

**MODIFIKASI SISTEM FEEDING DAN PENGUJIAN  
ALIRAN DINGIN PADA *FLUIDIZED BED*  
*INCINERATOR*  
UNIVERSITAS INDONESIA**

**SKRIPSI**

Oleh

**Asep S.R.**

**04 03 02 0165**



**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
UNIVERSITAS INDONESIA  
GENAP 2007/2008**

**MODIFIKASI SISTEM FEEDING DAN PENGUJIAN  
ALIRAN DINGIN PADA *FLUIDIZED BED*  
*INCINERATOR*  
UNIVERSITAS INDONESIA**

**SKRIPSI**

Oleh

**Asep S.R.**

**04 03 02 0165**



**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MEMENUHI SEBAGIAN  
PERYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
UNIVERSITAS INDONESIA  
GENAP 2007/2008**

## PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

**MODIFIKASI SISTEM FEEDING DAN PENGUJIAN ALIRAN DINGIN  
PADA *FLUIDIZED BED INCINERATOR*  
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, 22 Juni 2008



**Asep S.R.**

NPM : 0403020165

# PENGESAHAN

Skripsi dengan Judul :

**MODIFIKASI SISTEM FEEDING DAN PENGUJIAN  
ALIRAN DINGIN PADA *FLUIDIZED BED INCINERATOR*  
UNIVERSITAS INDONESIA**

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Skripsi ini telah diujikan pada sidang ujian skripsi pada tanggal 9 juli 2008 dan dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai skripsi pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, 23 Juni 2008

Dosen Pembimbing



**Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M. Eng**

NIP : 131 803 988

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

**Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M.Eng**

selaku dosen pembimbing yang bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi, dan bimbingan serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik.



Asep S.R.  
NPM 04 03 02 0165  
Departemen Teknik Mesin

Nama Pembimbing  
I. Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M.Eng

**MODIFIKASI SISTEM FEEDING DAN PENGUJIAN ALIRAN DINGIN  
PADA FLUIDIZEDBED INCINERATOR  
UNIVERSITAS INDONESIA**

**Abstrak**

*Fluidized Bed Incinerator* (FBI) adalah sebuah tungku pembakar yang menggunakan media pengaduk seperti pasir kuarsa, silika, dan media lainnya sehingga akan terjadi mixing yang homogen antara gas/udara dengan butiran-butiran media tersebut. Sistem ini menggunakan konsep turbulensi benda padat yang terjadi pada proses pembakaran, dimana dalam proses tersebut timbul juga perpindahan panas dan massa yang tinggi dalam mekanisme pembakaran. Butiran-butiran media yang ada ini berfungsi sebagai penyimpan dan pendistribusi panas, sehingga pembakaran tersebut dapat berfungsi dengan semestinya.

FBI memiliki dua prinsip dasar, yaitu fluidisasi dan pembakaran. Kedua prinsip dasar tersebut bekerja bersamaan menjadi satu sistem. Bagian-bagian dari FBI yang berpengaruh terhadap fluidisasi adalah pasir, blower, distributor, serta ruang bakar. Sedangkan yang berpengaruh terhadap proses pembakaran adalah pasir, bahan bakar (sampah organik), serta burner. Kesemua bagian tersebut bekerja dalam satu sistem, dan saling berpengaruh satu sama lainnya.

FBI yang sudah ada saat ini masih memiliki beberapa kelemahan terutama pada sistem feeding yang menggunakan jenis *rotary valve* dan sistem pemanasan dengan gas burner. Kelemahan pada sistem feeding-nya antara lain *Feeder* kurang menyalurkan sampah dengan baik, sehingga sampah sudah terbakar ketika di saluran *feeder*, lalu sampah sering kali tersangkut pada *feeder*. Ketika dimasukkan, sampah-sampah dengan bentuk panjang seperti ranting sering kali tersangkut pada *rotary valve*-nya sehingga *rotary valve* tersebut tidak dapat diputar. Dan yang terakhir laju umpan masuk (*feeding rate*) tidak konstan. Pada feeder jenis *rotary valve*, sampah dimasukkan ke dalam reaktor secara manual sehingga *feeding rate* tidak konstan yang dapat menyebabkan temperatur reaktor tidak stabil. Untuk itu diperlukan perbaikan metode yang akan digunakan pada *feeder*.

Modifikasi yang dilakukan adalah dengan mengganti sistem feeding dengan jenis *screw feeding* dengan ditambah *inverter*. Kelebihan sistem ini diantaranya sistem *screw feeding* dengan menggunakan motor listrik ini dapat menghasilkan kecepatan *feed rate* yang konstan, sehingga temperatur pada ruang bakar tetap terjaga karena bahan bakar yang berupa sampah-sampah organik ini dapat dialirkan secara teratur.

**Kata Kunci : Modifikasi, *Fluidized Bed Incinerator*, *Screw feeding*, Fluidisasi**

Asep S.R.  
NPM 04 03 02 0165  
Departemen Teknik Mesin

Nama Pembimbing  
I. Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M.Eng

**FEEDING SYSTEM MODIFICATION AND COLD FLOW TEST ON  
FLUIDIZED BED INCINERATOR IN UNIVERSITY OF INDONESIA**

**Abstract**

Fluidized Bed Incinerator ( FBI) is a burner stove using churn media like silica sand, and the other media so that homogeneous mixing between gas with the media item will be happened. This system use turbulent concept of solid goods that happened at combustion process, where in course of the hot transfer and the high mass in combustion mechanism also arise. This existing media item function as heat deposit and distributor, so that the combustion can function as it is.

FBI own two elementary principle, which is fluidization and combustion. Both work at the same time become one system. Parts of from FBC having an effect on to fluidization are sand, blower, distributor, and also the furnace. While having an effect to combustion process are sand, fuel ( organic garbage), and also burner. All shares work in one system, and each other have an effect on one another .

FBI at UI still own some feebleness, especially at feeding system using rotary valve type and combustion with gas burner. Feebleness at feeding system , for example, Feeder was not good in channeling the garbage, and then garbage frequently hooking of at feeder. When garbage with long form like stick entered, it frequently hooking of at rotary valve, so that the rotary valve cannot be turned around. And feeding rate is not constant. In rotary valve feeder type, garbage entered into reactor by manual system, so that feeding rate is not constant which can cause unstable reactor temperature.

Modification that's taken is change the feeding system with screw feeding type with inverter. The advantage of this system are screw feeding system by using this electromotor can yield constant speed feed rate, so that temperature at the furnace remain constant because fuel which is in the form of this organic garbage can be conducted regularly.

**Key words : Modification, *Fluidized Bed Incinerator*, *Screw feeding*, Fluidization**

# DAFTAR ISI

JUDUL	i
PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
ABSTRAK	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR SIMBOL	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 PERMASALAHAN	5
1.3 TUJUAN	5
1.4 PEMBAHASAN MASALAH	6
1.5 METODOLOGI Pengerjaan	6
1.6 SISTEMATIKA PENULISAN	6
BAB II LANDASAN TEORI	8
2.1 INCINERATOR	8
2.2 FLUIDIZED BED INCINERATOR	10
2.2.1. Prinsip Kerja <i>Fluidized Bed Incinerator</i>	12
2.2.2. Bagian-Bagian <i>Fluidized Bed Incinerator</i>	14
2.2.2.1. Ruang bakar	14
2.2.2.2. Pasir	15
2.2.2.3. Burner	17
2.2.2.4. Distributor	17
2.2.2.5. Blower	19
2.2.2.6. Cyclone Separator	19
2.3. FLUIDISASI	20
2.3.1 Jenis-jenis Fluidisasi	21
2.3.2 Parameter-parameter Fluidisasi	22



2.4. SISTEM REAKSI PEMBAKARAN	27
2.5. KARAKTERISTIK SAMPAH	33
BAB III PERTIMBANGAN DESAIN MODIFIKASI FLUIDIZED BED INCINERATOR	37
3.1 SISTEM PEMANASAN	38
3.2 SISTEM FEEDING	40
3.2.1. Desain modifikasi sistem feeding	44
3.2.2. Mekanisme modifikasi sistem feeding	45
3.2.3. Desain sistem feeding	45
3.3 HASIL FABRIKASI	48
3.4 KAPASITAS FEEDING	49
BAB IV PERSIAPAN & PROSEDUR PENGUJIAN	52
4.1 PERSIAPAN	53
4.1.1 Klasifikasi pasir yang digunakan	53
4.1.2 Kecepatan Fluidisasi minimum	54
4.1.3 Blower	60
4.1.4 Distributor	60
4.2 PROSEDUR PENGUJIAN ALIRAN DINGIN ( <i>COLD FLOW</i> )	61
BAB V HASIL & DISKUSI	63
BAB VI KESIMPULAN & SARAN	71
6.1 KESIMPULAN	71
6.2 SARAN	72
DAFTAR PUSTAKA	74
LAMPIRAN	75

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1. <i>Fluidized Bed Incinerator</i>	4
Gambar 2.1. Grafik Perbandingan Konsentrasi PCDD dan PCDF	10
Gambar 2.2. Tahapan proses kerja <i>fluidized bed incinerator</i> .	13
(a) Tahapan pada kondisi awal;	
(b) Tahapan proses pemanasan;	
(c) Tahapan pada kondisi operasi.	
Gambar 2.3. Ruang Bakar Utama	15
Gambar 2.4. Nilai Perpindahan Kalor terhadap Diameter Partikel tiap Jenis Pasir	16
Gambar 2.5. Nilai Perpindahan Kalor terhadap Kecepatan Minimum Fluidisasi tiap Jenis Pasir	17
Gambar 2.6. Pengaruh Gelembung yang Dihasilkan dari Perbedaan Jenis Distributor	18
Gambar 2.7. Distributor yang Digunakan	19
Gambar 2.8. Kurva Hubungan Antara <i>Pressure Drop</i> dengan Kecepatan Superfisial [Geldart. 1991]	23
Gambar 2.9. Grafik Jenis-Jenis Partikel [Geldart. 1991] dari sampah yang dibakar [Walter R. Niessen. 1994]	26
Gambar 3.1. Alat <i>Fluidized Bed Incinerator</i>	37
Gambar 3.2. Fluidisasi pada Pasir	38
Gambar 3.3. Skematis <i>Burner</i>	39
Gambar 3.4. <i>Burner</i>	39
Gambar 3.5. Metode pemanasan pasir	40
Gambar 3.6. <i>Feeding Port</i>	41
Gambar 3.7. Skematis <i>Rotary hopper</i> pada Saluran <i>Feeder</i>	41
Gambar 3.8. Sampah yang terbakar sebelum masuk ke ruang bakar	42
Gambar 3.9. Sampah yang Terbakar pada <i>Feeder</i>	42
Gambar 3.10. Skematis <i>Screw Conveyor Feeder</i>	43
Gambar 3.11. Letak lubang feeding berada disamping lubang burner pada ruang bakar utama	46
Gambar 3.12. <i>Screw Conveyor</i>	46
Gambar 3.13. <i>Feeding Chute / Hopper</i>	47
Gambar 3.14. <i>Sliding Gate</i>	47
Gambar 3.15. <i>Sliding Gate detail</i>	48
Gambar 3.16. <i>Screw conveyor</i>	49
Gambar 3.17. <i>Screw Feeding</i> yang sudah terpasang	49
Gambar 3.18. Ilustrasi sampah di dalam feeding	50
Gambar 3.19. Tampak samping ilustrasi sampah didalam feeding	50
Gambar 4.1. Alat fluidized bed incinerator UI	52
Gambar 4.2. Pasir silika	54
Gambar 4.3. <i>Blower</i> yang Digunakan	60
Gambar 4.4. Distributor Jenis <i>Porous Plate</i>	61
Gambar 4.5. Termokopel yang digunakan pada <i>fluidized bed incinerator</i>	62
Gambar 5.1. <i>Control panel</i>	66
Gambar 5.2. Kurva hubungan antara kecepatan superfisial dan tinggi hamparan.	69

Gambar 5.3. Kurva pressure drop vs kecepatan superfisial pada <i>Fluidized Bed Incinerator</i>	72
Gambar 5.4. Kurva Hubungan Antara <i>Pressure Drop</i> dengan Kecepatan Superfisial [Geldart. 1991]	72
Gambar 6.1. Sampah organik yang digunakan	75
Gambar 6.2. Screw feeding	76



## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Tipe-Tipe Insinerator	10
Tabel 2.2. Nilai <i>Excess Air</i> Berdasarkan <i>Type of Furnace</i> serta Bahan Bakar yang Digunakan	32
Tabel 2.3. Tabel Komposisi Sampah DKI Jakarta [Dinas Kebersihan DKI Jakarta. 2002]	34
Tabel 2.4. Komposisi Sampah Universitas Indonesia [Bagian Rumah Tangga Rektorat Uneversitas Indonesia. 2003]	35
Tabel 2.5. <i>Ultimate Analysis</i> Sampah yang Dibakar [Walter R. Niessen. 1994]	36
Tabel 2.6. <i>Proximate Analysis</i> Sampah yang Dibakar [Walter R. Niessen. 1994]	36
Tabel 2.7. Nilai <i>Higher Heating Value</i> ( $\text{kcal/kg}$ )	36
Tabel 3.1. karakteristik material-material untuk tipe-tipe tertentu dari <i>Screw Design</i>	44
Tabel 4.1. <i>Specific heat</i> untuk berbagai substansi	53
Tabel 4.2. Standar ukuran ayakan amerika	54
Tabel 4.3. Hasil pengujian aliran dingin	64
Tabel 5.1. Hasil percobaan pada alat " <i>Fluidization and Fluid Bed Heat Transfer Unit H692</i>	70
Tabel 5.2. Hasil percobaan pada alat <i>Fluidized Bed Incinerator</i>	71

## DAFTAR SIMBOL

$A$	: Massa Udara Aktual,	$(kg)$
$A_o$	: Massa Udara Teoritis,	$(kg)$
$A_t$	: Luas Area Permukaan,	$(m^2)$
$c_d$	: Koefisien Drag,	
$c_p$	: Panas Jenis,	$(\frac{J}{kg.K})$
$D_g$	: Koefisien Difusi Udara,	$(\frac{m^2}{s})$
$D_{rb}$	: Diameter Ruang Bakar,	$(m)$
$d_b$	: Diameter Gelembung,	$(m)$
$d_{sv}$	: Diameter Partikel ketika Spesifik Volum,	$(m)$
$d_p$	: Diameter Partikel,	$(m)$
$g$	: Percepatan Gravitasi,	$(\frac{m}{s^2})$
$H$	: Ketinggian Pasir,	$(m)$
$k_s$	: Konduktivitas Termal,	$(\frac{W}{m^2.K})$
$\Delta p_d$	: <i>Pressure Drop</i> pada Distributor,	$(\frac{N}{m^2})$
$\Delta p_b$	: <i>Pressure Drop</i> pada Pasir,	$(\frac{N}{m^2})$
$Q$	: Debit Aliran,	$(\frac{m^3}{s})$
$R_e$	: Bilangan Reynolds,	
$T_{gb}$	: Temperatur Gas Buang,	$(K)$
$T_u$	: Temperatur Udara,	$(K)$
$t$	: <i>Residence Time</i> ,	$(s)$
$u$	: Kecepatan Aliran Superfisial,	$(\frac{m}{s})$
$u_{mf}$	: Kecepatan Aliran ketika Fluidisasi Minimum,	$(\frac{m}{s})$
$\rho_g$	: Densitas Udara,	$(\frac{kg}{m^3})$
$\rho_p$	: Densitas Partikel,	$(\frac{kg}{m^3})$
$\mu_g$	: Viskositas Gas,	$(\frac{N.s}{m^2})$
$\varepsilon$	: <i>Voidage</i>	

$\varepsilon_{mf}$  : Voidage ketika Fluidisasi Minimum

$\psi$  : Sphericity

n = rpm

$\rho$  = berat jenis sampah [Kg/m<sup>3</sup>]



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 LATAR BELAKANG

Setiap ada kehidupan, pasti akan ada sisa-sisa benda yang tidak terpakai lagi atau yang sering kita sebut dengan sampah atau limbah. Selembar kertas ataupun kantong sisa-sisa pemakaian benda-benda rumah tangga yang tidak terpakai, bagi sebagian orang mungkin tidak akan menjadi suatu permasalahan besar. Namun apabila sampah-sampah tersebut dikumpulkan menjadi satu dan menumpuk dengan sampah-sampah yang berasal dari sumber-sumber lain yang berbeda-beda, maka hal ini akan menjadi suatu persoalan sendiri. Dalam jangka waktu dekat mungkin semua sampah-sampah tersebut masih dapat ditangani, namun apabila semua sampah-sampah tersebut menumpuk dengan lahan-lahan yang terbatas dalam jangka waktu panjang maka akan timbul suatu permasalahan lain lagi.

Dalam Kamus Istilah Lingkungan, sampah didefinisikan sebagai bahan yang tidak berguna atau yang tidak memiliki suatu nilai untuk maksud tertentu, dalam pembuatan atau pemakaian barang rusak dan bercacat dalam pembuatan manufaktur.

Berdasarkan beberapa ahli, limbah padat (sampah) dapat dikategorikan menjadi 2 kelompok, yaitu limbah perkotaan (*MSW – Municipal Solid Waste*) dan limbah padat industri (*ISW – Industrial Solid Waste*). *MSW* dihasilkan dari kegiatan masyarakat sehari-hari, sedangkan *ISW* dihasilkan dari sisa-sisa kegiatan industri. Kemudian, sampah itu sendiri ada yang berasal dari bahan *organik* dan *anorganik*.

Tidak ada data yang akurat untuk menunjukkan jumlah sampah yang ada pada kurun waktu tertentu. Namun, berdasarkan hasil perhitungan Bappensa, pada

tahun 1995 diperkirakan penumpukan sampah sampai berjumlah 2,25 juta ton, dan jumlah ini akan terus meningkat sampai dua kali lipat, dan diperkirakan pada tahun 2020 jumlah penumpukan sampah yang ada di Indonesia akan mencapai 53,7 juta ton. Jumlah yang banyak ini dapat membuat kehidupan manusia terganggu karena banyaknya bibit penyakit yang dapat ditimbulkan dari sampah.

Dengan melihat data tersebut, maka kebutuhan akan Tempat Pembuangan Akhir (TPA) pun akan semakin meningkat. Pada tahun 1995, lahan untuk TPA mencapai 675 Ha. Kemudian untuk 2020, luas lahan untuk penggunaan TPA diperkirakan akan meningkat sampai mencapai angka 1610 Ha. Kondisi ini menjadi masalah yang besar, karena semakin menipisnya lahan kosong yang ada di daerah perkotaan. Sebagai contoh adalah kesulitan dari pemerintah daerah DKI Jakarta dalam mencari lahan untuk pengolahan sampah, ketika TPA Bantar Gebang tidak dapat digunakan lagi. Disini dapat dilihat bahwa kebutuhan akan lahan untuk pembuangan sampah semakin meningkat seiring dengan jumlah sampah yang meningkat pula. Sehingga perlu dipikirkan sebuah cara alternatif untuk pengolahan sampah yang tidak memerlukan lahan yang luas.

Ada 3 filosofi dasar dalam pengolahan limbah, yaitu 3R : *Reduce*, *Reuse*, dan *Recycle*. Pengertian dari ketiga filosofi ini adalah :

- a. *Reduce* : Mengurangi seminim mungkin limbah yang dihasilkan, misalnya dengan mengurangi material pembungkus barang, meningkatkan pemakaian atau membuat kembali alat-alat yang mampu mengurangi jumlah sampah.
- b. *Reuse* : Menggunakan barang yang dapat digunakan secara berulang-ulang dan mudah untuk diperbaiki. Barang-barang yang dimaksud harus memiliki suatu karakter, yaitu dapat digunakan untuk jangka waktu yang lama.
- c. *Recycle* : Menggunakan limbah yang ada sebagai suatu bahan material yang baru. Pemanfaatan sumber yang sudah ada ini, pada umumnya mengandung potensial energi yang cukup besar.

