

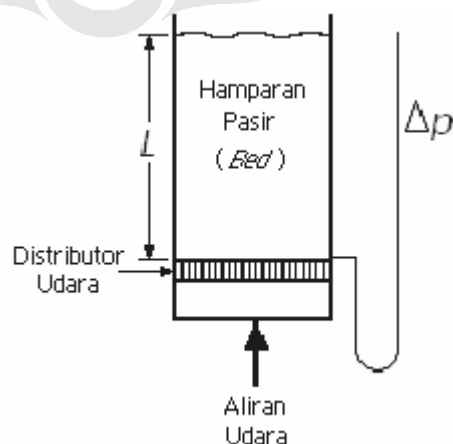
BAB III

FLUIDISASI

3.1 FENOMENA FLUIDISASI

3.1.1 Proses Fluidisasi

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



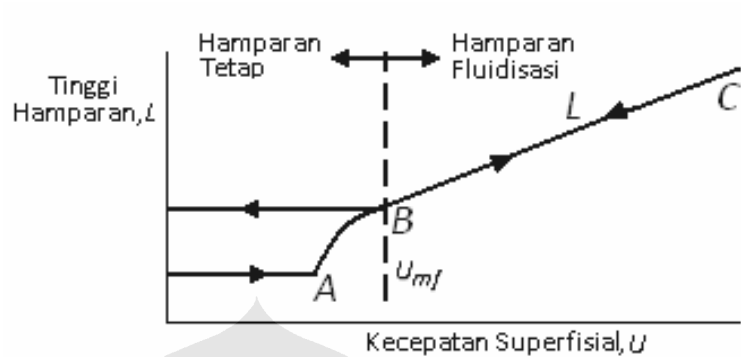
Gambar 3.1. Skematik proses fluidisasi

3.1.2 Kondisi Fluidisasi

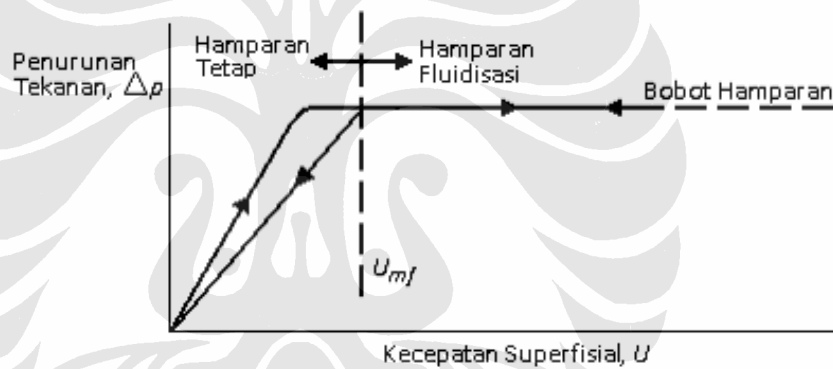
Perhatikan suatu tabung vertikal yang sebagian berisi dengan bahan butiran, sebagaimana terlihat dalam skema gambar 2.10. Tabung itu turbulen pada bagian atas, dan mempunyai plat berpori pada bagian bawah untuk menopang pasir di atasnya serta untuk menyebarkan aliran secara seragam pada keseluruhan penampang. Udara dimasukkan di bawah plat distribusi atau distributor (penyebar udara) dengan laju lambat, dan naik ke atas melalui hamparan tanpa menyebabkan terjadinya gerakan pada partikel. Jika partikel itu cukup kecil, aliran di dalam saluran-saluran di antara partikel-partikel dalam hamparan itu akan bersifat laminar. Jika kecepatan itu berangsur-angsur dinaikkan, penurunan tekanan (*pressure drop*) akan meningkat, tetapi partikel-partikel itu masih tetap tidak bergerak dan tinggi hamparan pun tidak berubah. Pada kecepatan tertentu, penurunan tekanan melintas hamparan itu akan mengimbangi gaya gravitasi yang dialaminya; dengan kata lain, mengimbangi bobot hamparan, dan jika kecepatan masih dinaikkan lagi, partikel itu akan mulai bergerak. Titik ini digambarkan oleh titik *A* pada grafik gambar 3.2. Jika kecepatan itu terus ditingkatkan lagi, partikel-partikel itu akan memisah dan menjadi cukup berjauhan satu sama lain sehingga dapat berpindah-pindah di dalam hamparan itu, dan fluidisasi yang sebenarnya pun mulailah terjadi (titik *B*). Jika hamparan itu sudah terfluidisasi, penurunan tekanan melintas hamparan akan tetap konstan (gambar 3.2 dan 3.3), akan tetapi tinggi hamparan bertambah terus jika aliran ditingkatkan lagi.

