

LAPORAN PENELITIAN
PENGARUH KECEPATAN UDARA DAN JENIS MATERIAL BED
TERHADAP PROSES FLUIDISASI MENGGUNAKAN AIRCAP BELL-TYPE
INOVATIF PADA UJI DINGIN CFB BOILER



Disusun oleh :

DWI ZACKY AL KHOISI (3335200052)
MOCHAMAD NAUFAL ALAWIANSYAH (3335200101)

JURUSAN TEKNIK KIMIA – FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA CILEGON – BANTEN
2024

LAPORAN PENELITIAN
PENGARUH KECEPATAN UDARA DAN JENIS MATERIAL *BED*
TERHADAP PROSES FLUIDISASI MENGGUNAKAN *AIRCAP BELL-*
***TYPE* INOVATIF PADA UJI DINGIN CFB BOILER**

disusun oleh:

DWI ZACKY AL KHOISI (3335200052)
MOCHAMAD NAUFAL ALAWIANSYAH (3335200101)

telah diperiksa dan disetujui oleh dosen pembimbing

Dosen Pembimbing I



Hafid Alwan S.T., M.T

NIP. 199012132019031011

Dosen Pembimbing II



Prof. Dr.-Ing. Ir. Anton Irawan S.T M.T., IPM., Asean ENG

NIP. 197510012008011007

Dosen Penguji I



Dr. Nuryoto, S.T., M.T

NIP. 197609152006041007

Dosen Penguji II



Dr. Endarto Yuda W., ST., M.T

NIP. 197707092008121001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Kimia



Dr. Heri Heriyanto, S.T., M.Eng

NIP. 197510222005011002

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Kami yang bertandatangan dibawah ini:

Nama : Dwi Zacky Al Khoisi
NIM : 3335200052
Fakultas : Teknik
Jurusan : Teknik Kimia

Nama : Mochammad Naufal Alwiansyah
NIM : 3335200101
Fakultas : Teknik
Jurusan : Teknik Kimia

Bahwasanya Tugas Akhir yang berjudul “ **Pengaruh Kecepatan Udara dan Jenis Material Bed Terhadap Proses Fluidisasi Menggunakan Aircap *Bell-type* Inovatif Pada Uji Dingin CFB Boiler**” adalah **ASLI** dirancang oleh kami, Dwi Zacky Al Khoisi dan Mochammad Naufal Alwiansyah.

Cilegon, 7 Februari 2025

A 1000 Rupiah Indonesian postage stamp is shown with a black ink signature written over it. The stamp features the Garuda Pancasila emblem and the text 'SEPUAS RIBU RUPIAH', '1000', 'METAL', 'TEMPER', and the serial number '5A545AJX017074510'.

Dwi Zacky Al Khoisi

A 1000 Rupiah Indonesian postage stamp is shown with a black ink signature written over it. The stamp features the Garuda Pancasila emblem and the text 'SEPUAS RIBU RUPIAH', '1000', 'METAL', 'TEMPER', and the serial number '5B246AJX019443278'.

Mochammad Naufal Alwiansyah

KATA PENGANTAR

Dengan segala kerendahan hati, penulis memanjatkan puji dan syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa karena berkat, rahmat, dan karunia-Nya, penulisan Proposal Penelitian yang berjudul PENGARUH KONDISI OPERASI PADA UJI DINGIN BOILER TERHADAP PROSES FLUIDISASI MENGGUNAKAN DESIGN AIRCAP BELL-TYPE INOVATIF dapat diselesaikan. Pembuatan proposal ini dibuat untuk melengkapi salah satu persyaratan Program Strata I pada Jurusan Teknik Kimia Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Penulis menyadari, berhasilnya studi dan penyusunan Laporan Penelitian ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak yang telah memberikan semangat, doa serta dukungan kepada penulis dalam menghadapi setiap kegiatan penelitian, sehingga pada kesempatan ini penulis mengucapkan rasa terima kasih kepada:

1. Kedua Orang Tua tercinta yang telah memberikan segala rasa cinta dan kasih sayang
2. Bapak Hafid Alwan, S.T., M.T & Prof, Dr. Ing. Ir.Anton Irawan S.T, M.T., IPM., AER selaku dosen pembimbing penelitian yang telah meluangkan waktu nya serta memberikan bimbingan
3. Bapak Dr. Heri Heriyanto, S.T, M.Eng. selaku dosen penguji
4. Rekan-rekan kami yang telah memberikan pertolongan baik bantuan langsung maupun tidak langsung.

Terakhir, penulis menyadari dalam penyusunan proposal ini masih terdapat kekurangan baik dari segi penulisan maupun kelengkapan informasi, untuk itu penulis berharap ada saran dan kritikan dari Pembaca semua agar penulis bisa lebih baik lagi dimasa yang akan datang

Cilegon, 02.01.2024

ABSTRAK

PENGARUH KONDISI OPERASI PADA UJI DINGIN BOILER TERHADAP PROSES FLUIDISASI MENGGUNAKAN DESIGN AIRCAP BELL TYPE INOVATIF

oleh :

DWI ZACKY AL KHOISI (3335200052)
MOCHAMAD NAUFAL ALAWIANSYAH (3335200101)

Circulating fluidized bed (CFB) boiler merupakan salah satu jenis pembakaran dari fluidized bed combustion. Fluidisasi adalah suatu operasi padatan granular fluida diubah seperti melalui kontak dengan gas atau cairan. Dalam kondisi terfluidisasi, butiran – butiran gaya gravitasi pada zat padat telah diimbangi oleh drag force fluida yang bekerja padanya. Tujuan dari penelitian ini adalah menginvestigasi efek perubahan kecepatan fluida (Primary flow) dengan menganalisa kurva karakteristik fluidisasi menggunakan aircap bell-type inovatif, menentukan nilai U_{mf} dan membandingkannya dengan hasil U_{mf} prediksi, serta mengevaluasi pengaruh penggunaan material bed yang berbeda pada kinerja fluidisasi menggunakan aircap bell-type inovatif. Metode percobaan pada penelitian ini adalah persiapan alat dan ruang fluidisasi, persiapan material bed dan percobaan cold-test di ruang fluidisasi. Adapun hasil yang didapatkan Fluidisasi terjadi pada partikel pasir silika di variasi ketinggian 30 cm dan 40 cm dan nilai U_{mf} sendiri berkisar 140 cm/s. Pada variasi batubara tidak terjadi fluidisasi di karenakan interlock antar partikel yang lebih tinggi karena bentuk partikel yang tidak teratur dan batubara terdapat pada grup d pada klasifikasi geldart.

Keyword : Aircap, Fluidisasi, Pasir silika, Batubara, CFB Boiler

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR.....	iii
ABSTRAK.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	viii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Percobaan.....	2
1.4 Ruang lingkup.....	2
BAB II.....	3
TINJAUAN PUSTAKA.....	3
2.1 Fluidisasi.....	3
2.2 Jenis Fluidisasi.....	3
2.3 Tahapan Fluidisasi.....	5
2.4 Circulation Fluidized Bed (CFB) Boiler.....	8
2.5 Air Caps Type-bell.....	12
2.6 State of the art.....	13
BAB III.....	19
METODOLOGI PERCOBAAN.....	19
3.1 Tahap Penelitian.....	19
3.1.1 Diagram Alir Persiapan Alat dan Ruang Fluidisasi.....	19
3.1.2 Diagram Alir Persiapan Material Bed.....	20
3.1.3.....	19
3.2 Prosedur Percobaan.....	22
3.2.1 Diagram Alir Persiapan Alat dan Ruang Fluidisasi.....	22
3.2.2 Diagram Alir Persiapan Material Bed.....	22
3.2.3 Diagram Alir Percobaan Cold-Test di Ruang Fluidisasi.....	22
3.3 Alat dan Bahan.....	22
3.3.1 Bahan.....	22

3.3.2 Alat.....	23
3.4 Variabel Penelitian	24
3.5 Metode Pengumpulan dan Analisa Data	25
BAB IV	26
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	26
4.1 Karakteristik Material Bed.....	26
4.2 Kurva Karakteristik Fluidisasi Pasir Silika	27
4.3 Kurva Karakteristik Fluidisasi Batubara.....	30
4.4 Perbandingan Nilai U _{mf} Experiment dan Prediksi.....	32
4.5 Perbandingan Aircaps Bell-Type innovative & Aircaps Bell-Type konvensional	35
BAB V.....	36
KESIMPULAN DAN SARAN.....	36
DAFTAR PUSTAKA	ix

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 State Of The Art.....	12
Tabel 4.1 Karakteristik material bed.....	18
Tabel 4.2 Perbandingan nilai Umf Exp, dengan pers 3.1	35

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Jenis Jenis Fluidisasi	4
Gambar 2.2 Fenomena Proses Fluidisasi (a) Unggun Tetap (b) Unggun Gelembung (c) Unggun Slugging (d) Unggun Turbulen.....	4
Gambar 2.3 Unit Circulating Fluidized Bed (Basu, 2015).....	8
Gambar 2.4 Unit Cyclone Pada CFB (Lee et al., 2003).....	10
Gambar 2.5 Loop Seal Pada CFB (Basu & Butler, 2009)	11
Gambar 2.6 Permasalahan pada air caps type bell (a). Abrasi (b) penyumbatan lubang kecil (c). Menutupi kerusakan (d). Pecahnya tabung inti bagian dalam ...	12
Gambar 3.1 Diagram Alir Persiapan Alat dan Ruang Fluidisasi	4
Gambar 3.2 Diagram Alir Persiapan Material Bed.....	18
Gambar 3.3 Diagram Alir Percobaan Proses Fluidisasi Uji Dingin di CFB Boiler	19
Gambar 3.4 (a) Ruang Fluidisasi (b) cover tube aircaps (c) inner tube aircaps (d) Desain 3D air caps inovatif	22
Gambar 3.5 Rangkaian alat fluidisasi	22
Gambar 4.1 Kurva karakteristik fluidisasi pasir silika pada ketinggian (a) 30 cm (b) 40 cm (c) 50 cm.....	26
Gambar 4.2 Ekspansi material bed pada variasi (a) 30 cm (b) 40 cm	28
Gambar 4.3 Kurva karakteristik fluidisasi batubara pada ketinggian (a) 30 cm (b) 40 cm (c) 50 cm.....	31
Gambar 4.4 Kurva Karakteristik Fluidisasi Pasir Silika (a) 30 cm (b) 40 cm	34

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Fluidisasi merupakan suatu operasi dimana partikel-partikel zat padat diperlakukan seperti fluida. Pada prosesnya partikel-partikel zat padat akan di kontakkan dengan fluida, apabila kecepatan fluida rendah maka unggun akan tetap diam karena fluida hanya akan melewati ruang antar partikelnya, sedangkan jika kecepatan fluida dinaikkan secara perlahan maka bed akan mulai bergerak.

Dalam bidang Industri sendiri suatu proses fluidisasi banyak digunakan seperti pada transportasi serbuk padatan, perpindahan panas, proses drying dan pada pembangkit listrik. Salah satu teknologi pembakaran menggunakan teknologi fluidisasi yaitu Circulating fluidized bed (CFB). CFB boiler adalah alat yang dapat menghasilkan uap dengan cara membakar bahan bakar fosil di dalam furnace. Aircap pada CFB boiler sering kali menimbulkan masalah seperti terjadinya erosi pada permukaan dan penyumbatan nozzle di aircap yang membuat terjadinya gangguan distribusi udara dari primary air (Mirek & Klajny, 2018). Untuk mengatasi hal tersebut perlu mengevaluasi rancangan atau desain aircap-nya (Basu, 2015). Selain itu berdasarkan Zhong Huang (2019), Studi Simulasi Eksperimental dan CFD pada aircap type-bell dari Boiler CFB memiliki masalah seperti abrasi, penyumbatan, keretakan. Untuk mengatasi permasalahan yang terjadi dilakukan uji cold-test dan simulasi numerik dengan menggunakan 2 aircap type-bell yang berbeda. aircap type-bell ini juga mempunyai masalah lain seperti blocking sehingga distribusi partikel zat padat akan terhambat dan bisa menyebabkan permasalahan baru ke komponen lain. Maka dari itu dilakukannya pengaruh kecepatan udara dan jenis material bed terhadap proses fluidisasi menggunakan aircap bell-type inovatif pada uji dingin CFB boiler agar didapatkan desain aircap yang dapat mengurangi permasalahan tersebut dan dapat mengoptimalkan kinerja dari CFB.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, masalah yang sering ditimbulkan dalam proses fluidisasi di CFB boiler menggunakan material bed berupa pasir silika dan batubara kalori rendah adalah erosi permukaan dan penyumbatan pada nozzle aircap. Optimalisasi proses fluidisasi di CFB boiler dapat dilakukan dengan merancang aircap jenis bell-type inovatif dan melakukan uji cold-test untuk melihat pengaruh pada variasi kecepatan udara dan jenis material bed yang berbeda terhadap performa fluidisasi, serta membandingkan aircap jenis bell-type inovatif dan konvensional terhadap pressure drop.

1.3 Tujuan Percobaan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah menginvestigasi efek perubahan kecepatan fluida (Primary flow) dengan membuat dan menganalisa kurva karakteristik fluidisasi menggunakan aircap bell-type inovatif, menentukan kecepatan fluida, menentukan nilai U_{mf} dan membandingkannya dengan hasil U_{mf} teori dengan eksperimen, serta mengevaluasi pengaruh penggunaan material bed yang berbeda pada kinerja fluidisasi menggunakan aircap bell-type inovatif.

1.4 Ruang lingkup

Ruang lingkup yang terdapat pada penelitian Aircap Terhadap Proses Circulating Fluidized Bed ini meliputi persiapan alat dan ruang fluidisasi, persiapan material bed, dan cold test ruang fluidisasi. Bahan yang digunakan adalah batubara kalori rendah (low rank coal) dan pasir silika (99%Si). Alat yang digunakan adalah ruang fluidisasi, Aircap bell-type innovative, blower, manometer digital, neraca digital, Anemometer, orifice, sieve shaker. Metode yang digunakan Uji cold test dan pengujian dilakukan rumah workshop teknologi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

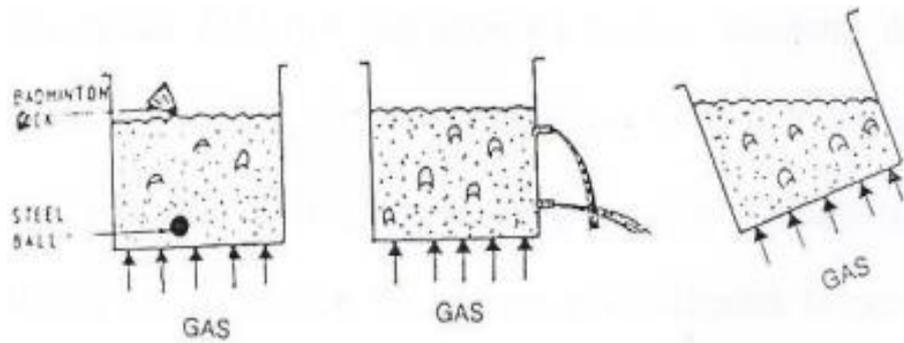
2.1 Fluidisasi

Fluidisasi adalah suatu operasi dimana hamparan zat padat diperlukan seperti fluida dengan mengkontakannya dengan fluida gas ataupun cairan (Basu, 2015). Dalam kondisi terfluidisasi, gaya gravitasi pada butiran-butiran zat padat diimbangi oleh gaya seret dari fluida yang bekerja padanya. Kejadian ini dapat menandai suatu proses dimulainya hal yang sangat penting di dalam teknologi *modern*. Winkler melihat partikel – partikel diangkat oleh tarikan gas, membuat partikel tampak seperti cairan yang mendidih. Pada proses pengkonversian energi dengan teknologi *Circulating fluidized bed* (CFB). Awalnya ruang bakar dipanasi secara eksternal sampai mendekati temperatur operasi. fluidisasi yang akan dipakai untuk mengabsorpsi panas adalah pasir silika. Pasir silika, batubara, dan bahan bakar bercampur dan mengalami turbulensi di dalam *furnace* sehingga keseragaman temperatur sistem menjadi terjaga, Kondisi ini mampu memberikan konversi energi yang baik.

2.2 Jenis Fluidisasi

Jenis fluidisasi dibedakan berdasarkan kontakannya dengan partikel padat, apabila zat cair atau gas dilewatkan melalui lapisan hamparan partikel padat pada kecepatan rendah, maka partikel akan tetap dalam keadaan *fixed bed*. Jika kecepatan fluida berangsur-angsur dinaikkan, maka partikel padat itu akhirnya akan mulai bergerak dan melayang didalam fluida, serta berperilaku seperti fluida rapat.