Tindak lanjut dari filosofi yang ketiga, sebelum limbah-limbah akan digunakan, maka sebelumnya harus dilakukan suatu sistem pengolahan terlebih dahulu, untuk mendapatkan suatu material yang diinginkan. Sistem pengolahan limbah/sampah ini terdiri dari 3 macam, yaitu :



- a. Daur ulang sampah anorganik
- b. Pengkomposan sampah
- c. Pembakaran sampah

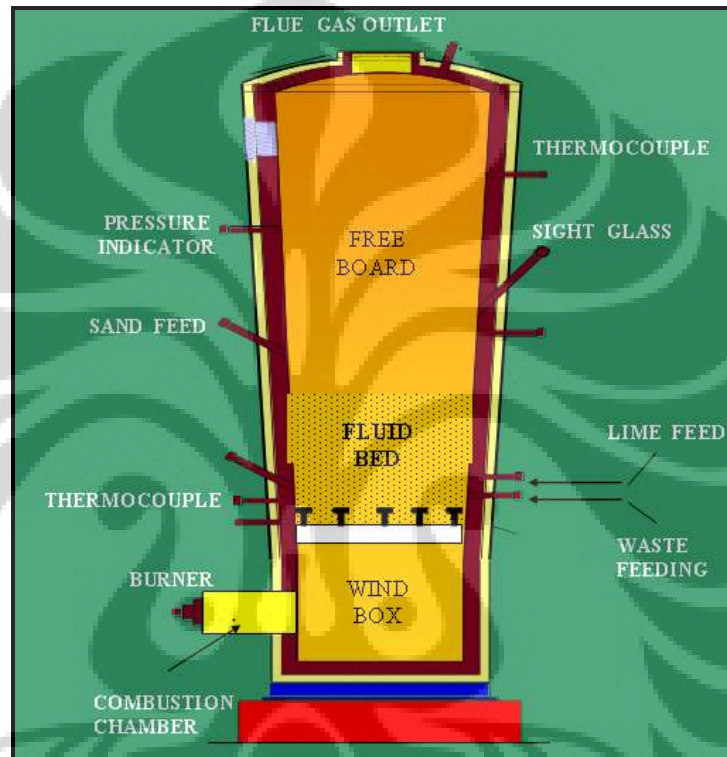
Salah satu cara untuk pengolahan sampah adalah dengan menggunakan pembakaran, dan alat yang digunakan biasa disebut sebagai *insinerator*. Pengolahan sampah dengan insinerator terutama bertujuan untuk mengurangi volume dari sampah itu sendiri sampai sekecil mungkin, kemudian juga untuk mengolah sampah supaya menjadi tidak berbahaya bagi lingkungan serta stabil secara kimiawi. Bahkan terdapat kemungkinan untuk memanfaatkan energi hasil pembakarannya dengan penambahan sebuah boiler.

Insinerator adalah sebuah alat yang menggunakan sistem *incineration*. Metode yang digunakan dalam sistem ini adalah mendisposisi sampah *solid* atau padat dengan membakar sebagian atau komponen bahan bakar. Bahan-bahan bakar yang digunakan adalah sampah padatan atau *solid*. Proses *incineration* ini dilakukan dengan membakar sampah pada temperatur yang tinggi (600 – 1000 °C), sehingga sampah padat tersebut menjadi abu. Salah satu jenis insinerator yang saat ini sedang dikembangkan di lingkungan Universitas Indonesia adalah Insinerator dengan tipe *Fluidized Bed*.

*Fluidized Bed Incinerator (FBI)* adalah sebuah tungku pembakar yang menggunakan media pengaduk berupa pasir seperti pasir kuarsa dan silika, sehingga akan terjadi *mixing* yang homogen antara udara dengan butiran-butiran media pasir tersebut. Sistem ini menggunakan konsep turbulensi benda padat yang terjadi pada proses pembakaran, dimana dalam proses tersebut timbul juga perpindahan panas dan massa dengan laju yang tinggi dalam mekanisme pembakaran. Butiran-butiran media pasir ini berfungsi sebagai penyimpan dan pendistribusi panas, sehingga pembakaran tersebut dapat berfungsi dengan semestinya.

Komponen-komponen yang ada pada *FBI* ini terdiri dari ruang bakar yang dilapisi bahan tahan panas, kemudian dialiri udara bertekanan dari bawah, yang bekerja melewati sejumlah volume pasir yang ada di atasnya. Lalu, limbah padat dengan ukuran tertentu mengisi bagian atasnya dan jatuh ke pasir yang bergolak karena hembusan udara.

Udara yang akan masuk ke dalam ruang bakar akan melalui ruang bakar. Udara tersebut akan melewati suatu plat udara pembagi (distributor). Ruang bakar bagian bawah, di bawah distributor, disebut ruang *plenum*, akan mengalirkan udara yang terbagi rata ke material pasir. Bagian atas dari ruang bakar biasa disebut juga sebagai *freeboard*, tempat terjadinya proses pelepasan atau terlemparnya partikel padat menuju ke saluran gas buang.



Gambar 1.1. *Fluidized Bed Incinerator*

Pada saat udara mengalir dari plenum ke pasir, gelembung udara akan timbul seperti halnya gelembung udara pada air yang mendidih. Aliran udara tersebut akan membangkitkan gejolak pasir yang mencampurkan limbah padat secara acak. Proses ini memberikan pengaruh proses pembakaran secara cepat yang dikarenakan laju perpindahan kalor dan massa yang tinggi, dan fenomena inilah yang memberikan karakter secara khusus di dalam sistem pembakaran dengan menggunakan sistem *Fluidized Bed*. Keterangan lebih lanjut dapat dilihat pada gambar 1.1.

Teknologi ini dapat menjadi salah satu teknologi pembakaran limbah partikel atau padatan dalam jumlah yang relatif besar secara cepat. Dan emisi pembakaran yang dihasilkan juga relatif kecil sehingga menekan polusi udara yang mungkin timbul akibat pembakaran yang kurang sempurna.

Teknologi *FBI* ini juga lebih baik bila dibandingkan dengan teknologi pembakaran biomassa yang konvensional, karena laju pembakaran yang cukup tinggi, dan juga dapat membakar limbah biomassa yang berkadar air tinggi.

Namun, ada beberapa kelemahan yang dimiliki, yaitu *pressure drop* yang cukup besar pada ruang bakar, serta investasi awal yang relatif mahal.

## **1.2 PERMASALAHAN**

Yang menjadi permasalahan adalah alat *Fluidized Bed Incinerator* yang ada di Universitas Indonesia saat ini masih memiliki banyak kelemahan-kelemahan pada sistem feeding dan sistem pemanasan dengan gas burner-nya.

Pada sistem feeding, permasalahan yang timbul antara lain adalah sampah sering kali tersangkut pada feeder lalu sampah terbakar terlebih dahulu pada feeder dan laju umpan masuk (*feeding rate*) yang tidak konstan

## **1.3 TUJUAN**

Memodifikasi *fluidized bed incinerator* UI yang sudah ada untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal dan lebih efisien dan melakukan pengujian aliran dingin untuk mempelajari karakteristik fluidisasi apakah dapat tercapai sesuai dengan yang diharapkan dan bagaimana hubungannya dan pengaruhnya dari komponen-komponen yang lainnya terhadap proses fluidisasi

## **1.4 PEMBATASAN MASALAH**

Pemodifikasian alat *fluidized bed incinerator* UI yang sudah ada mengenai sistem feeding serta proses fluidisasi yang terjadi. Namun, pembahasan yang ada tidak membahas lebih lanjut mengenai perpindahan kalor yang terjadi, serta penelitian emisi gas yang dihasilkan dari proses pembakaran.

## **1.5 METODOLOGI Pengerjaan**

Metode pengerjaan yang dilakukan adalah :

1. Studi Pustaka  
Melakukan penelitian berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya mengenai fluidized bed incinerator yang sudah ada di UI, dan juga berdasarkan literatur yang ada dan jurnal-jurnal penelitian mengenai sistem tersebut.
2. Perancangan Modifikasi  
Melakukan perancangan modifikasi alat fluidized bed incinerator.
3. Studi Lapangan  
Melakukan penelitian, pengamatan, dan pengujian pada alat fluidized bed incinerator.
4. Pendataan  
Mengambil data-data yang diperlukan untuk melakukan pengamatan terhadap alat tersebut.
5. Analisa  
Dari data-data yang telah ada, selanjutnya dilakukan analisa terhadap data-data tersebut.

## 1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penyusunan dari tugas akhir ini adalah :

### Bab I           Pendahuluan

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

### Bab II          Landasan Teori

Bab ini berisi dasar-dasar teori yang digunakan mengenai insinerator khususnya untuk tipe *Fluidized Bed*, fenomena Fluidisasi, Reaksi Pembakaran, dan karakteristik sampah yang digunakan sebagai bahan bakar.

Bab III      Pertimbangan Perancangan Modifikasi *Fluidized Bed Incinerator*

Bab ini berisi pertimbangan-pertimbangan yang dilakukan untuk perancangan modifikasi sistem feeding pada *Fluidized Bed Incinerator* yang sudah ada.

Bab IV      Persiapan dan Prosedur Pengujian

Bab ini membahas mengenai persiapan awal yang dilakukan sebelum melakukan pengujian, tinjauan-tinjauan ulang terhadap bagian-bagian yang mungkin masih bermasalah. Kemudian, prosedur pengujian yang dilakukan.

Bab V       Hasil & Diskusi

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

Bab VI      Kesimpulan & Saran

Bab ini membahas mengenai kesimpulan dari pengerjaan modifikasi sistem feeding *Fluidized Bed Incinerator* ini.

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 INSINERATOR**

Salah satu metode untuk pengolahan sampah adalah pembakaran, dengan menggunakan suatu alat yang disebut dengan insinerator. Insinerator adalah sebuah alat yang menggunakan sistem *incineration*. Metode yang digunakan dalam sistem ini adalah mendisposisi sampah *solid* atau padat dengan membakar sebagian atau komponen bahan bakar. Bahan-bahan bakar yang digunakan adalah sampah padatan atau *solid*. Proses *incineration* ini dilakukan dengan membakar sampah pada temperatur yang tinggi (600 – 1000 °C), sehingga sampah padat tersebut menjadi abu.

Proses insinerator dapat dibayangkan dengan membakar sampah secara konvensional. Perbedaannya adalah terletak pada sisa pembakaran yang tidak sempurna, serta bahan bakar (sampah) yang harus kering dan debu yang berpartikel besar, serta dibedakan juga dari polusi asap yang dihasilkan. Metode yang digunakan ini bekerja untuk mengurangi atau mereduksi volume dari sampah padat dan memisahkan kemungkinan dari polusi atau pencemaran air tanah. Selain itu, sisa sampah yang dihasilkan juga dapat digunakan sebagai bahan yang lebih berguna.

Secara umum, bagian konstruksi dari insinerator terdiri dari dua bagian. Bagian-bagian tersebut adalah :

1. Bagian luar (casing)

Merupakan bagian pelindung dari insinerator yang terbuat dari besi dengan tebal minimal 5 mm dan diperkuat dengan kerangka penguat.

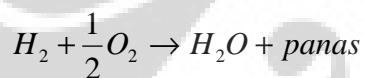
2. Bagian Dalam

Terdiri dari beberapa lapis bahan refraktori, bagian yang terkena kontak langsung dengan api dan limbah adalah bata api tahan asam dan temperatur tinggi (*SK 34 / SK 38*). Sedangkan lapisan dalamnya terdiri dari bahan isolasi panas yang berupa bata isolasi atau *ceramic fiber* yang tahan temperatur 1200°C. Sedangkan untuk bagian lorong api, pintu incinerator terbuat dari bahan *castable refraktori* dengan kualitas yang tahan sampai temperatur 1600°C.

Kemudian, kriteria-kriteria yang harus dimiliki oleh sebuah insinerator harus memenuhi beberapa syarat, yaitu :

- a. gas buang yang dihasilkan harus dalam kondisi yang bersih dan tidak berbau
- b. waktu tinggal gas buang ruang bakar minimal 1—2 detik
- c. abu yang dihasilkan dari proses insinerasi harus betul-betul stabil dan tidak berbahaya (steril).

Prinsip kerja pada insinerator ini cukup sederhana, dan terjadi pada temperatur pembakaran yang cukup tinggi. Proses ini bekerja pada suatu ruangan yang kemudian bereaksi dengan bahan bakar yang telah disiapkan. Bahan bakar ini adalah sampah padatan, yang mengalami proses dan reaksi kimia sebagai berikut :

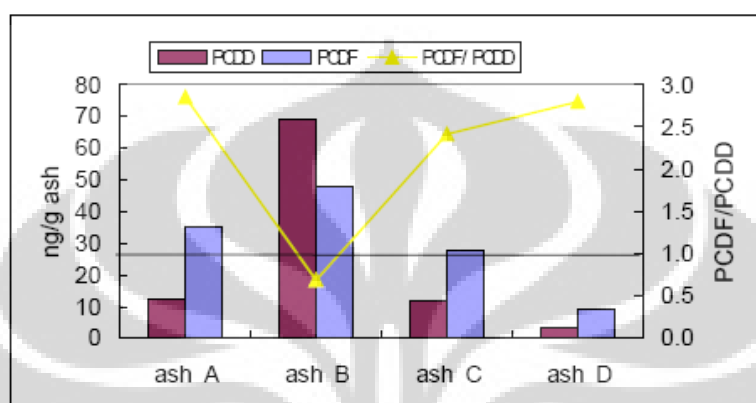


Ketiga senyawa dan panas yang dihasilkan tersebut disebut juga sebagai hasil pembakaran.

Insinerator itu sendiri pun memiliki variasi jenis yang bermacam-macam, dengan menggunakan metode yang bervariasi pula. Variasi ini pun menghasilkan efek dan emisi yang bervariasi pula. Perbandingan jenis-jenis insinerator dapat dilihat dari tabel yang ada di bawah ini.

Tabel 2.1. Tipe-Tipe Insinerator  
 [Jinsong Liu & Wilken Michael. 2004]

Incinerator	A	B	C	D
Scale(T/d)	3.6	350	350	300
Incinerator	Fixed-grate furnace	Step grate furnace	Slopping reciprocating grate furnace	Fluidized bed furnace
Burning materials	MSW	MSW	MSW	MSW +20% coal
Temperature of furnace	650-850 <sup>0</sup> C	800-1000 <sup>0</sup> C	800-1000 <sup>0</sup> C	800-900 <sup>0</sup> C
Time (s)	<1	>2	>2	>2
Air pollution control device	Wet scrubber	Half-dry lime scrubbing & active carbon&bag-house	Half-dry lime scrubbing & active carbon& bag-house	Half-dry lime scrubbing & bag-house



Gambar 2.1. Grafik Perbandingan Konsentrasi PCDD dan PCDF Untuk Setiap Abu yang Dihasilkan dari Tiap Insinerator

Tabel 2.1. menunjukkan jumlah konsentrasi PCDD dan PCDF pada abu yang dihasilkan dari setiap jenis insinerator. PCDD (*polychlorinated dibenzo-p-dioxin*) dan PCDF (*polychlorinated dibenzo-furan*) ini mengindikasikan kandungan dioxin yang dihasilkan, dan yang dicemarkan ke udara atmosfer, dimana efeknya dapat mengganggu kesehatan bagi kehidupan di sekitarnya. Dari situ dapat dilihat bahwa abu dari insinerator yang tipe D (FBC) memiliki konsentrasi yang lebih kecil dibandingkan tipe insinerator tipe lainnya. Sehingga insinerator yang dicoba untuk dikembangkan di Universitas Indonesia adalah tipe *fluidized bed*.

## 2.2 FLUIDIZED BED INCINERATOR (FBI)

*Fluidized Bed Incinerator (FBI)* adalah sebuah tungku pembakar yang menggunakan media pengaduk seperti pasir kuarsa, silika, dan media lainnya



sehingga akan terjadi *mixing* yang homogen antara gas/udara dengan butiran-butiran media tersebut. Sistem ini menggunakan konsep turbulensi benda padat yang terjadi pada proses pembakaran, dimana dalam proses tersebut timbul juga perpindahan panas dan massa yang tinggi dalam mekanisme pembakaran. Butiran-butiran media yang ada ini berfungsi sebagai penyimpan dan pendistribusi panas, sehingga pembakaran tersebut dapat berfungsi dengan semestinya.

Proses pembakaran dengan metode 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 lain-lain.

Konstruksi dasar dari teknologi *fluidized bed* terdiri atas ruang bakar silinder yang dilengkapi dengan plat untuk pendistribusian udara pada bagian bawahnya, dan sekaligus berfungsi juga sebagai penahan material-material yang ada di atasnya, yaitu pasir dan sampah padatan. Alat pendistribusi udara ini disebut juga sebagai *distributor*.

Sampah padat, yang sudah dipotong-potong menjadi kecil-kecil, dimasukkan ke dalam ruang bakar dalam jumlah yang tetap, dan diletakkan tepat di atas pasir-pasir tersebut. Udara untuk proses pembakaran di berikan dari *blower* yang melewati distributor. Bagian tenang yang letaknya ada di bawah ruang bakar disebut juga sebagai “ruang plenum”, sehingga aliran udara yang akan masuk ke dalam ruang bakar akan bergerak secara seragam menuju timbunan pasir yang ada di atasnya [Basu : 1994; Howard : 1994]. Kemudian ruang kosong yang ada di ruang bakar, dan tepat di atasnya timbunan pasir, disebut juga sebagai “*freeboard*”. Pada bagian inilah terjadi perubahan partikel padat menjadi gas. Gas-gas yang dihasilkan akan terbang ke udara setelah melewati alat kontrol polusi udara.

Insinerator FBI dapat beroperasi dalam dua jenis, yaitu *bubbling* dan *circulating*, bergantung pada kecepatan udara yang masuk ke dalam ruang bakar. Ketika kecepatan udara yang melewati pasir meningkat, pasir akan terfluidisasi dan karakteristiknya diasumsikan menjadi fluida. Selain daripada itu, penambahan kecepatan udara akan membuat pasir mendapatkan *excess air* yang lebih banyak untuk melewati fase *bubbling*. Fase *bubbling* ini akan mencampurkan partikel (sampah dan pasir) yang ada di dalam ruang bakar, dan membentuk kesetimbangan kalor antara gas dan partikel.

Proses *bubbling* pada insinerator FBI terjadi pada kecepatan udara yang relatif rendah ( $0.3-3 \text{ m/s}$ ), bergantung ukuran dari partikel pasir yang digunakan. Sampah padat dimasukkan ke dalam ruang bakar sampai dasarnya, baik itu di atas pasir, maupun di dalam tumpukan pasir. Udara yang mengalir akan membentuk gelembung (*bubble*) pada pasir, sehingga akan terbentuk ruang udara yang mudah terbakar (*combustible*). Pencampuran partikel antara udara dan sampah akan menghasilkan suatu pembakaran, dan ini menjadi suatu karakteristik dari *Fluidized Bed Combustor* (FBC). Proses pembakaran ini akan memisahkan partikel-partikel yang terbakar tadi pada *freeboard* di ruang bakar, sehingga tingginya *freeboard* menjadi pertimbangan yang cukup penting dalam mendesain ruang bakar pada insinerator FBC. Apabila ada partikel-partikel, baik itu pasir maupun sampah, yang masih berupa padatan, akan jatuh kembali ke dalam timbunan pasir yang ada di dasar ruang bakar. Ini mengindikasikan bahwa pembakaran belum sepenuhnya selesai, dan akan terus berlanjut dalam *freeboard*. Kemudian, partikel-partikel sampah yang kecil akan keluar bersama gas yang dihasilkan dari proses pembakaran. Skematis dari sisten kerja ini dapat dilihat pada gambar 2.2.

Insinerator FBI bekerja pada temperatur pembakaran  $800-1000 \text{ }^\circ\text{C}$ . Salah satu keuntungan yang didapat dalam proses pembakaran dengan sistem ini adalah tidak adanya kandungan panas  $\text{NO}_x$  yang terbentuk.  $\text{NO}_x$ , yang terbentuk dari oksidasi komponen nitrogen yang dikandung oleh beberapa bahan bakar, tetap dijaga dalam tingkat yang rendah.  $\text{NO}_x$  akan terlepas dari bahan bakar pada temeperatur yang semakin tinggi, serta pada kondisi ketika oksigen yang berlebih.

