

EFEK GAYA ANTAR PARTIKEL DAN DIAMETER PARTIKEL TERHADAP KECEPATAN MINIMUM FLUIDISASI

Oleh : Irhan Febijanto

Pusat Teknologi Sumberdaya Energi, BPP-Teknologi, irhan@bandung.wasantara.net.id,

Jl. M.H. Thamrin No. 8, Jakarta Pusat, phone: (021)316 9860

Abstract

In this study, the effect of diameter particle and the effect of inter-particle cohesion force due to liquid bridge formation on the minimum fluidization velocity in the fluidized bed have investigated. Also the effect of inter-particle cohesion force on a fluidization condition of the bed has observed by video camera. The investigation results showed bigger diameter can give higher minimum fluidization velocity, and stronger inter-particle force can give higher minimum fluidization velocity, and then make a quality of fluidization of bed lower. Using with this investigation results, the mechanism of fouling and slagging phenomena, which are happen in the coal-fired boiler can be explained.

Key words : *Fluidized bed, minimum fluidization velocity, particle diameter, relative humidity, inter-particle cohesion force*

1. PENDAHULUAN

Pada sistem *fluidized bed boiler*, yang meliputi *circulating fluidized bed boiler*, *circo-fluid fluidized bed boiler*, atau pun *pressurized fluidized bed boiler*, kecepatan minimum fluidisasi atau *minimum fluidization velocity* adalah faktor kecepatan yang penting untuk diketahui. Dalam sebuah desain untuk plant, faktor kecepatan tersebut berhubungan dengan disain *captive power* yang dibutuhkan. *Captive power* atau kebutuhan listrik sendiri yang terlalu besar akan mengakibatkan sistem plant tersebut menjadi tidak efisien dan menjadi mahal dalam pengoperasiannya.

Faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya kecepatan minimum fluidisasi seperti dinyatakan dalam persamaan Ergun⁽¹⁾ adalah diameter partikel, viskositas udara, percepatan gravitasi dan berat jenis partikel, dan biasanya persamaan yang banyak dipakai dalam penelitian fluidized bed ini tidak memperhitungkan gaya antar partikel, dan dimana rongga udara (voidage) pada saat terjadi fluidisasi dapat diabaikan. Dari pengalaman penulis dan referensi-referensi yang ada^{(2),(3),(4)}, perhitungan dari persamaan tersebut dalam skala laboratorium menunjukkan hasil tidak berbeda jauh dengan hasil pengukuran langsung kecepatan fluidisasi.

Gaya antar partikel ini perlu diperhitungkan, karena dalam kenyataannya pada pengoperasian boiler akan dijumpai fenomena *slagging* dan *fouling*. Fenomena ini biasanya diakibatkan karena disain tungku bakar tidak sesuai dengan karakteristik batu bara yang digunakan. Contoh dari fenomena ini bisa ditemui di PLTU Suralaya⁽⁵⁾ dimana disain awal tungku bakar disesuaikan dengan spesifikasi batu bara Bukit Asam, tetapi dengan berjalannya waktu potensi tambang terbuka Bukit Asam menjadi semakin menipis, akhirnya

dipakai batu bara dari lokasi tambang lain yang mempunyai spesifikasi yang mendekati dengan spesifikasi batu bara Bukit Asam, yang diambil dari lokasi tambang di Sumatera dan Kalimantan. Akan tetapi dalam kenyataannya sangat sulit mendapatkan spesifikasi yang hampir sama, sehingga dengan perbedaan - perbedaan spesifikasi yang ada maka terjadilah fenomena *slagging* dan *fouling* di dalam tungku bakar boiler PLTU Suralaya seperti yang terjadi saat ini.

Pada penelitian ini pertama dilakukan penelitian pengaruh efek dari salah satu yang mempengaruhi kecepatan minimum fluidisasi, yaitu diameter partikel. Dan selanjutnya dilakukan pengukuran kecepatan minimum fluidisasi pada saat gaya antara partikel bekerja. Kemudian dilakukan pengamatan kondisi fluidisasi. Gaya antar partikel ini, dalam *coal fired fluidized bed boiler* adalah gaya yang menyebabkan partikel-partikel batubara menggumpal sehingga membentuk fenomena *slagging* dan *fouling*. Percobaan ini memakai *cold model fluidized bed*, sehingga tidak memakai panas. Sebagai ganti partikel dipakai partikel *glass beads*.

2. PENJELASAN MENGENAI OBYEK KAJIAN

2.1. Kecepatan Fluidisasi Minimum dan Rugi Tekan

Kecepatan minimum fluidisasi partikel, u_{mf} , adalah adalah kecepatan terkecil dari kecepatan suplai udara, u_0 , yang dihembuskan dari bawah *fluidized bed* ke kumpulan partikel melalui *plate distributor*, dimana pada saat kecepatan tersebut tercapai, partikel mulai terfluidisasi. Secara visual partikel-partikel tersebut mempunyai kondisi fisik seperti zat cair.

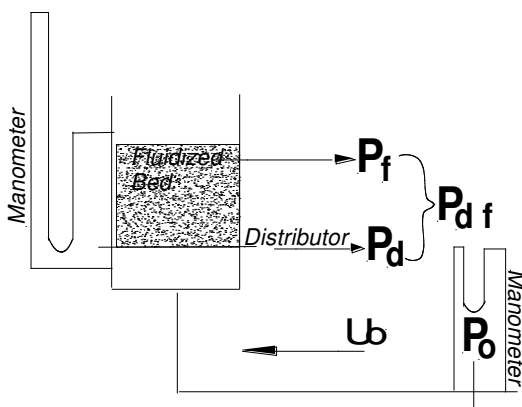
Pengukuran u_0 dilakukan dengan memakai

orifice, dimana kecepatan udara yang melewati orifice plate diukur berdasarkan perbandingan rugi tekan udara di orifice plate, ΔP_o . u_o yang merupakan fungsi ΔP_o , dihitung dengan menggunakan **prinsip Bernoulli**

$$u_o = f(\Delta P_o) \quad (1)$$

Seperti ditunjukkan di gambar 1, setelah suplai udara melalui *orifice*, suplai udara akan melalui *distributor* dan *bed*, lalu dikeluarkan ke bagian atas *bed*. Ketika suplai udara melewati *distributor* dan *bed*, rugi tekanan di *distributor*, ΔP_d dan rugi tekanan di *bed*, ΔP_f akan naik sebanding dengan naiknya u_o . Karena adanya hubungan antara perubahan u_o dengan ΔP_d dan ΔP_f , maka hubungan antara u_o dengan ΔP_d dan ΔP_f , dapat dicari persamaan matematikanya. Persamaan ini dapat dicari melalui pendekatan hasil percobaan.