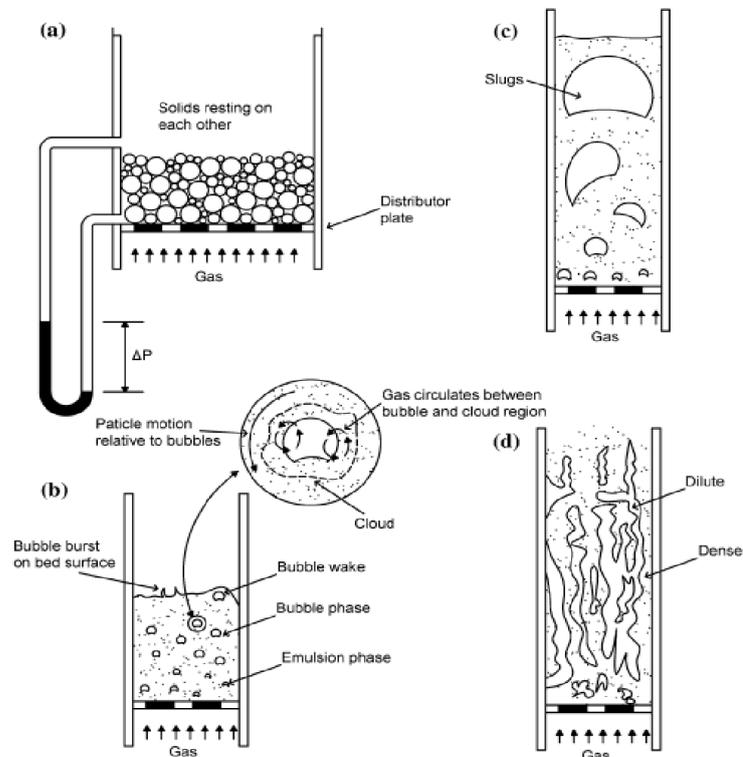
Jika hamparan itu dimiringkan, permukaan atas material *bed* akan tetap horizontal, dan benda-benda besar akan mengapung atau tenggelam didalam hamparan itu tergantung pada perbandingan densitas dari partikel tersebut.



Gambar 2.1 Jenis Jenis Fluidisasi

2.3 Tahapan Fluidisasi

Tahapan fluidisasi dapat dikelompokkan menjadi empat tahap, yaitu: hamparan tetap (*Fixed Bed*), hamparan fluidisasi gelembung (*Bubbling Fluidized Bed*), gelembung besar (*Slugging*) dan hamparan turbulen (*Turbulen Bed*) yang mana pada tiap tahapan akan menghasilkan fenomena-fenomena yang berbeda pada tiap tahapan seperti pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.2 Fenomena Proses Fluidisasi (a) Unggun Tetap (b) Unggun Gelembung (c) Unggun *Slugging* (d) Unggun Turbulen

a. *Fixed Bed*

Hamparan tetap udara dimasukkan di bawah plat *distributor* dengan laju lambat, dan naik melalui hamparan tanpa menyebabkan terjadinya suatu gerakan pada partikel. Jika kecepatan perlahan dinaikkan maka akan terjadi penurunan tekanan pada partikel. Jika kecepatan dinaikkan dan penurunan tekanan akan meningkat, tetapi partikel – partikel itu tidak bergerak dan tinggi hamparan tidak berubah. Kondisi ini dapat dikenal dengan (*fixed bed*)

b. *Bubbling Fluidized Bed*

Hamparan kecepatan aliran udara pada *fixed bed* akan meningkat sampai kecepatan udara mencapai kondisi titik kritis yang dikenal dengan kecepatan minimum fluidisasi (*Minimum Fluidization Velocity*) atau U_{mf} , besar nilai U_{mf} bisa didapatkan melalui eksperimen ataupun dengan persamaan yang didapatkan dari (Genehr et al., 2020), sebagai berikut :

$$\frac{d_m U_m \rho_g}{\mu} = \left(33.7^2 + 0.0408 \frac{d_m^3 U_m \rho_g (\rho_m - \rho_g)}{\mu^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 33.7 \dots\dots\dots 2.1$$

Dimana d_m adalah diameter rata-rata material bed yang digunakan, U_{mf} adalah kecepatan minimum untuk terfluidisasi, ρ_g adalah densitas kecepatan fluida, μ adalah viskositas fluida, dan ρ_m adalah densitas partikel padat.

Penurunan tekanan akan melewati hamparan dan akan mengimbangi gaya gravitasi yang akan dialaminya, dengan kata lain mengimbangi gaya pada bobot hamparan. Partikel mulai akan bergerak dan gas yang mengalir melalui hamparan yang akan membentuk suatu gelembung dan hal ini disebut dengan (*Bubbling Fluidized Bed*)

c. *Slugging*

Bubbling besar jika kecepatan udara yang melalui hamparan pada zat meningkat maka gelembung – gelembung cenderung bersatu dan menjadi besar (*Slug*). Pada saat gelembung naik melalui hamparan fluidisasi sebagai *slug*, terjadi fenomena ini diistilahkan dengan slugging. Jika menggunakan kolom berdiameter

kecil dengan hamparan zat padat yang tebal maka gelembung – gelembung yang beriringan akan bergerak ke puncak kolom dan dipisahkan oleh zat padat.

d. *Turbulen Bed*

Hamparan turbulen ketika kecepatan udara yang melewati *Bubbling Fluidized Bed* telah meningkat diatas kecepatan minimum gelembung maka hamparan partikel akan meluas. Peningkatan kecepatan tersebut mengakibatkan terjadinya perubahan pada susunan partikel. Dengan ditandai kecepatan udara yang tinggi yang mengakibatkan gelembung kehilangan identitasnya dan berubah bentuk perluasan hamparan. Partikel kemudian terlempar ke puncak kolom diatas hamparan sehingga mendapatkan permukaan hamparan yang tinggi. Hamparan tersebut disebut dengan *turbulent bed*. Tahapan ini dapat diaplikasikan pada *Circulating Fluidized Bed*.

Fenomena-fenomena yang terjadi pada proses fluidisasi seperti gambar 2.2 dipengaruhi oleh berbagai macam faktor, yaitu seperti jenis seperti kecepatan fluida, jenis fluida, ukuran partikel, bentuk partikel, jenis partikel, densitas partikel, porositas bed, distribusi aliran, distribusi bentuk ukuran fluida, diameter kolom, dan tinggi bed (Amal Kamala, 2018).

a. Kecepatan fluida

Pada fluidisasi terdapat kecepatan minimum untuk membuat partikel pada unggun bergerak, jika kecepatan fluida melebihi kecepatan minimum maka partikel-partikel akan terfluidisasi. Berdasarkan hal tersebut semakin besar kecepatan fluida maka akan membuat semakin mudahnya suatu partikel akan terfluidisasi.

b. Ukuran Partikel

Semakin besar suatu ukuran partikel maka membuat partikel tersebut memiliki gaya berat yang semakin besar pula, yang membuat kecepatan minimum untuk membuat partikel terfluidisasi akan semakin besar, oleh karena itu jika semakin besar suatu partikel maka akan membutuhkan energi yang lebih banyak atau semakin sulit untuk terfluidisasinya.

c. Distribusi Udara

Pada proses fluidisasi, untuk melakukan fluidisasi partikel maka diperlukan distribusi yang baik agar tiap-tiap partikel dapat berkontak dengan udara secara merata, semakin baik distribusi udara maka akan semakin baik juga proses fluidisasi, alat yang bertugas untuk mendistribusikan udara pada CFB boiler disebut *aircap*.

d. Tinggi Bed

Semakin tinggi bed pada kolom maka akan membuat semakin banyak partikel-partikel padat pada unggun bed, yang mana hal tersebut akan membuat semakin banyak partikel yang akan berkontak dengan udara.

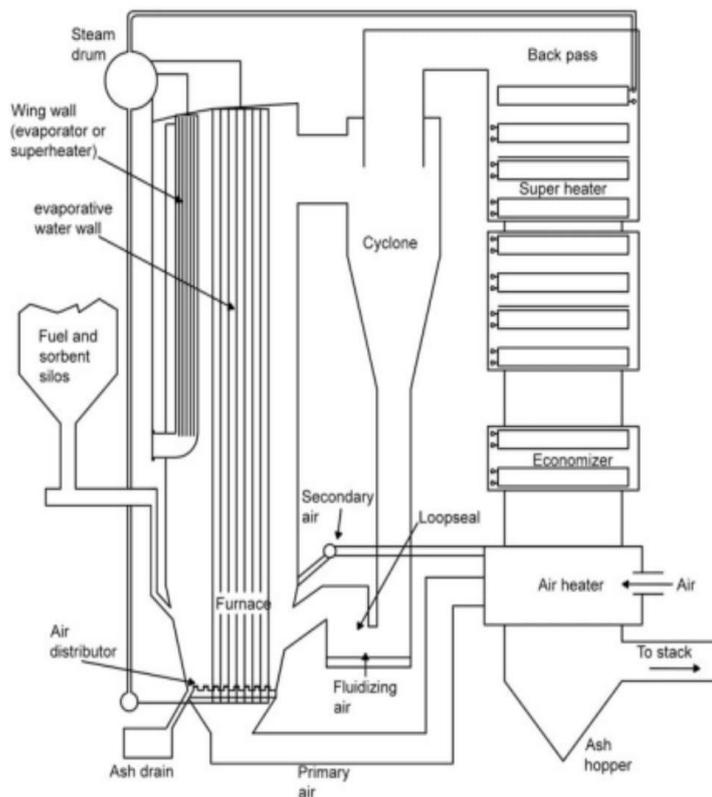
2.4 Circulation Fluidized Bed (CFB) Boiler

Circulating fluidized bed (CFB) boiler merupakan salah satu jenis pembakaran dari *fluidized bed combustion*. Pembakaran dengan *fluidized bed combustion* memiliki kelebihan seperti fleksibel terhadap bahan bakar, memiliki efisiensi pembakaran yang tinggi, pembakaran fluidized bed dapat berlangsung pada suhu yang lebih rendah, berkisar antara 850°C sehingga menghasilkan kadar NO_x yang lebih sedikit dan dapat menghindari masalah pembentukan kerak pada batubara tertentu dan memiliki pereduksian kadar sulfur dioksida (SO_x) yang biasanya terbentuk dari pembakaran kandungan belerang dalam batubara (Basu, 2015), karena itu teknologi ini sudah sangat dikenal dalam industri pembangkitan listrik baik dari segi ekonomis maupun emisi gas buang yang dihasilkan.

2.5 Bagian-Bagian dari CFB

CFB Boiler memiliki bagian utama yang dapat dibagi menjadi dua bagian, yang mana bagian pertama adalah loop CFB dan backpass. Pada bagian loop CFB terdapat *furnace*, *distributor plate*, *Cyclone*, *Loop-seal*, *Steam drum*, *fluidizing air system*, dan *fuel feeding system*. Sedangkan bagian *backpass* meliputi reheater, superheater, economizer, air-preheater

Adapun berikut merupakan gambar dari Circulating Fluidized Bed :



Gambar 2.3 Unit Circulating Fluidized Bed (Basu, 2015)

a. Furnace

Furnace merupakan ruang yang digunakan untuk melakukan pembakaran. Di dalam furnace juga terdapat nozzle yang berfungsi untuk menghembuskan *primary air*. Furnace dikelilingi oleh pipa-pipa (tube) air yang menempel pada dinding furnace yang akan menerima panas dari pembakaran yang terjadi di dalam furnace. Di dalam furnace sendiri memiliki beberapa bagian diantaranya *tube wall* merupakan susunan pipa-pipa yang berada pada sisi dinding sepanjang Furnace berfungsi sebagai alat untuk mengalirkan steam yang dipanaskan, rangkaian tube terbuat dari pipa lurus tanpa sambungan yang disusun paralel dan antara satu dengan yang lain. Selanjutnya terdapat *aircap* sebagai komponen penting dari *CFB boiler* yang ada di dalam *furnace* yang berfungsi untuk mendistribusikan udara primer. Selain itu *Tube support* berfungsi untuk menyangga tube agar tidak melengkung akibat adanya panas pembakaran pada saat furnace beroperasi. *Peephole* berfungsi untuk mengamati bentuk atau warna api (*flame*

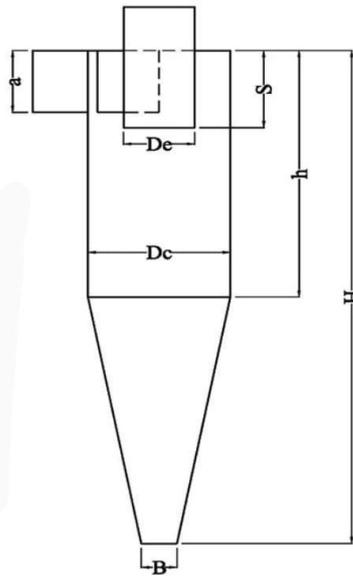
pattern) dari masing-masing burner. Selanjutnya terdapat evaporator panel yang terdiri dari susunan pipa-pipa yang berada pada *furnace* dengan posisi menggantung, fungsinya hampir sama dengan *tubewall* yaitu mengubah air menjadi uap

Selain itu pada *furnace* menggunakan bed material yang merupakan campuran material pembakaran yang terdiri dari batubara, pasir silika dan limestone. Batubara sendiri berfungsi sebagai bahan bakar dalam boiler, sedangkan pasir silika (*inner bed*) merupakan media pemanfaatan penyebaran panas di dalam *furnace*, sedangkan Limestone berfungsi untuk mengikat kandungan SO_x (karbon) agar ramah lingkungan.

b. Cyclone

Menurut Karagoz, Irfan (2007) Cyclone adalah alat untuk memisahkan fase padat pada aliran yang memiliki dua fase, dengan bantuan gaya sentrifugal. Karena desainnya yang sederhana dan tidak memiliki bagian yang bergerak, *cyclone* memiliki biaya pembuatan dan perawatan yang lebih rendah, dan fleksibilitas untuk penggunaan pada kondisi operasi yang ekstrim.

Cyclone sendiri memiliki fitur dengan struktur yang sederhana, efisiensi pemisahan tinggi dan dapat beroperasi pada suhu tinggi. Cyclone telah banyak digunakan sebagai alat untuk pemisah gas-padat dalam industri kimia, minyak bumi, dan PLTU. PLTU yang menggunakan boiler tipe circulating fluidized bed (CFB) pada umumnya menggunakan cyclone berjumlah 2 buah untuk setiap boiler dan beroperasi pada temperatur 800 s/d 900 °C serta tekanan pada tekanan 20 s/d 60 bar. Parameter operasional utama cyclone memiliki pengaruh langsung pada kinerja sistem seperti pressure drop, adapun berikut gambar dari unit cyclone sebagai berikut :

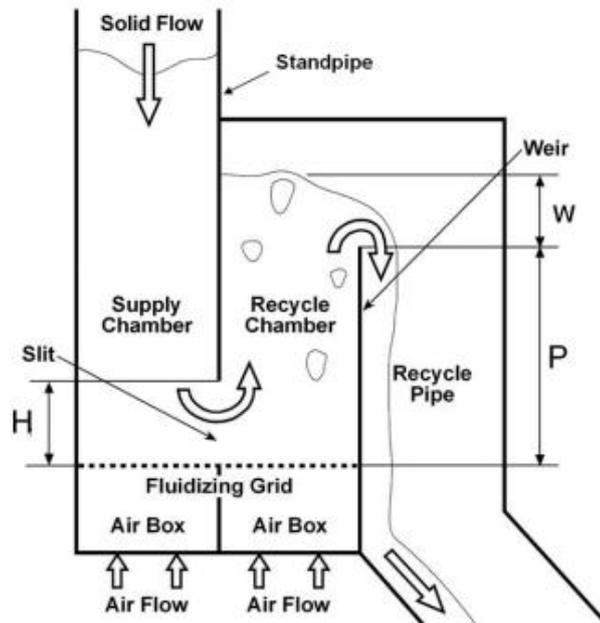


Gambar 2.4 Unit Cyclone Pada CFB (Lee et al., 2003)

c. Loop-Seal

Reaktor CFB memiliki banyak keuntungan, seperti sirkulasi partikel bed di antara *riser* dan *return leg* yang terus menerus bersirkulasi, hal ini menyebabkan pada boiler CFB memiliki laju reaksi yang lebih tinggi. Karena alasan ini CFB populer digunakan dalam reaktor kimia ataupun sebagai *furnace*. Partikel-partikel bed fluidisasi oleh *primary air* yang disuplai di dasar *riser*, dan reaksi sebagian besar terjadi pada *furnace*. Partikel yang keluar dari *furnace* ditangkap oleh *cyclone*. Partikel padat yang keluar dari *cyclone* akan dialirkan ke *return leg* kembali ke *solid particle control valve* yang mana setelah itu akan diumpankan ke riser. Untuk mengumpulkannya kembali ke riser menggunakan non-mechanical valve salah satunya adalah *Loop Seal*.

Loop Seal merupakan unit yang berfungsi untuk mensirkulasikan kembali partikel-partikel padat yang tidak bereaksi dan yang sebelumnya sudah dipisahkan pada unit cyclone untuk diumpankan kembali ke riser untuk disirkulasikan kembali, karena hal ini lah CFB sering digunakan pada industri kimia.

