



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI KARAKTERISTIK BAHAN BAKAR BIOMASSA CAMPURAN  
RANTING DAN TEMPURUNG KELAPA PADA FLUIDIZED BED  
COMBUSTOR UNIVERSITAS INDONESIA**

**SKRIPSI**

**SATRIAWAN WIGUNA**

**0606073575**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

**DEPOK**

**JUNI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI KARAKTERISTIK BAHAN BAKAR BIOMASSA  
CAMPURAN RANTING DAN TEMPURUNG KELAPA PADA  
FLUIDIZED BED COMBUSTOR UNIVERSITAS INDONESIA**

**SKRIPSI**

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

**SATRIAWAN WIGUNA**

**0606073575**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

**DEPOK**

**JUNI 2011**

## **PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI**

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

### **STUDI KARAKTERISTIK BAHAN BAKAR BIOMASSA CAMPURAN RANTING DAN TEMPURUNG KELAPA PADA FLUIDIZED BED COMBUSTOR UNIVERSITAS INDONESIA**

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

Depok, 12 Juni 2011



**Satriawan Wiguna**

NPM : 0606073575

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Satriawan Wiguna  
NPM : 0606073575  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : STUDI KARAKTERISTIK BAHAN BAKAR BIOMASSA CAMPURAN  
RANTING DAN TEMPURUNG KELAPA PADA FLUIDIZED BED COMBUSTOR UNIVERSITAS  
INDONESIA

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

### DEWAN PENGUJI

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

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

Penguji : Ir. Yulianto Sulistyono, M.Sc., Ph.D

Penguji : Dr. Ir. H. R. Danardono AS, DEA.PE

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 4 Juli 2011

## KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

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

1. Ayah dan Ibu tercinta, Guananta Kusumo dan Enny Widiyati yang telah memberikan pengertian, perhatian serta kasih sayangnya yang tidak pernah habis untuk saya. Kedua adik saya, Arini Satyandita dan Rizkyawan Wibawa yang senantiasa memotivasi saya.
2. Kekasih tersayang, Intania Kusumawardhani, S. Ars, yang senantiasa menyemangati saya tanpa kenal lelah, beserta Ayah dan Ibu, Herry Sulistyo dan Endang Pudjiastuti. Adik dan Kakak, Tri Sulistyo Oktorizky dan Dianita Suliastuti beserta kekasih, Indra Setiawan, yang selalu memberikan dukungan dan motivasinya.
3. Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M.Eng, selaku dosen pembimbing yang telah bersedia untuk meluangkan waktu, tenaga, pikiran dan segala perhatiannya kepada saya sehingga saya selalu termotivasi dan mendapatkan semangat baru untuk dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Secara pribadi saya memohon maaf jika selama masa bimbingan ada kesalahan baik yang disengaja maupun tidak.
4. Seluruh dosen, staf pengajar dan karyawan DTM FTUI yang secara langsung atau tidak langsung memberikan pelajaran, wawasan dan informasi.
5. Seluruh teman seperjuangan skripsi saya (Adhika Anindita Tama, Ahmad Nurlatif, Alwin Nurman) yang telah mengalami suka duka bersama selama pengerjaan skripsi. Terima kasih untuk kalian semua yang sudah banyak membantu dalam pengerjaan skripsi ini.
6. Teman-teman seperjuangan yang selalu bersama selama ini, Sulaiman Achmad, Farhan Hasan, R. Arya T. yang juga membantu kelancaran skripsi ini
7. Seluruh rekan di dunia permusikan. Rekan-rekan dari 1<sup>st</sup> Impressions, Demank, Kevin, Dame, Fahris, Tanya, Dewanti, Arin. Rekan-rekan dari Rafi And The Beat, Bosyang, Rafi, Rudolf, Raben, Felix, Agus dan para kru, Bram, Kevin, Ari. Rekan-rekan dari Margo Cross Colony, Dylan, Rio, Ankadiov, Adit, Ekel, Peppy, Grace, Angel, Lia,

Maleakhi, Jordy. Rekan-rekan dari KJLS, Tommy, Masbud, Gerald, Barry, Febby, Yudhis, Marco, Aldhi, Aldhan, Bayu, Dennis, Dimaz, Adrian, Brendley, Bram, Ditto, Fajar, Haris, Vicky. Rekan-rekan dari Jakarta Broadway Team, dan seluruh rekan beserta mentor saya di dunia permusikan yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu

8. Seluruh teman-teman teknik mesin UI 2006 saya yang banyak sekali mendukung saya baik secara langsung maupun tidak langsung dan tidak dapat disebutkan satu persatu.
9. 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, 12 Juni 2011

Penulis

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

---

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

Nama : Satriawan Wiguna

NPM : 0606073575

Program Studi : Teknik Mesin

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

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

**STUDI KARAKTERISTIK BAHAN BAKAR BIOMASSA CAMPURAN  
RANTING DAN TEMPURUNG KELAPA PADA FLUIDIZED BED  
COMBUSTION UNIVERSITAS INDONESIA**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 13 Juni 2011

Yang menyatakan,



(Satriawan Wiguna)

## ABSTRAK

Nama : Satriawan Wiguna

Npm : 0606073575

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : Studi Karakteristik Bahan Bakar Biomassa Campuran Ranting Dan Tempurung Kelapa pada *Fluidized Bed Combustor* Universitas Indonesia

Tempurung kelapa dan ranting merupakan potensi biomassa yang sangat besar yang dimiliki oleh Indonesia sebagai salah satu negara kepulauan yang terletak di daerah tropis. Sejauh ini masih sedikit yang memanfaatkannya tersebut sebagai sumber energi alternatif. *Fluidized bed combustor* merupakan salah satu alat pengkonversi energi biomassa menjadi energi panas yang dapat dimanfaatkan lagi. Proses pembakaran yang terjadi ialah pembakaran dengan sendirinya secara terus-menerus yang berlangsung pada temperatur tinggi. Pengujian untuk pembakaran dilakukan pada FBC jenis *bubbling* menggunakan bahan bakar campuran ranting dengan tempurung kelapa untuk mengetahui komposisi bahan bakar yang terbaik. Eksperimen ini menggunakan beberapa variasi *feeding* bahan bakar, yaitu 0.25kg sampai 2 kg. Selain itu juga menggunakan beberapa variasi perbandingan komposisi bahan bakar campuran ranting dan tempurung kelapa.

Kata kunci : *Fluidized bed combustor*, Biomassa, Tempurung Kelapa, Ranting



## ABSTRACT

Name : Satriawan Wiguna

NPM : 0606073575

Study Program : Mechanical Engineering

Title : Characteristics Combustion Study Of Combination Fuel Coconut Shell And Branch For University Of Indonesia fluidized Bed Combustor

Coconut shell and branch are very large biomass potential which Indonesia has as one of tropical-archipelago-country. Fluidized bed combustor is one of the biomass energy converter tool into *heat* energy that can be used again. Combustion process that occurs is burning by itself is continuously at high temperature . Burning testing on the type of bubbling FBC in University of Indonesia using coconut shells and branch to determine the best fuel composition. This experiment uses a variation of the fuel feeding, which is 0.25 kg to 2 kg. Beside that, it also uses a variation of the fuel composition.

Keyword : Fluidized Bed Combustor, Biomass, Coconut Shell, Branch

## DAFTAR ISI

|   |      |
|---|------|
| COVER.....                                    | 1    |
| PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....              | ii   |
| HALAMAN PENGESAHAN.....                       | iii  |
| KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMAKASIH.....        | iv   |
| HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI..... | vi   |
| ABSTRAK.....                                  | vii  |
| DAFTAR ISI.....                               | i    |
| DAFTAR TABEL.....                             | xii  |
| DAFTAR GAMBAR.....                            | xiii |
| BAB 1. PENDAHULUAN.....                       | 1    |
| 1.1 JUDUL PENELITIAN.....                     | 1    |
| 1.2 LATAR BELAKANG MASALAH.....               | 1    |
| 1.3 PERUMUSAN MASALAH.....                    | 4    |
| 1.4 TUJUAN PENELITIAN.....                    | 4    |
| 1.5 BATASAN MASALAH.....                      | 4    |
| 1.6 METODOLOGI PENELITIAN.....                | 5    |
| 1.7 SISTEMATIKA PENULISAN.....                | 6    |
| BAB 2. LANDASAN TEORI.....                    | 7    |
| 2.1 ENERGI BIOMASSA.....                      | 7    |
| 2.1.1 Jenis-jenis Biomassa.....               | 7    |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.1.2 Teknologi Pengkeonversian Biomassa.....                      | 8         |
| 2.2 KARAKTERISTIK BIOMASSA.....                                    | 14        |
| 2.3 SISTEM REAKSI PEMBAKARAN.....                                  | 17        |
| 2.3.1 Hal-Hal Yang Harus Diperhatikan Dalam Proses Pembakaran..... | 18        |
| 2.3.2 Komponen-Komponen Utama Reaksi Pembakaran.....               | 19        |
| 2.4 FLUIDIZED BED COMBUSTOR.....                                   | 22        |
| 2.4.1 Jenis-Jenis Fluidized Bed Combustor.....                     | 25        |
| 2.4.2 Prinsip Kerja Fluidized Bed Combustor.....                   | 26        |
| 2.4.3 Bagian-Bagian Fluidized Bed Combustor.....                   | 28        |
| 2.5 FENOMENA FLUIDISASI.....                                       | 38        |
| 2.5.1 Proses Fluidisasi.....                                       | 38        |
| 2.5.2 Kondisi Fluidisasi.....                                      | 39        |
| 2.5.3 Jenis-Jenis Fluidisasi.....                                  | 41        |
| 2.5.4 Parameter-Parameter Fluidisasi.....                          | 42        |
| <b>BAB 3 PERSIAPAN DAN PROSEDUR PENGUJIAN.....</b>                 | <b>53</b> |
| 3.1 PERSIAPAN PENGUJIAN.....                                       | 53        |
| 3.1.1 Bahan Bakar Biomassa.....                                    | 53        |
| 3.1.2 Pasir.....   | 55        |
| 3.1.3 Perlengkapan Dan Peralatan.....                              | 59        |
| 3.2 STANDAR OPERASI ALAT PENGUJIAN.....                            | 62        |
| 3.2.1 Sistem Feeder.....   | 62        |
| 3.2.2 Blower.....  | 64        |
| 3.2.3 Sistem Burner.....   | 66        |
| 3.3 PROSEDUR PENGUJIAN PEMBAKARAN.....                             | 69        |
| 3.3.1 Rangkaian Alat Pengujian.....                                | 69        |

|  |   |    |
|--|---|----|
| 3.3.2                                  | Prosedur Pengambilan Data Pembakaran.....                           | 70 |
| BAB 4 PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA..... |   | 73 |
| 4.1                                    | HASIL.....  | 71 |
| 4.1.1                                  | Karakteristik Pembakaran Tempurung Kelapa.....                      | 71 |
| 4.1.2                                  | Karakteristik Pembakaran Campuran Tempurung Kelapa Dan Ranting..... | 74 |
| 4.2                                    | ANALISA.....  | 76 |
| 4.2.1                                  | Analisa Temperatur Pada Pembakaran Tempurung Kelapa.....            | 76 |
| 4.2.2                                  | Analisa Pembakaran Campuran Ranting Dan Tempurung Kelapa.....       | 83 |
| BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....        |   | 90 |
| 5.1                                    | KESIMPULAN.....   | 90 |
| 5.2                                    | SARAN.....  | 92 |
| DAFTAR PUSTAKA.....                    |   | 93 |

## DAFTAR TABEL

|  |    |
|--|----|
| tabel 1. 1 Potensi Energi Terbaharukan di Indonesia.....           | 1  |
| tabel 2. 1 <i>Ultimate Anaysis</i> Beberapa Jenis Biomassa.....    | 16 |
| tabel 2. 2 <i>Proximate Analysis</i> Beberapa Jenis Biomassa ..... | 16 |
| tabel 2. 3 Nilai LHV Beberapa Jenis Biomassa .....                 | 17 |
| tabel 2. 4 Jenis-Jenis Bahan Bakar.....                            | 20 |
| tabel 2. 5 Increasing Size and Density .....                       | 51 |
| tabel 3. 1 potensi biomassa di Indonesia.....                      | 54 |
| tabel 3. 2 <i>Specific Heat</i> Berbagai Substansi.....            | 56 |
| tabel 3. 3 Fisik, Termal, dan Mekanik Pasir Silika .....           | 56 |
| tabel 3. 4 Distribusi ukuran pengayakan pasir silika .....         | 57 |
| tabel 3. 5 Spesifikasi motor feeder.....                           | 63 |
| tabel 3.6 Spesifikasi teknis ring blower.....                      | 65 |
| Tabel 3.7 Spesifikasi teknis <i>Hi-Temp Premixed Burner</i> .....  | 69 |

## DAFTAR GAMBAR

|  |    |
|--|----|
| gambar 2. 1 Chart Teknologi Konversi Biomassa . <b>Error! Bookmark not defined.</b>                    |    |
| gambar 2. 2 Direct Combustor.....  | 9  |
| gambar 2. 3 Proses Gasifikasi.....   | 9  |
| gambar 2. 4 <i>Anaerobic Digester</i> .....  | 12 |
| gambar 2. 5 Rangkaian Instalasi Biogas.....  | 12 |
| gambar 2. 6 Analisis Proximat untuk Beberapa Jenis Bahan Bakar Padat.....                              | 15 |
| gambar 2. 7 Definisi Analisis Ultimat dan Proximat .....   | 16 |
| gambar 2. 8 Skematis <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....  | 24 |
| gambar 2. 9 Diagram Proses Pencampuran ( <i>mixing</i> ) dalam <i>Fluidized Bed Combustor</i><br>..... | 25 |
| gambar 2. 10 Tahapan Proses Kerja <i>Fluidized Bed Combustor</i> <b>Error! Bookmark not defined.</b>   |    |
| gambar 2. 11 Ruang Bakar Utama <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI.....                                  | 29 |
| gambar 2. 12 Perilaku Gelembung Setiap Jenis Distributor .....   | 30 |
| gambar 2. 13 Distributor yang Digunakan pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI.....                    | 31 |
| gambar 2. 14 Jenis-Jenis <i>Solid Flow Control</i> .....   | 32 |
| gambar 2. 15 <i>Screw Feeder</i> .....   | 33 |
| gambar 2. 16 <i>Burner</i> yang digunakan pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI.....                  | 34 |
| gambar 2. 17 <i>Cyclone Separator Fluidized Bed Combustor</i> UI.....                                  | 36 |

|  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| gambar 2. 18 Blower Sentrifugal yang Digunakan pada FBC UI .....   | 37                                   |
| gambar 2. 19 <i>Control Panel</i> .....  | 37                                   |
| gambar 2. 20 <i>Data Logger</i> .....  | 3Error!                              |
| <b>Bookmark not defined.</b>   |                                      |
| gambar 2. 21 Skematik Fluidisasi.....  | 39                                   |
| gambar 2. 22 Hubungan Tinggi Hampan Terhadap Kecepatan Superfisial Di<br>Dalam Hampan Zat Padat<br>.....     | 40                                   |
| gambar 2. 23 Hubungan Penurunan Tekanan Terhadap Kecepatan Superfisial Di<br>Dalam Hampan Zat Padat<br>..... | 40                                   |
| gambar 2. 24 Diagram Klasifikasi Jenis-Jenis Pasir. (sumber : Geldart. 1991).....                            | 47                                   |
| gambar 2.25 Daerah batas fluidisasi (sumber: Grace. 1986).....   |                                      |
| gambar 3. 1 Tempurung kelapa.....  | 54                                   |
| gambar 3. 2 Tempurung kelapa partikel kecil.....   | 55                                   |
| gambar 3. 3 Pasir silika mesh 40-50 yang digunakan pada FBC UI.....  | 5Error! <b>Bookmark not defined.</b> |
| gambar 3. 4 Generator set yang digunakan.....  | 59                                   |
| gambar 3. 5 Konfigurasi termokopel .....   | 60                                   |
| gambar 3. 6 <i>Temperature data logger</i> .....   | 61                                   |
| gambar 3. 7 Timbangan dengan skala maksimum 5 kg.....  | 61                                   |
| gambar 3.8 <i>Control panel</i> yang digunakan untuk <i>feeder</i> dan blower.....                           | 62                                   |

|  |    |
|--|----|
| gambar 3.9 Sistem feeder pada <i>fluidized bed combustor</i> UI.....         | 63 |
| gambar 3.10 Ring blower pada <i>fluidized bed combustor</i> UI.....          | 65 |
| gambar 3.11 Bagian-bagian <i>hi-temp premixed burner</i> .....               | 68 |
| gambar 3.12 Rangkaian seluruh alat untuk melakukan pengujian pembakaran...70 |    |

|  |    |
|--|----|
| gambar 4. 1 grafik distribusi temperatur percobaan pembakaran tempurung kelapa<br>.....                  | 72 |
| gambar 4. 2 grafik distribusi temperatur pembakaran tempurung kelapa saat pemanasan awal.....            | 73 |
| gambar 4.3 grafik distribusi temperatur pembakaran tempurung kelapa saat <i>self combustion</i> .....    | 73 |
| gambar 4. 4 grafik distribusi temperatur pembakaran campuran tempurung kelapa dengan ranting.....        | 74 |
| gambar 4. 5 grafik pembakaran campuran tempurung kelapa dengan ranting saat pemanasan awal .....         | 75 |
| gambar 4. 6 grafik pembakaran campuran tempurung kelapa dengan ranting saat <i>self combustion</i> ..... | 75 |
| gambar 4. 7 grafik feeding 0,25 kg tempurung kelapa .....  | 76 |
| gambar 4. 8 grafik feeding 0,5 kg tempurung kelapa .....   | 77 |
| gambar 4. 9 grafik feeding 0,75 kg tempurung kelapa .....  | 78 |
| gambar 4. 10 grafik feeding 1 kg tempurung kelapa .....  | 79 |
| gambar 4. 11 grafik feeding 1,25 kg tempurung kelapa .....   | 80 |



|   |    |
|---|----|
| gambar 4. 12 grafik feeding 2 kg tempurung kelapa .....   | 80 |
| gambar 4. 13 grafik pengaruh ketinggian terhadap temperatur .....   | 82 |
| gambar 4. 14 grafik pembakaran campuran tempurung kelapa dengan ranting dengan komposisi 100% tempurung kelapa .....                | 83 |
| gambar 4. 15 grafik pembakaran campuran tempurung kelapa dengan ranting dengan komposisi 80% tempurung kelapa dan 20% ranting ..... | 84 |
| gambar 4. 16 grafik pembakaran campuran tempurung kelapa dengan ranting dengan komposisi 50% tempurung kelapa dan 50% ranting.....  | 85 |
| gambar 4. 17 grafik pembakaran campuran tempurung kelapa dengan ranting dengan komposisi 20% tempurung kelapa dan 80% ranting ..... | 86 |
| gambar 4. 18 grafik pembakaran campuran tempurung kelapa dengan ranting dengan komposisi 100% ranting.....                          | 87 |
| gambar 4. 19 grafik pengaruh ketinggian terhadap temperatur .....   | 88 |

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 JUDUL PENELITIAN

STUDI KARAKTERISTIK BAHAN BAKAR BIOMASSA CAMPURAN RANTING DAN TEMPURUNG KELAPA PADA FLUIDIZED BED COMBUSTOR UNIVERSITAS INDONESIA

### 1.2 LATAR BELAKANG MASALAH

Persediaan bahan bakar fosil yang selama ini menjadi sumber energi utama di seluruh dunia tidak dapat dipungkiri telah semakin menipis dan diperkirakan akan habis dalam waktu 40 tahun ke depan. Untuk itu, dibutuhkan sumber energi alternatif untuk diproyeksikan sebagai pengganti bahan bakar fosil. Keunggulan yang ada pada sumber energi alternatif sebagai objek yang diproyeksikan untuk menggantikan bahan bakar fosil diantaranya adalah jumlahnya yang melimpah karena dapat diperbarui.

Indonesia sebagai salah satu negara kepulauan terbesar di dunia yang memiliki iklim tropis memiliki potensi yang sangat besar dalam penyediaan sumber energi yang dapat diperbarui, antara lain energi hidro dan mikrohidro, energi geotermal, energi biomassa, energi surya dan energi angin. Kelebihan energi yang dapat diperbarui dibandingkan dengan energi fosil, selain jumlahnya yang melimpah, juga lebih ramah terhadap lingkungan. Emisi yang dihasilkan lebih rendah, terutama gas karbondioksida sehingga mampu mengurangi efek rumah kaca yang menyebabkan pemanasan global.

| Jenis sumber energi | Potensi  | Kapasitas terpasang |
|---------------------|----------|---------------------|
| Hidro               | 75,67 GW | 4200 MW             |
| Mikrohidro          | 712 MW   | 206 MW              |

|           |                             |          |
|-----------|-----------------------------|----------|
| Geotermal | 27 GW                       | 807 MW   |
| Biomassa  | 49.81 GW                    | 302.4 MW |
| Surya     | 4,8 kWh/m <sup>2</sup> /day | 6 MW     |
| Angin     | 3 - 6 m/sec                 | 0,6 MW   |

*Tabel 1.1 Potensi Energi Terbaharukan di Indonesia*

*(Sumber : Direktorat Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi, 2004)*

Dari tabel 1.1 dapat dilihat bahwa biomassa memiliki potensi yang besar setelah energi hidro yaitu 49,81 GW, namun pemanfaatan yang dilakukan hanya sebanyak 302,4 MW , atau hanya 0.6% dari seluruh potensi yang ada. Hal ini disebabkan jumlah instalasi dan kapasitas terpasang untuk pemanfaatan energi biomassa masih terlalu sedikit jika dibandingkan dengan instalasi pemanfaatan energi hidro. Bila kita dapat memaksimalkan potensi yang ada dengan menambah jumlah kapasitas terpasang, maka kita akan dapat memanfaatkan pemakaian energi biomassa untuk mengurangi beban bahan bakar fosil yang selama ini menjadi tumpuan dari sebagian besar penggunaan energi di Indonesia. Hal ini akan mempengaruhi perekonomian negara yang selama ini menjadi boros akibat dari anggaran subsidi bahan bakar minyak yang jumlahnya melebihi anggaran sektor lainnya. Selain itu, energi biomassa memiliki sebuah nilai tambah bila dibandingkan dengan energi terbarukan lainnya, yaitu dimana proses konversi energi biomassa menjadi energi listrik memiliki investasi yang lebih murah. Hal inilah yang menjadi kelebihan biomassa dibandingkan dengan energi terbarukan lainnya. Proses pada biomassa sendiri secara umum adalah memanfaatkan energi matahari untuk merubah energi panas menjadi karbohidrat melalui proses fotosintesis yang selanjutnya diubah kembali menjadi energi panas.

Pemanfaatan energi biomassa yang dikonversikan menjadi energi listrik pada umumnya dilakukan dengan proses pembakaran sehingga menghasilkan kalor yang nantinya digunakan untuk memanaskan boiler. Uap yang dihasilkan dari pemanasan tersebut kemudian ditransfer ke dalam turbin sehingga turbin akan menghasilkan putaran yang akan menggerakkan generator.

Pembakaran biomassa secara langsung, perlu diperhatikan, memiliki kelemahan yakni efisiensi yang dihasilkan sangat rendah. Oleh karena itu, pada instalasi-instalasi pemanfaatan biomassa perlu diterapkan teknologi yang mampu meningkatkan efisiensi biomassa sebagai bahan bakar. Teknologi pembakaran yang digunakan harus simpel, efisien, tidak menimbulkan gangguan terhadap lingkungan sekitar, serta membutuhkan biaya instalasi yang relatif murah. Ditinjau dari aspek-aspek tersebut, *Fluidized Bed Combustor (FBC)* merupakan salah satu teknologi yang memenuhi syarat.

*Fluidized Bed Combustor (FBC)* merupakan salah satu teknologi pembakaran yang mempunyai kemampuan mengkonversi berbagai jenis bahan bakar baik sampah, limbah, biomassa bahkan bahan bakar fosil berkalori rendah. Teknologi ini menggunakan konsep turbulensi benda padat yang terjadi pada proses pembakaran, dimana dalam mekanisme pembakaran tersebut terjadi perpindahan panas dan massa yang tinggi. Teknologi ini telah diaplikasikan dalam banyak sektor industri dan beberapa tahun belakangan ini telah diproyeksikan sebagai salah satu teknologi yang memadai untuk mengkonversi biomassa menjadi energi.