$$\Delta P_d = f(\Delta P_o) \quad (2)$$



Gambar 1 Komposisi Pressure Drop dalam pengukuran u_{mf}

Untuk menentukan u_{mf} , perlu diketahui hubungan u_o terhadap ΔP_f . u_{mf} tidak dapat ditentukan dengan pengukuran langsung, tetapi ditentukan dalam grafik⁽¹⁾. Penentuan nilai u_{mf} dilakukan dari hasil pengukuran rugi tekan *bed* saat terfluidisasi, ΔP_f terhadap kecepatan suplai udara, u_o . Dari hasil pengukuran tersebut, u_{mf} ditentukan dengan cara mencari nilai u_o pada saat gradient ΔP_f mulai berubah nol.

Faktor-faktor pengukuran u_{mf} , dapat diterangkan melalui gambar 1. Pada pengukuran dibutuhkan dua buah manometer dengan posisi pengukuran seperti ditunjukkan gambar 1. Manometer pertama, digunakan untuk mengukur hubungan antara u_o dengan ΔP_o , manometer kedua, pada saat yang bersamaan digunakan untuk mengukur gabungan rugi tekan antara fluidized bed dan distributor, ΔP_{df} . Dari manometer kedua ini dapat diketahui hubungan ΔP_{df} terhadap u_o atau karena $u_o = f(\Delta P_o)$ maka hubungan antara $\Delta P_{df} = f(\Delta P_o)$ dapat ditentukan.

Faktor-faktor yang bisa diukur secara

langsung dengan manometer adalah u_o , ΔP_{df} , ΔP_o dan ΔP_d . ΔP_f tidak dapat diukur secara langsung, nilai ΔP_f , didapat dari hasil pengurangan rugi tekan *distributor* dan *bed*, ΔP_{df} dengan rugi tekan *distributor*, ΔP_d . Hal ini ditunjukkan di persamaan (3).

$$\Delta P_f = \Delta P_{df} - \Delta P_d \quad (3)$$

Dari persamaan (3), karena $\Delta P_{df} = f(\Delta P_o)$ dapat diketahui, maka dapat dicari persamaan $\Delta P_d = f(\Delta P_o)$. Hubungan persamaan ini, hanya bisa diketahui setelah data percobaan didapat.

Penambahan u_o , pada $u_o > u_{mf}$, tidak akan menyebabkan perubahan pada nilai ΔP_f . Dimana nilai ΔP_f tetap konstan tidak terpengaruh pada perubahan u_o . Karena itu fungsi persamaan antara ΔP_f dengan u_o , dalam penentuan u_{mf} , dalam penelitian-penelitian fluidized bed tidak diwujudkan dalam persamaan. Karena ΔP_f tetap pada $u_o > u_{mf}$, maka yang diperlukan dalam penentuan u_{mf} , adalah selisih antara rugi tekan di *bed* dan *distributor* dengan rugi tekan di *distributor* ($= \Delta P_{df} - \Delta P_d$). Saat ketika selisih ini berubah menjadi tetap, kecepatan u_o , pada saat itu adalah sama dengan u_{mf} .

Secara fisik fenomena ΔP_f berubah menjadi tetap adalah sebagai berikut, ketika udara dari *distributor* melewati *bed* maka akan terbentuk gelembung udara, yang bergerak menuju ke bagian atas *bed* (*freeboard*), dimana gelembung udara ini menjadi jalan aliran udara. Pada $u_o < u_{mf}$, pertambahan u_o , tidak menyebabkan terjadinya gelembung udara yang menyebabkan terjadinya fluidisasi, karena aliran suplai udara di dalam *bed* mengalami hambatan yang besar.

Secara teoritis ΔP_f dapat didekati dengan persamaan Ergun⁽¹⁾, yang ditunjukkan pada persamaan di bawah ini.

$$\Delta P - (1 - \varepsilon)Lg(\rho_p - \rho_f) + F_w = 0 \quad (4)$$

dengan,

ΔP	: rugi tekan	(kPa)
ε	: <i>voidage</i>	(-)
L	: tinggi <i>bed</i>	(m)
g	: gravitasi	(m/det ²)
ρ_p	: berat jenis partikel	(kg/m ³)
ρ_f	: berat jenis partikel udara	(kg/m ³)
F_w	: gaya pada dinding fluidized <i>bed</i>	(Pa)

Ketika gaya antar partikel tidak bekerja nilai dari F_w dapat diabaikan. Ketika gaya antar partikel bekerja, maka akan bekerja gaya antara dinding *bed* dengan kumpulan partikel yang menyentuhnya. Besarnya gaya F_w ini sangat sulit untuk diukur karena kondisi yang dinamis dari pergerakan partikel.