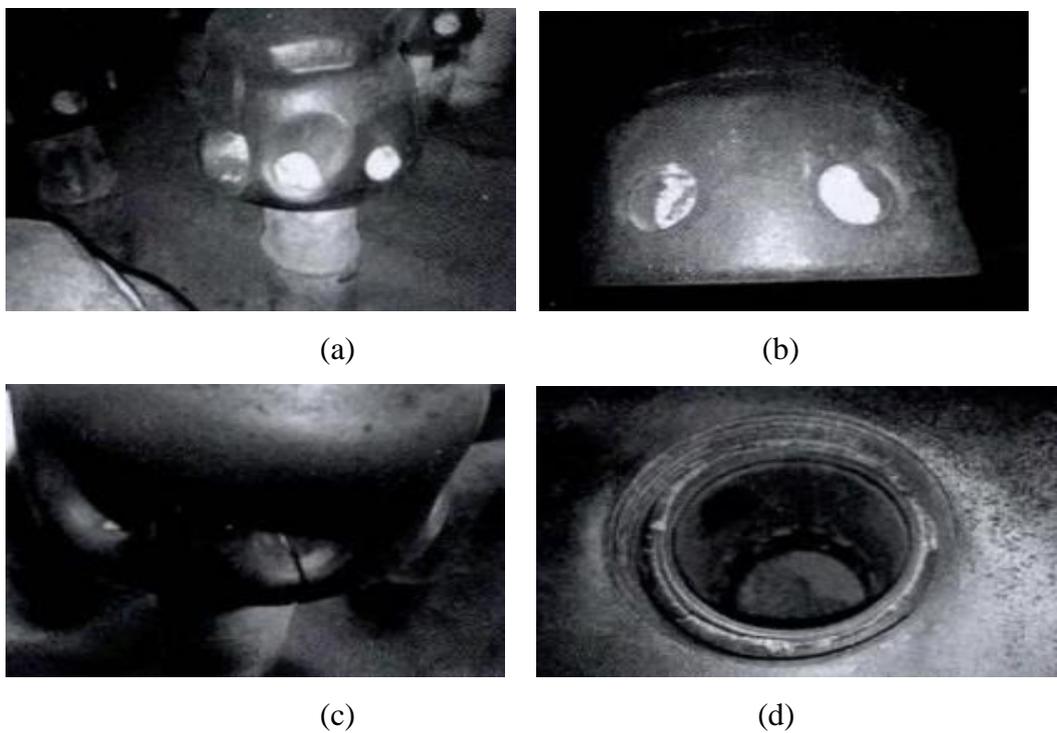


Gambar 2.5 Loop Seal Pada CFB (Basu & Butler, 2009)

2.5 Air Caps Type-bell

Aircap adalah komponen penting dari *boiler* CFB. Desain *aircap* yang tepat sangat penting untuk pengurangan dari konsumsi energi dan peningkatan keselamatan pada pengoperasian *boiler* CFB (Li, 2017). *Aircap* adalah cara yang efektif untuk memastikan keseragaman aliran udara dalam boiler *Circulating Fluidized Bed* (CFB). *Aircap type-bell* adalah alat berbentuk lonceng, pada dibagian tutup udara berbentuk seperti tabung. Air caps type bell (P. Mirek, 2011) digunakan untuk memastikan keseragaman aliran udara dalam *boiler circulating fluidized bed*. Karakteristik resistensi dari ketiga *aircap* tipikal yaitu *air caps type-arrow*, *type-bell*, dan *type-T*). *Aircap type Bell* memiliki resistansi tertinggi dan udara primer paling seragam (P. Mirek and M. Klajny, 2018). *Aircap type-bell* memiliki keseragaman distribusi di penampang pada ruang bakar. Karena keseragaman distribusi pada udara primer dapat menginduksi fluidisasi yang seragam dan stabil pada seluruh penampang ruang bakar. Abrasi pada *cover tube*, kerusakan *cover tube*, penyumbatan lubang dan pecahnya inner tube seperti pada gambar 2.5 sering terjadi pada *aircap type-bell* dengan diameter besar. Hal ini menyebabkan resistensi yang buruk. Fluidisasi pelat distribusi udara, kebocoran terak, kokas dan

kecelakaan lainnya, sangat mempengaruhi proses operasi normal boiler. Langkah efektif untuk mengatasi masalah ini adalah dengan menggunakan air caps baru. Tujuannya adalah untuk mendistribusikan udara *primer* secara merata ke dalam *fluidized bed* pada penurunan tekanan rendah, dan meningkatkan efisiensi pembakaran secara signifikan. Berikut adalah permasalahan *aircap type-bell* pada aplikasi yaitu sebagai berikut. Berikut adalah permasalahan *aircap type-bell* pada aplikasi yaitu sebagai berikut.



Gambar 2.6 Permasalahan pada *air caps type bell* (a). Abrasi (b) penyumbatan lubang kecil (c). Menutupi kerusakan (d). Pecahnya tabung inti bagian dalam

2.6 State of the art

Berikut merupakan tabel dari studi literatur mengenai CFB boiler :

Tabel 2.1 State Of The Art

Pustaka	Variabel Percobaan	Hasil	Inovasi
---------	--------------------	-------	---------

<p>Zhong Huang (2019),</p>	<p>2 nozel air tipe tabel yang berbeda yaitu nozzle air tradisional dan nozel air modern.</p>	<p>Simulasi untuk nozzle A (<i>nozel air tradisional</i>) dan nozzle B (<i>nozzle air modern</i>) pada beban 100% dan beban 30% dalam keadaan panas, hasilnya menunjukkan bahwa indeks kinerja <i>nozzle B</i> lebih baik daripada <i>nozzle A</i>, Hasil aplikasi boiler CFB 480 t h-1</p>	<p>Hasil yang didapatkan bahwa <i>nozzle B</i> memiliki hasil yang lebih baik yang menunjukkan bahwa CFB boiler dapat bekerja lebih optimum.</p>
<p>Pawel Mirek (2005)</p>	<p>Mengkonfigurasi susunan air cap pada jarak tertentu</p>	<p>Pada percobaan menggunakan dua variasi konfigurasi <i>aircap</i> yang berbeda yang mana pada variasi 1 yang mana letak <i>aircaps</i> memiliki konfigurasi yang lebih berjauhan jarak antar <i>aircap</i>-nya yang mana dengan adanya jarak yang lebih berjauhan membuat tidak adanya <i>backflow</i> atau aliran balik, yang mana hal tersebut membuat <i>air cap</i> tidak tersumbat oleh partikel padat. Pada variasi ke-2 jarak antar <i>air cap</i> diperkecil</p>	<p>Dengan adanya jarak antar <i>aircap</i> dapat mencegah adanya aliran balik atau <i>backflow</i> sehingga dapat mencegah partikel-partikel pada tidak masuk ke <i>aircap</i> yang dapat menyebabkan penyumbatan.</p>

		<p>yang mana menghasilkan aliran balik, sehingga padatan yang seharusnya terdistribusi ke furnace akan masuk ke dalam <i>aircap</i>, sehingga pada <i>aircap</i> di kemudian hari akan lebih cepat mengalami penyumbatan</p>	
<p>Pawel Mirek, Marcin Klajny. (2018)</p>	<p>Penurunan tekanan rendah pada nosel udara, erosi partikel pada lapisan boiler, abrasi.</p>	<p><i>Nozzle</i> mata panah dan nosel referensi dari data percobaan menunjukkan bahwa dibandingkan dengan nosel referensi kriteria energi kinetic telah memungkinkan desain <i>nozzle</i> udara alternatif dengan karakteristik penurunan tekanan yang sebanding dan peningkatan besaran gaya hambat aerodinamis dari pancaran udara keluar. Dari uji eksperimental diperoleh ketahanan yang tinggi dari desain <i>nozzle</i> baru terhadap aliran balik material dasar.</p>	<p>uji eksperimental telah mengkonfirmasi ketahanan yang tinggi dari desain nosel baru terhadap aliran balik material dasar dibandingkan dengan nosel mata panah dan nosel referensi.</p>

<p>Zhong Huang, Lei Deng, and Defu Che. 2019</p>	<p>Power consumption of primary and secondary air fans (kW), Bed pressure drop (kPa)</p>	<p>Mode baru dengan inventaris bed yang lebih rendah menghasilkan penurunan tekanan bed yang lebih signifikan dibandingkan dengan mode lama.</p>	<p>Mode baru mengoptimalkan tekanan bed untuk mengurangi konsumsi daya dan meningkatkan efisiensi pembakaran tanpa mengorbankan performa boiler.</p>
<p>Yang, Hairui, et al. 2009. Effect of Bed Pressure Drop on Perormance of a CFB Boiler</p>	<p>Laju alir fluidisasi, tekanan bed (kPa), Temperature bed (°C),</p>	<p>Efisiensi Pembakaran: Efisiensi pembakaran maksimal dicapai pada tekanan bed sekitar 5.7 kPa dengan rasio udara berlebih 1.06, Konsumsi Daya: Konsumsi daya kipas menurun saat tekanan bed diturunkan dari 7.3 kPa ke 3.2 kPa, Kandungan Karbon dalam Abu Terbang mencapai nilai minimal sekitar 17% pada tekanan bed 5.7 kPa.</p>	<p>Mengoperasikan boiler pada tekanan bed yang lebih rendah dengan mengurangi inventaris bed dan mengontrol kualitas bed, mengurangi konsumsi daya dan erosi permukaan pemanas.</p>

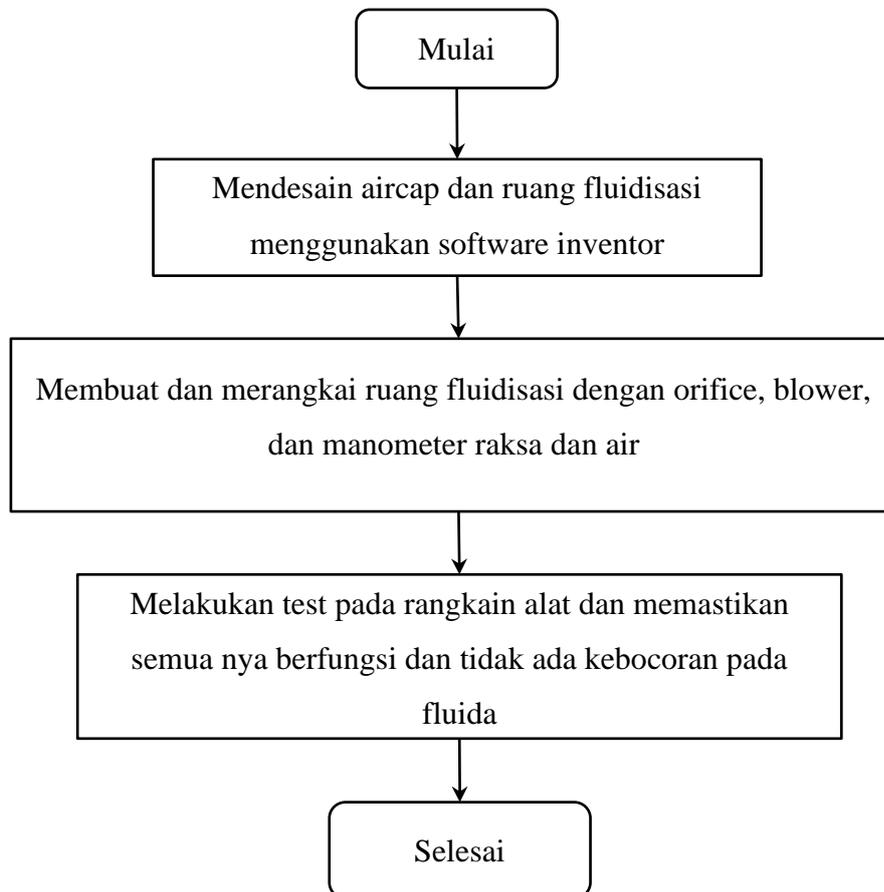
BAB III

METODOLOGI PERCOBAAN

3.1 Tahap Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan persiapan alat dan ruang fluidisasi, persiapan material bed, uji *cold-test* di ruang fluidisasi. Berikut diagram alir terkait tahapan-tahapan yang akan dilakukan pada penelitian:

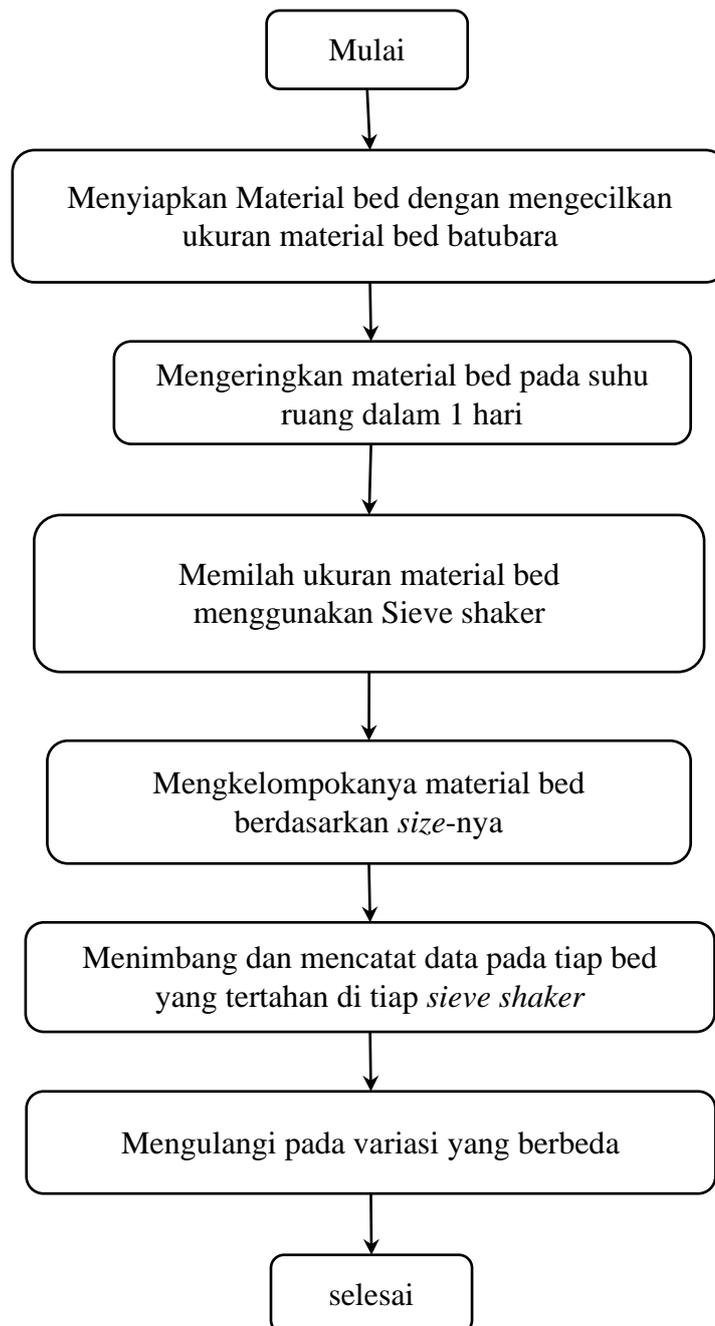
3.1.1 Diagram Alir Persiapan Alat dan Ruang Fluidisasi