*Fluidized bed combustor* memiliki bentuk seperti sebuah tungku pembakar biasa, namun memiliki media pengaduk berupa pasir. Pasir yang digunakan adalah pasir kuarsa ataupun pasir silika. Pasir dalam tungku FBC berperan sebagai penyimpan dan pendistribusi panas, sehingga panas yang dihasilkan oleh burner dapat merata karena adanya fluidisasi. *Fluidized bed combustor* memiliki temperatur pengoperasian antara 600 sampai 900°C sehingga bahan bakar seperti limbah dapat habis terbakar hingga menjadi abu yang tidak berbahaya bagi lingkungan. Emisi yang dihasilkan pembakaran juga relatif kecil sehingga akan meminimalisir polusi udara yang mungkin timbul akibat pembakaran yang kurang sempurna. Teknologi *fluidized bed combustor* juga lebih baik bila dibandingkan dengan teknologi pembakaran biomassa yang konvensional, karena selain laju pembakaran yang cukup tinggi juga dapat membakar limbah biomassa yang berkadar air tinggi. Namun masih ada beberapa kelemahan seperti belum maksimalnya pemakaian FBC akibat dari masih kurangnya penelitian yang dilakukan terhadap teknologi *fluidized bed combustor* di Indonesia.

### 1.3 PERUMUSAN MASALAH

Krisis energi yang terjadi saat ini merupakan masalah yang sangat serius dan perlu segera diselesaikan. Salah satu solusinya adalah dengan memanfaatkan potensi biomassa sebagai sumber energi alternatif. Walaupun energi biomassa belum akan dapat menggantikan peranan minyak bumi dan gas secara keseluruhan, namun setidaknya dapat membantu memenuhi kebutuhan energi nasional.

*Fluidized Bed Combustor* di Universitas Indonesia merupakan unit pemanfaatan limbah yang masih dalam tahap pengembangan. Namun demikian, masih banyak kekurangan yang perlu diperbaiki. Salah satu kekurangan yang cukup signifikan adalah penentuan komposisi bahan bakar yang mampu menghasilkan pembakaran yang optimal. Oleh karena itu diperlukan berbagai pengujian untuk mengetahui performa serta karakteristik FBC terhadap berbagai variasi jumlah dan komposisi bahan bakar.

### 1.4 TUJUAN PENELITIAN

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

1. Mengetahui dan membandingkan karakteristik tempurung kelapa dan campuran ranting-tempurung kelapa sebagai bahan bakar.
2. Mengetahui jumlah dan komposisi bahan bakar yang sesuai untuk *fluidized bed combustor* yang ada di Universitas Indonesia

### 1.5 BATASAN MASALAH

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

1. Penelitian yang dilakukan hanya mencakup eksperimen pembakaran yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik pembakaran dengan bahan bakar biomassa (pemanasan awal serta *self sustained combustion*). Sedangkan

penghitungan nilai heat rate output dari proses pembakaran, perhitungan efisiensi alat serta emisi gas buang yang dihasilkan tidak akan dibahas secara mendalam dalam tulisan ini.

2. Bahan bakar biomassa yang digunakan pada saat pengoperasian keseluruhan (baik pemanasan awal maupun *self sustained combustion*) adalah campuran dari kedua jenis bahan bakar, dengan perbandingan jumlah kedua bahan bakar yang bervariasi pada setiap proses *feeding* yang dilakukan.
3. Putaran blower untuk kedua pengujian adalah 3400 rpm, dan menggunakan pasir dengan *mesh* 40-50.

## 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. Pemilihan bahan bakar yang akan digunakan
2. Set Up Preparation
  - 2.1. Instalasi Laboratorium
  - 2.2. Penentuan dimensi bahan bakar
  - 2.3. Penentuan jenis pasir yang digunakan
  - 2.4. Kalibrasi Instrumentasi
  - 2.5. Instalasi Instrumentasi laboratorium
3. Pengujian dan Pengambilan Data
  - 3.1. Penentuan komposisi bahan bakar sebelum memasuki feeder
  - 3.2. Pengukuran massa dan ukuran rata-rata setiap jenis bahan bakar sebelum memasuki feeder
4. Pengolahan Data dan Grafik
  - 4.1. Analisa laju aliran massa bahan bakar pada feeding terhadap perubahan temperatur yang dihasilkan.
  - 4.3. Interpretasi grafik perbandingan dari berbagai kondisi dari hasil pengolahan data
5. Analisa dan Kesimpulan

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

## **1.7 SISTEMATIKA PENULISAN**

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

**BAB 1            PENDAHULUAN, berisi :**

Latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.

**BAB 2            DASAR TEORI, berisi :**

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

**BAB 3            METODOLOGI PENELITIAN, 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 berasal dari material organik, misalnya tumbuhan dan hewan, oleh karena itu energi ini merupakan bagian dari energi terbarukan. Energi ini juga merupakan energi yang ramah lingkungan karena menghasilkan emisi gas buang yang tidak sebesar emisi gas buang bahan bakar fosil.

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

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

##### **2.1.1 Jenis-Jenis Biomassa**

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

###### **2.1.1.1 Solid Biomassa**

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

- a) *Temperate Regions (wilayah beriklim sedang)*  
Menghasilkan kayu, sisa tumbuhan, serta kotoran manusia dan hewan.
- b) *Arid and semi – arid Regions (wilayah beriklim kering)*  
Menghasilkan sedikit vegetasi untuk sumber energi.
- c) *Humid Tropical Regions (wilayah beriklim lembab)*



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

#### 2.1.1.2 Biogas

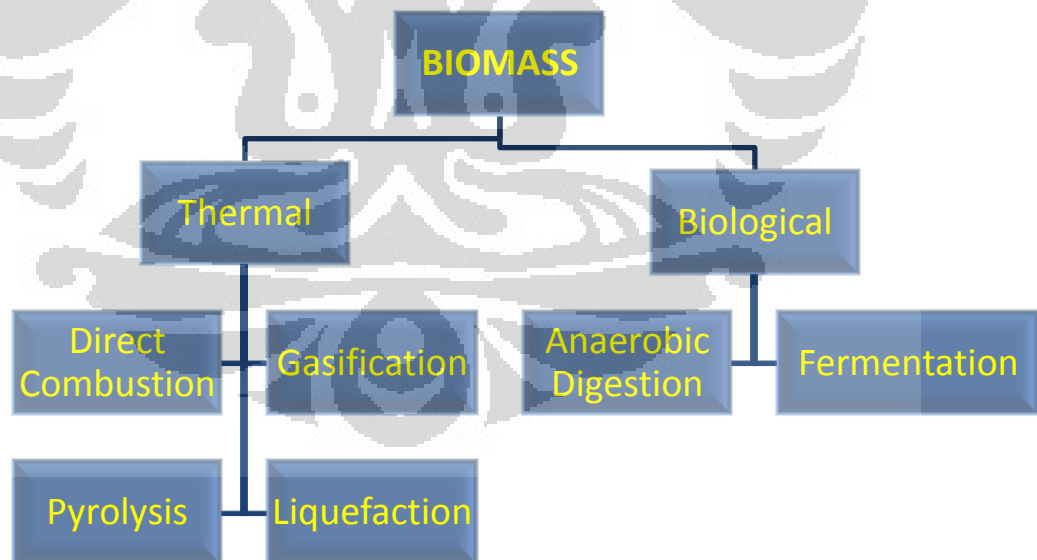
Biogas berasal dari material organik yang telah melewati proses fermentasi atau anaerob digesting oleh bakteri pada kondisi udara kekurangan oksigen yang kemudian menghasilkan gas yang dapat terbakar (combustible gas).

#### 2.1.1.3 Liquid Biofuel

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

### 2.1.2 Teknologi Pengkonversian Energi Biomassa

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



Gambar 2.1 Chart Teknologi Konversi Biomassa

#### 2.1.2.1 Proses Thermal

Ada 3 proses pemanasan dalam menghasilkan energi biomassa, yaitu:

## 1. Direct Combustor

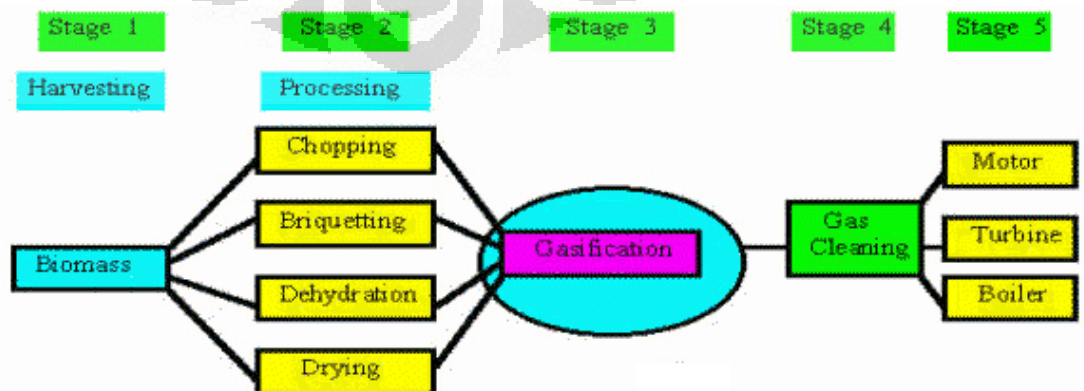
Pada proses ini material organik (biomassa) dilakukan pembakaran secara langsung. Agar efisiensi pembakaran baik, dilakukan pengeringan (drying) untuk menghilangkan kadar air pada material organik. Salah satu aplikasi dari direct combustor adalah kompor masak yang menggunakan kayu bakar.



Gambar 2.2 Direct Combustor

## 2. Gassification

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



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

Secara umum ada 3 sesi proses gasifikasi biomassa:

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

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

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

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

### 3. *Pyrolysis*

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

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

### 4. *Liquefaction*

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

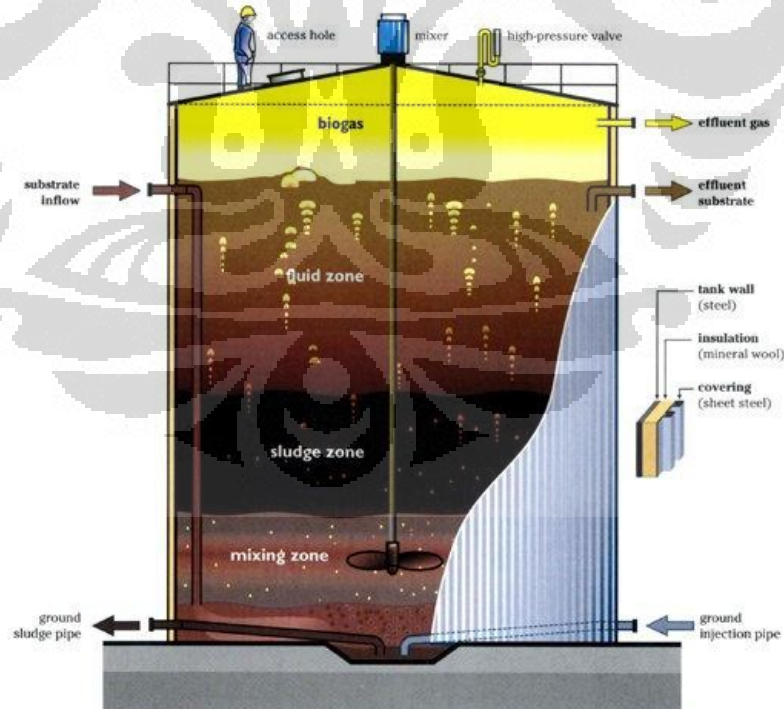
### 2.1.2.2 Proses Biologis

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

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

#### 1. *Anaerobic Digestion*

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

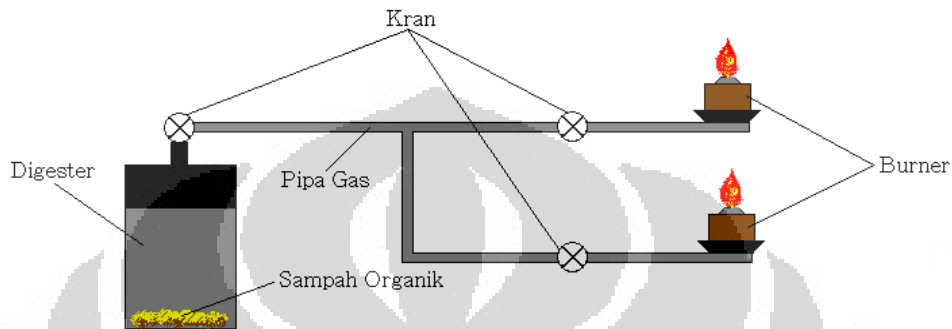


Gambar 2.4 Anaerobic Digester

(sumber:

[http://www.daviddarling.info/encyclopedia/A/AE\\_anaerobic\\_bacteria.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/A/AE_anaerobic_bacteria.html))

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



Gambar 2.5 Rangkaian Instalasi Biogas

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

#### 1. *Hydrolysis*

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

#### 2. *Fermentasi*

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

#### 3. *Acetogenesis*

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

#### 4. *Methanogenesis*

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

## 2. Fermentasi

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

### 2.1.3 Kelebihan dan Kekurangan

Energi biomassa memiliki kelebihan dan kekurangan beberapa diantaranya yaitu:

Kelebihan energi biomassa :

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

Kekurangan energi biomassa :

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

## 2.2 Karakteristik Biomassa

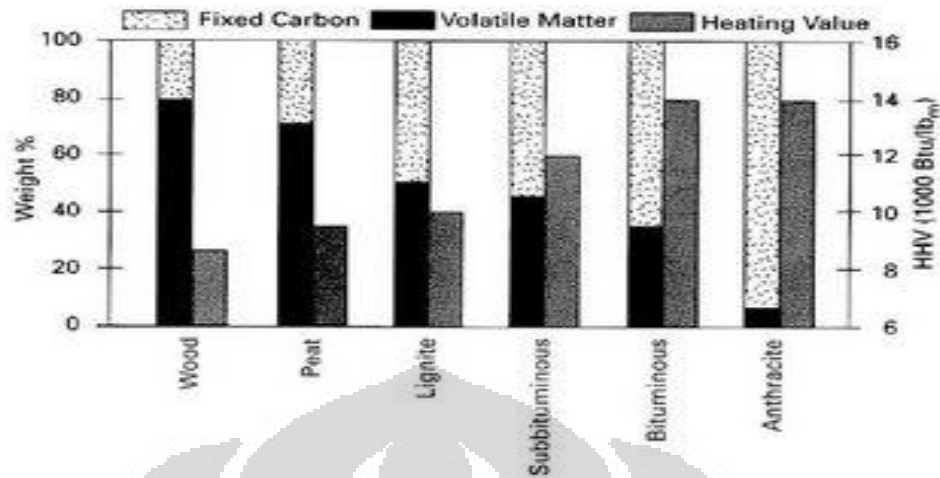
Potensi biomassa yang melimpah merupakan solusi energi masa depan karena dapat dikategorikan sebagai “*green and sustainable energi*” yaitu pemanfaatannya yang bersifat ramah lingkungan dan keberadaannya melimpah di dunia khususnya di Indonesia. Untuk pemanfaatan dengan cara *indirect combustor*, biomassa dikenal sebagai *zero CO<sub>2</sub> emission*, dengan kata lain tidak

menyebabkan akumulasi CO<sub>2</sub> di atmosfer, dan biomassa juga mengandung lebih sedikit sulfur jika dibandingkan dengan batubara.

Nilai kalor rendah (LHV) biomass (15-20 MJ/kg) lebih rendah dibanding nilai kalor batubara (25-33 kJ/kg) dan bahan bakar minyak (gasoline, 42,5 MJ/kg). Artinya untuk setiap kg biomassa hanya mampu menghasilkan energi 2/3 dari energi 1 kg batubara dan 1/2 dari energi 1 kg *gasoline*. Nilai kalor berhubungan langsung dengan kadar C dan H yang dikandung oleh bahan bakar padat. Semakin besar kadar keduanya akan semakin besar nilai kalor yang dikandung. Menariknya dengan proses 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.

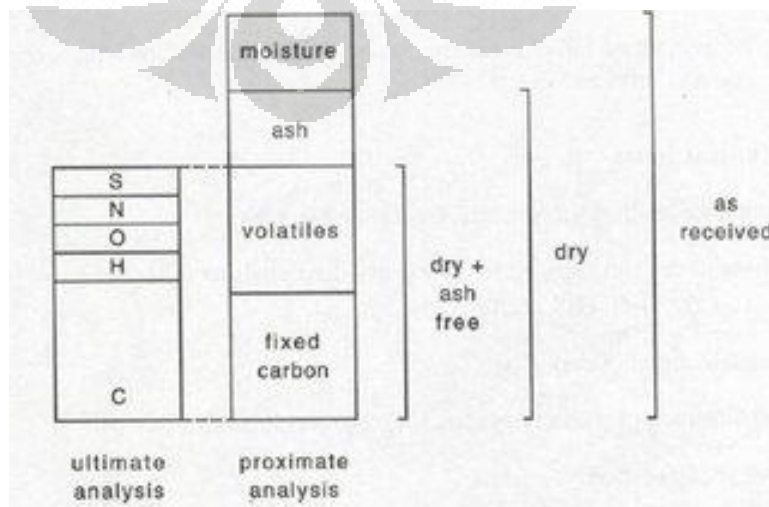
Nilai kalor rendah (LHV, *lower heating value*) adalah jumlah energi yang dilepaskan dari proses pembakaran suatu bahan bakar dimana kalor laten dari uap air tidak diperhitungkan, atau setelah terbakar, temperatur gas pembakaran dibuat 150°C. Pada temperatur ini, air berada dalam kondisi fasa uap. Jika 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 ~ 0.1. Untuk plastik, FR ~ 0. Analisis proximat untuk beberapa jenis bahan bakar padat dapat dilihat pada gambar di bawah.



Gambar 2.6 Analisis Proximat untuk Beberapa Jenis Bahan Bakar Padat.

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





Gambar 2.7 Definisi Analisis Ultimat dan Proximat.

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

Tabel 2.1 *Ultimate Analysis* Beberapa Jenis Biomassa

(Sumber: Walter R. Niessen. 1994)

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

Tabel 2.2 *Proximate Analysis* Beberapa Jenis Biomassa

(Sumber: Walter R. Niessen. 1994)

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

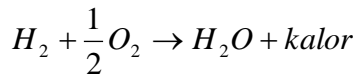
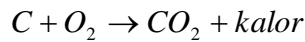
Tabel 2.3 Nilai LHV Beberapa Jenis Biomassa

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

### 2.3 Sistem Reaksi Pembakaran

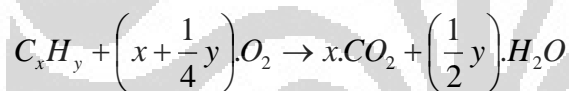
Pembakaran adalah sebuah reaksi antara oksigen dan bahan bakar yang menghasilkan panas. Oksigen diambil dari udara yang berkomposisi 21 % oksigen

serta 79 % nitrogen (persentase volume), atau 77 % oksigen serta 23 % nitrogen (persentase massa). Unsur terbanyak yang terkandung dalam bahan bakar adalah karbon, hidrogen, dan sedikit sulfur. Pembakaran pada umumnya terdiri dari tiga proses, yaitu:



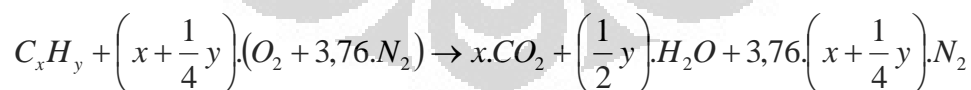
Tiga senyawa dan panas yang dihasilkan tersebut disebut juga sebagai hasil pembakaran.

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



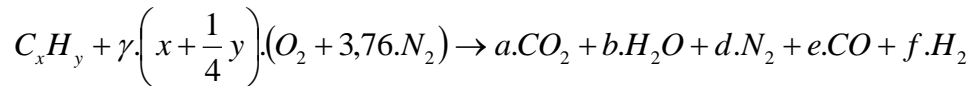
Nilai dari x dan y di atas bergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan. Nilai x adalah fraksi massa untuk kandungan *Carbon*, dan y fraksi massa untuk kandungan *Hydrogen* dalam bahan bakar.

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



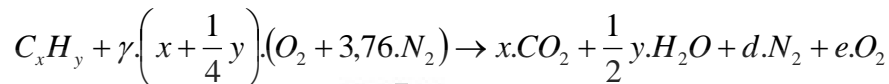
Namun, ada kalanya juga proses pembakaran tidak terjadi pada komposisi ideal antara bahan bakar dengan udara. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, proses yang tidak pada kondisi ideal ini bisa terbagi menjadi dua, yaitu pembakaran kaya dan pembakaran miskin.

- Proses pembakaran-kaya



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

- Proses pembakaran-miskin



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

### 2.3.1 Hal-Hal Yang Harus Diperhatikan Dalam Proses Pembakaran

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

#### 1. Mixing

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

#### 2. Udara

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

3. Temperatur

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

4. Waktu

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

5. Kerapatan

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

### 2.3.2 Komponen-Komponen Utama Reaksi Pembakaran

Suatu reaksi pembakaran memiliki 3 komponen utama, yaitu :

1. Zat yang dibakar

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

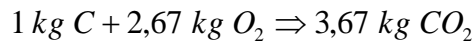
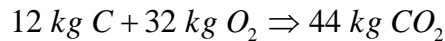
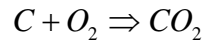
Tabel 2.4 Jenis-Jenis Bahan Bakar

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

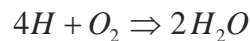
2. Zat yang membakar

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

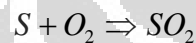
- Karbon terbakar sempurna akan membentuk  $CO_2$  menurut persamaan :



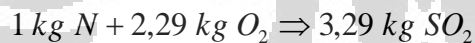
- Hidrogen terbakar sempurna akan membentuk  $H_2O$  menurut persamaan :



- Belerang terbakar akan membentuk  $SO_2$  menurut persamaan :



- Nitrogen terbakar membentuk  $NO_2$  menurut persamaan :



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

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

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

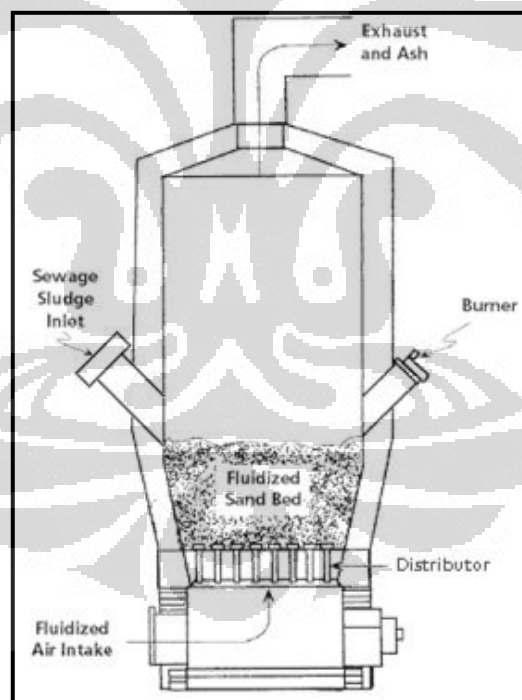
*Fluidized bed combustor* adalah sebuah tungku pembakar yang menggunakan media pengaduk berupa pasir seperti pasir kuarsa dan silika, tujuannya agar terjadi pencampuran (*mixing*) yang homogen antara udara dengan butiran-butiran pasir tersebut. *Mixing* yang konstan antara partikel-partikel mendorong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

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

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

Pembakaran dengan teknologi *fluidized bed* merupakan satu rancangan alternatif untuk pembakaran limbah padat. Teknologi ini telah diaplikasikan untuk

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

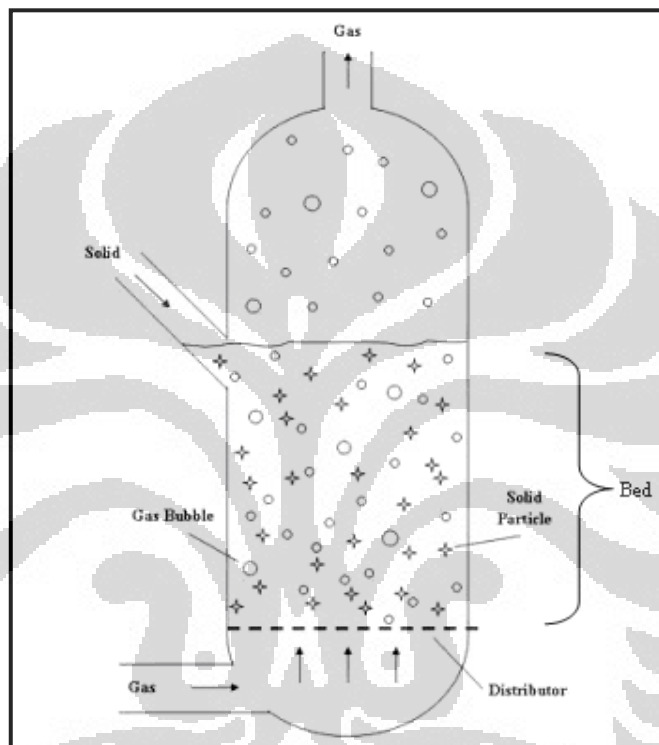


Gambar 2.8 Skematis *Fluidized Bed Combustor*

Suatu pandangan potongan *fluidized bed combustor* dipertunjukkan seperti gambar 2.8. Terlihat pada gambar tersebut bahwa *fluidized bed combustor* memiliki satu ruangan dimana pengeringan dan pembakaran terjadi di hamparan



pasir terfluidisasi. Waktu kontak di dalam daerah pembakaran hanyalah beberapa detik pada temperatur 750 sampai 900 °C. Abu terbawa keluar dari puncak ruang bakar dan dibersihkan dengan alat kontrol polusi udara. Pasir yang terbawa dengan abu harus diganti. Pasir yang terbang pada umumnya 5 persen dari volume hamparan untuk setiap 300 jam operasi. Pengumpanan (*feed*) pada ruang bakar itu dimasukkan baik dari atas atau secara langsung ke dalam hamparan.



