandungan energi kalor yang dinyatakan dalam jumlah karbon. Jenis bahan bakar dibedakan menjadi tiga bentuk, seperti pada tabel 2.4.

Tabel 2.4 Jenis-Jenis Bahan Bakar

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

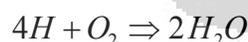
2. Zat yang membakar

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

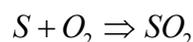
- Karbon terbakar sempurna akan membentuk CO_2 menurut persamaan :



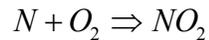
- Hidrogen terbakar sempurna akan membentuk H_2O menurut persamaan :



- Belerang terbakar akan membentuk SO_2 menurut persamaan :



- Nitrogen terbakar membentuk NO_2 menurut persamaan :



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

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

Kebutuhan udara dalam proses pembakaran dapat diklasifikasikan menjadi sebagai berikut :

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

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

Nilai *excess air* ini dapat ditulis sebagai berikut :

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

keterangan : $m = excess\ air$

$A_o =$ jumlah udara 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 CO_2 , H_2O , SO_2 , N_2 , dan O_2 . Komponen-komponen tersebut disebut juga sebagai hasil pembakaran (*combustion product*), atau biasa disebut juga sebagai gas buang.

2.4 Fluidized Bed Combustor

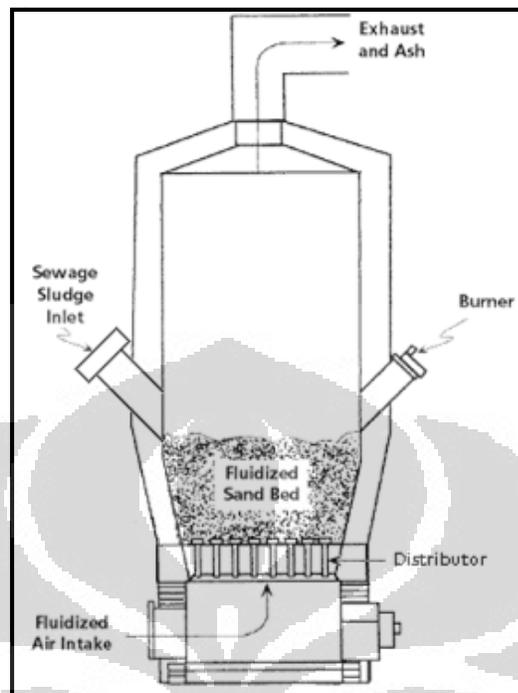
Fluidized bed combustor adalah sebuah tungku pembakar yang menggunakan media pengaduk berupa pasir seperti pasir kuarsa dan silika, tujuannya agar terjadi pencampuran (*mixing*) yang homogen antara udara dengan butiran-butiran pasir tersebut. *Mixing* yang konstan antara partikel-partikel mendorong terjadinya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

Hampan pasir yang menjadi media pengaduk diletakkan di atas *distributor* yang berupa grid logam dengan dilapisi bahan tahan api. Grid ini berisi suatu pelat berpori berisi nosel-nosel injeksi udara atau *tuyere* di mana udara dialirkan ke dalam ruang bakar untuk menfluidisasi hampan (*bed*) tersebut. Aliran udara melalui nosel hampan terfluidisasi sehingga berkembang menjadi dua kali volume sebelumnya. Fluidisasi meningkatkan pencampuran dan turbulensi serta laju perpindahan panas yang terjadi. Bahan bakar bantu digunakan selama pemanasan awal untuk memanaskan hampan sampai temperatur operasi sekitar 600 sampai 900°C

sehingga pembakaran dapat terjaga pada temperatur konstan. Dalam beberapa instalasi, suatu sistem *water spray* digunakan untuk mengendalikan suhu ruang bakar.

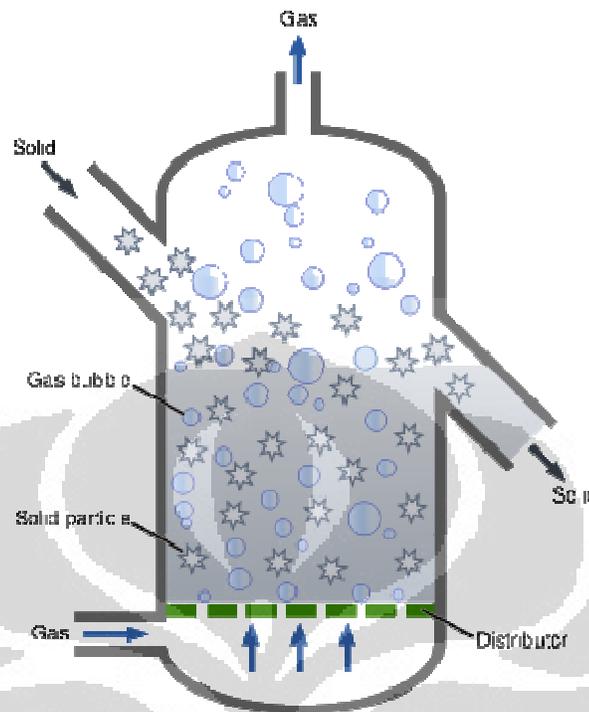
Reaktor unggun atau hamparan fluidisasi (*fluidized bed*) berfungsi meningkatkan penyebaran umpan bahan bakar yang datang dengan pemanasan yang cepat sampai temperatur pengapiannya (*ignition*) serta meningkatkan waktu kontak yang cukup dan juga kondisi pencampuran yang hebat untuk pembakaran sempurna.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

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



Gambar 2.9 Skematis *Fluidized Bed Combustor*

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.9 diatas, terlihat bahwa *fluidized bed combustor* memiliki satu ruangan dimana pengeringan dan pembakaran terjadi di hamparan pasir terfluidisasi. Waktu kontak di dalam daerah pembakaran hanyalah beberapa detik pada temperatur 750 sampai 900 °C. Abu terbawa keluar dari puncak ruang bakar dan dibersihkan dengan alat kontrol polusi udara. Pasir yang terbawa dengan abu harus diganti. Pasir yang terbuang pada umumnya 5 persen dari volume hamparan untuk setiap 300 jam operasi. Pengumpanan (*feed*) pada ruang bakar itu dimasukkan baik dari atas atau secara langsung ke dalam hamparan.



Gambar 2.10 Proses Pencampuran (*mixing*) dalam *Fluidized Bed Combustor*

[Sumber: <http://tinyurl.com/8xfr39a>]

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

2.4.1 Jenis-Jenis *Fluidized Bed Combustor*

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

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

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

2.4.2 Pinsip Kerja *Fluidized Bed Combustor*

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

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

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

1. Kondisi awal

Pada kondisi awal, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.16a, ruang bakar masih pada temperatur ruang. Pasir sebagai media pengaduk sekaligus pertukaran kalor dituang ke dalam ruang bakar.

2. Proses pemanasan

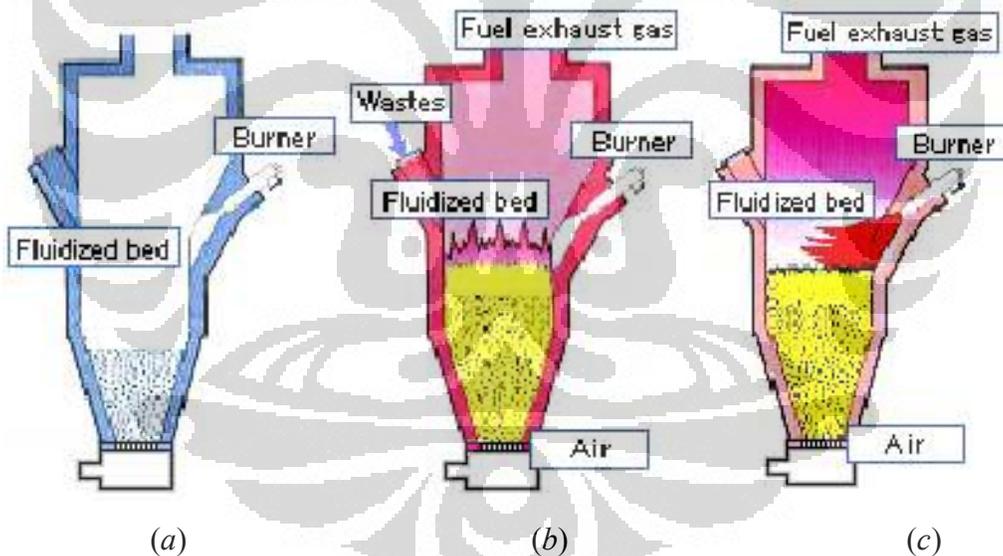
Pada tahapan proses pemanasan, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.16b, pasir tersebut mulai dipanaskan. Udara bertekanan mulai dialirkan dari *blower* ke dalam ruang bakar dari bagian bawah *insinator* untuk menfluidisasi pasir. Pada kondisi ini sudah terjadi fluidisasi pada kecepatan fluidisasi minimum. Proses pemanasan dilakukan dengan bahan bakar bantu dari burner. Burner memanaskan pasir sampai temperatur operasi (750 – 900°C). Untuk

mempercepat pemanasan dapat ditambahkan bahan bakar ke dalam reaktor berupa kayu bakar atau pun batu bara.

3. Kondisi operasi

Pada kondisi operasi, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.16c, temperatur ruang bakar pada hamparan sudah mencapai temperatur operasi. Pada kondisi ini bahan bakar bantu tidak dipakai lagi, burner dimatikan. Temperatur ruang bakar terjaga konstan dengan laju pengumpanan sampah yang tetap. Kecepatan udara dari blower dinaikkan sampai pada kecepatan pengoperasian maksimum. Sampah akan terbakar sendiri pada kondisi ini karena panas yang diberikan oleh pasir sudah melewati temperatur nyala dari sampah.

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



Gambar 2.11 Tahapan Proses Kerja *Fluidized Bed Combustor*;

(a) Tahapan pada Kondisi Awal;

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

2.4.3 Bagian-Bagian *Fluidized Bed Combustor*

Fluidized bed combustor memiliki beberapa bagian dalam pengoperasiannya, di antaranya terdiri dari *fluidization vessel*, *solid feeder*, *burner*, *bed material*, *cyclone separator*, *blower*, dan *instrumentation*.

2.4.3.1 *Fluidization Vessel*

Fluidization vessel sebagian besar terbuat dari rangka baja yang dilapisi material tahan panas.,yang biasanya berbentuk silinder tegak dengan diameter 9-34ft. Secara umum *fluidization vessel* terdiri dari atas tiga bagian utama yaitu :

1. Ruang Bakar

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

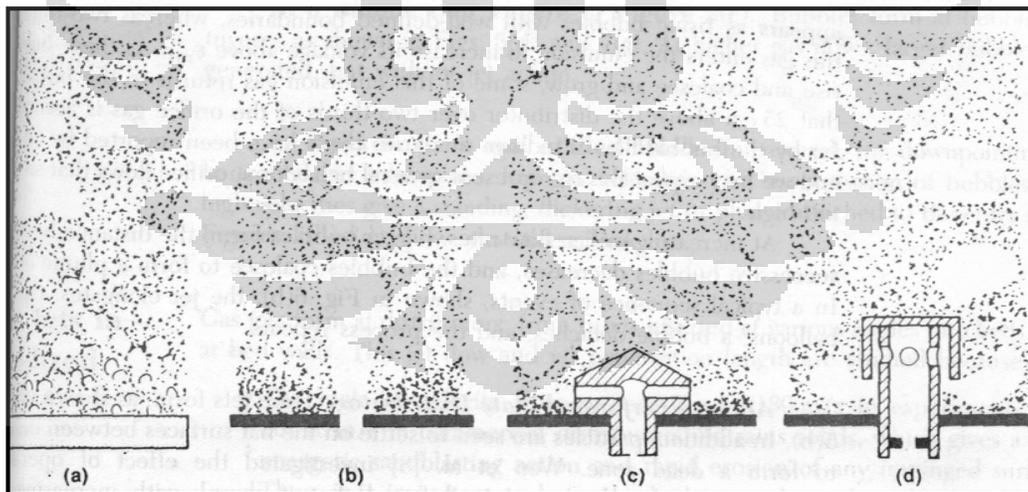


Gambar 2.12 Ruang Bakar Utama *Fluidized Bed Combustor* UI

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

2. Distributor

Distributor digunakan untuk untuk mendistribusikan aliran udara dari blower secara seragam pada keseluruhan penampang reaktor sehingga hamparan pasir yang ditopang oleh distributor tersebut terjadi fluidisasi. Distributor ini juga memiliki pengaruh terhadap ukuran dan jumlah *bubble* yang dihasilkan. Terdapat beberapa jenis distributor yang sering digunakan, yaitu *porous plate*, *perforated plate*, *nozzle-type tuyere*, dan *bubble cap tuyere*. Masing-masing jenis distributor tersebut dapat menghasilkan perilaku gelembung yang berbeda-beda seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.13:



Gambar 2.13 Perilaku Gelembung Setiap Jenis Distributor;

(a) *Porous Plate*; (b) *Perforated Plate*;

(c) *Nozzle-type Tuyere*; (d) *Bubble Cap Tuyere*.



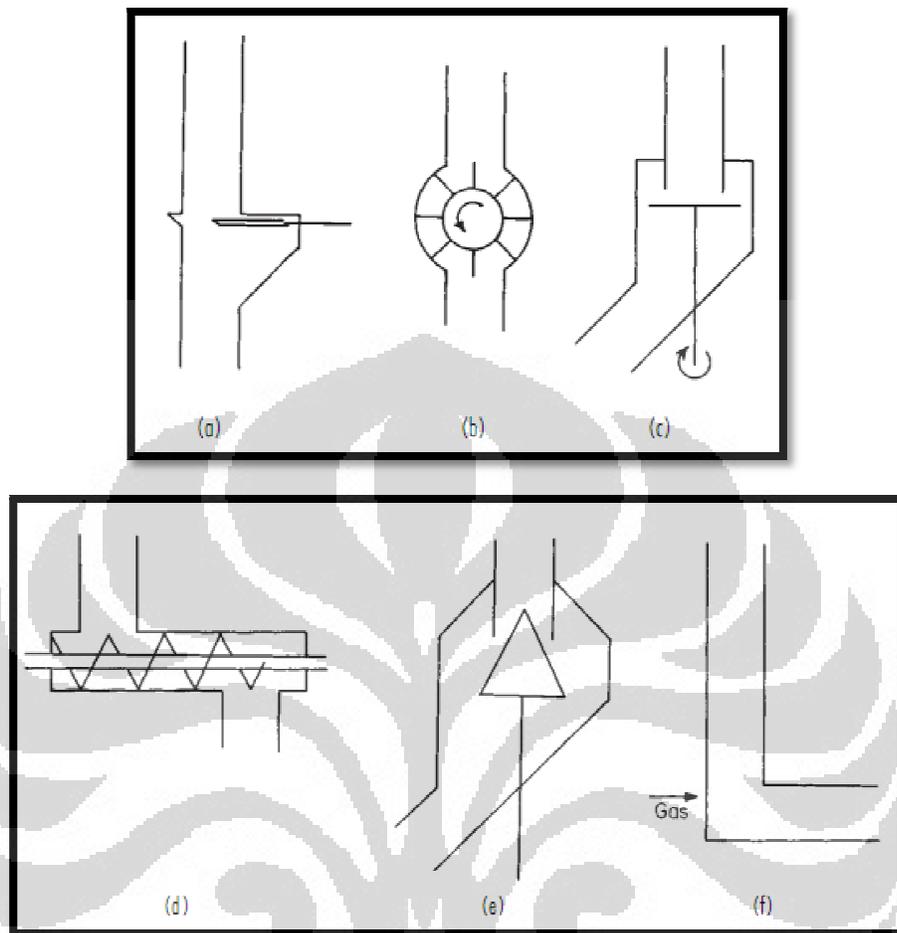
Gambar 2.14 Distributor yang Digunakan pada *Fluidized Bed Combustor* UI

3. *Plenum*

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

2.4.3.2 *Solid Feeder*

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



Gambar 2.15 Jenis-Jenis *Solid Flow Control*; (a) *Slide Valve*(b) *Rotary Valve*; (c) *Tabel Feeder*; (d) *Screw Feeder*; (e) *Cone Valve*; (f) *L Valve*

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

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



Gambar 2.16 Screw Feeder

2.4.3.3 Burner

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

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



Gambar 2.17 *Burner yang Digunakan pada Fluidized Bed Combustor UI*

2.4.3.4 *Bed Material*

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

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

- *Group A*

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

- *Group B*

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

- *Group C*

Kelompok ini memiliki ukuran rata-rata diameter partikel yang lebih kecil ($<30 \mu m$) dengan densitas yang kecil. Partikelnya sangat halus seperti tepung. Fluidisasi sangat sulit terjadi karena gaya interstitial antara partikel mempunyai efek yang lebih besar dibandingkan gaya gravitasi.

- *Group D*

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

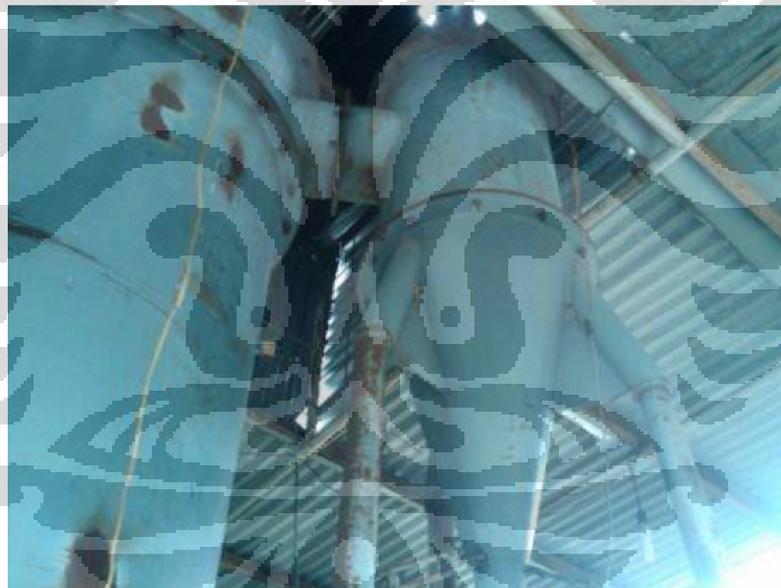
Untuk tujuan fluidisasi yang baik, sebaiknya menggunakan pasir silika atau pasir kuarsa dengan ukuran diameter $400 - 600 \mu m$. Pasir jenis ini diklasifikasikan diantara grup B. Pasir kuarsa dan pasir silika tidak jauh berbeda kandungannya, keduanya sama-sama memiliki kandungan SiO_2 . Kedua pasir tersebut berasal dari batuan yang sangat keras sehingga sangat cocok digunakan untuk penggunaan pada temperatur tinggi dan sebagai media pemindah panas.

2.4.3.5 Cyclone Separator

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

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

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



Gambar 2.18 *Cyclone Separator Fluidized Bed Combustor UI*

2.4.3.6 Blower Tiup (*Forced Draft Fan*)

Blower merupakan salah satu komponen vital yang digunakan untuk aplikasi teknologi *fluidized bed*. Blower tersebut berfungsi untuk mengalirkan udara ke reaktor dengan debit tertentu sehingga pasir silika yang ditopang dengan plat distributor tersebut terfluidisasi. Blower harus dapat memberikan aliran udara dengan

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



Gambar 2.19 Blower Tiup (*Forced Draft Fan*)

2.4.3.7 Blower Hisap (*Induced Draft Fan*)

Blower Hisap (*Induced Draft Fan*) yang dipakai dalam lab FBC ini berjenis sentrifugal blower. Kegunaan dari blower ini adalah untuk menghisap asap hasil pembakaran melalui *ducting* kemudian dialirkan menuju cerobong. Blower ini berbahan dasar *stainless steel* agar tahan terhadap temperatur tinggi aliran asap yang melewatinya. Dengan tipe impeller sirocco, blower ini bisa menahan temperatur sampai dengan 200 °C. Pengaturan kecepatan blower ini juga harus diperhatikan sesuai dengan kebutuhan.



Gambar 2.20 Blower Hisap (*Induced Draft Fan*)

2.4.3.8 Instrumentation

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

1. *Control Panel 1*

Berfungsi untuk mengontrol putaran feeder dan putaran blower tiup (*Forced Draft Fan*)



Gambar 2.21 *Control Panel 1*

2. *Control Panel 2*

Berfungsi untuk mengatur putaran blower hisap (*Induced Draft Fan*)



Gambar 2.22 *Control Panel 2*

3. *Termokopel*

Berfungsi untuk mengukur temperatur di dalam ruang bakar.



Gambar 2.23 Termokopel

4. *Data Acquisition (DAQ)*

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

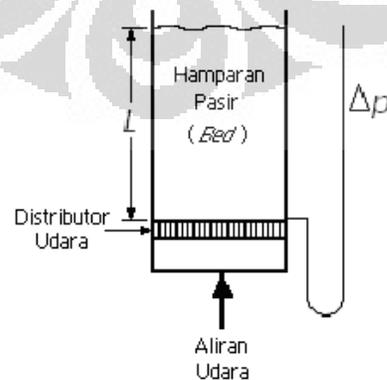


Gambar 2.24 *Data Acquisition (DAQ)*

2.5 Fenomena Fluidisasi

2.5.1 Proses Fluidisasi

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

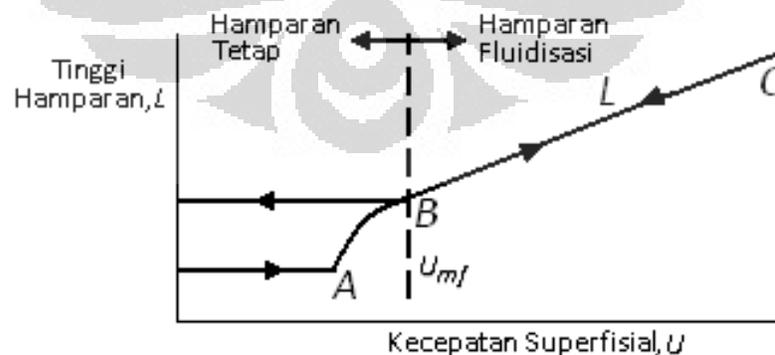


Gambar 2.25 Skematik Fluidisasi

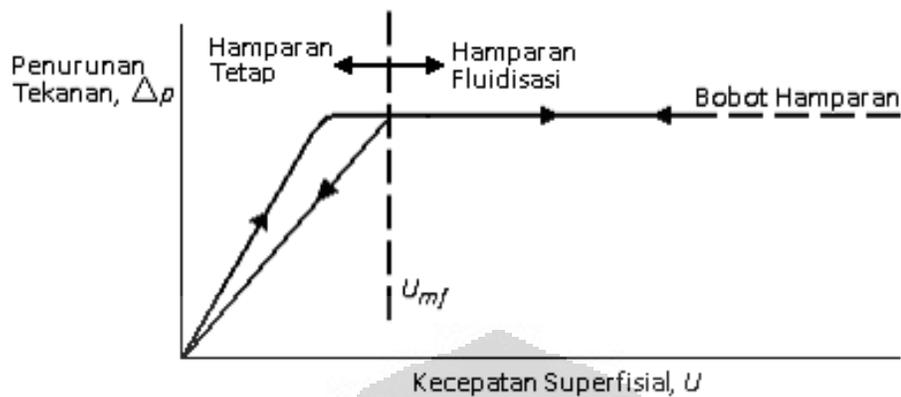
2.5.2 Kondisi Fluidisasi

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

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



Gambar 2.26 Hubungan Tinggi Hamparan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hamparan Zat Padat



Gambar 2.27 Hubungan Penurunan Tekanan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hamparan Zat Padat

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

2.5.3 Jenis-Jenis Fluidisasi

2.5.3.1 Fluidisasi partikulat (*particulate fluidization*)

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

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

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

2.5.3.2 Fluidisasi gelembung (*bubbling fluidization*)

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

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

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

2.5.4 Parameter-Parameter Fluidisasi

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

2.5.4.1 Ukuran partikel

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

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

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

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

2.5.4.2 Massa jenis padatan

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

2.5.4.3 Sphericity

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

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

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

2.5.4.4 Bed Voidage

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

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

2.5.4.5 Kecepatan Fluidisasi Minimum

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

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

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

$$\text{Re}_{mf} = \frac{\bar{d}_p \rho_f U_{mf}}{\mu_f}$$

bilangan *Archimedes* (Ar):

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

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

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

2.5.4.6 Penurunan Tekanan Melintas Hampanan

Suatu hampanan 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 hampanan yang tidak tenang, partikel-partikel tersebut menyusun kembali sendiri untuk memberikan lebih sedikit resistansi terhadap aliran fluida dan hampanan akan cenderung untuk mengembang. Dengan menaikkan lagi kecepatan aliran ke atas, berkembangnya hampanan akan terus berlanjut sampai suatu kondisi tercapai yang mana gaya seret yang terjadi pada partikel-partikel cukup untuk

menopang berat partikel-partikel dalam hamparan. Sehingga penurunan tekanan melintas hamparan (ΔP_b) akan kurang lebih sama dengan berat hamparan per satuan luas.