Gambar 3.1 Diagram Alir Persiapan Alat Fluidisasi

3.1.2 Diagram Alir Persiapan *Material Bed*

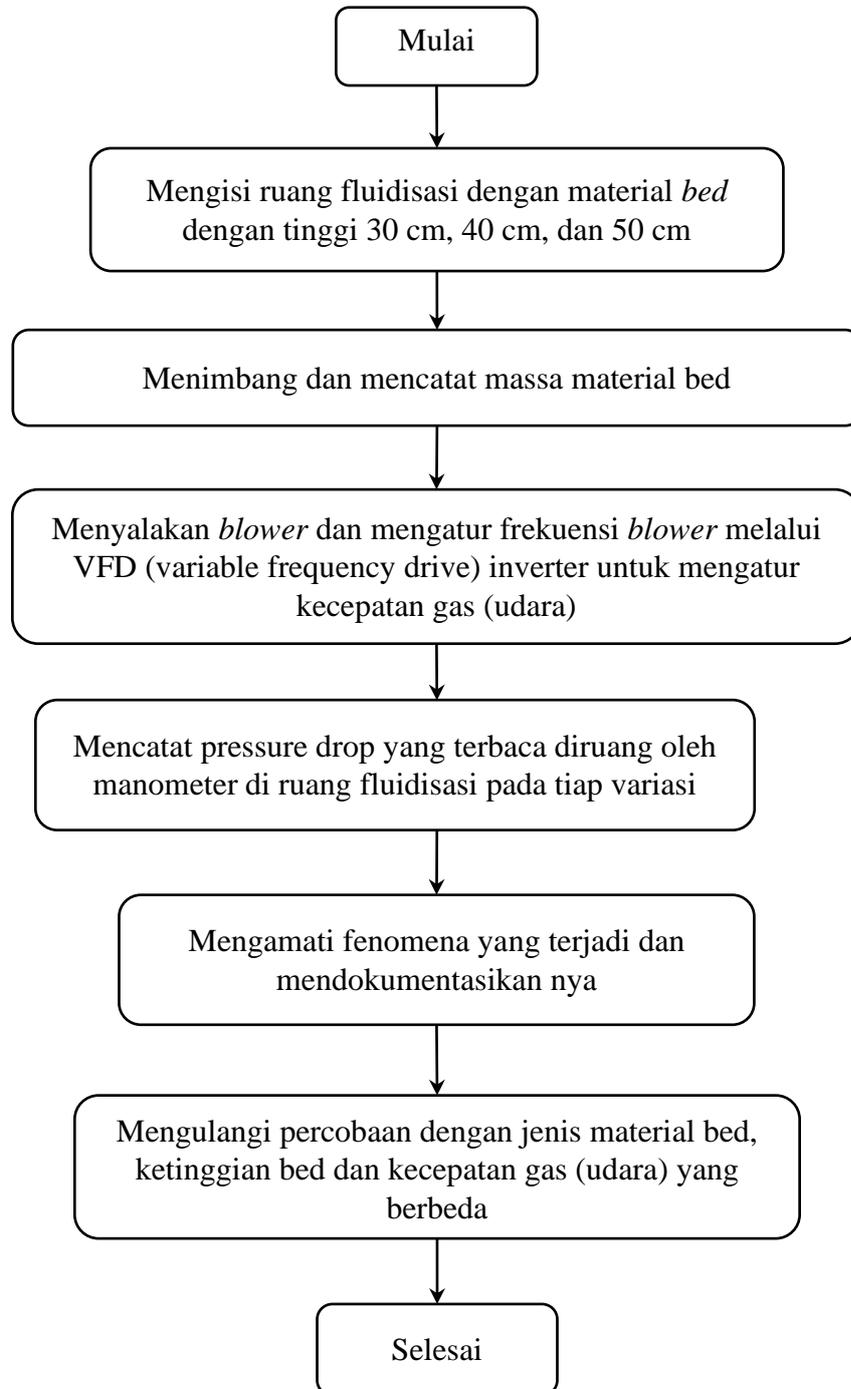
Berikut merupakan diagram alir persiapan *material bed* dengan tahapan sebagai berikut :



Gambar 3.2 Diagram Alir Persiapan *Material Bed*

3.1.3 Diagram Alir Percobaan *Cold-Test* di Ruang Fluidisasi

Berikut Diagram Alir Percobaan Proses Fluidisasi Uji Di CFB Boiler dengan tahapan sebagai berikut :



Gambar 3.3 Diagram Alir Percobaan Proses Fluidisasi Uji Dingin di CFB Boiler

3.2 Prosedur Percobaan

Berikut merupakan prosedur percobaan pada uji *cold-test* pada *aircap type-bell* inovatif pada penelitian ini sebagai berikut :

3.2.1 Diagram Alir Persiapan Alat dan Ruang Fluidisasi

Proses persiapan alat dan ruang fluidisasi diawali dengan membuat desain *aircap (engineering drawing)* dan ruang fluidisasi menggunakan software inventor, kemudian melakukan pembuatan alat sesuai desain yang telah dibuat di *workshop*. lalu membuat dan merangkai alat fluidisasi dengan orifice, blower, dan manometer air raksa, selanjutnya melakukan pengujian pada ruang fluidisasi dan memastikan semua berfungsi dengan baik dan tidak ada kebocoran pada alat.

3.2.2 Diagram Alir Persiapan Material Bed

Proses persiapan *material bed* dilakukan dengan menyiapkan *material bed* dengan mengecilkan ukuran *material bed*, selanjutnya mengeringkan *material bed* dengan cara mendiamkannya pada suhu ruang selama 24 jam, lalu memilah ukuran dan mengelompokkannya berdasarkan *size-nya* sebesar 4, 5, 7, 10, dan 20 mesh menggunakan sieve shaker, menimbang dan mencatat data pada tiap bed yang tertahan di tiap sieve shaker.

3.2.3 Diagram Alir Percobaan Cold-Test di Ruang Fluidisasi

Proses percobaan *cold-test* di ruang fluidisasi dimulai dengan mengisi ruang fluidisasi dengan *material bed* sesuai variasi ketinggiannya yaitu 30, 40, dan 50 cm. Lalu menimbang dan mencatat massa *material bed* dan menyalakan blower dan atur frekuensi blower melalui VFD Inverter sebesar 10, 20, 30, 40, dan 50 hz untuk mengatur kecepatan udara, dan mencatat pressure drop menggunakan manometer di ruang fluidisasi pada tiap variasi, mengamati fenomena yang terjadi dan mendokumentasikannya lalu mengulangi percobaan dengan variasi yang berbeda.

3.3 Alat dan Bahan

Berikut ini adalah alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini :

3.3.1 Bahan

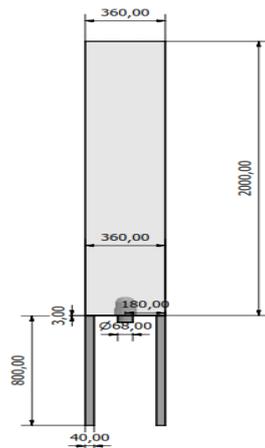
Berikut bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini selama percobaan yaitu sebagai berikut:

- a. Batubara kalori rendah (low rank coal)
- b. Pasir silika

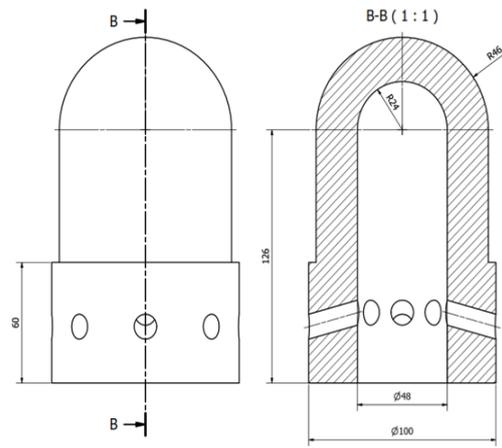
3.3.2 Alat

Berikut alat-alat yang digunakan pada penelitian ini selama percobaan yaitu sebagai berikut:

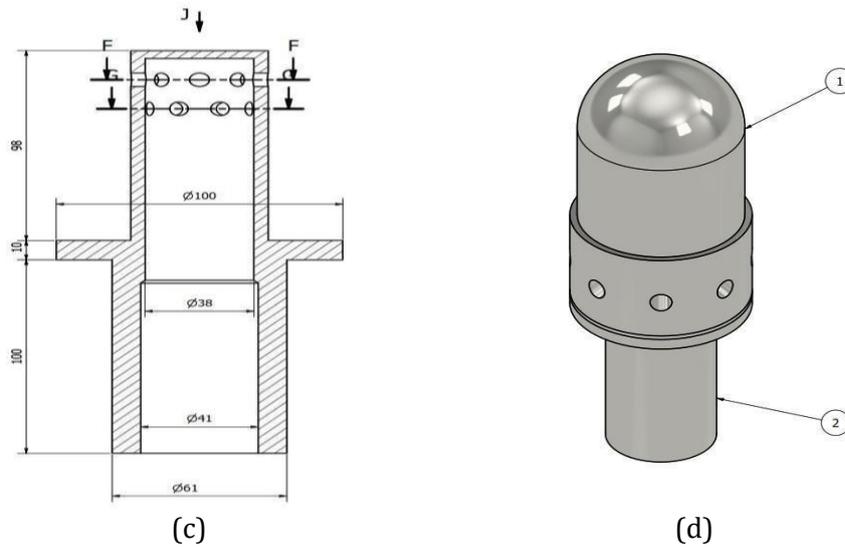
- a. Ruang Fluidisasi 360x360x2000 mm
- b. *Air caps bell-type Inovatif*
- c. Blower Katsu HB-1500A Power 1,5 KW
- d. Manometer digital SNDWAY
- e. Neraca digital Vernier VEB 2000C
- f. Anemometer LINI-T
- g. VFD Inverter Nflixing 9600D 2,2 Kw
- h. Sieve shaker



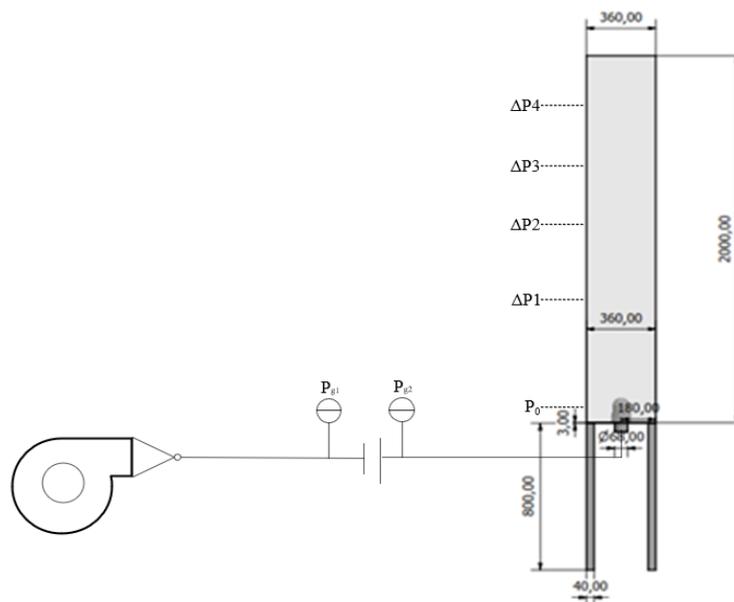
(a)



(b)



Gambar 3.4 (a) Ruang Fluidisasi (b) cover tube aircaps (c) inner tube aircaps (d) Desain 3D *air caps* inovatif



Gambar 3.5 Rangkaian alat fluidisasi

3.4 Variabel Penelitian

Pada penelitian ini terdapat tiga variabel yaitu variabel tetap, bebas, dan terikat. Pada penelitian ini variabel tetap adalah tipe *aircap*. Untuk variabel bebasnya adalah ukuran *material bed*, jenis *material bed*, dan kecepatan udara. Variabel terikat meliputi *pressure drop* dan ketinggian *material bed* yang terfluidisasi.

3.5 Metode Pengumpulan dan Analisa Data

Metode pengumpulan dan analisa data yang digunakan pada penelitian ini adalah metode kualitatif dan metode kuantitatif. Metode kualitatif berupa visual pada fenomena-fenomena berlangsungnya proses fluidisasi pada uji dingin pada CFB, hal tersebut karena dapat memberikan kemudahan untuk pengamatan. Sedangkan metode kuantitatif berupa pengambilan data pada uji particle size distribution (PSD) dengan standar SNI-03-1968-1990. Lalu menganalisa kurva karakteristik partikel dengan pengambilan data *pressure drop* dan kecepatan fluida ketika mengalir melalui *air cap bell-type* inovatif dalam plot logaritmik, Serta menganalisa dan menghitung nilai U_{mf} percobaan dan teori berdasarkan menggunakan persamaan :

$$\frac{d_m U_{mf} \rho_g}{\mu} = \left(33.7^2 + 0.0408 \frac{d_m^3 \rho_g (\rho_m - \rho_g)}{\mu^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 33.7 \dots\dots\dots 3.1$$

dimana persamaan ini didapatkan berdasarkan (Genehr et al., 2020) untuk menghitung nilai U_{mf} pada partikel campuran, selanjutnya merupakan persamaan yang didapatkan

$$\frac{d_m U_{mf} \rho_g}{\mu} = \left(C_1^2 + C_2 \frac{d_m^3 \rho_g (\rho_m - \rho_g)}{\mu^2} \right)^{\frac{1}{2}} - C_1 \dots\dots\dots 3.2$$

dimana nilai C_1 dan C_2 merupakan konstanta yang didapatkan dari eksperimen sebagai 27,2 dan 0,0408 (Basu, 2015), persamaan selanjutnya merupakan persamaan ergun yang mana dapat dilihat di bawah :

$$\frac{\Delta P g_c}{\rho L} = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{S_p}{V_p} \left(\frac{K_1 \mu g U_{mf}^{(1-\varepsilon)} S_p}{\rho v_p} + K_2 \cdot U_{mf}^2 \right) \dots\dots\dots 3.3$$

Setelah itu untuk mengetahui korelasi tiap persamaan dengan hasil eksperimen dapat menggunakan persen eror, absolut persen error dan RMS eror berdasarkan persamaan di bawah ini.

$$E_r = 100 \left(\frac{1}{N} \right) \sum_1^N \left(\frac{X_{exp} - X_{teori}}{x_{exp}} \right) \dots\dots\dots 3.4$$

$$E_r = 100 \left(\frac{1}{N} \right) \sum_1^N \left| \left(\frac{X_{exp} - X_{teori}}{x_{exp}} \right) \right| \dots\dots\dots 3.5$$

$$E_{RMS} = \left[\left(\frac{1}{N} \right) \sum_1^N (X_{exp} - X_{teori})^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots 3.6$$

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Material Bed

Material bed memiliki karakteristik yang berbeda dalam ruang fluidisasi, karena itu perlu untuk memahami sifat dari material bed. Pada proses fluidisasi CFB boiler banyak menggunakan pasir silika dan batubara, kedua material padat memiliki fungsi yang berbeda dalam CFB boiler.

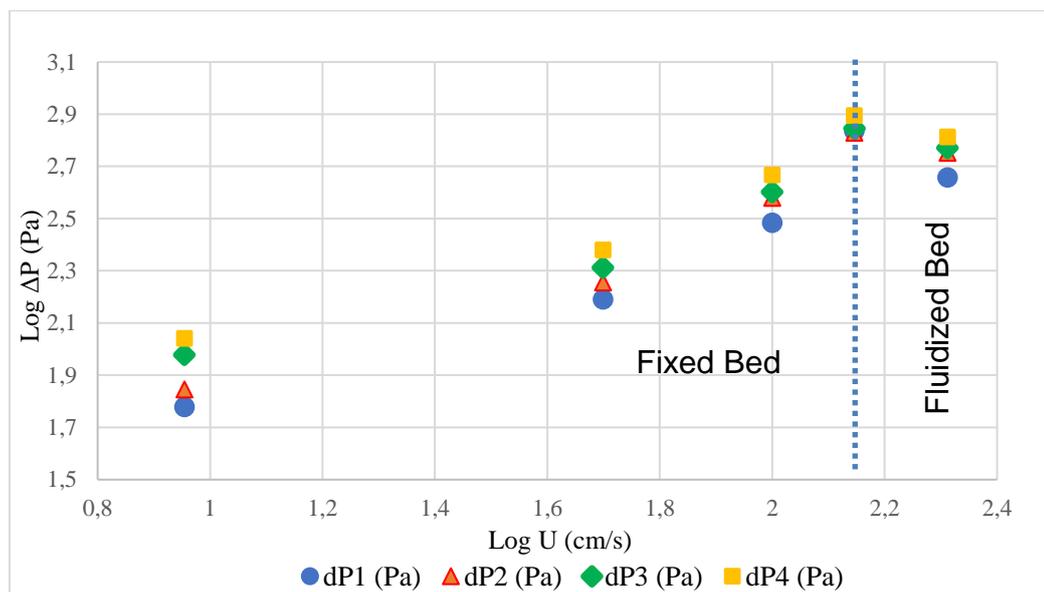
Pasir silika merupakan bahan material bed yang sering digunakan dalam proses fluidisasi di berbagai industri. Berdasarkan klasifikasi kurva geldart pasir silika berada pada group B. Material bed yang berada pada group B cenderung lebih mudah untuk terfluidisasikan. Ukuran d_{50} pada material pasir pada percobaan ini adalah 0,583 mm. Pada CFB boiler batubara digunakan sebagai sumber bahan bakar. Batubara sendiri mempunyai sifat basah dan berair dan menimbulkan kondisi pada batu bara menjadi lengket. Parting adalah material sedimen berupa carbonaceous mudstone yang tersisip antar lapisan batu bara. Parting sendiri mempunyai sifat hydrophilic yaitu kondisi dimana suatu batuan mudah berikatan dengan air. Ukuran d_{50} pada material batubara pada percobaan ini adalah 1,169 mm dan masuk kedalam grup D pada kurva geldarts. Batubara sulit terfluidisasi karena membutuhkan kecepatan yang jauh lebih tinggi untuk membuat terfluidisasi partikel ini (Basu, 2015).