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

mematikan aliran udara, dan laju aliran dinaikkan lagi perlahan-lahan sampai hamparan itu mengembang.



Gambar 3.2. Hubungan tinggi hamparan vs. kecepatan superfisial di dalam hamparan zat padat [7]



Gambar 3.3. Hubungan penurunan tekanan vs. kecepatan superfisial di dalam hamparan zat padat [7]

3.1.3 Jenis-Jenis Fluidisasi

3.1.3.1 Fluidisasi partikulat (particulate fluidization)

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

Ketika fluida cairan seperti air dan padatnya berupa kaca, gerakan dari partikel saat fluidisasi terjadi dalam ruang sempit dalam hamparan. Seiring

dengan bertambahnya kecepatan fluida dan penurunan tekanan, maka hamparan akan tereksansi dan pergerakan partikel semakin cepat. Jalan bebas rata-rata suatu partikel di antara tubrukan-tubrukan dengan partikel lainnya akan bertambah besar dengan meningkatnya kecepatan fluida, dan akibatnya porositas hamparan akan meningkat pula. Ekspansi dari hamparan ini akan diikuti dengan meningkatnya kecepatan fluida sampai setiap partikel bertindak sebagai suatu individu. Proses ini dikenal sebagai fluidisasi partikulat.

3.1.3.2 Fluidisasi gelembung (*bubbling fluidization*)

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

Perilaku hamparan fluidisasi gelembung sangat bergantung pada banyaknya dan besarnya gelembung gas dan ini tidak mudah meramalkannya. Ukuran rata-rata gelembung itu bergantung pada jenis dan ukuran partikel, jenis plat distributor, kecepatan superfisial, dan tebalnya hamparan. Gelembung-gelembung cenderung bersatu, dan menjadi besar pada waktu naik melalui hamparan fluidisasi (*fluidized bed*) itu dan ukuran maksimum gelembung stabil berkisar antara beberapa inci sampai beberapa kaki diameternya. Gelembung-gelembung yang beriringan lalu bergerak ke puncak terpisah oleh zat padat yang seakan-akan sumbat. Peristiwa ini disebut “penyumbatan” (*slugging*) dan biasanya hal ini tidak dikehendaki karena mengakibatkan adanya fluktuasi

tekanan di dalam hamparan, meningkatkan zat padat yang terbawa ikut, dan menimbulkan kesulitan jika kita ingin memperbesar skalanya (*scale up*) ke unit-unit yang lebih besar.

3.1.4 Parameter-Parameter Fluidisasi

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

3.1.4.1 Ukuran partikel

Jika suatu pasir dengan menggunakan proses pengayakan (*sieving*) memiliki ukuran partikel yang terdistribusi dari beberapa ukuran partikel d_{pi} , maka ukuran partikel pengayakan rata-rata (*mean sieve size*) d_p [3]:

$$d_p = \frac{1}{\sum x / d_{pi}} \dots\dots\dots (3.1)$$

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

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

3.1.4.2 Kerapatan padatan

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

3.1.4.3 Sphericity

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

dengan area permukaan partikel. Material yang melingkar seperti katalis dan pasir bulat memiliki nilai *sphericity* sebesar 0,9 atau lebih [3].

$$\psi = \frac{d_{sv}}{d_v} \dots\dots\dots (3.2)$$

3.1.4.4 *Bed voidage*

Bed voidage (ϵ) merupakan faktor kekosongan di antara partikel di dalam hampan pasir. *Bed voidage* didefinisikan sebagai perbandingan antara selisih volume hampan dan volume partikel dibagi dengan volume hamparannya. Pada partikel yang tidak memiliki porositas internal, *bed voidage* dapat ditentukan dari kerapatan partikel (ρ_p) dan kerapatan borongan pada hampan (ρ_b) [3].

$$\epsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \dots\dots\dots (3.3)$$

3.1.4.5 *Kecepatan fluidisasi minimum*

Bila gas dilewatkan melalui lapisan hampan partikel padat pasir pada kecepatan rendah, partikel-partikel itu tidak bergerak. Jika kecepatan fluida berangsur-angsur dinaikkan, partikel-partikel pasir itu akhirnya akan mulai bergerak dan melayang di dalam fluida, dan gesekan (*friction*) menyebabkan terjadinya penurunan tekanan (*pressure drop*). Ketika kecepatan gas dinaikkan, penurunan tekanan meningkat sampai besar penurunan tekanan tersebut sama dengan berat hamparannya dibagi dengan luas penampangnya. Kecepatan gas ini disebut kecepatan fluidisasi minimum, U_{mf} . Kecepatan fluidisasi minimum adalah kecepatan superfisial terendah yang dibutuhkan untuk terjadinya fluidisasi. Jika U_{mf} tidak dapat ditentukan secara eksperimental, maka gunakan persamaan di bawah ini [3].