Sedangkan kecepatan minimum fluidisasi, u_{mf} untuk tiap partikel secara teoritis dapat dihitung dengan persamaan di bawah ini⁽¹⁾.

$$u_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_f) g}{1650 \mu} \quad (\text{m/det}) \quad (5)$$

dengan,

- u_{mf} : kecepatan minimum fluidisasi (m/det)
- d_p : diameter partikel (m)
- μ : dynamic viscosity (Pa.det)

Persamaan (5), hanya untuk nilai Archimedes, $Ar < 1.9 \times 10^{4(4)}$. Nilai Archimedes ditunjukkan di persamaan (6). Nilai Archimedes yang kecil menunjukkan bahwa, partikel berada pada pengaruh viskositas yang kecil, sedangkan nilai Archimedes yang besar menunjukkan partikel berada pengaruh momen inerti yang besar.

$$Ar \equiv d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) \frac{g}{\mu^2} \quad (6)$$

dengan,

- Ar : Archimedes number (-)
- d_p : diameter partikel (m)

2.2. Sudut Repose dan Gaya Antar Partikel

Sudut Repose merupakan salah satu parameter phisik yang dipakai untuk menunjukkan kondisi fluidisasi partikel^{(6),(7)}. Sudut repose ini digunakan sebagai index yang menunjukkan besarnya gaya kohesi antar partikel secara kualitatif. Pengukuran sudut repose statis, menggunakan Powder Tester (buatan Hosokawa Co.).

Gaya antar partikel terdiri dari berbagai macam sebab, seperti gaya elektorstatik atau gaya kohesi antar 2 permukaan karena adanya jembatan air (*liquid bridge*). Pada percobaan ini, diciptakan gaya antar partikel yang terjadi karena *liquid bridge*.

Pengukuran langsung stress dari gaya kohesi antar partikel di *liquid bridge* yang terbentuk pada dua permukaan partikel dilakukan oleh Nishino⁽⁷⁾ dengan menggunakan glass beads diameter, $d_p = 0.017 \sim 0.098 \text{mm}$. Dari hasil pengukuran diketahui bahwa pada kondisi $RH < 60\%$, besarnya stress tersebut tidak berubah, walaupun RH semakin mengecil. Yamaguchi⁽⁹⁾ mengukur, gaya absorpsi antar partikel glass beads yang bundar berdiameter rata-rata $d_p = 1.2 \sim 3.7 \text{mm}$ dengan glass plate datar. Keduanya terbuat dari glass Pyrex.

Dari kedua hasil penelitan tersebut, $RH = 60 \sim 75\%$, merupakan kondisi kritis, dimana pada RH tersebut gaya antar partikel yang terjadi karena pembentukan *liquid bridge* di kedua permukaan partikel yang bersentuhan mengalami perubahan, menjadi lebih kuat.

Pada penelitian ini gaya antar partikel dibentuk

dengan peningkatan kelembaban relatif, RH di dalam fluidized bed, cara ini seperti yang dilakukan oleh Nakajima⁽¹⁰⁾. Dengan meningkatnya kelembaban relatif di dalam bed maka jumlah uap air di dalam bed akan meningkat, ini mengakibatkan terjadinya pembentukan lapisan tipis di permukaan partikel, yang mengakibatkan timbulnya gaya adhesive antar partikel. Kondisi ini mengakibatkan partikel-partikel ini akan menggumpal⁽¹⁰⁾.

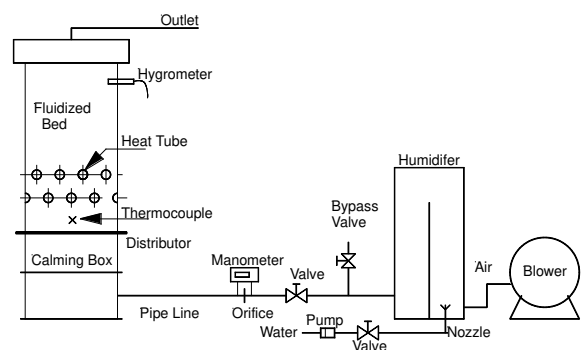
Gaya antar partikel sendiri tidak diukur dalam penelitian ini secara kuantitatif, karena tujuan penelitian ini meneliti efek kerja gaya antar partikel terhadap kondisi fluidisasi.

2.3. Visualisasi Pergerakan Partikel

Efek dari gaya antar partikel terhadap kondisi fluidisasi di dalam bed, diamati dengan melakukan observasi secara visual. Pengamatan seperti ini relatif sedikit dilakukan oleh penelitian-penelitian tentang fluidized bed sebelumnya. Umumnya penelitian tentang gaya antar partikel di dalam bed hanya diamati dalam kondisi statis^{(7),(8),(9)}, lebih menitikkan beratkan kepada mekanisme terbentuknya gaya dan besarnya gaya tersebut, sedangkan pengamatan terhadap efek fluidisasi tidak dilakukan. Nakajima⁽¹⁰⁾ melakukan pengamatan gaya antar partikel di dalam bed, tetapi lebih dititikberatkan pada kondisi di sekitar u_{mf} .

Pada $u_o > u_{mf}$, permukaan *bed* akan bergejolak naik turun, dimana gejolak naik turun akan lebih cepat seiring dengan kenaikan u_o . Semakin tinggi suplai u_o , ketinggian permukaan *bed* akan naik, karena dorongan gelembung udara yang terbentuk oleh adanya suplai udara dari u_o ^{(1),(2),(3)}. Gejolak permukaan *bed* mirip gejolak fluida air yang bergolak.

Untuk menggambarkan gejolak naik-turun permukaan *bed* yang diakibatkan kenaikan u_o , maka pada penelitian ini, diambil ketinggian rata-rata maksimum, L_{max} dan rata-rata minimum *bed*, L_{min} yang didapat dari pengamatan secara visual dari hasil rekaman video kamera.



Gambar 2 Sketsa cold model fluidized bed⁽¹⁰⁾

Hubungan L_{max} , L_{min} terhadap u_o , jika digambarkan secara matematis akan merupakan hubungan yang sangat kompleks, karena menyangkut pergerakan dari ribuan partikel yang

bergerak secara 3 dimensi dan tidak beraturan.