Tabel 4.1 Karakteristik material bed

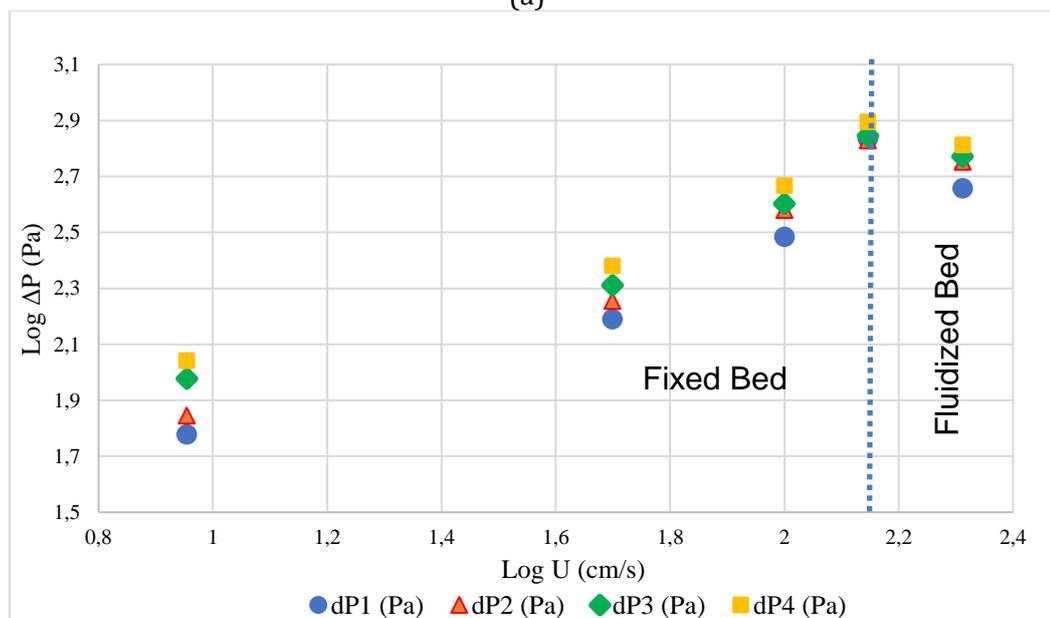
Material bed	Densitas	Ukuran (mesh)	% berat
Pasir Silika	1420 g/cm ³	20	8,62%
		-20 + 35	29,06%
		-35 +30	10,94%
		-30	51,38%
Total		100 %	
Batubara	600 g/cm ³	< 4	0,06%
		-4, 1-5	0,10%
		5, 1-7	0,50%
		7, 1-10	14,01%
		10, 1-20	81,57 %
		>20	3,75%
Total		100 %	

4.2 Kurva Karakteristik Fluidisasi Pasir Silika

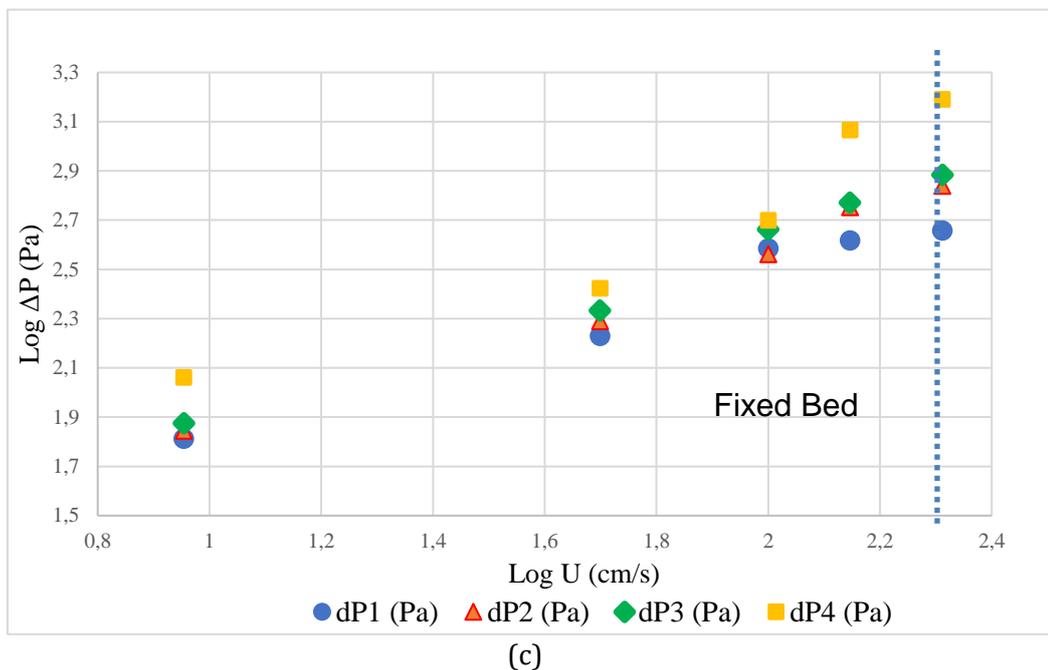
Karakteristik unggun yang di fluidakan dapat digambarkan dengan kurva karakteristik fluidisasi, hal ini dapat mempermudah untuk memahami bagaimana material berperilaku di ruang fluidisasi, dengan mengevaluasi kurva karakteristik pada pada tiap variasi. Kurva karakteristik fluidisasi di dapatkan dari kurva pressure drop sebagai sumbu X dan kecepatan udara dalam bentuk logaritma pada sumbu Y, kurva karakteristik fluidisasi dapat dilihat pada gambar 4.1 di bawah ini.



(a)



(b)



(c)
Gambar 4.1 Kurva karakteristik fluidisasi pasir silika pada ketinggian (a) 30 cm
 (b) 40 cm (c) 50 cm

Pada kurva karakteristik fluidisasi material bed pasir silika digunakan 4 titik pengukuran ΔP untuk mengevaluasi kondisi fluidisasi pada tiap ketinggian bed yaitu ΔP_1 , ΔP_2 , ΔP_3 , dan ΔP_4 ke-4 titik tersebut dibedakan pengambilan datanya berdasarkan letak ketinggian nya seperti pada gambar 3.4.

Kurva karakteristik fluidisasi sendiri di dapatkan dari plot pressure drop dengan kecepatan fluida superficial dalam koordinat logaritmik. Adapun berikut merupakan kecepatan fluida yang didapatkan melalui kalibrasi blower secara berturut-turut 9 cm/s; 50 cm/s; 100 cm/s; 140 cm/s; 205 cm/s.

Pada gambar 4.1 ketinggian 30 cm, grafik mengalami kenaikan secara linear sampai kecepatan fluida mencapai 140 cm/s dan setelah itu pressure drop turun kembali pada kecepatan fluida 205 cm/s, hal ini menunjukkan bahwa material bed sudah terfluidisasi pada kecepatan fluida 205 cm/s, Karena disaat terjadinya fluidisasi pressure drop akan mencapai nilai ΔP maksimum sesaat lalu turun kembali (Astuti, 2015), pada percobaan ini pressure drop maksimum terdapat pada kecepatan fluida 140 cm/s dan sebesar 610 Pa; 720 Pa; 800 Pa; dan 815 Pa.

Kenaikan ΔP sesaat sebelum terjadi fluidisasi dikarenakan interlock antar partikel, atau kecenderungan partikel untuk saling mengunci satu dengan lainnya (Syahrul et al., 2016; Winaya, 2016), adanya fenomena interlock ini dapat terjadi oleh beberapa faktor seperti bentuk partikel. Bentuk partikel yang tidak beraturan atau bersudut cenderung akan saling mengait satu sama lain, selain itu terdapat faktor ukuran partikel dan kecepatan fluida yang dapat menyebabkan interlock antar partikel (Syahrul et al., 2016). Setelah itu pressure drop turun kembali dan tidak akan lagi di pengaruhi kecepatan fluida karena akan konstan terhadap laju alir fluida superficial. Pada sekitar titik ke-4 kecepatan fluida sudah melewati nilai kecepatan minimum fluidisasi (U_{mf}) yang berkisar pada kecepatan fluida 140 cm/s, sedangkan pada saat kecepatan fluida mencapai 205 cm/s material bed sudah terfluidisasikan hampir seluruhnya atau pada kondisi *fluidized bed*.

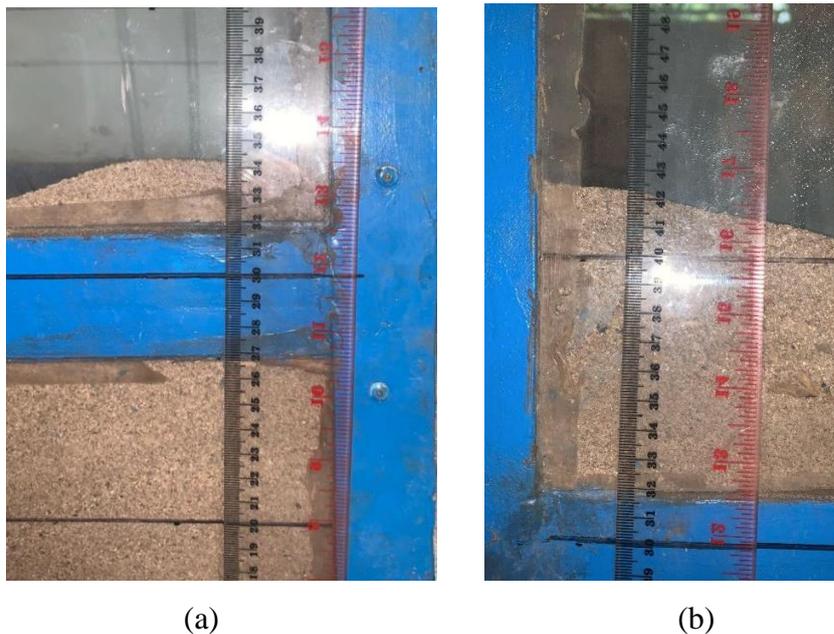
Selanjutnya pada gambar 4.2 pada kurva karakteristik fluidisasi variasi ketinggian 40 cm setelah diamati memiliki kesamaan pada hasil grafiknya dengan ketinggian 30 cm. Kondisi partikel bed di ruang fluidisasi juga sama dengan variasi ketinggian 30 cm, tetapi ΔP yang didapatkan pada ketinggian 40 cm lebih besar berturut-turut 4,91%; 7,64%; 5,33%; dan 0,84% dengan variasi ketinggian 30 cm. Hal tersebut dikarenakan bed yang lebih tinggi memiliki massa yang lebih besar sehingga semakin banyak fluida yang tertahan yang menyebabkan semakin besar hilang tekannya (Kristiantana et al., 2013).

Berdasarkan pada gambar 4.1b grafik mengalami kenaikan secara linear sampai pada kecepatan fluida 140 cm/s; lalu pressure drop mengalami penurunan pada laju 205 cm/s, yang mana menurut (Agi, 2012), pada kecepatan fluida 140 cm/s; nilai kecepatan minimum fluidisasi (U_{mf}) sudah tercapai dan pada titik selanjutnya pressure drop mengalami penurunan yang menunjukkan bahwa material bed pada ruang fluidisasi sudah terfluidisasi.

Selanjutnya pada variasi ketinggian 50 cm grafik pada gambar 4.1c menunjukkan bahwa pressure drop mengalami kenaikan secara linear dan pada variasi ini tidak terjadi fluidisasi, partikel yang terfluidisasikan akan menunjukkan pressure drop mengalami kenaikan hingga mencapai titik maksimum dan akan

turun kemudian akan konstan terhadap laju fluida. Pada variasi ketinggian 50 cm tidak terjadi fluidisasi, hal tersebut dapat terjadi karena kecepatan fluida tidak cukup untuk memberi gaya angkat atau untuk membuat partikel terfluidisasi, selain itu berbeda dengan titik sebelumnya pada ketinggian 50 cm massa partikel bed lebih berat karena volume bed lebih besar, sehingga ketika massa partikel bed semakin berat maka akan semakin besar pula U_{mf} -nya (Kristiantana et al., 2013) yang mana pada percobaan ini kecepatan fluida belum mencapai nilai U_{mf} -nya yang membuat tidak terjadinya fluidisasi pada percobaan ini.

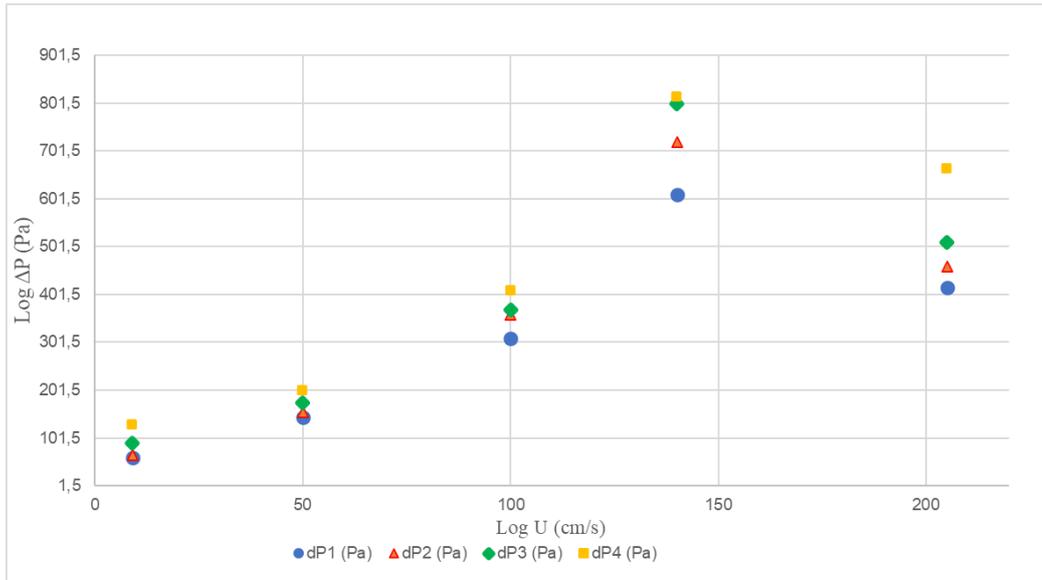
Selain itu diamati fenomena fluidisasi seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.2, dimana pada percobaan ini material *bed* mengalami ekspansi sebesar 34 cm dari ketinggian awal 30 cm dan ekspansi sebesar 42,5 cm dari ketinggian awal 40 cm setelah material *bed* selesai terfluidisasikan.



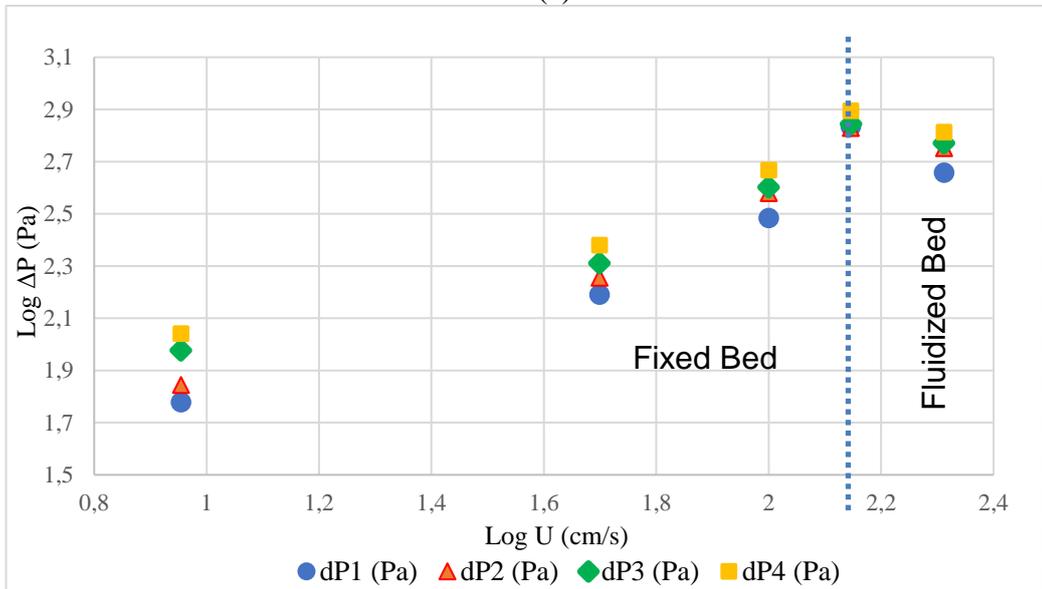
Gambar 4.2 Ekspansi material bed pada variasi (a) 30 cm (b) 40 cm

Ekspansi *bed* yang terjadi pada ruang fluidisasi dapat terjadi karena partikel *bed* yang terangkat saat terfluidisasi menciptakan ruang antar partikel yang lebih besar sehingga terjadi nya peningkatan ketinggian bed saat bed di kondisi akhir fluidisasi. Pasir silika yang digunakan dalam penelitian ini memiliki diameter partikel rata-rata sebesar 0,67 mm,. menurut klasifikasi kurva geldart berada pada

grup B, Material bed pada grup B memiliki karakteristik partikel yang cenderung lebih mudah terfluidisasikan (Cocco & Chew, 2023), karena itu jika kecepatan fluida cukup, maka fluidisasi dapat terjadi. Dalam penelitian ini fluidisasi terjadi pada variasi 30 cm dan 40 cm. Adapun berikut merupakan perbandingan kurva karakterstik dalam bentuk logaritmik dan linear