$$Re_{mf} = (1135,7 + 0,0408 \cdot Ar)^{1/2} - 33,7 \dots\dots\dots (3.4)$$

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

$$Re_{mf} = \frac{d_p \rho_f U_{mf}}{\mu_f} \dots\dots\dots (3.5)$$

bilangan *Archimedes* (Ar):

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu_f^2} \dots\dots\dots (3.6)$$

keterangan : U_{mf} = kecepatan fluidisasi minimum (m/s)

d_p = ukuran partikel pengayakan rata-rata (m)

ρ_f = masa jenis fluida udara (kg/m³)

ρ_p = masa jenis partikel (kg/m³)

μ_f = viskositas dinamik fluida udara (kg/ms)

g = percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

Pengukuran kecepatan fluidisasi minimum dapat juga diukur berdasarkan data eksperimental dari grafik penurunan tekanan vs kecepatan superfisial berdasarkan data eksperimental dari titik potong antara bagian kurva yang naik dan bagian kurva yang datar seperti pada gambar 3.2.

3.1.4.6 Penurunan tekanan melintas hampan

Suatu hampan partikel-partikel pasir memberikan resistansi terhadap aliran fluida yang melaluinya. Jika kecepatan aliran tersebut dinaikkan, maka gaya seret (*drag force*) yang terjadi pada partikel-partikel tersebut meningkat. Dengan aliran ke atas melalui hampan yang tidak tenang, partikel-partikel tersebut menyusun kembali sendiri untuk memberikan lebih sedikit resistansi terhadap aliran fluida dan hampan akan cenderung untuk mengembang. Dengan menaikkan lagi kecepatan aliran ke atas, berkembangnya hampan akan terus berlanjut sampai suatu kondisi tercapai yang mana gaya seret yang terjadi pada partikel-partikel cukup untuk menopang berat partikel-partikel dalam hampan. Sehingga penurunan tekanan melintas hampan (ΔP_b) akan kurang lebih sama dengan berat hampan per satuan luas [3].

Persamaan penurunan tekanan melalui distributor melintas hampan pasir adalah:

$$\Delta P_b = h(\rho_p - \rho_f) (1 - \epsilon)g \dots\dots\dots (3.7)$$

- keterangan :
- ΔP_b = penurunan tekanan melintas hamparan (Pa)
 - h = tinggi hamparan pasir (kg)
 - ρ_p = kerapatan partikel pasir (kg/m³)
 - ρ_f = kerapatan fluida udara (kg/m³)
 - ϵ = *bed voidage*
 - g = percepatan gravitasi (m/s²)

3.1.4.7 Penurunan tekanan melintas distributor

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

$$U_{or} = \frac{U_o}{f_{oa}} \dots\dots\dots (3.8)$$

Sehingga persamaan penurunan tekanan melalui distributor adalah [3]:

$$\Delta P_D = \frac{\rho_f}{2} \left\{ \left(\frac{U_{or}}{C_d} \right)^2 - U_o^2 \right\} \dots\dots\dots (3.9)$$

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

Orifice discharge coefficient bergantung pada bentuk dari orifis. Terdapat kemungkinan bahwa udara yang melewati orifis menuju hamparan terfluidisasi (*fluidized bed*) mengalami penurunan tekanan yang lebih sedikit daripada yang tanpa ada partikel atau kosong. Untuk orifis bundar bertepi-persegi dengan diameter d_{or} jauh lebih besar daripada ketebalan plat distributor t , C_d dapat