Seperti dipaparkan di atas, pengamatan visualisasi kondisi fluidisasi fluidized bed, sangat mempunyai arti karena tidak banyak penelitian yang melakukan.

3. METODOLOGI

3.1. Alat-alat Yang Digunakan

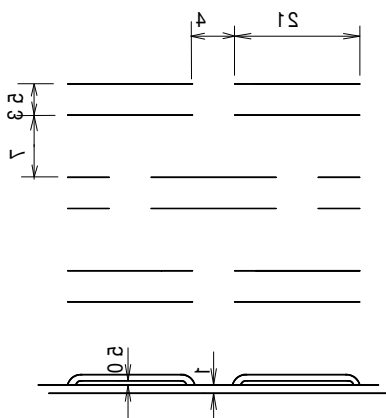
Gambar 2 menunjukkan gambar dari peralatan percobaan, *cold model fluidized bed*, yang mempunyai penampang luas $400 \times 400 \text{ mm}^2$. Dinding dari *cold model fluidized bed* ini terbuat dari bahan *acrylic* yang transparan dengan pertimbangan pengamatan kondisi fluidisasi partikel di dalam *bed* dapat dilakukan secara visual.

Dalam percobaan ini, udara dari *blower* dihembuskan melalui pipa menuju *fluidized bed*. Udara setelah masuk ke dalam *calming box*, akan melewati *distributor* yang terbuat dari *stainless steel*, dengan garis-garis kecil, dengan perbandingan luas permukaan bukaan 4%. Bentuk dari *distributor* ditunjukkan pada gambar 3.

Gambar 3 bagian atas menunjukkan bentuk *distributor* dilihat dari arah atas, gambar 2 bagian bawah adalah bentuk *distributor* dilihat dari arah samping. Lubang tebalnya 0.5mm dan ketebalan plate *distributor* 1mm.

Setelah melewati *distributor*, udara melewati *bed* (kumpulan partikel), kemudian dikeluarkan melalui bagian atas *cold model fluidized bed*.

Kecepatan udara, u_0 diukur dengan *orifice*, dan datanya dibaca melalui digital manometer. Kelembaban udara, RH dikontrol dengan *humidifier*, dimana di dalam *humidifier* ini terdapat *spray water*, yang berfungsi untuk mengontrol kelembaban udara di dalam *bed*.



Gambar 3 Struktur *distributor*⁽¹⁰⁾

Suhu dan kelembaban udara di dalam *bed* diukur masing-masing dengan *digital hygrometer* dan *thermocouple*, yang masing masing dipasang pada posisi 1000 mm dan 50 mm ke arah atas dari *distributor*, seperti ditunjukkan dalam gambar 2.

Posisi pengukuran rugu tekan dengan manometer di *distributor* dan *orifice* ditunjukkan di gambar 1. Posisi titik pengukuran rugu tekan

distributor terletak di atas *distributor* pada ketinggian 750mm dan di bawah *distributor* pada jarak 115mm. Media untuk fluidisasi untuk percobaan pengaruh diameter partikel d_p terhadap kecepatan fluidisasi minimum, u_{mf} dipakai partikel gelas dengan diameter rata rata $d_p=0.20, 0.42$ dan 1.0 mm. Untuk memudahkan penulisan, masing-masing diameter ditulis GB200, GB420 dan GB1000.

Pada percobaan pengaruh gaya kohesi antar partikel terhadap u_{mf} hanya dipakai GB420.

Tabel 1 menunjukkan karakteristik fisik masing-masing partikel gelas dan tabel 2, 3 dan 4 menunjukkan distribusi diameter rata-rata partikel, yang diperoleh dari hasil pengukuran oleh pabrikan glass beads.

Tabel 1 Karakteristik Fisik Partikel

Mean diameter, d_p (mm)	0.20	0.42	1.0
Density (kg/m^3)	2490	2490	2490
Bulk density (kg/m^3)	1535	1567	1548
Archimedes Num.	6559	6559	6559
u_{mf} (m/det)	0.034	0.14	0.50
Geldart group ⁽⁴⁾	B	B	D

Tabel 2 Distribusi diameter GB200

Range, (μm)	Weight (%)
300<	0.0
250~300	0.6
212~250	39.6
180~212	52.3
150~180	7.4
150>	0.1
Total	100.0

Tabel 3 Distribusi diameter GB420

Range, (μm)	Weight (%)
500<	0.0
425~500	53.0
355~425	46.7
300~355	0.1
300>	0.0
Total	100.0

Tabel 4 Distribusi diameter GB1000

Range, (μm)	Weight (%)
1400<	0.0
1180~1400	0.9
1000~1180	76.4
850~1000	22.7
850>	0.0
Total	100.0

3.2. Metoda Pengukuran

Sebelum penelitian dimulai dilakukan prosedur pengukuran sebagai berikut.

1. Pengukuran efek perubahan kecepatan minimum fluidisasi partikel, u_{mf} , terhadap perubahan diameter partikel dilakukan terhadap ketinggian *bed*, L_s , 100, 150 dan 200mm. Partikel yang digunakan GB200, GB420 dan GB1000.
2. Pengukuran efek gaya antar partikel terhadap perubahan kecepatan minimum fluidisasi partikel, u_{mf} , dilakukan sbd di bawah ini. Partikel yang digunakan GB420.
 - a. Pengukuran sudut repose dilakukan dengan menggunakan Powder Tester, yang ditempatkan di ruang tertutup. Dimana relative kelembaban ruangan diatur dari RH=30% sampai 85% dengan menggunakan *humidifier*. Pada saat pengukuran, kelembaban relatif, RH dan suhu ruangan dijaga dalam kondisi tetap.
 - b. Dilakukan pengambilan gambar dengan mikroskop (pembesaran 70 kali) terhadap kondisi statis antara partikel yang bersentuhan pada saat *liquid bridge* belum terbentuk dan kondisi ketika *liquid bridge* terbentuk.
 - c. Pengukuran kecepatan minimum fluidisasi partikel, u_{mf} , dilakukan dengan merubah kelembaban relatif *bed*, RH dari 30% sampai 85%. Pada saat pengukuran u_{mf} , kelembaban relatif dan suhu ruangan dijaga agar tetap konstan.
 - d. Pengamatan visual kondisi fluidisasi *bed* pada saat gaya antar partikel bekerja dilakukan dengan video kamera, kecepatan 33 fps.
 - e. Dari hasil rekaman video-kamera, dilakukan pengukuran langsung terhadap perubahan ketinggian *bed*, L , terhadap u_o . Untuk memudahkan analisa maka dilakukan pengukuran tinggi *bed* terendah rata-rata L_{min} dan tinggi *bed* tertinggi rata-rata, L_{max} .