(a)



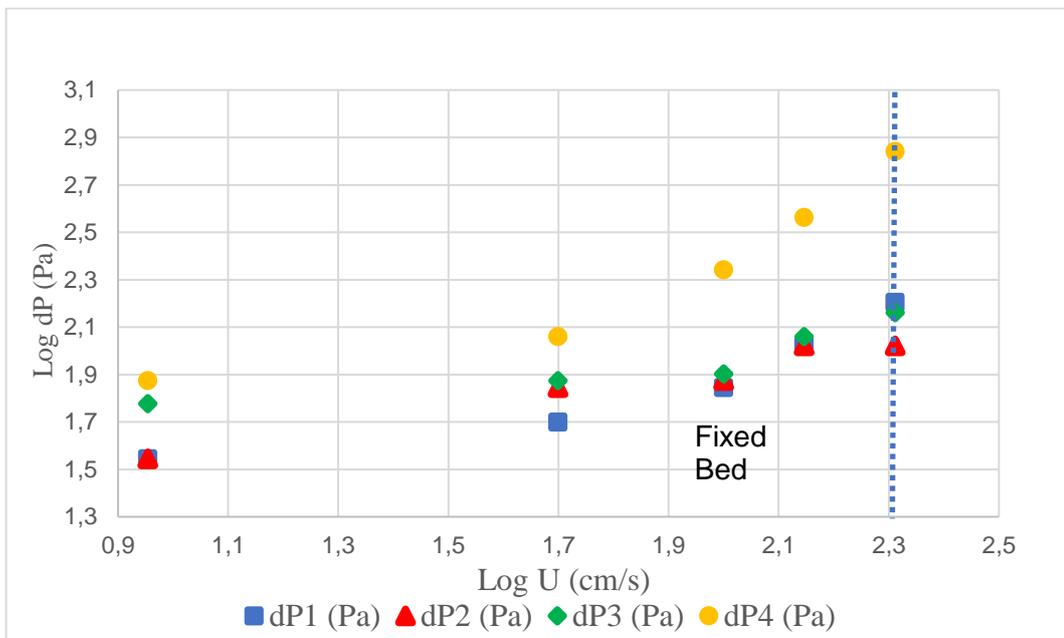
(b)

Gambar 4.3 Perbandingan kurva karakteristik fluidisasi dalam bentuk (a) linear (b) logaritmik

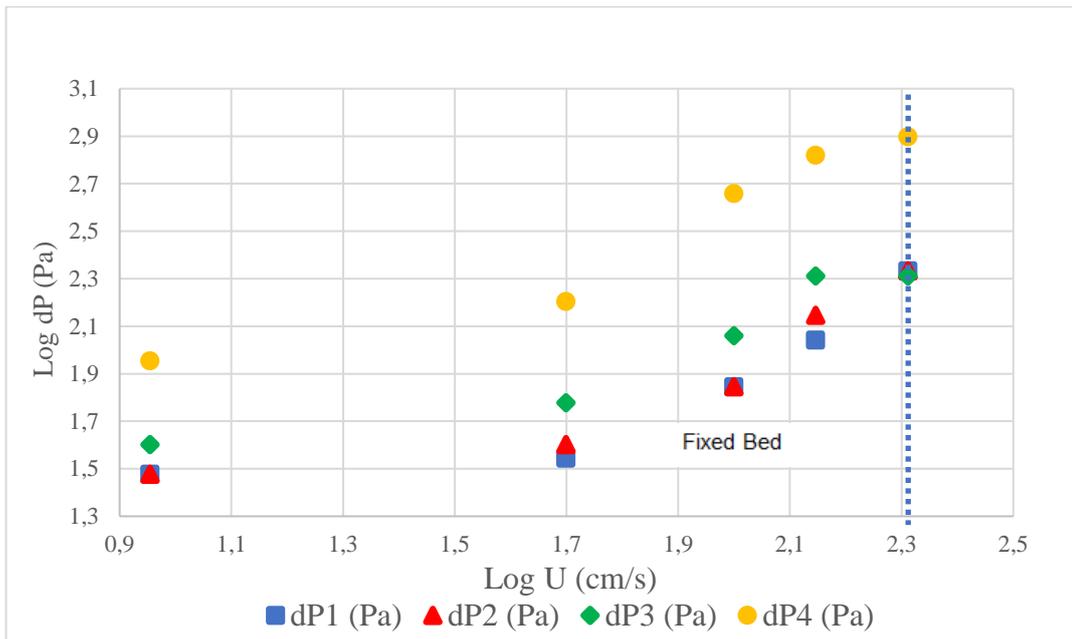
Pada fluidisasi kecepatan fluida bervariasi dari kecepatan awal (dalam fixed bed) hingga sangat besar untuk membuat terfluidisasi memiliki rentang data yang sangat luas, selain itu pressure drop terjadi perubahan drastis dari kondisi awal yaitu nol, hingga mencapai nilai maksimumnya. Berdasarkan hasil perbandingan tersebut grafik yang tidak dalam bentuk log (linear) dan grafik dalam skala log pada gambar di atas bahwa dalam skala linear rentang data sulit diamati yang menyebabkan sulit mengidentifikasi antar regim fluidisasi (fixed bed → minimum fluidization → fluidized bed) (Bi & Grace, 1995). Dalam skala logaritmik setiap tahapan dapat terlihat dengan jelas karena perbedaan kecil dalam data dapat diwakilkan dengan baik, karena itu umumnya digunakan kurva karakteristik fluidisasi dalam bentuk skala logaritmik karena dapat memudahkan analisa dalam penentuan regim fluidisasi

4.3 Kurva Karakteristik Fluidisasi Batubara

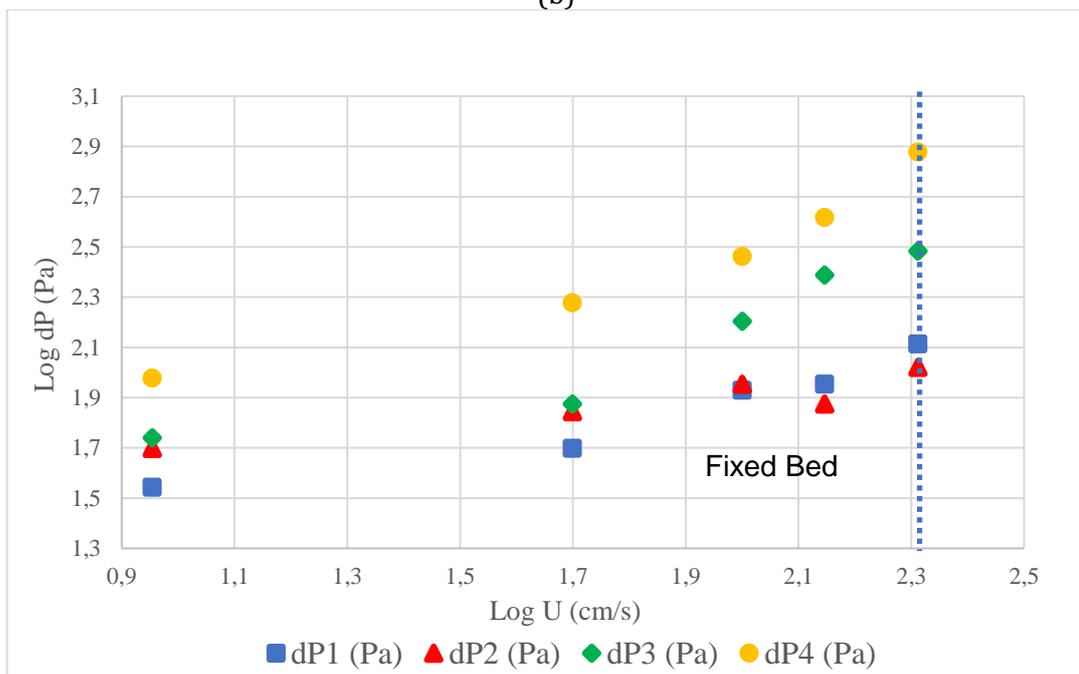
Berikut merupakan kurva karakteristik fluidisasi variasi material bed batubara sebagai berikut :



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.3 Kurva karakteristik fluidisasi batubara pada ketinggian (a) 30 cm (b) 40 cm (c) 50 cm

Pada gambar kurva karakteristik fluidisasi ketinggian 30 cm grafik mengalami kenaikan secara linear pada kecepatan fluida 140 cm/s dan 205 cm/s , dan setelah itu grafik turun pressure drop pada ΔP_2 pada kecepatan fluida 205 cm/s dengan Nilai yang diperoleh pada ΔP_2 lebih kecil dibandingkan ΔP_1 . Pada

kecepatan kecepatan fluida 9 cm/s dan 50 cm/s belum terjadi kenaikan yang signifikan. Menurut Aditya (2020), pada kecepatan tersebut udara belum mampu mengangkat partikel dan udara hanya melewati celah celah partikel tanpa menyebabkan perubahan susunan partikel tersebut. Dan pada kecepatan 100 cm/s dan 140 cm/s terjadi kenaikan diantara kedua nya hal ini terjadi karena partikel yang awalnya diam mulai terjadi ekspansi. Pada kecepatan fluida 205 cm/s terjadi kenaikan dan mengalami penurunan di ΔP_2 . Menurut dalimunthe, dkk. (2018), pressure drop menurun dengan menurunnya kecepatan fluida karena sebelum melewati kecepatan fluidisasi minimum nilai pressure drop akan menurun saat kecepatan superficial diturunkan. Jadi pada kurva karakteristik 30cm ini belum terjadi fluidisasi hanya terjadi ekspansi di dalam unggun

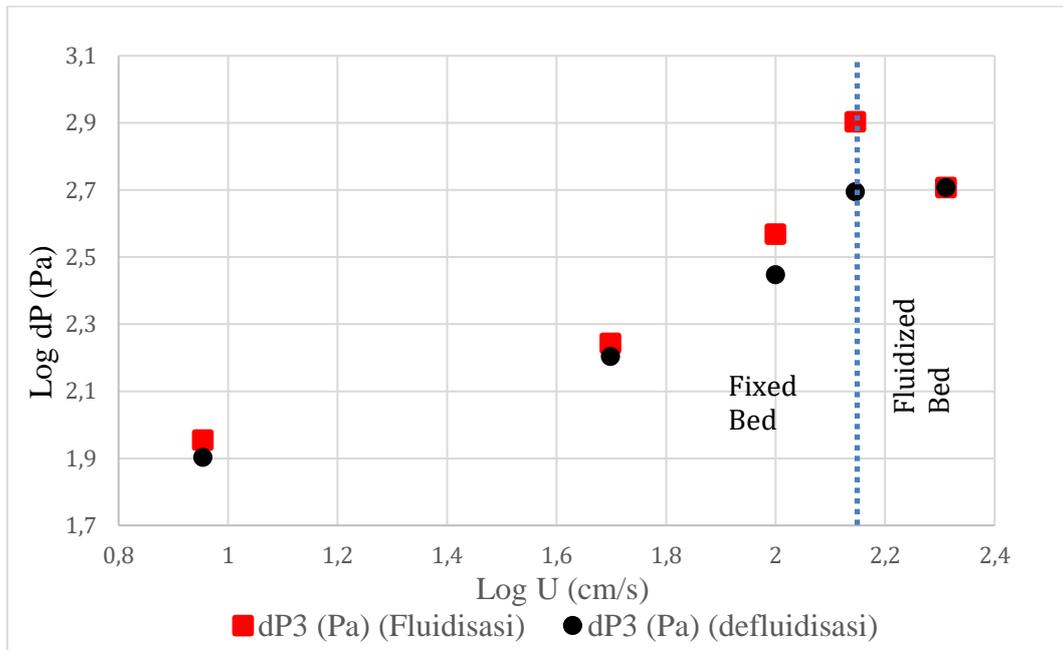
Selanjutnya adalah kurva karakteristik di ketinggian 40 cm menunjukkan pola grafik yang berbeda dengan ketinggian 30 cm. pada kurva di ketinggian 40 cm ini terjadi kenaikan yang signifikan pada ke 5 titiknya dan terjadi 1 penurunan kecepatan fluida 205 cm/s pada ΔP_3 . Setelah itu Pressure drop mengalami kenaikan secara signifikan pada ΔP_1 sampai dengan ΔP_4 Menurut Agung. (2016), Pressure drop naik secara signifikan hal ini terjadi karena ketika kecepatan fluida dinaikan partikel yang awal mula diam akan mulai berekspansi sedikit pada unggun yang awalnya 40cm akan naik menjadi 41cm. Selain itu pada ketinggian 40 cm ini pressure drop cenderung meningkat secara signifikan tetapi tidak terjadinya proses fluidisasi karena hanya terjadi ekspansi pada permukaan unggun. Pada kurva di ketinggian 40cm ini masih sama dengan kurva 30 cm masih belum terjadi fluidisasi.

Kurva karakteristik di ketinggian 50 cm menunjukkan pola yang berbeda dari kedua ketinggian yaitu 30 cm dan 40 cm. Pola pada kurva karakteristik 50 cm ini terjadi perubahan fluktuatif. Pada grafik ketinggian 50 cm ini tidak terjadi fluidisasi (Aditya D, 2020) Hal ini terjadi karena kecepatan fluida fluida tidak cukup kuat untuk memberi gaya angkat untuk membuat terfluidisasi, selain itu berbeda dengan titik sebelumnya pada ketinggian 50 cm, massa partikel bed lebih berat karena volume bed lebih besar, yang mana ketika massa partikel bed semakin berat maka akan semakin besar pula U_{mf} -nya (Kristiantana et al., 2013). Material bed ini termasuk dalam jenis partikel paling kasar karena memiliki ukuran partikel

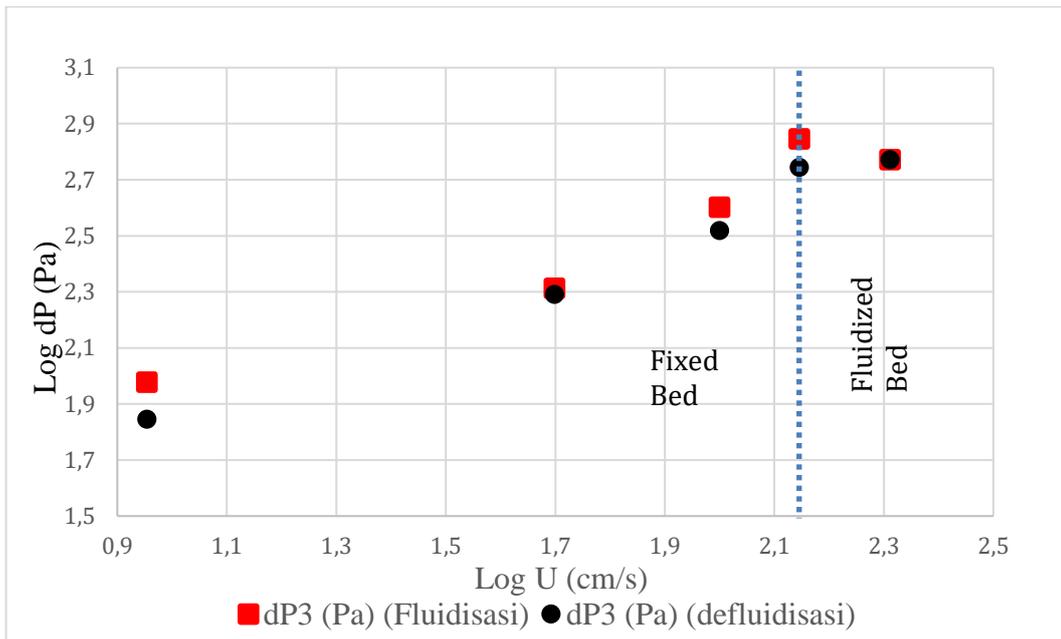
pada d_{50} sebesar 1,169 mm dan masuk kedalam grup D pada kurva geldarts. Batubara sulit terfluidisasi karena membutuhkan kecepatan yang jauh lebih tinggi untuk membuat terfluidisasi partikel ini (Basu, 2015).