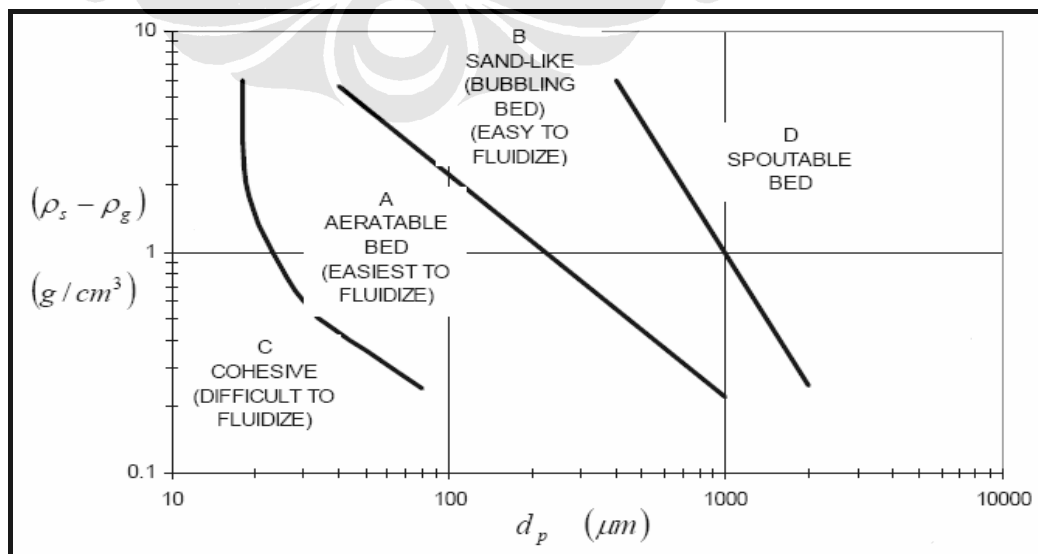
ditentukan sebesar 0,6. Untuk $t/d_{or} > 0,09$, C_d dapat diperkirakan menurut korelasi yang diberikan oleh Qureshi dan Creasy [3]:

$$C_d = 0.82 \left(\frac{t}{d_{or}} \right)^{0.13} \dots\dots\dots (3.10)$$

- Keterangan :
- ΔP_d = penurunan tekanan melintas distributor (Pa)
 - U_o = kecepatan udara superfisial (m/s)
 - U_{or} = kecepatan udara rata-rata melewati orifis (m/s)
 - f_{oa} = fractional open area
 - ρ_f = kerapatan fluida udara (kg/m³)
 - C_D = Orifice discharge coefficient
 - t = tebal plat distributor (m)
 - d_{or} = diameter lubang orifis pada distributor (m)

3.1.4.8 Klasifikasi pasir

Pasir diklasifikasikan berdasarkan bagaimana pasir tersebut terfluidisasi saat dialirkan aliran udara pada kecepatan udara tertentu. Setiap masing-masing kelompok pasir memiliki karakteristik yang berbeda-beda seperti bagaimana terbentuknya gelembung, solid mixing yang terjadi, tingkat mengembangnya pasir dan besarnya nilai penurunan tekanan yang semuanya dipengaruhi oleh diameter partikel pasir dan kerapatan pasir tersebut.



Gambar 3.4. Diagram klasifikasi jenis-jenis kelompok pasir [3]

Geldart meneliti perilaku tiap-tiap kelompok pasir ketika mengalami fluidisasi. Dia mengkategorikan klasifikasi ini dengan cara membuat plot grafik diameter partikel pasir terhadap selisih antara kerapatan partikel pasir dengan kerapatan udara. Diagram klasifikasi jenis-jenis pasir yang dikelompokkan oleh Geldart dapat dilihat pada gambar 3.4.

Klasifikasi jenis-jenis pasir dikelompokkan menurut Geldart yaitu :

a) **Group A**

Pasir yang dikategorikan dalam *group A* menurut Geldart biasanya memiliki kerapatan kurang dari 1400 kg/m^3 dan memiliki ukuran berkisar antara 20 sampai $100 \mu\text{m}$. Para peneliti telah menunjukkan dengan meyakinkan bahwa terdapat gaya antar partikel bahkan pada pasir seperti *cracking catalyst* yang menunjukkan pada kelompok ini. Hampan pasir pada kelompok ini sangat mengembang pada kecepatan udara antara U_{mf} dan kecepatan yang mana gelembung mulai terjadi, U_{mb} , karena pasir seperti itu sedikit kohesif. Pasir jenis ini memperlihatkan suatu peningkatan hampan (*bed*) nyata yang mengembang stabil ketika kecepatan fluidisasi minimum terlampaui dahulu, dan fluidisasi dapat terjaga seragam atau fluidisasi partikulat seperti itu bahkan sampai kecepatan fluidisasi minimum telah terlampaui dua sampai tiga kalinya. Tetapi, dengan memperbesar lagi kecepatan udara sampai pada suatu titik yang mana terjadinya hampan mengempis kembali sehingga pada keadaan kurang mengembang yang kira kira pada tingkat mengembangnya hampan di bawah kondisi fluidisasi minimum dan kebanyakan udara berlebih akan mengalir melalui hampan seperti fase gelembung, yakni yang sering disebut dengan fluidisasi agregativ. Kecepatan udara pada saat yang mana hampan mengempis terjadi merupakan kecepatan minimum gelembung (*minimum bubbling velocity*, U_{mb}).