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

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

masih terus dikembangkan lebih lanjut di kawasan Eropa, Amerika, Jepang, Australia, dan negara-negara maju lainnya.

#### **2.4.1 Jenis-Jenis *Fluidized Bed Combustor***

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

*Bubbling Fluidized Bed* beroperasi ketika kecepatan aliran udara tidak cukup tinggi untuk membawa partikel hampan 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, hampan harus dibersihkan dari partikel abu secara manual. Sedangkan pada CFB memiliki kecepatan gas atau udara yang lebih tinggi, biasanya 4-6 m/s. Ketinggian *freeboard* untuk *combustor zone* pun lebih tinggi dibandingkan dengan BFB. Material yang berpindah terbawa keluar sistem diperoleh kembali dengan mensirkulasikan partikel tersebut ke dalam sistem.

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

#### 2.4.2 Pinsip Kerja *Fluidized Bed Combustor*

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

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

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

##### 1. Kondisi awal

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

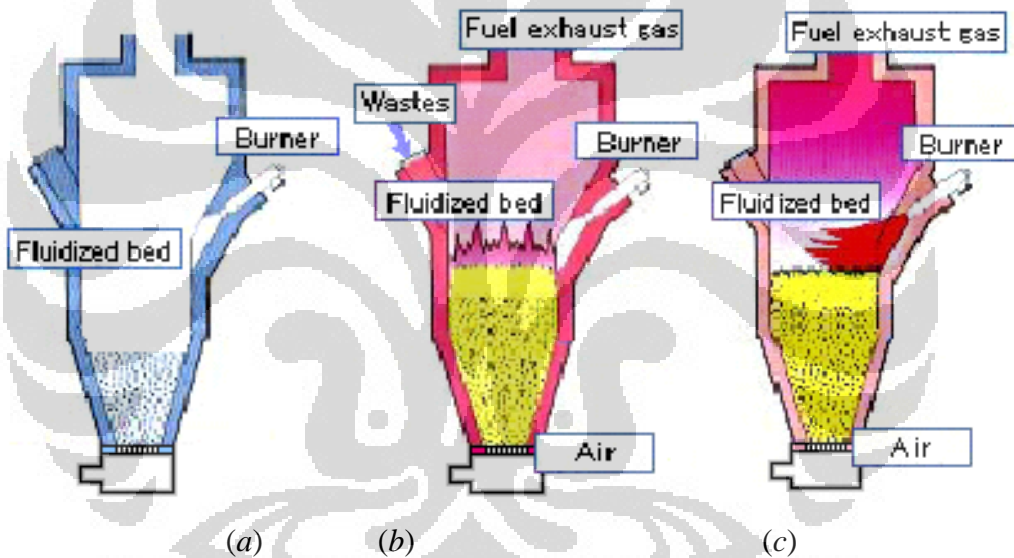
##### 2. Proses pemanasan

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

##### 3. Kondisi operasi

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

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



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

### 2.4.3 Bagian-Bagian *Fluidized Bed Combustor*

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

#### 2.4.3.1 *Fluidization Vessel*

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

##### 1. Ruang Bakar

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



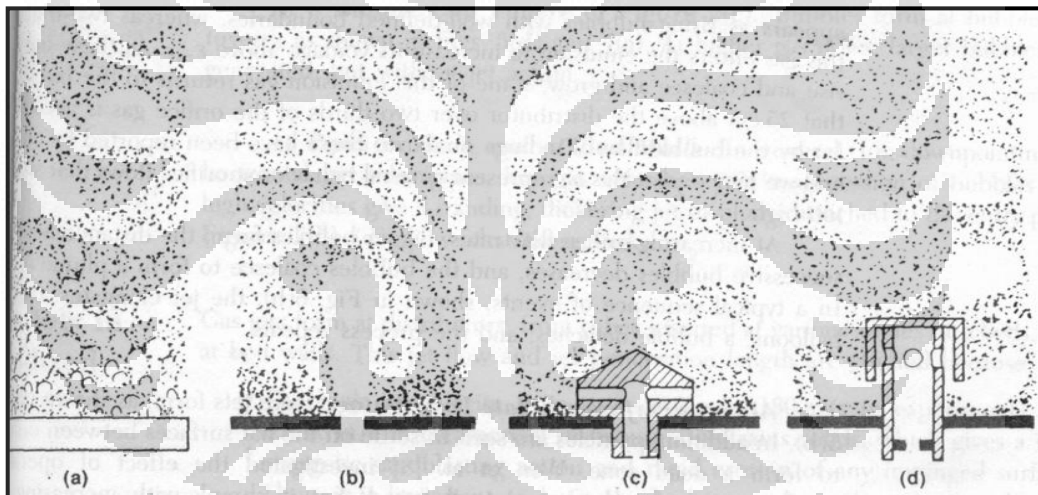
Gambar 2.11 Ruang Bakar Utama *Fluidized Bed Combustor* UI

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

padat, dan juga dapat membantu peningkatan stabilitas termal di dalam ruang bakar.

## 2. Distributor

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



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



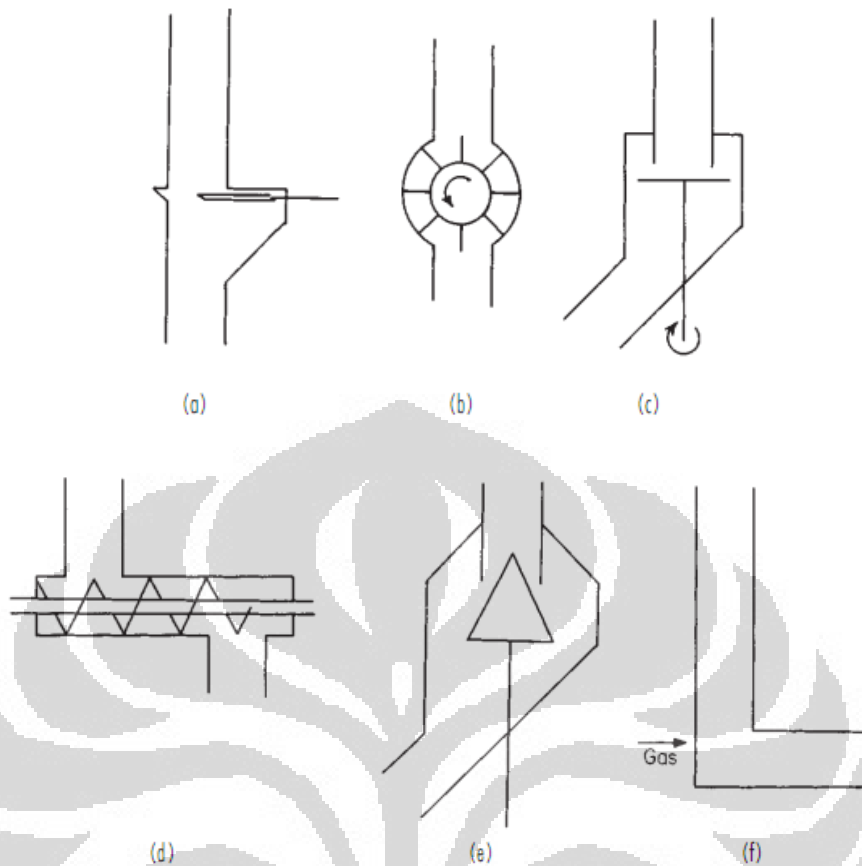
Gambar 2.13 Distributor yang Digunakan pada *Fluidized Bed Combustor* UI

### 3. *Plenum*

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

#### 2.4.3.2 *Solid Feeder*

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



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

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

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





Gambar 2.15 *Screw Feeder*

#### 2.4.3.3 Burner

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

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



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

#### 2.4.3.4 *Bed Material*

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

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

- *Group A*

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

- *Group B*

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

- *Group C*

Kelompok ini memiliki ukuran rata-rata diameter partikel yang lebih kecil (<30  $\mu\text{m}$ ) 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  $\mu\text{m}$  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.

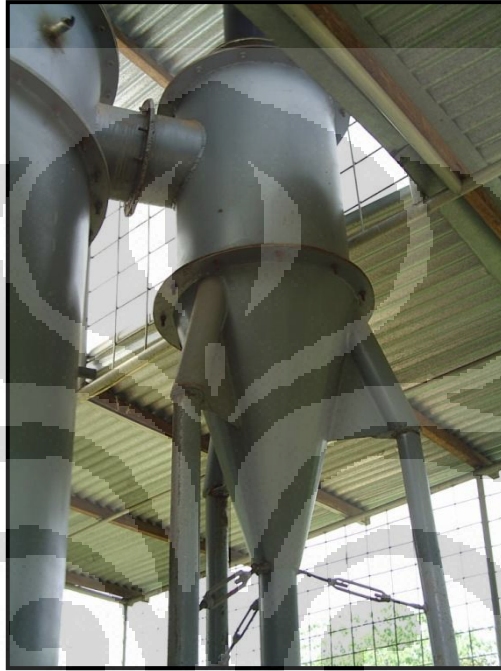
Untuk tujuan fluidisasi yang baik, sebaiknya menggunakan pasir silika atau pasir kuarsa dengan ukuran diameter 400 – 600  $\mu\text{m}$ . Pasir jenis ini diklasifikasikan diantara grup B. Pasir kuarsa dan pasir silika tidak jauh berbeda kandungannya, keduanya sama-sama memiliki kandungan  $\text{SiO}_2$ . Kedua pasir tersebut berasal dari batuan yang sangat keras sehingga sangat cocok digunakan untuk penggunaan pada temperatur tinggi dan sebagai media pemindah panas.

#### 2.4.3.5 *Cyclone separator*

*Cyclone separator* merupakan salah satu komponen penting sebagai *gas cleaning system* dari hasil proses pembakaran yang terjadi. *Cyclone separator* berfungsi sebagai alat pemisah partikel padat dengan gas. Pada komponen ini, yang dipisahkan adalah partikel-partikel hasil dari proses pembakaran. Akibat yang dihasilkan dari proses pembakaran yang terjadi, terutama pembakaran dengan *fluidized bed combustor*, akan menghasilkan partikel-partikel padat besar dan partikel-partikel padat kecil beserta dengan partikel gas.

Partikel yang memiliki nilai kerapatan lebih besar, dalam hal ini adalah partikel padat, akan jatuh turun ke bawah dan kemudian ditampung. Biasanya, partikel tersebut adalah abu-abu hasil sisa pembakaran. Begitu juga sebaliknya,

partikel-partikel yang memiliki kerapatan lebih kecil, akan terbang terangkat ke atas. Biasanya, partikel-partikel tersebut adalah gas-gas hasil pembakaran, seperti  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $SO_x$ ,  $NO_x$  dan lain-lain. *Cyclone separator* ini sendiri belum memadai sebagai *gas cleaning system*, seharusnya terdapat komponen lainnya seperti *scrubber*.



Gambar 2.17 *Cyclone Separator Fluidized Bed Combustor UI*

#### 2.4.3.6 Blower

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

pemilihan tersebut adalah besar debit aliran maksimum blower, besar tekanan maksimum blower, dan besar daya yang dibutuhkan blower.



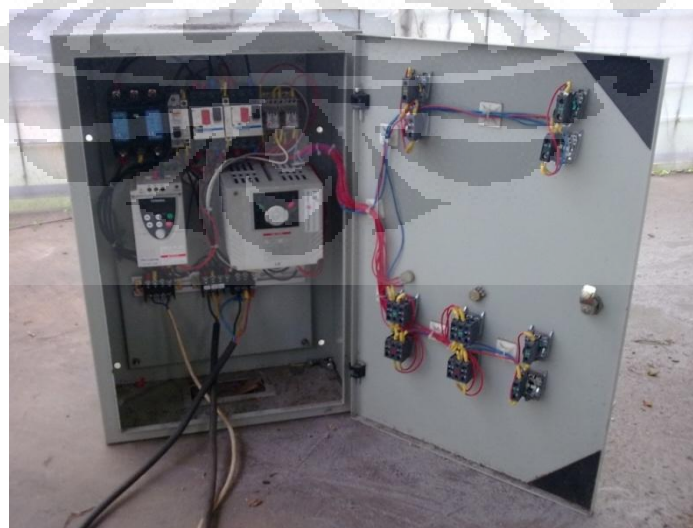
Gambar 2.18 Blower Sentrifugal yang Digunakan pada FBC

#### 2.4.3.7 Instrumentation

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

##### 1. Control Panel

Berfungsi untuk mengontrol putaran feeder dan putaran blower.



Gambar 2.19 Control Panel

##### 2. Termokopel

Berfungsi untuk mengukur temperatur di dalam ruang bakar.

### 3. *Data logger*

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



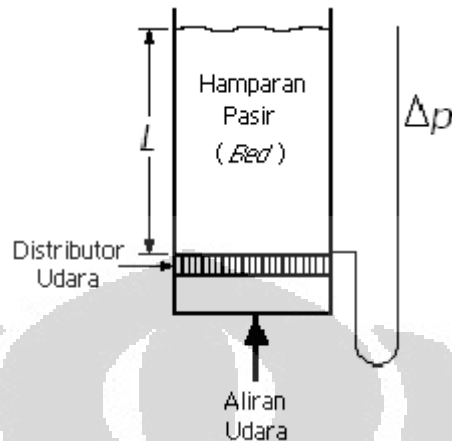
Gambar 2.20 *Data Logger*

## 2.5 **Fenomena Fluidisasi**

### 2.5.1 **Proses Fluidisasi**

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

fluiditas ini merupakan keuntungan utama dari penggunaan fluidisasi untuk menangani zat padat.



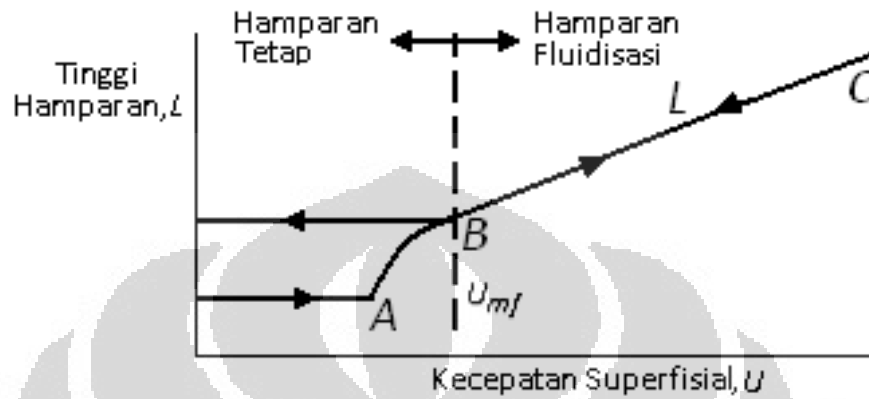
Gambar 2.21 Skematik Fluidisasi

### 2.5.2 Kondisi Fluidisasi

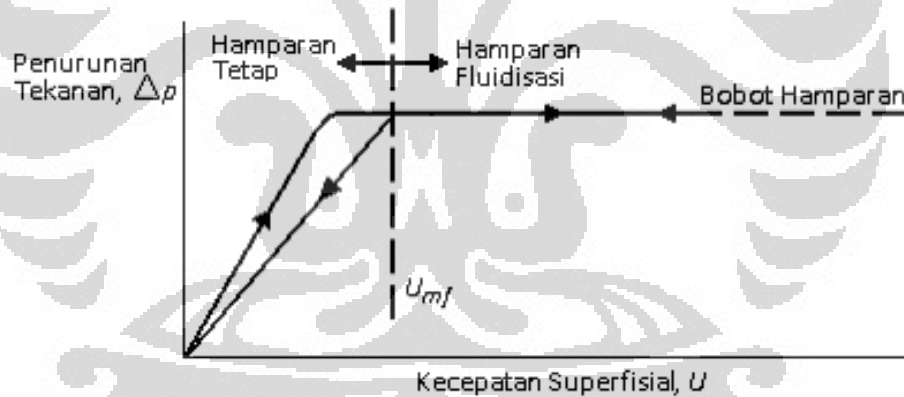
Perhatikan suatu tabung vertikal yang sebagian berisi dengan bahan butiran, sebagaimana terlihat dalam skema gambar. Tabung itu turbulen pada bagian atas, dan mempunyai plat berpori pada bagian bawah untuk menopang pasir di atasnya serta untuk menyebarkan aliran secara seragam pada keseluruhan penampang.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

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

Jika hamparan itu sudah terfluidisasi, penurunan tekanan melintasi hamparan tetap konstan (gambar 3.2 dan 3.3), akan tetapi tinggi hamparan bertambah terus jika aliran ditingkatkan lagi.



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



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

Jika laju aliran ke hamparan fluidisasi (*fluidized bed*) itu perlahan-lahan diturunkan, penurunan tekanan tetap sama, tetapi tinggi hamparan berkurang, mengikuti garis *BC* yang diamati pada waktu penambahan kecepatan. Akan tetapi, tinggi-akhir hamparan itu mungkin lebih besar dari nilainya pada hamparan diam semula, karena zat padat yang dicurahkan ke dalam tabung itu menetal lebih rapat dari zat padat yang mengendap perlahan-lahan dari keadaan fluidisasi. Penurunan



tekanan pada kecepatan rendah lebih kecil dari pada hampan-diam semula. Jika fluidisasi dimulai kembali, penurunan tekanan akan mengimbangi bobot hampan pada titik *B*. Titik inilah yang harus kita anggap sebagai kecepatan fluidisasi minimum  $U_{mf}$ ; dan bukan titik *A*. Untuk mengukur  $U_{mf}$ , hampan itu harus difluidisasikan dengan kuat terlebih dahulu, dibiarkan mengendap dengan mematikan aliran udara, dan laju aliran dinaikkan lagi perlahan-lahan sampai hampan 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 hampan rata-rata pada suatu kecepatan tertentu sama di segala arah hampan. Proses ini disebut “fluidisasi partikulat” (*particulate fluidization*) yang bercirikan ekspansi hampan yang cukup besar tetapi seragam pada kecepatan yang tinggi.

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

#### 2.5.3.2 Fluidisasi gelembung (*bubbling fluidization*)

Hampan zat padat yang terfluidisasi di dalam udara biasanya menunjukkan fluidisasi yang dikenal sebagai fluidisasi agregatif atau fluidisasi gelembung. Fluidisasi ini terjadi jika kecepatan superfisial gas di atas kecepatan fluidisasi minimum. Bila kecepatan superfisial jauh lebih besar dari  $U_{mf}$ , kebanyakan gas itu mengalir melalui hampan dalam bentuk gelembung atau rongga-rongga kosong yang tidak berisikan zat padat, dan hanya sebagian kecil

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

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

#### 2.5.4 Parameter-Parameter Fluidisasi

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

##### 2.5.4.1 Ukuran partikel

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

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

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

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

##### 2.5.4.2 Massa jenis padatan

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

#### 2.5.4.3 Sphericity

*Sphericity* ( $\psi$ ) 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* ( $\epsilon$ ) merupakan faktor kekosongan di antara partikel di dalam hamparan pasir. *Bed voidage* didefinisikan sebagai perbandingan antara selisih volume hamparan dan volume partikel dibagi dengan volume hamparannya. Pada partikel yang tidak memiliki porositas internal, *bed voidage* dapat ditentukan dari massa jenis partikel ( $\rho_p$ ) dan massa jenis borongan pada hamparan ( $\rho_b$ ).

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

#### 2.5.4.5 Kecepatan fluidisasi minimum

Bila gas dilewatkan melalui lapisan hamparan partikel padat pasir pada kecepatan rendah, partikel-partikel itu tidak bergerak. Jika kecepatan fluida berangsur-angsur dinaikkan, partikel-partikel pasir itu akhirnya akan mulai bergerak dan melayang di dalam fluida, dan gesekan (*friction*) menyebabkan terjadinya penurunan tekanan (*pressure drop*). Ketika kecepatan gas dinaikkan,

penurunan tekanan meningkat sampai besar penurunan tekanan tersebut sama dengan berat hamparannya dibagi dengan luas penampangnya. Kecepatan gas ini disebut kecepatan fluidisasi minimum,  $U_{mf}$ . Kecepatan fluidisasi minimum adalah kecepatan superfisial terendah yang dibutuhkan untuk terjadinya fluidisasi. Jika  $U_{mf}$  tidak dapat ditentukan secara eksperimental, maka gunakan persamaan di bawah ini.

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

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

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

bilangan *Archimedes* ( $Ar$ ):

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

keterangan :

- $U_{mf}$  = kecepatan fluidisasi minimum (  $m/s$  )
- $\bar{d}_p$  = diameter partikel rata-rata pasir (  $m$  )
- $\rho_f$  = densitas fluida gas (  $kg/m^3$  )
- $\rho_p$  = densitas partikel pasir (  $kg/m^3$  )
- $\mu_f$  = viskositas dinamik fluida gas (  $N \cdot s/m^2$  )
- $g$  = percepatan gravitasi (  $m/s^2$  )

Pengukuran kecepatan fluidisasi minimum dapat juga diukur berdasarkan data eksperimental dari grafik penurunan tekanan vs kecepatan superfisial berdasarkan data eksperimental dari titik potong antara bagian kurva yang naik dan bagian kurva yang datar seperti pada gambar 2.23.

#### 2.5.4.6 Penurunan tekanan melintas hamparan

Suatu hamparan partikel-partikel pasir memberikan resistansi terhadap aliran fluida yang melaluinya. Jika kecepatan aliran tersebut dinaikkan, maka gaya seret (*drag force*) yang terjadi pada partikel-partikel tersebut meningkat. Dengan aliran ke atas melalui hamparan yang tidak tenang, partikel-partikel tersebut

menyusun kembali sendiri untuk memberikan lebih sedikit resistansi terhadap aliran fluida dan hamparan akan cenderung untuk mengembang. Dengan menaikkan lagi kecepatan aliran ke atas, berkembangnya hamparan akan terus berlanjut sampai suatu kondisi tercapai yang mana gaya seret yang terjadi pada partikel-partikel cukup untuk menopang berat partikel-partikel dalam hamparan. Sehingga penurunan tekanan melintas hamparan ( $\Delta P_b$ ) 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 :

- $\Delta P_b$  = penurunan tekanan melewati hamparan ( $N/m^2$ )
- $h$  = tinggi hamparan pasir ( $kg$ )
- $\rho_p$  = massa jenis partikel pasir ( $kg/m^3$ )
- $\rho_f$  = massa jenis fluida udara ( $kg/m^3$ )
- $\epsilon$  = *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,  $\Delta P_D$ . 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  $\rho_f$  merupakan massa jenis udara dan  $C_d$  merupakan *orifice discharge coefficient*.