Persamaan penurunan tekanan melalui distributor melintas hamparan pasir adalah:

$$\Delta P_b = h(\rho_p - \rho_f)(1 - \epsilon)g$$

keterangan :

- ΔP_b = penurunan tekanan melewati hamparan (N/m^2)
- h = tinggi hamparan pasir (kg)
- ρ_p = massa jenis partikel pasir (kg/m^3)
- ρ_f = massa jenis fluida udara (kg/m^3)
- ϵ = *bed voidage*
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)

2.5.4.7 Penurunan Tekanan Melintas Distributor

Bila dilihat dari sudut pandang bagaimana udara didistribusikan, maka kebutuhan mendasar adalah merancang suatu distributor sedemikian rupa sehingga udara yang mengalir melewati distributor tersebut mengalami penurunan tekanan yang secukupnya, ΔP_D . Jumlah orifis, nozzle, dan sebagainya yang dibutuhkan pada distributor untuk mencapai besar nilai penurunan tekanan ini harus ditentukan dahulu. Kita pertimbangkan dahulu contoh kasus paling sederhana dari sebuah distributor *perforated plate*. Jika kecepatan udara superfisial dalam *windbox* atau ruang plenum adalah U_o dan *fractional open area* dari distributor (yaitu fraksi dari jumlah total luas bukaan pada aliran udara yang melewati distributor) adalah f_{oa} , maka kecepatan udara rata-rata melewati orifis adalah:

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

sehingga persamaan penurunan tekanan melalui distributor adalah:

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

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

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

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

Keterangan :

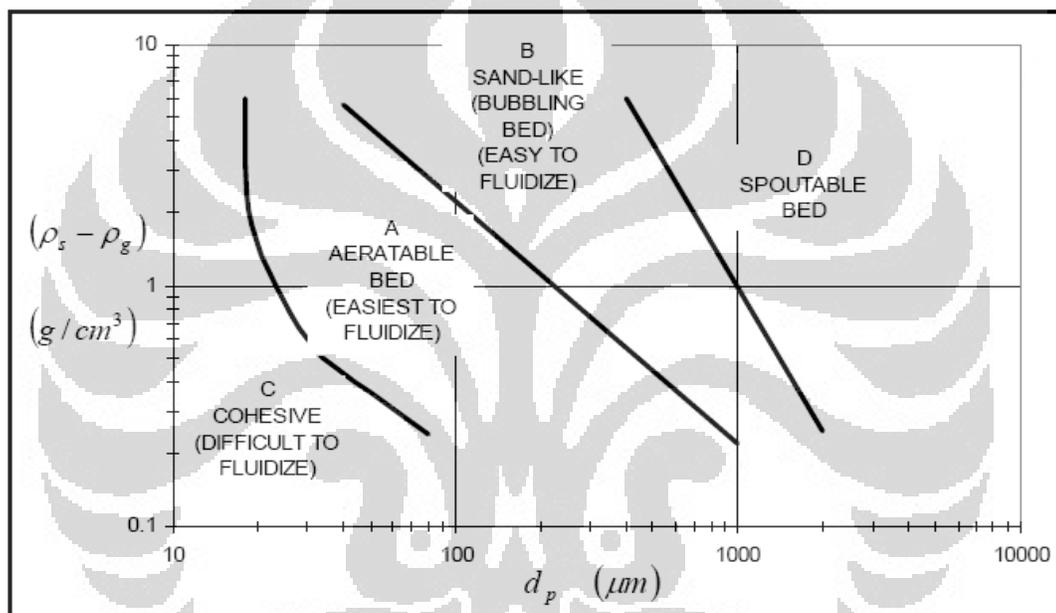
- ΔP_d = penurunan tekanan melewati distributor (N/m^2)
- U_o = kecepatan udara superfisial (m/s)
- U_{or} = kecepatan udara rata-rata melewati orifis (m/s)
- f_{or} = *fractional open area* (m^2)
- ρ_f = massa jenis fluida udara (kg/m^3)
- C_D = *Orrifice discharge coefficient*
- t = tebal plat distributor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

2.5.4.8 Klasifikasi Pasir

Pasir diklasifikasikan berdasarkan bagaimana pasir tersebut terfluidisasi saat dialirkan aliran udara pada kecepatan udara tertentu. Setiap masing-masing kelompok pasir memiliki karakteristik yang berbeda-beda seperti bagaimana terbentuknya gelembung, *solid mixing* yang terjadi, tingkat mengembangnya pasir dan besarnya

nilai penurunan tekanan yang semuanya dipengaruhi oleh diameter partikel pasir dan massa jenis pasir tersebut.

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



Gambar 2.28 Diagram Klasifikasi Jenis-Jenis Pasir.

(sumber: Geldart, 1991)

Klasifikasi jenis-jenis pasir menurut Geldart, yaitu :

a) *Group A*

Pasir yang dikategorikan dalam *group A* menurut Geldart biasanya memiliki massa jenis kurang dari 1400 kg/m^3 dan memiliki ukuran berkisar antara 20 sampai $100 \mu\text{m}$. Hamparan pasir pada kelompok ini sangat mengembang pada kecepatan udara antara U_{mf} dan kecepatan yang mana gelembung mulai terjadi, U_{mb} , karena pasir kelompok ini sedikit kohesif. Pasir jenis ini memperlihatkan suatu peningkatan hamparan (*bed*) nyata yang mengembang stabil ketika kecepatan fluidisasi minimum

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

b) *Group B*

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

c) *Group C*

Pasir *group C* merupakan pasir yang ukuran rata-ratanya lebih kecil dibandingkan yang lainnya ($<30 \mu m$) dan atau massa jenis yang lebih kecil juga sehingga gaya-gaya antar partikel mempunyai pengaruh yang lebih besar daripada gaya gravitasi. Pasir jenis ini sangat sulit untuk terfluidisasi. Hal ini dikarenakan besar penurunan tekanan sama dengan berat per unit luas. Hal ini menunjukkan bahwa peranan dari berat, bahkan jika hamparan menunjukkan sifat-sifat tampaknya

seperti fluida, disokong oleh gaya antar partikel dan persinggungan permukaan partikel. Pada pasir jenis ini, *channelling* sangat mudah terjadi. Sekali hal ini terjadi, maka cenderung memperbesar jalurnya ketika meningkatkan kecepatan udara sehingga udara tidak terdistribusi dengan baik yang mana tidak pernah terjadi benar-benar fluidisasi.

d) *Group D*

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

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

sampai permukaan hamparan. Jika *channelling* tidak terbentuk, maka seluruh hamparan akan terangkat seperti piston. Semua kelompok partikel pasir ini (*group A, B, C, dan D*) ketika kecepatan gas dinaikkan lagi, densitas hamparan akan berkurang dan tubulensi meningkat.

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

Tabel 2.5 *Increasing Size and Density*

(Sumber: Geldart, 1991)

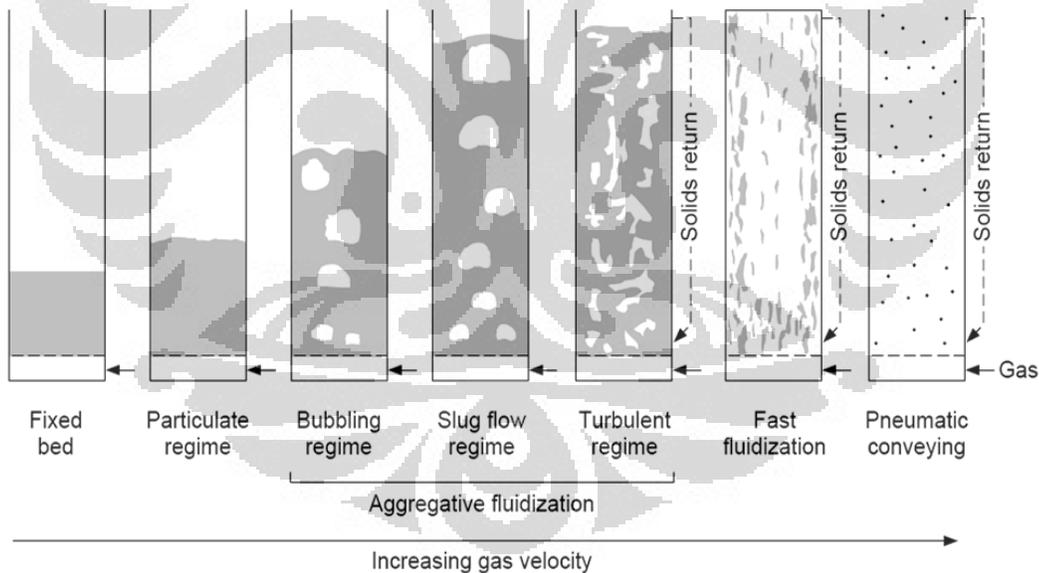
Group	C	A	B	D	
Most obvious characteristic	Cohesive, difficult to fluidize	Bubble-free range of fluidization	Starts bubbling at U_{mf}	Coarse solids	
Property	Flour, cement	Cracking catalyst	Building sand, table salt	Crushed limestone coffee beans	
1. Bed expansion	Low when bed channel, can be high when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

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

^b At equal d_p .

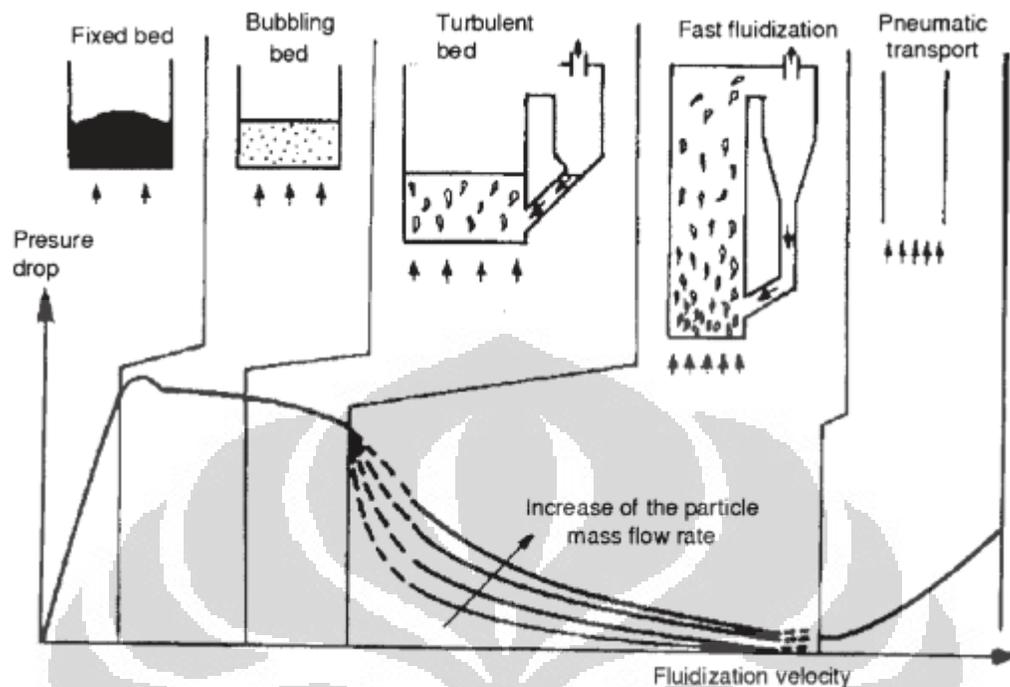
2.5.4.9 Daerah Batas Fluidisasi (*Fluidization Regimes*)

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



Gambar 2.29 Daerah Batas Fluidisasi

(sumber: Grace, 1986)



Gambar 2.30 Grafik Penurunan Tekanan Terhadap Kecepatan Fluidisasi untuk Perbedaan Daerah Batas Fluidisasi

2.6 Sifat Fisik dari Partikulat Padatan

Bulk density dari partikulat padat adalah massa dari partikel per satuan volume *bed*. *Bulk density* selalu lebih kecil daripada densitas sebenarnya dari partikel padat dikarenakan volume *bed* telah termasuk volume void antara partikel. *Bulk density* bergantung pada ukuran dan bentuk partikel, bentuk permukaan partikel, densitas dari partikel padat dan mode dari partikel “*packing*”. Jika mode dari partikel “*packing*” diabaikan, kesalahan besar mungkin terjadi dalam penentuan *bulk density*. *Bulking* dari bahan yang longgar untuk kedalaman besar, getaran dinding *furnace* dll, dapat mengakibatkan *bed* yang tidak *bubbling*, “*packing*” partikel yang lebih baik dan peningkatan *bulk density*. Titik tertinggi dan terendah dari *bulk density* dari partikulat padat dapat berbeda sebanyak 1,5 kali. *Bulk density* dapat dihitung dari persamaan berikut:

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_b} = \rho_p (1 - \epsilon)$$

Tingkat kekasaran dari partikulat padat dapat ditentukan tergantung dari *bulk density*:

- Material Ringan ($\rho_b < 600 \text{ kg/m}^3$)
- Material Sedang ($600 \text{ kg/m}^3 < \rho_b < 2000 \text{ kg/m}^3$)
- Material Berat ($\rho_b > 2000 \text{ kg/m}^3$)

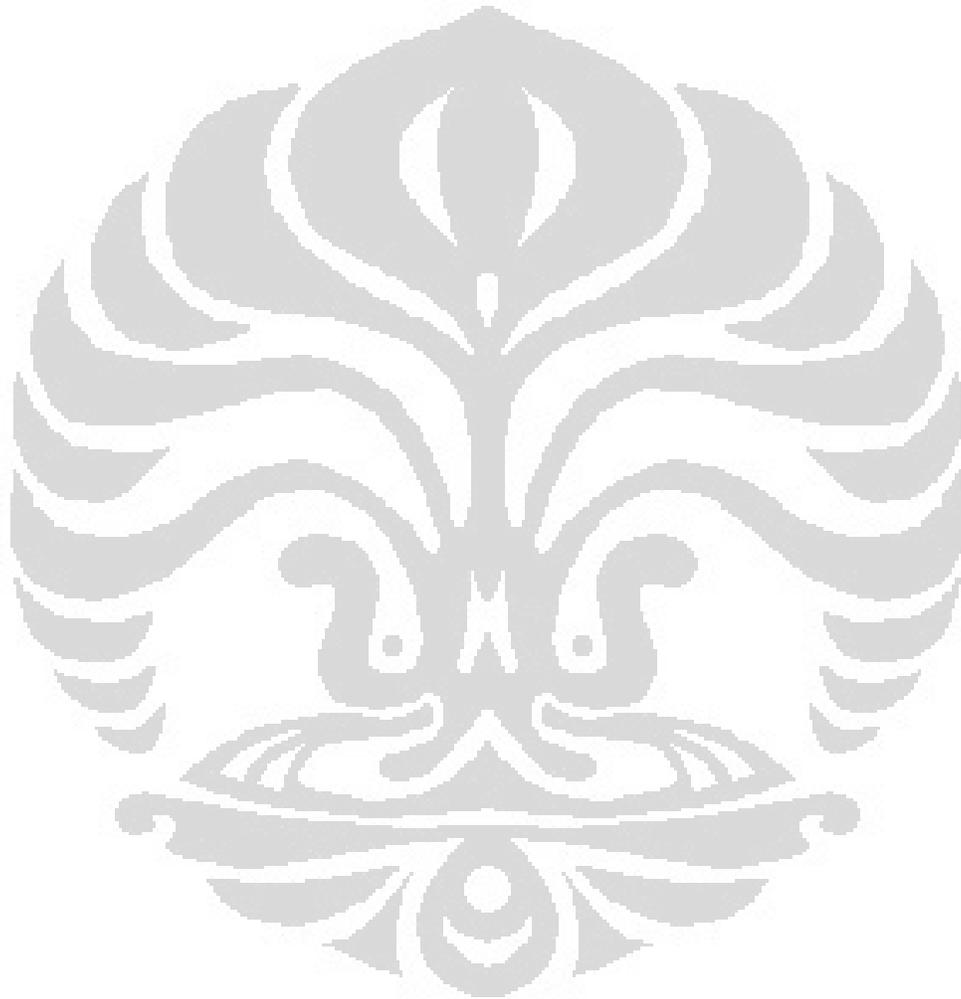
Tabel 2.6 *Bulk Density* dari Beberapa Partikulat Padat
(Sumber: Simeon N Oka. 2004)

Material	ρ_b [kg/m ³]
Pasir	1200-1400
Batu Kapur	1200-1400
Batu Bara	600-800
Abu	1200-1500
Bijih Besi (<i>Pulverized</i>)	2800-3000
Garam Meja	800-900
Semen	1300-1900
Beras Putih	770

Banyak partikulat padat berporos di bagian dalamnya. Oleh karena itu perlu adanya pembedaan diantara densitas partikel (termasuk volume dari poros), ρ_p dan densitas sebenarnya, ρ_s (densitas skeletal). ρ_s biasa disebut dengan densitas sebenarnya dan ρ_p lebih sering disebut densitas partikel. Batu bara adalah salah satu contoh dari partikel yang berporos. Tidak boleh diabaikan pada sebuah proses pembakaran untuk beberapa jenis batubara dimana pembakarannya tidak hanya berlangsung pada bagian permukaan saja tetapi juga masuk ke dalam poros yang terdapat pada batubara tersebut. Dalam hal seperti itu, densitas skeletal dibutuhkan

serta pengetahuan bagaimana densitas partikel berubah selama proses pembakaran. Kedua densitas tersebut terhubung dalam persamaan berikut:

$$\rho_p = \frac{1 + \rho_f \xi_p}{\frac{1}{\rho_s} + \xi_p}$$

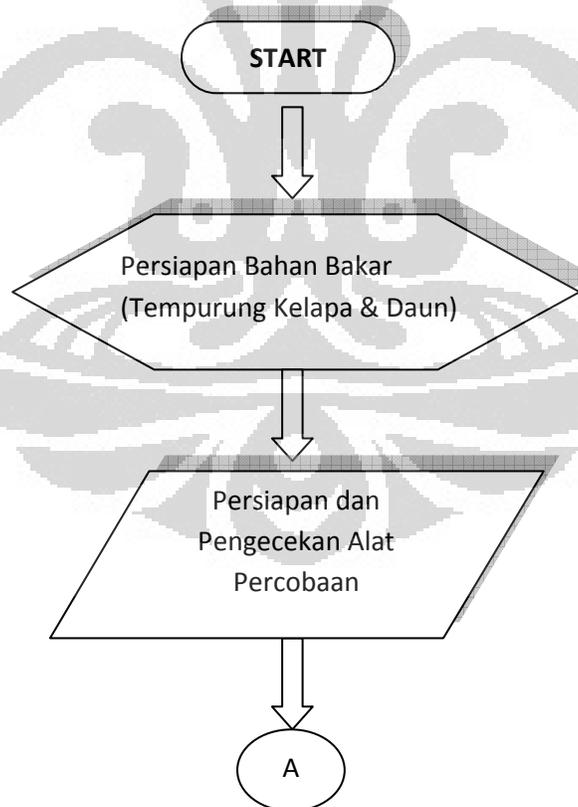


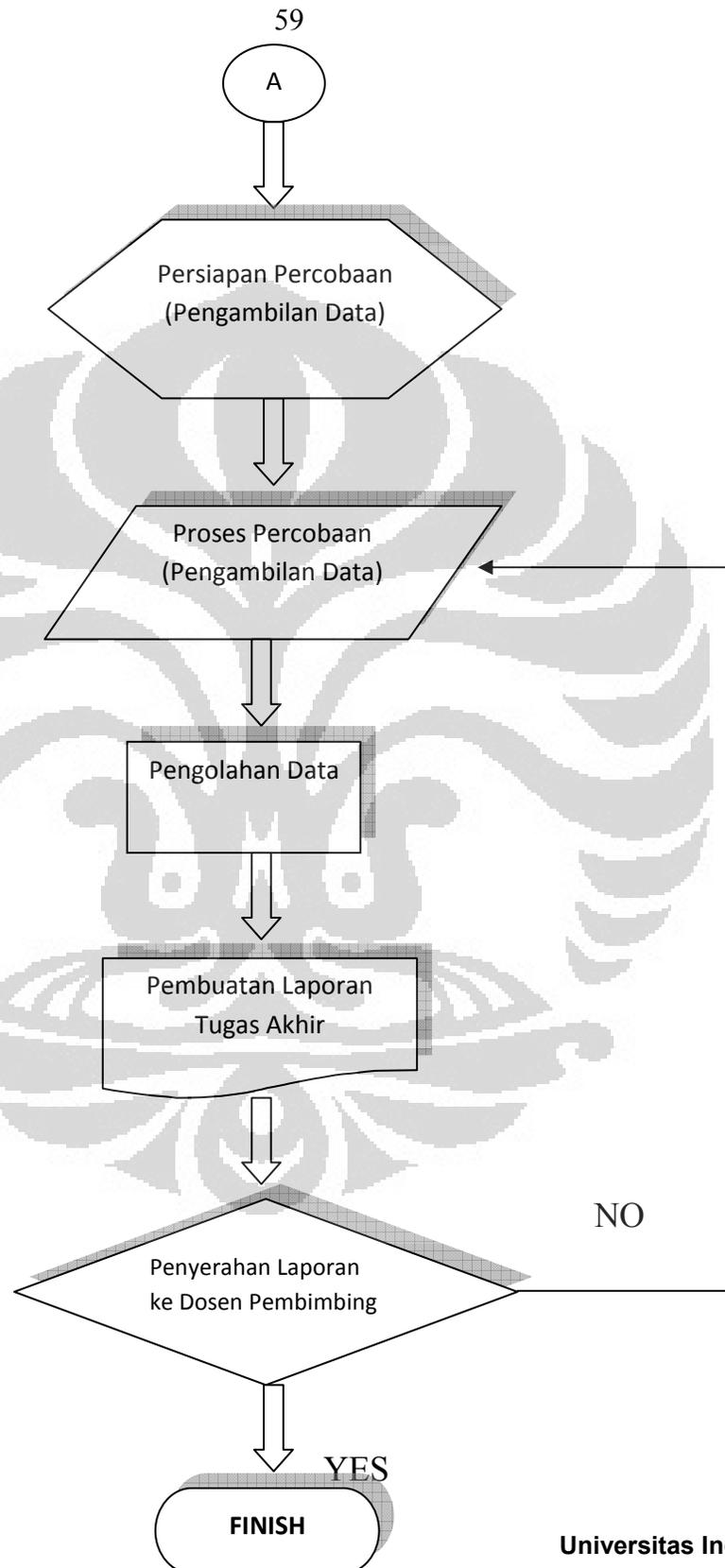
BAB 3 PERSIAPAN DAN PROSEDUR PENGUJIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Sebelum melakukan pengoperasian pada *fluidized bed combustor* UI tersebut secara baik dan benar, perlu dilakukan pengujian semua peralatan secara keseluruhan. Dalam melakukan pengujian pada alat, diperlukan persiapan dan prosedur pengujian yang sesuai dengan kondisi dari alat tersebut. agar proses pengujian berlangsung lebih efektif, efisien, dan mendapatkan hasil yang semaksimal mungkin. Demikian juga dengan persiapan yang harus dilakukan sebelum melakukan pengujian pada FBC yang ada di Universitas Indonesia, 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 studi perbandingan karakteristik pembakaran menggunakan bahan bakar daun sebelum dan setelah pemasangan *induced draft fan*

3.2 Persiapan Pengujian

3.2.1 Bahan Bakar Biomassa

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

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

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



Gambar 3.1 Tempurung Kelapa

Tempurung kelapa merupakan salah satu biomassa yang mudah didapatkan di Indonesia. Dalam satu tahun, Indonesia dapat menghasilkan 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 penggajian kayu	1,1 juta ton/tahun	10,6
Tandan kosong kelapa sawit	3,5 juta ton/tahun	15,4
Sabut/sisa buah sawit	3,7 juta ton/tahun	35,3
Cangkang buah sawit	1,3 juta ton/tahun	17,2
Bagas tebu	6,5 juta ton/tahun	78,0
Sekam padi	14,3 juta ton/tahun	179,0
Tempurung kelapa	1,1 juta ton/tahun	18,7
Sabut kelapa	2,0 juta ton/tahun	24,0

Proses pengolahan tempurung kelapa yang masih merupakan bahan baku menjadi tempurung kelapa yang siap menjadi bahan bakar memerlukan dua proses, yakni pelepasan sabut dan pencacahan tempurung kelapa tersebut dengan menggunakan alat pencacah berupa mesin *crusher*, sehingga tempurung kelapa menjadi bagian-bagian kecil untuk memudahkannya menjadi bahan bakar dalam proses FBC

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

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

Mengacu pada penelitian Nanda Prima (2011) yang berjudul “Studi Karakteristik Pengujian Pembakaran Biomassa Tempurung Kelapa 1 x 1 cm dan 1,5 x 1,5 cm di Fluidized Bed Combustor Universitas Indonesia” tertera bahwa proses pemanasan awal menggunakan tempurung kelapa ukuran 1x1 cm lebih baik dibandingkan menggunakan ukuran 1,5x1,5 cm dalam hal tingkat kestabilan temperatur pembakaran. Kestabilan kondisi pembakaran terlihat dari fluktuasi yang ditampilkan dari grafik pada saat running (yang tercantum pada display monitor DAQ), dan dari fluktuasi yang ditampilkan pada grafik hasil pengukuran temperatur percobaan. Apabila amplitudo fluktuasi pada grafik suhunya cenderung kecil, maka bisa dikatakan proses tersebut dalam kondisi yang stabil.