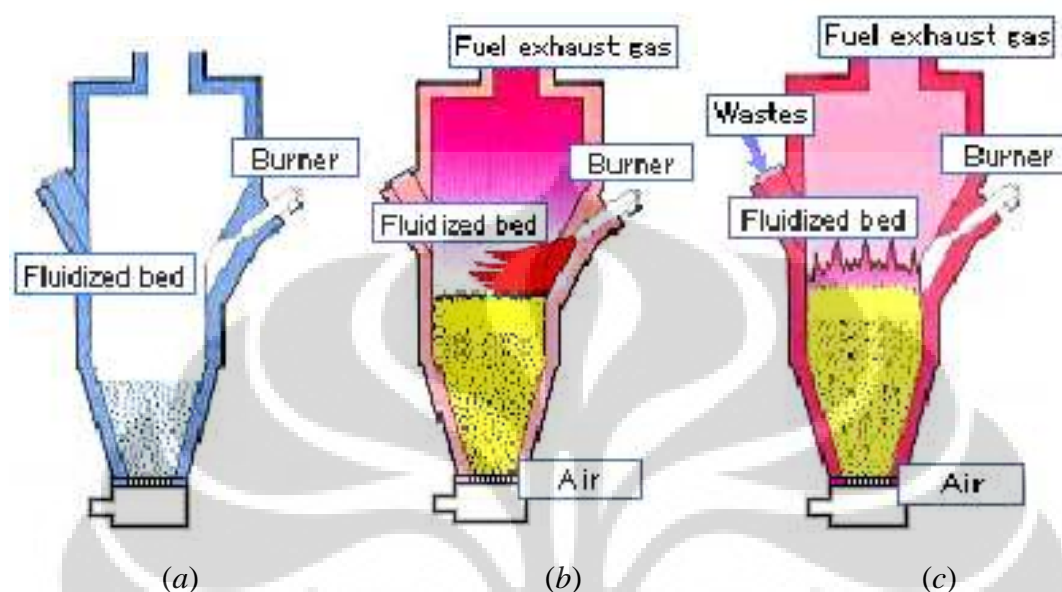
### 2.2.1 Prinsip Kerja *Fluidized Bed Incinerator*

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.

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



Gambar 2.2. Tahapan proses kerja *fluidized bed incinerator*. (a) Tahapan pada kondisi awal; (b) Tahapan proses pemanasan; (c) Tahapan pada kondisi operasi.

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

- Kondisi awal  
 Pada kondisi awal, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.2a, ruang bakar masih pada temperatur ruang. Pasir sebagai media pengaduk sekaligus pertukaran kalor dituang ke dalam ruang bakar.
- Proses pemanasan  
 Pada tahapan proses pemanasan, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.2b, pasir tersebut mulai dipanaskan. Udara bertekanan mulai dialirkan dari blower ke dalam ruang bakar dari bagian bawah insinerator untuk menfluidisasi pasir. Pada kondisi ini sudah terjadi fluidisasi pada kecepatan fluidisasi minimum. Proses

pemanasan dilakukan dengan bahan bakar bantu dari burner. Burner memanaskan pasir sampai temperatur operasi (750 – 925 °C). Untuk mempercepat pemanasan dapat ditambahkan bahan bakar ke dalam reaktor berupa kayu bakar atau pun batu bara.

- **Kondisi operasi**

Pada kondisi operasi, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.2c, 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.

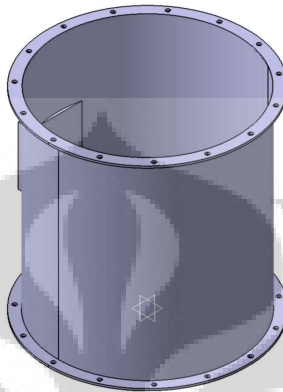
### **2.2.2. Bagian-Bagian *Fluidized Bed Incinerator***

*Fluidized bed incinerator* memiliki banyak bagian-bagian penting yang harus diperhatikan dalam pengoperasiannya. Bagian-bagian penting tersebut di antaranya terdiri dari ruang bakar sebagai tempat terjadinya fluidisasi pasir dan proses pembakaran, pasir sebagai media pentransfer, distributor sebagai penyebar aliran udara dari blower secara seragam pada keseluruhan penampang, blower sebagai penyuplai udara untuk fluidisasi, burner sebagai alat pemanas awal, dan *cyclone separator* sebagai alat pemisah partikel padat dan abu dengan gas.

#### **2.2.2.1. Ruang Bakar**

Ruang bakar ini merupakan ruang tempat meletakkan pasir dan sampah, sehingga proses pembakaran terjadi di sini. Kecepatan fluidisasi yang tinggi membuat ruang bakar menjadi lebih padat, karena akan banyak yang terkikis, serta membutuhkan ruang bakar yang lebih tinggi untuk dapat memenuhi kebutuhan panas yang dipindahkan ke dalam dinding ruang bakar. Sehingga, semakin tinggi ruang bakar, maka semakin besar pula *blower* yang diperlukan. Ketinggian suatu ruang bakar harus memberikan cukup waktu bagi bahan bakar untuk bereaksi ketika terjadi proses pembakaran. Ruang bakar dalam FBI juga harus menjaga temperatur pasir yang dapat mencapai 800 – 1000 °C .

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 panas yang terjadi. Volume yang besar dari ruang bakar ini membantu dalam proses pirolisa terhadap bahan bakar padat, dan juga dapat membantu peningkatan stabilitas termal di dalam ruang bakar.



Gambar 2.3. Ruang Bakar Utama

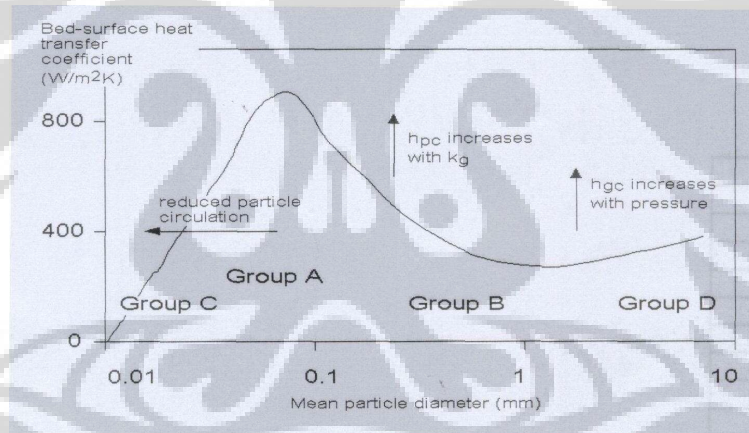
#### 2.2.2.2. Pasir

Fungsi partikel dalam FBC 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 alumina, dengan ukuran partikel yang kecil,  $\frac{1}{4}$  sampai dengan  $\frac{1}{2}$  mm diameter. Pasir ini digunakan sebagai media pentransfer panas terhadap bahan bakar yang akan dibakar. Salah satu persyaratan yang harus dimiliki oleh pasir adalah nilai konduktivitas termal yang cukup tinggi. Pasir yang digunakan sebagai media harus mempunyai persyaratan teknik diantaranya besar butir partikel relatif sama, tahan terhadap panas sampai temperatur  $1.800\text{ }^{\circ}\text{C}$  serta tidak mudah pecah akibat gesekan dan tumbukan di dalam proses fluidisasi dan dapat menyerap panas.

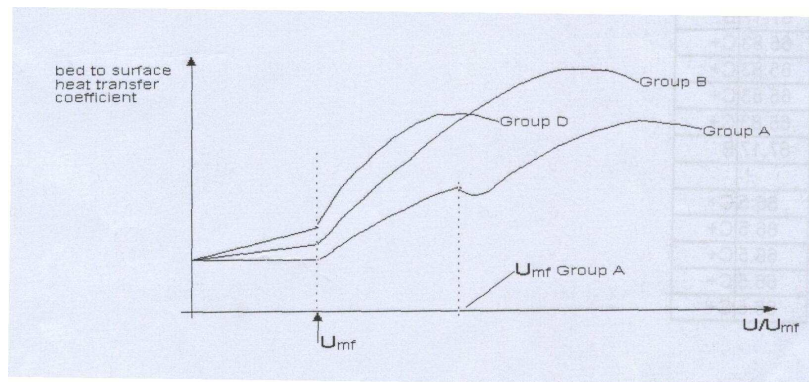
Partikel pasir yang digunakan, dapat dibagi menjadi beberapa tipe [Geldart. 1991]. Tipe-tipe pasir tersebut adalah :

- Grup A : Material yang memiliki diameter partikel (  $d_p$  ) 20 s.d 100  $\mu\text{m}$  dan density partikel ( $< 1.400 \text{ kg/ m}^3$  ). Material ini sangat mudah fluidisasi pada kecepatan udara yang kecil.
- Grup B : Partikel dengan ukuran diameter,  $d_p$ ,  $40 \mu\text{m} < d_p < 500 \mu\text{m}$  dan densitasnya 1.400 s.d 4.500  $\text{kg/ m}^3$ .
- Grup C : Partikelnya sangat halus seperti tepung. Normal fluidisasi sangat sulit karena kekuatan interstitial partikel lebih besar dari aksi udara yang dialirkan.
- Grup D : Partikelnya besar lebih dari 600 mm sebesar biji kopi dan lebih besar dari grup lainnya. Grup ini membutuhkan kecepatan udara fluidisasi yang besar sehingga sangat sulit untuk pencampuran yang baik dibandingkan grup A dan B.

Keempat tipe pasir tersebut memiliki nilai perpindahan kalor yang berbeda-beda terhadap diameter-diameter partikelnya. Perbedaan nilai perpindahan kalor tersebut bisa disajikan dalam grafik pada gambar 2.4. Kemudian pada gambar 2.5 menunjukkan grafik nilai perpindahan kalor terhadap kecepatan minimum fluidisasi tiap jenis pasir.



Gambar 2.4 Nilai Perpindahan Kalor terhadap Diameter Partikel tiap Jenis Pasir



Gambar2.5. Nilai Perpindahan Kalor terhadap Kecepatan Minimum Fluidisasi tiap Jenis Pasir

Untuk tujuan fluidisasi yang baik, sebaiknya menggunakan pasir silika ( $\text{SiO}_2$ ) atau quartz dengan ukuran diameter 400 – 700  $\mu\text{m}$  dengan density-nya 2.600  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Pasir jenis ini diklasifikasikan diantara grup B dan D. Quartz adalah salah satu dari batuan yang sangat keras sehingga cocok digunakan untuk media pentransfer panas dan tidak menyebabkan pasir tersebut hancur bersama bahan bakar sampah sehingga berubah menjadi semen.

#### 2.2.2.3. Burner

Burner digunakan sebagai satu alat untuk proses pemanasan awal pasir. Sifat kerja dari *burner* ini tidaklah digunakan selamanya dalam proses pembakaran. Ia hanya digunakan pada awal, yaitu ketika proses pemanasan pasir. Namun ketika pasir sudah mencapai temperatur panas yang diinginkan, maka *burner* ini dimatikan fungsinya.

#### 2.2.2.4. Distributor

Distributor digunakan untuk membagi dorongan udara yang berasal dari blower, untuk mendorong pasir agar terjadi fluidisasi. Distributor ini juga memiliki pengaruh yang besar terhadap ukuran dan jumlah *bubble* yang dihasilkan dari proses ini. Dalam mendesain suatu distributor, ada beberapa hal yang harus dipertimbangkan, yaitu :

- Tingginya *pressure drop* menentukan jenis blower yang digunakan.
- Kemungkinan terjadinya penyumbatan oleh partikel-partikel
- Area mati dari distributor

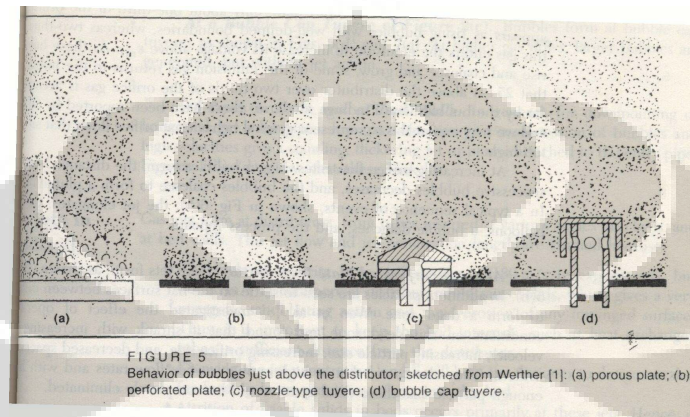


- Fluidisasi yang menyeluruh untuk variasi kecepatan dan temperatur.

Distributor terdiri dari bermacam-macam tipe, yaitu :

1. *porous plate*
2. *perforated plate*
3. *nozzle-type tuyere*
4. *bubble cap tuyere*

Pengaruh dari perbedaan distributor dapat menghasilkan gelembung yang berbeda-beda, serta nilai penurunan tekanan (*pressure drop*) yang berbeda-beda pula. tersebut dapat dilihat pada gambar yang ada dibawah ini.



Gambar2.6 Pengaruh Gelembung yang Dihasilkan dari Perbedaan Jenis Distributor

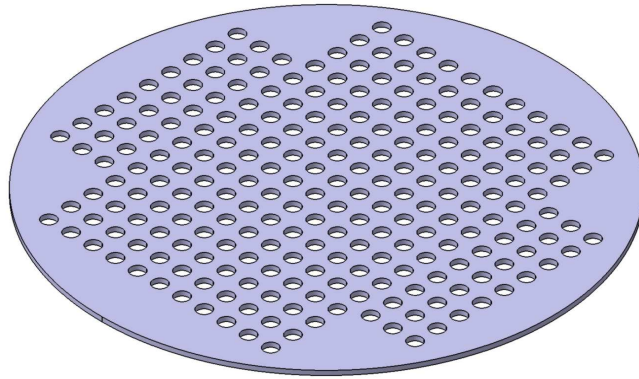
Berdasarkan Kunii & Levenspiel (1991), suatu distributor harus memiliki *pressure drop* ( $\Delta p_d$ ) yang cukup, untuk menghasilkan aliran udara yang seragam menuju pasir.

$$\Delta p_d = (0.2 - 0.4)\Delta p_b$$

Nilai koefisien berdasarkan atas jenis distributor yang digunakan.

Dari beberapa pertimbangan di atas, maka distributor yang digunakan adalah yang berjenis *porous plate*. Salah faktor dasar yang digunakan atas pemilihan distributor ini adalah nilai *pressure drop* yang kecil, sehingga *blower* yang digunakan pun tidak terlalu besar pula. Distributor ini memiliki diameter orifis sebesar 35 cm sebanyak 98 buah, dan dapat dilihat pada gambar 2.7..





Gambar 2.7. Distributor yang Digunakan

#### **2.2.2.5. Blower**

*Blower* digunakan untuk memberikan udara yang dibutuhkan untuk fluidisasi dan reaksi pembakaran. *Blower* digunakan untuk menfluidisasi pasir dan bahan bakar yang ada di ruang bakar. Selain itu, juga untuk menghasilkan turbulensi pada ruang bakar, sehingga terjadi kontak antara pasir dengan bahan yang akan dibakar. Proses pemilihan *blower* ini didapat dengan mencari *blower* yang diinginkan, yang ada di pasaran, dengan melihat debit aliran minimum yang dihasilkan dari *blower* tersebut.

#### **2.2.2.6 Cyclone separator**

*Cyclone separator* berfungsi sebagai alat pemisah partikel padat dan abu dengan gas. Pada bagian ini, yang dipisahkan adalah zat-zat yang dihasilkan dari suatu proses pembakaran. Efek dari suatu pembakaran, terutama pembakaran dengan FBI, akan menghasilkan zat-zat yang terbagi menjadi partikel besar dan partikel-partikel kecil.

Zat yang memiliki nilai densitas lebih besar dari nilai densitas udara, dalam hal ini adalah partikel yang besar, akan turun ke bawah, dan dapat dikumpulkan. Biasanya, zat tersebut adalah debu-debu sisa pembakaran. Begitu juga sebaliknya, zat-zat yang memiliki densitas lebih kecil dari densitas udara, dalam hal ini adalah partikel-partikel kecil, akan terbang melawan gaya gravitasi. Biasanya, zat-zat tersebut adalah gas-gas yang dihasilkan pembakaran, seperti  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $SO_x$ ,  $NO_x$  dan lain-lain. Sehingga dapat dilihat bahwa *cyclone* memiliki peran yang penting terhadap lingkungan.

### 2.3. FLUIDISASI

Fluidisasi merupakan suatu proses yang hampir sama dengan liquefaction dimana material granular yang berupa butiran-butiran kecil dirubah dari keadaan static solid-like menjadi keadaan dynamic fluid-like. Proses ini terjadi bila fluida (liquid atau gas) dialirkan melewati material granular.

Bila aliran udara masuk melalui dasar bed dari butiran-butiran padat, udara tersebut akan bergerak ke atas melewati bed melalui ruang-ruang kosong di antara butiran-butiran padat. Pada kecepatan udara rendah, gaya seret (drag force) aerodinamik pada setiap partikel juga rendah, sehingga keadaan bed tetap tidak berubah. Dengan menaikkan kecepatannya, gaya seret aerodinamik akan mulai meniadakan gaya gravitasi, yang menyebabkan bed mengembang volumenya karena butiran-butiran padat saling menjauhi. Dengan menaikkan kecepatannya lagi, nilainya akan mencapai kecepatan kritis dimana gaya seret ke atas akan tepat sama dengan gaya gravitasi ke bawah, yang menyebabkan butiran-butiran padat become suspended within the fluid. Pada kecepatan kritis ini, bed dikatakan terfluidisasi dan akan menunjukkan perilaku seperti fluida. Dengan menaikkan kecepatan udara lebih lagi, bulk density dari bed akan terus menurun, dan fluidisasi yang terjadi semakin hebat, sampai butiran-butiran padat tidak lagi membentuk bed dan terbawa ke atas bersama dengan aliran udara.

Ketika terfluidisasi, bed dari butiran-butiran padat akan berperilaku seperti fluida, seperti liquid atau gas. Seperti air di dalam ember: bed akan menyesuaikan diri dengan volume ruang ember, permukaannya tegak lurus terhadap gravitasi; benda dengan densitas lebih kecil daripada bed akan terapung pada permukaannya, bobbing up and down if pushed downwards, sedangkan benda dengan densitas lebih besar daripada bed akan tenggelam ke dasar bed. Perilaku seperti fluida membuat butiran-butiran padat dapat berpindah seperti fluida, disalurkan melalui pipa-pipa, tidak memerlukan alat pengangkut mekanikal.

Bila fluida dialirkan pada partikel unggun sampai fluida tersebut dapat memberikan gaya yang membuat partikel tersebut bergerak dan menunjukkan sifat-sifat seperti fluida maka fenomena ini disebut fluidisasi.

Jika suatu aliran udara melewati suatu partikel ungun yang ada dalam tabung, maka aliran tersebut memberikan gaya seret / *drag force* pada partikel dan memberikan *pressure drop* sepanjang ungun. *Pressure drop* akan naik jika kecepatan superficial naik. Kecepatan superficial adalah kecepatan aliran jika tabung kosong.

Pada kecepatan superficial rendah, ungun mula-mula diam. Jika kemudian kecepatan superficial dinaikkan, maka pada suatu saat gaya seret fluida menyebabkan ungun mengembang dan menyebabkan tahanan terhadap aliran udara mengecil, sampai akhirnya gaya seret tersebut cukup untuk mendukung gaya partikel ungun, maka ungun akan terfluidisasi dan sistem padat atau fluida menunjukkan sifat-sifat seperti fluida.

Fluida padatan oleh gas merupakan gaya seret dari suatu partikel ungun padat oleh gas. Proses pencampuran padatan secara intens dan kontak yang terjadi antara padatan gas yang baik akan menghasilkan sistem isothermal yang memiliki perpindahan massa yang baik.