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

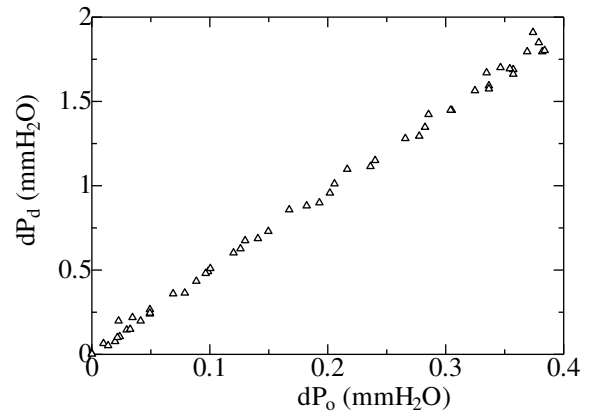
4.1 Kecepatan Fluidisasi Minimum

1. Pengukuran u_{mf} dilakukan pertama dengan menentukan hubungan rugi tekan antara ΔP_d dengan ΔP_o . Pengukuran dilakukan dalam kondisi partikel tidak ada, ruang *fluidized bed* dalam keadaan kosong.
2. Hasil pengukuran ditunjukkan di gambar 4, dimana hubungan antara hasil pengukuran ΔP_d terhadap ΔP_o ditunjukkan di persamaan 7. Persamaan ini memperjelas bentuk dari fungsi $\Delta P_d = f(\Delta P_o)$.

$$\Delta P_d = \sum_{k=0}^n a_k \Delta P_o^k \quad (\text{kPa}) \quad (7)$$

dimana,

$$\begin{aligned} n &= 4 \\ a_0 &= -0.88720 \times 10^0 \\ a_1 &= 5.06621 \times 10^0 \\ a_2 &= -2.11442 \times 10^{-3} \\ a_3 &= -6.04366 \times 10^{-4} \\ a_4 &= 1.05106 \times 10^{-5} \end{aligned}$$



Gambar 4 Pengukuran rugi tekan distributor.

Kemudian setelah itu *fluidized bed* diisi dengan partikel, dan dilakukan pengukuran rugi tekan *bed*, ΔP_f , dengan cara pengukuran hasil pengukuran rugi tekan *bed* dan *distributor*, ΔP_{df} , terhadap rugi tekan *distributor*, ΔP_d , seperti yang ditunjukkan di persamaan (3).

4.2. Efek Diameter Partikel terhadap u_{mf}

Hasil pengukuran u_{mf} terhadap GB200, GB420 dan GB1000 ditunjukkan di gambar 5, 6 dan gambar 7. Sumbu x menunjukkan kecepatan suplai udara, u_o dan sumbu y menunjukkan, rugi tekan *bed*, ΔP_f .

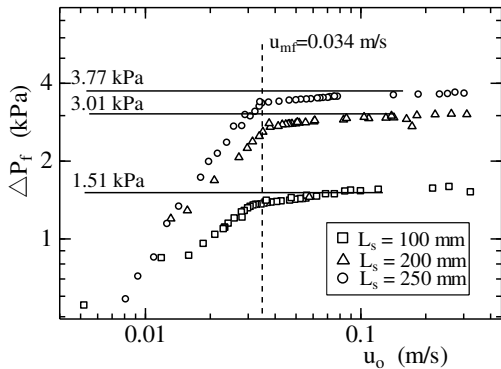
Rugi tekan, ΔP_f menjadi besar seiring dengan kenaikan u_o , dan mencapai nilai konstan (gradient mendekati nilai nol) pada u_{mf} . Nilai u_{mf} untuk masing-masing partikel ditunjukkan oleh garis putus-putus vertikal pada gambar. Hasil pengukuran u_{mf} ini sesuai dengan hasil perhitungan persamaan 5, yang ditunjukkan di tabel 1.

Dari hasil pengukuran diketahui, bahwa pada saat $u_o > u_{mf}$, nilai ΔP_f menjadi konstan. Sebenarnya yang terjadi adalah, pada saat $u_o > u_{mf}$, selisih antara ΔP_{df} dengan ΔP_d ($\Delta P_{df} - \Delta P_d$) menjadi konstan. ΔP_{df} dan ΔP_d akan selalu menjadi besar sebanding dengan kenaikan u_o , selisih dari keduanya menjadi tetap pada saat $u_o > u_{mf}$, yang ditunjukkan dengan konstantanya nilai ΔP_f .

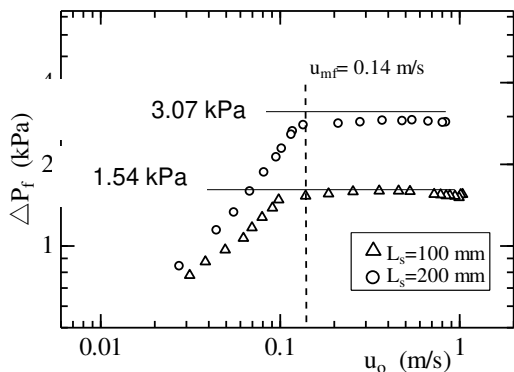
Secara teoritis, nilai konstan ΔP_f dapat dihitung dengan persamaan (4), dan hasil perhitungan ditunjukkan oleh garis lurus pada

gambar. Phenomena phisik saat ΔP_f konstan, telah dijelaskan di tinjauan pustaka di bagian depan makalah ini.