Pada penelitian ini tempurung kelapa hanya digunakan sebagai bahan bakar pada pemanasan awal hingga mencapai suhu optimal untuk *self sustained combustion*.



Gambar 3.2 Persiapan Bahan Bakar Tempurung Kelapa

Pada saat suhu telah optimal dan *self sustained combustion* telah terjadi maka bahan bakar diganti menggunakan daun. Daun tidak dijadikan sebagai bahan bakar dari pemanasan awal dikarenakan menurut percobaan yang telah dilakukan suhu optimal untuk *self sustained combustion* sulit didapatkan dan sisa-sisa hasil pembakarannya cenderung menumpuk. Suhu yang kurang optimal tersebut yang membuat daun tidak terbakar sempurna dan terdapat banyak sisa-sisa pembakaran di

dalam pasir. Hal inilah yang dapat membuat kondisi *bed* menjadi tidak *bubbling*. Sehingga diputuskan untuk pemanasan awal menggunakan tempurung kelapa karena telah valid dalam mencapai *self sustained combustion* pada penelitian sebelumnya.



Gambar 3.3 Daun Kering yang Digunakan sebagai Bahan Bakar

Setelah dilakukan pencarian literatur dan bertanya kepada pihak terkait, data untuk sampah daun di Universitas Indonesia sendiri tidak tersedia. Akan tetapi bila berkunjung ke Universitas Indonesia sampah daun merupakan hal yang lumrah dan wajar mengingat banyaknya pepohonan yang berada di dalam lingkungan kampus. Dari hal ini dapat terlihat bahwa potensi biomassa dalam hal ini daun mempunyai jumlah yang melimpah.

Daun yang digunakan pada penelitian ini didapatkan dari ibu penyapu jalanan di sekitar daerah asrama dengan memberikan insentif kepada beliau sehingga pada penelitian ini dapat berdampak langsung terhadap masyarakat sekitar. Daun ini Daun yang telah dikumpulkan kemudian dijemur agar kandungan airnya berkurang. Daun yang digunakan tidak dilakukan perlakuan lebih lanjut seperti pencacahan atau dihancurkan.

3.2.2 Pasir

Pasir yang digunakan akan sangat berpengaruh terhadap berhasil tidaknya proses fluidisasi dan pembakaran yang akan dilakukan. Dalam menentukan jenis pasir yang akan digunakan pada alat FBC UI ini sebaiknya menggunakan pasir silika atau

pasir kuarsa untuk tujuan mendapatkan fluidisasi yang baik dengan densitas partikelnya kurang lebih sebesar 2600 kg/m^3 . Pasir silika dan pasir kuarsa juga memiliki nilai *specific heat* (kalor jenis) yang kecil sehingga sangat baik dalam menyimpan kalor. Karena semakin kecil nilai *specific heat* suatu material maka akan semakin mudah untuk menaikkan temperatur material tersebut. Dengan massa dan besar kenaikan temperatur yang sama, dua material yang berbeda dengan nilai kalor jenis yang jauh berbeda akan memiliki besar jumlah kalor yang jauh berbeda pula untuk menaikkan temperaturnya.

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

Tabel 3.2 *Specific Heat* Berbagai Substansi

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

granit	0,19	794
--------	------	-----

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

Tabel 3.3 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 μm sampai 500 μm .

Pasir yang terpilih tersebut kemudian diperoleh dengan melakukan pengayakan bertingkat. Ayakan (*sieve*) bertingkat digunakan untuk melakukan pengamatan terhadap nomor kehalusan butiran (*grain fineness number*), dan dapat dilihat seperti pada tabel 3.4 yang mana terdapat ukuran lubang ayakan (*mesh*)

menurut standar di Amerika. Berdasarkan tabel tersebut maka partikel pasir yang berkisar antara 300 μm sampai 500 μm adalah partikel pasir dengan ukuran diameter partikel pasir antara *mesh* 35 sampai *mesh* 50.

Tabel 3.4 Distribusi Ukuran Pengayakan Pasir Silika

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

(Sumber: AGSCO silica sand technical data sheet)

Pada literatur di atas yang sesuai untuk digunakan adalah pasir silika dengan ukuran mesh 40-50, karena bila menggunakan pasir silika dengan ukuran mesh 30 masih terlalu besar dari yang diinginkan dan bila menggunakan pasir silika dengan

Universitas Indonesia

ukuran mesh 40-70 akan terlalu halus. Akan tetapi berdasarkan penelitian Azmi Muntaqo (2011) yang berjudul “Studi Karakteristik Pembakaran Biomassa Tempurung Kelapa pada Fluidized Bed Combustor Universitas Indonesia dengan partikel bed berukuran mesh 20-40” tertera bahwa temperatur pada kondisi kerja saat percobaan menggunakan pasir silika mesh 20-40 mempunyai temperatur lebih tinggi dibandingkan dengan percobaan dengan hamparan pasir *mesh* 40-50 karena api yang terbentuk di dalam ruang bakar. Temperatur agar bahan bakar dapat terbakar pada kondisi kerja menggunakan hamparan pasir *mesh* 40-50 adalah sekitar 567°C. Temperatur ini lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan hamparan pasir *mesh* 30, yaitu sekitar 631°C. Sehingga mengacu pada penelitian tersebut, penelitian pada kali ini menggunakan pasir silika mesh 20-40.



Gambar 3.4 Pasir Silika Mesh 20-40 yang Digunakan pada FBC UI

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

- massa jenis partikel pasir (ρ_p) = 2600 kg/m³
- massa jenis borongan pasir (ρ_b) = 1300 kg/m³
- diameter hamparan pasir (d_b) = 63,5 cm = 0,635 m
- tinggi hamparan pasir (*bed height*) = 7,5 cm = 0,075 m

3.2.3 Perlengkapan dan Peralatan

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

1. *Generator Set*

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



Gambar 3.5 Generator Set yang Digunakan

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

- *rated voltage* : 220 V
- *rated frequency* : 50 Hz
- *peak power* : 4 kVA
- *rated power* : 3,5 kVA

- *power factor* : 1,0
- *fuel consumption* : 2 litre / hour (bensin)

2. Termokopel

Jenis termokopel yang digunakan 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
- T6 = 219,5 cm = 2,195 m



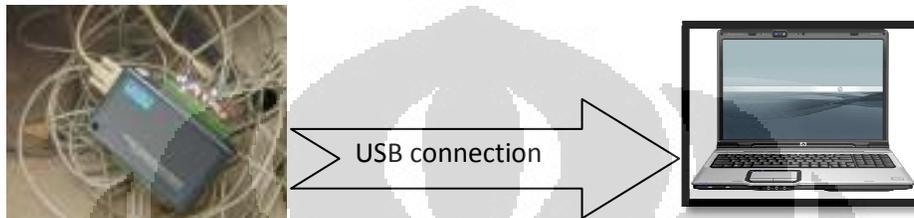
(a)

(b)

Gambar 3.6 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*. Mengenai *data sheet* spesifikasi DAQ yang digunakan, terdapat pada bagian lampiran tulisan ini.



Gambar 3.7 *Data Acquisition (DAQ)*

4. Timbangan (*weight scale*)

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



Gambar 3.8 Timbangan dengan Skala Maksimum 5 kg

5. *Control Panel 1*

Panel kontrol ini berfungsi sebagai pengontrol dan pengatur dari putaran motor feeder dan putaran blower tiup (*Forced Draft Fan*) 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 3.9 *Control Panel 1* yang Digunakan untuk *Feeder* dan *Blower* Tiup (*Forced Draft Fan*)

6. *Control Panel 2*



Gambar 3.10 *Control Panel 2* yang Digunakan untuk *Blower* Hisap (*Induced Draft Fan*)

Panel kontrol ini berfungsi sebagai pengontrol dan pengatur putaran blower hisap (*Induced Draft Fan*) yang akan dioperasikan. Pada panel kontrol ini terdapat satu *inverter* yang memiliki *switch*. *Inverter* atau yang dikenal juga sebagai *variable-frequency drives* merupakan alat untuk pengontrol kecepatan yang akurat dan pengontrol putaran dari motor. *Inverter* yang digunakan bermerk Siemens.

3.3 Standar Operasi Alat Pengujian

3.3.1 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 3.11 Sistem *Feeder* pada *Fluidized Bed Combustor* UI

Berikut ini beberapa spesifikasi pada sistem feeder tersebut :

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

Tabel 3.5 Spesifikasi Motor *Feeder*

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

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

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

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

Namun pada percobaan ini sistem *feeder* tidak digunakan. Hal ini dikarenakan listrik yang tersedia dari *generator set* tidak mencukupi untuk menyuplai kebutuhan listrik untuk seluruh sistem *fluidized bed combustor* UI. Untuk mengatasi hal ini,

bahan bakar dimasukkan melalui pintu pada bagian *feeder* yang mengarah ke ruang bakar, sehingga bahan bakar langsung turun ke dalam ruang bakar.

3.3.2 Blower

3.3.2.1. Blower Tiup (*Forced Draft Fan*)

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 3.12 Ring Blower untuk *Forced Draft Fan*

Spesifikasi dari blower yang digunakan adalah sebagai berikut ini :

Tabel 3.6 Spesifikasi Teknis *Ring Blower*

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

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

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

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

3.3.2.2. Blower Hisap (*Induced Draft Fan*)

Blower Hisap (*Induced Draft Fan*) yang dipakai dalam lab FBC ini berjenis sentrifugal blower. Kegunaan dari blower ini adalah untuk membentuk aliran udara kontinu yang diperlukan dalam jumlah sesuai bagi pembakaran sehingga tekanan di *furnace* tetap terjaga serta menghisap dan membuang gas sisa hasil produk pembakaran. Blower ini berbahan dasar *stainless steel* agar tahan terhadap temperatur tinggi aliran asap yang melewatinya. Dengan tipe impeller sirocco, blower ini bisa menahan temperatur sampai dengan 200 °C. Pengaturan kecepatan blower ini juga harus diperhatikan sesuai dengan kebutuhan.



Gambar 3.13 *Centrifugal Blower* sebagai *Induced Draft Fan*

Spesifikasi dari blower yang digunakan adalah sebagai berikut ini :

Tabel 3.7 Spesifikasi Teknis *Centrifugal Blower*

<i>Phase</i>	1
<i>Frequency (Hz)</i>	50
<i>Power (kW)</i>	1,1
<i>Voltage (V)</i>	220
<i>Current (A)</i>	6,5
<i>Pressure (Pa)</i>	840
<i>Air Flow (CMH)</i>	2300
<i>Inlet Pipe</i>	15"
<i>Weight (kg)</i>	11

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 control* 2 untuk blower hisap, 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 *circuit breaker* dengan menekan ke arah atas
4. Aktifkan saklar yang berada di bagian pintu *control panel* dengan menekan ke arah atas.
5. Blower telah hidup, kemudian atur besarnya *rpm* yang diinginkan dengan memutar-mutar pengendali blower yang ada di pintu panel persis di bawah saklar.

6. Jika sudah selesai dan ingin mematikan blower, putar pengendali ke nol lagi dan matikan saklar serta *circuit breaker* pada panel kontrol.

3.3.3 Sistem *Burner*

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

1. Buka *ball valve* utama gas masuk.
2. Atur tekanan kerja gas pada 20~30 mbar (200 ~ 300 mm H₂O).
3. Putar saklar *burner control* ke posisi *on* untuk mengaktifkan *burner control*. Pada tahap awal, *burner control* melakukan pengecekan status awal apakah ada tekanan udara palsu dan apakah ada api yang terdeteksi *UV sensor*. Bila gejala ini ditemukan, maka indikator burner *misfire* dan lampu merah reset akan menyala.
4. Blower akan berputar untuk menghasilkan tekanan yang stabil. Apabila tekanan blower di bawah nilai setting dari *air pressure switch* maka sistem akan di *cut-off* dan indikator *cut-off* akan menyala.
5. Setelah 10 detik proses *pre-purge* yang berguna untuk mengusir gas yang terperangkap (bila ada), maka *solenoid valve* untuk gas akan membuka. Pada saat bersamaan *ignition trafo* bekerja untuk membentuk *spark* listrik pada elektroda busi. Pertemuan campuran udara dan gas dengan percikan listrik akan menghasilkan nyala api. Atur besarnya volume gas untuk api pilot dengan memutar *needle valve* sampai api menyala konsisten.
6. *UV sensor* akan mendeteksi nyala api dan mengirim sinyal ke *burner control*. *Burner control* akan tetap membuka *solenoid valve* sehingga api

tetap menyala. Tapi bila pembacaan *UV sensor* kurang maka sistem akan di *cut-off* menjadi *misfire*. Bila hal ini terjadi, segera cari tahu apa penyebabnya dan segera tangani. Ulangi urutan proses (*sequence*) dari awal dengan menekan tombol reset atau memutar saklar *burner control* ke posisi *off* lalu nyalakan lagi dari awal.

7. Setelah nyala api terbentuk dapat dilakukan penyetelan untuk mendapat mutu nyala api yang bagus dan panjang api yang diinginkan.
8. Jika ingin mematikan burner, putar saklar burner ke posisi *off* dan pastikan bahwa api burner sudah mati semua.
9. Tutup *ball valve* utama gas masuk dan tutup katup utama pada tabung gas LPG.

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

- Penyetelan mutu api:

- a. Atur volume gas yang mengalir:

Putar bagian knop *needle valve*:

- Searah jarum jam: *flow* gas berkurang (-), api berubah menjadi lebih merah.
- Berlawanan jarum jam: *flow* gas bertambah (+), api menjadi lebih ke biru.

- b. Atur manual *air damper* pada posisi buka setengah yaitu skala nomor 5.

Posisi ini bisa diatur lebih lanjut untuk mendapatkan komposisi udara dan gas yang tepat untuk membentuk mutu nyala api yang bagus.

Kencangkan baut pengunci supaya posisi *damper* tidak berubah.

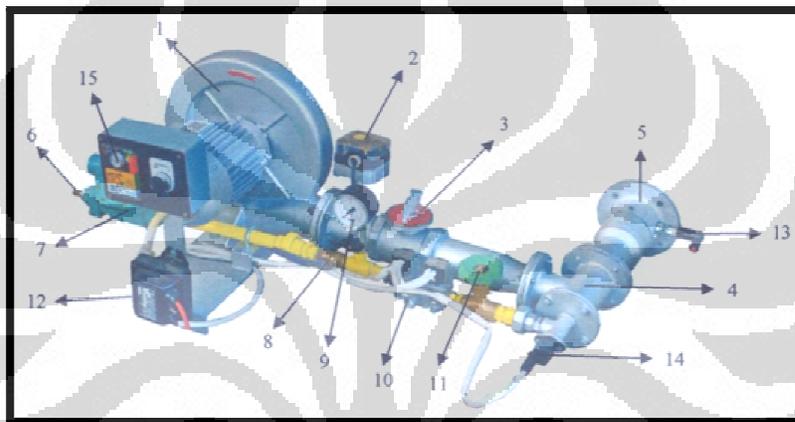
- Penyetelan panjang api:

- a. Atur *gas regulator* sehingga tekanan kerja antara 20~30 *mbar* (200~300 *mmH₂O*).

- b. Buka tutup dan putar penyetel:

- Searah jarum jam: tekanan gas bertambah (+), panjang api berubah menjadi lebih panjang.
 - Berlawanan jarum jam: tekanan gs berkurang (-), api menjadi lebih pendek.
- c. Selanjutnya atur kembali *dampers* udara untuk mendapatkan mutu nyala api yang bagus.

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



Gambar 3.14 Bagian-Bagian *Hi-Temp Premixed Burner*

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

Tabel 3.8 Spesifikasi Teknis *Hi-Temp Premixed Burner*

Burner	Kapasitas	75000 <i>kcal/jam</i>
	Bahan Bakar	LPG atau LNG

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

3.4 Prosedur Pengujian Pembakaran

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

3.4.1 Rangkaian Alat Pengujian

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

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

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



Gambar 3.15 Rangkaian Seluruh Alat untuk Melakukan Pengujian Pembakaran

3.4.2 Prosedur Pengambilan Data Pembakaran

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

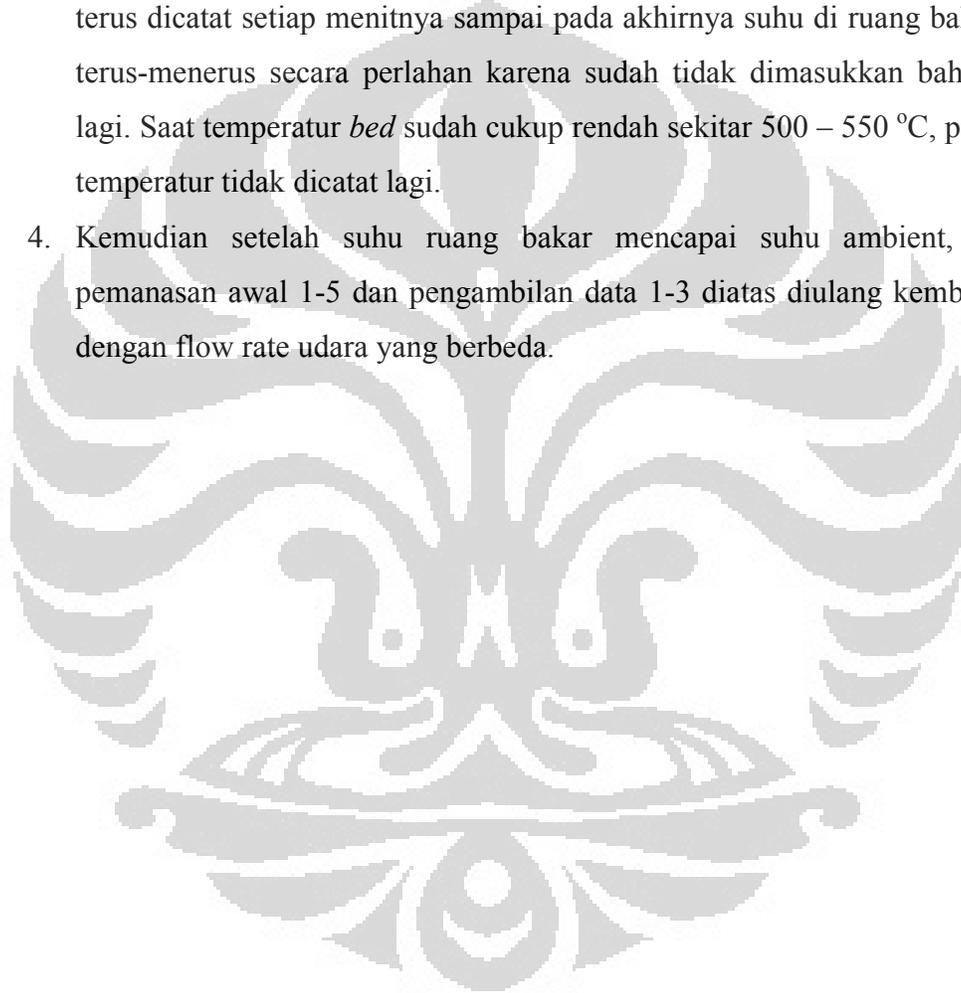
3.4.2.1 Prosedur pemanasan awal pembakaran

1. Pastikan semua persiapan, rangkaian dan posisi alat sudah dilakukan dengan benar sesuai dengan yang sudah disebutkan sebelumnya.
2. Menyalakan blower sebagai penyedia udara saat menyalakan burner dan saat proses pembakaran berlangsung, serta untuk proses fluidisasi pasir agar panasnya tersebar merata di seluruh pasir. Digunakan dua flow rate udara yang berbeda (jika dilihat putarannya, yang pertama ialah 3000 rpm).
3. Menyalakan *burner* untuk memanaskan *bed* (pasir) hingga *bed temperatur* mencapai suhu sekitar 400°C.
4. Setelah itu memasukkan solid fuel berupa cangkang kelapa ke dalam ruang bakar sampai temperatur *bed* mencapai suhu sekitar 750 – 800 °C. Temperatur pada *DAQ* dicatat setiap menitnya.
5. Kemudian burner dimatikan secara perlahan dan temperatur bed akan perlahan menurun dan ditunggu hingga suhunya stabil (kondisi steady) berada diantara 700 – 750 °C. Pada temperatur ini bahan bakar cangkang kelapa maupun ranting pohon sudah dapat terbakar dengan sendirinya (self-sustained combustion). Temperatur dicatat setiap menitnya.

3.4.2.2 Prosedur pengambilan data pembakaran

1. Setelah mencapai temperatur stabil tersebut, bahan bakar yang sudah disiapkan dengan sejumlah massa tertentu (0,25 kg, 0,5kg, hingga 2 kg) dan sesuai dengan ukuran dimensi yang diinginkan (1x1cm atau 1,5x1,5 cm) dimasukkan ke dalam ruang bakar.

2. Dimulai dari massa 0,25 kg, lalu mengamati perubahan temperatur yang terjadi dan dicatat setiap menitnya. Pada awalnya temperatur akan menurun kemudian naik lagi dan akhirnya saat bahan bakar habis terbakar masukkan bahan bakar dengan massa 0,5 kg. Perubahan temperatur setiap menitnya dicatat dan lakukan proses yang sama hingga bahan bakar massa 2 kg.
3. Setelah semua bahan bakar tersebut dimasukkan, perubahan temperturnya terus dicatat setiap menitnya sampai pada akhirnya suhu di ruang bakar turun terus-menerus secara perlahan karena sudah tidak dimasukkan bahan bakar lagi. Saat temperatur *bed* sudah cukup rendah sekitar 500 – 550 °C, perubahan temperatur tidak dicatat lagi.
4. Kemudian setelah suhu ruang bakar mencapai suhu ambient, langkah pemanasan awal 1-5 dan pengambilan data 1-3 diatas diulang kembali tetapi dengan flow rate udara yang berbeda.



BAB 4

HASIL DAN ANALISIS

4.1 Hasil Penelitian

Penulisan tugas akhir ini bertujuan untuk mengetahui kinerja dari *Fluidized Bed Combustor* Universitas Indonesia melalui perbandingan karakteristik pembakaran biomassa sebelum dan setelah pemasangan *Induced Draft Fan*. Pengujian karakteristik pembakaran pada penelitian ini menggunakan bahan bakar biomassa tempurung kelapa sebagai pemanasan awal, kemudian setelah mencapai *self sustained combustion* bahan bakar diganti menjadi menggunakan daun.

Kinerja dari *Fluidized Bed Combustor* dilihat dari perbandingan karakteristik pembakarannya yang ditinjau dari:

- Grafik pembakaran daun pada *self sustained combustion* selama 1 jam sebelum dan setelah modifikasi penambahan *induced draft fan*
- Grafik pembakaran daun pada *self sustained combustion* selama 2 jam sebelum dan setelah modifikasi penambahan *induced draft fan*
- Uji daya tahan pembakaran menggunakan bahan bakar daun pada *self sustained combustion* selama 3 jam

Pada bab 4 ini akan banyak dibahas mengenai perbandingan temperatur dimana data temperatur yang didapat berasal dari pengukuran termokopel yang kemudian pembacaan temperaturnya menggunakan DAQ. Oleh karena itu, akan diulang kembali penjelasan mengenai letak termokopel pada *Fluidized Bed Combustor* UI ini. Terdapat 6 buah termokopel yang dipasang pada *furnace*. Dengan mengacu pada distributor, termokopel ditempatkan dengan konfigurasi sebagai berikut:

T1 = 31,5 cm dibawah distributor

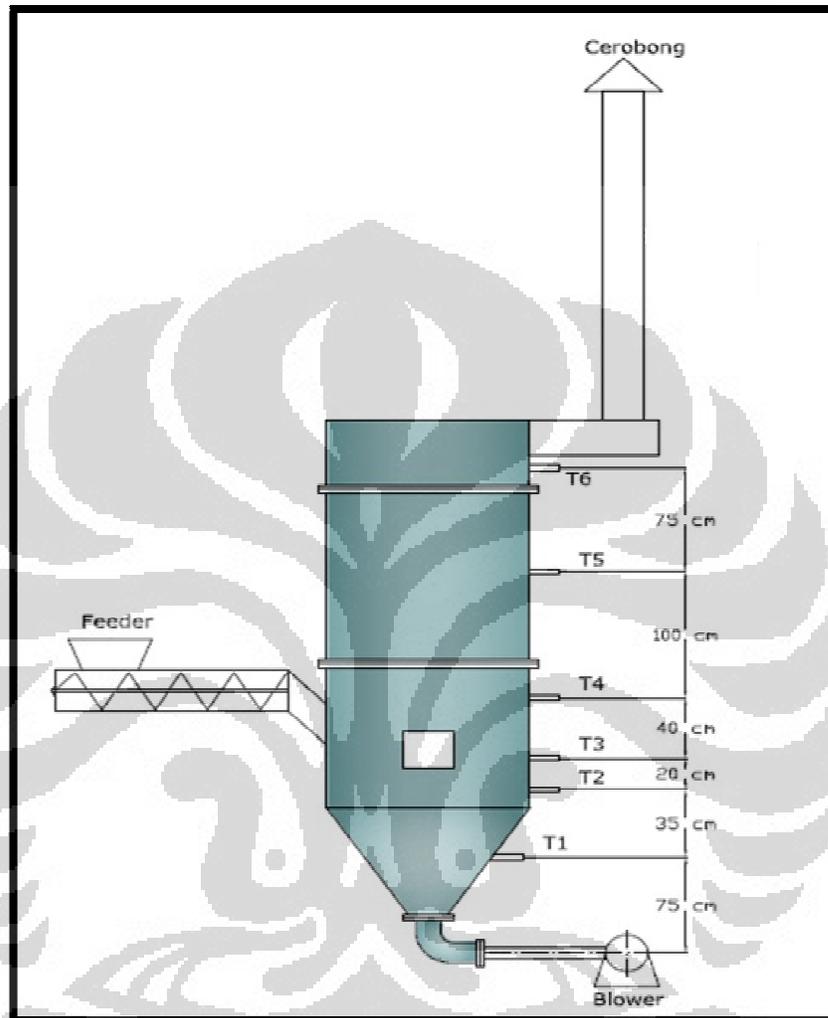
T2 = 3,5 cm diatas distributor

T3 = 24,5 cm diatas distributor

T4 = 63,5 cm diatas distributor

T5 = 144,5 cm diatas distributor

T6 = 219,5 cm diatas distributor



Gambar 4.1 Skematik Letak Termokopel pada *Fluidized Bed Combustor* UI

4.1.1. Hasil Pengujian Pembakaran Sebelum Modifikasi Penambahan *Induced Draft Fan*

Pada bagian ini akan ditampilkan hasil pembakaran sebelum adanya modifikasi penambahan *induced draft fan* pada *Fluidized Bed Combustor* Universitas Indonesia. Pengujian pembakaran dilakukan pada saat *self sustained combustion* berlangsung 1 jam dan 2 jam.