b) **Group B**

Pasir *group B* menurut Geldart cenderung untuk memiliki ukuran berkisar antara 40 sampai $500 \mu\text{m}$ dan kerapatan berkisar antara 1400 sampai 4000 kg/m^3 . Berkebalikan dengan pasir *group A*, gaya antar partikel diabaikan dan gelembung-gelembung mulai terbentuk pada kecepatan fluidisasi

minimum atau sedikit lebih di atasnya. Berkembangnya hampan kecil dan hampan tersebut mengempis dengan sangat cepat ketika suplai udara dihentikan. Kebanyakan gelembung naik lebih cepat daripada kecepatan udara interstitial dan ukuran gelembung meningkat dengan keduanya yakni tinggi hampan dan kecepatan udara berlebih ($U - U_{mf}$). Pasir jenis ini memperlihatkan pengembangan hampan yang kurang stabil; gelembung (fluidisasi agregativ) terjadi pada kecepatan fluidisasi minimum atau sedikit lebih di atasnya. Gelembung cenderung berkembang sampai diameter gelembungnya terbatas oleh ukuran dari hampan (*bed*) pasir *group B*.

c) **Group C**

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

d) **Group D**

Pasir *group D* biasanya memiliki ukuran lebih besar dari pada $600 \mu m$ dan atau kerapatan yang besar. Walaupun suatu hampan fluidisasi gelembung (*bubbling fluidized bed*) terlihat sangat turbulen dan dapat digambarkan sebagai fluidisasi secara turbulen pada saat kecepatan fluidisasi yang lebih tinggi, kondisi aliran udara di dalam celah-celah pasir cenderung menjadi laminar. Pada pasir jenis ini, laju aliran udara interstitial yang diperlukan untuk fluidisasi lebih besar daripada kecepatan naiknya gelembung, sehingga aliran udara mengalir ke dasar gelembung dan keluar

dari atasnya, yang memberikan suatu cara terjadinya perpindahan udara yang mana hal ini berbeda dengan yang diamati pada pasir *group A* atau *group B*. Kecepatan udara untuk fluidisasi pada pasir yang berkerapatan besar itu tinggi dan proses *solid mixing* cenderung kurang baik.

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

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

Ringkasan secara kualitatif sifat-sifat dari masing-masing kelompok pasir disajikan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1. Klasifikasi Sifat-Sifat Pasir [3]

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

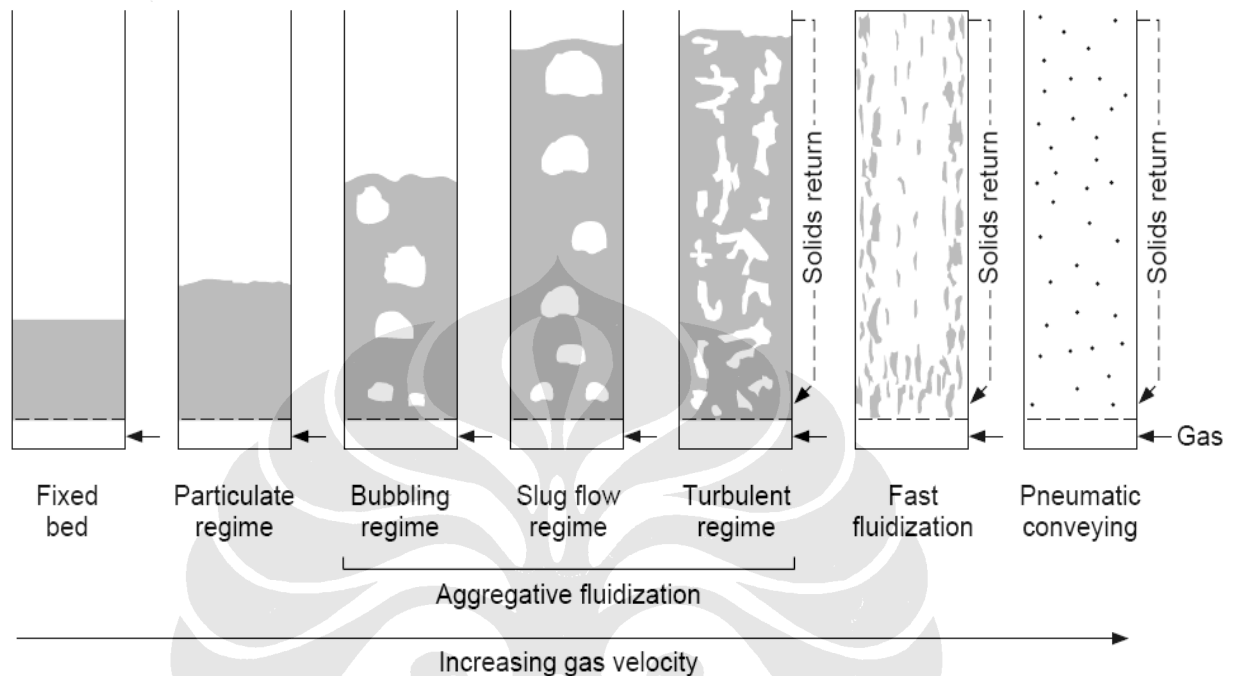
^a At equal $U-U_{mf}$.