4.4 Perbandingan Nilai U_{mf} Experiment dan Prediksi

Kurva karakteristik fluidisasi merupakan cara paling mudah untuk mengetahui perubahan pada ruang fluidisasi dari keadaan *fixed bed* menjadi *fluidized bed*. Ketika partikel sudah mencapai keadaan fluidized bed, maka partikel tersebut telah melewati nilai U_{mf} -nya. Karena itu dilakukan percobaan ini untuk mengetahui nilai U_{mf} -nya. Adapun hasilnya sebagai berikut :



(a)



(b)

Gambar 4.4 Kurva Karakteristik Fluidisasi Pasir Silika (a) 30 cm (b) 40 cm

Untuk mengetahui nilai U_{mf} secara akurat dan paling mudah dapat menggunakan kurva karakteristik fluidisasi (Thermopedia, 2014) dengan membuat grafik Δp ataupun menggunakan tinggi bed saat fluidisasi dengan kecepatan fluidanya. Pada percobaan ini nilai U_{mf} eksperimen didapatkan dengan membuat kurva pressure drop dengan kecepatan fluida yang dinaikkan (*fluidization*) dan kecepatan fluida diturunkan (*defluidization*) dengan menggunakan kurva logaritmik. Nilai U_{mf} didapatkan dengan mengamati grafik tersebut. Berdasarkan hasil yang didapatkan fluidisasi terjadi hanya pada variasi pasir silika di ketinggian 30 cm dan 40 cm

Berdasarkan grafik pada gambar 4.4a dan 4.4b, didapatkan bahwa ketika kecepatan fluida diturunkan (*defluidization*) dari 205 cm/s ke 140 cm/s kurva pada grafik tersebut membentuk garis yang linear. Setelah membentuk garis yang linear ΔP menurun sampai ketitik awal, tetapi ΔP yang didapatkan saat penurunan kecepatan fluida (*defluidization*) lebih rendah dibandingkan saat kecepatan fluida dinaikkan, hal tersebut dapat terjadi karena partikel padat pada kondisi awal tersusun lebih rapat sehingga membuat Δp semakin besar, hal tersebut dapat dibuktikan bahwa pada variasi ketinggian 30 cm saat kondisi akhir ketinggian bed

bereksansi menjadi 34.5 cm dari 30 cm.

Nilai U_{mf} eksperimen sendiri pada percobaan ini diambil dari kecepatan fluida 140 cm/s pada kondisi *defluidization*, karena pada kecepatan fluida 140 cm/s membentuk garis linear dengan titik ke-5 atau pada kecepatan fluida 205 cm/s, selanjutnya pada titik ke-4 atau pada kecepatan fluida 140 cm/s grafik menurun hal ini sesuai dengan teori yang berarti nilai U_{mf} berada di sekitar ± 140 cm/s. Selain itu dilakukan pendekatan teoritis untuk mengetahui nilai U_{mf} yang lebih akurat menggunakan persamaan 3.3. Adapun hasil dapat dilihat pada tabel 4.1 di bawah ini.

Tabel 4.2 Perbandingan nilai U_{mf} Exp, dengan pers 3.1

Partikel bed	Ketinggian (cm)	U_{mf} exp (cm/s)	U_{mf} pers. 3.3 (cm/s)	%error
Pasir silika	30	140	39,72	70,57
	40	140	39,72	70,57

Pada pers. 3.2 %error yang didapatkan yaitu 70,57% dengan nilai U_{mf} sebesar 39,726 cm/s. Terjadinya perbedaan nilai U_{mf} yang berbeda antara teori dengan eksperimen dikarenakan faktor lain seperti pada perumusan persamaan tersebut mengasumsikan bahwa fluidisasi terjadi pada keadaan ideal, selain itu *solid friction* dan interlock antar partikel pasir silika yang membuatnya semakin sulit untuk terfluidisasi karena memerlukan kecepatan fluida yang lebih besar untuk mengatasi gaya interlock antar partikel tersebut.

4.5 Perbandingan *Aircaps Bell-Type innovative* & *Aircaps Bell-Type konvensional*

Pada penelitian ini telah dilakukan percobaan pada *aircap* inovatif untuk membandingkan desain *aircap bell-type* konvensional dan inovatif. Pada *aircap bell-type* inovatif menunjukkan bahwa pressure drop rata-rata yang didapatkan pada variasi material bed pasir silika dan batubara secara berturut-turut 28,13 % dan 20,72 % lebih kecil dibandingkan *aircap bell-type* konvensional. Hal tersebut dapat terjadi karena pada *air-cap bell-type* inovatif telah dimodifikasi strukturalnya,

dengan melakukan optimasi aliran fluida saat melewati *aircap* inovatif, dengan adanya kemiringan 15° pada outlet cover tube dapat meningkatkan jet penetrasi (Liu et al, 2019). Menurut Xiaozhou (2021) penambahan sudut hingga kemiringan 60° dapat mengurangi terjadinya *backflow* sehingga abrasi pada *cover tube* dan *blocking hole* dapat dihindari, selain itu udara dapat mengenai alas di bagian bawah fluidisasi dan memantul ke atas sehingga dapat membuat material bed di alas ruang fluidisasi dapat terangkat. Pada tiap variasi kemiringan sudut pada cover tube dapat membuat pola aliran yang berbeda di tiap sudut. pemilihan sudut kemiringan 15° pada outlet cover tube didasarkan untuk mengontrol aliran fluida agar dapat lebih stabil pada bed yang kecil, serta belum banyaknya terkait penelitian menggunakan sudut kemiringan 15° .

Selain itu pressure drop yang dihasilkan lebih rendah sehingga energi yang digunakan akan lebih sedikit, karena jika pressure drop nya tinggi maka energi yang diperlukan dalam suatu proses akan lebih banyak, dan jika energi lebih banyak maka biaya operasi yang di butuh akan akan meningkat (Zulnazri et al, 2020). Berdasarkan hal tersebut menunjukkan bahwa *aircap* inovatif dapat memberikan pressure drop yang lebih rendah dibandingkan *aircap bell-type* konvensional yang dapat meningkatkan efisiensi fluidisasi.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun berikut merupakan kesimpulan yang didapatkan pada penelitian ini sebagai berikut :

1. Pengaruh variasi kecepatan udara terhadap proses fluidisasi dalam uji dingin (*cold-test*) menunjukkan bahwa, kecepatan minimum fluidisasi (U_{mf}) untuk pasir silika terjadi pada kecepatan sekitar 140 cm/s pada ketinggian bed 30 cm dan 40 cm. Sedangkan pada ketinggian bed 50 cm, tidak terjadi fluidisasi karena kecepatan fluida tidak cukup untuk mengatasi atau mengangkat massa material bed yang lebih berat.
2. Pada material *bed* batubara, tidak terjadi fluidisasi pada semua variasi ketinggian bed karena interaksi antar partikel batubara yang lebih kuat serta ukuran partikel yang jauh lebih besar dibandingkan pasir silika, yang memerlukan kecepatan udara yang lebih besar untuk mencapai U_{mf} .
3. Aircap *bell-type* inovatif terbukti secara eksperimen lebih efisien dibandingkan aircap *bell-type* konvensional, dengan menurunkan pressure drop pada ruang fluidisasi sebesar 28,13% untuk pasir silika dan 20,72 % untuk batubara. Desain inovatif ini menghasilkan distribusi udara udara yang lebih seragam, sehingga meningkatkan efisiensi proses fluidisasi.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan penulis kepada peneliti selanjutnya adalah melakukan percobaan dengan variasi ukuran material bed yang bervariasi, mencoba variasi kecepatan yang berbeda dari sebelumnya pada proses fluidisasi dan menambahkan lebih banyak titik pengambilan data kecepatan fluida.

DAFTAR PUSTAKA

- Winaya, Nyoman Suprpta. 2018. Teknik Fluidisasi Universitas Udayana. (1)1-8
- L. Li (2017) Hot test report of a 220t/hr CFB boiler before retrofit, Report submitted to Guang Dong Special Equipment Test and Research Institute.
- P. Mirek (2011) Designing of primary air nozzles for large-scale CFB boilers in a combined numerical–experimental approach, *Chemical Engineering and Processing* (50) 694-701.
- Y. Zhang, M. Zhang, S. Zhu, Y. Huang, B. Deng, X. Gao, X. Jiang, J. Lyu and H. Yang (2019) Mechanism analysis of gas solid flow non-uniformity problem of 330 MW CFB boiler, *Chemical Engineering Research and Design* (145) 258-267.
- P. Mirek and M. Klajny (2018) Air nozzle design criteria for protection against the backflow of solids in CFB boilers, *Applied Thermal Engineering* (141) 503-515.
- Yang, Shi *et al.* 2008. A transient method to study the pressure drop characteristics of the cyclone in a CFB system. 105-109.
- Anusorn dan Jiraroch Somjun. 2020. An investigation of performance of a conventional U type loop-seal for CFB reactors with side and bottom aerations (163) 58-66.
- Chinsuwan, Anusorn. 2021. A mathematical model for predicting the flow behavior through a CFB reactor U type loop – seal.
- Karagoz, Irfan dan Atakan Avci. 2005. Modelling of the Pressure Drop in Tangential Inlet Cyclone Separators. 39 : 857-865.
- Kristiantana, K., Rohmat, T. A., & Yogyakarta, J. G. (2013). *Pengaruh Tinggi Bed Terhadap Kecepatan Minimum Fluidisasi dan Distribusi Temperatur Dalam Fluidized Bed Combustor*. x, 23–24.
- Zulnazri, Z., Hakim, L., & Zikki, M. A. (2020). Menghitung Pressure Drop pada Fluidized Bed dengan Bahan Ketumbar. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 8(2), 89. <https://doi.org/10.29103/jtku.v8i2.2684>

- Islam, Md.T. and Nguyen, A.V. (2021) 'Effect of particle size and shape on liquid–solid fluidization in a hydrofloat cell', *Powder Technology*, 379, pp. 560–575. doi:10.1016/j.powtec.2020.10.080.
- Muhammad Agung Indra Iswara. (2016). THE STUDY OF FLUIDIZATION COMBUSTION POLYDISPERSE COAL IN THE FLUIDIZED BED USING NUMERIC APPROACH BASED OF CFD SIMULATION. Jurnal Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya.
- Basu, P. (2015). Circulating fluidized bed boilers: Design, operation and maintenance. In *Circulating Fluidized Bed Boilers: Design, Operation and Maintenance*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06173-3>
- Basu, P., & Butler, J. (2009). Studies on the operation of loop-seal in circulating fluidized bed boilers. *Applied Energy*, 86(9), 1723–1731. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.11.024>
- Genehr, G. A., da Silva, Á. R. S., Zinani, F. S. F., & Indrusiak, M. L. S. (2020). Fluidization of binary mixtures of biomass and coal with sand: an experimental study. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(6), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02380-9>
- Lee, J. M., Kim, J. S., & Kim, J. J. (2003). Evaluation of the 200 MWe Tonghae CFB boiler performance with cyclone modification. *Energy*, 28(6), 575–589. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(02\)00155-X](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(02)00155-X)
- Arjunwadkar, A., Basu, P., & Acharya, B. (2016). A review of some operation and maintenance issues of CFBC boilers. *Applied Thermal Engineering*, 102, 672–694. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.008>
- Basu, P. (2015). Circulating fluidized bed boilers: Design, operation and maintenance. In *Circulating Fluidized Bed Boilers: Design, Operation and Maintenance*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06173-3>

- Cocco, R., & Chew, J. W. (2023). 50 years of Geldart classification. *Powder Technology*, 428(May), 118861. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118861>
- Bi, H. T., & Grace, J. R. (1995). Flow regime diagrams for gas-solid fluidization and upward transport. *International Journal of Multiphase Flow*, 21(6), 1229–1236. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(95\)00037-X](https://doi.org/10.1016/0301-9322(95)00037-X)
- Mirek, P., & Klajny, M. (2018). Air nozzle design criteria for protection against the backflow of solids in CFB boilers. *Applied Thermal Engineering*, 141, 503–515. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.06.006>

LAMPIRAN

A. Perhitungan

Berikut merupakan perhitungan pada percobaan ini :

1. Pasir Silika

Tabel A.1 Variasi pada percobaan

Variasi Tinggi (cm)	30	40	50		
Variasi kecepatan blower (hz)	10	20	30	40	50
Kecepatan fluida (cm/s)	9	50	100	140	205

Tabel A.2 Pressure drop pada variasi tinggi 30 cm

Kecepatan Udara (U) cm/s	Pressure Drop							
	dP1 (Pa)		dP2 (Pa)		dP3 (Pa)		dP4 (Pa)	
9	0,05	0,07	0,07	0,06	0,09	0,09	0,12	0,14
50	0,15	0,15	0,14	0,17	0,18	0,17	0,21	0,19
100	0,3	0,32	0,35	0,37	0,36	0,38	0,4	0,42
140	0,6	0,62	0,73	0,71	0,8	0,8	0,82	0,81
204	0,41	0,42	0,45	0,47	0,5	0,52	0,66	0,67

a. Variasi tinggi pasir silika 30 cm

- Pressure drop rata rata pada kecepatan 10 hz atau 9 cm/s

$$\Delta P1 = \frac{0,05+0,07}{2} = 0,06 \text{ kPa}$$

$$\Delta P2 = \frac{0,07+0,06}{2} = 0,065 \text{ kPa}$$

$$\Delta P3 = \frac{0,09+0,09}{2} = 0,09 \text{ kPa}$$

$$\Delta P4 = \frac{0,12+0,14}{2} = 0,13 \text{ kPa}$$

Dengan cara yang sama maka di dapatkan tabel di bawah ini :

Tabel A.3 Pressure drop rata-rata pada variasi ketinggian 30 cm

Kecepatan Udara (U) cm/s	Pressure Drop			
	$\Delta P1$ (Pa)	$\Delta P2$ (Pa)	$\Delta P3$ (Pa)	$\Delta P4$ (Pa)
9	0,06	0,065	0,09	0,13
50	0,145	0,155	0,175	0,2
100	0,310	0,36	0,37	0,41
140	0,610	0,72	0,8	0,815
204	0,415	0,46	0,51	0,665

- Konversi kPa ke Pa

$$\Delta P1 = 0,06 \text{ kPa} \times \frac{1000 \text{ Pa}}{\text{kPa}} = 60 \text{ Pa}$$

$$\Delta P2 = 0,065 \text{ kPa} \times \frac{1000 \text{ Pa}}{\text{kPa}} = 65 \text{ Pa}$$

$$\Delta P3 = 0,09 \text{ kPa} \times \frac{1000 \text{ Pa}}{\text{kPa}} = 90 \text{ Pa}$$

$$\Delta P4 = 0,13 \text{ kPa} \times \frac{1000 \text{ Pa}}{\text{kPa}} = 130 \text{ Pa}$$

Dengan cara yang sama maka di dapatkan tabel di bawah in :

Tabel A.4 Pressure drop dalam bentuk Pa

Kecepatan Udara (U) cm/s	Pressure Drop			
	$\Delta P1$ (Pa)	$\Delta P2$ (Pa)	$\Delta P3$ (Pa)	$\Delta P4$ (Pa)
9	60	65	90	130
50	145	155	175	200
100	310	360	370	410
140	610	720	800	815
204	415	460	510	665

Mengubah kecepatan udara dan pressure drop menjadi bentuk logaritmik kecepatan udara

Kecepatan udara

- Log 9 cm/s = 0,954 cm/s
- Log 50 cm/s = 1,698 cm/s
- Log 100 cm/s = 2 cm/s

- Log 140 cm/s = 2,146 cm/s
- Log 205 cm/s = 2,311 cm/s

Pressured drop

- Log 60 Pa = 1,77 Pa
- Log 145 Pa = 2,19 Pa
- Log 305 Pa = 2,483 Pa
- Log 685 Pa = 2,83 Pa
- Log 455 Pa = 2,65 Pa

Tabel A.5 Pressure drop kurva karakteristik

Kecepatan Udara	Pressure Drop			
	Log $\Delta P1$ (Pa)	Log $\Delta P2$ (Pa)	Log $\Delta P3$ (Pa)	Log $\Delta P4$ (Pa)
(Log U) cm/s				
0,954243	1,778151	1,845098	1,977724	2,041393
1,69897	2,190332	2,255273	2,311754	2,380211
2	2,4843	2,579784	2,60206	2,667453
2,146128	2,835691	2,829304	2,845098	2,89487
2,311754	2,658011	2,752048	2,770852	2,812913

Lalu membuat grafik kurva karakteristik fluidisasi dengan Log U sebagai sumbu Y dan Log ΔP sebagai sumbu X seperti pada gambar 4.1 (a).

Dengan cara yang sama pada variasi 40 cm di dapatkan tabel di bawah ini :

Tabel A.6 Pressure drop pada variasi tinggi 40 cm

Kecepatan Udara	Pressure Drop							
	dP1 (Pa)		dP2 (Pa)		dP3 (Pa)		dP4 (Pa)	
(U) cm/s								
9	0,05	0,06	0,07	0,07	0,1	0,09	0,1	0,12
50	0,16	0,15	0,18	0,18	0,2	0,21	0,25	0,23
100	0,35	0,26	0,38	0,38	0,42	0,38	0,48	0,45
140	0,69	0,68	0,67	0,68	0,7	0,7	0,79	0,78
204	0,46	0,45	0,56	0,57	0,79	0,78	0,63	0,67

Tabel A.7 Pressure drop kurva karakteristik pada variasi 40 cm

Kecepatan Udara	Pressure Drop			
(Log U) cm/s	Log $\Delta P1$ (Pa)	Log $\Delta P2$ (Pa)	Log $\Delta P3$ (Pa)	Log $\Delta P4$ (Pa)
0,954243	1,778151	1,845098	1,977724	2,041393
1,69897	2,190332	2,255273	2,311754	2,380211
2	2,4843	2,579784	2,60206	2,667453
2,146128	2,835691	2,829304	2,845098	2,89487
2,311754	2,658011	2,752048	2,770852	2,812913

Lalu membuat grafik kurva karakteristik fluidisasi dengan Log U sebagai sumbu Y dan Log ΔP sebagai sumbu X seperti pada gambar 4.1 (b).