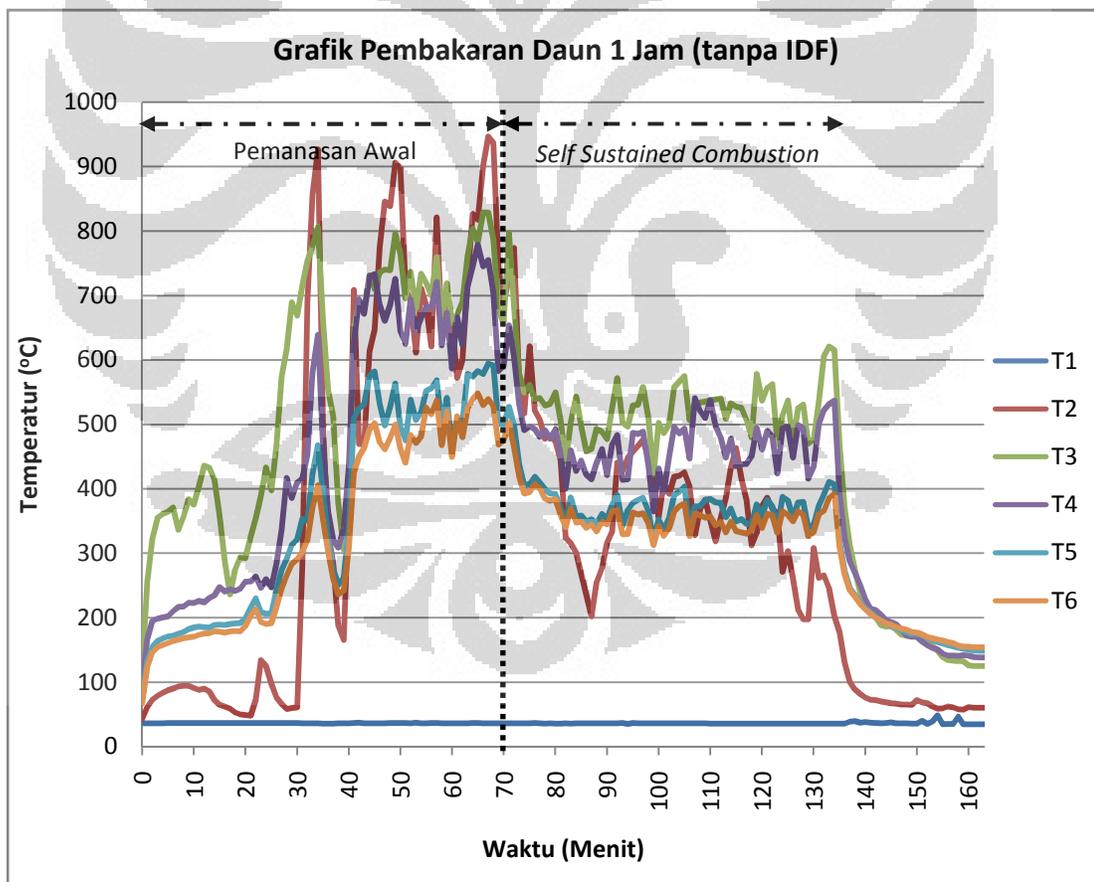
4.1.1.1. Hasil Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* selama 1 jam

Beberapa parameter yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari hasil penelitian periode sebelumnya (Desember 2011) antara lain:

- *Flow rate* dari ring *blower* 0,093 m³/s (3300 pm).
- Menggunakan pasir silika mesh 20-40 pada *bed* sebanyak 25 kg
- Penggunaan tempurung kelapa 1,5 x 1,5 cm sebagai pemanasan awal

Parameter baru yang dimasukkan dalam penelitian ini adalah penggantian bahan bakar menjadi daun ketika *self sustained combustion* telah tercapai.

Dari data-data yang telah didapatkan pada percobaan, selanjutnya dilakukan pengolahan data sehingga dapat ditampilkan dalam bentuk grafik yang menunjukkan karakteristik pembakarannya.



Gambar 4.2 Grafik Hasil Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* 1 Jam (Tanpa IDF) terhadap Waktu (menit)

Sistem pengumpanan bahan bakar (*feeding*) pada pengambilan data diatas juga sistem *batch*, di mana *feeding* dilakukan ketika T2 mengalami penurunan suhu setelah T2 tersebut mencapai nilai maksimum yang didapatkan dari *feeding* sebelumnya.

Tabel 4.1 *Feed Rate* Bahan Bakar Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* 1 Jam (Tanpa IDF)

Feeding Bahan Bakar	Feed Rate
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

Nilai temperatur rata-rata untuk setiap termokopel selama pengujian pembakaran (pemanasan awal dan dilanjutkan dengan *self sustained combustion*) ditampilkan pada tabel dan grafik di bawah ini:

Tabel 4.2 Temperatur Rata-Rata Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* 1 Jam (Tanpa IDF)

Pemanasan Awal + Self Sustained Combustion	
Termokopel	Temperatur Rata-Rata (°C)
T1	36.155
T2	395.016
T3	544.469
T4	463.867
T5	368.713
T6	345.224

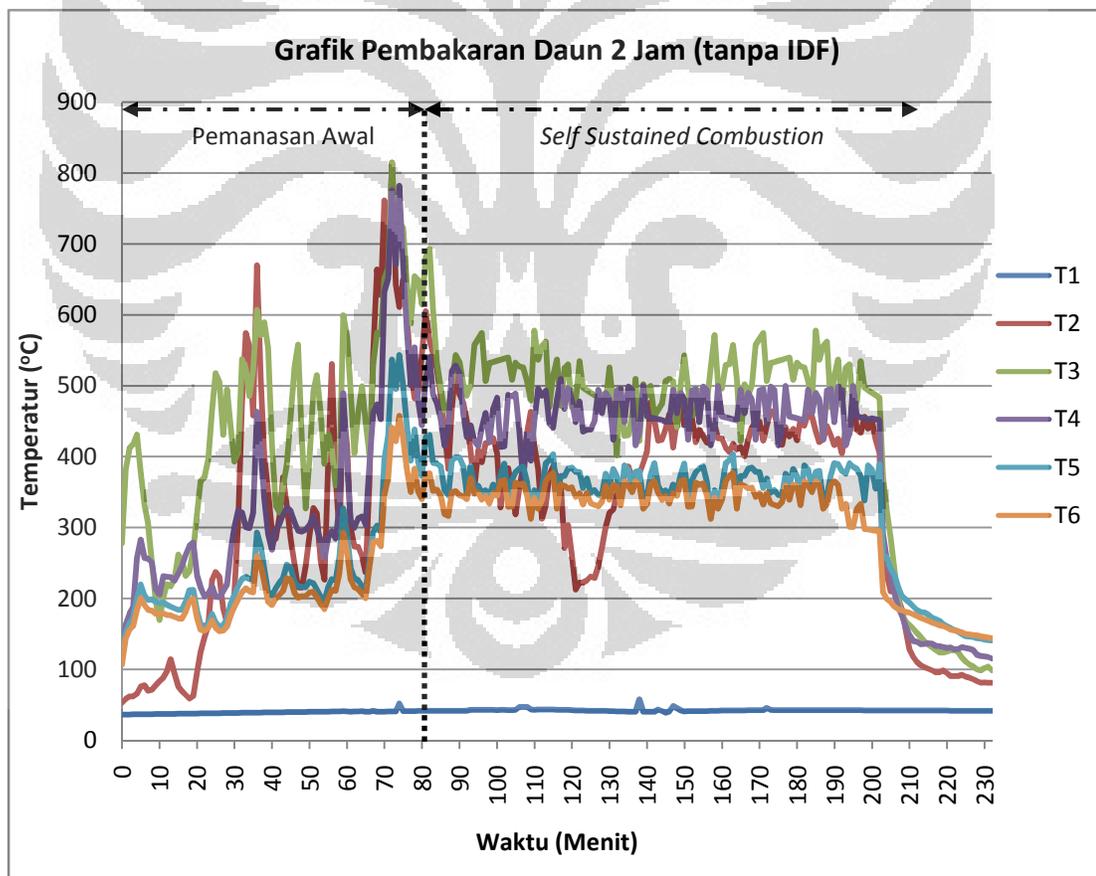
4.1.1.2. Hasil Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* selama 2 jam

Beberapa parameter yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari hasil penelitian periode sebelumnya (Desember 2011) antara lain:

- *Flow rate* dari ring *blower* 0,093 m³/s (3300 pm).
- Menggunakan pasir silika mesh 20-40 pada *bed* sebanyak 25 kg
- Penggunaan tempurung kelapa 1,5 x 1,5 cm sebagai pemanasan awal

Parameter baru yang dimasukkan dalam penelitian ini adalah penggantian bahan bakar menjadi daun ketika *self sustained combustion* telah tercapai.

Dari data-data yang telah didapatkan pada percobaan, selanjutnya dilakukan pengolahan data sehingga dapat ditampilkan dalam bentuk grafik yang menunjukkan karakteristik pembakarannya.



Gambar 4.3 Grafik Hasil Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* 2 Jam (Tanpa IDF) Terhadap Waktu (menit)

Sistem pengumpanan bahan bakar (*feeding*) pada pengambilan data diatas juga sistem *batch*, di mana *feeding* dilakukan ketika T2 mengalami penurunan suhu setelah T2 tersebut mencapai nilai maksimum yang didapatkan dari *feeding* sebelumnya.

Tabel 4.3 *Feed Rate* Bahan Bakar Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* 2 Jam (Tanpa IDF)

Feeding Bahan Bakar	Feed Rate
Serbuk + Serabut 0,5 kg	0,5 kg/6 menit
Tempurung Kelapa 0,25 kg	0,25 kg/5 menit
Tempurung Kelapa 0,5 kg	0,5 kg/3 menit
Daun 0,25 kg	0,25 kg/0,5 menit

Nilai temperatur rata-rata untuk setiap termokopel selama pengujian pembakaran (pemanasan awal dan dilanjutkan dengan *self sustained combustion*) ditampilkan pada tabel dan grafik di bawah ini:

Tabel 4.4 Temperatur Rata-Rata Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* 2 Jam (Tanpa IDF)

Pemanasan Awal + Self Sustained Combustion	
Termokopel	Temperatur Rata-Rata (°C)
T1	41.273
T2	365.749
T3	485.698
T4	410.769
T5	319.601
T6	296.770

4.1.2. Hasil Pengujian Pembakaran Setelah Modifikasi Penambahan *Induced Draft Fan*

Pada bagian ini akan ditampilkan hasil pembakaran setelah adanya modifikasi penambahan *induced draft fan* pada *Fluidized Bed Combustor* Universitas Indonesia. Adapun yang digunakan sebagai *induced draft fan* adalah berupa blower sentrifugal yang berguna untuk menghisap asap hasil pembakaran melalui *ducting* kemudian dialirkan menuju cerobong. Pada percobaan ini akan terlihat pengaruh pemasangan *induced draft fan* pada *Fluidized Bed Combustor* Universitas Indonesia. Pengujian pembakaran dilakukan pada saat *self sustained combustion* berlangsung 1 jam dan 2 jam.

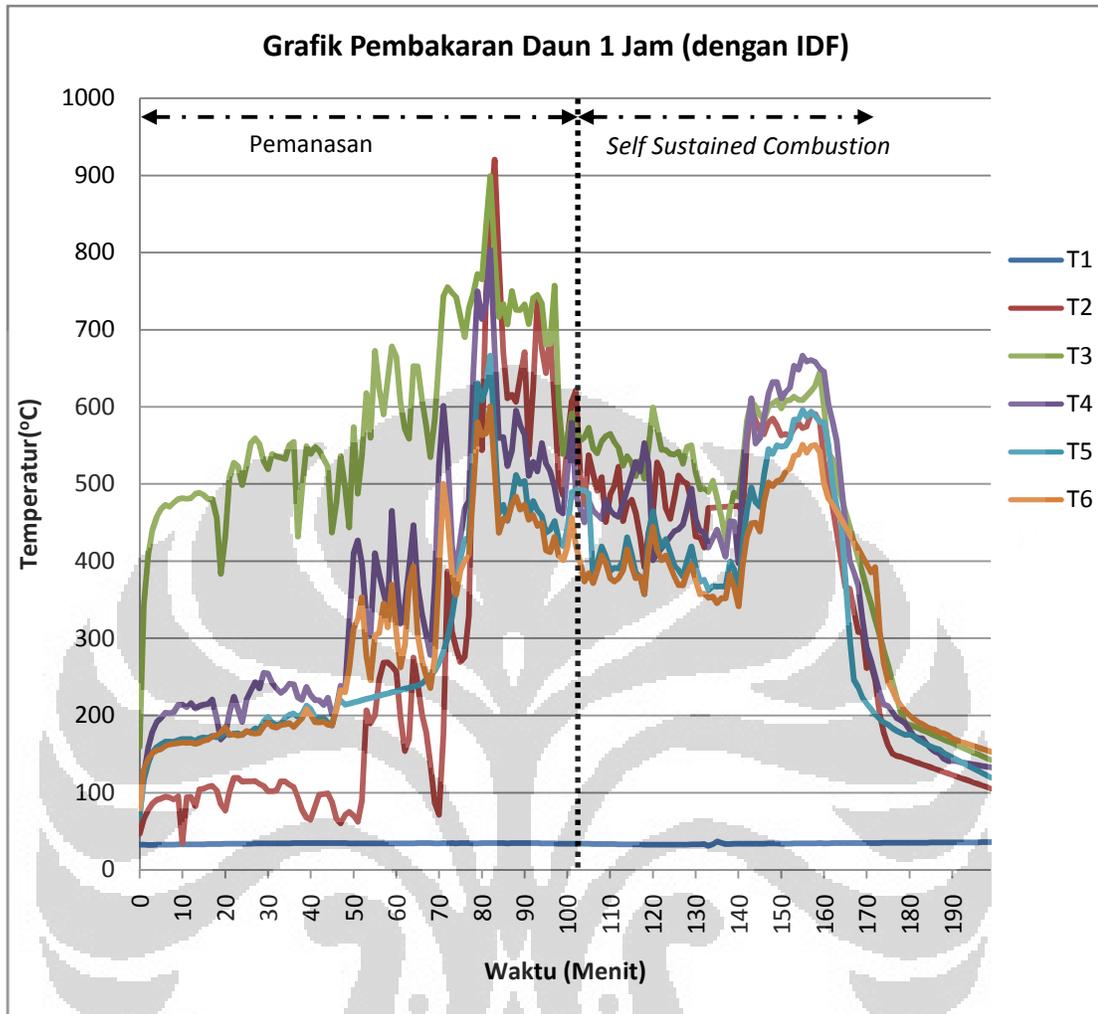
4.1.2.1. Hasil Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* selama 1 jam

Beberapa parameter yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari hasil penelitian periode sebelumnya (Desember 2011) antara lain:

- *Flow rate* dari ring *blower* 0,093 m³/s (3300 pm)
- Menggunakan pasir silika mesh 20-40 pada *bed* sebanyak 25 kg
- Penggunaan tempurung kelapa 1,5 x 1,5 cm sebagai pemanasan awal

Parameter baru yang dimasukkan dalam penelitian ini adalah penggantian bahan bakar menjadi daun ketika *self sustained combustion* telah tercapai serta *flow rate* dari *centrifugal blower* adalah 23,6 m³/menit (1000 rpm)

Dari data-data yang telah didapatkan pada percobaan, selanjutnya dilakukan pengolahan data sehingga dapat ditampilkan dalam bentuk grafik yang menunjukkan karakteristik pembakarannya.



Gambar 4.4 Grafik Hasil Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* 1 Jam (Dengan IDF) terhadap Waktu (menit)

Sistem pengumpanan bahan bakar (*feeding*) pada pengambilan data diatas juga sistem *batch*, di mana *feeding* dilakukan ketika T2 mengalami penurunan suhu setelah T2 tersebut mencapai nilai maksimum yang didapatkan dari *feeding* sebelumnya.

Tabel 4.5 *Feed Rate* Bahan Bakar Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* 1 Jam (Dengan IDF)

Feeding Bahan Bakar	Feed Rate
Serabut 0,25 kg	0,25 kg/5 menit
Serbuk 0,25 kg	0,25 kg/10 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

Nilai temperatur rata-rata untuk setiap termokopel selama pengujian pembakaran (pemanasan awal dan dilanjutkan dengan *self sustained combustion*) ditampilkan pada tabel dan grafik di bawah ini:

Tabel 4.6 Temperatur Rata-Rata Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* 1 Jam (Dengan IDF)

Pemanasan Awal + Self Sustained Combustion	
Termokopel	Temperatur Rata-Rata (°C)
T1	34.092
T2	319.988
T3	511.586
T4	376.846
T5	316.132
T6	324.214

4.1.2.2. Hasil Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* selama 2 jam

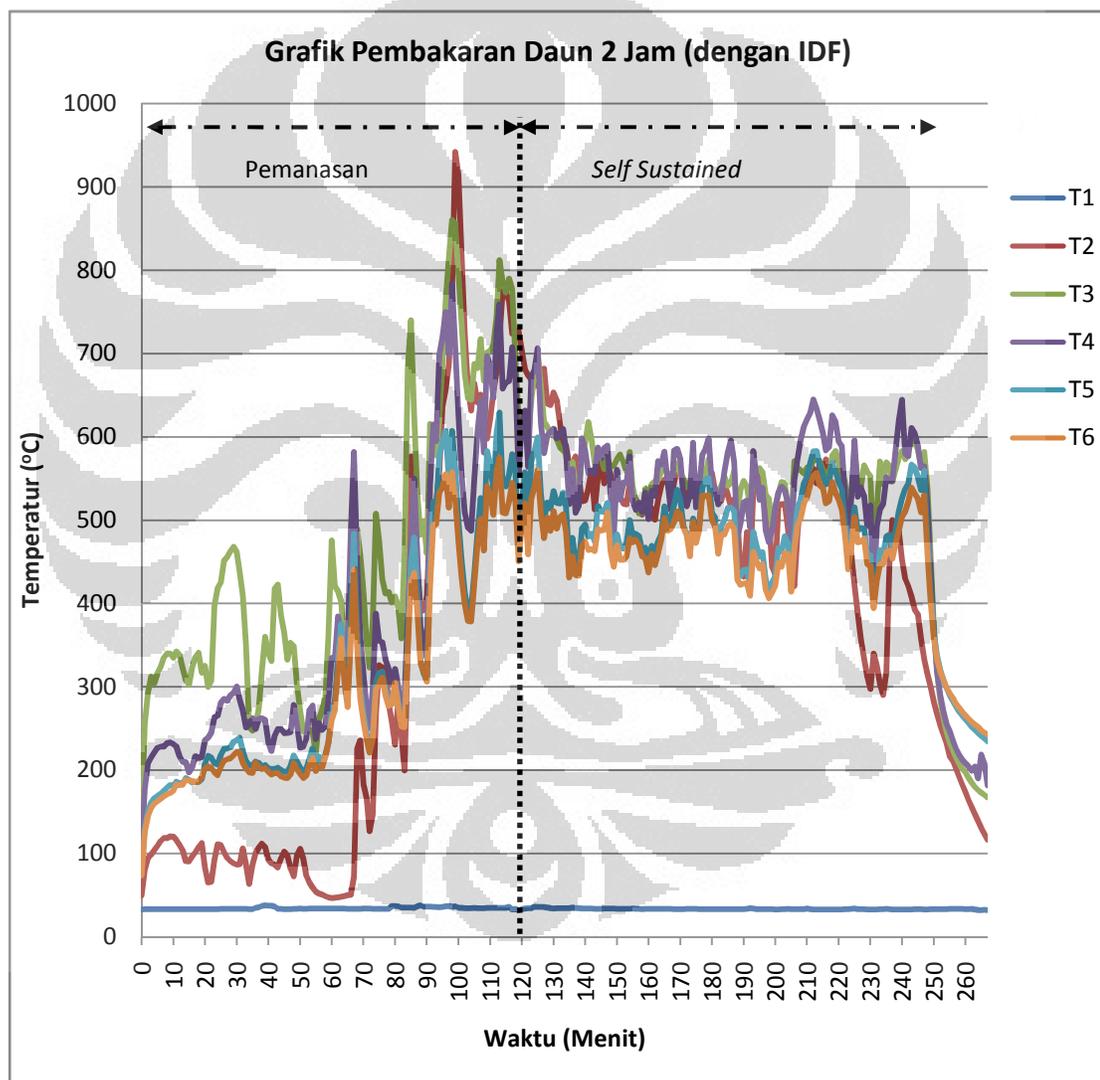
Beberapa parameter yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari hasil penelitian periode sebelumnya (Desember 2011) antara lain:

- *Flow rate* dari ring *blower* 0,093 m³/s (3300 pm)
- Menggunakan pasir silika mesh 20-40 pada *bed* sebanyak 25 kg

- Penggunaan tempurung kelapa 1,5 x 1,5 cm sebagai pemanasan awal

Parameter baru yang dimasukkan dalam penelitian ini adalah penggantian bahan bakar menjadi daun ketika *self sustained combustion* telah tercapai serta *flow rate* dari *centrifugal blower* adalah 23,6 m³/menit (1000 rpm)

Dari data-data yang telah didapatkan pada percobaan, selanjutnya dilakukan pengolahan data sehingga dapat ditampilkan dalam bentuk grafik yang menunjukkan karakteristik pembakarannya.



Gambar 4.5 Grafik Hasil Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* 2 Jam (Dengan IDF) terhadap Waktu (menit)

Sistem pengumpanan bahan bakar (*feeding*) pada pengambilan data diatas juga sistem *batch*, di mana *feeding* dilakukan ketika T2 mengalami penurunan suhu setelah T2 tersebut mencapai nilai maksimum yang didapatkan dari *feeding* sebelumnya.