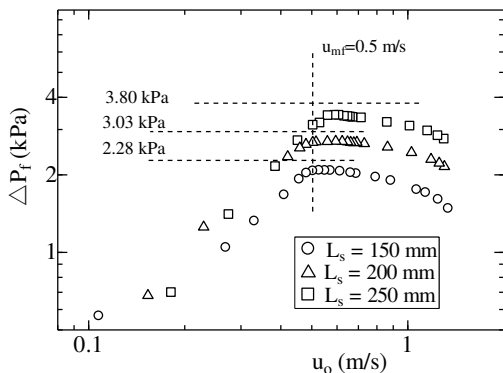
Nilai ΔP_f ($= \Delta P_{df} - \Delta P_d$) berubah menjadi semakin kecil jika u_o mengecil pada kondisi $u_o < u_{mf}$, seperti ditunjukkan pada hasil pengukuran. Hasil pengukuran u_{mf} , yang dilakukan dengan diameter, d_p berbeda dengan partikel yang sama yaitu *glass beads*, ditunjukkan bahwa semakin besar, d_p maka u_{mf} semakin besar.



Gambar 5 Hasil pengukuran kecepatan minimum fluidisasi untuk GB200



Gambar 6 Hasil pengukuran kecepatan minimum fluidisasi untuk GB420

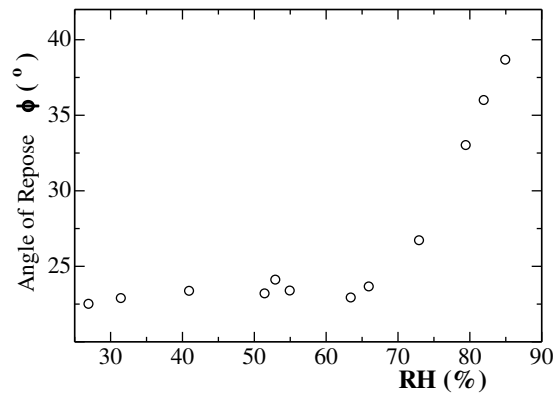


Gambar 7 Hasil pengukuran kecepatan minimum fluidisasi untuk GB1000

Pada pengukuran u_{mf} untuk GB1000, karena gelembung udara (*bubble*) dan juga *voidage*, e_{mf} yang terbentuk relatif lebih besar dibandingkan dengan partikel yang lain, maka pada $u_o > u_{mf}$, dengan semakin tingginya u_o , gelembung udara yang terbentuk semakin besar, sehingga ΔP_f nilainya turun.

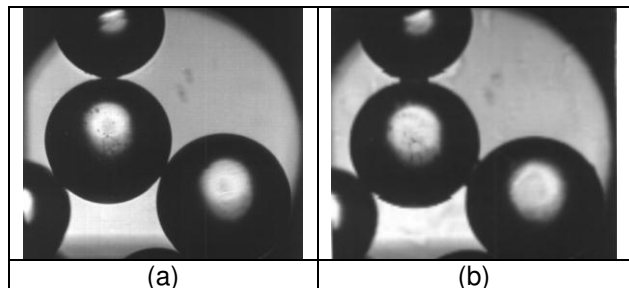
4.3. Sudut Repose

Hasil dari pengukuran sudut repose menunjukkan kenaikan sudut dimulai pada RH=70%, dan sudut repose terus naik sesuai dengan kenaikan RH, seperti ditunjukkan di gambar 8. Dari gambar 8, dapat diketahui bahwa sudut repose pada sekitar RH=60% naik secara mendadak dan sudut repose naik dengan gradient yang tajam sampai RH=85%. Hasil ini sesuai dengan penelitian Nishino⁽⁸⁾ dan Yamaguchi⁽⁹⁾.



Gambar 8 Hubungan antara sudut repose dengan kelembaban relatif, RH

Dari hasil pemotretan dengan mikroskop yang ditunjukkan di gambar 9(a) dan 9(b). Pada gambar 9(b), pada RH=75%, ditunjukkan dengan jelas pembentukan *liquid bridge* terbentuk pada dua permukaan partikel yang saling bersentuhan. Pembentukan *liquid bridge* ini, menyebabkan bekerjanya kohesi.



Gambar 9 Pembesaran glass beads pada kondisi RH=65%(a) dan 75%(b)

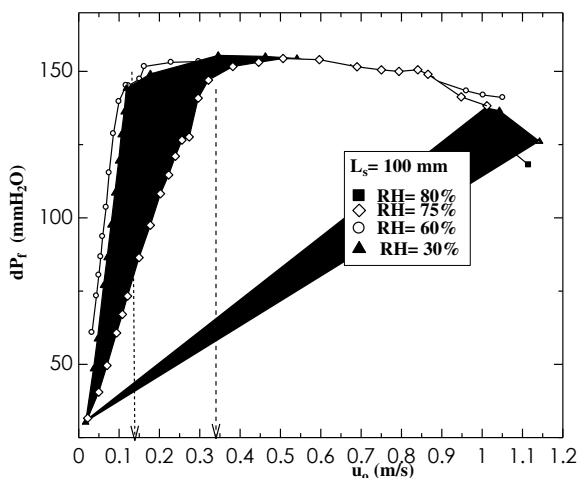
Hasil pengukuran ini juga sesuai dengan hasil pengukuran yang dilakukan Kaiho⁽⁷⁾, yang mengukur

sudut repose dinamis, dengan *glass beads* diameter rata-rata, $d_p=35\sim 100\text{mesh}$. Dimana pada $RH<60\%$, sudut repose tidak menunjukkan perubahan yang besar akan tetapi ketika $RH=70\%$, sudut repose mulai menunjukkan kenaikan besarnya sudut secara mendadak (perubahan *gradient* yang sangat besar).