^b At equal d_p .

3.1.4.9 Daerah batas fluidisasi (fluidization regimes)

Pada kecepatan gas rendah, suatu padatan dalam tabung hampan fluidisasi akan berada dalam keadaan konstan atau tetap. Seiring dengan bertambahnya kecepatan gas, gaya seret mengimbangi berat hampannya sehingga hampan secara menyeluruh ditopang oleh aliran gas tersebut. Pada fluidisasi minimum, hampan memperlihatkan pergerakan yang minimal dan hampan tersebut akan sedikit mengembang. Begitu seterusnya hampan akan mengembang saat kecepatan aliran gas dinaikkan pula dan mengalami daerah batas fluidisasi dari *fixed bed* sampai *pneumatic conveying*. Untuk daerah batas fluidisasi turbulent dan di atasnya beroperasi di atas kecepatan terminal dari

beberapa atau bahkan semua partikel, maka pengembalian kembali partikel (*solids return*) adalah perlu untuk mempertahankan hamparan. Cara setiap daerah batas fluidisasi tampil berbeda-beda menurut kecepatan aliran gas (gambar 3.5).



Gambar 3.5. Daerah batas fluidisasi [6]

3.2 EKSPERIMENTAL ALAT PEMODELAN FLUIDISASI

3.2.1 Deskripsi Alat

Alat “*Fluidization and Fluid Bed Heat Transfer Unit H692*” seperti yang terlihat pada gambar 3.6, merupakan alat pemodelan untuk fenomena fluidisasi untuk skala eksperimental yang terdapat pada laboratorium mekanika fluida di gedung departemen teknik mesin lantai tiga. Alat ini terdiri dari sebuah silinder kaca vertikal yang diisi dengan pasir alumina (Al_2O_3). Pada bagian bawahnya terdapat plat distributor udara untuk mendukung pasir alumina yang berada di atasnya. Distributor ini dirancang untuk memastikan terjadinya aliran udara yang terdistribusi secara seragam tanpa menyebabkan terjadinya *pressure drop* yang berlebihan dan sesuai dengan pasir yang digunakan.

Saat meninggalkan hamparan pasir (*bed*), udara melewati ruangan di atasnya (*chamber*) dan meninggalkan menuju lingkungan melalui sebuah filter. *Chamber*, filter dan distributor dipasang tergantung pada braket yang ditempel

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



Gambar 3.6. Alat “*Fluidization and Fluid Bed Heat Transfer Unit H692*”

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

3.2.2 Persiapan

Spesifikasi alat yang digunakan adalah seperti berikut ini.

1. *Bed chamber*

- bahan : silinder kaca
- diameter dalam : 105 mm
- tinggi : 220 mm

- luas penampang : 8660 mm^2

2. Pasir

- jenis : *fused alumina* (Al_2O_3)
- ukuran partikel : $125 \mu\text{m}$
- kerapatan : 3770 kg/m^3

3. Suplai udara (kompresor)

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

Instrumen yang digunakan adalah seperti berikut ini.

1. Aliran udara

Dari 0,15 sampai 1,7 liter per detik dengan *flow meter* yang dipasang dengan katup kontrol aliran udara.

2. Tekanan

H_2O manometer (*range* $300 \text{ mm H}_2\text{O}$) digunakan untuk mengukur tekanan dalam *bed chamber*.

Kemampuan eksperimental alat:

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

3.2.3 Prosedur Percobaan

Prosedur percobaan yang dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Tuang pasir alumina dengan ukuran partikel $125 \mu\text{m}$ ke dalam *bed chamber* sebanyak kurang lebih $1,25 \text{ kg}$. Ketok-ketok *bed chamber* agar pasir yang dituang memadat.
2. Nolkan manometer.
3. Buka katup kontrol udara dan periksa manometer apakah menunjukkan perubahan tekanan saat laju aliran udara diubah.