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

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

Keterangan :

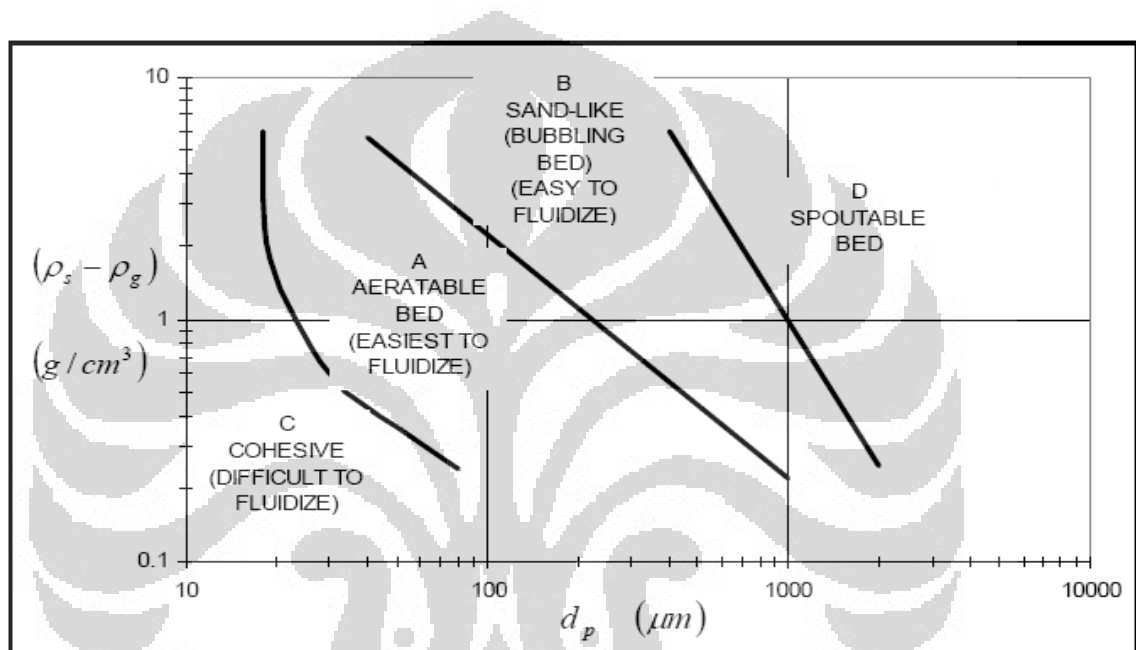
- $\Delta P_d$  = penurunan tekanan melewati distributor (  $N/m^2$  )
- $U_o$  = kecepatan udara superfisial (  $m/s$  )
- $U_{or}$  = kecepatan udara rata-rata melewati orifis (  $m/s$  )
- $f_{or}$  = *fractional open area* (  $m^2$  )
- $\rho_f$  = massa jenis fluida udara (  $kg/m^3$  )
- $C_D$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

#### 2.5.4.8 Klasifikasi pasir

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

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

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



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

Klasifikasi jenis-jenis pasir menurut Geldart, yaitu :

a) *Group A*

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

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

b) *Group B*

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

c) *Group C*

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



kecepatan udara sehingga udara tidak terdistribusi dengan baik yang mana tidak pernah terjadi benar-benar fluidisasi.

d) *Group D*

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

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

Pada pasir yang lebih halus dan kurang padat (*group A*), ukuran gelembung stabil maksimum jauh lebih kecil daripada pasir yang lebih kasar dan lebih padat (*group B*) sehingga distribusi ukuran gelembung yang stabil dapat

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

Tabel 2.5 *Increasing Size and Density*

(Sumber: Geldart, 1991)

| Group                           | C   | A   | B   | D  |
|---------------------------------|---|---|---|--|
| Most obvious characteristic     | Cohesive, difficult to fluidize                             | Bubble-free range of fluidization                                   | Starts bubbling at $U_{mf}$                         | Coarse solids                              |
| Property                        | Typical solids  |   |   |  |
|                                 | Flour, cement   | Cracking catalyst   | Building sand, table salt                           | Crushed limestone coffee beans             |
| 1. Bed expansion                | Low when bed channel, can be high when fluidized            | High  | Moderate  | Low  |
| 2. Deaeration rate              | Initially fast, exponential                                 | Slow, linear  | Fast  | Fast                                       |
| 3. Bubble Properties            | No bubbles. Channels, and cracks                            | Splitting/recoalescence predominate; maximum size exist; large wake | No limit on size                                    | No known upper size; small wake            |
| 4. Solids mixing <sup>a</sup>   | Very low  | High  | Moderate  | Low  |
| 5. Gas backmixing <sup>a</sup>  | 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       |
|                                 | Particle size distribution <sup>b</sup>                     | Not known   | Increasing <45 $\mu m$ fraction improves properties | None                                       |
|                                 | Increasing pressure, temperature, viscosity, density of gas | Probably improves   | Definitely improves                                 | Uncertain, some possibly                   |

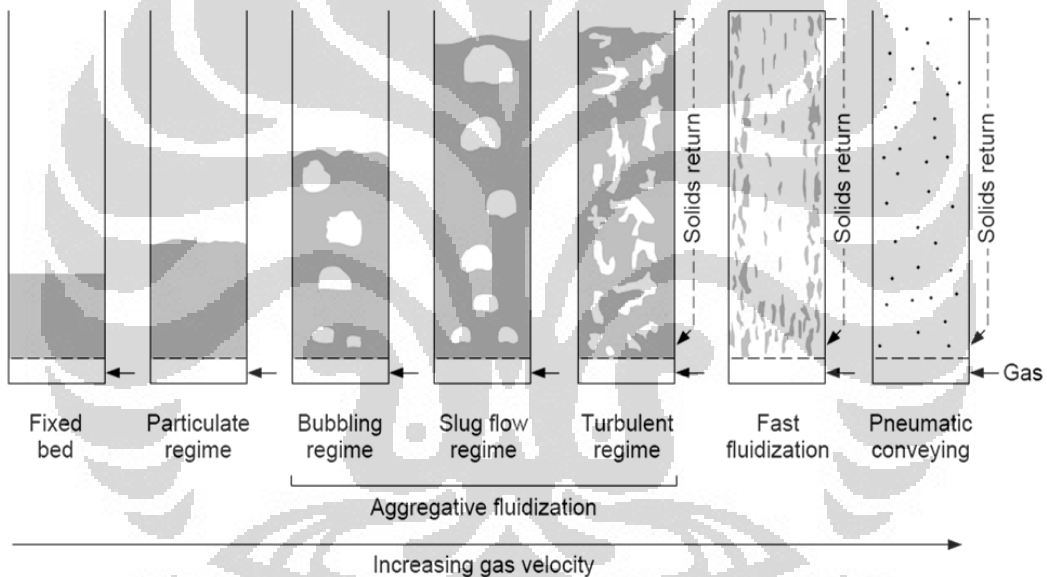
<sup>a</sup>At equal  $U-U_{mf}$

<sup>b</sup>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).

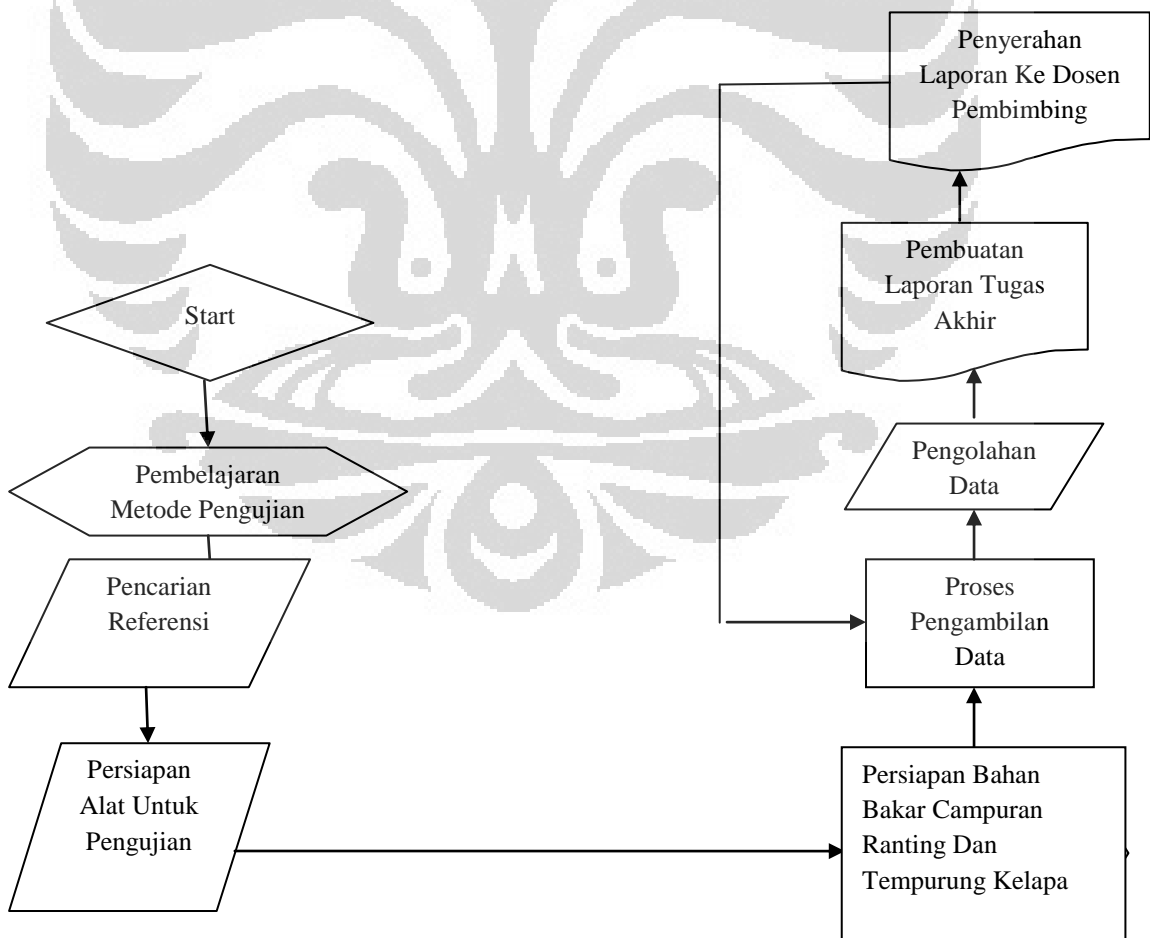


Gambar 2.25 Daerah batas fluidisasi (sumber: Grace. 1986)

### BAB 3

## PERSIAPAN DAN PROSEDUR PENGUJIAN

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



### 3.1 Persiapan Pengujian

#### 3.1.1 Bahan Bakar Biomassa

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

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

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

Tabel 3. 1 Potensi biomassa di Indonesia

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

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

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



Gambar 3.2 Tempurung kelapa partikel kecil

### 3.1.2 Pasir

Pasir yang digunakan akan sangat berpengaruh terhadap berhasil tidaknya proses fluidisasi dan pembakaran yang akan dilakukan. Dalam menentukan jenis pasir yang akan digunakan pada alat FBC UI ini sebaiknya menggunakan pasir silika atau pasir kuarsa untuk tujuan mendapatkan fluidisasi yang baik dengan densitas partikelnya kurang lebih sebesar  $2600 \text{ kg/m}^3$ . Pasir silika dan pasir kuarsa juga memiliki nilai *specific heat* (kalor jenis) yang kecil sehingga sangat baik dalam menyimpan kalor. Karena semakin kecil nilai *specific heat* suatu material maka akan semakin mudah untuk menaikkan temperatur material tersebut. Dengan massa dan besar kenaikan temperatur yang sama, dua material yang berbeda dengan nilai kalor jenis yang jauh berbeda akan memiliki besar jumlah kalor yang jauh berbeda pula untuk menaikkan temperaturnya.

Sebagai perbandingan nilai *specific heat* untuk substansi-substansi yang lain dapat dilihat pada tabel 3.1. Pasir silika memiliki titik lebur yang tinggi sampai mencapai temperatur sekitar  $1800 \text{ }^\circ\text{C}$  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

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

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

Tabel 3.3 Sifat fisik, termal, dan mekanik pasir silika

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

| <i>Properties</i>                                | <i>Silica Sand</i> |
|--|--------------------|
| <i>Particle density ( kg/m<sup>3</sup> )</i>     | 2600               |
| <i>Bulk density ( kg/m<sup>3</sup> )</i>         | 1300               |
| <i>Thermal conductivity ( Wm<sup>-1</sup>K )</i> | 1.3                |
| <i>Tensile strength ( MPa )</i>                  | 55                 |
| <i>Compressive strength ( MPa )</i>              | 2070               |
| <i>Melting point ( °C )</i>                      | 1830               |
| <i>Modulus of elasticity ( GPa )</i>             | 70                 |
| <i>Thermal shock resistance</i>                  | <i>Excellent</i>   |

Setelah memilih jenis pasir yang digunakan, maka ditentukan ukuran diameter partikel pasir yang digunakan pada FBC UI. Jenis pasir yang digunakan sudah pasti antara pasir silika dan pasir kuarsa. Menurut pengklasifikasian partikel pasir oleh Geldart seperti yang telah dijelaskan pada bab dua, maka jenis partikel pasir tersebut terkelompok dalam *group B* dan *group D*. Namun partikel pasir dalam *group D* membutuhkan kecepatan fluidisasi yang besar sehingga sangat



sulit untuk mendapatkan pencampuran yang baik bila dibandingkan dengan pasir *group A* dan *group B*. Dengan demikian partikel pasir yang paling baik digunakan untuk aplikasi *fluidized bed combustor* ini adalah partikel pasir *group B* dengan ukuran diameter partikel pasir yang paling baik untuk tujuan fluidisasi berkisar antara 300  $\mu\text{m}$  sampai 500  $\mu\text{m}$ .

Pasir yang terpilih tersebut kemudian diperoleh dengan melakukan pengayakan bertingkat. Ayakan (*sieve*) bertingkat digunakan untuk melakukan pengamatan terhadap nomor kehalusan butiran (*grain fineness number*), dan dapat dilihat seperti pada tabel 3.3 yang mana terdapat ukuran lubang ayakan (*mesh*) menurut standar di Amerika. Berdasarkan tabel tersebut maka partikel pasir yang berkisar antara 300  $\mu\text{m}$  sampai 500  $\mu\text{m}$  adalah partikel pasir dengan ukuran diameter partikel pasir antara *mesh 35* sampai *mesh 50*.

Tabel 3.4 Distribusi ukuran pengayakan pasir silika

Sumber: AGSCO silica sand technical data sheet

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

Oleh karena itu, digunakanlah pasir silika dengan ukuran mesh 40-50, karena bila menggunakan pasir silika dengan ukuran mesh 30 masih terlalu besar

dari yang diinginkan dan bila menggunakan pasir silika dengan ukuran mesh 40-70 akan terlalu halus.



Gambar 3.3 Pasir silika mesh 40-50 yang digunakan pada FBC UI

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

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

### 3.1.3 Perlengkapan dan Peralatan

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

#### 1. *Generator Set*

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



Gambar 3.4 Generator set yang digunakan

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

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

## 2. Termokopel

Jenis termokopel yang digunakan di sini adalah termokopel tipe K. Lima termokopel yang ada sebelumnya sudah dikalibrasi oleh mahasiswa peneliti untuk keperluan skripsi di lab gasifikasi. Termokopel itu dimasukkan satu persatu pada reaktor FBC dengan konfigurasi ketinggian yang berbeda-beda diukur dari batas tengah distributor FBC yang ada (T2 paling dekat dengan hamparan pasir dan T5 paling jauh dari hamparan pasir. Sedangkan T1 berada di bawah distributor), yaitu:

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



(a)

(b)

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

### 3. *Temperature Data Logger*

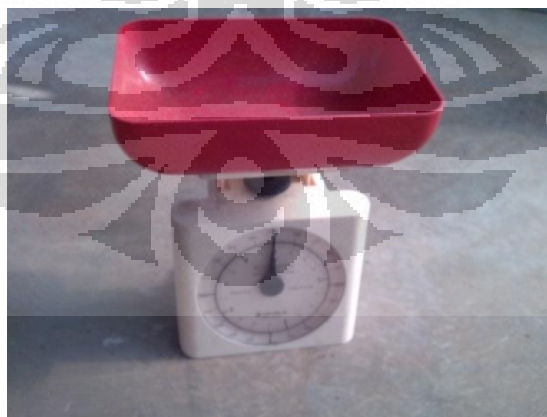
Untuk mendapatkan data-data keluaran dari distribusi temperaturnya digunakan *temperature data logger* sebagai pengkonversi suhu dari analog ke digital yang kemudian akan ditampilkan pada layar *display* yang ada.



Gambar 3.6 *Temperature data logger*

#### 4. Timbangan (*weight scale*)

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



Gambar 3.7 Timbangan dengan skala maksimum 5 kg

#### 5. *Control Panel*

Panel kontrol ini berfungsi sebagai pengontrol dan pengatur dari putaran motor feeder dan putaran blower yang akan dioperasikan. Pada panel kontrol ini

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



Gambar 3.8 Control panel yang digunakan untuk feeder dan blower

## 3.2 STANDAR OPERASI ALAT PENGUJIAN

### 3.2.1 Sistem Feeder

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



Gambar 3.9 Sistem feeder pada *fluidized bed combustor* UI

Berikut ini beberapa spesifikasi pada sistem feeder tersebut :

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

Tabel 3.5 Spesifikasi motor feeder

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

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

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

1. Pastikan bahwa kabel motor feeder sudah terhubung dengan tepat ke panel kontrol untuk feeder, sambungkan setiap kabel sesuai dengan warnanya.
2. Sambungkan konektor dari panel kontrol ke generator set yang sudah menyala untuk mendapatkan sumber tegangan. Gunakan *test pen* untuk memastikan sisi konektor terhubung dengan sisi *generato set* yang benar.
3. Aktifkan *switch* utama dan *circuit breaker* dengan menekan ke arah atas, lampu di pintu panel akan menyala.

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

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

### 3.2.2 Blower

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





Gambar 3.10 Ring blower pada *fluidized bed combustor* UI

Spesifikasi dari blower yang digunakan adalah sebagai berikut ini :

Tabel 3.6. Spesifikasi teknis ring blower

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

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

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

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

### 3.2.3 Sistem *Burner*

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

1. Buka *ball valve* utama gas masuk.
2. Atur tekanan kerja gas pada 20~30 mbar (200 ~ 300 mm H<sub>2</sub>O).
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.

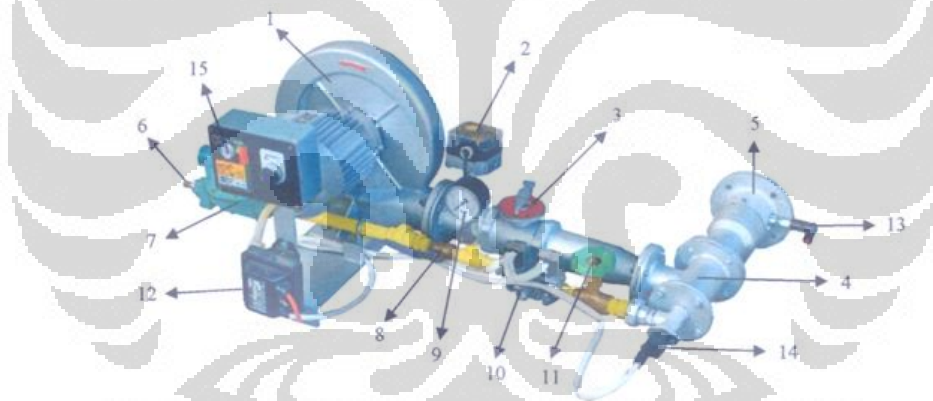
Penyetelan *hi-temp premixed burner* juga perlu dilakukan untuk dapat mengatur mutu nyala api dan panjang nyala api yang diinginkan. Mekanisme penyetelan burner adalah seperti berikut ini :

- 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 *mmH<sub>2</sub>O*).
  - b. Buka tutup dan putar penyetel :
    - Searah jarum jam : tekanan gas bertambah (+), panjang api berubah menjadi lebih panjang.
    - Berlawanan jarum jam : tekanan gs berkurang (-), api menjadi lebih pendek.
  - c. Selanjutnya atur kembali *damper* udara untuk mendapatkan mutu nyala api yang bagus.

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



Gambar 3.11 Bagian-bagian *hi-temp premixed burner*

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

Tabel 3.7 Spesifikasi teknis *Hi-Temp Premixed Burner*

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

### 3.3 Prosedur Pengujian Pembakaran

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

#### 3.3.1 Rangkaian Alat Pengujian

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

- Panel kontrol dihubungkan ke generator set untuk mendapatkan sumber tegangan yang cukup.
- Sistem feeder terhubung ke panel kontrol agar dapat diatur putarannya.
- Blower juga terhubung ke panel kontrol agar dapat diatur putarannya.
- Burner terhubung ke generator set agar dapat memutar blower burner dan menyalakan busi.

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



Gambar 3.12 Rangkaian seluruh alat untuk melakukan pengujian pembakaran

### 3.3.2 Prosedur Pengambilan Data Pembakaran

Dalam melakukan pengujian pembakaran dan pengambilan data untuk *fluidized bed combustor* UI harus dilakukan dengan metode yang optimal, sehingga hasil atau data-data yang didapat menjadi lebih akurat dan benar.

Keseluruhan langkah-langkah yang dilakukan dari awal setelah persiapan dan sebelum pengambilan data sampai setelah pengambilan data akan dijelaskan berikut ini.

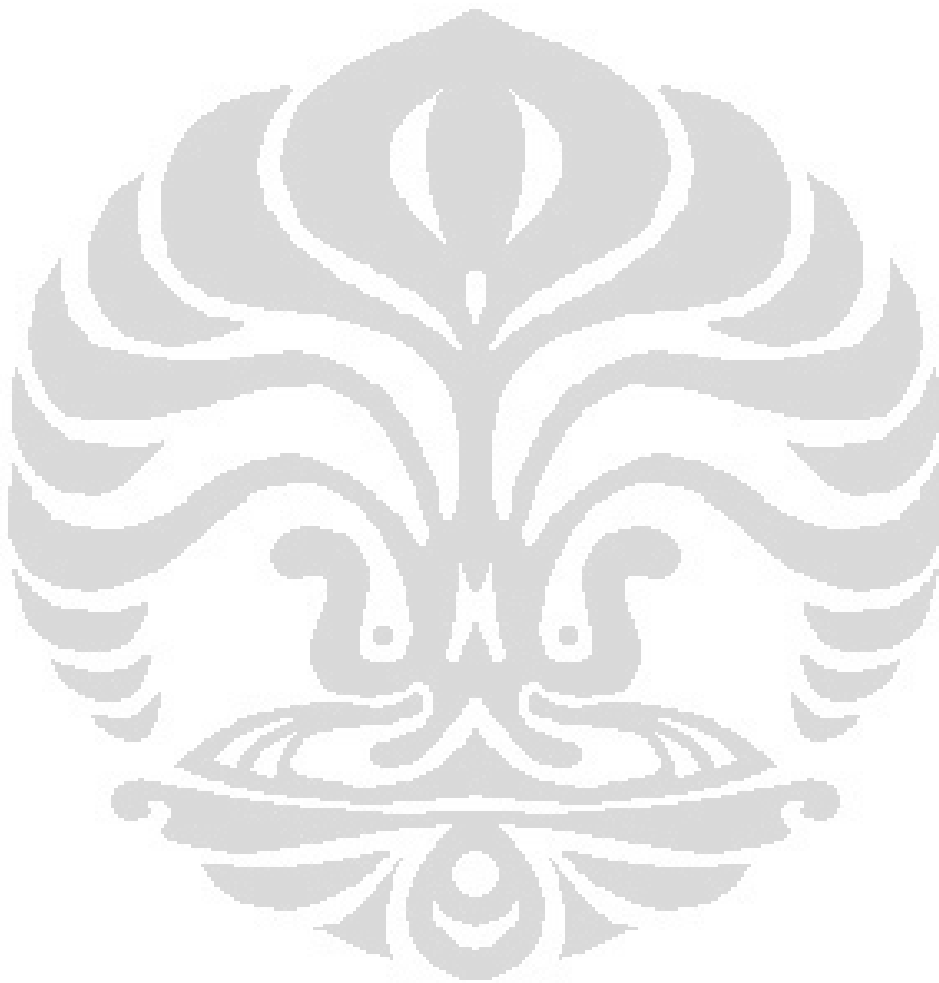
#### 3.3.2.1 *Prosedur pemanasan awal pembakaran*

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

#### 3.3.2.2 *Prosedur pengambilan data pembakaran*

1. Setelah mencapai temperatur stabil tersebut, bahan bakar yang sudah disiapkan dengan sejumlah massa tertentu (0,25 kg, 0,5 kg, 0,75 hingga 2 kg) dimasukkan ke dalam ruang bakar.
2. Dimulai dari massa 0,25 kg, lalu mengamati perubahan temperatur yang terjadi dan dicatat setiap menitnya. Pada awalnya temperatur akan menurun kemudian naik lagi dan akhirnya saat bahan bakar habis terbakar masukkan bahan bakar dengan massa 0,5 kg. Perubahan temperatur setiap menitnya dicatat dan lakukan proses yang sama hingga bahan bakar massa 2 kg.

3. Setelah semua bahan bakar tersebut dimasukkan, perubahan temperaturnya terus dicatat setiap menitnya sampai pada akhirnya suhu di ruang bakar turun terus-menerus secara perlahan karena sudah tidak dimasukkan bahan bakar lagi. Saat temperatur *bed* sudah cukup rendah sekitar 500 – 550 °C, perubahan temperatur tidak dicatat lagi.