4.4. Efek Gaya antar Partikel terhadap u_{mf}

Hasil pengukuran efek gaya antar partikel terhadap u_{mf} , ditunjukkan di gambar 10. Pengukuran dilakukan dengan mengubah RH dalam bed dari 30% sampai 80%.

Dari hasil pengukuran diketahui bahwa dengan naiknya RH dari 30% sampai 80%, u_{mf}



Gambar 10 Hasil pengukuran u_{mf} GB420 pada RH yang berbeda.

berubah dari 0.13 m/det pada $RH=30\%$ menjadi 0.53 m/det pada $RH=80\%$.

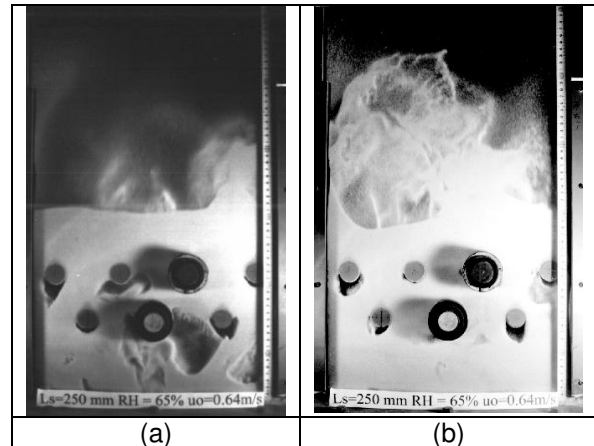
Semakin besarnya u_{mf} ini disebabkan karena dengan meningkatnya kekuatan gaya antar partikel partikel membentuk gumpalan partikel, sehingga menyebabkan udara yang melewati *distributor* untuk naik ke atas, mendapat halangan. Udara yang disuplai dari *distributor*, membutuhkan daya untuk memecahkan gumpalan partikel sebelum naik ke atas. Daya yang dibutuhkan ini semakin besar sebanding dengan semakin besarnya suplai u_0 dari *distributor*.

Hasil di atas sesuai dengan prediksi sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Nakajima⁽¹⁰⁾ dan Seville⁽¹¹⁾, dimana kenaikan gaya antar partikel di dalam bed akan merubah u_{mf} dan *voidage*, e_{mf} . Semakin besar e_{mf} maka u_{mf} akan semakin besar. Dalam kondisi gaya antar partikel tidak bekerja, jika diameter partikel besar, maka e_{mf} akan besar sehingga u_{mf} akan menjadi lebih besar.

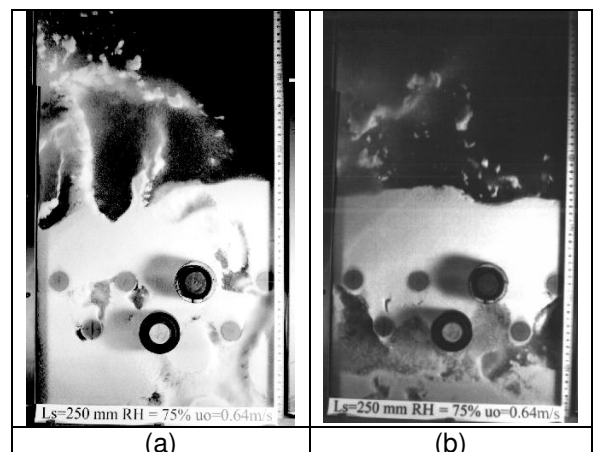
Pada gambar 10, pada $u_0 > u_{mf}$, dengan semakin besarnya u_0 , ΔP_f semakin turun. Ini disebabkan dalam percobaan ini tinggi bed, L_s terlalu rendah, sehingga, ketika u_0 semakin besar, gelembung udara dan *voidage*, e_{mf} yang terbentuk semakin

besar, yang mengakibatkan udara yang naik ke atas, mengalami penurunan hambatan.

4.5. Pengamatan Kondisi Fluidisasi



Gambar 11(a)(b) Kondisi Fluidisasi Partikel dalam *Fluidized bed* di $u_0=0.64$ m/det, $RH = 65\%$



Gambar 12(a)(b) Kondisi Fluidisasi Partikel dalam *Fluidized bed* di $u_0=0.64$ m/det, $RH = 75\%$

Gambar 11(a) dan 11(b) menunjukkan hasil pemotretan kondisi fluidisasi *fluidized bed* dengan ketinggian statis, L_s , 250 mm, pada kecepatan $u_0=0.64$ m/det dan $RH=65\%$, partikel GB420. Dimana bagian yang putih adalah partikel gelas, yang nampak dari ke dua foto tersebut, dalam kondisi bergejolak. Bagian hitam adalah gelembung udara, yang bergerak dari bagian bawah *fluidized bed* (*distributor*) menuju ke bagian atas (*splash zone*). Bagian bulatan yang berwarna abu-abu adalah pipa penghantar panas yang dipakai sebagai *dummy*, sedangkan bagian hitam adalah pipa penghantar panas yang dipakai dalam pengukuran.

Di bagian bawah pipa selalu terbentuk rongga udara (*voidage*), sedangkan bagian atas hampir selalu tertutup partikel. Partikel bergerak/bergejolak karena adanya gelembung udara yang bergerak ke atas, kemudian kumpulan partikel yang bergerak ke arah atas akan kembali lagi ke dalam *bed*.