### **2.3.1. Fluidisasi terdiri dari beberapa jenis, yaitu :**

#### **a. Fluidisasi Partikulat (*particulate fluidization*)**

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

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

b. Fluidisasi Agregat (*Agregative Fluidization*) atau fluidisasi Gelembung (*Bubbling Fluidization*)

Hamparan zat padat yang terfluidisasi dalam udara biasanya menunjukkan fluidisasi yang dikenal sebagai fluidisasi agregat atau fluidisasi gelembung. Fluidisasi ini terjadi jika kecepatan gas di atas kecepatan fluidisasi minimum dimana unggun akan bubbling dan rongga-rongga seperti gelembung uap akan membangkitkan sirkulasi partikel unggun.

Beberapa serbuk halus yang difluidisasi dengan gas menunjukkan gejala fluidisasi partikulat dalam jangkauan kecepatan terbatas di sekitar titik fluidisasi minimum. Jika kecepatan ditingkatkan, hamparan mengembang secara seragam sehingga akhirnya gelembung-gelembung mulai terbentuk, dan apabila kecepatan ditingkatkan sampai melewati titik gelembung, hamparan itu akan berangsur-angsur mengempis kembali, tetapi akan mengembang kembali.

Dalam fluidisasi agregat, fluida akan membuat gelembung pada padatan unggun dalam tingkah laku yang khusus. Gelembung fluida meningkat melalui unggun dan pecah pada permukaan unggun dan akan terjadi “splashing”, dimana partikel unggun akan bergerak ke atas. Seiring dengan meningkatnya kecepatan fluida., perilaku gelembung akan bertambah besar.

c. Fluidisasi Kontinu (*Continuous Fluidization*)

Bila kecepatan fluida hamparan zat padat cukup besar, semua partikel dalam hamparan itu akan terbawa ikut oleh fluida hingga memberikan suatu fluidisasi kontinu. Prinsip fluidisasi ini terutama diterapkan dalam pengangkutan zat padat dari suatu titik ke titik lain dalam pabrik pengolahan, disamping ada beberapa reaktor gas zat padat, yang bekerja dengan prinsip ini. Contohnya dalam transportasi lumpur dan transportasi pneumatik.

### 2.3.2. Parameter-Parameter Fluidisasi, yaitu:

a. Ukuran Partikel

Padatan dalam unggun yang terfluidisasi tak pernah sama dalam ukuran dan mengacu pada distribusi ukuran partikel tersebut. Untuk menghitung ukuran partikel rata-rata dengan menggunakan diameter rata-rata permukaan ( $d_{SV}$ ).

$$d_{sv} = \frac{1}{\sum(x_i / d_p)}$$

Keterangan :

$d_p$  = Diameter partikel rata-rata yang secara umum digunakan untuk desain

$d_{sv}$  = Diameter suatu bidang.

Diameter ini sama dengan daerah permukaan pada rasio volume sebagai partikel aktual, dimana seringkali memacu pada diameter rata-rata Sauter yang merupakan korelasi yang banyak digunakan untuk ukuran partikel karena gaya hidrodinamik dalam fluida unggun yang bergerak pada permukaan luar suatu partikel.

b. Densitas padatan

Padatan dapat dibedakan dalam 3 densitas, yaitu *bulk*, *skeletal*, dan *particle*. Densitas *bulk* merupakan pengukuran berat dari keseluruhan partikel dibagi dengan volume partikel. Pengukuran ini menyertakan faktor kekosongan diantara partikel dan kekosongan dalam pori-pori partikel. *Skeletal* / densitas padatan sesungguhnya adalah densitas dari suatu padatan jika porositasnya nol. Dalam perhitungan *fluidized bed* biasanya menggunakan densitas partikel  $\rho_p$  dimana merupakan berat dari suatu partikel dibagi volumenya dan menyertakan lubang atau pori-pori. Jika tidak ada nilai untuk densitas partikel, maka pendekatan untuk densitas partikel dapat diperoleh dengan membagi dua densitas *bulk*.

c. *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.

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

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

d. Kecepatan fluidisasi minimum

Kecepatan fluidisasi minimum adalah kecepatan *superficial* terendah yang dibutuhkan untuk terjadinya fluidisasi. Kecepatan fluidisasi minimum dapat ditentukan dari plot *Zenz* pada gambar di bawah ini, dengan mengasumsikan faktor kekosongan pada fluidisasi minimum adalah 0,5.

$$u_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g \cdot d_p} [(1135.7 + 0.0408Ar)^{0.5} - 33.71]$$

Dimana bilangan *Archimedes* (*Ar*) :

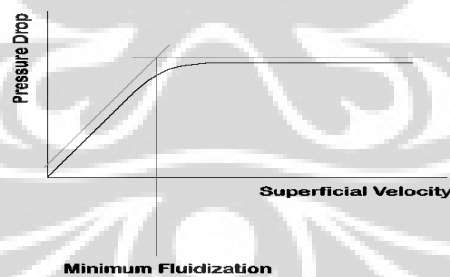
$$Ar = \frac{\rho_g d_p^3 (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2}$$

Untuk memprediksi kecepatan fluidisasi minimum, Ergun menurunkan suatu korelasi dengan cara menyamakan *pressure drop* pada saat kecepatan fluidisasi minimum dengan berat unggun per satuan luas dan diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$Ar = 150 \cdot \frac{1 - \epsilon_{mf}}{\phi^2 \cdot \epsilon_{mf}^3} \cdot Re_{mf} + \frac{1.75}{\phi \cdot \epsilon_{mf}^3} \cdot Re_{mf}^2 \quad Re_{mf} = \frac{u_{mf} d_p}{\mu_g}$$

Suku pertama persamaan Ergun dominan pada aliran laminar sedangkan suku kedua dominan pada aliran turbulen.

Pengukuran kecepatan fluidisasi minimum dapat diperoleh dari grafik *pressure drop vs* kecepatan *superficial*, yaitu sesuai titik potong atau antara bagian kurva yang naik dan bagian kurva yang datar seperti gambar di bawah ini.



Gambar 2.8. Kurva Hubungan Antara *Pressure Drop* dengan Kecepatan Superfisial [Geldart. 1991]

e. Batas partikel

Partikel diklasifikasikan berdasarkan bagaimana partikel tersebut terfluidisasi dalam udara pada kondisi tertentu. Klasifikasi tersebut berdasarkan densitas partikelnya terhadap fungsi diameter partikel. Grafik tersebut dapat dilihat pada gambar 2.9.

Geldart meneliti perlakuan macam-macam partikel ketika mengalami fluidisasi. Dia mengategorikan klasifikasi ini dengan cara membuat plot grafik diameter partikel versus perbedaan densitas relatif antara fasa fluid dengan partikel solid. Kategori-kategori dari partikel tersebut adalah :

Group A Partikel halus

Karakteristik partikel :

- Saat fluidisasi terjadi gelembung,
- Bed mengalami ekspansi sebelum muncul,
- Gelembung akan saling bergabung pada *bed chamber*,
- Ukuran *bubble* paling besar adalah 10 mm,

Group B Partikel kasar

Karakteristik partikel :

- Terbuat dari partikel yang lebih kasar dari pada group A dan densitasnya juga lebih tinggi,
- Membentuk gelembung dengan cepat ketika kecepatan superfisial sudah mencapai kecepatan untuk mencapai fluidisasi minimum ( $V_{mf}$ ),
- Membentuk gelembung kecil pada bagian bawah bed chamber yang akan tumbuh semakin besar melalui bed,

Group C Kohesif (partikel yang sangat halus)

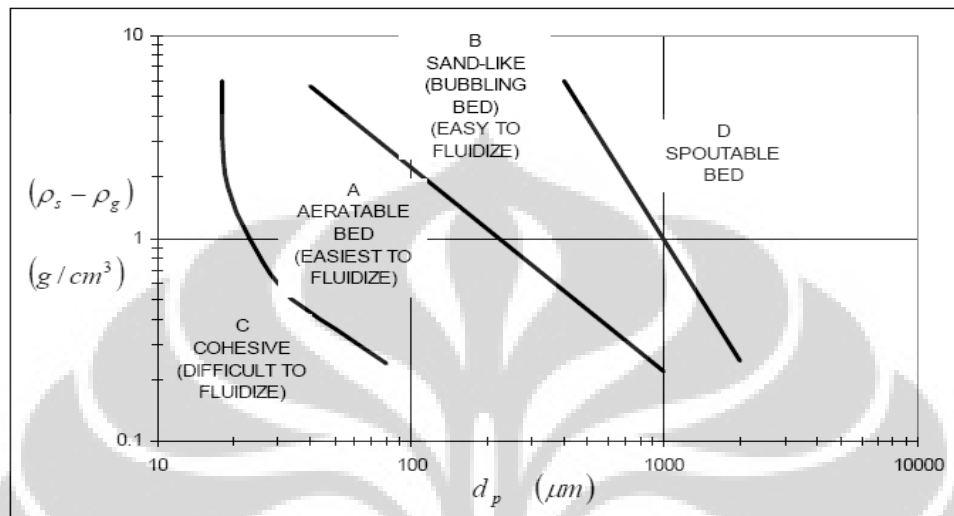
Karakteristik partikel :

- Sulit untuk difluidisasikan dan cenderung menyerupai tembak-tembak dari suatu solid,
- Membentuk channel pada bed yang besar tanpa terjadi fluidisasi
- Cenderung untuk saling kohesive antar partikelnya,.

## Group D Unggun yang bergerak

Karakteristik partikel :

- Sangat besar dan densitasnya tinggi,
- Membentuk gelembung yang saling bergabung dengan cepat dan tumbuh besar,
- Menyebabkan pembentukan tembakan-tembakan pada bed ketika ukuran gelembung mencapai diameter bed,
- Menyembur dengan mudah.



Gambar 2.9. Grafik Jenis-Jenis Partikel [Geldart, 1991]

### f. Gaya antar partikel dan daerah batas fluidisasi (*fluidization regimes*)

Gaya antar partikel seringkali diabaikan dalam fluidisasi, meskipun dalam banyak kasus gaya ini lebih kuat dibandingkan dengan *hydrodynamic* yang digunakan dalam banyak korelasi. Gaya antar partikel yang berhubungan atau berkaitan dengan unggun yang terfluidisasi, misalnya *Van der Waals*, elektrostatis, kapilaritas.

Pada kecepatan gas rendah, suatu padatan dalam tabung unggun akan berada dalam keadaan konstan atau tetap seiring dengan bertambahnya kecepatan gas, gaya seret dan gaya buoyant mengalahkan berat partikel serta gaya antar partikel tersebut dan partikel secara menyeluruh didukung oleh gas tersebut.



Pada fluidisasi minimum, partikel memperlihatkan pergerakan yang minimal dan secara langsung unggun akan sedikit terangkat. Kondisi *bubbling* - kondisi awal dari fluidisasi agregat terjadi ketika kecepatan gas meningkat.

g. Penurunan tekanan (*Pressure Drop*)

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 akan kurang lebih sama dengan berat hamparan per satuan luas. Jadi:

$$\Delta P_b = \frac{m}{\rho_p A_b} (\rho_p - \rho_f) g$$

keterangan :  $\Delta P_b$  = penurunan tekanan melewati hamparan ( $N/m^2$ )

$m$  = massa hamparan pasir ( $kg$ )

$A_b$  = luas penampang hamparan ( $m^2$ )

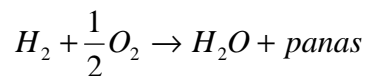
$\rho_p$  = densitas partikel pasir ( $kg/m^3$ )

$\rho_f$  = densitas fluida gas ( $kg/m^3$ )

$g$  = percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )

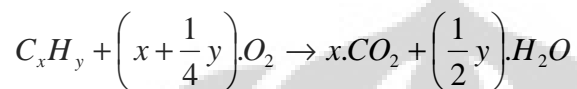
#### 2.4. SISTEM REAKSI PEMBAKARAN

Pembakaran adalah sebuah reaksi antara oksigen dan bahan bakar serta 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:



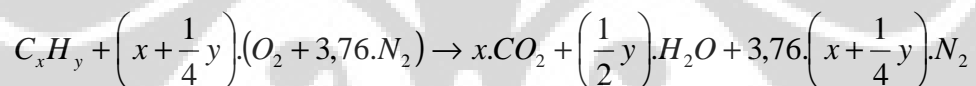
Tiga senyawa dan panas yang dihasilkan tersebut disebut juga sebagai hasil pembakaran.

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 miskin. Begitu juga sebaliknya, apabila bahan bakar yang digunakan lebih banyak dari pada oksigen, maka campurannya disebut campuran kaya. Reaksi untuk pembakaran sempurna adalah :



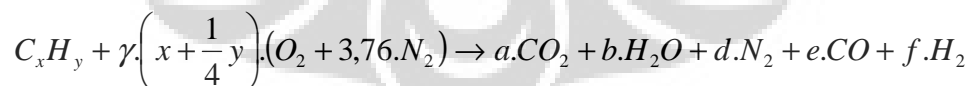
Nilai dari x dan y di atas bergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan. Nilai x adalah fraksi massa untuk kandungan *Carbon*, dan y fraksi massa untuk kandungan *Hidrogen* dalam bahan bakar.

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



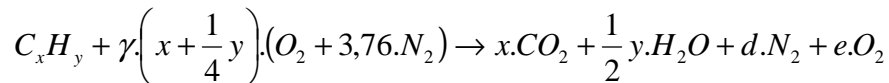
Namun, ada kalanya juga proses pembakaran tidak terjadi pada komposisi ideal antara bahan bakar dengan udara. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, proses yang tidak pada kondisi ideal ini bisa terbagi menjadi dua, yaitu pembakaran kaya dan pembakaran miskin.

#### **Proses Pembakaran-Kaya :**



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

Di atas ini merupakan reaksi kimia pembakaran secara teoritis. Tetapi pada kenyataannya, proses pembakaran ini akan menghasilkan gas-gas atau sisa-sisa lainnya yang tidak disebutkan pada reaksi tersebut. Untuk memperoleh hasil pembakaran yang baik, maka proses pembakaran harus dilaksanakan dengan memperhatikan hal-hal berikut, 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.

Suatu sistem pembakaran memiliki 3 komponen utama, yaitu :

1. Zat yang Dibakar

Unsur-unsur kimia pada bahan bakar yang berpotensi membangkitkan energi panas adalah karbon, oksigen, hidrogen, dan sulfur. Setiap bahan bakar memiliki kandungan energi panas yang dinyatakan dalam karbon. Adapun jenis bahan bakar dibedakan menjadi 3 bentuk, dan dapat dilihat pada tabel 2.7. yang ada di bawah ini.

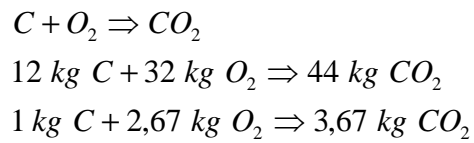
Tabel 2.7. Jenis-Jenis Bahan Bakar

<b>Padat</b>	<b>Cair</b>	<b>Gas</b>
Kayu	Solar	LNG
Ampas Tebu	Minyak Tanah	LPG
Cangkang + Sabut Kelapa	Bensin	Dan lain-lain
Batu bara	Dan lain-lain	
Dan lain-lain		

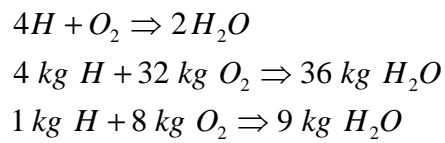
2. Zat Yang Membakar

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

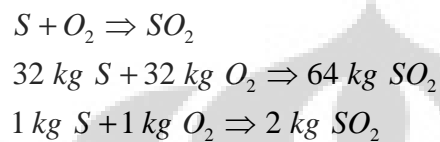
- Karbon yang terbakar sempurna akan membentuk  $CO_2$  menurut persamaan :



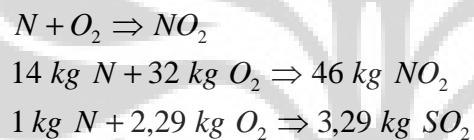
- Hidrogen terbakar sempurna akan membentuk  $H_2O$  menurut persamaan :



- 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 :

$$m = \frac{A - A_o}{A} \cdot 100 \%, \text{ dimana :}$$

$m = excess\ air$

$A_o = \text{jumlah udara teoritis}$

$A = \text{jumlah udara aktual}$

Besarnya *excess air* bergantung dari jenis bahan bakar dan tipe ruang bakarnya. Untuk *excess air* yang diperbolehkan, dapat dilihat dari tabel 2.2.

Tabel 2.2. Nilai *Excess Air* Berdasarkan *Type of Furnace* serta Bahan Bakar yang Digunakan

<i>Fuel</i>	<i>Type of Furnaces</i>	<i>Excess Air</i>
<i>Coal</i>	<i>Spreader Stoker</i>	30 – 60
	<i>Water-Cooled Vibrating Grate Stoker</i>	30 – 60
	<i>Chain-Grate and Travelling Stoker</i>	15 – 50
	<i>Underfedded Stoker</i>	20 – 50
<i>Fuel Oil</i>	<i>Oil burner, register type</i>	5 – 10
	<i>Multifuel Burner &amp; Flat Flame</i>	10 – 20
<i>Natural Gas</i>	<i>Register type burner</i>	5 – 10
	<i>Multifuel Burner</i>	10 – 20
<i>Wood</i>	<i>Dutch Oven &amp; Hoff Type</i>	20 – 25
	<i>Other Furnace</i>	35 – 50

### 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.

Energi yang hilang dari gas buang ( $E_{gb}$ ) dapat ditulis juga sebagai :

$$E_{gb} = m_{gb} \cdot c_p \cdot (T_{gb} - T_u),$$

dimana :  $m_{gb}$  = massa gas buang (kg)

$c_p$  = panas jenis rata-rata gas buang ( $\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$ )

$T_{gb}$  = temperatur gas buang ( $^\circ C$ )

$T_u$  = temperatur udara masuk ruang bakar ( $^\circ C$ )

## 2.5. KARAKTERISTIK SAMPAH

Seperti diketahui bahwa sampah menjadi topik pembicaraan setiap harinya. Ini disebabkan karena jumlahnya yang semakin banyak sementara lahan untuk penampungan untuk sampah-sampah tersebut semakin berkurang, apalagi lahan-lahan yang ada di perkotaan. Untuk lebih jelasnya mengenai sampah-sampah yang dihasilkan dari beberapa kota besar di dunia, dapat dilihat dari tabel berikut ini, yang dipresentasikan dalam persentase berat basah (% berat basah).