## BAB 4

### PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA

#### 4.1 HASIL

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah untuk mengetahui sifat dan karakteristik dari kedua jenis bahan bakar, yaitu tempurung kelapa dan campuran tempurung kelapa dengan ranting. Percobaan dilakukan dengan *feed rate* yang bervariasi

Perbandingan karakteristik kedua jenis bahan bakar ditinjau dari:

- Temperatur yang dihasilkan saat pemanasan awal
- Temperatur yang dihasilkan saat *self combustion*

#### **Karakteristik Pembakaran Biomassa**

Eksperimen *Fluidized Bed Combustor* yang ada di Universitas Indonesia dibagi menjadi dua tahap, yaitu tahap pemanasan awal dimana *burner* masih dinyalakan untuk memanaskan pasir, sedangkan tahap kedua adalah tahap *self combustion* dimana *burner* dimatikan sehingga bahan bakar terbakar dengan sendirinya.

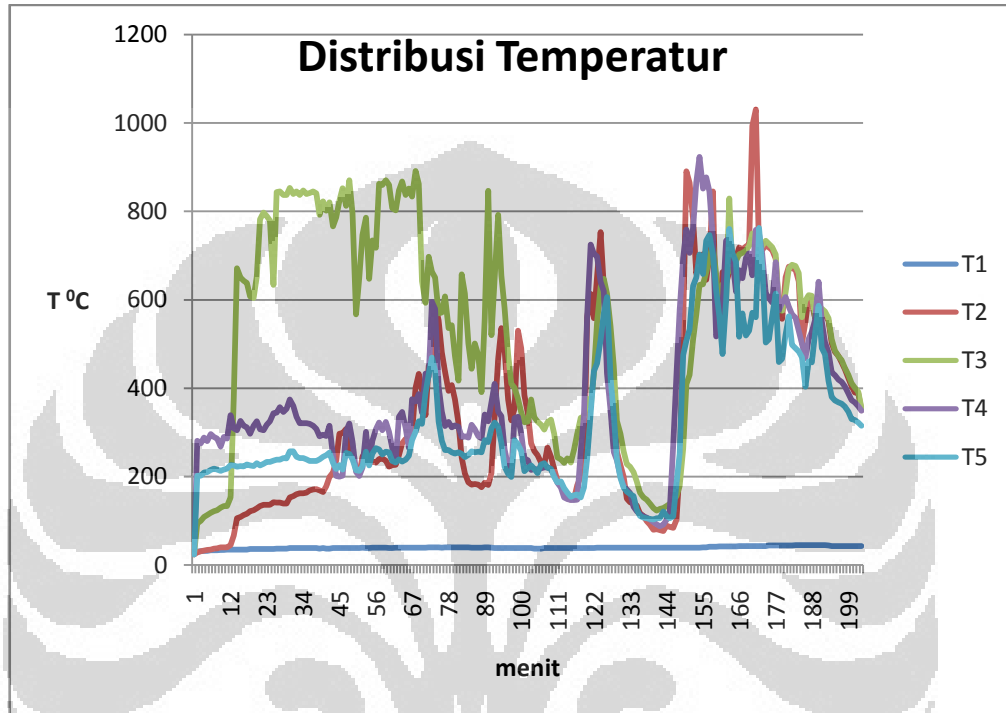
Kedua pengujian dilakukan dengan putaran blower yang sama, yaitu 3400 rpm. Pasir yang digunakan adalah pasir dengan *mesh* 40-50 sebanyak 30 kg.

##### **4.1.1. Karakteristik Pembakaran Tempurung Kelapa**

Parameter yang menjadi pertimbangan untuk menentukan karakteristik dari jenis bahan bakar tempurung kelapa adalah sebagai berikut :

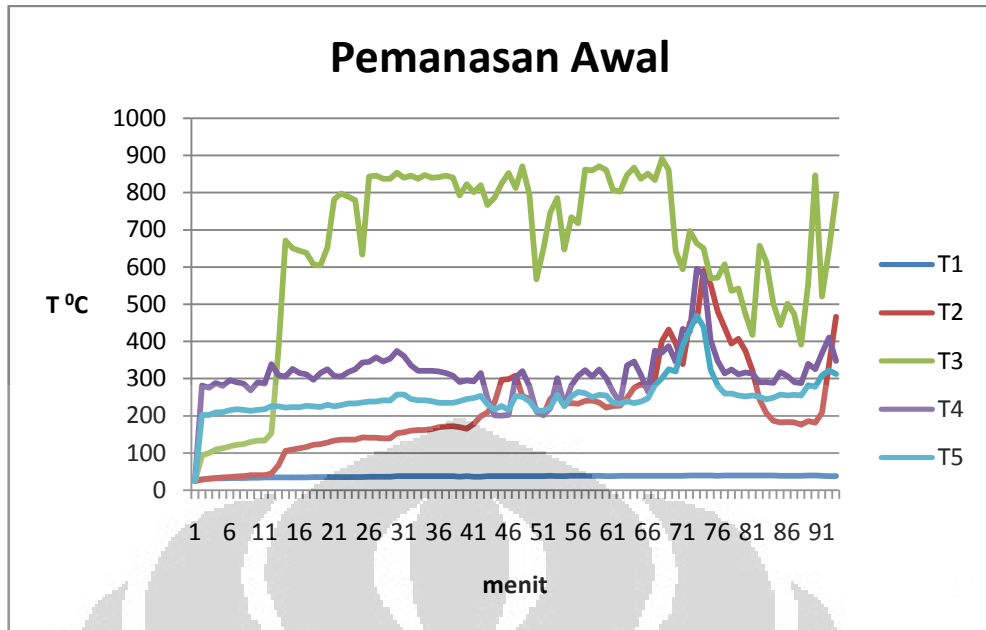
- a. Variasi jumlah fuel pada setiap proses *feeding*
- b. Distribusi temperatur untuk *feeding* setelah *self combustion*

Data percobaan diplot ke dalam grafik distribusi temperatur sehingga dapat dilihat pola kurva karakteristik pembakarannya. Grafik distribusi temperatur berikut merupakan keseluruhan proses pengujian mulai dari pemanasan awal hingga *self combustion* untuk bahan bakar tempurung kelapa.

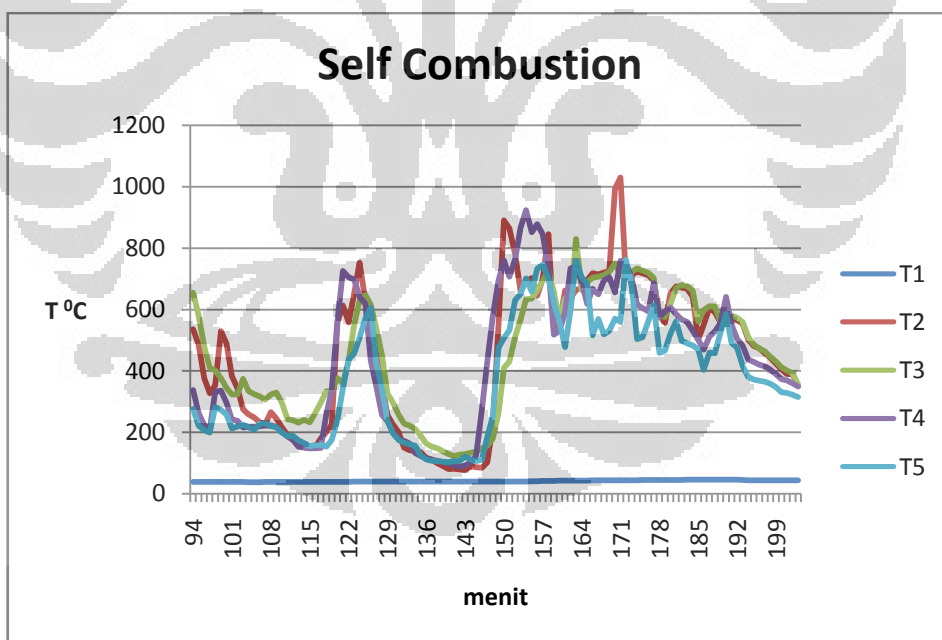


gambar 4. 1 grafik distribusi temperatur percobaan pembakaran tempurung kelapa

Grafik diatas merupakan visualisasi dari persebaran distribusi temperatur pengujian pembakaran dengan bahan bakar tempurung kelapa secara keseluruhan. Distribusi temperatur saat pemanasan awal dan saat *self combustion* akan diplot ke dalam gambar grafiknya masing-masing berikut ini.



gambar 4. 2 grafik distribusi temperatur pembakaran tempurung kelapa saat pemanasan awal



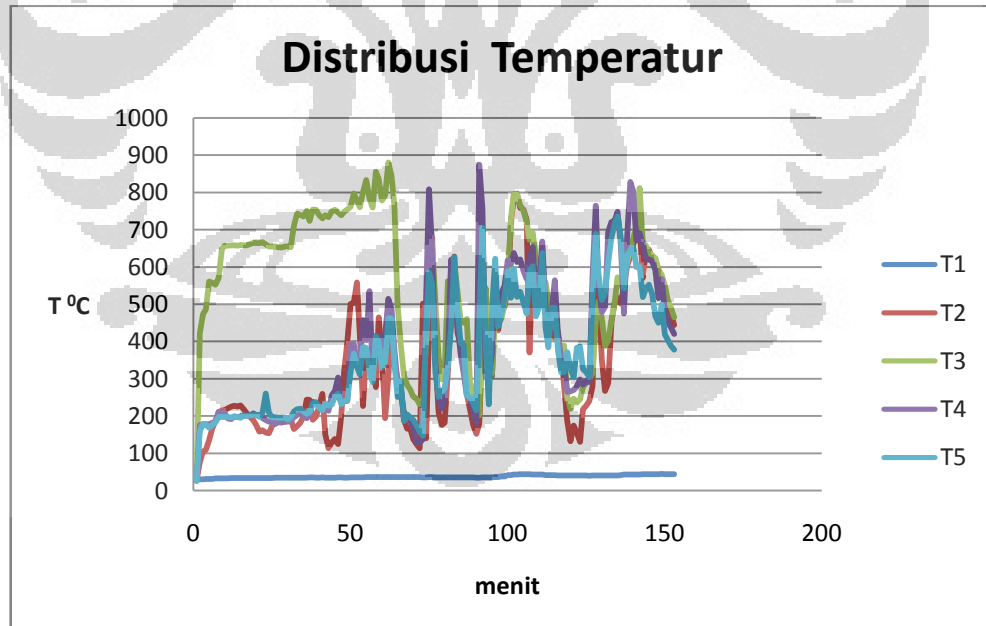
gambar 4.3 grafik distribusi temperatur pembakaran tempurung kelapa saat self combustion

#### 4.1.2. Karakteristik Pembakaran Campuran Tempurung Kelapa Dengan Ranting

Parameter yang menjadi pertimbangan untuk menentukan karakteristik bahan bakar campuran tempurung kelapa dengan ranting adalah :

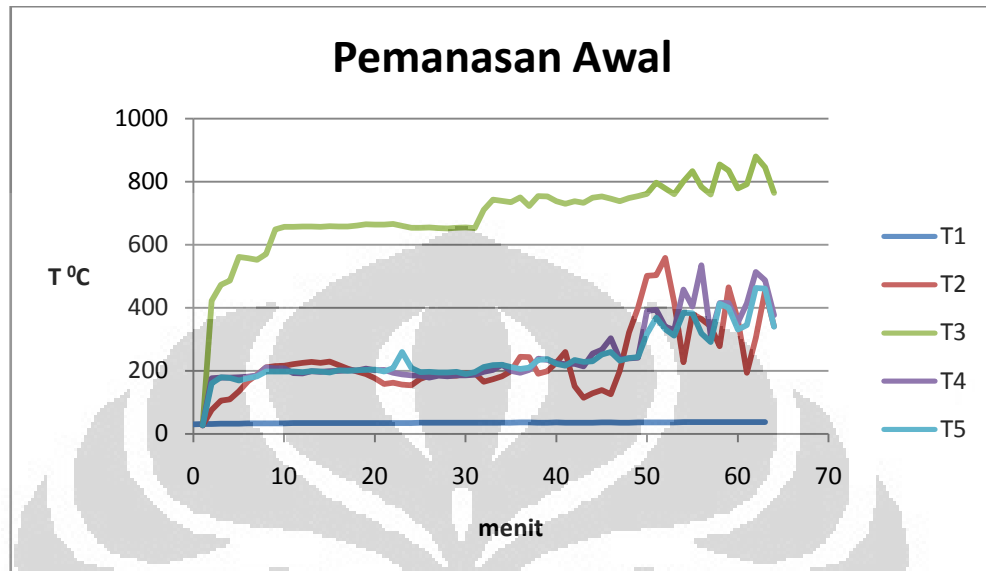
- Komposisi bahan bakar dari setiap *feeding* yang dilakukan
- Pengaruh komposisi bahan bakar terhadap distribusi temperatur

Data percobaan diplot kedalam grafik distribusi temperatur berikut, sehingga akan tampak kurva distribusi hasil pembakaran campuran tempurung kelapa dengan ranting secara keseluruhan mulai dari proses pemanasan awal hingga *self combustion*.

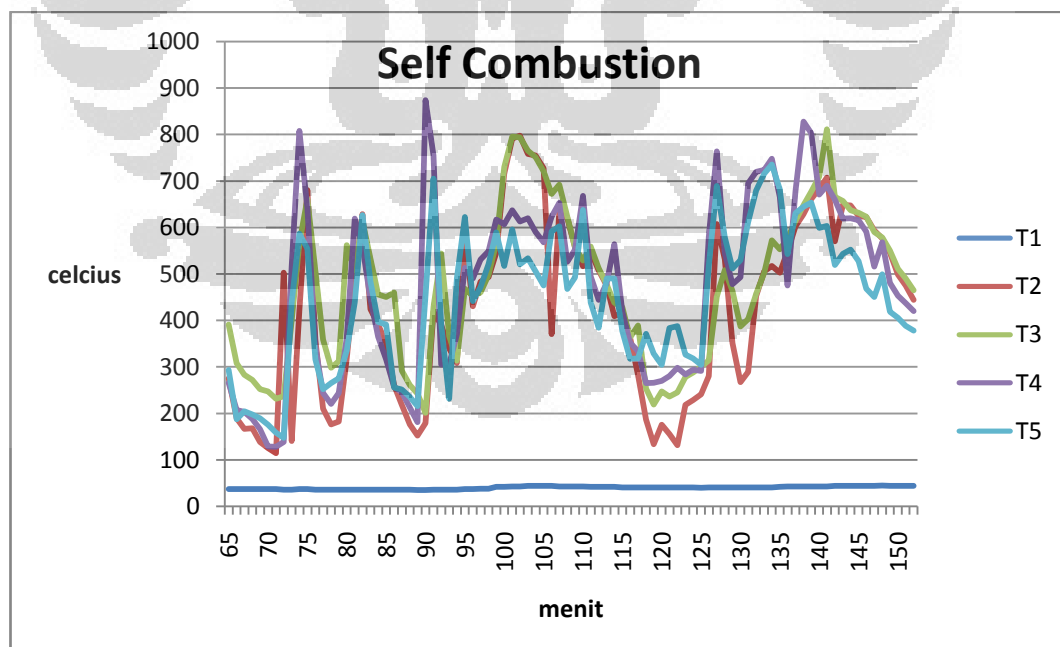


gambar 4.4 grafik distribusi temperatur pembakaran campuran tempurung kelapa dengan ranting

Dari grafik distribusi temperatur di atas, akan diperjelas persebaran distribusi temperatur untuk kedua kondisi, yaitu saat pemanasan awal dan *self combustion* pada grafik berikut ini.



gambar 4.5 grafik pembakaran campuran tempurung kelapa dengan ranting saat pemanasan awal



gambar 4.6 grafik pembakaran campuran tempurung kelapa dengan ranting saat *self combustion*

## 4.2 ANALISA

Setelah melakukan pengujian dengan kedua jenis bahan bakar (tempurung kelapa, campuran ranting dengan tempurung kelapa), didapatkan data distribusi temperatur secara keseluruhan yang dapat dianalisa sesuai dengan aspek-aspek yang akan ditinjau.

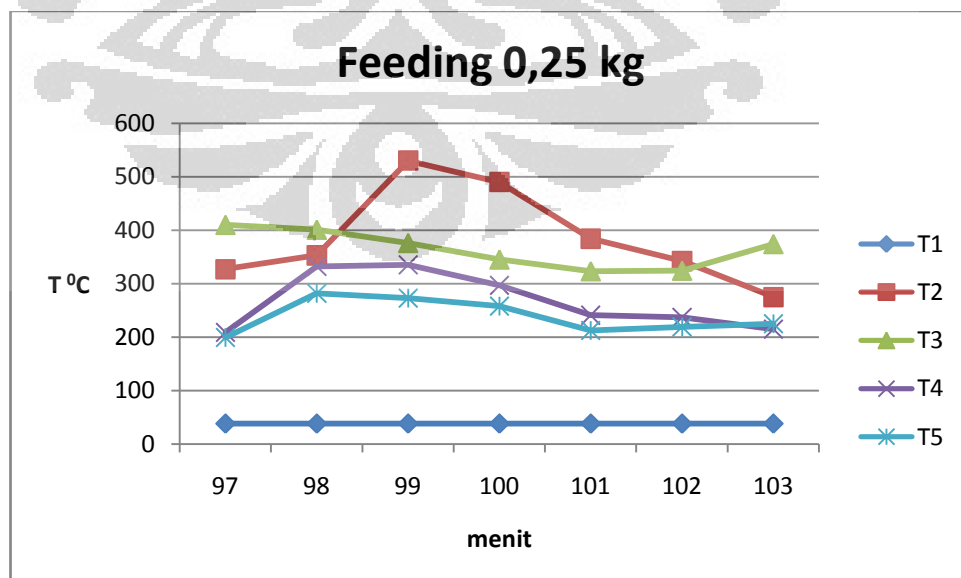
Untuk pembakaran dengan bahan bakar tempurung kelapa, aspek-aspek yang akan ditinjau adalah :

- Variasi jumlah *fuel*
- Pengaruh ketinggian terhadap distribusi temperatur

### 4.2.1 Analisa Temperatur Pada Pembakaran Tempurung Kelapa

Untuk proses pembakaran dengan bahan bakar 100% tempurung kelapa, karakteristiknya akan ditinjau dari variasi jumlah bahan bakar untuk setiap proses *feeding* yang dilakukan. Dalam pengujian yang dilakukan pada tanggal 21 Mei 2011, dengan putaran blower 3400 rpm dan menggunakan pasir dengan *mesh* 40-50, didapatkan hasil sebagai berikut :

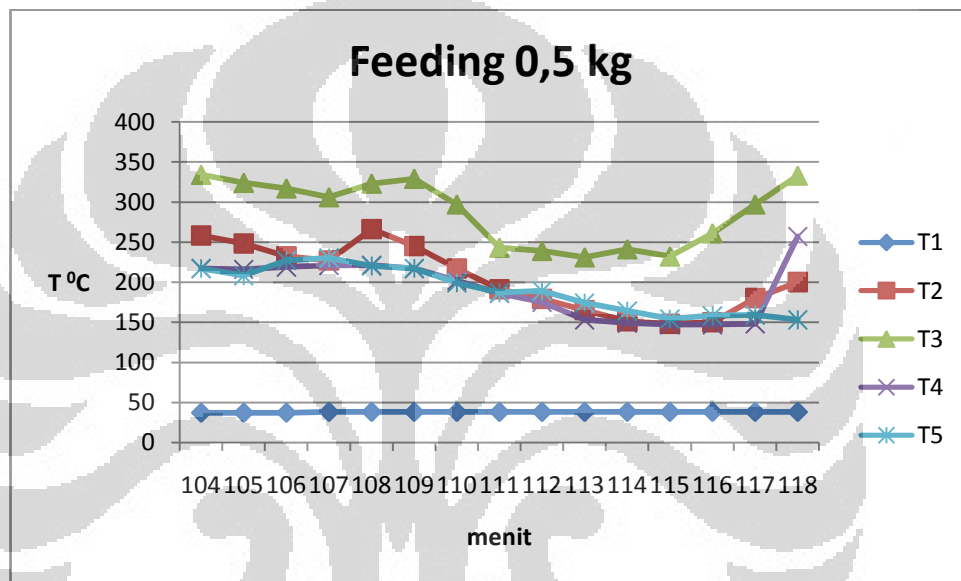
- *Feeding* 0,25 kg tempurung kelapa



gambar 4.7 grafik feeding 0,25 kg tempurung kelapa

Proses *feeding* 0,25 kg tempurung kelapa setelah *self combustion* dilakukan pada menit ke-97 dan menit ke-100. Terlihat kenaikan suhu pasir setelah *feeding* pada menit ke-97 sebesar 200<sup>0</sup>C yang terjadi pada menit ke-99 sebelum akhirnya turun, sehingga *feeding* dilakukan lagi pada menit ke-100.

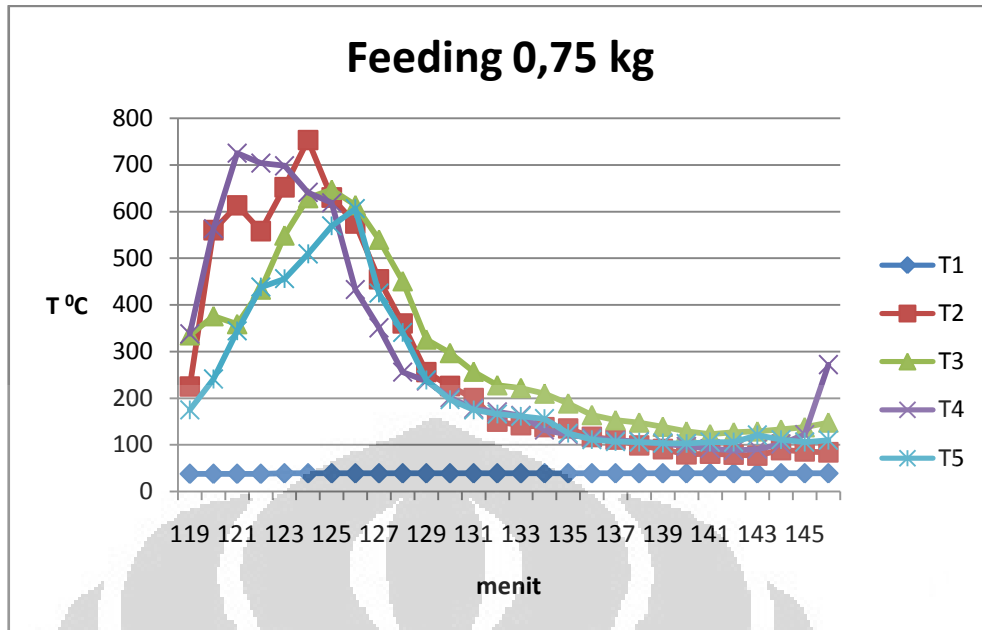
- *Feeding* 0,5 kg tempurung kelapa



gambar 4.8 grafik feeding 0,5 kg tempurung kelapa

Proses *feeding* 0,5 kg tempurung kelapa dilakukan pada menit ke-104 dan menit ke-109. Suhu pasir yang sudah mulai turun pada menit ke-100 baru mulai naik pada menit ke-107. Fenomena ini disebabkan terjadinya penumpukan tempurung kelapa sebanyak 0,5 kg sebelum mulai terbakar.