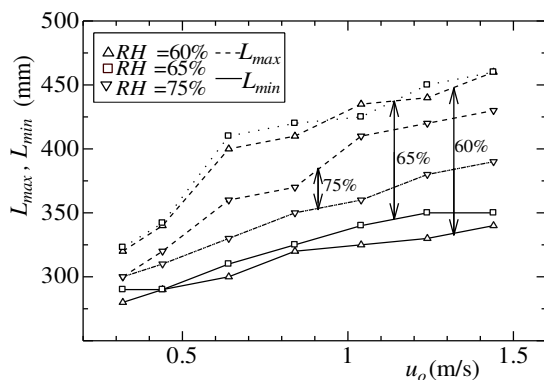
Gambar 12(a) dan 12(b) menunjukkan hasil

pemotretan kondisi fluidisasi di dalam *fluidized bed* dengan ketinggian statis, L_s , 250 mm, pada kecepatan $u_o=0.64$ m/det dan RH=75% partikel GB420.

Dibandingkan dengan kondisi RH=65%, nampak partikel-partikel yang terlempar ke atas di bagian *freeboard* (bagian di atas permukaan bed), sebagian ada yang berbentuk gumpalan partikel. Gumpalan ini diakibatkan adanya gaya antar partikel yang bekerja pada RH=75%. Pada gambar 12(b), di bagian bawah *tube*, nampak *voidage* (bukan gelembung udara) dengan volume yang relatif besar terbentuk.

Dengan semakin meningkatnya RH, pada RH=85%, partikel di dalam bed hampir sama sekali tidak bergerak, pergerakan partikel hanya terjadi di daerah sekitar bed yang terbentuk *channel* yang mengarah ke atas sesuai dengan arah pergerakan udara dari *distributor* yang mengarah ke *freeboard*. Bentuk dari *channel-channel* ini tidak statis, tetapi bentuknya terkadang berubah sesuai dengan kekuatan dinding partikel yang mengelilinginya. Phenomena ini mirip seperti yang terjadi pada penelitian Nakajima[10].

4.6. Pengamatan Tinggi Bed



Gambar 13 Gejolak Perubahan Tinggi Permukaan Bed

Hasil pengukuran perubahan tinggi permukaan bed ditunjukkan di gambar 13. Dalam gambar, garis putus-putus menunjukkan tinggi rata-rata minimum bed, L_{min} , sedangkan garis lurus menunjukkan tinggi rata-rata maksimum bed, L_{max} .

Dari gambar 11(a) dan (b) dan 12(a) dan (b) ditunjukkan bahwa partikel di dalam bed bergejolak karena adanya kecepatan suplai udara dari *distributor* menuju ke atas.

Dengan naiknya RH, maka gaya antar partikel semakin kuat. Efek dari gaya ini, menyebabkan partikel menggumpal, sehingga dibutuhkan suplai udara lebih banyak untuk fluidisasi partikel (gambar 10). Dan penggumpalan partikel ini menyebabkan gejolak naik turun dari permukaan bed berkurang, karena dengan semakin kuatnya gaya antar partikel,

maka suplai udara dari distributor mengalami hambatan untuk masuk ke rongga antar partikel, sehingga kualitas fluidisasi bed menurun. Gambar 13 menunjukkan gejolak naik turun permukaan bed di RH=60% berbeda dengan RH=75%, semakin besar RH maka semakin kecil gejolak yang terjadi.

5. KESIMPULAN

Dari hasil percobaan ini, dapat dilakukan analisa pengaruh diameter partikel dan gaya antar partikel terhadap kecepatan minimum fluidisasi, u_{mf} dan kondisi fluidisasi di dalam bed.:

- Sudut repose dapat dipakai sebagai index besarnya gaya antar partikel yang bekerja pada kondisi dinamis di dalam bed.
- Persamaan Ergun dapat diaplikasikan pada perhitungan u_{mf} pada kondisi ketika gaya antar partikel dapat dianggap kecil/diabaikan.
- Gaya antar partikel mengakibatkan partikel menggumpal, menyebabkan aliran gelembung udara dari distributor tidak dapat menyebar ke seluruh bed. Hal ini berakibat berubahnya karakteristik kondisi fluidisasi. Sehingga dengan semakin kuatnya gaya antar partikel akan terbentuk *channel-channel* udara yang mengarah ke atas, gejolak permukaan bed akan berkurang dan pada akhirnya fluidized bed akan berubah menjadi statis.

DAFTAR PUSTAKA

- Horio, etc, *Reaction Engineering of Fluidized Bed*, Chemical Engineering Series, Baifuan Printing, 1975
- Saxena, C, et. al., *Variation of Solids Population Profile around Horizontal tube Surfaces of Different Diameters Immersed in a Three-Dimensional Gas-Fluidized Bed*, AIChE Symposium Series, 84-262, (199) pp.36-49
- R. Chandran, et. al., *Bed - Surface Contact Dynamics for Horizontal Tubes in Fluidized Beds*, AIChE. Journal, 28-6, (1982) pp. 907-915
- M. Miyamoto et al., *International Journal of Heat Mass Transfer*, (1995), Vol. 38, No.17, pp. 3263
- Kamis, 9 Desember 2003 - KoranTempo - Kerusakan Suralaya Akibat Penggunaan Batu Bara di Bawah Standar
- Manual pemakaian Power Tester, Hosokawa, co.
- Kaiho, et al, "*Effect of fluid absorption on fluidized powder*", *Journal Powder Technology of Japan*, pp. 324-331
- Nishino, et. al, *Material*, 22-238 (1973), pp.663-667.
- Yamaguchi, et. al, *Journal Powder Technology of Japan*, Vol.16, No.9 (1979), pp. 514-519.
- Nakajima et.al. "*Characteristic of humidified fluidized bed particle*", *Journal Powder Technology of Japan*, Vol.27 No.8 (1990) pp. 520-525
- F. Irhan, *Analisa Penghantaran Panas Fluidized*

Bed Boiler Pada Kondisi Slagging dengan Cold Model Fluidized Bed, Prosiding Konferensi ESDAL 2001, Bidang Energi, pp. E-10-14.

[12] J.P.K Seville and R. Clift, "*The Effect of Thin Liquid Layer on Fluidization Characteristics*", Powder Technology, No. 37 (1984), pp. 117-129