Dengan cara yang sama pada variasi 40 cm di dapatkan tabel di bawah ini :

Tabel A.8 Pressure drop pada variasi tinggi 50 cm

Kecepatan Udara	Pressure Drop							
(U) cm/s	dP1 (Pa)		dP2 (Pa)		dP3 (Pa)		dP4 (Pa)	
9	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,11	0,12
50	0,18	0,16	0,19	0,2	0,23	0,2	0,26	0,27
100	0,38	0,39	0,35	0,38	0,45	0,47	0,51	0,49
140	0,41	0,42	0,56	0,57	0,58	0,6	1,15	1,18
204	0,45	0,46	0,7	0,68	0,75	0,78	1,5	1,6

Tabel A.9 Pressure drop kurva karakteristik pada variasi 40 cm

Kecepatan Udara	Pressure Drop			
(Log U) cm/s	Log $\Delta P1$ (Pa)	Log $\Delta P2$ (Pa)	Log $\Delta P3$ (Pa)	Log $\Delta P4$ (Pa)
0,954243	1,812913	1,845098	1,875061	2,060698
1,69897	2,230449	2,290035	2,332438	2,423246
2	2,585461	2,562293	2,662758	2,69897
2,146128	2,618048	2,752048	2,770852	3,066326
2,311754	2,658011	2,838849	2,883661	3,190332

Lalu membuat grafik kurva karakteristik fluidisasi dengan Log U sebagai sumbu Y dan Log ΔP sebagai sumbu X seperti pada gambar 4.1 (b).

2. Batubara

Dengan cara yang sama pada variasi Batubara pada variasi 30, 40 dan 50 cm di dapatkan tabel di bawah ini :

Tabel A.10 Pressure drop pada variasi batubara dengan tinggi 30 cm

Kecepatan Udara (U) cm/s	Pressure Drop							
	dP1 (Pa)		dP2 (Pa)		dP3 (Pa)		dP4 (Pa)	
9	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07	0,07	0,08
50	0,05	0,05	0,06	0,08	0,07	0,08	0,11	0,12
100	0,06	0,08	0,07	0,08	0,07	0,09	0,24	0,2
140	0,09	0,12	0,11	0,1	0,11	0,12	0,35	0,38
204	0,17	0,15	0,11	0,1	0,15	0,14	0,69	0,7

Tabel A.11 Pressure drop pada variasi batubara dengan tinggi 40 cm

Kecepatan Udara (U) cm/s	Pressure Drop							
	dP1 (Pa)		dP2 (Pa)		dP3 (Pa)		dP4 (Pa)	
9	0,03	0,03	0,02	0,04	0,04	0,04	0,08	0,1
50	0,04	0,03	0,05	0,03	0,05	0,07	0,15	0,17
100	0,07	0,07	0,06	0,08	0,11	0,12	0,45	0,46
140	0,1	0,12	0,13	0,15	0,2	0,21	0,65	0,67
204	0,21	0,22	0,23	0,2	0,19	0,22	0,78	0,8

Tabel A.12 Pressure drop pada batubara dengan tinggi 50 cm

Kecepatan Udara (U) cm/s	Pressure Drop							
	dP1 (Pa)		dP2 (Pa)		dP3 (Pa)		dP4 (Pa)	
9	0,04	0,03	0,04	0,06	0,05	0,06	0,09	0,1
50	0,06	0,04	0,06	0,08	0,06	0,09	0,2	0,18
100	0,08	0,09	0,08	0,1	0,13	0,19	0,28	0,3
140	0,1	0,08	0,07	0,08	0,23	0,26	0,4	0,43
204	0,13	0,13	0,12	0,09	0,29	0,32	0,78	0,73

3. Partikel Size Distribusi

- Menghitung diameter rata-rata (d_m) pasir silika

Tabel A.13 Partikel size distribution pasir silika

Sample 1	Fraksi (Mesh)	Fraksi (mm)	Berat (%)
Pasir silika	20	0,85	8,62%
	-20+35	-0,850+0,71	29,06%
	-35+30	0,71+0,6	10,94%
	-30	0,6	51,38%
Total			100%

Mencari rata-rata fraksi

- 0,85 mm = 0,85 mm
- $\frac{0,85+0,71}{2} = 0,78$ mm
- $\frac{0,71+0,6}{2} = 0,655$ mm
- 0,6 mm = 0,6 mm

Menghitung d_m

Fraksi \bar{x} × berat (%)

- 0,85 mm × 8,62% = 0,073 mm
- 0,78 mm × 29,06% = 0,227 mm
- 0,65 mm × 10,94% = 0,071 mm
- 0,6 mm × 51,38% = 0,308 mm

Maka

$$d_m = 0,073 + 0,227 + 0,071 + 0,308$$

$$d_m = 0,679 \text{ mm}$$

Dengan cara yang sama maka di dapatkan ukuran d_m material batubara pada tabel di bawah ini :

Tabel A.14 Partikel size distribution batubara

Sample 1	Fraksi (Mesh)	Fraksi (mm)	Fraksi rata-rata(mm)	Berat (%)	Diameter Partikel (mm)
Batubara	<4	<4,76	4,76	0,06%	0,003
	4,1-5	4,75-4	4,38	0,10%	0,004
	5,1-7	4-2,38	3,415	0,50%	0,017
	7,1-10	2,38-2	2,415	14,01%	0,338
	10,1-20	2-0,841	1,4205	81,57%	1,159
	>20	0,841	0,841	3,75%	0,032
Total				100,00%	1,553

4. Mencari nilai U_{mf} prediksi pasir silika

Untuk mencari nilai U_{mf} prediksi dapat menggunakan 3 persamaan di bawah ini :

Pers. 3.1

$$\begin{aligned}
 &= \frac{d_m U_{mf} \rho_g}{\mu} = \left(33,7^2 + 0,0408 \frac{d^3 m \rho_g (\rho_m - \rho_g)}{\mu^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 33,7 \\
 &= \frac{0,00068 \times U_{mf} \times 1,16}{(0,0000181)} = \left(33,7^2 + 0,0408 \frac{0,00068^3 \times 1,16 (1400 - 1,16)}{(0,0000181)^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 33,7 \\
 &= \frac{0,00068 \times U_{mf} \times 1,16}{(0,0000181)} = (1383,84 + 624,341)^{\frac{1}{2}} - 33,7 \\
 &= \frac{0,00068 \times U_{mf} \times 1,16}{(0,0000181)} = 44,812 - 33,7 \\
 &= \frac{0,00068 \times U_{mf} \times 1,16}{(0,0000181)} = 7,612 \\
 &= U_{mf} = \frac{0,0000181 \times 7,612}{0,00068 \times 1,16} \\
 &= U_{mf} = \frac{1,38 \times 10^{-4}}{7,8 \times 10^{-4}} \\
 &= U_{mf} = 0,1776 \text{ m/s} = 17,76 \text{ cm/s}
 \end{aligned}$$

Perhitungan pada Pers. 3.2

$$\begin{aligned}
 &= \frac{d_m U_{mf} \rho_g}{\mu} = \left(27,2^2 + 0,0408 \frac{d^3 m \rho_g (\rho_m - \rho_g)}{\mu^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 27,2 \\
 &= \frac{0,00068 \times U_{mf} \times 1,16}{(0,0000181)} = \left(27,2^2 + 0,0408 \frac{0,00068^3 \times 1,16 (1400 - 1,16)}{(0,0000181)^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 27,2 \\
 &= \frac{0,00068 \times U_{mf} \times 1,16}{(0,0000181)} = (739,84 + 624,341)^{\frac{1}{2}} - 27,2
 \end{aligned}$$

$$= \frac{0,00068 \times U_{mf} \times 1,16}{(0,0000181)} = 36,935 - 27,2$$

$$= \frac{0,00068 \times U_{mf} \times 1,16}{(0,0000181)} = 9,734$$

$$= U_{mf} = \frac{0,0000181 \times 9,734}{0,00068 \times 1,16}$$

$$= U_{mf} = \frac{1,76 \times 10^{-4}}{7,8 \times 10^{-4}}$$

$$= U_{mf} = 0,22712 \text{ m/s} = 22,712 \text{ cm/s}$$

B. Fenoma pada ruang fluidisasi

1. Pasir silika



a. 30 cm



b. 40 cm



c. 50 cm

2. Batubara



a. 30 cm



b. 40 cm



c. 50 cm



KEMENTERIAN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL REPUBLIK INDONESIA
DIREKTORAT JENDERAL MINERAL DAN BATUBARA
BALAI BESAR PENGUJIAN MINERAL DAN BATUBARA *tekMIRA*
Jl. Jenderal Sudirman 623 Bandung - 40211

Tromol Pos : 816

Telepon : (022) 6030483

Fax : (022) 6003373

e-mail : laboratorium.tekmira@esdm.go.id

Nomor: 1357/LBB/XII/2023

08 Desember 2023

SERTIFIKAT ANALISIS
CERTIFICATE OF ANALYSIS

Dibuat untuk : Syifa Ainun Mauk dan Oppy Oktaviani Pajri
Certified for
Jenis contoh : Batubara
Type of sample
Sifat / Kondisi Barang yang diuji : -
Description of sample
Asal contoh : Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon
Origin of sample
Jumlah contoh : 1 (satu)
Amount of sample
Nomor laboratorium : 7943/2023
Laboratory number
Contoh diterima : 07 Desember 2023
Sample received on
Tanggal Selesai Analisis : 07 Desember 2023
Date of analysis
Hasil analisis : Hasil Analisis Terlampir
Analysis results

Laboratorium Batubara,

Astuti Rahayu, S.Si. 

NIP. 19730923 199403 2 005

1 dari 2

Catatan : 1. Hasil Pengujian/analisis ini hanya berlaku untuk contoh yang diuji

Notes The analysis result are valid only for the tested samples

2. Sertifikat tidak boleh diperbanyak (digandakan) tanpa izin dari Pengendali Teknis

The certificate cannot be reproduced without a written permission from the Technical Controller

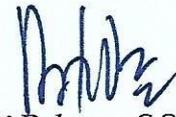
Tanggal Penerbitan/Revisi : 08-07-2022/-

Lampiran Sertifikat Nomor : 1357/LBB/XII/2023

HASIL ANALISIS / ANALYSIS RESULT :

No	No. Lab	Sample Marks	Bulk Density
			g/cm ³
1	7943/23	Batubara	0,64
STANDARD METHOD MENGACU KE			ISO 567

Laboratorium Batubara,



Astuti Rahayu, S.Si.

NIP. 19730923 199403 2 005

2 dari 2

Catatan : 1. Hasil Pengujian/analisis ini hanya berlaku untuk contoh yang diuji

Notes The analysis result are valid only for the tested samples

2. Sertifikat tidak boleh diperbanyak (digandakan) tanpa izin dari Pengendali Teknis

The certificate cannot be reproduced without a written permission from the Technical Controller

Tanggal Penerbitan/Revisi : 08-07-2022/-



KEMENTERIAN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL REPUBLIK INDONESIA
DIREKTORAT JENDERAL MINERAL DAN BATUBARA
BALAI BESAR PENGUJIAN MINERAL DAN BATUBARA tekMIRA
Jl. Jenderal Sudirman 623 Bandung - 40211

Tromol Pos : 816

Telepon : (022) 6030483

Fax : (022) 6003373

e-mail : laboratorium.tekmira@esdm.go.id

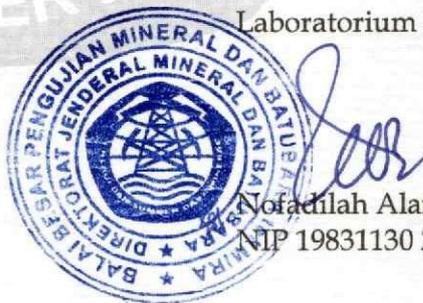
Nomor : 1404/LFM/XII/2023

12 Desember 2023

SERTIFIKAT ANALISIS
CERTIFICATE OF ANALYSIS

Dibuat untuk : Syifa Ainun Mauk & Oppy Oktaviani Pajri
Certified for
Jenis contoh : Pasir Silika
Type of sample
Sifat / Kondisi Barang yang diuji : -
Description of sample
Asal contoh : Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon
Origin of sample
Jumlah contoh : 1 (satu)
Amount of sample
Nomor laboratorium : 7942/2023
Laboratory number
Contoh diterima : 07 Desember 2023
Sample received on
Tanggal Selesai Analisis : 12 Desember 2023
Date of analysis
Hasil analisis : Hasil Analisis Terlampir
Analysis results



Laboratorium Mineral,

Nofadilah Alamanda, S.Si
NIP 19831130 200604 2 001

1 dari 2

Catatan : 1. Hasil Pengujian/analisis ini hanya berlaku untuk contoh yang diuji

Notes The analysis result are valid only for the tested samples

2. Sertifikat tidak boleh diperbanyak (digandakan) tanpa izin dari Pengendali Teknis

The certificate cannot be reproduced without a written permission from the Technical Controller

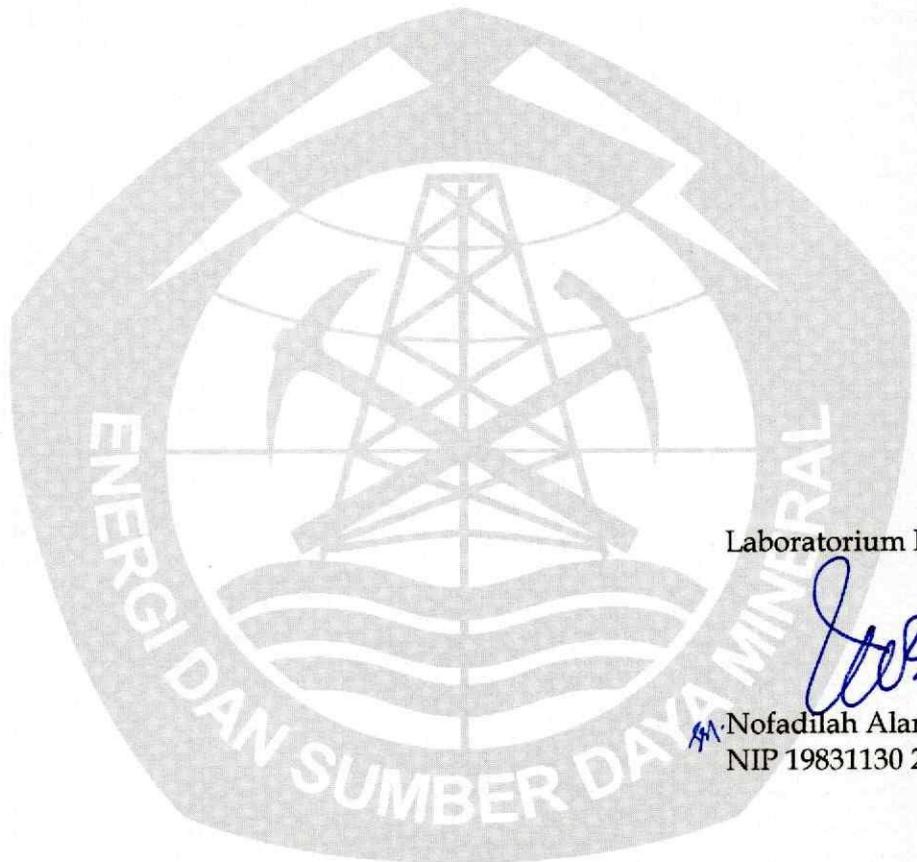
Tanggal Penerbitan/Revisi : 08-07-2022/-

Lampiran sertifikat Nomor : 1404/LFM/XII/2023

Hasil analisis :

Analysis results

Nomor Lab.	Sample ID	Fraksi (mesh)	Fraksi (mm/ μ m)	Berat (%)
7942/2023	Pasir Silika	+20	+850 μ m	8,62
		-20+35	-850 μ m +710 μ m	29,06
		-35+30	-710 μ m +600 μ m	10,94
		-30	-600 μ m	51,38
Total				100,00



Laboratorium Mineral,

Nofadilah Alamanda, S.Si
NIP 19831130 200604 2 001

Catatan : 1. Hasil Pengujian/analisis ini hanya berlaku untuk contoh yang diuji

Notes The analysis result are valid only for the tested samples

2. Sertifikat tidak boleh diperbanyak (digandakan) tanpa izin dari Pengendali Teknis

The certificate cannot be reproduced without a written permission from the Technical Controller