- *Feeding* 0,75 kg tempurung kelapa

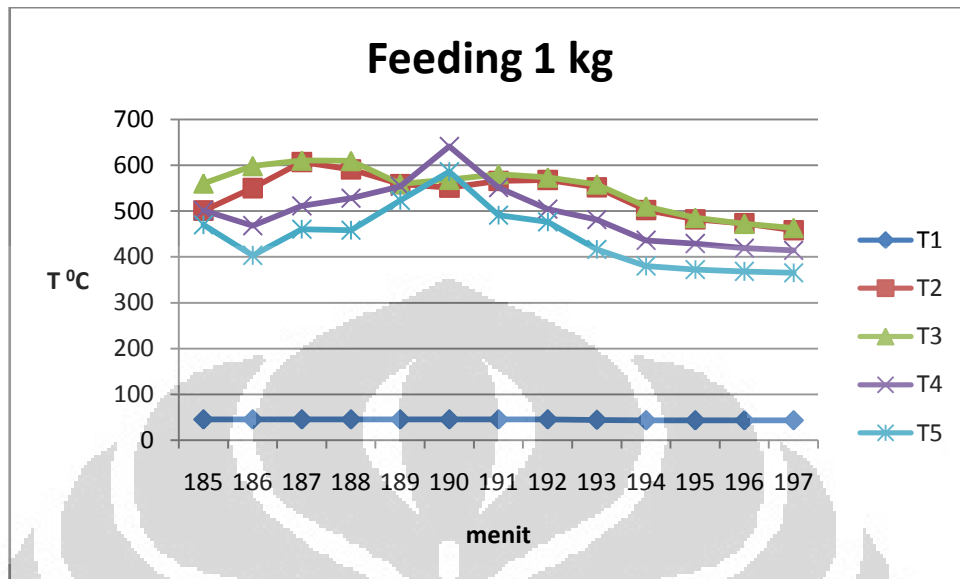


gambar 4.9 grafik feeding 0,75 kg tempurung kelapa

Pada range antara menit ke-119 sampai dengan menit ke-125 terlihat fenomena dimana suhu pasir meningkat tajam. Kenaikan suhu pasir sebesar  $528^{\circ}\text{C}$  terjadi dalam selang waktu kurang dari 7 menit. Kenaikan dimulai tepat pada menit ke-119, atau dimana *feeding* 0,75 kg tempurung kelapa yang pertama dilakukan. Sempat terjadi penurunan pada menit ke-121 yang disebabkan oleh terjadinya penumpukan bahan bakar, namun setelah tempurung yang menumpuk mulai terbakar, temperatur pasir terus naik hingga  $753^{\circ}\text{C}$  pada menit ke-124, dimana dilakukan lagi *feeding* sebanyak 0,75 kg tempurung yang kedua. Setelah proses tersebut, suhu pasir menurun drastis sampai mencapai temperatur di bawah  $100^{\circ}\text{C}$  pada menit ke-140. Fenomena ini disebabkan oleh terjadinya penumpukan bahan bakar di dalam ruang pembakaran.



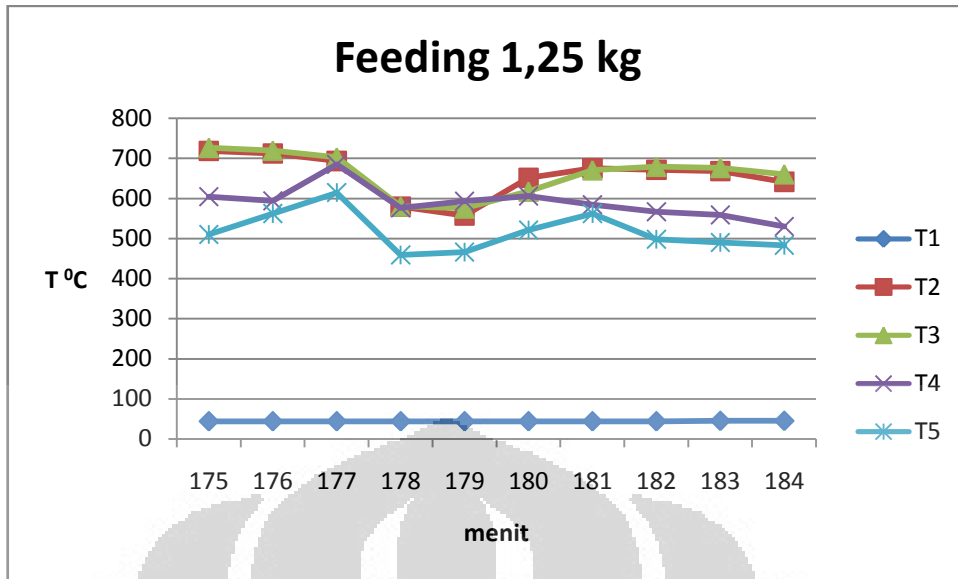
- *Feeding* 1 kg tempurung kelapa



gambar 4.10 grafik feeding 1 kg tempurung kelapa

Grafik temperatur pada saat *feeding* 1 kg tempurung kelapa di menit ke-185 dan menit ke-190 menunjukkan nilai distribusi yang relatif stabil. Temperatur pasir cenderung stabil pada kisaran 500-600<sup>0</sup>C. Hal ini terjadi karena pasir sudah mencapai kondisi operasi.

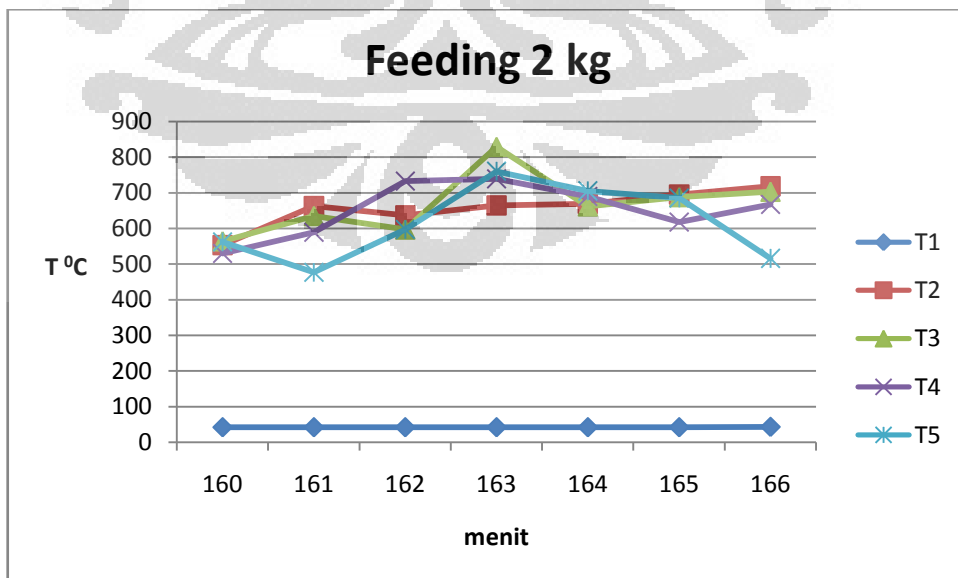
- *Feeding* 1,25 kg tempurung kelapa



gambar 4.11 grafik feeding 1,25 kg tempurung kelapa

Proses *feeding* 1,25 kg tempurung kelapa dilakukan pada menit ke-175 dan 179. Dari grafik, terlihat distribusi temperatur yang cenderung mulai stabil, tidak ada lonjakan atau penurunan temperatur yang drastis. Fenomena ini disebabkan oleh pasir yang terfluidisasi dengan baik, dan mulai mencapai kondisi operasi.

- *Feeding* 2 kg tempurung kelapa

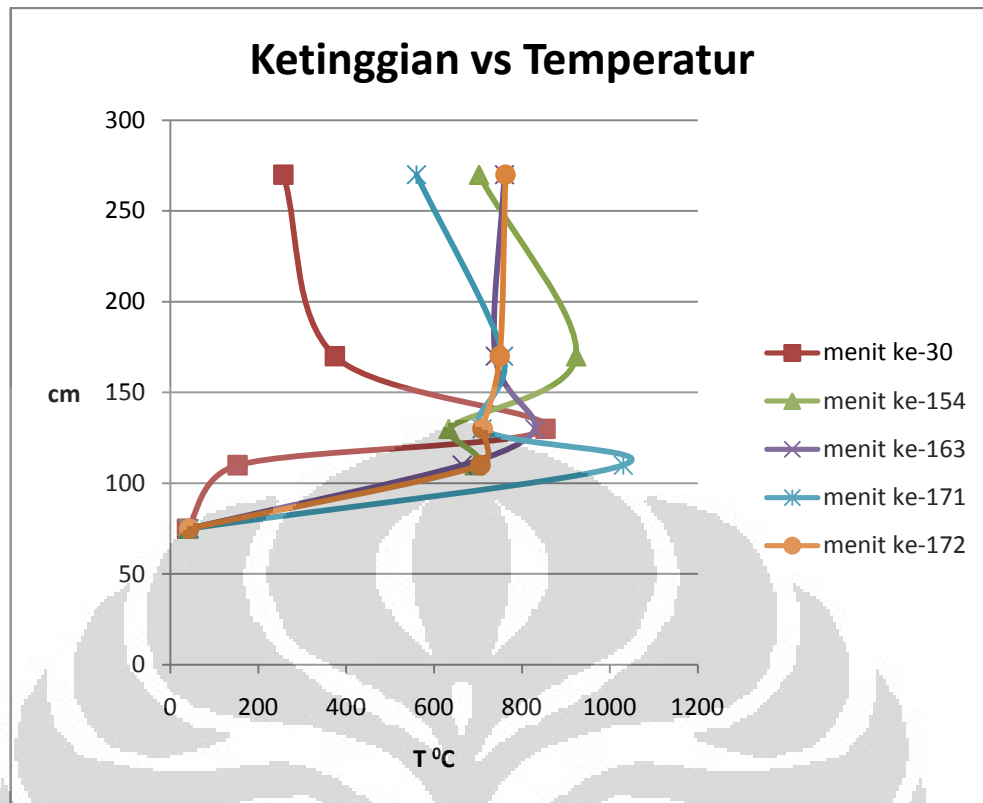


gambar 4.12 grafik feeding 2 kg tempurung kelapa

*Feeding* 2 kg tempurung kelapa dilakukan pada menit ke-160. Dari grafik terlihat temperatur pasir mulai stabil, cenderung meningkat. Fenomena ini merupakan indikasi bahwa sistem mulai memasuki tahap kondisi operasi, dimana kenaikan temperatur telah meningkat sejak menit ke-140.

### **Analisis Pengaruh Ketinggian Terhadap Temperatur**

Pengaruh ketinggian terhadap temperatur merupakan salah satu parameter khusus yang bertujuan untuk melihat hubungan dari ketinggian ruang terhadap temperaturnya. Data yang digunakan untuk menganalisis pengaruh ketinggian terhadap temperatur adalah data temperatur maksimal dari setiap termokopel. Suhu di T1, atau temperatur plenum yang cenderung statis sepanjang pengujian menggunakan data pada menit ke-163. Temperatur maksimum di T2, atau temperatur pasir maksimum tercapai pada menit ke-171. Temperatur maksimum pada T3 tercapai pada menit ke-30. Temperatur maksimum pada T4 tercapai pada menit ke-154, dan temperatur maksimum pada T5 tercapai pada menit ke-172.



gambar 4.13 grafik pengaruh ketinggian terhadap temperatur

Temperatur pada plenum cenderung statis selama pengujian dilakukan, karena T1 merupakan termokopel yang mengukur temperatur pada ruang yang terletak dibawah bed, yang terus tertiup blower. Temperatur pasir yang diukur oleh termokopel T2 mencapai nilai maksimum pada menit ke-171, dan merupakan temperatur tertinggi yang tercapai selama pengujian dilakukan. Fenomena ini merupakan efek dari fluidisasi pasir, dan proses pemanasan ruang yang paling optimum, karena letaknya dekat dengan *burner*.

Temperatur maksimum pada termokopel T4 ternyata lebih tinggi pada temperatur maksimum di termokopel T3 yang letaknya lebih dekat ke *burner*. Fenomena ini disebabkan oleh panas yang dihasilkan dari proses pembakaran memenuhi ruang yang diukur pada termokopel T4, sehingga mencapai temperatur maksimum yang lebih tinggi dibanding termokopel T3 meskipun T3 lebih dekat ke *burner*.

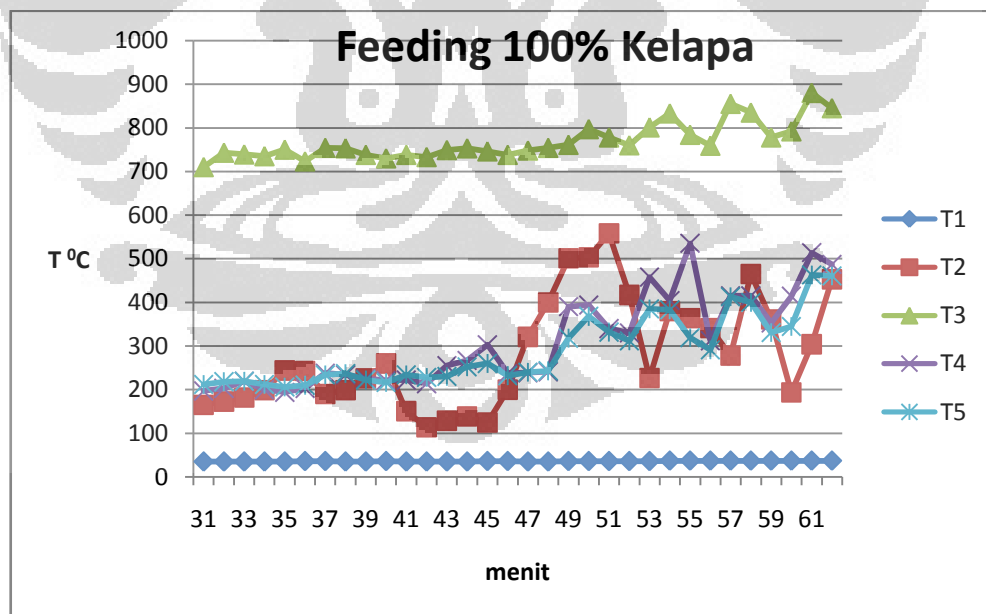
#### 4.2.2 Analisa Pembakaran Campuran Ranting Dan Tempurung Kelapa

Pengujian dengan bahan bakar campuran ranting dan tempurung kelapa dilakukan dengan perencanaan komposisi berurutan sebagai berikut :

1. 100% tempurung kelapa, pada menit ke-30 sampai menit ke-60
2. 80% tempurung kelapa dan 20% ranting, pada menit ke-63 sampai menit ke-77
3. Komposisi 50-50, pada menit ke-78 sampai menit ke-93
4. 20% tempurung kelapa dan 80% ranting, pada menit ke-95 sampai menit ke-106
5. 100% ranting, dimulai pada menit ke-107 sampai akhir pengujian

Untuk pengujian dengan campuran ranting dan tempurung kelapa, yang dilakukan pada tanggal 2 Juni 2011, karakteristik bahan bakar akan ditinjau dari komposisi bahan bakar untuk setiap proses *feeding* serta pengaruhnya terhadap perubahan temperatur.

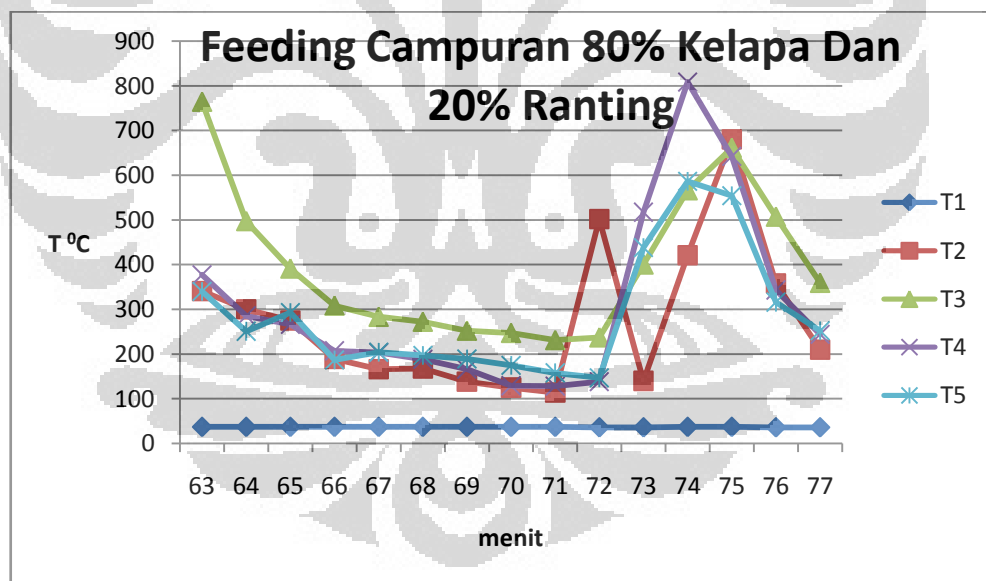
- *Feeding* dengan komposisi 100% tempurung kelapa



gambar 4.14 grafik pembakaran campuran tempurung kelapa dengan ranting dengan komposisi 100% tempurung kelapa

*Feeding* dengan komposisi 100% tempurung kelapa dilakukan sejak pemanasan awal. Dari grafik terlihat persebaran temperatur yang masih naik turun terutama pada temperatur pasir. Temperatur pada T3 cenderung stabil dan memiliki nilai yang lebih tinggi dalam kisaran waktu antara menit ke-30 sampai dengan menit ke-60. Tingginya nilai T3 disebabkan saat proses pemanasan awal belum terlalu banyak bahan bakar yang dimasukkan, sehingga termokopel T3 terus menerus terkena api dari *burner* yang menyebabkan temperaturnya cenderung stabil saat pemanasan awal.

- *Feeding* dengan komposisi 80% tempurung kelapa dan 20% ranting



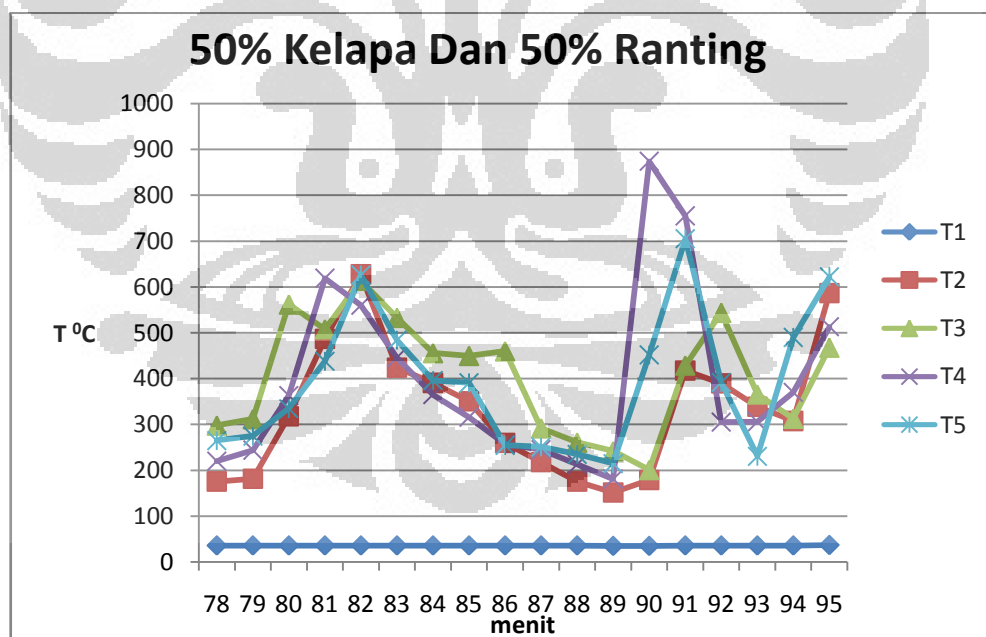
gambar 4.15 grafik pembakaran campuran tempurung kelapa dengan ranting dengan komposisi 80% tempurung kelapa dan 20% ranting

*Feeding* dengan komposisi 80% tempurung kelapa dan 20% ranting menghasilkan distribusi temperatur seperti yang terlihat pada grafik. Temperatur yang terukur pada termokopel T3 mengalami penurunan sebesar 553<sup>0</sup>C dalam

waktu kurang dari 10 menit, dimulai dari menit ke-63 dan berakhir pada menit ke-72 sebelum mulai meningkat secara signifikan.

Fenomena yang menarik terjadi pada termokopel T2 atau temperatur pasir, dimana setelah mengalami penurunan sebesar  $200^{\circ}\text{C}$  dari menit ke-63 sampai menit ke-71, secara drastis mengalami peningkatan sebesar  $390^{\circ}\text{C}$ , dan mengalami penurunan drastis, hampir sebesar  $390^{\circ}\text{C}$  hanya dalam jangka waktu 2 menit. Fenomena ini merupakan efek dari input bahan bakar sebanyak 0,5 kg pada menit ke-71, dimana secara tiba-tiba timbul *flame* yang besar namun hanya sebentar, dan temperatur pasir kembali menurun 1 menit setelahnya. Fenomena yang sama terjadi pada termokopel T4, dimana dari grafik terlihat perbedaan sekitar 1 menit dengan kenaikan yang terukur pada termokopel T2.

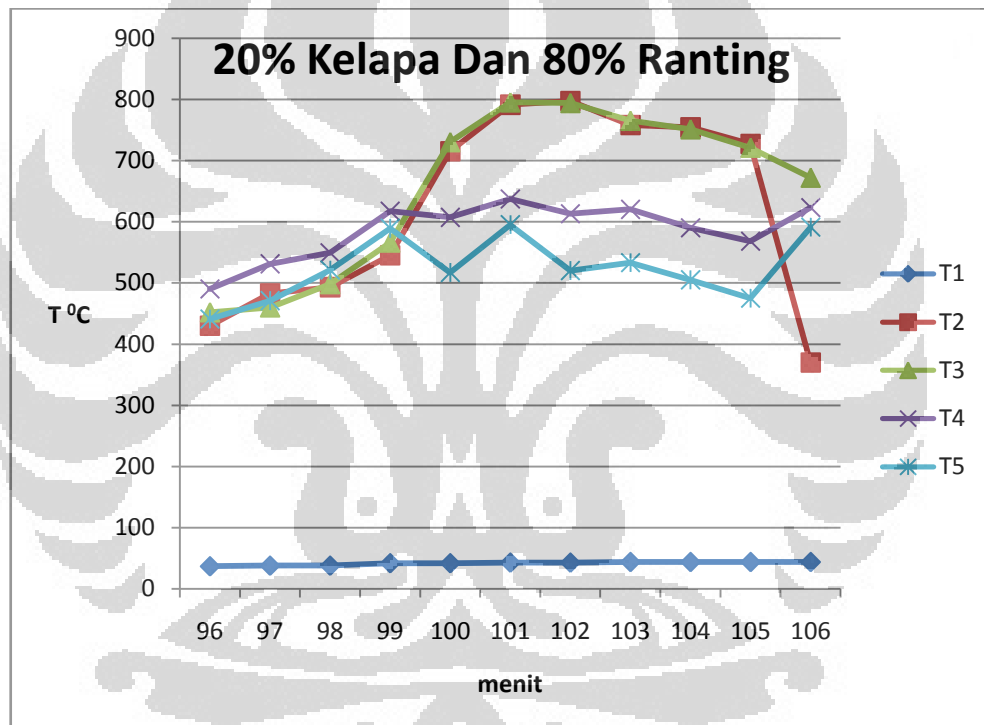
- *Feeding* dengan komposisi 50% tempurung kelapa dan 50% ranting



gambar 4.16 grafik pembakaran campuran tempurung kelapa dengan ranting dengan komposisi 50% tempurung kelapa dan 50% ranting

Pada proses *feeding* dengan komposisi 50-50, distribusi temperatur secara keseluruhan masih belum menunjukkan nilai yang stabil, karena saat *feeding* dengan komposisi 50-50 dilakukan, sistem baru memasuki awal tahap *self combustion*. Namun pada komposisi ini, termokopel T4 mencapai temperatur maksimumnya, yaitu sebesar 874<sup>0</sup>C pada menit ke-90. Kenaikan maksimum ini terjadi setelah dilakukan proses *feeding* dengan komposisi 50-50 sebanyak 1 kg.

- *Feeding* dengan komposisi 20% tempurung kelapa dan 80% ranting

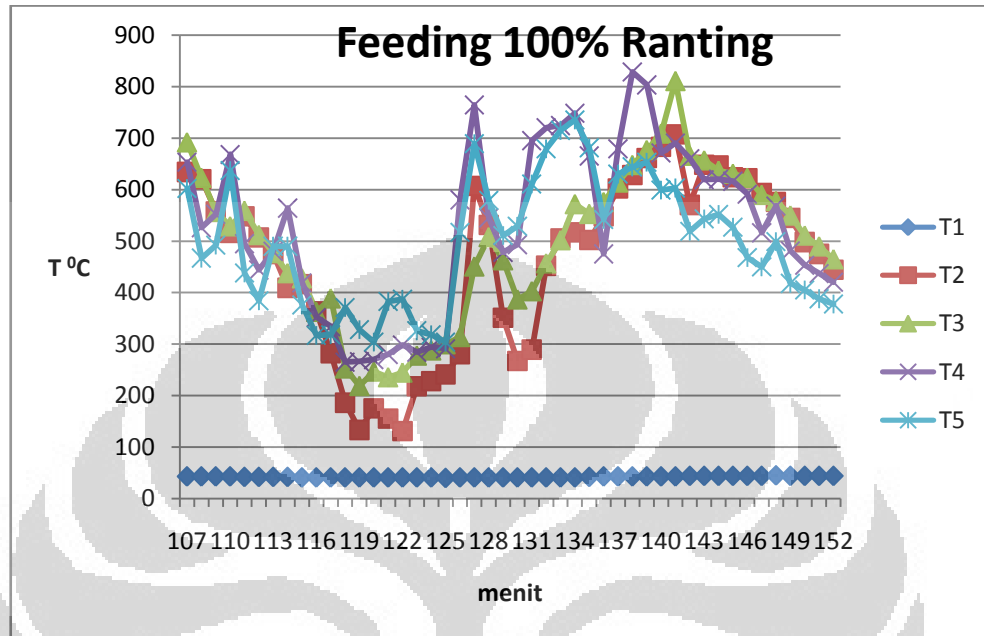


gambar 4.17 grafik pembakaran campuran tempurung kelapa dengan ranting dengan komposisi 20% tempurung kelapa dan 80% ranting

Proses *feeding* dengan komposisi 20% tempurung kelapa dan 80% ranting dilakukan dalam kisaran waktu antara menit ke-96 hingga menit ke-106. Fenomena yang terjadi pada saat *feeding* dengan komposisi ini adalah dimana temperatur yang terukur pada T4 dan T5 mulai cenderung stabil. Disinilah temperatur pasir mencapai nilai maksimumnya, tepatnya pada menit ke-102, atau 3 menit setelah dilakukan *feeding* sebanyak 1 kg.