Tabel 4.7 *Feed Rate* Bahan Bakar Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* 2 Jam (Dengan IDF)

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

Nilai temperatur rata-rata untuk setiap termokopel selama pengujian pembakaran (pemanasan awal dan dilanjutkan dengan *self sustained combustion*) ditampilkan pada tabel dan grafik di bawah ini:

Tabel 4.8 Temperatur Rata-Rata Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* 2 Jam (Dengan IDF)

Pemanasan Awal + Self Sustained Combustion	
Termokopel	Temperatur Rata-Rata (°C)
T1	33.693
T2	383.267
T3	490.653
T4	452.434
T5	398.083
T6	383.375

4.1.3. Hasil Pengujian Daya Tahan Pembakaran Daun Setelah Modifikasi Penambahan *Induced Draft Fan* pada *Self Sustained Combustion* selama 3 jam

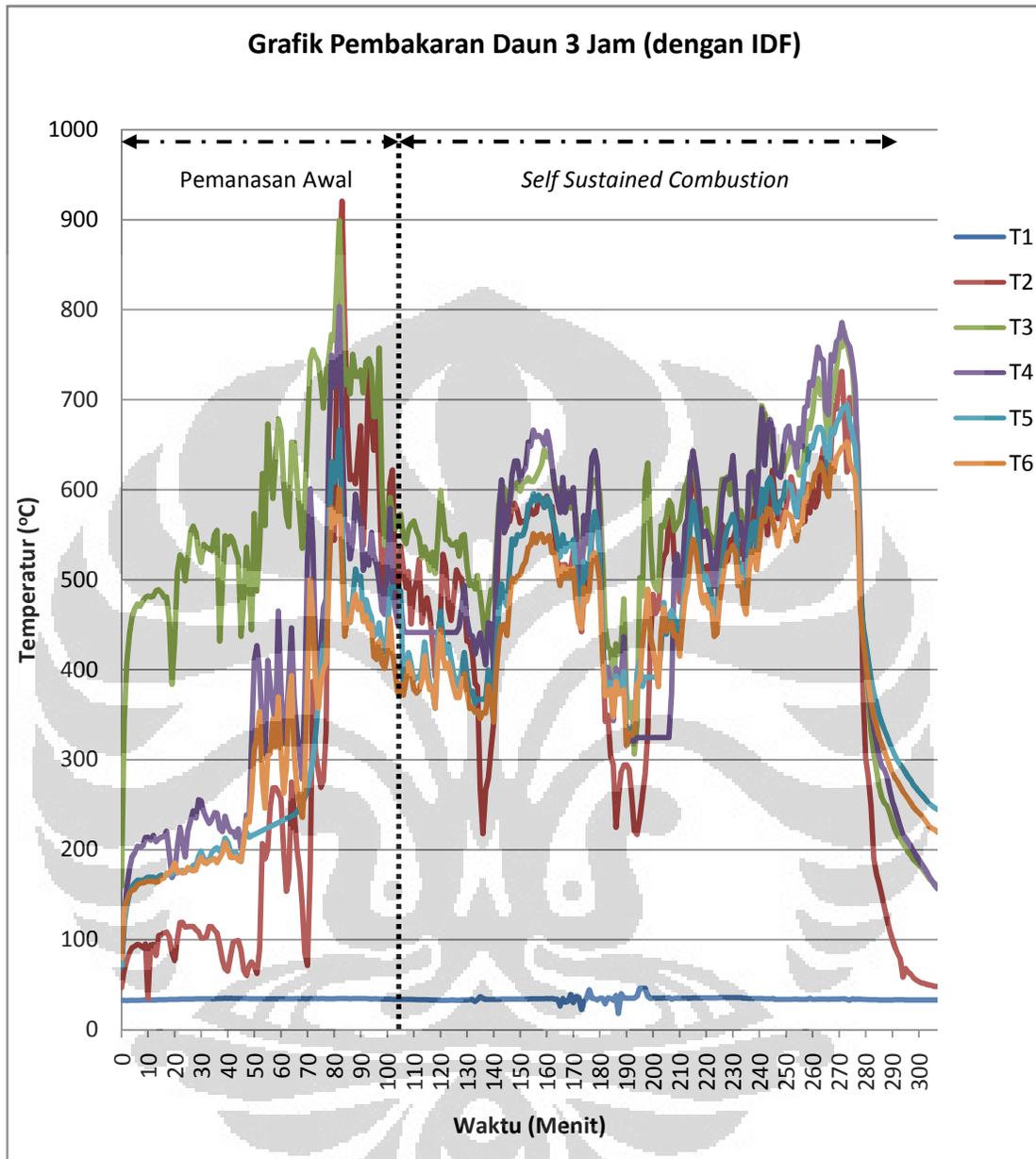
Pada bagian ini akan ditampilkan hasil uji daya tahan pembakaran daun setelah adanya modifikasi penambahan blower hisap (*induced draft fan*) pada *Fluidized Bed Combustor* Universitas Indonesia. Adapun yang digunakan sebagai *induced draft fan* adalah berupa blower sentrifugal yang berguna untuk menghisap asap hasil pembakaran melalui *ducting* kemudian dialirkan menuju cerobong. Pemasangan *induced draft fan* ini didasari karena pada percobaan periode sebelumnya (Desember 2011) banyak asap yang tidak keluar melalui cerobong akan tetapi keluar melalui jalur *feeder* dan juga *cyclone*. Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah blower hisap atau yang biasa dikenal dengan *induced draft fan* untuk mengatasi hal tersebut. Pada percobaan ini akan terlihat pengaruh pemasangan *induced draft fan* pada *Fluidized Bed Combustor* Universitas Indonesia. Pengujian pembakaran ini sekaligus bertujuan untuk menguji daya tahan pembakaran daun yang dilakukan pada saat *self sustained combustion* berlangsung 3 jam.

Beberapa parameter yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari hasil penelitian periode sebelumnya (Desember 2011) antara lain:

- *Flow rate* dari ring *blower* 0,093 m³/s (3300 pm)
- Menggunakan pasir silika mesh 20-40 pada *bed* sebanyak 25 kg
- Penggunaan tempurung kelapa 1,5 x 1,5 cm sebagai pemanasan awal

Parameter baru yang dimasukkan dalam penelitian ini adalah penggantian bahan bakar menjadi daun ketika *self sustained combustion* telah tercapai serta *flow rate* dari *centrifugal blower* adalah 23,6 m³/menit (1000 rpm)

Dari data-data yang telah didapatkan pada percobaan, selanjutnya dilakukan pengolahan data sehingga dapat ditampilkan dalam bentuk grafik yang menunjukkan karakteristik pembakarannya.



Gambar 4.6 Grafik Hasil Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* 3 Jam (Dengan IDF) Terhadap Waktu (menit)

Sistem pengumpanan bahan bakar (*feeding*) pada pengambilan data diatas juga sistem *batch*, di mana *feeding* dilakukan ketika T2 mengalami penurunan suhu setelah T2 tersebut mencapai nilai maksimum yang didapatkan dari *feeding* sebelumnya.

Tabel 4.9 *Feed Rate* Bahan Bakar Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* 3 Jam (Dengan IDF)

Feeding Bahan Bakar	Feed Rate
Serabut 0,25 kg	0,25 kg/5 menit
Serbuk 0,25 kg	0,25 kg/10 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

Nilai temperatur rata-rata untuk setiap termokopel selama pengujian pembakaran (pemanasan awal dan dilanjutkan dengan *self sustained combustion*) ditampilkan pada tabel dan grafik di bawah ini:

Tabel 4.10 Temperatur Rata-Rata Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* 3 Jam (Dengan IDF)

Pemanasan Awal + Self Sustained Combustion	
Termokopel	Temperatur Rata-Rata (°C)
T1	34.176
T2	415.492
T3	579.650
T4	472.162
T5	419.792
T6	408.591

4.2 Analisis

Setelah melakukan beberapa proses pengujian dan pengambilan data untuk mengetahui kinerja dari insinerator *Fluidized Bed Combustor* Universitas Indonesia melalui perbandingan karakteristik pembakaran biomassa sebelum dan setelah pemasangan *Induced Draft Fan*, selanjutnya data ini diolah dan diinterpretasikan dalam bentuk grafik. Grafik yang dihasilkan antara lain:

- Grafik pembakaran daun pada *self sustained combustion* selama 1 jam sebelum dan setelah modifikasi penambahan *induced draft fan*
- Grafik pembakaran daun pada *self sustained combustion* selama 2 jam sebelum dan setelah modifikasi penambahan *induced draft fan*
- Grafik uji daya tahan pembakaran menggunakan bahan bakar daun pada *Self Sustained Combustion* selama 3 jam

4.2.1. Analisis Perbandingan Grafik Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* selama 1 jam

Proses pemanasan awal pada penelitian ini menggunakan tempurung kelapa yang mengacu pada penelitian Nanda Prima (2011) yang berjudul “Studi Karakteristik Pengujian Pembakaran Biomassa Tempurung Kelapa 1 x 1 cm dan 1,5 x 1,5 cm di Fluidized Bed Combustor Universitas Indonesia” tertera bahwa proses pemanasan awal menggunakan tempurung kelapa ukuran 1x1 cm lebih baik dibandingkan menggunakan ukuran 1,5x1,5 cm dalam hal tingkat kestabilan temperatur pembakaran.

Feeding (pemasukan bahan bakar) pada saat pemanasan awal dilakukan secara berkelanjutan berdasarkan perubahan temperatur. *Feeding* dilakukan bila temperatur mulai turun dari titik tertinggi yang dicapainya. Setelah burner dinyalakan tidak ada pemasukan bahan bakar lebih dahulu karena pada saat ini naiknya temperatur masih bergantung sepenuhnya terhadap panas api dr *burner*. Hal ini biasanya dilakukan sekitar 7-10 menit sampai dengan temperatur T2 dan T3 tidak lagi

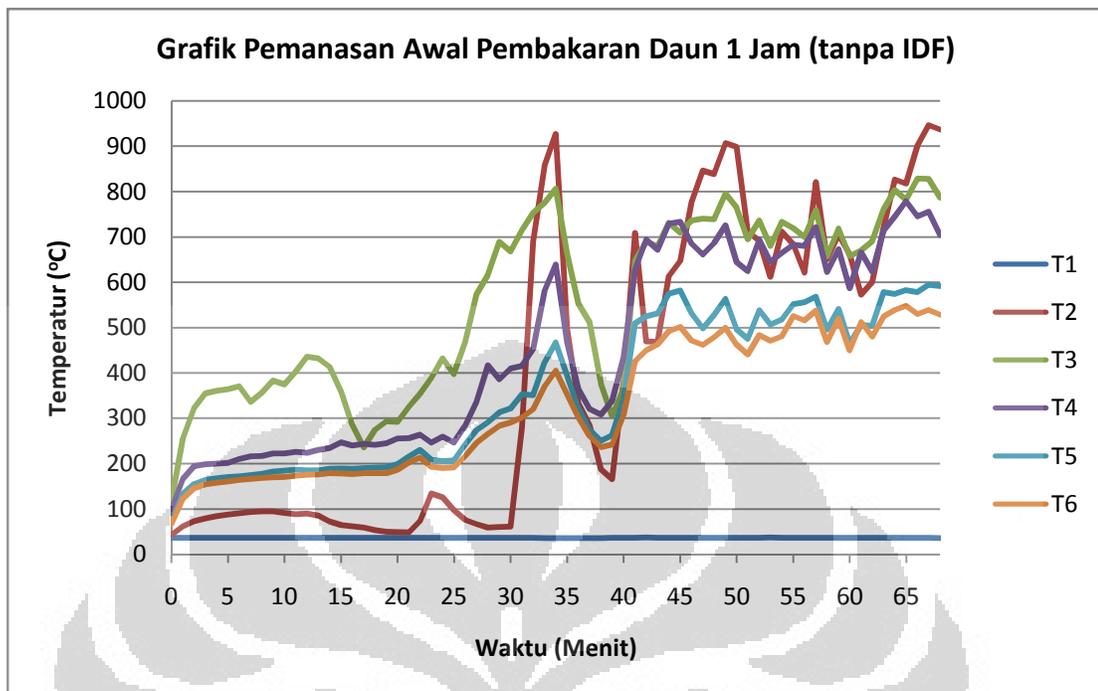
mengalami kenaikan. Serbuk dan serabut dimasukkan pertama kali karena faktor lebih mudah terbakar sehingga dapat cepat menaikkan temperatur



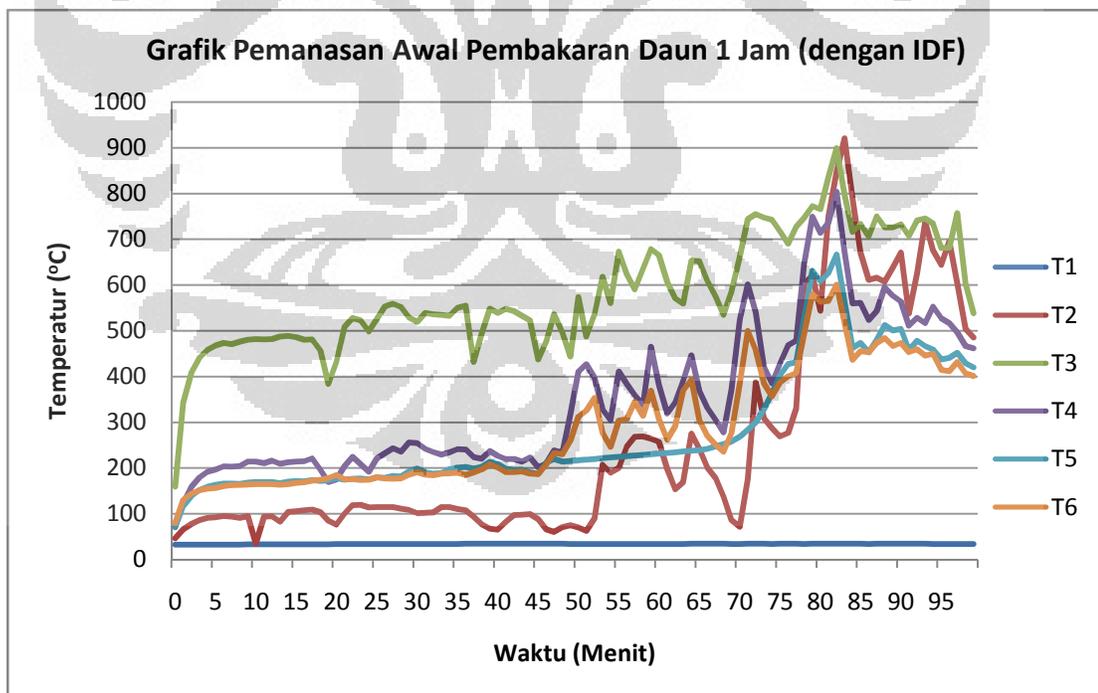
Gambar 4.7 Kondisi saat Pemanasan Awal (*Burner* hidup)

4.2.1.1. Analisis Perbandingan Grafik Pemanasan Awal

Proses pemanasan awal sebelum adanya penambahan *induced draft fan* berlangsung selama 69 menit, sedangkan pada proses pemanasan awal setelah penambahan *induced draft fan* berlangsung selama 104 menit. Dapat terlihat bahwa pada percobaan yang menggunakan *induced draft fan* pemanasan awal berlangsung lebih lama. Perbedaan waktu pemanasan awal antara sebelum dan setelah penggunaan *induced draft fan* itu sebesar 35 menit. Meskipun demikian terlihat pada grafik bahwa temperatur pada penggunaan *induced draft fan* kenaikannya cenderung stabil. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan *induced draft fan* pada pemanasan awal dapat membuat proses berlangsung lebih lama, akan tetapi temperaturnya mengalami kenaikan yang stabil dalam menuju *self sustained combustion*.



Gambar 4.8 Grafik Pemanasan Awal Pembakaran Daun 1 Jam Sebelum Penambahan *Induced Draft Fan* Terhadap Waktu (menit)



Gambar 4.9 Grafik Pemanasan Awal Pembakaran Daun 1 Jam Setelah Penambahan *Induced Draft Fan* Terhadap Waktu (menit)

Pada gambar 4.8 dan 4.9, terlihat dari grafiknya bahwa temperatur T1 cenderung tetap karena T1 hanya mengukur temperatur dari udara *blower* untuk fluidisasi, di mana nilai temperaturnya tidak mengalami perubahan yang signifikan selama proses pemanasan awal.

Untuk T2 pada gambar 4.8, terlihat bahwa pemanasan awalnya masih berada di bawah temperatur 100°C sampai dengan menit ke-30. Temperatur mengalami kenaikan drastis menjadi 689°C pada menit ke-33, kemudian pada menit ke-35 T2 mencapai temperatur maksimum pada 926°C. Hal ini terjadi dikarenakan proses *heat transfer* yang lambat dari ruang bakar (*freeboard*) menuju hamparan pasir (*bed*). Barulah pada menit ke-31 dimulai proses *heat transfer* tersebut dari *freeboard* menuju *bed* sehingga temperatur *bed* mengalami kenaikan drastis dan mengalami puncaknya pada menit ke-35. Akan tetapi, temperatur mengalami penurunan nilai yang juga drastis sampai menyentuh suhu 165°C pada menit ke-40. Hal ini diakibatkan oleh menumpuknya tempurung kelapa sehingga bahan tidak terbakar oleh *burner* dan tidak dapat memanaskan *bed*. Setelah menit ke-41 temperatur T2 cenderung mengalami kenaikan sampai dengan puncaknya pada menit ke-50 sebesar 900°C dan kemudian stabil pada kisaran temperatur 600-700°C pada menit ke-53 sampai dengan menit ke-63. Dan akhirnya pada menit ke-69 ditetapkanlah bahwa telah terjadi *self sustained combustion* sehingga *burner* dimatikan. Untuk T2 pada gambar 4.9, terlihat bahwa pemanasan awalnya masih berada di bawah temperatur 150°C sampai dengan menit ke-53. Pada menit ke-57 sampai dengan menit ke-65 temperatur masih di kisaran 250 °C yang kemudian temperatur mengalami penurunan kembali pada menit ke-71 dengan temperatur 71°C. Temperatur mengalami kenaikan kembali sampai menyentuh titik puncaknya pada menit ke-84 dengan temperatur sebesar 920°C. Dan akhirnya pada menit ke-100 ditetapkanlah bahwa telah terjadi *self sustained combustion* sehingga *burner* dimatikan. Perbedaan paling mencolok antara kedua grafik pemanasan awal pada T2 ini adalah mengenai waktu terjadinya *self sustained combustion*. *Self sustained combustion* sendiri dapat dilihat dari kondisi hamparan pasir (*bed*) yang telah berubah warna menjadi merah menyala seperti lava yang bergolak membara. Sehingga bila telah terlihat tanda-tanda seperti itu makan

burner telah dapat dimatikan. Kembali mengenai perbedaan waktu pemanasan awal antara kedua grafik terlihat bahwa waktu pemanasan awal untuk pembakaran daun yang telah ditambahkan *induced draft fan* lebih lama sekitar 30 menit. Akan tetapi, dilihat dari grafik 4.9 terlihat bahwa kenaikan temperatur T2 cenderung lebih stabil daripada yang terlihat di grafik 4.8. Pada grafik 4.9, yang telah menggunakan *induced draft fan*, meskipun temperatur mengalami peningkatan yang cukup lama tetapi tidak ada temperatur yang mengalami penurunan drastis seperti halnya yang terlihat pada grafik 4.8 yang belum menggunakan *induced draft fan*. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan *induced draft fan* saat pemanasan awal meskipun membutuhkan waktu yang relatif lebih lama sekitar 30 menit namun efektif dalam menaikkan suhu menjadi lebih stabil sehingga *self sustained combustion* yang terjadi lebih baik.

Untuk T3 pada gambar 4.8, terlihat bahwa pada pemanasan awal temperatur tidak stabil. Bahkan pada menit ke-40 mengalami penurunan drastis menjadi 305°C yang membuat T2 juga mengalami penurunan yang drastis. Terdapat anomali juga pada pembakaran sebelum penggunaan *induced draft fan* yaitu dimana temperatur T2 berada lebih tinggi daripada temperatur T3. Tujuan pemanasan awal sendiri adalah untuk menaikkan temperatur T2 atau *bed* hingga mencapai kondisi *self sustained combustion* sehingga seharusnya temperatur T3 selalu lebih tinggi daripada T2. Untuk T3 pada gambar 4.9, terlihat bahwa temperatur T3 pada pemanasan awal setelah penggunaan *induced draft fan* stabil pada kisaran temperatur 500°C sampai menit ke-53 dan terus mengalami kenaikan yang stabil hingga mencapai titik puncak dengan temperatur 900°C pada menit ke-83. Hal ini kembali mengindikasikan bahwa penggunaan *induced draft fan* membuat kenaikan temperatur menjadi lebih stabil meskipun memakan waktu yang relatif lebih lama.

Untuk T4, T5 dan T6 pada gambar 4.8 dan gambar 4.9, temperatur pada bagian ini tergantung dari temperatur T3. Perbedaan ketiganya adalah letaknya dari pusat pembakaran. Dimana semakin menjauhi pusat pembakaran (*free board area*) yang suhunya diukur dengan termokopel 3 (T3), maka temperaturnya lebih rendah

dari termokopel yang ada di bawahnya. Jadi, apabila disimpulkan bahwa temperaturnya $T4 > T5 > T6$

Tabel 4.11 Perbandingan Temperatur Rata-Rata Pemanasan Awal Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* 1 Jam

	Tanpa <i>Induced Draft Fan</i>	Dengan <i>Induced Draft Fan</i>
Termokopel	Temperatur Rata-Rata (°C)	Temperatur Rata-Rata (°C)
T1	36.378	34.064
T2	396.051	249.152
T3	553.695	582.632
T4	451.514	346.814
T5	357.433	274.667
T6	327.794	287.530

Jika dilihat dari tabel perbandingan temperatur rata-rata di atas terlihat bahwa pemanasan awal dengan menggunakan *induced draft fan* hanya unggul pada temperatur T3, sedangkan temperatur lainnya masih kalah dibandingkan dengan pengujian pembakaran tanpa *induced draft fan*. Hal ini disebabkan karena pemanasan awal dengan penggunaan *induced draft fan* yang meskipun stabil mengalami kenaikan temperatur tetapi memakan waktu cukup lama pada suhu rendah sehingga temperatur rata-ratanya ikut rendah.

4.2.1.2. Analisis Perbandingan Grafik *Self Sustained Combustion*

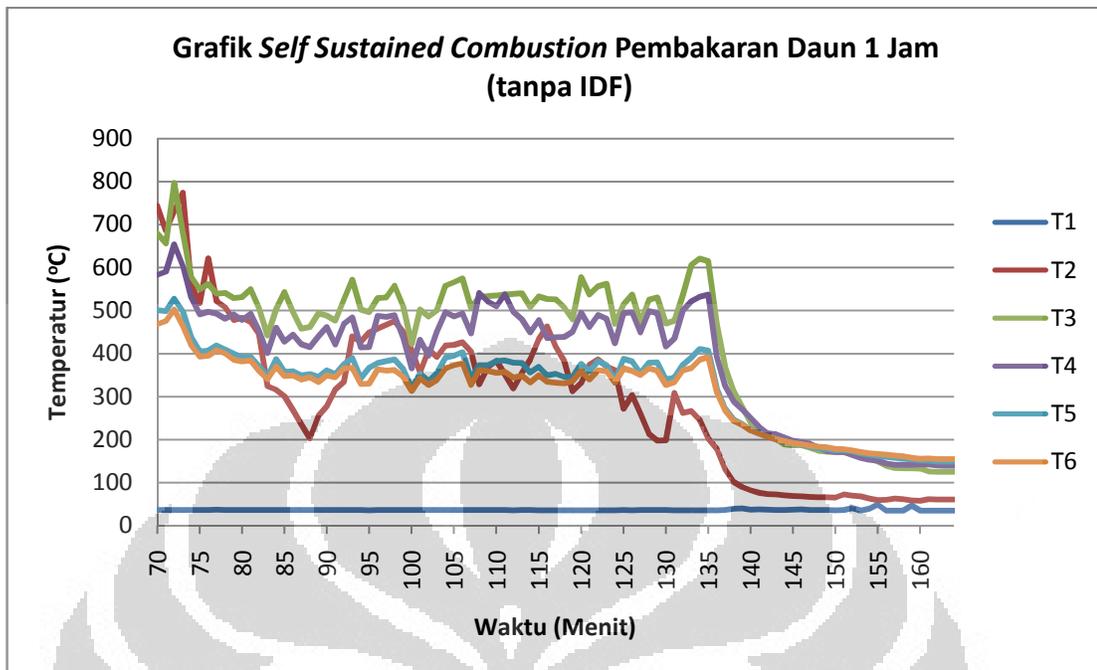
Self Sustained Combustion adalah suatu kondisi dimana hamparan pasir (*bed*) yang telah berubah warna menjadi merah menyala seperti lava yang bergolak membara. Kondisi seperti ini didapatkan setelah dilakukan pemanasan awal yang cukup. Sehingga saat burner telah dimatikan hamparan pasir (*bed*) telah menyimpan panas dan saat dimasukkan bahan bakar dapat langsung terbakar. Untuk blower tiup (*Forced Draft Fan*) tetap dihidupkan dalam kondisi ini, hanya *burner* sajalah yang dimatikan pada saat proses *self sustained combustion* ini. Hal inilah yang menjadi

keunggulan dari incinerator *fluidized bed combustor* dimana dengan proses *self sustained combustion* dapat membuat efektifitasnya menjadi lebih tinggi karena dengan burner yang dimatikan tentulah akan berujung hematnya ongkos pengoperasian dari *fluidized bed combustor*. Dampak positif ini sendiri baru bisa dirasakan apabila *fluidized bed combustor* dioperasikan secara terus menerus, bukan hanya untuk penelitian saja yang pemakaiannya sebentar.