Tabel 2.3. Tabel Komposisi Sampah DKI Jakarta

[Dinas Kebersihan DKI Jakarta. 2002]

Komponen	%	Massa Basah (kg)	Massa kering (kg)	Kandungan Unsur					
				Karbon	Hidrogen	Oksigen	Nitrogen	Sulfur	Abu (kg)
Organik	73.9	385.65	154.26	74.05 kg 6.17 kmol	9.87 kg 9.87 kmol	58.00 kg 3.63 kmol	4.01 kg 0.29 kmol	0.62 kg 0.02 kmol	7.71
Kertas	8.28	43.21	17.28	7.52 kg 0.63 kmol	1.04 kg 1.03 kmol	7.60 kg 0.48 kmol	0.05 kg 0.004 kmol	0.03 kg 0.001 kmol	1.04
Plastik	5.44	28.39	11.36	7.84 kg 0.65 kmol	0.98 kg 0.98 kmol	1.29 kg 0.08 kmol	0.11 kg 0.008 kmol	0.00 kg 0.00 kmol	1.14
Kayu	3.77	19.67	7.89	3.89 kg 0.32 kmol	0.47 kg 0.00 kmol	3.36 kg 0.21 kmol	0.02 kg 0.001 kmol	0.01 kg 0.0004 kmol	0.12
Tekstil	1.16	6.05	2.42	1.39 kg 0.12 kmol	0.17 kg 0.17 kmol	0.52 kg 0.03 kmol	0.18 kg 0.001 kmol	0.01 kg 0.0002 kmol	0.15
Lain-lain	3.6	18.79	7.51	1.98 kg 0.16 kmol	0.23 kg 0.23 kmol	0.15 kg 0.009 kmol	0.04 kg 0.003 kmol	0.02 kg 0.0006 kmol	5.11
Total	96.15	501.77	200.71	8.06 kmol	12.76 kmol	4.43 kmol	0.31 kmol	0.02 kmol	15.27
Massa Air		301.06							
Mol H		33.45							
Mol O		267.61							

Untuk dapat mengatasi jumlah sampah tersebut, harus dilakukan suatu proses pengolahan sampah agar dapat mengurangi jumlah-jumlah sampah tersebut. Proses pengolahan sampah terdiri atas 3 macam, yaitu :

- Daur ulang sampah
- Pengkomposan sampah
- Pembakaran sampah

Proses daur ulang sampah dilakukan untuk sampah-sampah yang berjenis anorganik. Untuk proses pengkomposan sampah, dilakukan terhadap sampah-sampah yang bersifat organik. Dan yang terakhir adalah proses pembakaran sampah. Proses pembakaran sampah dilakukan terhadap sampah-sampah yang bersifat *combustible*. Namun, terkadang ada beberapa sampah organik yang pengolahannya lebih baik dilakukan dengan cara pembakaran daripada pengkomposan. Alasannya adalah waktu yang dibutuhkan dalam proses pengolahan sampah organik tersebut lebih cepat menggunakan sistem pembakaran daripada menggunakan sistem pengkomposan. Ini dibutuhkan guna mengefisiensikan lahan yang digunakan sebagai tempat pembuangan sampah.



Secara teoritis, apabila program pengolahan-pengolahan sampah yang telah disebutkan di atas dapat dilakukan, maka dapat mengurangi volume / berat sampah sampai dengan hanya 3 %. Sehingga jumlah truk dan lahan TPA pun akan berkurang sesuai dengan pengurangan jumlah tersebut. Dengan demikian, sistem pengolahan sampah tersebut dapat menunjang program kebersihan di wilayah perkotaan, yang mana masalah keterbatasan lahan merupakan topik utama dalam setiap pembicaraan.

Sampah-sampah organik juga menjadi satu topik permasalahan yang ada di lingkungan Universitas Indonesia. Sampah-sampah tersebut terdiri dari daun-daun kering dan ranting-ranting dari pohon-pohon, sisa makanan dari kantin-kantin yang berjenis organik, serta sampah-sampah organik lainnya. Persentase jumlah dari sampah-sampah yang dihasilkan juga tidak jauh beda dengan komposisi sampah yang di Jakarta, dimana persentase terbesar berasal sampah organik dan sampah-sampah kertas. Namun, yang dijadikan objek awal untuk pengujian adalah sampah-sampah organik yang berasal dari pohon-pohon. Komposisi sampah di lingkungan Universitas Indonesia dapat dilihat dari tabel yang ada di bawah.

Tabel 2.4. Komposisi Sampah Universitas Indonesia  
[Bagian Rumah Tangga Rektorat Universitas Indonesia. 2003]

<b>Jenis Sampah</b>	<b>Persentase</b>
Organik	62.21 %
Plastik	16.94 %
Kertas	10.85 %
Kaleng	4.52 %
Botol	2.28 %
Lain-lain	3.20 %

Kandungan-kandungan dari sampah-sampah tersebut dapat dilihat berdasarkan *ultimate analysis*, serta dari *proximate analysis*. Data-data tersebut dapat dilihat tabel di bawah ini.

Tabel 2.5. *Ultimate Analysis* Sampah yang Dibakar

[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
Ranting Kayu	50.46	5.97	42.37	0.15	0.05	1
Sisa makanan sayur	49.06	6.62	37.55	1.68	0.2	4.89
Sisa makanan daging	59.59	9.47	24.65	1.02	0.19	5.08
Kertas	43.41	5.82	44.32	0.25	0.20	6.00

Tabel 2.6. *Proximate Analysis* Sampah yang Dibakar

[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
Ranting Kayu	20	67.89	11.31	0.8
Sisa makanan sayur	78.29	17.1	3.55	1.06
Sisa makanan daging	38.74	56.34	1.81	3.11
Kertas	10.24	75.94	8.44	5.38

Tabel 2.7. Nilai *Higher Heating Value* ( $kcal/kg$ ) dari Dampah yang Dibakar

[Walter R. Niessen. 1994]

<i>Solid Waste</i>	<i>As received</i>	<i>Dry</i>	<i>Moisture &amp; Ash</i>
Daun	4436	4927	5150
Ranting Kayu	3833	4785	4833
Sisa makanan sayur	997	4594	4833
Sisa makanan daging	4235	6913	7293
Kertas	3778	4207	4475

### **BAB III**

## **PERTIMBANGAN DESAIN MODIFIKASI**

### ***FLUIDIZED BED INCINERATOR***

Alat yang menjadi objek dari penulisan tugas akhir ini adalah alat *Fluidized Bed Incinerator*, yang dijadikan sebagai proyek dari Universitas Indonesia untuk pengolahan sampah yang ada di lingkungan Universitas Indonesia. Saat ini alat tersebut terdapat di Hutan Kota UI dekat Wisma Makara Universitas Indonesia, dan untuk lebih jelasnya, dapat dilihat pada gambar 3.1 yang ada di bawah ini.



Gambar 3.1. Alat *Fluidized Bed Incinerator*

Alat ini sudah pernah dioperasikan dan digunakan untuk membakar sampah-sampah organik yang ada di lingkungan kampus UI. Dan setelah dilakukan tahap uji coba, dapat dikatakan bahwa proses fluidisasi yang terjadi telah berjalan dengan baik. Untuk membuktikan bahwa alat ini sudah dapat menghasilkan fluidisasi dapat dilihat pada gambar 3.2 yang ada di bawah. Ketika terjadi fluidisasi, pasir-pasir terdorong ke

atas dan menyebabkan gerakan turbulensi. Untuk melihatnya, pintu yang ada di ruang bakar dibuka, dan terlihat pasir-pasir saling bergejolak ke atas, bahkan terlihat ada yang ke luar ruang bakar.



Gambar 3.2. Fluidisasi pada Pasir

Namun ternyata terdapat beberapa masalah yang timbul pada proses pengoperasiannya. Oleh karena itu untuk mengatasi masalah-masalah tersebut maka perlu dilakukan beberapa modifikasi desain dari sistem alat tersebut. Masalah-masalah yang ada antara lain terjadi pada sistem *feeding* dan sistem pemanasan dengan gas burner.

### 3.1.SISTEM PEMANASAN

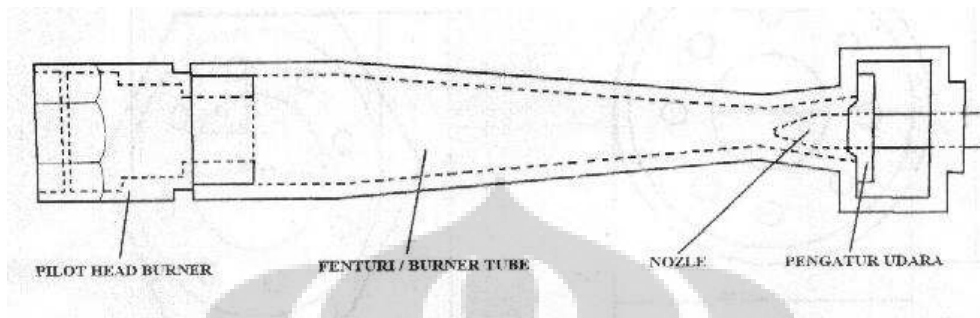
Desain awal gas burner pada alat *Fluidized Bed Incinerator* ini menggunakan *stick burner*. *Burner* digunakan sebagai pemanas udara yang akan mengalir ke dalam ruang bakar utama, untuk kemudian dapat memanaskan pasir sampai temperatur tertentu. Pada satu burner ini terdiri dari bermacam-macam bagian, yaitu :

- *Pilot Head*  
*Pilot head* merupakan bagian terdepan dari *burner*. Fungsi utama dari *pilot head* ini adalah menentukan model bunga api yang keluar.
- *Venturi / Burner Tube*  
*Venturi/Burner Tube* merupakan bagian dari *burner* yang berbentuk venturi. Fungsi bagian ini adalah mengalirkan dan mengumpulkan gas sebelum dialirkan ke *pilot head*, serta sebagai penahan agar api tidak langsung terbakar pada *nozzle*.
- *Nozzle*

*Nozzle* memiliki fungsi sebagai tempat keluarnya aliran gas, serta meningkatkan tekanan pada aliran.

- Pengatur Udara

Pengatur udara berfungsi sebagai kendali masuknya udara sebelum bercampur dengan bahan bakar (gas), dan juga dapat menentukan jenis dan panjang api yang dihasilkan.



Gambar 3.3. Skematis *Burner*

Dalam pengoperasian alat *Fluidized Bed Incinerator*, burner tidak akan beroperasi sepenuhnya, karena hanya berfungsi sebagai pemanas awal pasir untuk mencapai temperatur pembakaran. Setelah mencapai temperatur tersebut, *burner* ini tidak akan bekerja lagi. Tapi, apabila temperatur menunjukkan penurunan temperatur, maka *burner* akan dinyalakan kembali.



Gambar 3.4. *Burner*

Proses pemanasan dengan menggunakan *stick burner* ini mempunyai beberapa kelemahan dan memiliki beberapa masalah dalam proses pengoperasiannya. Permasalahan yang timbul antara lain :

1. Proses yang berbahaya ketika menyalakan burner, yaitu dengan menggunakan korek gas. Sedangkan proses penyalaan dengan menggunakan busi tidak berhasil, karena api yang dihasilkan terlalu kecil.
2. Suply udara ke burner tidak terkontrol.
3. Ketika sampah sudah mulai terbakar di ruang bakar, burner sering mati karena kurangnya pasokan oksigen.
4. Gas Burner masih belum optimal bekerjanya, karena pemanasan pasir dilakukan melalui pintu utama ruang bakar. Sehingga ada sebagian panas keluar dari pintu tersebut selama proses pembakaran awal dengan gas LPG. Seperti terlihat pada gambar 3.5 di bawah ini.



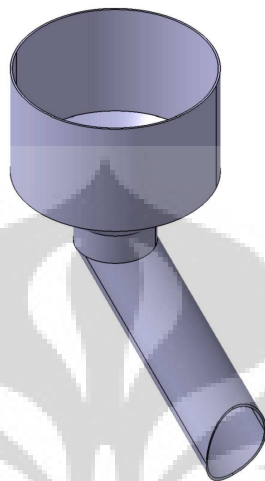
gambar 3.5. Metode pemanasan pasir

### 3.2.SISTEM FEEDING

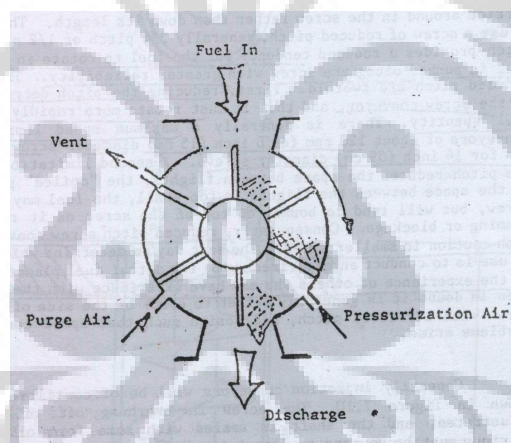
*Feeder* merupakan tempat saluran untuk memasukkan umpan masuk bahan bakar dalam hal ini adalah sampah ke dalam reaktor. Bahan bakar inilah yang akan menjaga temperatur reaktor incinerator agar tetap terjaga konstan. Oleh karena itu laju umpan masuk (*feeding rate*) bahan bakar harus dapat di jaga stabil pada nilai tertentu agar temperatur pada reaktor utama tidak mengalami penurunan temperatur. Pada sistem feeding, desain awal *feeder* yang digunakan adalah jenis *Gravity Chute*. *Feeder* berfungsi sebagai jalur untuk memasukkan sampah ke dalam ruang bakar utama. Desain awal *Feeder* yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.6. *Feeder* tersebut memiliki dua lubang, yaitu lubang atas yang digunakan sebagai tempat

masuknya sampah, memiliki diameter 49,4 *cm* , sedangkan lubang bawah memiliki diameter 8,9 *cm* , digunakan untuk menyalurkan sampah ke dalam ruang bakar.

Dalam saluran menuju ruang bakar, diberikan satu alat tambahan yang disebut dengan *rotary hopper*. Mekanisme ini menggunakan alat yang berbentuk sudu-sudu yang berfungsi untuk membatasi jumlah bahan bakar yang akan masuk ke dalam ruang bakar, serta membatasi agar sampah yang masuk ke dalam ruang bakar memiliki ukuran—ukuran tertentu.



Gambar 3.6. *Feeding Port*



Gambar 3.7. Skematis *Rotary hopper* pada Saluran *Feeder*

Alasan digunakannya *feeder* jenis ini adalah objek yang akan dibakar adalah sampah, sehingga tidak perlu tenaga berlebih, karena berat yang dimiliki sampah tersebut tidak terlalu besar. Selain itu, *feeder* jenis ini lebih murah dibandingkan



*feeder* jenis lain, karena tidak adanya sistem tambahan dalam proses kerjanya. Akan tetapi pada pelaksanaannya terdapat beberapa permasalahan yang timbul pada sistem feeding jenis ini, karena pemutar yang digunakan pada *rotary valve* adalah menggunakan mekanisme manual dengan tangan manusia sehingga membuat kecepatan putaran yang dihasilkan tidak konstan.

Permasalahan yang ada antara lain :

- Sampah sering kali tersangkut pada feeder. Ketika dimasukkan, sampah-sampah dengan bentuk panjang seperti ranting sering kali tersangkut pada *rotary valve* sehingga *rotary valve* tersebut tidak dapat diputar.
- Sampah terbakar terlebih dahulu pada feeder. Karena tersangkut seperti yang dijelaskan pada poin di atas sehingga bara-bara pasir silika yang beterbangan membakar sampah yang tersangkut pada feeder.
- Laju umpan masuk (*feeding rate*) tidak konstan. Pada feeder jenis *rotary valve*, sampah dimasukkan ke dalam reaktor secara manual sehingga *feeding rate* tidak konstan yang dapat menyebabkan temperatur reaktor tidak stabil



Gambar 3.8. Sampah yang terbakar sebelum masuk ke ruang bakar



Gambar 3.9. Sampah yang Terbakar pada *Feeder*

*Feeder* merupakan salah satu bagian yang paling krusial dalam perancangan sebuah *Incinerator*. *Feeder* harus dapat mengalirkan sampah dengan lancar ke dalam ruang bakar, dan hasil pembakarannya, yang berupa gas, tidak boleh keluar melalui *feeder* ini. Jadi, *feeder* harus dapat menahan gas hasil pembakaran keluar, karena sisa-sisa pembakaran tersebut harus melalui jalur yang lain, yaitu *cyclone*. Oleh



karena itu untuk mengatasi permasalahan yang timbul pada sistem feeding *Fluidized Bed Incinerator* ini akan digunakan sistem feeding yang baru.

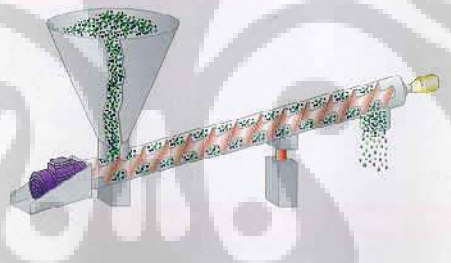
Selain jenis *Gravity Chute*, masih terdapat beberapa jenis sistem feeding yang lain. Pada dasarnya, ada 4 (empat) cara untuk memasukkan bahan bakar ke dalam ruang bakar pada *Fluidized Bed Incinerator*. Keempat sistem tersebut adalah :

- *Gravity Chute*

Sistem ini tidak menggunakan sistem tambahan. Sistem ini hanya menggunakan gaya gravitasi sebagai mekanismenya. Sehingga, yang diperlukan adalah membuat suatu alat atau suatu bagian yang menurun, yang searah dengan gaya gravitasi.

- *Screw Conveyor*

Sistem ini menggunakan sistem ulir, untuk mendorong bahan bakar yang akan masuk ke dalam ruang bakar. Dengan menggunakan sistem ini dapat memungkinkan pencegahan keluarnya volatile meter dari suatu bahan bakar ke luar. Skematis dari *feeder* jenis ini dapat dilihat dari gambar 3.10 yang ada dibawah ini.



Gambar 3.10. Skematis  
*Screw Conveyor Feeder*

- *Pneumatic Injection*

*Feeder* jenis ini menggunakan sistem *pneumatic* untuk mendorong bahan bakar yang akan digunakan, ke dalam ruang bakar.

- *Spreader Stoker*








Sistem yang terakhir ini adalah sistem yang digunakan seperti pada boiler-boiler konvensional. Sistem ini merupakan alternatif terakhir yang dapat digunakan pada FBC, apabila sistem-sistem yang telah disebutkan sebelumnya tidak dapat bekerja dengan baik.

### 3.2.1. Desain Modifikasi Sistem Feeding

Sasaran utama dari modifikasi sistem feeding adalah agar suplai bahan bakar sampah masuk melalui feeder dengan feeding rate konstan pada nilai tertentu, sehingga temperatur pada reaktor stabil. Oleh karena itu feeding rate sebaiknya diputar oleh motor dengan putaran yang dapat diatur. Desain modifikasi sistem feeding ini akan menggunakan *Screw Feeder* yang diputar dengan motor.

Berikut ini adalah penggolongan secara kasar dari karakteristik material-material yang cocok untuk tipe-tipe tertentu dari *Screw Design* :

Tabel 3.1. karakteristik material-material untuk tipe-tipe tertentu dari *Screw Design*

							
Characteristics							
very free flowing							
free flowing							
rel. free flowing	○						
poor flowing	○						
dusty	○						
sticky	○						
lumpy	○						
greasy	○						
damp	○						
hygroscopic	○						
bridging	○						
ratholing	○						
flooding							
compacting	○						
fluidizing							
plasticizing	○						
	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4

Legend:

1	<span style="color: red;">■</span> Powder	4	<span style="color: yellow;">■</span> Fibers
2	<span style="color: blue;">■</span> Pellets	5	<span style="color: purple;">■</span> Flakes
3	<span style="color: green;">■</span> Granules	○	requires agitator

A colored dot in the table means: essentially suitable

Dapat dilihat bahwa jenis screw yang digunakan pada *Screw Feeder* untuk Incinerator ini adalah jenis *Auger Screw*. Hal ini berdasarkan pertimbangan bahwa karakteristik material cocok dengan tabel diatas.

### 3.2.2. Mekanisme Modifikasi Sistem Feeding

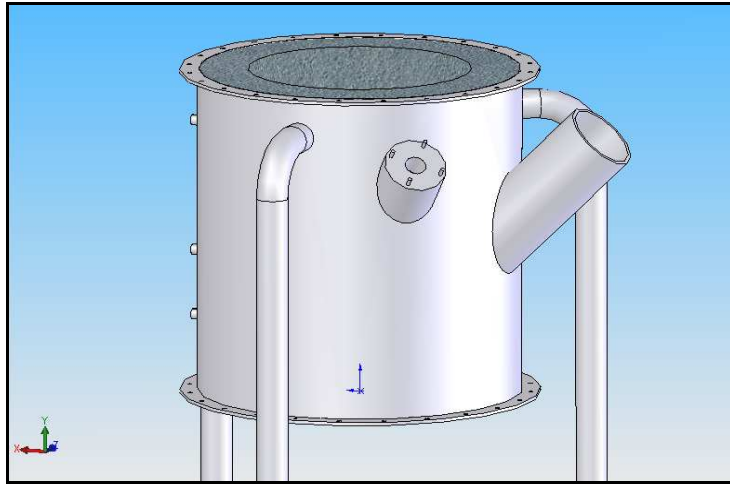
Dalam modifikasi sistem feeding ini, mekanisme yang digunakan pada sistem ini menggunakan jenis screw feeding yang diletakkan pada tempat/saluran yang sama dengan sistem feeding sebelumnya dengan fungsi memberikan suplai bahan bakar berupa sampah yang dijaga pada kecepatan tertentu agar temperatur pada ruang bakar bisa tetap stabil. Desain screw feeding ini menggunakan motor 0,75 Kw, 1450 rpm. Sistem screw feeding ini menggunakan reduction gear dengan perbandingan 1 : 30, sehingga output nya menjadi sekitar 48 rpm saja. Selain itu sistem feeding ini juga menggunakan *Inverter* yang berfungsi untuk mengatur putaran screw, dengan menggunakan *Inverter* ini, output yang dikeluarkan dapat kita atur sesuai dengan keinginan kita.