- *Feeding* dengan komposisi 100% ranting

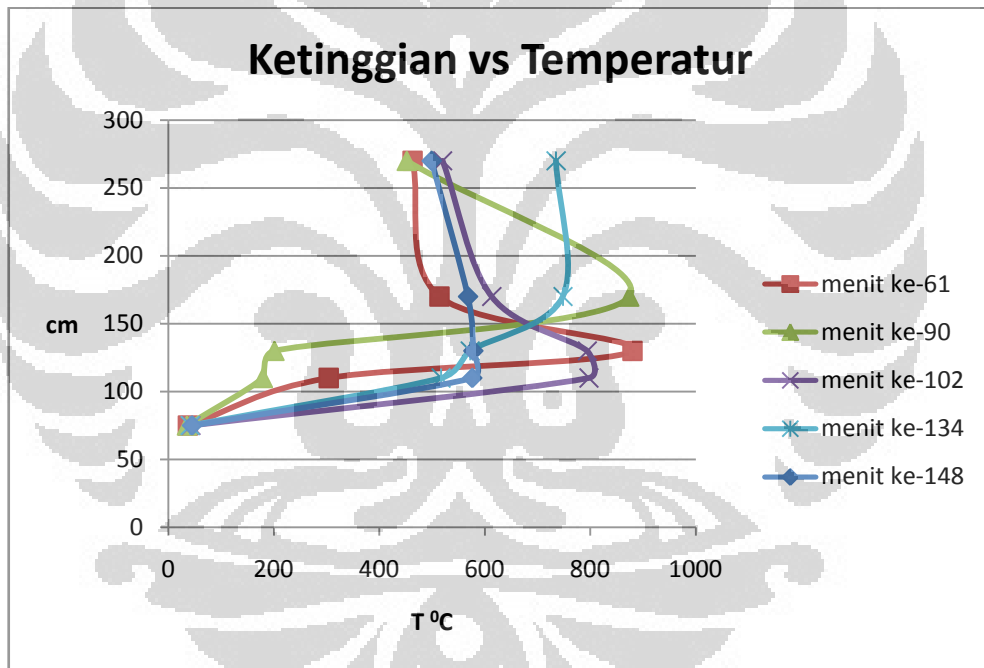


gambar 4.18 grafik pembakaran campuran tempurung kelapa dengan ranting dengan komposisi 100% ranting

Proses *feeding* dengan komposisi 100% ranting dilakukan mulai menit ke-107 hingga akhir pengujian. Pada kisaran waktu tersebut, keempat termokopel T2, T3, T4 dan T5 tidak pernah mencapai kembali suhu maksimumnya. Dilihat dari grafik, fenomena yang terjadi adalah distribusi temperatur pada tiap termokopel selain T1 cenderung naik-turun. Distribusi ini menunjukkan bahwa setelah tahap *self combustion*, komposisi dengan ranting membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mencapai kondisi operasi dibandingkan pengujian dengan bahan bakar tempurung kelapa.

### Analisa Pengaruh Ketinggian Terhadap Temperatur

Gambar 4.19 yang menunjukkan grafik pengaruh ketinggian terhadap temperatur menunjukkan temperatur maksimum yang diukur oleh tiap-tiap termokopel. Untuk T1 maksimum yang cenderung stabil, digunakan data pada menit ke-148. T2 atau temperatur pasir maksimum dicapai pada menit ke-102. T3 mencapai nilai maksimum pada menit ke-61. T4 mencapai nilai maksimum pada menit ke-90 dan T5 mencapai nilai maksimum pada menit ke-134.



gambar 4.19 grafik pengaruh ketinggian terhadap temperatur

Dari grafik, terlihat bahwa temperatur yang diukur oleh termokopel T3 merupakan yang pertama mencapai nilai maksimum, yaitu pada menit ke-61, dimana merupakan tahap akhir dari pemanasan awal, yaitu sekitar 3 menit sebelum memasuki tahap *self combustion*. Termokopel T4 mencapai nilai

maksimum pada menit ke-90, dimana tercapai setelah proses *feeding* dengan komposisi 50-50 sebanyak 1 kg.

Temperatur pasir mencapai nilai maksimumnya pada menit ke-102, yaitu setelah proses *feeding* dengan komposisi 20% tempurung dan 80% ranting sebanyak 1 kg. Sedangkan T5 mencapai temperatur maksimumnya pada menit ke-134, dimana *feeding* 100% ranting dilakukan dengan jumlah 2 kg.



## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 KESIMPULAN

1. Proses pembakaran, terutama sekali pada tahap awal *self combustion* akan menghasilkan distribusi temperatur yang lebih stabil dengan bahan bakar tempurung kelapa. Pemakaian campuran bahan bakar ranting dengan tempurung kelapa pada awal *self combustion* cenderung naik-turun sampai dengan akhir pengujian, yaitu setelah 152 menit.
2. Temperatur maksimum pasir lebih cepat tercapai pada penggunaan bahan bakar campuran, yaitu pada menit ke-102, sedangkan pada penggunaan bahan bakar tempurung, temperatur maksimum pasir baru tercapai pada menit ke-171. Namun temperatur maksimum pada bahan bakar tempurung memiliki nilai  $1030^{\circ}\text{C}$  , lebih tinggi dibandingkan bahan bakar campuran yang hanya mencapai suhu maksimum  $797^{\circ}\text{C}$  , meskipun waktu pencapaiannya lebih lama.
3. Temperatur maksimum pada ruang diatas distributor yang diukur oleh termokopel T3 dan dipengaruhi oleh api pada kedua pengujian tercapai pada tahap pemanasan awal, hal ini dikarenakan letak termokopel T3 yang dekat dengan *burner*. Pada pengujian pertama dengan bahan bakar tempurung kelapa, temperatur maksimum di T3 tercapai saat *feeding* pertama kali dilakukan, yaitu pada menit ke-30, dengan bahan bakar sebanyak 0,25 kg dan temperatur yang terukur adalah sebesar  $853^{\circ}\text{C}$ , sedangkan pada pengujian kedua, temperatur maksimum di T3 tercapai di menit ke-61, sekitar 3 menit sebelum tahap *self combustion* dimulai, dengan komposisi *feeding* 100% tempurung kelapa sebanyak 1 kg dan mencapai temperatur  $880^{\circ}\text{C}$ .
4. Temperatur maksimum pada ruang yang diukur oleh termokopel T4 lebih cepat tercapai dengan penggunaan bahan bakar campuran. Dari hasil analisa, T4 maksimum tercapai pada menit ke-90, sedangkan pada pemakaian bahan bakar tempurung kelapa, temperatur maksimumnya baru tercapai di menit ke-

154. Namun T4 maksimum yang terukur pada pengujian dengan bahan bakar campuran hanya mencapai  $874^{\circ}\text{C}$ , sedangkan pada bahan bakar tempurung, T4 mencapai  $923^{\circ}\text{C}$ .

5. Ditinjau secara keseluruhan, pembakaran dengan melibatkan bahan bakar ranting untuk FBC akan menghasilkan temperatur yang cenderung tidak stabil jika dibandingkan dengan pengujian menggunakan bahan bakar tempurung kelapa untuk periode waktu pengujian tertentu. Hal ini dikarenakan perbedaan *moisture content* kedua jenis bahan bakar, dimana tempurung kelapa menghasilkan temperatur yang relatif lebih stabil.



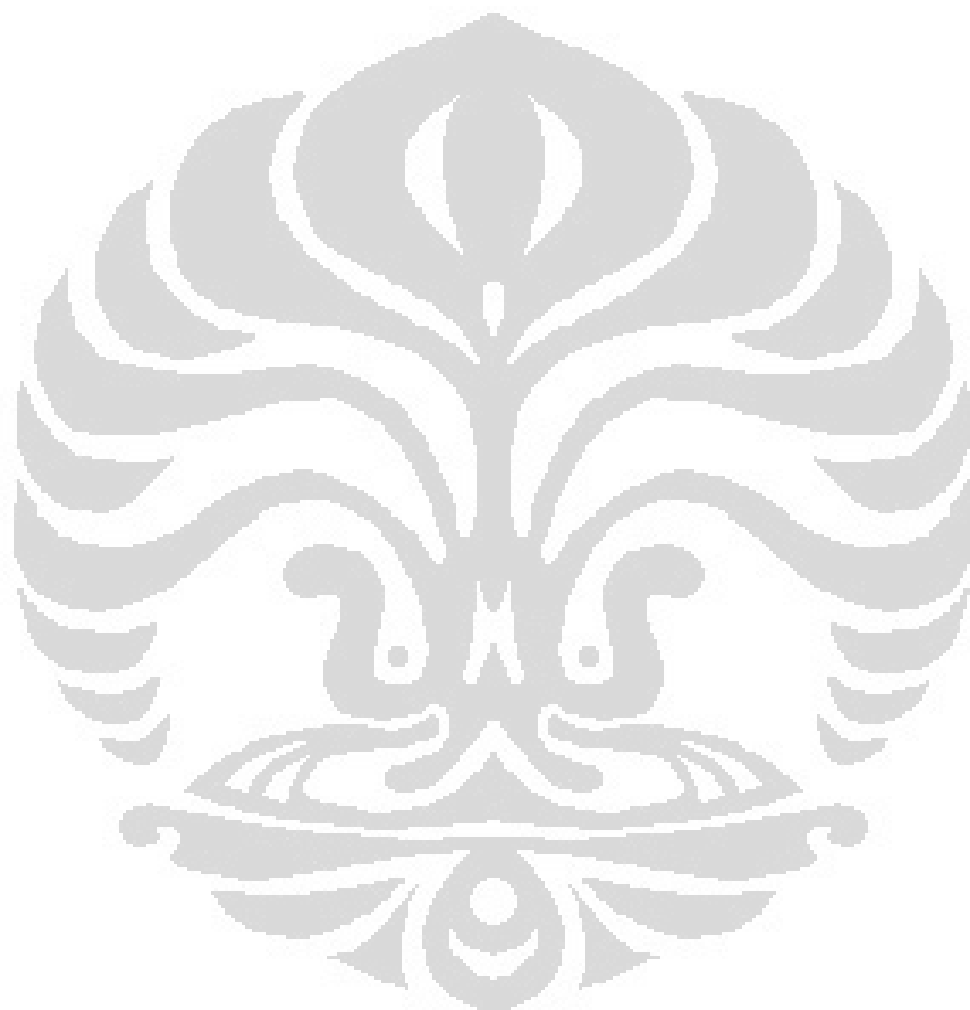
## 5.2 SARAN

Studi mengenai *Fluidize Bed Combuster* merupakan salah satu solusi untuk permasalahan krisis energi di masa yang akan datang, sehingga diharapkan performance dari *Fluidize Bed Combuster UI* dapat meningkat untuk keperluan penelitian lebih lanjut. Beberapa rekomendasi yang diajukan untuk kepentingan penelitian lebih jauh, yakni:

1. Persiapkan bahan bakar dengan baik (jumlah maupun ukuran) sehingga saat proses pengujian FBC akan berlangsung lebih baik. Dalam hal ini penulis berbicara tentang pentingnya keberadaan alat pencacah khusus untuk pemotongan bahan bakar di lab FBC. Adanya alat semacam ini akan sangat membantu penelitian, terutama ditinjau dari segi waktu persiapan yang akan jauh lebih singkat dibanding memotong bahan bakar biomassa secara manual.
2. Penambahan kapasitas burner perlu dilakukan untuk mengurangi lamanya proses pemanasan awal.
3. Perlunya pengadaan instalasi jaringan listrik dan air bersih pada laboratorium pengujian FBC, karena hal ini sangat dibutuhkan untuk praktikan laboratorium di masa mendatang. Untuk informasi, sampai saat ini pengujian FBC masih dilakukan dengan sumber listrik dari genset, dan sejauh ini belum menimbulkan masalah berarti, namun adanya instalasi listrik dari PLN akan banyak membantu kelancaran proses pengujian.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Basu, Prabir. "Combustion and Gasification in Fluidized Beds" (Taylor & Francis Group 2006).
2. Oka, Simeon N. "Fluidized Bed Combustion" (Marcel Dekker, Inc. 2004)
3. Bruce R. Munson, Donald F. Young, *Mekanika Fluida*, terj. Harinaldi, Budiarmo (Jakarta: Erlangga, 2003).
4. Surjosatyo, Adi. "Fluidized Bed Incineration of Palm Shell & Oil Sludge Waste." Tesis, Program Magister Engineering Universiti Teknologi Malaysia, 1998.
5. Howard, J. R., *Fluidized Beds – Combustion and Applications*, (London: Applied Science Publishers, 1983).
6. Kunii, Daizo & Octave Levenspiel, *Fluidization Engineering*, (New York: Butterworth-Heinemann, 1991).
7. [www.cogeneration.net/fluidized\\_bed\\_combustion.htm](http://www.cogeneration.net/fluidized_bed_combustion.htm)
8. [www.doiserbia.nb.rs/ft.aspx?id=0354-98360302105G](http://www.doiserbia.nb.rs/ft.aspx?id=0354-98360302105G)
9. [www.tpub.com/content/altfuels10/Gasification/Gasification0018.htm](http://www.tpub.com/content/altfuels10/Gasification/Gasification0018.htm)
10. [www.fluidizedbedcombustion.com/](http://www.fluidizedbedcombustion.com/)

**LAMPIRAN**



## TABEL KONVERSI SATUAN

### Massa

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

### Panjang

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

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

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

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

### Waktu

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

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

### Energi

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

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

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

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

### Daya

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

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

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

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

### Tekanan

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

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

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

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

- Tabel data pembakaran tempurung kelapa 21 Mei 2011 dengan putaran blower 3400 rpm dan menggunakan pasir dengan *mesh* 40-50

| menit | T1 | T2  | T3  | T4  | T5  | Bahan Bakar |
|-------|----|-----|-----|-----|-----|-------------|
| 1     | 28 | 24  | 24  | 24  | 24  |             |
| 2     | 30 | 28  | 94  | 281 | 202 |             |
| 3     | 31 | 31  | 100 | 275 | 202 |             |
| 4     | 32 | 33  | 109 | 288 | 209 |             |
| 5     | 32 | 34  | 113 | 280 | 210 |             |
| 6     | 33 | 35  | 118 | 296 | 215 |             |
| 7     | 33 | 37  | 122 | 290 | 218 |             |
| 8     | 33 | 38  | 124 | 286 | 216 |             |
| 9     | 34 | 40  | 130 | 268 | 213 |             |
| 10    | 34 | 40  | 133 | 290 | 216 |             |
| 11    | 35 | 40  | 133 | 286 | 218 |             |
| 12    | 35 | 45  | 153 | 339 | 226 |             |
| 13    | 35 | 67  | 378 | 309 | 225 |             |
| 14    | 35 | 106 | 671 | 305 | 222 |             |
| 15    | 35 | 109 | 650 | 326 | 224 |             |
| 16    | 35 | 113 | 643 | 315 | 223 |             |
| 17    | 35 | 116 | 638 | 311 | 227 |             |
| 18    | 36 | 122 | 607 | 297 | 225 |             |
| 19    | 36 | 124 | 604 | 315 | 224 |             |
| 20    | 36 | 128 | 653 | 325 | 230 |             |
| 21    | 36 | 133 | 782 | 307 | 225 |             |
| 22    | 36 | 136 | 797 | 305 | 229 |             |
| 23    | 36 | 136 | 789 | 317 | 233 |             |
| 24    | 36 | 136 | 779 | 325 | 233 |             |
| 25    | 36 | 142 | 633 | 343 | 236 |             |
| 26    | 37 | 141 | 843 | 345 | 238 |             |
| 27    | 37 | 141 | 845 | 357 | 238 |             |
| 28    | 37 | 139 | 837 | 346 | 242 |             |
| 29    | 37 | 139 | 837 | 353 | 241 |             |
| 30    | 38 | 153 | 853 | 374 | 257 | +0,25 kg    |
| 31    | 38 | 156 | 839 | 360 | 257 |             |
| 32    | 38 | 160 | 845 | 335 | 245 |             |
| 33    | 38 | 162 | 837 | 321 | 242 |             |
| 34    | 38 | 162 | 847 | 321 | 242 |             |
| 35    | 38 | 164 | 839 | 321 | 239 |             |
| 36    | 38 | 169 | 841 | 319 | 235 |             |
| 37    | 38 | 171 | 845 | 315 | 235 |             |

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

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

|     |    |     |     |     |     |          |
|-----|----|-----|-----|-----|-----|----------|
| 120 | 38 | 560 | 376 | 563 | 241 |          |
| 121 | 38 | 613 | 359 | 725 | 344 |          |
| 122 | 38 | 558 | 433 | 704 | 438 |          |
| 123 | 39 | 652 | 549 | 698 | 456 |          |
| 124 | 39 | 753 | 629 | 641 | 509 | +0,75 kg |
| 125 | 39 | 630 | 647 | 619 | 569 |          |
| 126 | 39 | 574 | 614 | 433 | 606 |          |
| 127 | 39 | 455 | 540 | 351 | 425 |          |
| 128 | 39 | 360 | 451 | 256 | 341 |          |
| 129 | 39 | 256 | 326 | 237 | 239 | +0,75 kg |
| 130 | 39 | 226 | 297 | 201 | 197 |          |
| 131 | 39 | 200 | 257 | 178 | 175 |          |
| 132 | 39 | 150 | 228 | 171 | 166 |          |
| 133 | 39 | 142 | 222 | 163 | 161 |          |
| 134 | 39 | 138 | 210 | 132 | 156 |          |
| 135 | 39 | 135 | 189 | 122 | 125 |          |
| 136 | 39 | 117 | 164 | 115 | 111 |          |
| 137 | 39 | 111 | 153 | 110 | 107 |          |
| 138 | 39 | 99  | 148 | 107 | 106 |          |
| 139 | 39 | 91  | 139 | 103 | 104 |          |
| 140 | 39 | 80  | 129 | 97  | 103 |          |
| 141 | 39 | 81  | 123 | 92  | 106 |          |
| 142 | 39 | 79  | 127 | 88  | 106 |          |
| 143 | 39 | 77  | 129 | 91  | 121 |          |
| 144 | 39 | 89  | 133 | 102 | 111 |          |
| 145 | 39 | 86  | 138 | 122 | 106 |          |
| 146 | 39 | 84  | 148 | 272 | 110 |          |
| 147 | 39 | 102 | 156 | 429 | 184 | +0,5 kg  |
| 148 | 39 | 219 | 179 | 576 | 251 |          |
| 149 | 39 | 549 | 263 | 694 | 475 |          |
| 150 | 39 | 890 | 409 | 759 | 507 | +1,25 kg |
| 151 | 39 | 864 | 430 | 706 | 533 |          |
| 152 | 39 | 781 | 510 | 763 | 631 |          |
| 153 | 39 | 659 | 567 | 866 | 650 | +1,25 kg |
| 154 | 39 | 692 | 633 | 923 | 702 |          |
| 155 | 40 | 703 | 635 | 851 | 658 |          |
| 156 | 40 | 645 | 662 | 877 | 733 | +1,25 kg |
| 157 | 41 | 699 | 693 | 845 | 746 |          |
| 158 | 41 | 845 | 727 | 734 | 702 |          |
| 159 | 41 | 537 | 657 | 517 | 621 |          |
| 160 | 42 | 553 | 564 | 530 | 562 | +2kg     |

|     |    |      |     |     |     |          |
|-----|----|------|-----|-----|-----|----------|
| 161 | 42 | 662  | 635 | 589 | 477 |          |
| 162 | 42 | 636  | 597 | 733 | 597 |          |
| 163 | 42 | 664  | 829 | 739 | 760 |          |
| 164 | 42 | 669  | 662 | 690 | 705 |          |
| 165 | 42 | 695  | 688 | 618 | 685 |          |
| 166 | 43 | 718  | 703 | 667 | 516 |          |
| 167 | 43 | 714  | 706 | 649 | 569 | +0,25 kg |
| 168 | 43 | 720  | 711 | 694 | 519 |          |
| 169 | 43 | 725  | 722 | 705 | 530 |          |
| 170 | 43 | 993  | 750 | 655 | 570 |          |
| 171 | 43 | 1030 | 709 | 758 | 560 |          |
| 172 | 43 | 705  | 710 | 749 | 762 |          |
| 173 | 43 | 712  | 722 | 703 | 676 |          |
| 174 | 43 | 723  | 733 | 615 | 503 |          |
| 175 | 44 | 718  | 726 | 604 | 510 | +1,25 kg |
| 176 | 44 | 712  | 719 | 594 | 562 |          |
| 177 | 44 | 693  | 702 | 685 | 614 |          |
| 178 | 44 | 579  | 580 | 576 | 459 |          |
| 179 | 44 | 557  | 575 | 593 | 466 | +1,25 kg |
| 180 | 44 | 651  | 617 | 606 | 521 |          |
| 181 | 44 | 675  | 670 | 584 | 562 |          |
| 182 | 44 | 671  | 679 | 567 | 498 |          |
| 183 | 45 | 668  | 676 | 559 | 490 |          |
| 184 | 45 | 641  | 660 | 530 | 483 |          |
| 185 | 45 | 501  | 560 | 501 | 470 | +1 kg    |
| 186 | 45 | 550  | 598 | 468 | 403 |          |
| 187 | 45 | 607  | 610 | 511 | 460 |          |
| 188 | 45 | 591  | 609 | 528 | 458 |          |
| 189 | 45 | 559  | 559 | 554 | 523 |          |
| 190 | 45 | 551  | 568 | 641 | 586 | +1 kg    |
| 191 | 45 | 566  | 580 | 551 | 491 |          |
| 192 | 45 | 568  | 573 | 504 | 476 |          |
| 193 | 44 | 552  | 558 | 481 | 416 |          |
| 194 | 43 | 502  | 510 | 436 | 380 |          |
| 195 | 43 | 482  | 485 | 429 | 372 |          |
| 196 | 43 | 473  | 472 | 419 | 368 |          |
| 197 | 43 | 458  | 463 | 414 | 365 |          |
| 198 | 43 | 443  | 446 | 404 | 358 |          |
| 199 | 43 | 423  | 430 | 388 | 347 |          |
| 200 | 43 | 405  | 411 | 373 | 330 |          |
| 201 | 43 | 390  | 401 | 368 | 328 |          |

|            |    |     |     |     |     |  |
|------------|----|-----|-----|-----|-----|--|
| <b>202</b> | 43 | 389 | 392 | 359 | 322 |  |
| <b>203</b> | 43 | 350 | 355 | 349 | 315 |  |