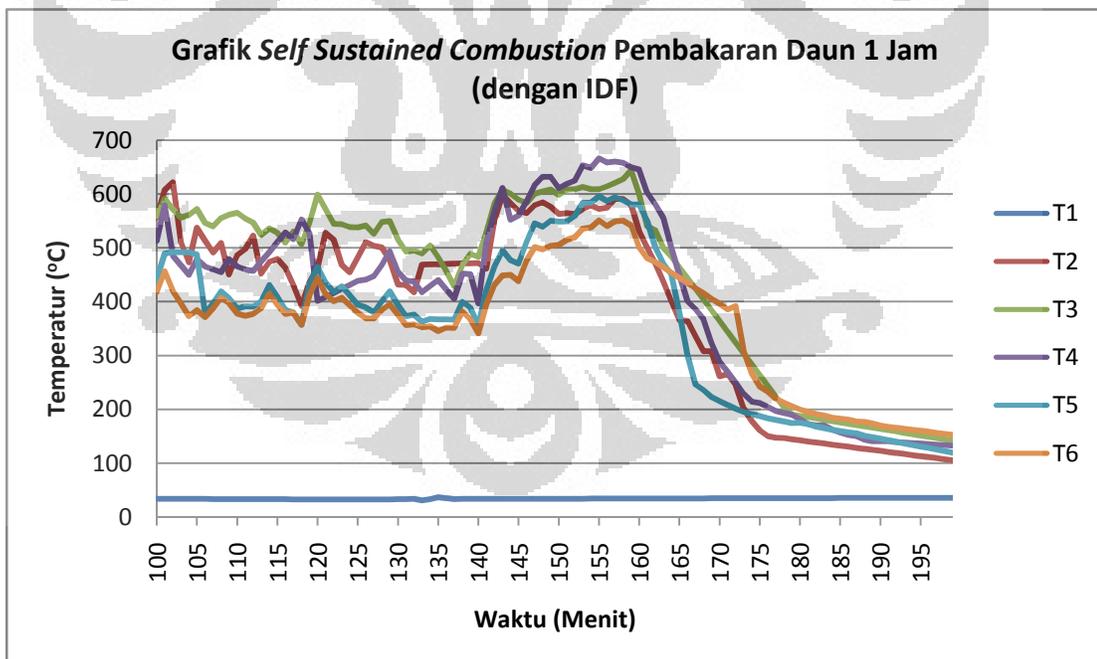
Feeding (pemasukan bahan bakar) pada saat *self sustained combustion* dilakukan secara berkelanjutan berdasarkan perubahan temperatur. *Feeding* dilakukan bila temperatur mulai turun dari titik tertinggi yang dicapainya. *Feeding* ini sistemnya tidak berbeda jauh dengan saat pemanasan awal. Perbedaannya hanya terdapat pada bahan bakarnya. Saat *self sustained combustion* ini bahan bakar yang digunakan adalah daun kering. Daun kering yang mudah terbakar membuat *feed rate* (laju pengumpanan) menjadi tinggi sehingga dibutuhkan bahan bakar yang jumlahnya banyak.



Gambar 4.10 Kondisi saat *Self Sustained Combustion* (Burner fully off)



Gambar 4.11 Grafik *Self Sustained Combustion* Pembakaran Daun 1 Jam Sebelum Penambahan *Induced Draft Fan* Terhadap Waktu (menit)



Gambar 4.12 Grafik *Self Sustained Combustion* Pembakaran Daun 1 Jam Setelah Penambahan *Induced Draft Fan* Terhadap Waktu (menit)

Pada gambar 4.11 dan 4.12, terlihat dari grafiknya bahwa temperatur T1 cenderung tetap karena T1 hanya mengukur temperatur dari udara *blower* untuk fluidisasi, di mana nilai temperaturnya tidak mengalami perubahan yang signifikan selama proses *self sustained combustion*. Hal ini sama dengan kondisi pada saat pemanasan awal.

Pada gambar 4.11, terlihat dari grafiknya bahwa temperatur T2 mengalami penurunan yang drastis pada menit ke-88 dengan temperatur 202°C. Hal ini terjadi diakibatkan oleh bahan bakar yang menumpuk sehingga saat bahan bakar dimasukkan tidak langsung terbakar. Akibatnya temperatur *bed* mengalami penurunan drastis karena tidak adanya *heat transfer* dari *freeboard area* menuju *bed*. Secara keseluruhan temperatur T2 pada pengujian pembakaran sebelum penggunaan *induced draft fan* berada di kisaran temperatur 300-450°C dan terus mengalami penurunan mulai dari menit ke-125. Sedangkan pada gambar 4.12, terlihat dari grafiknya bahwa temperatur T2 secara keseluruhan berada di kisaran temperatur 400-600°C dan terus mengalami peningkatan mulai dari menit ke-143 hingga percobaan selesai dilakukan. Titik puncak T2 setelah penggunaan *induced draft fan* berada pada temperatur 600°C. Dapat disimpulkan dari kedua grafik tersebut bahwa penggunaan *induced draft fan* sangat berpengaruh untuk meningkatkan temperatur T2 hingga mencapai lebih dari 150°C. Hal ini juga mengindikasikan bahwa proses *heat transfer* yang terjadi dari *freeboard area* menuju *bed* berlangsung dengan baik.

Untuk T3, T4, T5 dan T6 pada gambar 4.11, terlihat secara keseluruhan dari grafiknya bahwa temperaturnya tidak terlalu berbeda jauh dan berada di kisaran temperatur 350-500°C. Sedangkan untuk T3, T4, T5 dan T6 pada gambar 4.12, terlihat secara keseluruhan dari grafiknya bahwa temperaturnya tidak terlalu berbeda jauh dan berada di kisaran temperatur 400-600°C. Bahkan mulai dari menit ke-143 temperatur terus meningkat hingga percobaan dihentikan pada menit ke-160. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan *induced draft fan* berpengaruh untuk meningkatkan temperatur hingga mencapai lebih dari 100°C.

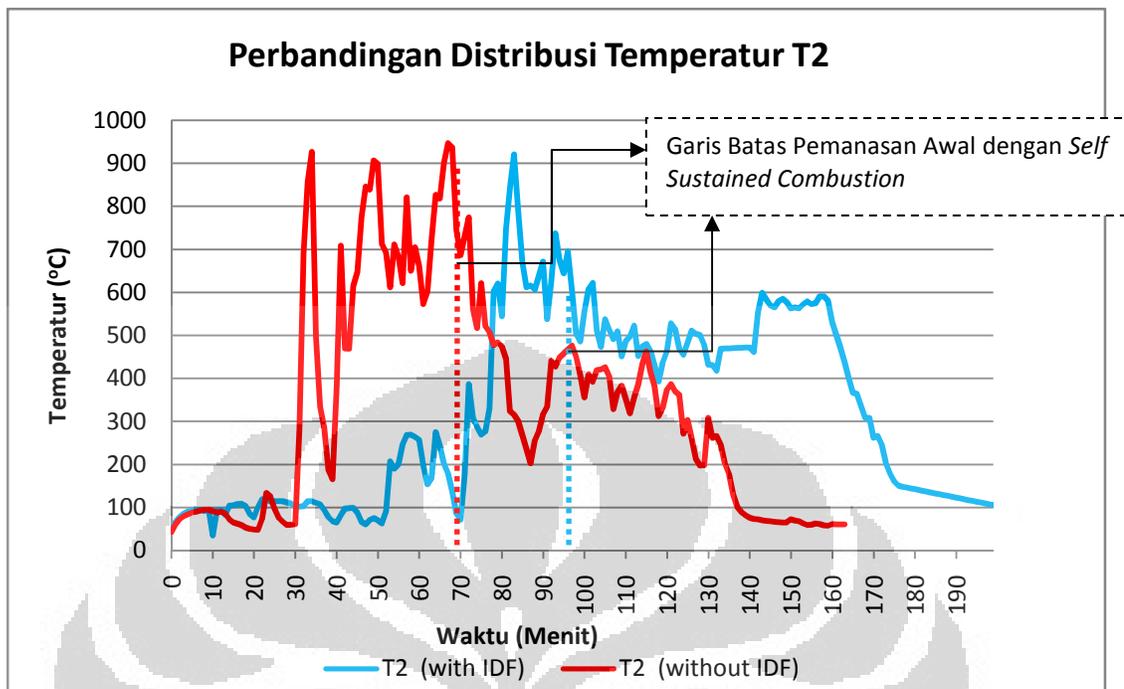
Tabel 4.12 Perbandingan Temperatur Rata-Rata *Self Sustained Combustion*
Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* 1 Jam

	Tanpa <i>Induced Draft Fan</i>	Dengan <i>Induced Draft Fan</i>
Termokopel	Temperatur Rata-Rata (°C)	Temperatur Rata-Rata (°C)
T1	35.922	33.522
T2	393.933	511.261
T3	534.824	553.799
T4	476.781	510.893
T5	380.505	449.387
T6	363.447	420.926

Jika dilihat dari tabel perbandingan temperatur rata-rata di atas terlihat bahwa temperatur *self sustained combustion* dengan menggunakan *induced draft fan* lebih unggul mulai dari T2 sampai dengan T6. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan *induced draft fan* dapat membuat temperatur mulai dari *bed*, *freeboard area* sampai dengan *exhaust* lebih meningkat dan relatif stabil. Dengan demikian efisiensi dari *fluidized bed combustor* ini ikut meningkat.

4.2.1.3. Analisis Perbandingan Grafik Distribusi Temperatur Beberapa Termokopel

Pada bagian ini akan lebih lanjut dibahas mengenai perbandingan distribusi temperatur 2 termokopel, yaitu termokopel 2 (T2) dan termokopel 3 (T3). T2 dipilih karena letak termokopel ini yang berada di dalam hamparan pasir (*bed*) sehingga akan terlihat kondisi *bed* apakah mengalami aglomerasi atau tidak baik saat pemanasan awal maupun saat *self sustained combustion*. Melalui T2 dapat pula terlihat apakah telah terjadi *self sustained combustion* atau belum sehingga dapat diputuskan kapan burner dimatikan. Karena pentingnya peran dari T2 ini maka dilakukan pengamatan terhadap termokopel ini.

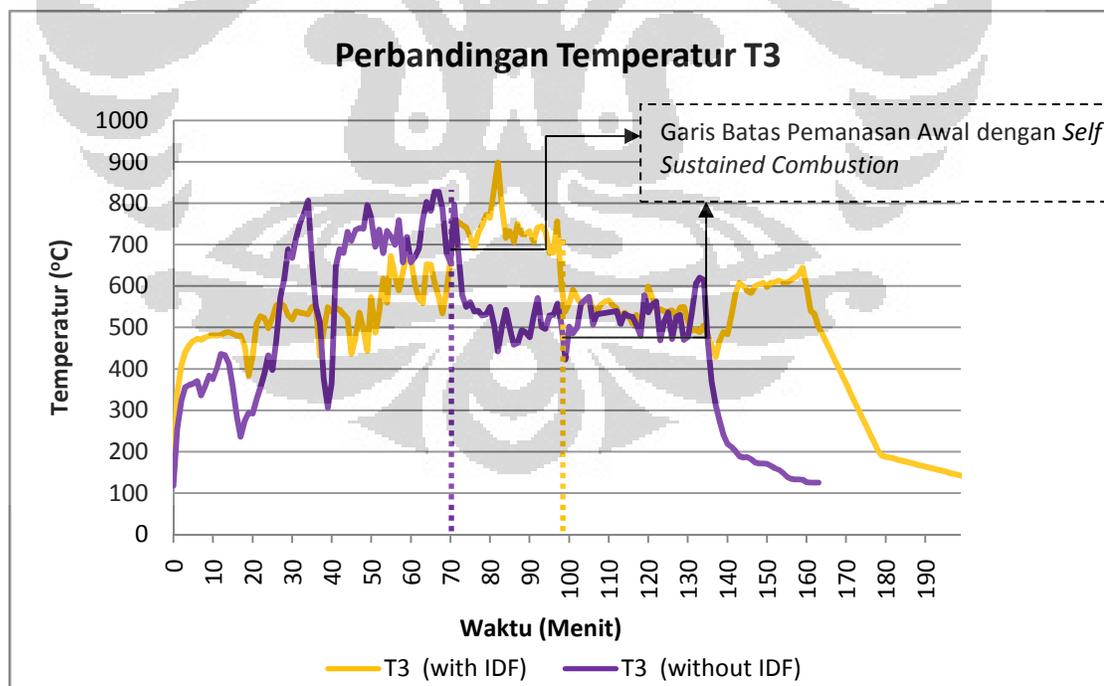


Gambar 4.13 Grafik Perbandingan Distribusi Temperatur T2 Terhadap Waktu (menit)

Dalam perbandingan temperatur termokopel 2 (T2) ini terlihat bahwa T2 pada pemanasan awal tanpa IDF temperaturnya lebih cepat naik hingga temperatur 900°C dan juga lebih cepat dalam mencapai kondisi *self sustained combustion*. Sedangkan T2 pada pemanasan awal dengan IDF kenaikan temperaturnya berlangsung lebih lama dan juga 35 menit lebih lama dalam mencapai kondisi *self sustained combustion*. Hal ini disebabkan sebelum pemasangan IDF pembakaran terkumpul pada *bed* sehingga temperaturnya mengalami kenaikan yang pesat, sedangkan dengan penggunaan IDF pada saat pemanasan awal *volatile* yang terjadi pada pembakaran banyak yang ikut terhisap oleh IDF dan terbuang melalui cerobong sehingga pembakaran menjadi tidak seperti pada sebelumnya yang mengumpul melainkan tersebar di dalam *furnace*. Hal ini terlihat secara jelas diamati melalui lubang pengamatan dimana pada saat 1 jam pemanasan awal panas yang terjadi tidak keluar melalui lubang pengamatan berbeda halnya pada sebelum pemasangan IDF dimana panas yang terjadi dapat keluar melalui lubang pengamatan. Pada kondisi *self sustained combustion* terlihat dari grafik bahwa penggunaan IDF sangat berpengaruh

untuk meningkatkan temperatur hingga mencapai temperatur 100-150°C. Hal ini disebabkan pada saat *self sustained combustion* dimana burner telah dimatikan sehingga hanya bergantung kepada blower dorong (*Forced Draft Fan*) saja dalam pembentukan aliran udara bagi pembakaran. Dengan adanya IDF maka kerja dari FDF akan terbantu sehingga aliran udara yang terjadi mulai dari *plenum, distributor, bed, freeboard* hingga *exhaust* berlangsung lebih baik. Aliran udara inilah yang membuat pembakaran berlangsung lebih baik dimana salah satu faktor terjadinya pembakaran selain bahan bakar adalah udara. Kesimpulannya ialah dengan aliran udara lebih baik maka pembakaran yang terjadi juga lebih baik.

Selanjutnya termokopel 3 (T3) dipilih karena letak termokopel ini yang berada di bagian *freeboard* sehingga akan terlihat kondisi temperatur *freeboard* ketika dimasukkan bahan bakar. Apabila temperatur langsung mengalami kenaikan berarti bahan bakar tersebut langsung terbakar, namun apabila temperatur lambat naik berarti bahan bakar belum terbakar. Melalui T3 ini pula dapat terlihat perpindahan panas yang terjadi dari *freeboard* menuju *bed*.



Gambar 4.14 Grafik Perbandingan Distribusi Temperatur T3 Terhadap Waktu (menit)

Dalam perbandingan temperatur termokopel 3 (T3) ini terlihat bahwa pada pemanasan awal sebelum penggunaan IDF temperatur mengalami kenaikan yang lebih cepat dikarenakan pembakaran hanya terkumpul pada daerah *freeboard* sehingga otomatis T3 yang berada pada *freeboard* temperaturnya lebih cepat naik. Kenaikan temperatur yang berlangsung pesat ini berakibat pula terdapat penurunan drastis karena kenaikan temperatur yang terjadi tidak diiringi dengan perpindahan panas yang signifikan dari *freeboard* menuju *bed* sehingga berakibat penurunan temperatur yang drastis pula. Sedangkan dengan penggunaan IDF maka pembakaran terjadi lebih merata diantara daerah T3 sampai dengan T6 sehingga terlihat dari grafik bahwa *freeboard* mengalami kenaikan temperatur yang lebih lama akan tetapi kenaikannya cenderung stabil hingga mencapai kondisi *self sustained combustion*. Pemanasan awal berlangsung lebih lama dikarenakan saat awal pembakaran dengan IDF *volatile* banyak yang ikut terhisap sehingga ikut terbuang melalui cerobong. Pada kondisi *self sustained combustion* terlihat dari grafik bahwa pada daerah *freeboard* antara tanpa dan dengan penggunaan IDF temperaturnya tidak terjadi perbedaan yang berarti. Temperatur yang ada sama-sama berkisar diantara 450-600°C. Kondisi feed rate daun yang sama pada *self sustained combustion* sebesar 0,25 gram/0,5 menit merupakan faktor penyebab tidak terjadinya perbedaan berarti pada daerah *freeboard*.

4.2.2. Analisis Perbandingan Grafik Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* selama 2 jam

Proses pemanasan awal pada penelitian ini menggunakan tempurung kelapa yang mengacu pada penelitian Nanda Prima (2011) yang berjudul “Studi Karakteristik Pengujian Pembakaran Biomassa Tempurung Kelapa 1 x 1 cm dan 1,5 x 1,5 cm di Fluidized Bed Combustor Universitas Indonesia” tertera bahwa proses pemanasan awal menggunakan tempurung kelapa ukuran 1x1 cm lebih baik dibandingkan menggunakan ukuran 1,5x1,5 cm dalam hal tingkat kestabilan temperatur pembakaran. *Feeding* (pemasukan bahan bakar) pada saat pemanasan awal dilakukan secara berkelanjutan berdasarkan perubahan temperatur. *Feeding* dilakukan bila temperatur mulai turun dari titik tertinggi yang dicapainya. Setelah

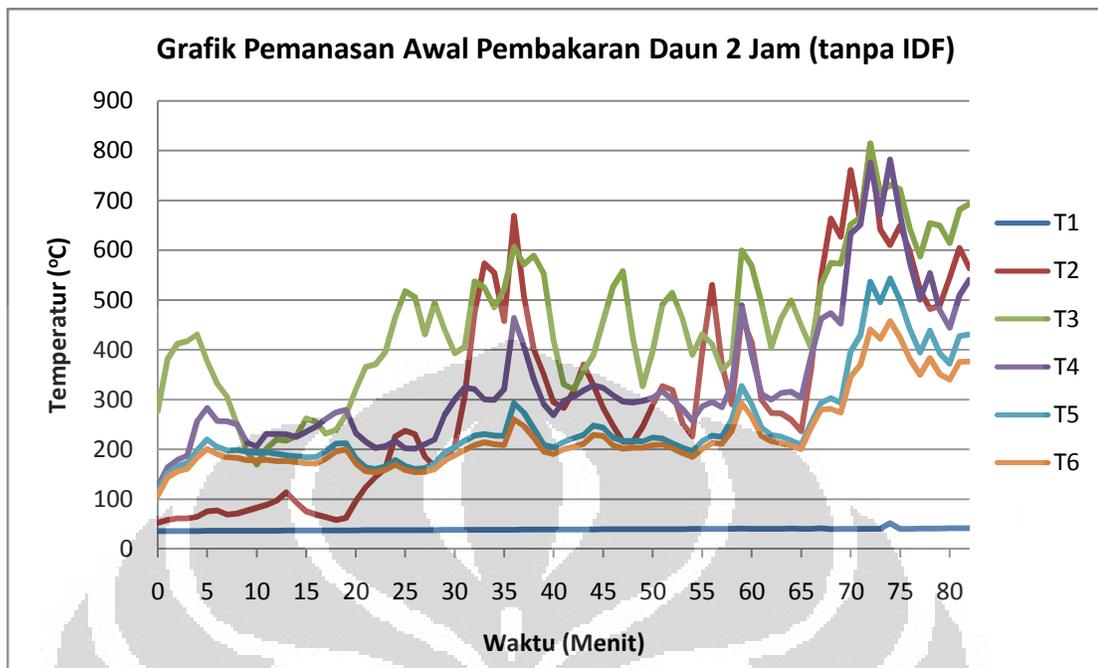
burner dinyalakan tidak ada pemasukan bahan bakar lebih dahulu karena pada saat ini naiknya temperatur masih bergantung sepenuhnya terhadap panas api dr *burner*. Hal ini biasanya dilakukan sekitar 7-10 menit sampai dengan temperatur T2 dan T3 tidak lagi mengalami kenaikan. Serbuk dan serabut dimasukkan pertama kali karena faktor lebih mudah terbakar sehingga dapat cepat menaikkan temperatur



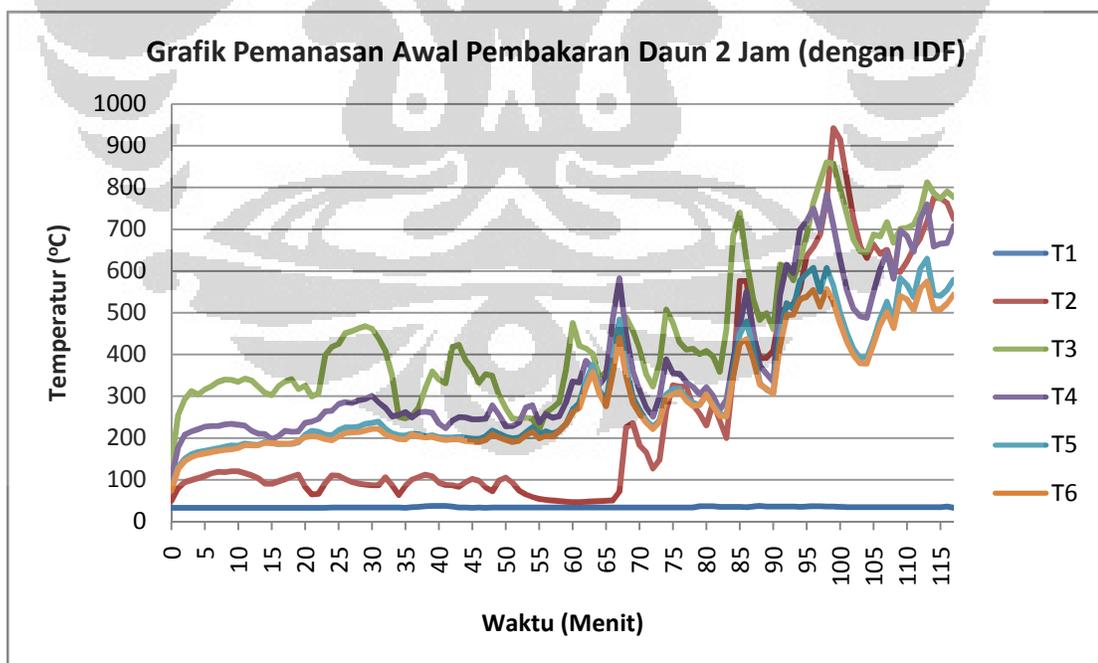
Gambar 4.15 Kondisi saat Pemanasan Awal (*Burner* hidup)

4.2.2.1. Analisis Perbandingan Grafik Pemanasan Awal

Proses pemanasan awal sebelum adanya penambahan *induced draft fan* berlangsung selama 83 menit, sedangkan pada proses pemanasan awal setelah penambahan *induced draft fan* berlangsung selama 118 menit. Dapat terlihat bahwa pada percobaan yang menggunakan *induced draft fan* pemanasan awal berlangsung lebih lama. Perbedaan waktu pemanasan awal antara sebelum dan setelah penggunaan *induced draft fan* itu sebesar 35 menit. Meskipun demikian terlihat pada grafik bahwa temperatur pada penggunaan *induced draft fan* kenaikannya cenderung stabil.



Gambar 4.16 Grafik Pemanasan Awal Pembakaran Daun 2 Jam Sebelum Penambahan *Induced Draft Fan* Terhadap Waktu (menit)



Gambar 4.17 Grafik Pemanasan Awal Pembakaran Daun 2 Jam Setelah Penambahan *Induced Draft Fan* Terhadap Waktu (menit)

Pada pengujian pembakaran 2 jam ini perbedaan waktu pemanasan awal untuk mencapai *self sustained combustion* juga mencapai 35 menit sama dengan pemanasan awal pada pengujian pembakaran daun 1 jam. Sehingga hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan *induced draft fan* pada pemanasan awal dapat membuat proses berlangsung lebih lama, akan tetapi temperturnya mengalami kenaikan yang stabil dalam menuju *self sustained combustion*.

Pada gambar 4.16 dan 4.17, terlihat dari grafiknya bahwa temperatur T1 cenderung tetap karena T1 hanya mengukur temperatur dari udara *blower* untuk fluidisasi, di mana nilai temperturnya tidak mengalami perubahan yang signifikan selama proses pemanasan awal.

Untuk T2 pada gambar 4.16, terlihat bahwa pemanasan awalnya terus mengalami peningkatan hingga mencapai titik puncak pertamanya pada menit ke-37 dengan temperatur sebesar 670 °C. Setelah itu temperatur mengalami penurunan hingga pada kisaran 300°C pada menit ke-55. Hal ini terjadi dikarenakan proses *heat transfer* yang lambat dari ruang bakar (*freeboard*) menuju hamparan pasir (*bed*). Pada menit ke-56 sampai dengan menit ke-62 temperatur berfluktuasi dengan titik tertinggi sebesar 500°C dan titik terendahnya sebesar 300°C. Barulah mulai dari menit ke-66 temperatur *bed* mengalami kenaikan dan mengalami puncak temperatur pemanasan awalnya pada menit ke-73 dengan temperatur 814°C. Akan tetapi, temperatur mengalami penurunan nilai yang juga drastis sampai menyentuh suhu 165°C pada menit ke-40. Dan akhirnya pada menit ke-83 ditetapkanlah bahwa telah terjadi *self sustained combustion* sehingga *burner* dimatikan. Untuk T2 pada gambar 4.17, terlihat bahwa pemanasan awalnya terjadi sangat lambat dimana temperturnya masih di kisaran 100°C sampai dengan menit ke-67. Hal ini terjadi dikarenakan proses *heat transfer* yang lambat dari ruang bakar (*freeboard*) menuju hamparan pasir (*bed*). Mulai dari menit ke-69 temperatur mulai mengalami kenaikan hingga mencapai titik puncak pemanasan awalnya pada temperatur 941°C di menit ke-100. Dan akhirnya pada menit ke-118 ditetapkanlah bahwa telah terjadi *self sustained combustion* sehingga *burner* dimatikan. Perbedaan paling mencolok antara kedua

grafik pemanasan awal pada T2 ini adalah mengenai waktu terjadinya *self sustained combustion*. *Self sustained combustion* sendiri dapat dilihat dari kondisi hamparan pasir (*bed*) yang telah berubah warna menjadi merah menyala seperti lava yang bergolak membara. Sehingga bila telah terlihat tanda-tanda seperti itu maka *burner* telah dapat dimatikan. Kembali mengenai perbedaan waktu pemanasan awal antara kedua grafik terlihat bahwa waktu pemanasan awal untuk pembakaran daun yang telah ditambahkan *induced draft fan* lebih lama sekitar 35 menit. Hal ini terjadi dikarenakan proses *heat transfer* yang lambat dari ruang bakar (*freeboard*) menuju hamparan pasir (*bed*). Akan tetapi, dilihat dari grafik 4.17 terlihat bahwa kenaikan temperatur T2 cenderung lebih stabil daripada yang terlihat di grafik 4.16. Pada grafik 4.17, yang telah menggunakan *induced draft fan*, meskipun temperatur mengalami peningkatan yang cukup lama tetapi tidak ada temperatur yang mengalami penurunan drastis seperti halnya yang terlihat pada grafik 4.16 yang belum menggunakan *induced draft fan*. Temperatur pada grafik 4.16 sangat berfluktuasi sehingga meskipun temperaturnya cepat naik akan tetapi dapat pula cepat turun. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan *induced draft fan* saat pemanasan awal meskipun membutuhkan waktu yang relatif lebih lama sekitar 35 menit namun efektif dalam menaikkan suhu menjadi lebih stabil sehingga *self sustained combustion* yang terjadi lebih baik.