*Screw Feeder* ini terdiri dari komponen – komponen berikut ini :

- Shaft screw
- Reduction gear
- Rantai
- Sliding gate
- Screw housing
- Hopper
- Motor listrik 3 fase 0.75 Kw

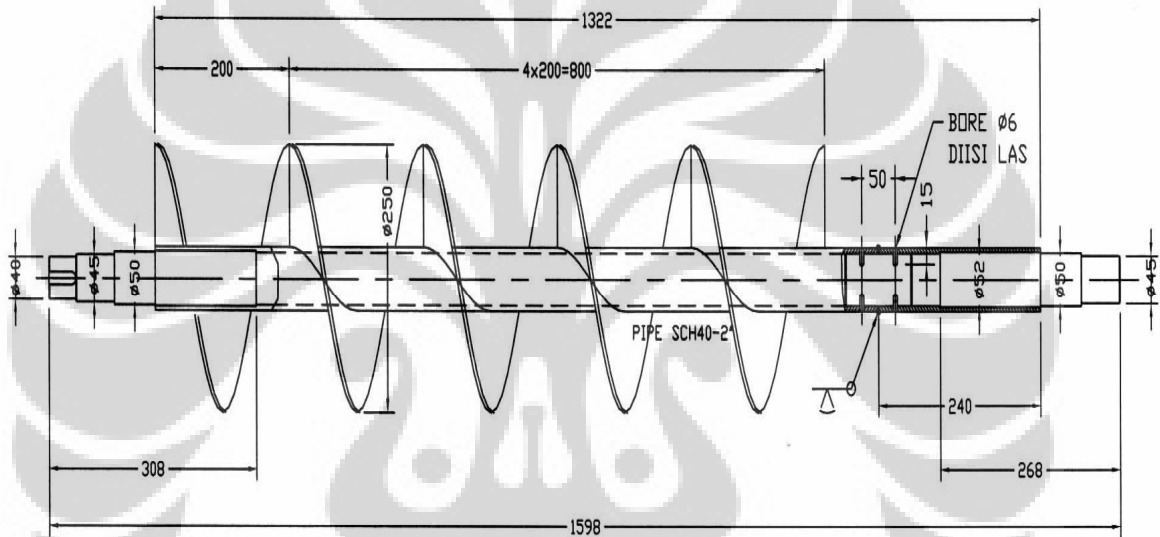
### 3.2.3. Desain Sistem Feeding

*Screw feeding* ini akan diletakkan disamping ruang bakar utama, diantara main hole dan tempat gas burner. *Screw feeding* ini akan dipasang secara horizontal, dan dikarenakan posisinya yang cukup tinggi, di sebelah *screw feeding* ini juga ditambah tangga, agar operator dapat memasukkan sampah ke dalam feeding.

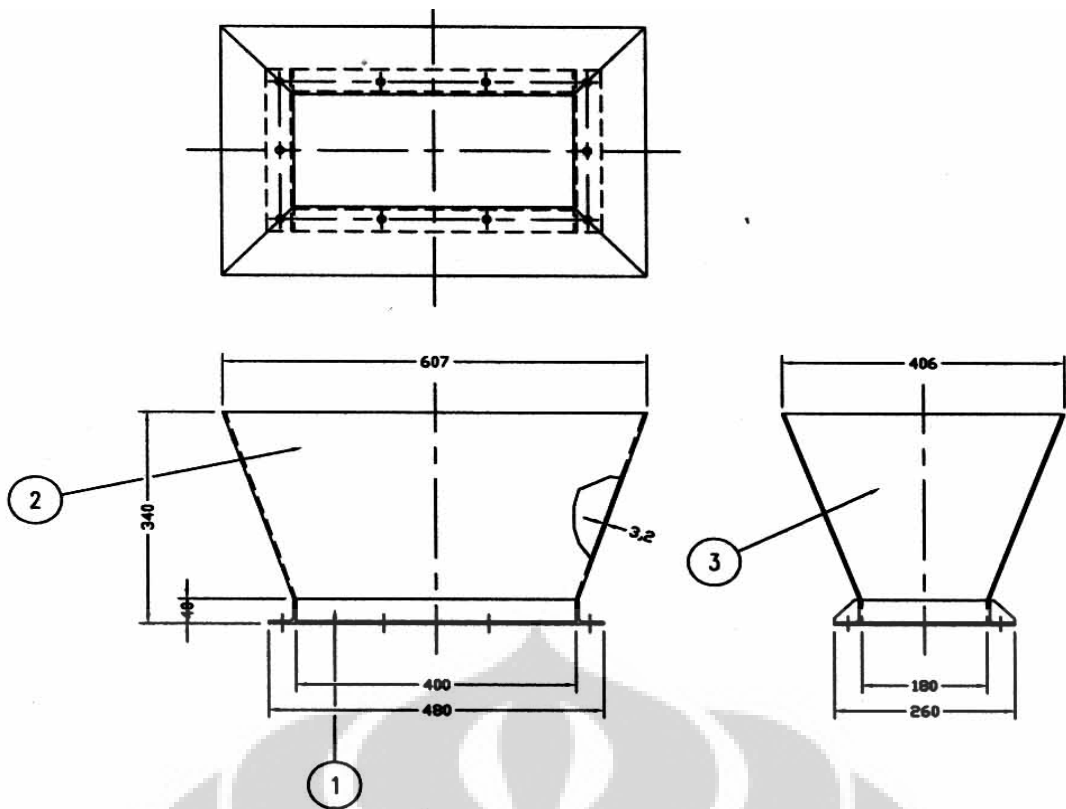


Gambar 3.11. Letak lubang feeding berada disamping lubang burner pada ruang bakar utama

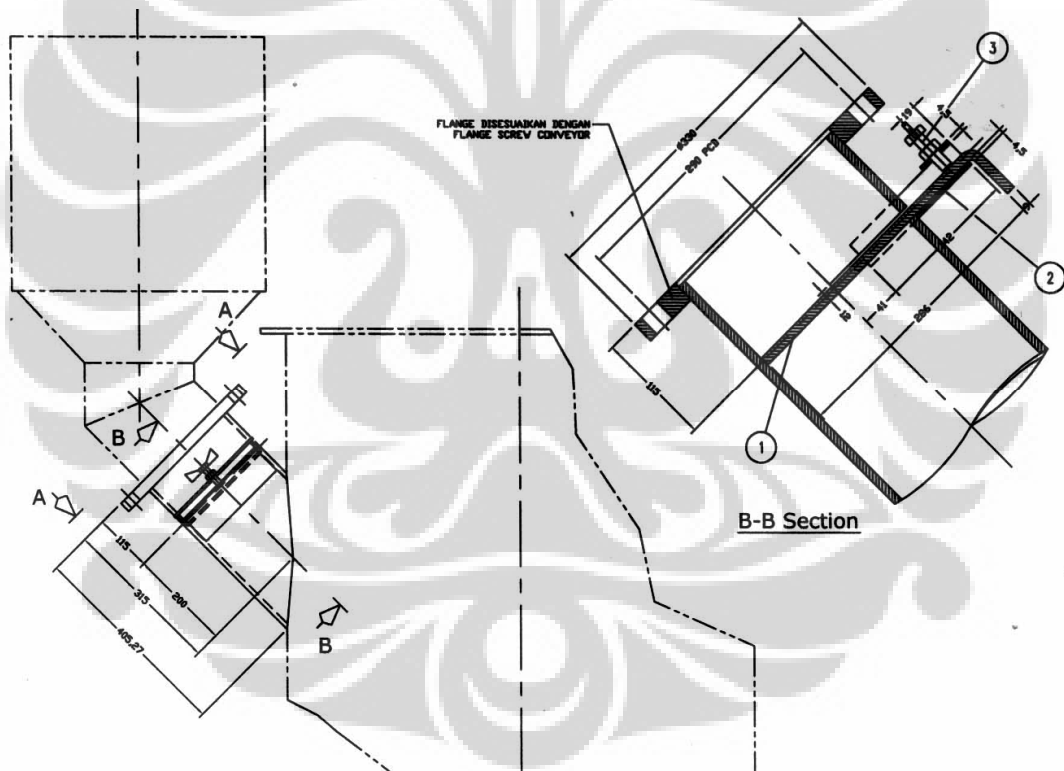
Berikut ini adalah gambar desain sistem *screw feeding* yang digunakan pada alat Incinerator UI :



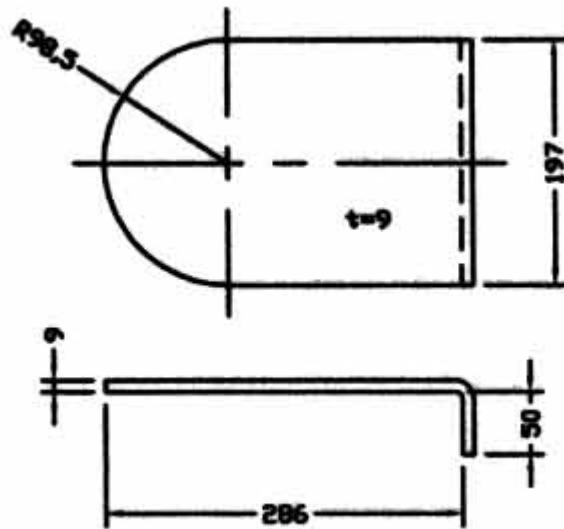
Gambar 3.12. *Screw Conveyer*



Gambar 3.13. *Feeding Chute / Hopper*



Gambar 3.14. *Sliding Gate*



Gambar 3.15. *Sliding Gate detail*

*Sliding gate* ini dibuat dengan tujuan agar sampah-sampah, gas hasil pembakaran dan bara-bara pasir yang beterbangan di dalam ruang bakar utama tidak masuk kembali ke dalam ruang feeding.

### 3.3.HASIL FABRIKASI

Proses fabrikasi *screw feeding* ini tidak memakan waktu lama dan tidak terlalu sulit. Yang dilakukan pertama adalah pemilihan material yang sesuai untuk desain yang ada. Yaitu material-material seperti pelat besi, pipa besi, rantai, gear dan mempersiapkan motor. Proses pembuatan screw-nya sendiri juga tidak terlalu sulit. Dengan menggunakan suatu alat khusus, bentuk *screw* yang diinginkan dapat dibuat. Yang dilakukan adalah pelat besi ditahan pada salah satu ujungnya dan ujung yang lain ditarik dengan menggunakan alat tersebut, sehingga bentuknya berubah menjadi bentuk screw. Lalu *screw* itupun di-las ke shaft screw-nya. Sedangkan proses-proses yang lain adalah proses-proses fabrikasi yang biasa dilakukan seperti *cutting*, *welding* dan sedikit dilakukan proses *machining*. Dibawah ini adalah gambar *screw* yang sudah jadi.



Gambar 3.16. *Screw conveyer*

Dan gambar di bawah ini adalah gambar sistem *screw feeding* yang sudah jadi dan sudah terpasang pada Incinerator UI



Gambar 3.17. *Screw Feeding* yang sudah terpasang

### 3.4. KAPASITAS FEEDING

Kapasitas feeding ini dapat diketahui melalui percobaan pada alat ataupun dapat dicari secara teoritis. Karena pada sistem *screw feeding* ini juga dipasang alat Inverter yang dapat mengatur kecepatan/output putaran screw feeding tersebut, maka kapasitas feeding ini dapat kita tentukan sendiri. Misalnya pada rpm tertentu, feeding ini memiliki kapasitas yang tertentu pula.

Untuk mengetahui kapasitas feeding ini, secara teoritis dapat dicari dengan melakukan perhitungan seperti di bawah ini.

Misalkan :

$Q$  = Debit screw feeding [ kg/jam ]

$V$  = kecepatan screw [ m/s ]



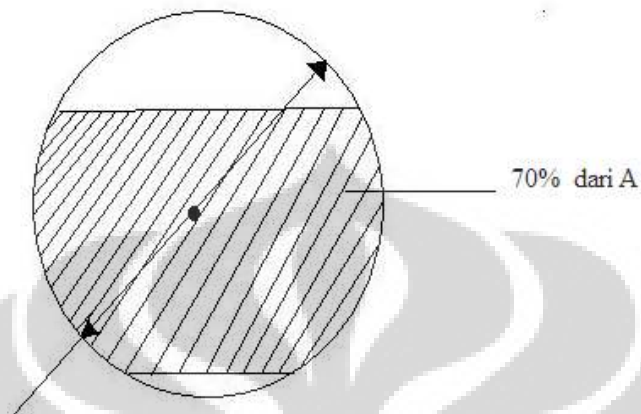
$n = \text{rpm}$

$A = \text{luas ( tidak penuh, hanya 70\% saja) } [m^2]$

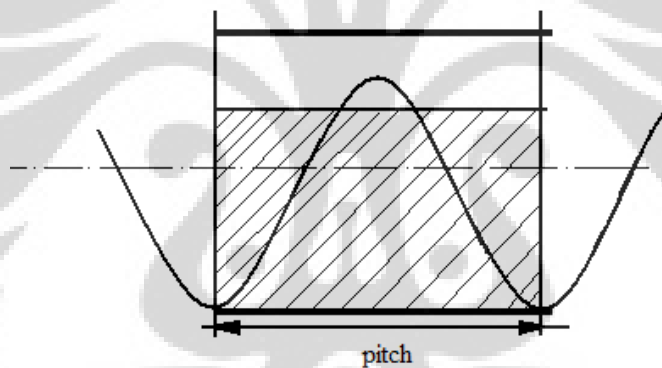
$\rho = \text{berat jenis sampah } [Kg/m^3]$

$pitch = \text{jarak antar pitch pada screw } [mm]$

Seperti yang kita ketahui bahwa tidak mungkin sampah-sampah dapat memenuhi tempat feeding secara 100%. Sehingga diasumsikan di dalam feeding hanya terisi sampah sekitar 70% saja, seperti di ilustrasikan pada gambar di bawah ini.



Gambar 3.18. Ilustrasi sampah di dalam feeding



Gambar 3.19. Tampak samping ilustrasi sampah didalam feeding

Sehingga jika kita masukkan kedalam rumus, maka :

$$Q = A.V.\rho$$

Dimana,

$$V = \omega.pitch$$



$$V = \frac{2\pi n}{60} \left[ \frac{1}{\text{sec}} \right] \cdot \text{pitch} [\text{mm}]$$

Sehingga,

$$Q = A [m^2] \cdot \frac{2\pi n}{60} \left[ \frac{1}{\text{sec}} \right] \cdot \text{pitch} [\text{mm}] \cdot \rho [kg / m^3]$$

Berdasarkan perhitungan (dengan menggunakan putaran rpm maksimum dan jenis sampah organik) kapasitas maksimum feeding ini adalah sebesar 62,86 kg/jam

Kapasitas feeding ini juga bisa dicari dengan cara eksperimen pada alat. Yaitu dengan cara dilakukan percobaan pada rpm-rpm tertentu yang kita inginkan.

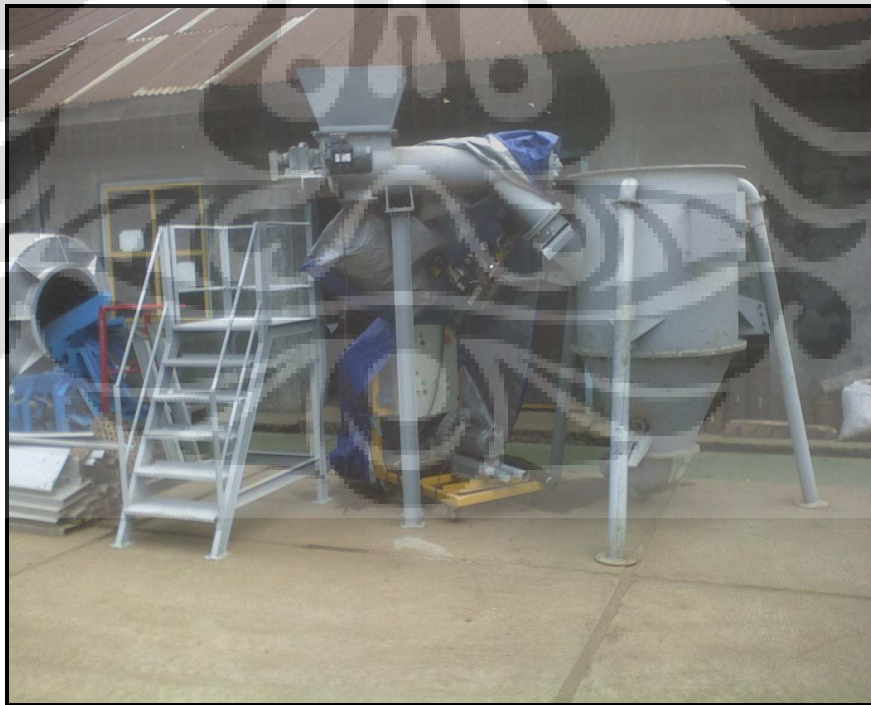


Gambar 3.20.. sampah organik yang digunakan

## **BAB IV**

### **PERSIAPAN DAN PROSEDUR PENGUJIAN**

Sebelum dilakukan pengoperasian *fluidized bed incinerator* UI secara baik maka perlu dilakukan pengujian alat ini secara keseluruhan. Pengujian alat ini bertujuan untuk melihat karakteristik alat *fluidized bed incinerator* UI dan melihat bagaimana perubahan hasil modifikasi yang telah dilakukan pada alat tersebut. Dalam melakukan suatu pengujian pada suatu alat, maka diperlukan persiapan dan prosedur pengujian yang sesuai dengan kondisi dari alat tersebut. Hal ini dimaksudkan agar dalam melakukan proses operasional saat pengujian menjadi lebih efektif, lebih efisien dan memperoleh hasil yang maksimal.



Gambar 4.1. Alat fluidized bed incinerator UI

Begitu juga halnya dengan pengoperasian untuk alat *fluidized bed incinerator* yang ada di Universitas Indonesia. Sebelum dilakukan pengujian alat lebih lanjut maka harus disiapkan terlebih dahulu dua hal yaitu persiapan alat dan prosedur pengujian. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian aliran dingin (*cold flow*) dengan proses fluidisasi dan aliran panas (*hot flow*) dengan proses pembakaran. Pengujian *cold flow* dimaksudkan untuk melihat karakteristik fluidisasi pada *fluidized bed incinerator* UI dengan melihat nilai penurunan tekanan pada hamparan pasir di reaktor. Pengujian *hot flow* dimaksudkan untuk melihat karakteristik pembakaran pada *fluidized bed incinerator* UI dengan melihat distribusi temperatur di sepanjang ketinggian reaktor dan hubungannya terhadap waktu.

#### **4.1 PERSIAPAN**

Sebelum melakukan pengujian maka perlu dilakukan persiapan terlebih dahulu. Persiapan tersebut meliputi penentuan parameter-parameter yang digunakan dalam pengoperasian alat *fluidized bed incinerator* UI ini seperti klasifikasi pasir yang digunakan, kecepatan fluidisasi minimum, penurunan tekanan melintas hamparan, penurunan tekanan melintas distributor, blower, distributor, penempatan termokopel di ruang bakar dan peralatan perlengkapan yang dibutuhkan.