4. Naikkan laju aliran udara secara bertahap terus-menerus dari nol sambil mengamati bagaimana terjadinya fluidisasi dan perilaku gelembung-gelembung yang mulai terbentuk.
5. Catat tinggi hamparan dan besar penurunan tekanan pada *bed chamber* setiap kenaikan laju aliran udara sebesar 0,05 l/s dari nol sampai nilai maksimum.
6. Turunkan laju aliran udara secara bertahap terus-menerus dari nilai maksimum sambil mengamati bagaimana fluidisasi mulai berhenti terjadi dan perilaku gelembung-gelembung yang mulai hilang.
7. Catat tinggi hamparan dan besar penurunan tekanan pada *bed chamber* setiap penurunan laju aliran udara sebesar 0,05 l/s dari nilai maksimum sampai nol.

3.3 DATA DAN ANALISA

3.3.1 Data Percobaan

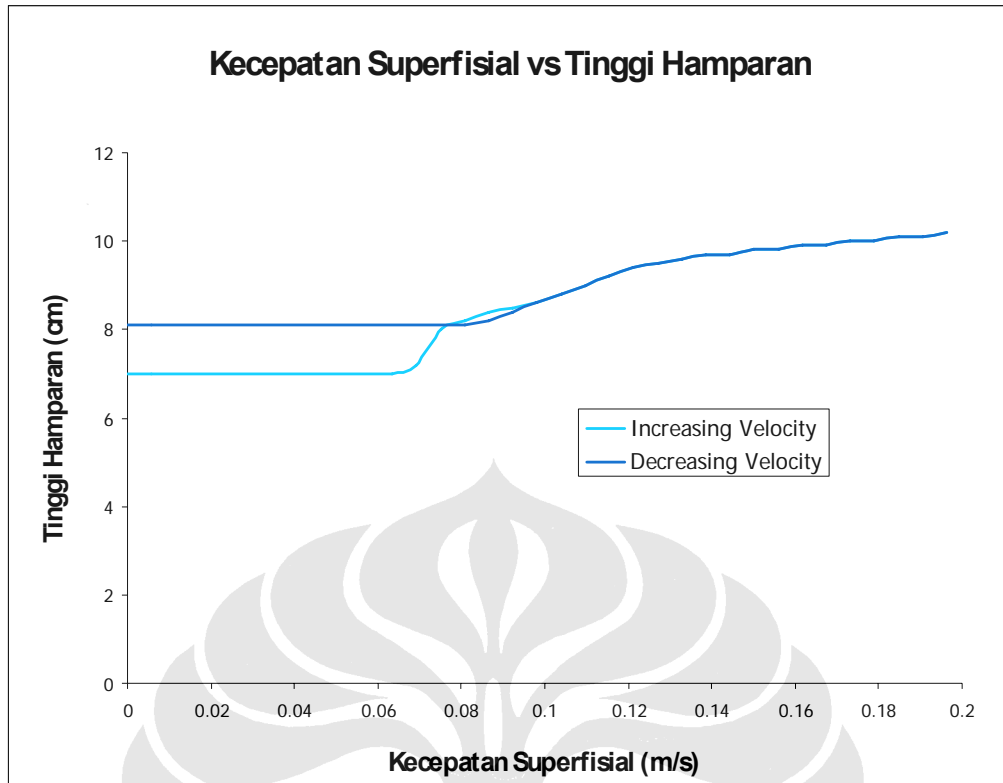
Laju Aliran Udara	Kecepatan Superfisial	Tinggi Hamparan - increasing velocity -	Tinggi Hamparan - decreasing velocity -	Penurunan Tekanan - increasing velocity -	Penurunan Tekanan - decreasing velocity -
<i>l/s</i>	<i>m/s</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>mm H₂O</i>	<i>mm H₂O</i>
0	0	7	8.1	0	0
0.05	0.01	7	8.1	1	1
0.1	0.01	7	8.1	2	2
0.15	0.02	7	8.1	4	3.5
0.2	0.02	7	8.1	7.5	7
0.25	0.03	7	8.1	12.5	10.5
0.3	0.03	7	8.1	17.5	14
0.35	0.04	7	8.1	23	18.5
0.4	0.05	7	8.1	32	24.5
0.45	0.05	7	8.1	41	32
0.5	0.06	7	8.1	52	42
0.55	0.06	7	8.1	65	53
0.6	0.07	7.2	8.1	78	65
0.65	0.08	8	8.1	89	77
0.7	0.08	8.2	8.1	100	87
0.75	0.09	8.4	8.2	110	93
0.8	0.09	8.5	8.4	117.5	98
0.85	0.10	8.6	8.6	118	102
0.9	0.10	8.8	8.8	114.5	104.5
0.95	0.11	9	9	111.5	106
1	0.12	9.2	9.2	110	108
1.05	0.12	9.4	9.4	110	109