Untuk T3 pada gambar 4.16, terlihat bahwa pada pemanasan awal temperatur tidak stabil. Bahkan baru pada menit ke-11 temperatur T3 mengalami penurunan drastis menjadi 169°C. Setelah itu temperatur T3 kembali normal dengan berfluktuasi sesuai dengan *feeding*. Apabila *feeding* dilakukan maka temperaturnya akan segera naik. Pada pengujian ini juga terdapat anomali seperti pada pengujian pembakaran daun 1 jam dimana pembakaran sebelum penggunaan *induced draft fan* temperatur T2 terkadang berada lebih tinggi daripada temperatur T3. Tujuan pemanasan awal sendiri adalah untuk menaikkan temperatur T2 atau *bed* hingga mencapai kondisi *self sustained combustion* sehingga seharusnya temperatur T3 selalu lebih tinggi daripada T2. Untuk T3 pada gambar 4.17, terlihat bahwa temperatur T3 pada pemanasan awal setelah penggunaan *induced draft fan* stabil pada kisaran temperatur 300-400°C

Universitas Indonesia

hingga menit ke-83 dan terus mengalami kenaikan yang stabil hingga mencapai titik puncak dengan temperatur 860°C pada menit ke-99. Hal ini kembali mengindikasikan bahwa penggunaan *induced draft fan* membuat kenaikan temperatur menjadi lebih stabil meskipun memakan waktu yang relatif lebih lama.

Untuk T4, T5 dan T6 pada gambar 4.16 dan gambar 4.17, temperatur pada bagian ini tergantung dari temperatur T3. Perbedaan ketiganya adalah letaknya dari pusat pembakaran. Dimana semakin menjauhi pusat pembakaran (*free board area*) yang suhunya diukur dengan termokopel 3 (T3), maka temperaturnya lebih rendah dari termokopel yang ada di bawahnya. Jadi, apabila disimpulkan bahwa temperaturnya $T4 > T5 > T6$

Tabel 4.13 Tabel Perbandingan Temperatur Rata-Rata Pemanasan Awal Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* 2 Jam

	Tanpa <i>Induced Draft Fan</i>	Dengan <i>Induced Draft Fan</i>
Termokopel	Temperatur Rata-Rata (°C)	Temperatur Rata-Rata (°C)
T1	39.394	34.200
T2	309.025	260.483
T3	449.063	449.186
T4	332.766	362.926
T5	247.495	303.163
T6	205.844	226.056

Jika dilihat dari tabel perbandingan temperatur rata-rata di atas terlihat bahwa pemanasan awal dengan menggunakan *induced draft fan* unggul pada temperatur T4 dan mempunyai temperatur rata-rata yang sama pada T3, sedangkan temperatur lainnya masih kalah dibandingkan dengan pengujian pembakaran tanpa *induced draft fan*. Hal ini disebabkan karena pemanasan awal dengan penggunaan *induced draft fan* yang meskipun stabil mengalami kenaikan temperatur tetapi memakan waktu cukup lama pada suhu rendah sehingga temperatur rata-ratanya ikut menjadi rendah.

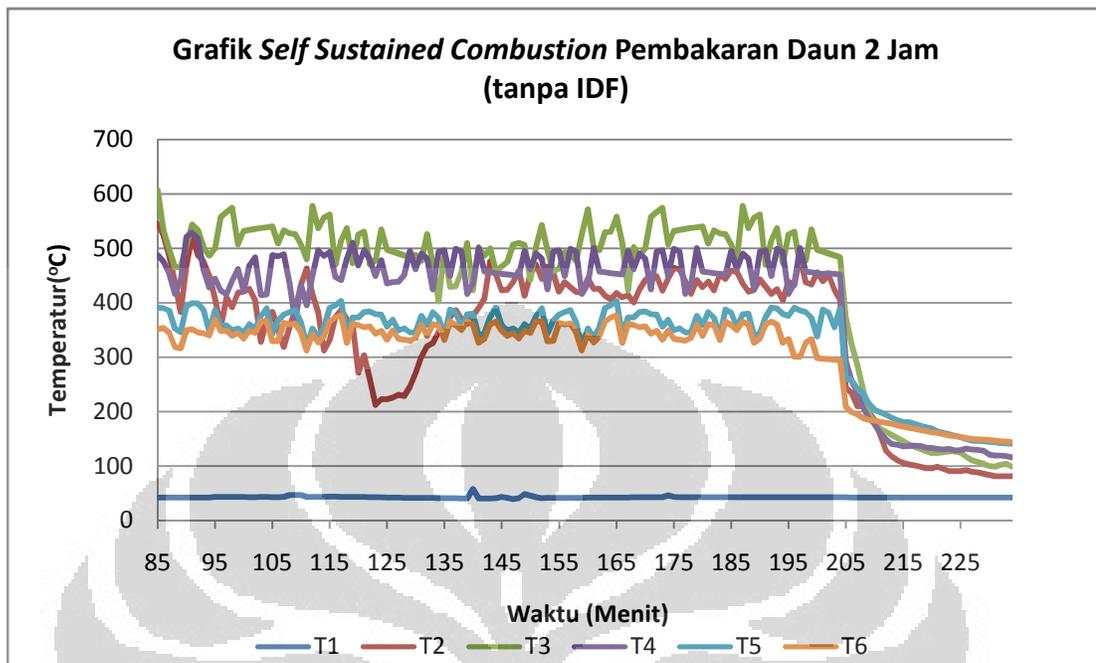
4.2.2.2. Analisis Perbandingan Grafik *Self Sustained Combustion*

Self Sustained Combustion adalah suatu kondisi dimana hamparan pasir (*bed*) yang telah berubah warna menjadi merah menyala seperti lava yang bergolak membara. Kondisi seperti ini didapatkan setelah dilakukan pemanasan awal yang cukup. Sehingga saat burner telah dimatikan hamparan pasir (*bed*) telah menyimpan panas dan saat dimasukkan bahan bakar dapat langsung terbakar. Untuk blower tiup (*Forced Draft Fan*) tetap dihidupkan dalam kondisi ini, hanya *burner* sajalah yang dimatikan pada saat proses *self sustained combustion* ini.

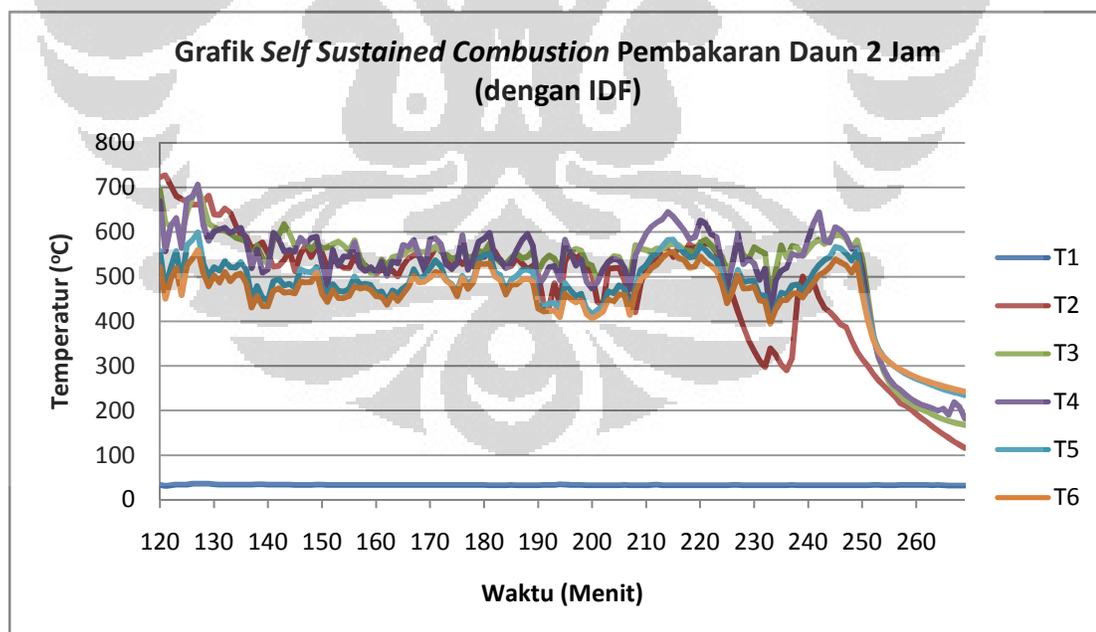
Feeding (pemasukan bahan bakar) pada saat *self sustained combustion* dilakukan secara berkelanjutan berdasarkan perubahan temperatur. *Feeding* dilakukan bila temperatur mulai turun dari titik tertinggi yang dicapainya. *Feeding* ini sistemnya tidak berbeda jauh dengan saat pemanasan awal. Perbedaannya hanya terdapat pada bahan bakarnya. Saat *self sustained combustion* ini bahan bakar yang digunakan adalah daun kering. Daun kering yang mudah terbakar membuat *feed rate* (laju pengumpanan) menjadi tinggi sehingga dibutuhkan bahan bakar yang jumlahnya banyak.



Gambar 4.18 Kondisi saat *Self Sustained Combustion* (*Burner fully off*)



Gambar 4.19 Grafik *Self Sustained Combustion* Pembakaran Daun 2 Jam Sebelum Penambahan *Induced Draft Fan* Terhadap Waktu (menit)



Gambar 4.20 Grafik *Self Sustained Combustion* Pembakaran Daun 2 Jam Setelah Penambahan *Induced Draft Fan* Terhadap Waktu (menit)

Pada gambar 4.19 dan 4.20, terlihat dari grafiknya bahwa temperatur T1 cenderung tetap karena T1 hanya mengukur temperatur dari udara *blower* untuk fluidisasi, di mana nilai temperaturnya tidak mengalami perubahan yang signifikan selama proses *self sustained combustion*. Hal ini sama dengan kondisi pada saat pemanasan awal.

Pada gambar 4.19, terlihat dari grafiknya bahwa temperatur T2 mengalami penurunan yang drastis pada menit ke-122 dengan temperatur 212°C. Hal ini terjadi diakibatkan pada *bed* tidak terjadi *bubbling* sehingga bahan bakar menjadi tertumpuk dan saat bahan bakar dimasukkan tidak langsung terbakar. Akibatnya temperatur *bed* mengalami penurunan drastis karena tidak adanya *heat transfer* dari *freeboard area* menuju *bed*. Solusinya adalah dengan melakukan pengadukan manual hingga *bed* kembali *bubbling*. Secara keseluruhan temperatur T2 pada pengujian pembakaran sebelum penggunaan *induced draft fan* berada di kisaran temperatur 400-450°C. Sedangkan pada gambar 4.20, terlihat dari grafiknya bahwa temperatur T2 mengalami penurunan yang drastis pada menit ke-227 sampai dengan menit ke-236 dengan temperatur paling rendah sebesar 289°C. Penyebab dari hal ini sama dengan yang terjadi sebelum penggunaan *induced draft fan* dimana pada *bed* tidak terjadi *bubbling* sehingga bahan bakar menjadi tertumpuk dan saat bahan bakar dimasukkan tidak langsung terbakar. Akibatnya temperatur *bed* mengalami penurunan drastis karena tidak adanya *heat transfer* dari *freeboard area* menuju *bed*. Perbedaannya adalah waktu terjadinya *bed* yang tidak *bubbling*. Pada sebelum penggunaan *induced draft fan*, *bed* yang tidak *bubbling* itu terjadi selang 40 menit setelah *self sustained combustion*. Sedangkan setelah penggunaan *induced draft fan*, *bed* yang tidak *bubbling* itu terjadi 117 menit setelah *self sustained combustion*. Temperatur T2 secara keseluruhan setelah penggunaan *induced draft fan* berada di kisaran temperatur 500-550°C. Dapat disimpulkan dari kedua grafik tersebut bahwa penggunaan *induced draft fan* sangat berpengaruh untuk meningkatkan temperatur T2 hingga mencapai 150°C. Hal ini juga mengindikasikan bahwa proses *heat transfer* yang terjadi dari *freeboard area* menuju *bed* berlangsung dengan baik.

Untuk T3, T4, T5 dan T6 pada gambar 4.19, terlihat secara keseluruhan dari grafiknya bahwa temperaturnya tidak terlalu berbeda jauh dan berada di kisaran temperatur 350-500°C dengan T3 selalu berada pada temperatur paling tinggi. Sedangkan untuk T3, T4, T5 dan T6 pada gambar 4.20, terlihat secara keseluruhan dari grafiknya bahwa temperaturnya tidak terlalu berbeda jauh dan berada di kisaran temperatur 450-600°C.

Dalam pengujian kali ini yang paling menarik untuk diperhatikan adalah grafik pembakaran dengan IDF dimana deviasi temperatur antara T2, T3, T4, T5 dan T6 nilainya sangat kecil bila dibandingkan dengan pembakaran tanpa IDF. Hal ini mengindikasikan bahwa pembakaran yang terjadi pada *furnace* berlangsung lebih merata mulai dari *bed* sampai dengan daerah *freeboard* yang paling atas. Pembakaran yang merata pada daerah *freeboard* ini terjadi dikarenakan penggunaan IDF membuat pembakaran tidak hanya terkumpul di satu titik pada daerah *freeboard* saja melainkan merata dari bagian bawah sampai dengan bagian atas. Pembakaran yang biasanya hanya terjadi pada T3 dengan adanya IDF membuat sebagian *volatile* terbakar pada T4 sampai dengan T6. Akan tetapi mungkin saja terdapat efek samping dari hal ini dimana yang ditakutkan adalah terdapat *volatile* yang terbakar ikut keluar melalui cerobong. Tentulah hal ini dapat membahayakan daerah sekitar laboratorium.

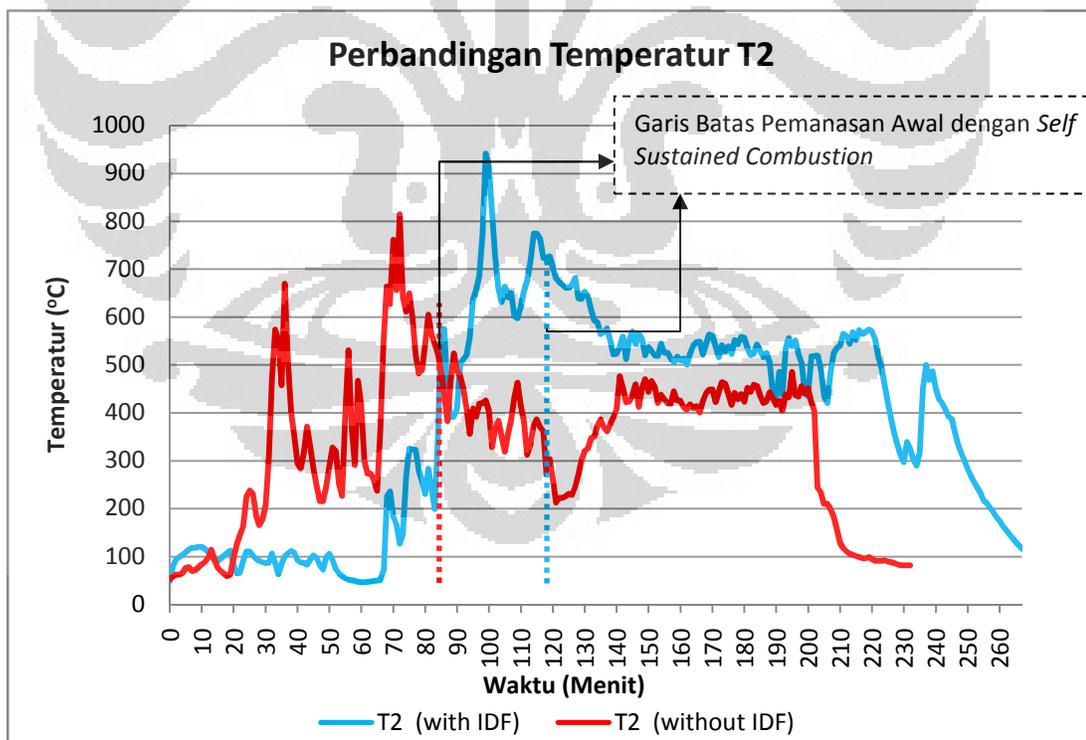
Tabel 4.14 Perbandingan Temperatur Rata-Rata *Self Sustained Combustion* Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* 2 Jam

	Tanpa <i>Induced Draft Fan</i>	Dengan <i>Induced Draft Fan</i>
Termokopel	Temperatur Rata-Rata (°C)	Temperatur Rata-Rata (°C)
T1	42.546	33.370
T2	404.190	515.397
T3	510.524	559.690
T4	463.631	558.374
T5	368.466	496.013
T6	344.691	478.802

Jika dilihat dari tabel perbandingan temperatur rata-rata di atas terlihat bahwa temperatur *self sustained combustion* dengan menggunakan *induced draft fan* lebih unggul mulai dari T2 sampai dengan T6. Bahkan temperatur rata-ratanya berbeda sekitar 100°C pada T2, T4, T5 dan T6. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan *induced draft fan* dapat membuat temperatur mulai dari *bed*, *freeboard area* sampai dengan *exhaust* lebih meningkat dan relatif stabil. Ini dikarenakan *induced draft fan* berguna untuk membentuk aliran udara kontinu yang diperlukan dalam jumlah sesuai bagi pembakaran serta menghisap dan membuang gas sisa hasil produk pembakaran. Dengan demikian efisiensi dari *fluidized bed combustor* ini ikut meningkat.

4.2.2.3. Analisis Perbandingan Grafik Distribusi Temperatur Beberapa Termokopel

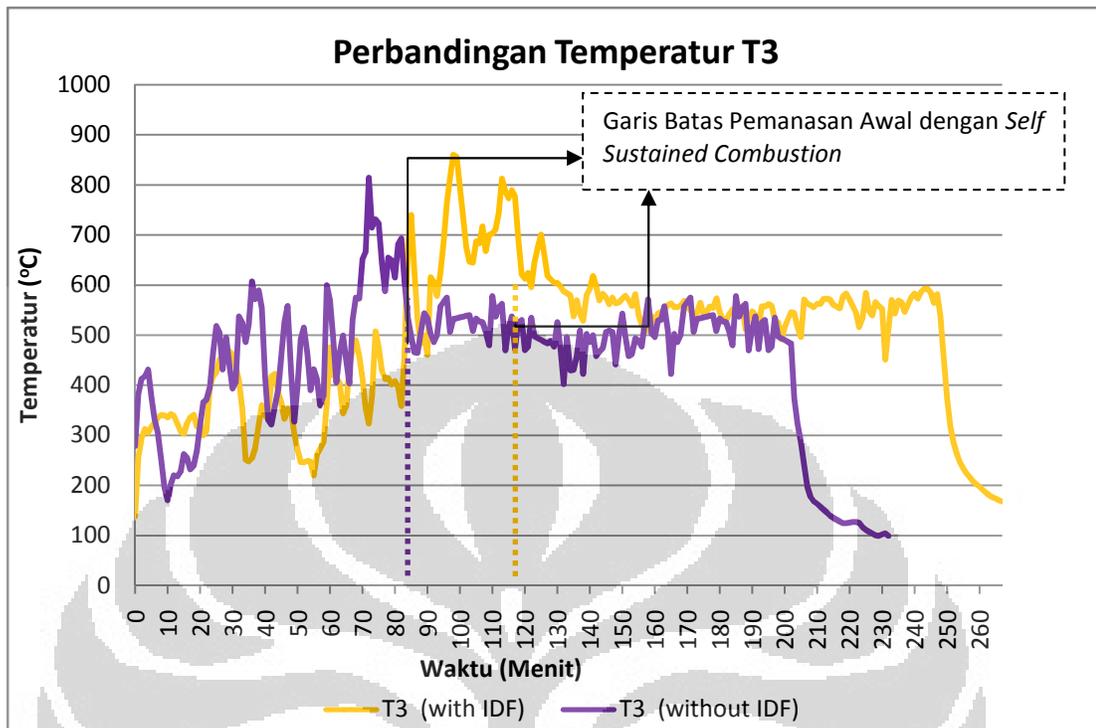
Pada bagian ini akan lebih lanjut dibahas mengenai perbandingan distribusi temperatur 2 termokopel, yaitu termokopel 2 (T2) dan termokopel 3 (T3).



Gambar 4.21 Grafik Perbandingan Distribusi Temperatur T2 Terhadap Waktu (menit)

T2 dipilih karena letak termokopel ini yang berada di dalam hampan pasir (*bed*) sehingga akan terlihat kondisi *bed* apakah mengalami aglomerasi atau tidak baik saat pemanasan awal maupun saat *self sustained combustion*. Melalui T2 dapat pula terlihat apakah telah terjadi *self sustained combustion* atau belum sehingga dapat diputuskan kapan burner dimatikan. Karena pentingnya peran dari T2 ini maka dilakukan pengamatan terhadap termokopel ini.

Dalam perbandingan temperatur termokopel 2 (T2) ini terlihat bahwa T2 pada pemanasan awal tanpa IDF sama halnya dengan pada pengujian sebelumnya dimana temperaturnya lebih cepat naik dan juga lebih cepat dalam mencapai kondisi *self sustained combustion*. Sedangkan T2 pada pemanasan awal dengan IDF kenaikan temperaturnya berlangsung lebih lama dan juga 35 menit lebih lama dalam mencapai kondisi *self sustained combustion* tetapi lebih stabil dalam hal kenaikan temperaturnya. Dapat disimpulkan dari kedua pengujian ini adalah sebelum pemasangan IDF pembakaran terkumpul pada *bed* sehingga temperaturnya mengalami kenaikan yang pesat, sedangkan dengan penggunaan IDF pada saat pemanasan awal *volatile* yang terjadi pada pembakaran banyak yang ikut terhisap oleh IDF dan terbuang melalui cerobong sehingga pembakaran menjadi tidak seperti pada sebelumnya yang mengumpul melainkan tersebar di dalam *furnace*. Hal ini terlihat secara jelas diamati melalui lubang pengamatan dimana pada saat 1 jam pemanasan awal panas yang terjadi tidak keluar melalui lubang pengamatan berbeda halnya pada sebelum pemasangan IDF dimana panas yang terjadi dapat keluar melalui lubang pengamatan. Pada kondisi *self sustained combustion* pada pengujian kali ini barulah terlihat perbedaan temperatur T2 yang signifikan antara pembakaran dengan dan tanpa IDF. Pembakaran dengan IDF membuat kenaikan temperatur pada *bed* mencapai 100-150°C. Seperti yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya bahwa pembakaran dengan IDF membuat pembakaran menjadi lebih baik dimana temperatur pada *freeboard* meningkat. Pembakaran yang lebih baik inilah yang membuat bahan bakar yang dimasukkan tidak lagi meninggalkan sisa hasil pembakaran (*ash*) yang banyak. Dengan demikian *bed* terus terjaga untuk *bubbling* sehingga perpindahan panas menuju *bed* berlangsung dengan baik.



Gambar 4.22 Grafik Perbandingan Distribusi Temperatur T3 Terhadap Waktu (menit)

Selanjutnya termokopel 3 (T3) dipilih karena letak termokopel ini yang berada di bagian *freeboard* sehingga akan terlihat kondisi temperatur *freeboard* ketika dimasukkan bahan bakar. Apabila temperatur langsung mengalami kenaikan berarti bahan bakar tersebut langsung terbakar, namun apabila temperatur lambat naik berarti bahan bakar belum terbakar. Melalui T3 ini pula dapat terlihat perpindahan panas yang terjadi dari *freeboard* menuju *bed*.