##### **4.1.1 Klasifikasi Pasir Yang Digunakan**

Klasifikasi pasir yang akan digunakan akan sangat berpengaruh terhadap berhasil tidaknya proses fluidisasi yang dihasilkan. Dalam menentukan jenis pasir yang akan digunakan pada alat *fluidized bed incinerator* UI ini sebaiknya menggunakan pasir silika ( $SiO_2$ ) atau pasir kuarsa (*quartz*) untuk tujuan mendapatkan fluidisasi yang baik dengan densitas partikelnya 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 delta temperatur yang sama, dua material yang berbeda dengan nilai kalor jenis yang jauh berbeda akan memiliki

besar jumlah kalor yang jauh berbeda pula yang dibutuhkan untuk menaikkan temperaturnya. Sebagai perbandingan nilai *specific heat* untuk substansi-substansi yang lain dapat kita lihat pada tabel 5.1.

**Tabel 4.1.** *Specific heat* untuk berbagai substansi

<i>Substansi</i>	<i>Specific Heat</i> ( <i>cal/gram.°C</i> )	<i>Specific Heat</i> ( <i>J/kg.°C</i> )
air (murni)	1,00	4186
lumpur basah	0,60	2512
es (0 °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

Kemudian setelah memilih jenis pasir yang digunakan, maka ditentukan ukuran diameter partikel pasir yang digunakan dalam alat FBI. Jenis pasir yang digunakan sudah pasti antara pasir silika dan pasir kuarsa yang mana memiliki densitas partikel sebesar  $2600 \text{ kg/m}^3$ . 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 pencampuran yang baik dibandingkan *group A* dan *group B*. Dengan demikian partikel pasir yang paling baik digunakan untuk aplikasi *fluidized bed incinerator* 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 pada tabel 5.2 merupakan tabel ukuran diameter lubang ayakan (*mesh*) menurut standar 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 30 *mesh* sampai 40 *mesh*. Setelah menentukan partikel pasir yang digunakan yaitu pasir silika atau kuarsa dengan ukuran partikel pasir 30 sampai 40 *mesh*, maka dapat diketahui beberapa hal lainnya seperti kecepatan fluidisasi minimum .

**Tabel 4.2.** Standar ukuran ayakan amerika

Sieve No.	Diameter Lubang (mm)
10	2,000
20	0,850
30	0,600
40	0,425
50	0,300
60	0,250
80	0,180
100	0,150

Sumber: Braja M. Das



Gambar 4.2. Pasir silika

#### 4.1.2 Kecepatan Fluidisasi Minimum

Kecepatan fluidisasi minimum adalah kecepatan superficial terendah yang dibutuhkan untuk terjadinya fluidisasi. Jika  $U_{mf}$  tidak dapat ditentukan secara

eksperimental, maka dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.3 di bab dua, yaitu:

$$Re_{mf} = (1135,7 + 0,0408.A_r)^{1/2} - 33.7$$

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

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

bilangan *Archimedes* ( $Ar$ ) :

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

Dengan melihat data-data yang ada pada alat FBI ini, maka dapat dilakukan suatu perhitungan untuk mendapatkan nilai kecepatan fluidisasi minimum. Data-data tersebut yaitu:

#### **Parameter Perhitungan**

Pasir Silika 20 - 40 mesh

Particle density ( $\rho_p$ )	=	2600	kg/m <sup>3</sup>
Bulk density ( $\rho_b$ )	=	1600	kg/m <sup>3</sup>
Kalor jenis ( $c$ )	=	0.2	cal/gram.K
Diameter partikel rata-rata ( $d_p$ )	=	0.000372559	m

Bed Voidage	=	0.384615385
-------------	---	-------------

#### **Reaktor Utama Fluidized Bed Incinerator**

Diameter reaktor ( $d_r$ )	=	0.635	m
Tinggi reaktor ( $t_r$ )	=	1	m
Luas permukaan reaktor ( $A_r$ )	=	0.317	m <sup>2</sup>

Langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan. Perhitungan-perhitungan yang dilakukan pada kondisi ambien dan kondisi operasi adalah dengan tahapan-tahapan sebagai berikut :

### Gas Distributor (perforated plate)

Tebal plat ( t )	=	0.009	m
Diameter orifis ( dor )	=	0.02	m
Luas orifis ( Aor )	=	0.000314	m <sup>2</sup>
Jumlah orifis	=	89	
Fractional total open area ( for )	=	0.088	
Kecepatan udara melalui orifis ( Uor )			
Uor = Uo / for	=	3.696	m/s
Orifice discharge coefficient ( Cd )	=	0.739	
Jarak antar pusat lubang orifis	=	0.06	m

### Hamparan (bed) Pasir Silika

Tinggi pasir di reaktor ( h )	=	0.15	m
Volume hamparan ( v )			
v = A × h	=	0.048	m <sup>3</sup>
Massa hamparan ( m )			
m = ρb × v	=	76.01	kg
	=	76006	gr
Diameter hamparan ( db )	=	0.635	m
Luas permukaan hamparan ( Ab )			
Ab = Ar	=	0.317	m <sup>2</sup>
T1 (suhu ruang)	=	27	°C
	=	300	K
T2 (suhu operasi)	=	800	°C
	=	1073	K
ΔT	=	773	K
Percepatan gravitasi ( g )	=	9.81	m/s <sup>2</sup>

### Suplai udara dari blower (ring blower)

Debit udara (maks)	=	6.2	m <sup>3</sup> /min
	=	0.103	m <sup>3</sup> /s
Diameter outlet blower	=	0.0508	m

$$\begin{aligned} \text{Luas outlet blower} &= 0.0020 \text{ m}^2 \\ \text{Kecepatan udara pd outlet blower} &= 50.983 \text{ m/s} \\ \text{Kecepatan udara pd ruang plenum} &= \text{superficial velocity ( } U_o \text{ )} \\ U_o &= 0.326 \text{ m/s} \end{aligned}$$

#### **Fluida udara pada kondisi ambien ( T = 27 oC )**

$$\begin{aligned} \text{Massa jenis udara ( } \rho_f \text{ )} &= 1.179766047 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Viskositas udara ( } \mu_f \text{ )} &= 0.000018199 \text{ N.s/m}^2 \end{aligned}$$

#### **Fluida udara pada kondisi operasi ( T = 850 oC )**

$$\begin{aligned} \text{Massa jenis udara ( } \rho_f \text{ )} &= 0.328441282 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Viskositas udara ( } \mu_f \text{ )} &= 0.00004090642601759 \text{ N.s/m}^2 \end{aligned}$$

#### **Q Pasir Silika**

$$\begin{aligned} Q = m \times c \times \Delta T &= 11750546 \text{ cal} \\ Q &= 11751 \text{ kcal} \end{aligned}$$

Maka Q yang dibutuhkan untuk memanaskan pasir silika sampai suhu 800 °C adalah 11751 kcal.

Asumsi heat loss 30%, maka heat total adalah 20614.1 kcal  $\approx$  20000 kcal

#### **Pressure Drop Melintas Hampanan**

- pada kondisi ambien

$$\Delta P_b = 2353 \text{ Pa}$$

- pada kondisi operasi

$$\Delta P_b = 2354 \text{ Pa}$$

Maka pressure drop melintas hampanan sebesar, pada kondisi ambien  $\Delta P_b = 2983$  Pa dan pada kondisi operasi  $\Delta P_b = 2984$  Pa

#### **Pressure Drop Melintas Distributor**

- pada kondisi ambien

$$\Delta P_D = 14.74 \text{ Pa}$$

- pada kondisi operasi



$$\Delta PD = 4.11 \text{ Pa}$$

### Kecepatan Fluidisasi Minimum

#### Perhitungan bilangan Archimedes (Ar)

- pada kondisi ambien

$$Ar = 4696$$

- pada kondisi operasi

$$Ar = 259$$

#### Perhitungan bilangan Remf

- pada kondisi ambien

$$Remf = 2.732$$

- pada kondisi operasi

$$Remf = 0.1565$$

#### Perhitungan kecepatan fluidisasi minimum

- pada kondisi ambien

$$U_{mf} = 0.113 \text{ m/s}$$

- pada kondisi operasi

$$U_{mf} = 0.052 \text{ m/s}$$

#### Maka, debit udara minimum agar terjadi fluidisasi

- pada kondisi ambien

$$Q = 0.036 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 2.15 \text{ m}^3/\text{min}$$

- pada kondisi operasi

$$Q = 0.017 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 0.99 \text{ m}^3/\text{min}$$

Ternyata kecepatan fluidisasi minimum pada alat FBI ini adalah sebesar  $0,113 \text{ m/s}$  pada kondisi ambien ( $T = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ ) sampai  $0,052 \text{ m/s}$  pada kondisi operasi ( $T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Sehingga debit aliran udara dari blower yang dibutuhkan agar terjadi fluidisasi minimum adalah sebesar  $0,036 \text{ m}^3/\text{s}$  pada kondisi ambien sampai  $0,017 \text{ m}^3/\text{s}$  pada kondisi operasi. Namun ini hanya menunjukkan sampai terjadi

fluidisasi minimum dan supaya terjadi fluidisasi berkecepatan tinggi, maka debit aliran udara harus lebih besar lagi.

#### 4.1.3 Blower

Blower digunakan untuk memberikan udara yang dibutuhkan untuk fluidisasi dan reaksi pembakaran. Blower digunakan untuk memfluidisasi pasir dan bahan bakar yang ada di ruang bakar. Selain itu, juga untuk menghasilkan turbulensi pada ruang bakar, sehingga terjadi kontak antara pasir dengan bahan yang akan dibakar. Proses pemilihan blower ini didapat dengan mencari blower yang diinginkan, dan tentu saja yang tersedia dipasaran, dengan melihat debit aliran minimum yang dihasilkan dari blower tersebut.

Spesifikasi Blower pengganti yang digunakan adalah:

- Ring Blower merk Chen Fung
- Motor listrik 3 fase
- Putaran maksimum 2800 rpm
- Daya motor 2.2 Kw
- Tipe RB-033 (2200)



Gambar 4.3. *Blower* yang Digunakan

#### 4.1.4 Distributor

Proses fluidisasi tidak akan terlepas dari peranan distributor. Distributor dapat menentukan banyaknya gelembung yang dihasilkan. Kemudian, distributor

juga mempengaruhi besarnya debit aliran udara dari blower yang akan digunakan, karena penurunan tekanan yang terjadi untuk setiap jenis distributor.

Berdasarkan Geldart [h. 104. 1991], *pressure drop* untuk distributor jenis *porous plate* memiliki penurunan tekanan lebih kecil daripada distributor-distributor lain yang memiliki lubang orifis. Penurunan tekanan ini sangat dipengaruhi oleh kecepatan aliran udara yang melewati distributor. Ini dapat diekspresikan pada persamaan yang ada di bawah ini.

$$\Delta p_d \propto u_o$$
, untuk *porous plate*

$$\Delta p_d \propto u_o^2$$
, untuk *perforated plate* dan *tuyere*

Karena pertimbangan tersebut, maka distributor yang digunakan adalah distributor yang berjenis *porous plate*. Semakin banyaknya lubang yang ada pada distributor ini dapat lebih mendistribusikan udara yang dihasilkan, serta dengan sendirinya akan mengurangi penurunan tekanan yang terjadi. Distributor yang berjenis porous plate dapat dilihat pada gambar 4.2



Gambar 4.4. Distributor Jenis *Porous Plate*

#### 4.2 PROSEDUR PENGUJIAN ALIRAN DINGIN (*COLD FLOW*)

Awal dari pengoperasian untuk alat FBI ini adalah memanaskan pasir sampai temperatur tertentu, untuk kemudian dapat membakar bahan bakar (sampah). Proses pemanasan ini membutuhkan metode yang cukup optimal agar dapat memanaskan pasir secara menyeluruh, dan cepat.

Tetapi sebelum, itu dapat dilakukan dulu pengujian aliran dingin. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah proses fluidisasi yang terjadi sudah cukup ideal atau belum. Untuk mendapatkan standar operasional yang dapat dikerjakan oleh orang-orang awam, maka diperlukan pengujian-pengujian dan percobaan yang berulang-ulang. Pengujian-pengujian yang dilakukan ini bertujuan untuk mencari prosedur yang ideal.

#### Prosedur Pengujian Cold Flow

1. Pasir silika dituang ke dalam reaktor

Sebanyak kurang lebih 100 kg pasir silika dituang ke dalam reaktor *fluidized bed incinerator* UI. Tinggi hamparan pasir dalam reaktor akan menjadi setinggi kira-kira 20 cm.

2. Manometer disiapkan

Sebuah manometer  $H_2O$  disiapkan untuk mengukur penurunan tekanan (pressure drop) yang melintas hamparan pasir. Kedua selang sambungan dimasukkan ke dalam reaktor melalui lubang termokopel. Selang pertama dimasukkan melalui lubang termokopel 1, sedangkan selang kedua dimasukkan melalui lubang termokopel 2.

3. Blower dinyalakan

Blower mulai dinyalakan untuk proses fluidisasi. Namun blower tidak dioperasikan langsung pada putaran maksimum. Putaran motor blower diatur dari putaran rendah dulu baru kemudian secara bertahap dinaikkan sampai putaran maksimum. Untuk mengatur putaran motor blower tersebut dilakukan dengan menggunakan sebuah inverter

4. Pengambilan data

Pengambilan data dilakukan dengan mencatat besar nilai penurunan tekanan setiap putaran motor blower dari putaran rendah secara bertahap dinaikkan sampai putaran maksimum.

## BAB V

### HASIL DAN DISKUSI

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah Memodifikasi *fluidized bed incinerator* UI yang sudah ada untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal dan lebih efisien serta melakukan pengujian aliran dingin untuk mempelajari karakteristik fluidisasi apakah dapat tercapai sesuai dengan yang diharapkan dan bagaimana hubungannya dan pengaruhnya dari komponen-komponen yang lainnya terhadap proses fluidisasi.

Untuk menjalankan *screw feeding* ini, putaran dari *screw* tersebut dapat kita atur sesuai keinginan kita sendiri. Untuk dapat melakukan hal tersebut, maka dibutuhkan satu alat tambahan yang disebut dengan *inverter* dan alat *inverter* ini terdapat didalam control panel. (gambar 5.1)



Gambar 5.1. *control panel*

Satu alat *inverter* tersebut memiliki fungsi yang bermacam-macam terhadap mekanisme kerja dari *screw feeding*. Fungsi yang dimiliki oleh inverter tersebut adalah :

- Sebagai alat *convert* listrik dari 1 *phase* menjadi 3 *phase*.

Hal ini diperlukan karena motor yang digunakan untuk menggerakkan *screw feeding* harus dijalankan dengan menggunakan listrik yang memiliki arus 3 *phase*. Sementara itu, sumber listrik yang berasal dari PLN masih menggunakan arus yang 1 *phase*.

- Sebagai alat pengatur kecepatan putaran *screw feeding*.
- Sebagai alat *contactor*.

*Contactor* berfungsi sebagai alat pemutus hubungan listrik apabila terjadi beban yang berlebih. Setiap operasional dari motor, harus menggunakan alat ini untuk melindungi motor itu sendiri, serta kapasitor yang dimiliki setiap motor. *Inverter* yang ada ini memiliki kemampuan tersebut.

Sedangkan untuk pengujian aliran dingin, sebelumnya telah dilakukan pengujian pada alat pemodelan fluidisasi yang terdapat pada lantai 3 departemen teknik mesin UI. Hal ini dilakukan untuk melihat dan membandingkan karakteristik fluidisasi yang terjadi pada alat *Fluidized Bed Incinerator* dengan alat pemodelan ini.

Alat "*Fluidization and Fluid Bed Heat Transfer Unit H692*", merupakan alat pemodelan fenomena fluidisasi untuk skala eksperimental. Alat ini terdiri dari sebuah silinder kaca vertikal yang diisi dengan pasir alumina ( $Al_2O_3$ ). Pada bagian bawahnya terdapat plat distributor udara untuk mendukung pasir alumina yang berada di atasnya. Distributor ini dirancang untuk memastikan terjadinya aliran udara yang terdistribusi secara seragam tanpa menyebabkan terjadinya *pressure drop* yang berlebihan dan sesuai dengan pasir yang digunakan.

Saat meninggalkan hamparan pasir (*bed*), udara melewati ruangan di atasnya (*chamber*) dan meninggalkan menuju lingkungan melalui sebuah filter. Chamber, filter dan distributor dipasang tergantung pada braket yang ditempel pada sebuah panel. Pada braket ini dipasang probe untuk temperatur dan pengukuran tekanan, dan sebuah elemen pemanas berbentuk silinder, yang semuanya dapat digerakkan secara vertikal pada ketinggian berapa pun dalam *chamber*. Udara bertekanan yang disuplai dialirkan melalui sebuah *pressure regulator*, sebuah alat pengukur aliran udara yang disusun dengan sebuah katup kontrol dan sebuah plat orifis (untuk mengukur laju aliran yang lebih tinggi), kemudian menuju distributor.

Ketika digunakan, laju perpindahan kalor dari elemen pemanas dikontrol dengan sebuah *variable transformer*, serta tegangan dan arus yang ditampilkan pada panel. Dua termokopel dilekatkan pada permukaan elemen pemanas tersebut. Salah satu

termokopel tersebut menunjukkan temperatur permukaannya, dan yang lainnya dengan ditambahkan kontroler, untuk menjaga temperatur dari elemen pemanas tidak melebihi nilai yang ditentukan (sampai  $200^{\circ}\text{C}$ ). Indikator temperatur digital menampilkan temperatur dari elemen pemanas, udara yang disuplay menuju distributor, dan probe yang dapat digerakkan dalam *chamber*.

Dua manometer dipasang pada panel. Salah satunya digunakan untuk menampilkan tekanan udara pada ketinggian berapa pun dalam chamber, dan yang lain digunakan untuk menampilkan perbedaan tekanan pada orifis.

Keistimewaan alat ini adalah kemudahannya mengganti material pasir yang digunakan dalam chamber.

### Spesifikasi

#### 1. Chamber

- bahan : silinder kaca
- diameter dalam :  $105\text{ mm}$
- tinggi :  $220\text{ mm}$
- luas penampang :  $8660\text{ mm}^2$

#### 2. Elemen pemanas

- bahan : tembaga
- diameter :  $12.7\text{ mm}$
- panjang :  $37\text{ mm}$
- luas permukaan :  $16\text{ cm}^2$

#### 3. Pasir

- jenis : fused alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- ukuran partikel :  $125 - 350\ \mu\text{m}$
- massa jenis :  $3770\text{ kg/m}^3$

#### 4. Suplai udara (kompresor)

- daya :  $0.5\text{ HP}$
- putaran motor :  $1400\text{ rpm}$
- tekanan :  $70\text{ bar}$
- debit :  $0.15/1.7\text{ l/s}$

### Pengoperasian

Alat ini mempunyai dua kontrol,

1. Katup kontrol aliran udara (*air flow control valve*)

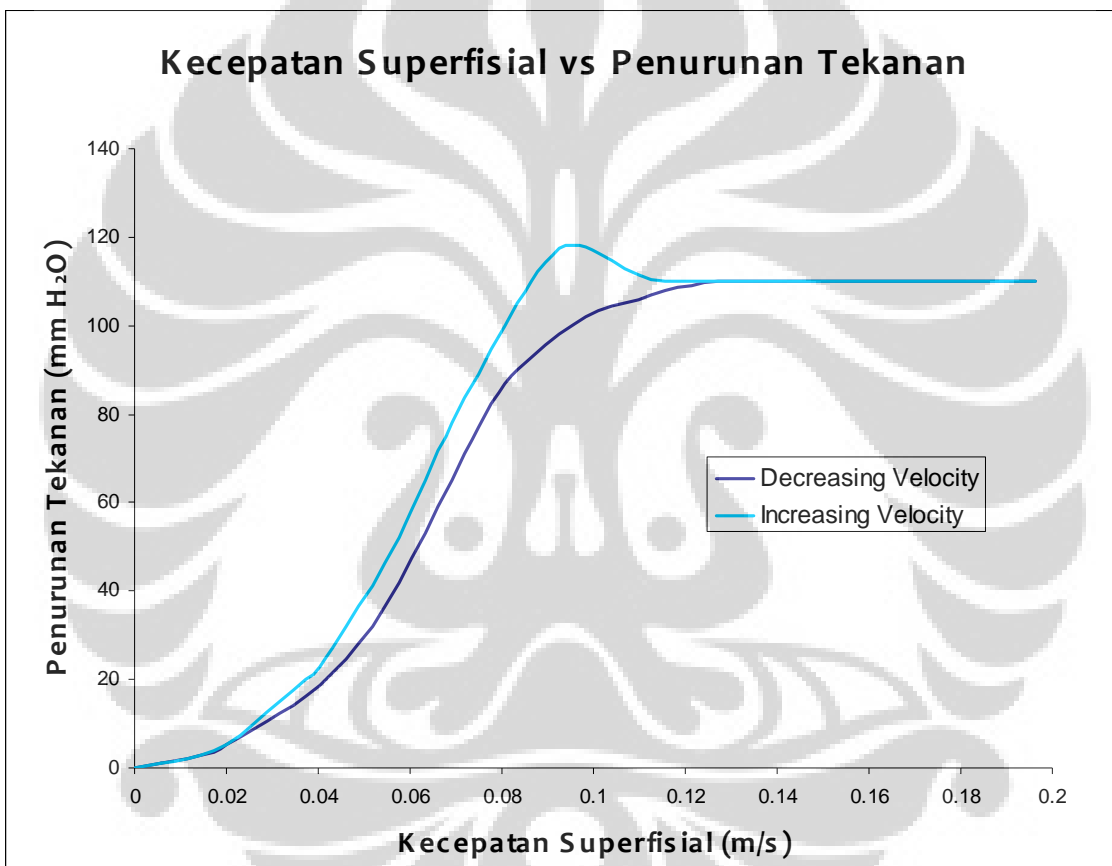
Katup kontrol ini diletakkan di bawah air flow meter dan dimaksudkan untuk mengontrol laju udara yang masuk mengalir melalui hamparan pasir (*bed*).