- Tabel data pembakaran tempurung kelapa 29 Mei 2011 dengan putaran blower 3000 rpm dan menggunakan pasir dengan *mesh* 40-50

| menit | T1 | T2  | T3  | T4  | T5  | bahan bakar |
|-------|----|-----|-----|-----|-----|-------------|
| 0     | 29 | 30  | 31  | 30  | 32  |             |
| 1     | 30 | 108 | 811 | 221 | 194 |             |
| 2     | 31 | 136 | 823 | 242 | 201 |             |
| 3     | 32 | 147 | 829 | 252 | 204 |             |
| 4     | 32 | 148 | 827 | 265 | 212 |             |
| 5     | 32 | 155 | 824 | 267 | 216 |             |
| 6     | 33 | 158 | 821 | 268 | 215 |             |
| 7     | 33 | 160 | 831 | 260 | 219 |             |
| 8     | 33 | 161 | 830 | 264 | 221 |             |
| 9     | 34 | 165 | 828 | 276 | 223 |             |
| 10    | 34 | 162 | 830 | 270 | 222 |             |
| 11    | 34 | 165 | 827 | 267 | 224 |             |
| 12    | 34 | 164 | 836 | 276 | 224 |             |
| 13    | 34 | 164 | 833 | 272 | 222 |             |
| 14    | 34 | 165 | 832 | 277 | 222 |             |
| 15    | 35 | 165 | 831 | 273 | 226 |             |
| 16    | 35 | 168 | 832 | 275 | 224 |             |
| 17    | 35 | 167 | 834 | 278 | 226 |             |
| 18    | 35 | 166 | 827 | 272 | 223 |             |
| 19    | 35 | 168 | 827 | 263 | 222 |             |
| 20    | 35 | 173 | 827 | 270 | 220 |             |
| 21    | 35 | 175 | 827 | 273 | 223 |             |
| 22    | 35 | 176 | 826 | 270 | 225 |             |
| 23    | 35 | 176 | 830 | 267 | 224 |             |
| 24    | 36 | 178 | 831 | 272 | 227 |             |
| 25    | 36 | 177 | 825 | 273 | 227 |             |
| 26    | 36 | 178 | 826 | 273 | 231 |             |
| 27    | 36 | 177 | 828 | 272 | 228 |             |
| 28    | 36 | 178 | 821 | 275 | 227 |             |
| 29    | 36 | 180 | 829 | 271 | 229 |             |
| 30    | 36 | 178 | 834 | 271 | 230 |             |

|    |    |     |     |     |     |           |
|----|----|-----|-----|-----|-----|-----------|
| 31 | 36 | 169 | 830 | 291 | 238 | + 0,25 kg |
| 32 | 36 | 163 | 837 | 295 | 238 |           |
| 33 | 37 | 158 | 868 | 292 | 242 |           |
| 34 | 37 | 149 | 858 | 290 | 243 |           |
| 35 | 36 | 160 | 848 | 298 | 253 |           |
| 36 | 36 | 191 | 780 | 280 | 242 |           |
| 37 | 37 | 199 | 789 | 282 | 234 |           |
| 38 | 37 | 202 | 791 | 282 | 236 |           |
| 39 | 37 | 205 | 798 | 287 | 238 |           |
| 40 | 37 | 207 | 803 | 290 | 244 |           |
| 41 | 37 | 200 | 802 | 290 | 245 | +0,25 kg  |
| 42 | 37 | 193 | 712 | 297 | 252 |           |
| 43 | 37 | 185 | 747 | 293 | 259 |           |
| 44 | 37 | 210 | 751 | 257 | 233 |           |
| 45 | 37 | 244 | 741 | 241 | 223 |           |
| 46 | 37 | 259 | 749 | 239 | 224 |           |
| 47 | 37 | 240 | 675 | 219 | 223 | +0,5 kg   |
| 48 | 37 | 241 | 818 | 285 | 264 |           |
| 49 | 37 | 240 | 793 | 292 | 263 |           |
| 50 | 37 | 248 | 776 | 238 | 232 |           |
| 51 | 37 | 260 | 730 | 227 | 222 |           |
| 52 | 37 | 283 | 760 | 233 | 224 |           |
| 53 | 37 | 298 | 761 | 229 | 231 |           |
| 54 | 37 | 291 | 806 | 255 | 251 |           |
| 55 | 37 | 291 | 747 | 248 | 242 |           |
| 56 | 37 | 295 | 862 | 315 | 287 |           |
| 57 | 37 | 266 | 845 | 338 | 282 | +0,75 kg  |
| 58 | 37 | 249 | 622 | 271 | 244 |           |
| 59 | 37 | 253 | 722 | 245 | 239 |           |
| 60 | 37 | 255 | 819 | 267 | 254 |           |
| 61 | 38 | 273 | 856 | 288 | 270 |           |
| 62 | 38 | 252 | 848 | 326 | 273 |           |
| 63 | 38 | 241 | 872 | 329 | 282 |           |
| 64 | 38 | 222 | 798 | 315 | 269 |           |
| 65 | 38 | 217 | 782 | 304 | 272 | +0,75 kg  |
| 66 | 38 | 241 | 789 | 271 | 260 |           |
| 67 | 38 | 277 | 812 | 282 | 281 |           |
| 68 | 38 | 297 | 765 | 260 | 259 |           |
| 69 | 38 | 308 | 805 | 267 | 268 |           |
| 70 | 38 | 302 | 870 | 263 | 259 |           |
| 71 | 38 | 282 | 838 | 290 | 287 |           |



|     |    |     |     |     |     |            |
|-----|----|-----|-----|-----|-----|------------|
| 72  | 38 | 478 | 920 | 358 | 380 |            |
| 73  | 38 | 660 | 822 | 635 | 560 | BURNER OFF |
| 74  | 38 | 372 | 924 | 449 | 378 |            |
| 75  | 38 | 271 | 900 | 424 | 351 | +1 kg      |
| 76  | 38 | 240 | 732 | 554 | 406 |            |
| 77  | 38 | 228 | 916 | 404 | 415 |            |
| 78  | 38 | 233 | 870 | 438 | 370 |            |
| 79  | 38 | 225 | 858 | 395 | 335 |            |
| 80  | 38 | 210 | 860 | 403 | 342 | +1 kg      |
| 81  | 38 | 160 | 916 | 451 | 400 |            |
| 82  | 38 | 255 | 922 | 470 | 433 |            |
| 83  | 38 | 575 | 906 | 509 | 574 |            |
| 84  | 38 | 352 | 883 | 434 | 428 |            |
| 85  | 38 | 271 | 549 | 327 | 285 |            |
| 86  | 38 | 224 | 389 | 262 | 236 | +0,25 kg   |
| 87  | 38 | 183 | 362 | 243 | 225 |            |
| 88  | 37 | 152 | 235 | 215 | 201 |            |
| 89  | 37 | 162 | 189 | 285 | 174 | +0,25 kg   |
| 90  | 38 | 340 | 253 | 343 | 246 |            |
| 91  | 38 | 456 | 482 | 619 | 480 | +0,25 kg   |
| 92  | 39 | 488 | 590 | 413 | 381 |            |
| 93  | 39 | 364 | 484 | 340 | 318 | +0,5 kg    |
| 94  | 39 | 398 | 474 | 482 | 440 |            |
| 95  | 39 | 309 | 354 | 324 | 290 | +0,5 kg    |
| 96  | 39 | 262 | 300 | 264 | 234 |            |
| 97  | 39 | 206 | 216 | 230 | 207 |            |
| 98  | 39 | 182 | 175 | 209 | 192 | +0,75 kg   |
| 99  | 39 | 156 | 174 | 191 | 178 |            |
| 100 | 38 | 135 | 183 | 178 | 170 |            |
| 101 | 38 | 156 | 203 | 178 | 172 |            |
| 102 | 38 | 137 | 198 | 172 | 187 |            |
| 103 | 38 | 185 | 187 | 155 | 193 | +0,75 kg   |
| 104 | 38 | 180 | 152 | 127 | 173 |            |
| 105 | 38 | 119 | 153 | 128 | 160 |            |
| 106 | 38 | 118 | 200 | 122 | 162 |            |
| 107 | 38 | 131 | 178 | 280 | 275 | +1 kg      |
| 108 | 38 | 150 | 203 | 416 | 437 |            |
| 109 | 38 | 321 | 262 | 847 | 814 | +1 kg      |
| 110 | 39 | 637 | 381 | 830 | 632 |            |
| 111 | 39 | 673 | 613 | 712 | 640 |            |
| 112 | 39 | 476 | 546 | 474 | 480 | +1,25 kg   |

|     |    |     |     |     |     |          |
|-----|----|-----|-----|-----|-----|----------|
| 113 | 39 | 318 | 300 | 334 | 317 |          |
| 114 | 39 | 257 | 320 | 280 | 273 |          |
| 115 | 39 | 270 | 255 | 237 | 229 |          |
| 116 | 39 | 434 | 383 | 605 | 409 |          |
| 117 | 39 | 490 | 489 | 512 | 500 |          |
| 118 | 40 | 407 | 416 | 422 | 440 | +1,25 kg |
| 119 | 40 | 362 | 373 | 337 | 304 |          |
| 120 | 40 | 332 | 338 | 303 | 275 |          |
| 121 | 40 | 292 | 296 | 276 | 253 |          |
| 122 | 41 | 254 | 270 | 262 | 239 |          |
| 123 | 41 | 215 | 241 | 234 | 219 | +1,25 kg |
| 124 | 41 | 194 | 233 | 251 | 281 |          |
| 125 | 41 | 337 | 301 | 403 | 470 | +1,5 kg  |
| 126 | 41 | 495 | 383 | 751 | 684 |          |
| 127 | 41 | 534 | 486 | 527 | 512 |          |
| 128 | 43 | 342 | 346 | 348 | 330 | +1,5 kg  |
| 129 | 43 | 671 | 624 | 674 | 523 |          |
| 130 | 44 | 495 | 483 | 753 | 684 |          |
| 131 | 44 | 476 | 492 | 655 | 692 | +1,75 kg |
| 132 | 45 | 604 | 627 | 734 | 612 |          |
| 133 | 46 | 774 | 789 | 678 | 547 |          |
| 134 | 49 | 906 | 910 | 702 | 540 |          |
| 135 | 49 | 935 | 960 | 752 | 603 |          |
| 136 | 49 | 995 | 976 | 971 | 702 | +1,75 kg |
| 137 | 49 | 827 | 831 | 797 | 628 |          |
| 138 | 48 | 733 | 891 | 663 | 561 |          |
| 139 | 47 | 672 | 772 | 583 | 494 |          |
| 140 | 48 | 716 | 854 | 597 | 489 |          |
| 141 | 48 | 875 | 654 | 542 | 451 |          |
| 142 | 48 | 800 | 616 | 568 | 470 |          |
| 143 | 47 | 785 | 599 | 500 | 422 |          |
| 144 | 46 | 699 | 560 | 481 | 409 |          |
| 145 | 46 | 634 | 537 | 464 | 390 |          |
| 146 | 46 | 561 | 510 | 446 | 376 |          |
| 147 | 46 | 583 | 556 | 487 | 476 |          |
| 148 | 46 | 596 | 575 | 475 | 403 |          |
| 149 | 45 | 567 | 555 | 473 | 406 |          |
| 150 | 44 | 547 | 528 | 457 | 404 |          |
| 151 | 43 | 497 | 488 | 427 | 379 | +2 kg    |
| 152 | 43 | 472 | 431 | 370 | 337 |          |
| 153 | 42 | 274 | 344 | 295 | 281 |          |

|     |    |     |     |     |     |  |
|-----|----|-----|-----|-----|-----|--|
| 154 | 42 | 197 | 310 | 275 | 268 |  |
| 155 | 43 | 380 | 657 | 492 | 465 |  |
| 156 | 43 | 838 | 762 | 663 | 574 |  |
| 157 | 43 | 704 | 623 | 552 | 461 |  |
| 158 | 43 | 703 | 560 | 558 | 443 |  |
| 159 | 43 | 648 | 530 | 480 | 393 |  |
| 160 | 43 | 642 | 500 | 440 | 365 |  |
| 161 | 43 | 580 | 515 | 390 | 392 |  |
| 162 | 43 | 564 | 455 | 400 | 352 |  |
| 163 | 43 | 461 | 437 | 378 | 335 |  |
| 164 | 43 | 411 | 413 | 358 | 321 |  |
| 165 | 43 | 338 | 383 | 335 | 302 |  |
| 166 | 43 | 350 | 371 | 325 | 294 |  |
| 167 | 43 | 333 | 354 | 314 | 289 |  |
| 168 | 42 | 286 | 322 | 294 | 268 |  |
| 169 | 42 | 268 | 265 | 251 | 240 |  |
| 170 | 42 | 248 | 243 | 233 | 221 |  |

- Tabel data pembakaran campuran ranting dan tempurung kelapa dengan putaran blower 3400 rpm dan menggunakan pasir dengan *mesh* 40-50

| menit | T1 | T2  | T3  | T4  | T5  | bahan bakar | berat |
|-------|----|-----|-----|-----|-----|-------------|-------|
| 0     | 30 | 27  | 27  | 26  | 27  |             |       |
| 1     | 31 | 76  | 422 | 176 | 160 |             |       |
| 2     | 31 | 105 | 473 | 178 | 179 |             |       |
| 3     | 32 | 109 | 486 | 178 | 177 |             |       |
| 4     | 32 | 135 | 561 | 179 | 169 |             |       |
| 5     | 32 | 167 | 557 | 181 | 176 |             |       |
| 6     | 33 | 187 | 552 | 186 | 183 |             |       |
| 7     | 33 | 211 | 570 | 211 | 198 |             |       |
| 8     | 33 | 215 | 648 | 208 | 198 |             |       |
| 9     | 33 | 216 | 657 | 208 | 198 |             |       |
| 10    | 33 | 221 | 657 | 193 | 198 |             |       |
| 11    | 34 | 225 | 658 | 192 | 196 |             |       |
| 12    | 34 | 228 | 658 | 199 | 199 |             |       |
| 13    | 34 | 225 | 657 | 197 | 198 |             |       |
| 14    | 34 | 229 | 659 | 199 | 195 |             |       |
| 15    | 34 | 218 | 658 | 200 | 202 |             |       |

|    |    |     |     |     |     |             |         |
|----|----|-----|-----|-----|-----|-------------|---------|
| 16 | 34 | 207 | 658 | 202 | 200 |             |         |
| 17 | 34 | 198 | 661 | 201 | 202 |             |         |
| 18 | 34 | 189 | 665 | 207 | 203 |             |         |
| 19 | 34 | 176 | 664 | 202 | 204 |             |         |
| 20 | 34 | 158 | 664 | 203 | 198 |             |         |
| 21 | 34 | 162 | 666 | 194 | 209 |             |         |
| 22 | 34 | 156 | 660 | 189 | 260 |             |         |
| 23 | 34 | 154 | 654 | 185 | 209 |             |         |
| 24 | 34 | 174 | 654 | 184 | 196 |             |         |
| 25 | 35 | 184 | 655 | 178 | 197 |             |         |
| 26 | 35 | 188 | 653 | 184 | 195 |             |         |
| 27 | 35 | 184 | 652 | 182 | 195 |             |         |
| 28 | 35 | 184 | 654 | 185 | 197 |             |         |
| 29 | 35 | 190 | 655 | 185 | 190 |             |         |
| 30 | 35 | 192 | 653 | 188 | 196 |             |         |
| 31 | 35 | 165 | 710 | 197 | 212 | Kelapa 100% | 0,25 kg |
| 32 | 35 | 173 | 743 | 203 | 218 |             |         |
| 33 | 35 | 182 | 739 | 219 | 219 |             |         |
| 34 | 35 | 199 | 735 | 200 | 212 |             |         |
| 35 | 35 | 244 | 750 | 194 | 206 |             |         |
| 36 | 36 | 243 | 723 | 203 | 210 | Kelapa 100% | 0,25 kg |
| 37 | 36 | 190 | 754 | 238 | 234 |             |         |
| 38 | 35 | 199 | 753 | 234 | 237 |             |         |
| 39 | 35 | 226 | 738 | 225 | 222 |             |         |
| 40 | 36 | 260 | 730 | 221 | 216 | Kelapa 100% | 0,5 kg  |
| 41 | 35 | 151 | 738 | 222 | 234 |             |         |
| 42 | 35 | 114 | 733 | 214 | 228 |             |         |
| 43 | 35 | 129 | 749 | 255 | 230 |             |         |
| 44 | 35 | 139 | 753 | 267 | 252 |             |         |
| 45 | 36 | 125 | 746 | 303 | 260 | Kelapa 100% | 0,5 kg  |
| 46 | 36 | 200 | 738 | 237 | 232 |             |         |
| 47 | 35 | 321 | 748 | 239 | 240 |             |         |
| 48 | 35 | 400 | 754 | 241 | 243 |             |         |
| 49 | 36 | 501 | 761 | 390 | 318 |             |         |
| 50 | 36 | 503 | 797 | 394 | 368 |             |         |
| 51 | 36 | 558 | 778 | 340 | 332 |             |         |
| 52 | 36 | 417 | 760 | 330 | 312 | Kelapa 100% | 0,75 kg |
| 53 | 36 | 227 | 801 | 458 | 385 |             |         |
| 54 | 37 | 380 | 833 | 404 | 383 |             |         |
| 55 | 37 | 364 | 784 | 535 | 319 |             |         |
| 56 | 37 | 341 | 759 | 312 | 291 | Kelapa 100% | 0,75 kg |

|    |    |     |     |     |     |                    |         |
|----|----|-----|-----|-----|-----|--------------------|---------|
| 57 | 37 | 278 | 855 | 415 | 413 |                    |         |
| 58 | 37 | 465 | 835 | 415 | 400 |                    |         |
| 59 | 37 | 361 | 778 | 353 | 331 | Kelapa 100%        | 1 kg    |
| 60 | 37 | 194 | 792 | 414 | 345 |                    |         |
| 61 | 37 | 304 | 880 | 514 | 463 |                    |         |
| 62 | 37 | 453 | 845 | 487 | 461 |                    |         |
| 63 | 37 | 341 | 764 | 377 | 340 | BK 80% R 20%       | 0,25 kg |
| 64 | 37 | 300 | 497 | 285 | 251 | SELF<br>COMBUSTION |         |
| 65 | 37 | 275 | 391 | 266 | 293 |                    |         |
| 66 | 37 | 189 | 308 | 207 | 187 | K 80% R 20%        | 0,25 kg |
| 67 | 37 | 166 | 283 | 203 | 204 |                    |         |
| 68 | 37 | 168 | 272 | 188 | 197 |                    |         |
| 69 | 37 | 138 | 252 | 166 | 189 | K 80% R 20%        | 0,5 kg  |
| 70 | 37 | 125 | 247 | 129 | 175 |                    |         |
| 71 | 37 | 114 | 231 | 128 | 158 | K 80% R 20%        | 0,5 kg  |
| 72 | 36 | 502 | 237 | 138 | 147 |                    |         |
| 73 | 36 | 140 | 400 | 517 | 438 | K 80% R 20%        | 0,75 kg |
| 74 | 37 | 421 | 566 | 808 | 586 |                    |         |
| 75 | 37 | 680 | 661 | 642 | 554 |                    |         |
| 76 | 36 | 358 | 507 | 343 | 316 | K 80% R 20%        | 0,75 kg |
| 77 | 36 | 210 | 359 | 244 | 252 |                    |         |
| 78 | 36 | 176 | 298 | 220 | 265 | K 50% R 50%        | 0,5 kg  |
| 79 | 36 | 182 | 312 | 244 | 275 |                    |         |
| 80 | 36 | 318 | 562 | 363 | 335 |                    |         |
| 81 | 36 | 487 | 508 | 619 | 438 | K 50% R 50%        | 0,5 kg  |
| 82 | 36 | 628 | 614 | 560 | 626 |                    |         |
| 83 | 36 | 424 | 533 | 446 | 484 |                    |         |
| 84 | 36 | 391 | 456 | 365 | 396 | K 50% R 50%        | 0,75 kg |
| 85 | 36 | 351 | 450 | 316 | 391 |                    |         |
| 86 | 36 | 260 | 460 | 257 | 255 |                    |         |
| 87 | 36 | 218 | 292 | 245 | 251 | K 50% R 50%        | 0,75 kg |
| 88 | 36 | 176 | 261 | 213 | 235 |                    |         |
| 89 | 35 | 152 | 242 | 181 | 215 | K 50% R 50%        | 1 kg    |
| 90 | 35 | 179 | 201 | 874 | 452 |                    |         |
| 91 | 36 | 418 | 429 | 755 | 705 |                    |         |
| 92 | 36 | 390 | 544 | 305 | 392 |                    |         |
| 93 | 36 | 339 | 366 | 306 | 231 | K 50% R 50%        | 2 kg    |
| 94 | 36 | 308 | 313 | 370 | 490 |                    |         |
| 95 | 37 | 587 | 468 | 513 | 622 |                    |         |
| 96 | 37 | 430 | 452 | 490 | 441 | K 20 % R 80%       | 1 kg    |
| 97 | 38 | 483 | 460 | 531 | 471 |                    |         |

|     |    |     |     |     |     |               |         |
|-----|----|-----|-----|-----|-----|---------------|---------|
| 98  | 38 | 493 | 498 | 549 | 521 |               |         |
| 99  | 42 | 545 | 566 | 617 | 589 | K 20 % R 80%  | 1 kg    |
| 100 | 42 | 715 | 730 | 607 | 517 |               |         |
| 101 | 43 | 791 | 795 | 637 | 595 |               |         |
| 102 | 43 | 797 | 794 | 613 | 520 |               |         |
| 103 | 44 | 758 | 765 | 620 | 533 |               |         |
| 104 | 44 | 754 | 751 | 590 | 505 |               |         |
| 105 | 44 | 727 | 721 | 568 | 475 |               |         |
| 106 | 44 | 370 | 672 | 623 | 591 |               |         |
| 107 | 43 | 634 | 692 | 653 | 602 | Ranting 100 % | 1 kg    |
| 108 | 43 | 620 | 623 | 526 | 467 |               |         |
| 109 | 43 | 557 | 557 | 552 | 492 |               |         |
| 110 | 43 | 516 | 529 | 668 | 637 | Ranting 100 % | 1 kg    |
| 111 | 42 | 548 | 559 | 495 | 438 |               |         |
| 112 | 42 | 507 | 512 | 444 | 384 |               |         |
| 113 | 42 | 475 | 477 | 480 | 490 | Ranting 100 % | 1 kg    |
| 114 | 42 | 409 | 438 | 564 | 490 |               |         |
| 115 | 41 | 416 | 428 | 419 | 376 |               |         |
| 116 | 41 | 363 | 363 | 352 | 317 | Ranting 100 % | 1,25 kg |
| 117 | 41 | 282 | 389 | 334 | 318 |               |         |
| 118 | 41 | 186 | 253 | 265 | 371 | Ranting 100 % | 1,25 kg |
| 119 | 41 | 133 | 219 | 266 | 328 |               |         |
| 120 | 41 | 175 | 247 | 270 | 304 |               |         |
| 121 | 41 | 155 | 236 | 280 | 383 | Ranting 100 % | 1,5 kg  |
| 122 | 41 | 131 | 245 | 298 | 387 |               |         |
| 123 | 41 | 218 | 278 | 284 | 326 |               |         |
| 124 | 41 | 228 | 288 | 294 | 318 |               |         |
| 125 | 40 | 241 | 300 | 291 | 304 | Ranting 100 % | 1 kg    |
| 126 | 41 | 280 | 314 | 580 | 517 |               |         |
| 127 | 41 | 607 | 451 | 764 | 689 |               |         |
| 128 | 41 | 531 | 508 | 545 | 579 |               |         |
| 129 | 41 | 351 | 463 | 478 | 511 | Ranting 100 % | 2 kg    |
| 130 | 41 | 267 | 387 | 493 | 529 |               |         |
| 131 | 41 | 289 | 403 | 695 | 611 |               |         |
| 132 | 41 | 452 | 457 | 720 | 679 |               |         |
| 133 | 41 | 505 | 502 | 724 | 715 |               |         |
| 134 | 41 | 517 | 572 | 748 | 735 |               |         |
| 135 | 42 | 502 | 553 | 665 | 681 | Ranting 100 % | 2 kg    |
| 136 | 43 | 548 | 576 | 475 | 542 |               |         |
| 137 | 43 | 602 | 614 | 679 | 630 |               |         |
| 138 | 43 | 628 | 648 | 828 | 644 |               |         |

|     |    |     |     |     |     |  |  |
|-----|----|-----|-----|-----|-----|--|--|
| 139 | 43 | 661 | 677 | 803 | 653 |  |  |
| 140 | 43 | 683 | 709 | 671 | 599 |  |  |
| 141 | 43 | 707 | 811 | 690 | 603 |  |  |
| 142 | 44 | 570 | 666 | 660 | 519 |  |  |
| 143 | 44 | 648 | 657 | 619 | 543 |  |  |
| 144 | 44 | 647 | 637 | 620 | 552 |  |  |
| 145 | 44 | 624 | 631 | 616 | 527 |  |  |
| 146 | 44 | 622 | 623 | 591 | 468 |  |  |
| 147 | 44 | 593 | 590 | 516 | 450 |  |  |
| 148 | 45 | 576 | 578 | 568 | 499 |  |  |
| 149 | 44 | 545 | 550 | 481 | 418 |  |  |
| 150 | 44 | 498 | 511 | 453 | 405 |  |  |
| 151 | 44 | 475 | 490 | 437 | 388 |  |  |
| 152 | 44 | 444 | 465 | 420 | 378 |  |  |