Dalam perbandingan temperatur termokopel 3 (T3) ini terlihat bahwa pada pemanasan awal tanpa dan dengan IDF temperaturnya sama-sama mengalami kenaikan yang relatif stabil. Akan tetapi pada pembakaran dengan IDF dapat terlihat lebih lama mencapai kondisi *self sustained combustion* sama seperti pengujian sebelumnya. Pemanasan awal berlangsung lebih lama dikarenakan saat awal pembakaran dengan IDF *volatile* banyak yang ikut terhisap sehingga ikut terbangun melalui cerobong. Pada kondisi *self sustained combustion* terlihat dari grafik bahwa pada daerah *freeboard* antara tanpa dan dengan penggunaan IDF temperaturnya tidak

terjadi perbedaan yang berarti. Temperatur yang ada sama-sama berkisar diantara 450-600°C. Kondisi feed rate daun yang sama pada *self sustained combustion* sebesar 0,25 gram/0,5 menit merupakan faktor penyebab tidak terjadinya perbedaan berarti pada daerah *freeboard*.

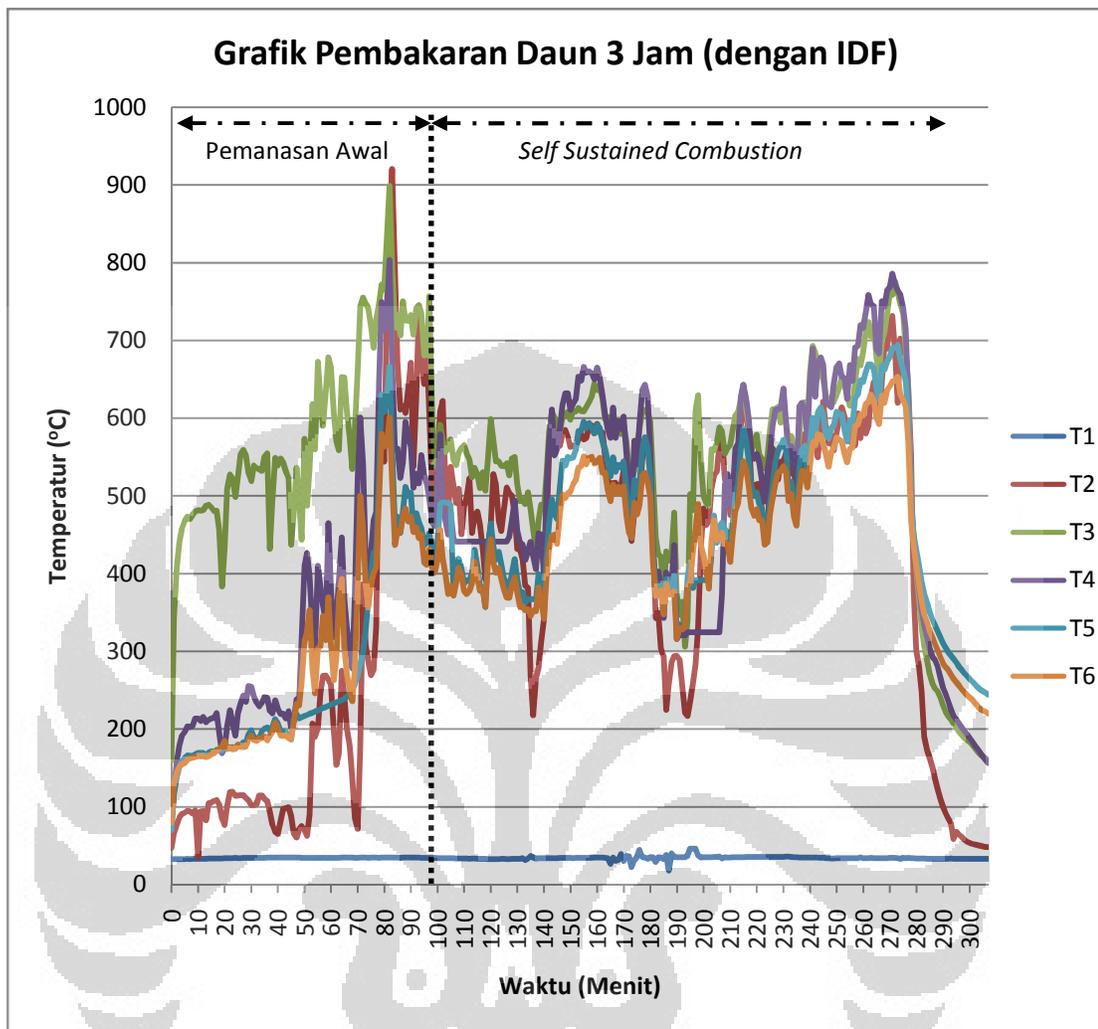
4.2.3. Analisis Grafik Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* selama 3 jam

Pada bagian ini tidak ada perbandingan grafik pembakaran seperti pada bagian sebelumnya. Analisis pada bagian ini untuk melihat daya tahan serta karakteristik dari pembakaran daun pada saat *self sustained combustion*. *Self Sustained Combustion* adalah suatu kondisi dimana hamparan pasir (*bed*) yang telah berubah warna menjadi merah menyala seperti lava yang bergolak membara. Kondisi seperti ini didapatkan setelah dilakukan pemanasan awal yang cukup. *Feeding* (pemasukan bahan bakar) pada saat *self sustained combustion* dilakukan secara berkelanjutan berdasarkan perubahan temperatur. Saat *self sustained combustion* ini bahan bakar yang digunakan adalah daun kering. Daun kering yang mudah terbakar membuat *feed rate* (laju pengumpanan) menjadi tinggi sehingga dibutuhkan bahan bakar yang jumlahnya banyak.



Gambar 4.23 Kondisi saat *Self Sustained Combustion* (*Burner fully off*)

Universitas Indonesia



Gambar 4.24 Grafik Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* 3 Jam Setelah Penambahan *Induced Draft Fan* Terhadap Waktu (menit)

Pada bagian analisis ini percobaan mengenai uji daya tahan pembakaran difokuskan hanya pada bagian *self sustained combustion*.

Pada gambar 4.19, terlihat dari grafiknya bahwa temperatur T1 cenderung tetap karena T1 hanya mengukur temperatur dari udara *blower* untuk fluidisasi, di mana nilai temperaturnya tidak mengalami perubahan yang signifikan selama proses *self sustained combustion*. Hal ini sama dengan kondisi pada saat pemanasan awal.

Pada gambar 4.19, terlihat dari grafiknya bahwa temperatur T2 mengalami penurunan yang drastis pada 3 titik yaitu: menit ke-137 dengan temperatur 217°C, menit ke-187 dengan temperatur 224°C dan menit ke-195 dengan temperatur 217°C. Hal ini terjadi diakibatkan pada *bed* tidak terjadi *bubbling* sehingga bahan bakar menjadi tertumpuk dan saat bahan bakar dimasukkan tidak langsung terbakar. Akibatnya temperatur *bed* mengalami penurunan drastis karena tidak adanya *heat transfer* dari *freeboard area* menuju *bed*. Mulai dari menit ke-200 temperatur mengalami peningkatan yang signifikan hingga mencapai temperatur 731°C pada menit ke-272. Karena keterbatasan bahan bakar dan target 3 jam yang sudah tercapai maka pengujian pembakaran dihentikan. Bila melihat tren yang ada pada bagian akhir, mungkin apabila diteruskan temperatur dapat terus meningkat dan waktu pembakaran daun berlangsung lebih lama. Secara keseluruhan temperatur T2 pada pengujian pembakaran sebelum penggunaan *induced draft fan* berada di kisaran temperatur 500-600°C. Bila melihat tren yang ada hal ini mengindikasikan bahwa pembakaran dengan menggunakan bahan bakar daun dapat berlangsung lebih lama dan terus menerus apabila dijaga *bed* agar tetap *bubbling*.

Untuk T3, T4, T5 dan T6 pada gambar 4.16, terlihat secara keseluruhan dari grafiknya bahwa temperaturnya tidak terlalu berbeda jauh dan berada di kisaran temperatur 400-600°C. Akan tetapi, terlihat dari grafik pula bahwa temperatur kurang stabil dan terjadi penurunan temperatur hingga menyentuh temperatur 350°C mulai dari menit ke-191 sampai dengan menit ke-195. Meskipun temperatur pada pengujian ini kurang stabil tetapi tren yang ada terlihat bahwa temperatur dapat terus mengalami peningkatan apabila *bed* dijaga agar tetap *bubbling*.

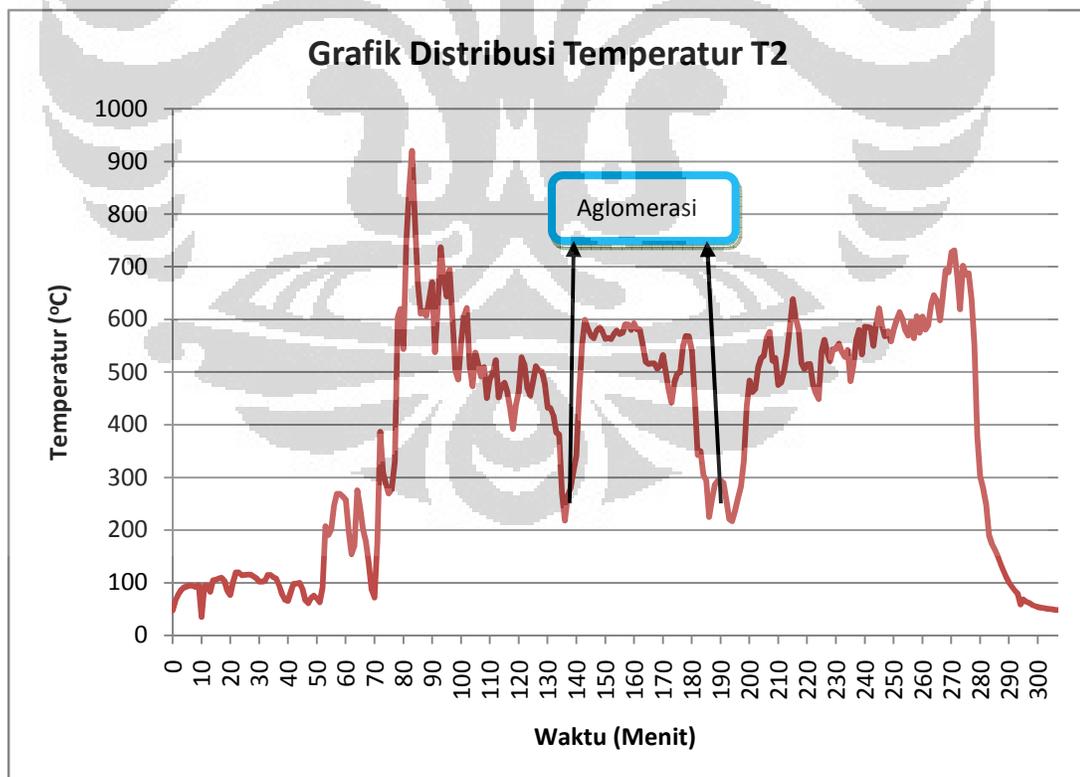
Jika melihat dari tabel 4.15 terlihat bahwa temperatur rata-rata T2, T3, T4 serta T5 berada di atas angka 500°C. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan *induced draft fan* dapat membuat temperatur mulai dari *bed*, *freeboard area* sampai dengan *exhaust* lebih meningkat dan relatif stabil. Ini dikarenakan *induced draft fan* berguna untuk membentuk aliran udara kontinu yang diperlukan dalam jumlah sesuai bagi pembakaran serta menghisap dan membuang gas sisa hasil produk pembakaran. Dengan demikian efisiensi dari *fluidized bed combustor* ini ikut meningkat.

Universitas Indonesia

Tabel 4.15 Tabel Temperatur Rata-Rata *Self Sustained Combustion* Pengujian Pembakaran Daun pada *Self Sustained Combustion* 3 Jam

<i>Self Sustained Combustion</i>	
Termokopel	Temperatur Rata-Rata (°C)
T1	34.236
T2	509.307
T3	578.881
T4	541.456
T5	500.196
T6	475.552

Pada bagian berikut ini akan dijelaskan lebih lanjut mengenai penurunan temperatur drastis yang terjadi pada T2. Terlihat dari grafik di bawah bahwa temperatur T2 mengalami penurunan yang drastis pada 3 titik yaitu: menit ke-137 dengan temperatur 217°C, menit ke-187 dengan temperatur 224°C dan menit ke-195 dengan temperatur 217°C.



Gambar 4.25 Grafik Distribusi Temperatur T2 Terhadap Waktu (menit)

Penurunan temperatur secara drastis ini disebut juga dengan aglomerasi. Aglomerasi selalu menjadi masalah serius pada alat pengkonversian bahan bakar padat seperti FBC ini. Komponen anorganik alkali yang berasal dari bahan bakar biomassa, terutama Kalium (K) dan Natrium (Na), menjadi sumber dari terjadinya aglomerasi ini. Jumlah komponen anorganik alkali berbeda-beda tergantung dari biomassa yang digunakan. Komponen anorganik alkali ini akan bereaksi dengan hamparan pasir silika yang digunakan sebagai *bed*, sehingga akan bereaksi membentuk alkali silicate. Hal ini membuat titik leleh dari pasir silika yang seharusnya lebih dari 1000°C turun menjadi kurang dari 700°C dan bahkan dapat lebih rendah lagi. Sebagai akibatnya, partikel pasir silika menjadi seperti dilapisi dengan lapisan perekat. Partikel pasir yang lengket tersebut apabila dibiarkan akan terus membesar sehingga seluruh hamparan pasir pada *bed* tidak mengalami *bubbling*. Hal inilah yang membuat terjadinya penurunan temperatur secara drastis karena tidak adanya *heat transfer* dari *freeboard area* menuju *bed*. Solusi sederhana yang dilakukan untuk mengatasi masalah ini adalah dengan melakukan pengadukan manual sampai dengan *bed* menjadi *bubbling* kembali seperti terlihat pada gambar di bawah.



Gambar 4.26 Proses Pengadukan Manual agar *Bed* kembali *Bubbling*

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

9.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari studi kinerja insinerator *fluidized bed combustor* yang memanfaatkan limbah daun kering melalui perbandingan pengujian pembakaran sebelum dan setelah penggunaan *induced draft fan* antara lain:

1. Pengujian pembakaran daun pada *self sustained combustion* selama 1 jam proses pemanasan awal sebelum adanya penambahan *induced draft fan* berlangsung selama 69 menit, sedangkan pada proses pemanasan awal setelah penambahan *induced draft fan* berlangsung selama 104 menit. Temperatur rata-rata pemanasan awal dengan menggunakan *induced draft fan* hanya unggul pada temperatur T3, sedangkan temperatur lainnya masih kalah dibandingkan dengan pengujian pembakaran tanpa *induced draft fan*
2. Pengujian pembakaran daun pada *self sustained combustion* selama 1 jam menghasilkan temperatur pada proses *self sustained combustion* T2 sampai dengan T6 sebelum penggunaan *induced draft fan* berada di kisaran temperatur 300-500°C, sedangkan temperatur T2 sampai dengan T6 pada setelah penggunaan *induced draft fan* berada di kisaran temperatur 400-600°C. Temperatur rata-rata *self sustained combustion* dengan menggunakan *induced draft fan* lebih unggul mulai dari T2 sampai dengan T6.
3. Pengujian pembakaran daun pada *self sustained combustion* selama 2 jam proses pemanasan awal sebelum adanya penambahan *induced draft fan* berlangsung selama 83 menit, sedangkan pada proses pemanasan awal setelah penambahan *induced draft fan* berlangsung selama 118 menit. Temperatur rata-rata pemanasan awal dengan menggunakan *induced draft fan* unggul pada temperatur T4 dan mempunyai temperatur rata-rata yang sama pada T3, sedangkan temperatur lainnya masih kalah dibandingkan dengan pengujian pembakaran tanpa *induced draft fan*

4. Pengujian pembakaran daun pada *self sustained combustion* selama 2 jam menghasilkan temperatur pada proses *self sustained combustion* T2 sampai dengan T6 sebelum penggunaan *induced draft fan* berada di kisaran temperatur 350-500°C, sedangkan temperatur T2 sampai dengan T6 pada setelah penggunaan *induced draft fan* berada di kisaran temperatur 450-600°C. Temperatur rata-rata *self sustained combustion* dengan menggunakan *induced draft fan* lebih unggul mulai dari T2 sampai dengan T6.
5. Dari kedua pengujian pembakaran daun pada *self sustained combustion* selama 1 dan 2 jam terlihat bahwa penggunaan *induced draft fan* meskipun membutuhkan pemanasan awal yang lebih lama 35 menit tetapi kenaikan temperaturnya lebih stabil sehingga terlihat pula saat proses *self sustained combustion* temperatur rata-ratanya lebih besar sekitar 100-150°C. Hal ini sesuai dengan fungsi *induced draft fan* yang berguna untuk membentuk aliran udara kontinu yang diperlukan dalam jumlah sesuai bagi pembakaran sehingga tekanan di *furnace* tetap terjaga serta menghisap dan membuang gas sisa hasil produk pembakaran. Dengan demikian efisiensi dari *fluidized bed combustor* ini ikut meningkat.
6. Pada pengujian daya tahan pembakaran daun pada *self sustained combustion* selama 3 jam terlihat bahwa meskipun ada 2 kali penurunan temperatur tetapi tren temperaturnya selalu meningkat. Hal ini mengindikasikan bahwa pembakaran menggunakan bahan bakar daun dapat dilakukan selama lebih dari 3 jam sehingga insinerator *fluidized bed combustor* ini dapat dijadikan solusi pemanfaatan limbah daun kering di kampus UI Depok.

9.2 Saran

Studi mengenai *Fluidized Bed Combustor* merupakan. Beberapa rekomendasi yang saya ajukan untuk kepentingan penelitian lebih jauh, yakni:

1. Diperlukannya pengujian komposisi gas pada saat pengujian pembakaran agar diketahui lebih lanjut pengaruh penggunaan *induced draft fan* pada proses pembakaran yang terjadi.
2. Pemanfaatan *heat* yang dihasilkan dari percobaan ini, diharapkan bisa diwujudkan dalam bentuk perangkat *heat exchanger*, baik itu untuk pemanfaatan dalam bentuk mini-boiler, atau aplikasi pengering.
3. Untuk penelitian kedepannya, diharapkan adanya studi mekanisme *feeding* yang terkontrol secara otomatis berdasarkan bacaan data digital temperatur yang terdapat di DAQ sehingga efektifitas dan efisiensi dari *feeding* bahan bakar pada pengujian pembakaran bisa menghasilkan nilai yang lebih baik.
4. 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. Selain itu, diperlukan juga instalasi air bersih yang sangat dibutuhkan untuk praktikan laboratorium di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

1. Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia 2011, Kementerian ESDM sumber <http://www.esdm.go.id/publikasi/handbook-of-energy-a-economics-statistics-of-indon-handbook-of-energy-a-economics-statistics-of-indon-.html> diakses pada tanggal 25 Mei 2012.
2. Presentasi Menteri ESDM, 11 April 2008 sumber http://www.wwf.or.id/about_wwf/whatwedo/climate/oursolution/mitigation222/renewable_energy.cfm) diakses pada tanggal 3 Juni 2012
3. Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2006 sumber http://www.batan.go.id/prod_hukum/extern/Perpres5_2006.pdf diakses pada tanggal 4 Juni 2012.
4. Blueprint Pengelolaan Energi Nasional Tanggal 2006-2025 Tanggal 10 November 2007 sumber <http://www.esdm.go.id/publikasi/lainlain.html> diakses pada 25 Mei 2012
5. Howard, J. R., *Fluidized Beds – Combustion and Applications*, (London: Applied Science Publishers, 1983).
6. Bruce R. Munson, Donald F. Young, *Mekanika Fluida*, terj. Harinaldi, Budiarto (Jakarta: Erlangga, 2003).
7. Geldart, D., *Gas Fluidization Technology*, (New York: John Wiley & Sons, 1986).
8. Kunii, Daizo & Octave Levenspiel, *Fluidization Engineering*, (New York: Butterworth-Heinemann, 1991).
9. Robert H. Perry, Don W. Green, *Perry's Chemical Engineers' Handbook* 7th Ed., (Singapore: McGraw-Hill Int., 1997).
10. Christian, Hans. "Modifikasi Sistem Burner dan Pengujian Aliran Dingin *Fluidized Bed Incinerator* UI." Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2008.
11. Surjosatyo, Adi. "Fluidized Bed Incineration of Palm Shell & Oil Sludge Waste." Tesis, Program Magister Engineering Universiti Teknologi Malaysia, 1998.

12. “Experimental Operating & Maintenance Manual – Fluidisation and Fluid Bed Heat Transfer Unit H692,” P. A. Hilton Ltd.
13. Muntaqo, Azmi. “Studi Karakteristik Pembakaran Biomassa Tempurung Kelapa pada *Fluidized Bed Combustor* UI dengan Partikel Hampanan Pasir Berukuran Mesh 20-40.” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2011.
14. Prima, Nanda. “Studi Karakteristik Pengujian Pembakaran Biomassa Tempurung Kelapa Ukuran 1x1 cm dan 1,5x1,5 cm pada *Fluidized Bed Combustor* UI.” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2011.
15. Rahmat, Riza. “Studi Variasi Supply Udara Blower untuk Pencapaian *Self Sustained Combustion* pada Eksperimen Uji Bahan Bakar *Fluidized Bed Combustor* UI.” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2011.
16. Trisutrisno, R. arya. “Studi Karakteristik Pembakaran Biomassa (Tempurung Kelapa) *Fluidized Bed Combustor* UI dengan Kapasitas Maskimal.” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2010.
17. Atmaja, Anton. “Modifikasi Feeder dan Uji Pembakaran Ranting dengan Feeding Bertahap Naik pada *Fluidized Bed Combustor*.” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2010.

LAMPIRAN

USB-4718

8-ch Thermocouple Input USB Module with 8-ch Isolated Digital Input



Features

- Supports USB 2.0
- Supports voltage, current, and thermocouple inputs
- Bus-powered
- 8 thermocouple input channels
- 2,500 V_{DC} isolation
- Supports 4 – 20 mA current input
- Detachable screw terminal on modules
- 8-ch isolated DI and 8-ch isolated DO
- Suitable for DIN-rail mounting
- One lockable USB cable for secure connection included

CE FCC

Introduction

The USB-4700 series consists of true Plug & Play data acquisition devices. No more opening up your computer chassis to install boards—just plug in the module, then get the data. It's easy and efficient. USB-4718 offers 8 thermocouple inputs with 16-bit resolution, up to 0.1% input range accuracy. Portable design makes the USB-4718 suitable for the field research. Also the input channels can be set separately make it possible handling multiple types of sensor with only one USB-4718 module.

Reliable and rugged enough for industrial applications; yet, inexpensive enough for home projects, the USB-4718 is the perfect way to add measurement and control capability to any USB capable computer. The USB-4700 series is fully plug and play and easy to use. It obtains all required power from the USB port, so no external power connection is ever required.

Specifications

Analog Input

- **Accuracy** ±0.1% for voltage input
- **Bandwidth** 13.1 Hz @ 50 Hz
15.72 Hz @ 60 Hz
- **Channels** 8 differential
- **Ch. Independent Conf.** Yes
- **CMR @ 50/60 Hz** 92 dB min.
- **Resolution** 16 bits
- **Input Impedance** 1.8 MΩ
- **Input Range** 0 – 15 mV, 0 – 50 mV, 0 – 100 mV, 0 – 500 mV,
0 – 1 V, 0 – 2.5 V, 0 – 20 mA, 4 – 20 mA
- **Input Types** Thermocouple, mV, V, mA
- **Sampling Rate** 10 S/s (shared for all channels)
- **Span Drift** ±25 ppm/°C
- **T/C Type and Temperature Ranges**

J	0 – 760° C	R	500 – 1750° C
K	0 – 1370° C	S	500 – 1750° C
T	-100 – 400° C	B	500 – 1800° C
E	0 – 1000° C		

- **TVS/ESD Protection** Built-in
- **Zero Drift** ±0.3 μV/°C

Isolated Digital Input

- **Channels** 8
- **Input Voltage** Logic 0: 2 V max.
Logic 1: 5 V min. (30 V max.)
- **Isolation Protection** 2,500 V_{DC}
- **Opto-isolator Response** 25 μs

Isolated Digital Output

- **Channels** 8
- **Output Type** Sink (NPN)
- **Isolation Protection** 2,500 V_{DC}
- **Output Voltage** 5 – 30 V_{DC}, 1.1 A max./total
- **Sink Current** 200 mA max./channel
- **Opto-isolator Response** 25 μs

General

- **Bus Type** USB 2.0
- **I/O Connector** Onboard screw terminal
- **Dimensions (L x W x H)** 132 x 80 x 32 mm (5.2" x 3.15" x 1.26")
- **Power Consumption** 100 mA @ 5 V
- **Watchdog Timer** 1.6 sec. (System)
- **Operating Temperature** 0 – 60° C (32 – 140° F) (refer to IEC 68-2-1, 2)
- **Storage Temperature** -20 – 70° C (-4 – 158° F)
- **Storage Humidity** 5 – 95% RH non-condensing (refer to IEC 68-2-3)

Ordering Information

- **USB-4718-AE** 8-ch Thermocouple Input USB Module

Accessories

- **1960004544** Wall Mount Bracket
- **1960005788** VESA Mount Bracket

Online Download www.advantech.com/products

ADVANTECH