2. *Variable transformer*

Diatur dengan menggunakan knob hitam yang terletak di tengah-tengah panel dan digunakan untuk mengontrol tegangan yang dipakai untuk elemen pemanas.

Kemampuan eksperimental alat

1. Pengamatan kelakuan dari partikel partikel pada hamparan dengan aliran udara ke atas.
2. Penelitian hubungan antara tinggi hamparan, penurunan tekanan pada hamparan dan kecepatan aliran udara ke atas melalui hamparan pasir.
3. Penelitian pengaruh dari rancangan distributor pada perilaku hamparan.



Gambar 5.2. kurva hubungan antara kecepatan superfisial dan penurunan tekanan.



Tabel 5.1. hasil percobaan pada alat “*Fluidization and Fluid Bed Heat Transfer Unit H692*”

Laju Aliran Udara (l/s)	Kecepatan Superfisial (m/s)	Tinggi Hambaran (cm) - increasing velocity -	Tinggi Hambaran (cm) - decreasing velocity -	Penurunan Tekanan (mm H <sub>2</sub> O) - increasing velocity -	Penurunan Tekanan (mm H <sub>2</sub> O) - decreasing velocity -
0	0	7	8.1	0	0
0.05	0.01	7	8.1	1	1
0.1	0.01	7	8.1	2	2
0.15	0.02	7	8.1	4	3.5
0.2	0.02	7	8.1	7.5	7
0.25	0.03	7	8.1	12.5	10.5
0.3	0.03	7	8.1	17.5	14
0.35	0.04	7	8.1	23	18.5
0.4	0.05	7	8.1	32	24.5
0.45	0.05	7	8.1	41	32
0.5	0.06	7	8.1	52	42
0.55	0.06	7	8.1	65	53
0.6	0.07	7.2	8.1	78	65
0.65	0.08	8	8.1	89	77
0.7	0.08	8.2	8.1	100	87
0.75	0.09	8.4	8.2	110	93
0.8	0.09	8.5	8.4	117.5	98
0.85	0.10	8.6	8.6	118	102
0.9	0.10	8.8	8.8	114.5	104.5
0.95	0.11	9	9	111.5	106
1	0.12	9.2	9.2	110	108
1.05	0.12	9.4	9.4	110	109
1.1	0.13	9.5	9.5	110	110
1.15	0.13	9.6	9.6	110	110
1.2	0.14	9.7	9.7	110	110
1.25	0.14	9.7	9.7	110	110
1.3	0.15	9.8	9.8	110	110
1.35	0.16	9.8	9.8	110	110
1.4	0.16	9.9	9.9	110	110
1.45	0.17	9.9	9.9	110	110
1.5	0.17	10	10	110	110
1.55	0.18	10	10	110	110
1.6	0.18	10.1	10.1	110	110
1.65	0.19	10.1	10.1	110	110
1.7	0.20	10.2	10.2	110	110

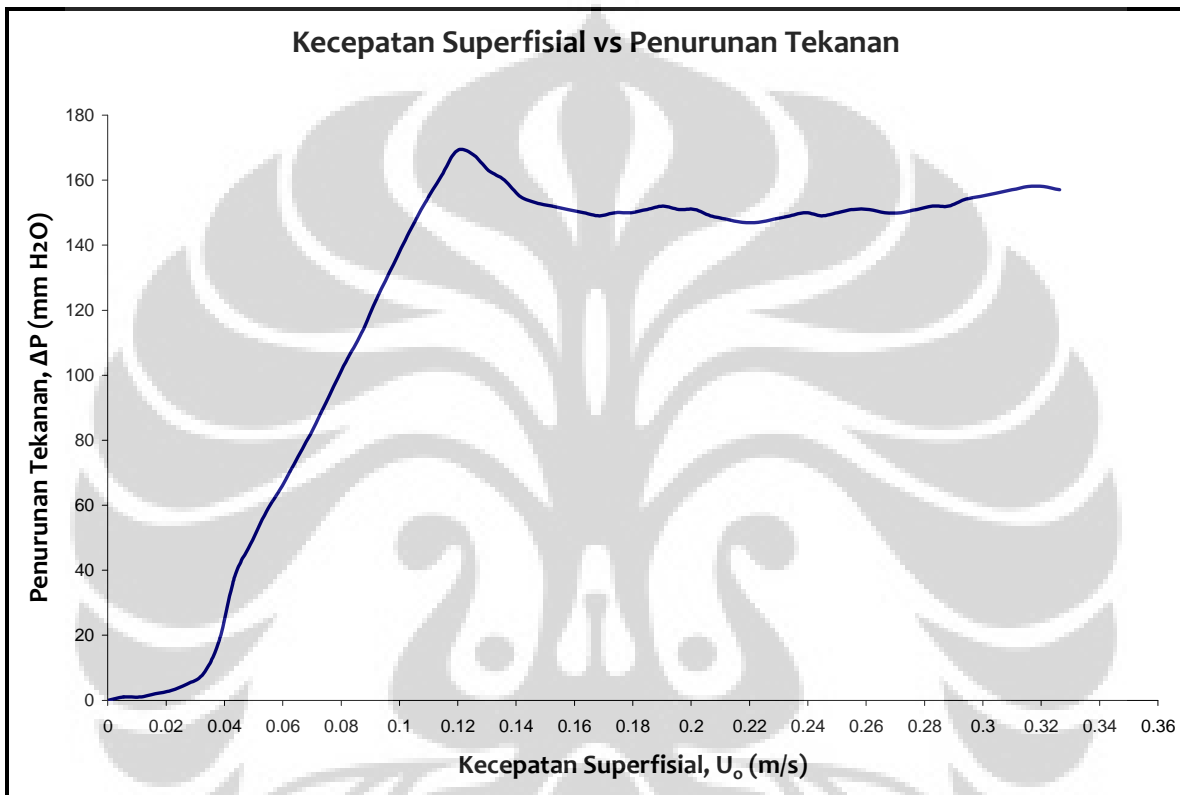
Dan berikut ini adalah data hasil pengujian aliran dingin yang telah dilakukan pada *Fluidized Bed Incinerator*. Berdasarkan pengujian *cold flow* yang telah dilakukan maka didapatkan data pengujian berupa nilai penurunan tekanan yang melintas distributor dan hambaran pasir dengan variabel putaran motor blower.

Tabel 5.2. hasil pengujian aliran dingin

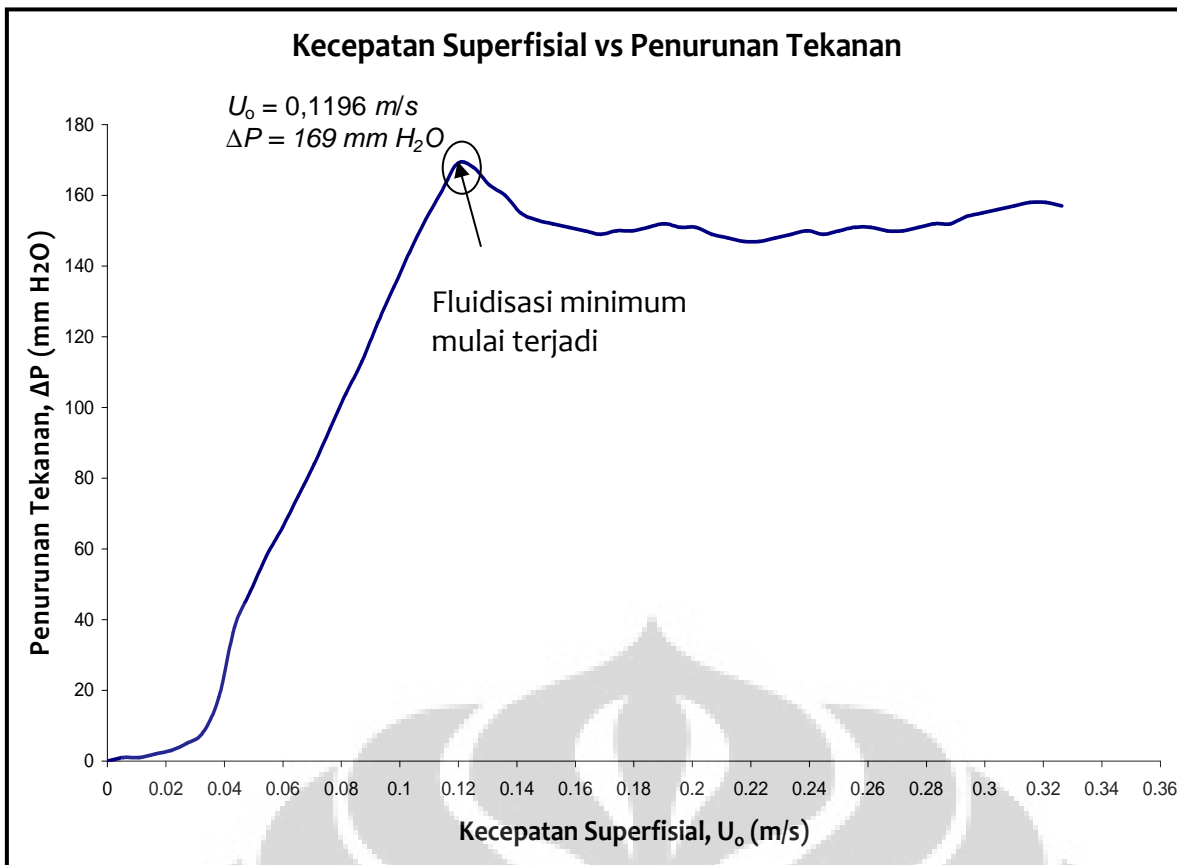
<b>Putaran</b>	<b>Kecepatan Superfisial, <math>U_o</math></b>	<b>Penurunan Tekanan, <math>\Delta P</math></b>
<i>rpm</i>	<i>m/s</i>	<i>mm H<sub>2</sub>O</i>
0	0	0
47	0.005438	1
93	0.010876	1
140	0.016314	2
187	0.021753	3
233	0.027191	5
280	0.032629	8
327	0.038067	18
373	0.043505	38
420	0.048943	48
467	0.054382	58
513	0.05982	66
560	0.065258	75
607	0.070696	84
653	0.076134	94
700	0.081572	104
747	0.087011	113
793	0.092449	124
840	0.097887	134
887	0.103325	144
933	0.108763	153
980	0.114201	161
1027	0.119639	169
1073	0.125078	167
1120	0.130516	163
1167	0.135954	160
1213	0.141392	155
1260	0.14683	153
1307	0.152268	152
1353	0.157707	151
1400	0.163145	150
1447	0.168583	149
1493	0.174021	150
1540	0.179459	150
1587	0.184897	151
1633	0.190336	152
1680	0.195774	151
1727	0.201212	151
1773	0.20665	149
1820	0.212088	148
1867	0.217526	147
1913	0.222964	147
1960	0.228403	148
2007	0.233841	149
2053	0.239279	150
2100	0.244717	149
2147	0.250155	150
2193	0.255593	151

2240	0.261032	151
2287	0.26647	150
2333	0.271908	150
2380	0.277346	151
2427	0.282784	152
2473	0.288222	152
2520	0.293661	154
2567	0.299099	155
2613	0.304537	156
2660	0.309975	157
2707	0.315413	158
2753	0.320851	158
2800	0.32629	157

Bila data pengujian *cold flow* di atas diplot dalam grafik maka didapatkan grafik hubungan antara kecepatan superfisial dan penurunan tekanan.



Gambar 5.3. Grafik “Kecepatan Superfisial vs Penurunan Tekanan”



Gambar 5.4. Grafik “Kecepatan Superfisial vs Penurunan Tekanan” hasil pengujian *cold flow* alat *fluidized bed incinerator* UI

Dalam pengujian *cold flow* yang dilakukan dapat dilihat karakteristik fluidisasi pada alat *fluidized bed incinerator* UI ini. Hubungan antara kecepatan superfisial dan penurunan tekanan yang melintas distributor dan hamparan pasir, seperti yang diilustrasikan pada gambar diatas, sudah menggambarkan karakteristik fluidisasi alat *fluidized bed incinerator* UI ini. Bila dibandingkan antara data perhitungan dengan data pengujian ternyata memiliki korelasi yang sangat signifikan. Berdasarkan pengujian aliran dingin (*cold flow*) yang telah dilakukan, diperoleh bahwa kondisi fluidisasi minimum mulai terjadi pada kecepatan superfisial aliran udara,  $U_o = 0,1196 \text{ m/s}$ , sedangkan berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan bahwa kondisi fluidisasi minimum mulai terjadi pada kecepatan aliran udara,  $U_{mf} = 0,113 \text{ m/s}$ . Dapat dilihat bahwa besar perbedaannya kurang dari 6 %, sehingga dapat dipastikan bahwa kondisi fluidisasi minimum mulai terjadi pada kecepatan aliran udara kisaran  $0,11 \text{ m/s}$ .

## BAB VI

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 6.1 KESIMPULAN

Hasil modifikasi sistem feeding berupa *screw feeding* pada *Fluidized Bed Incinerator* ini memiliki kelebihan-kelebihan dibandingkan dengan sistem feeding yang dulu digunakan. Kelebihan-kelebihan itu diantaranya :

- Sistem *screw feeding* dengan menggunakan motor listrik ini dapat menghasilkan kecepatan *feed rate* yang konstan, sehingga temperatur pada ruang bakar tetap terjaga karena bahan bakar yang berupa sampah-sampah organik ini dapat dialirkan secara teratur.
- Dengan penggunaan inverter pada sistem *screw feeding* ini, motor listrik 3 *phase* yang digunakan pada *screw feeding* dapat di convert menjadi 1 *phase*. Selain itu putaran rpm dapat juga diatur dengan menggunakan alat ini.

Kemudian, untuk pengujian aliran dingin (*cold flow*) yang telah dilakukan sangat dipengaruhi oleh beberapa unsur yang terdiri dari :

- Pasir yang digunakan sebagai media
- Jenis distributor yang digunakan
- Blower

Unsur-unsur yang telah disebutkan di atas mempengaruhi kinerja *Fluidized Bed Incinerator* yang ada di lingkungan Universitas Indonesia.

Setelah melakukan pengujian, maka didapatkan satu prosedur yang dinilai cukup ideal untuk digunakan dalam proses pengujian aliran dingin ini. Dan juga dapat diikuti bagi orang awam. Prosedur tersebut terdiri dari :

#### Prosedur Pengujian *Cold Flow*

1. Pasir silika dituang ke dalam reaktor

Sebanyak kurang lebih 100 kg pasir silika dituang ke dalam reaktor *fluidized bed incinerator* UI. Tinggi hamparan pasir dalam reaktor akan menjadi setinggi kira-kira 20 cm.

2. Manometer disiapkan

Sebuah manometer  $H_2O$  disiapkan untuk mengukur penurunan tekanan (pressure drop) yang melintas hamparan pasir. Kedua selang sambungan dimasukkan ke dalam reaktor melalui lubang termokopel. Selang pertama dimasukkan melalui lubang termokopel 1, sedangkan selang kedua dimasukkan melalui lubang termokopel 2.

3. Blower dinyalakan

Blower mulai dinyalakan untuk proses fluidisasi. Namun blower tidak dioperasikan langsung pada putaran maksimum. Putaran motor blower diatur dari putaran rendah dulu baru kemudian secara bertahap dinaikkan sampai putaran maksimum. Untuk mengatur putaran motor blower tersebut dilakukan dengan menggunakan sebuah inverter

4. Pengambilan data

Pengambilan data dilakukan dengan mencatat besar nilai penurunan tekanan setiap putaran motor blower dari putaran rendah secara bertahap dinaikkan sampai putaran maksimum.

## 6.2 SARAN

Untuk melakukan proses pengujian pada feeding, ada beberapa hal yang harus diperhatikan, diantaranya :

- Sampah organik yang akan dimasukkan agar dipilih terlebih dahulu, karena alat *fluidized bed incinerator* ini baru terbatas untuk sampah-sampah organik saja.



Gambar 6.1. sampah organik yang digunakan

- Sampah-sampah yang akan dimasukkan agar dicacah terlebih dahulu. Hal ini bertujuan agar sampah-sampah tersebut tidak tersangkut di pojok screw, yang akan membuat putaran screw terganggu bahkan berhenti.



Gambar 6.2. Screw feeding

#### Kendala

- Terdapat masalah yang bersifat non teknis, yakni tidak adanya sumber listrik yang permanen dan cukup
- Sumber listrik yang digunakan harus dapat memberikan daya listrik yang cukup yakni minimal sebesar 3,45 kW
- Sumber listrik yang ada hanyalah berasal dari generator set yang disewa dan sangat terbatas oleh waktu
- Hal ini mengakibatkan tidak dapat melakukan pengujian yang berulang-ulang untuk dapat melihat karakteristik hasil modifikasi pada sistem burner dan sistem feeding

## DAFTAR PUSTAKA

- Baumeister, Theodore, *Standard Handbook of Mechanical Engineering, 8th Edition*, (Massachussets : McGraw-Hill, 1978).
- Basu, Prabir, *Fluidized Bed Boiler : Design & Application*, (Canada : Pergamon Press, 1984).
- Das, Asit, *A Study of Circulating Fluidized Bed Combustion*, 1989.
- Kunii, Daizo & Octave Levenspiel, *Fluidization Engineering*, (USA : Butterworth-Heinemann, 1991).
- Niessen, R. Walter, *Combustion and Incineration Process*, (New York : Marcel Dekker Inc., 1995).
- Patumsawad, Suthum, *Fluidized Bed Combustion of Palm Solid Waste, The Journal of KMITNB*, Vol. 12, No.2, Apr – Jun 2002.
- Ryabov, Georgy A, *Agglomeration of Bed Material : Influence on Efficiency of Biofuel Fluidized Bed Boiler, Original Scientific Paper*.
- Shaha, A.K, *Combustion Engineering & Fuel Technology*, (New Delhi : Oxford & IBH Publishing Co., 1974).
- Themelis, Nicholas J, *Energy Recovery from New York City Solid Waste. ISWA Journal : Waste Management & Research*, 2002.
- [www.wikipedia.com/fluidized\\_bed\\_combustion](http://www.wikipedia.com/fluidized_bed_combustion).





**Lampiran**