1.1	0.13	9.5	9.5	110	110
1.15	0.13	9.6	9.6	110	110
1.2	0.14	9.7	9.7	110	110
1.25	0.14	9.7	9.7	110	110
1.3	0.15	9.8	9.8	110	110
1.35	0.16	9.8	9.8	110	110
1.4	0.16	9.9	9.9	110	110
1.45	0.17	9.9	9.9	110	110
1.5	0.17	10	10	110	110
1.55	0.18	10	10	110	110
1.6	0.18	10.1	10.1	110	110
1.65	0.19	10.1	10.1	110	110
1.7	0.20	10.2	10.2	110	110

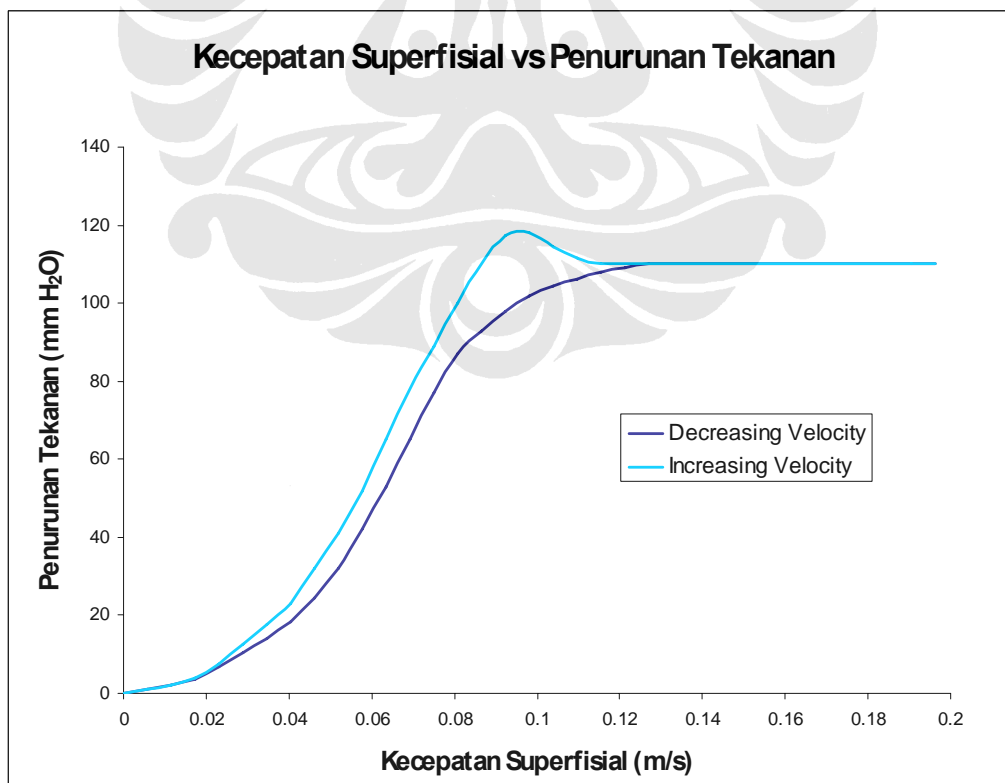
3.3.2 Analisa

Percobaan dilakukan untuk mengukur tinggi hamparan dan penurunan tekanan pada *bed chamber* dengan bervariasi laju aliran udara. Laju aliran udara divariasikan dengan menaikkan laju aliran udara dari nol yang mana belum terjadi fluidisasi sampai nilai maksimum yang mana sudah terjadi fluidisasi. Kemudian juga dilakukan sebaliknya dengan menurunkan laju aliran udara dari nilai maksimum sampai nol. Keduanya baik dengan menaikkan atau menurunkan laju aliran udara memperlihatkan karakteristik fluidisasi yang berbeda. Hal ini dapat kita lihat dari grafik data hasil percobaan di bawah ini. Pada kedua grafik tersebut dapat dilihat bahwa garis “*increasing velocity*” dan garis “*decreasing velocity*” memperlihatkan tren yang berbeda baik pada grafik “Kecepatan Superfisial vs Tinggi Hamparan” dan grafik “Kecepatan Superfisial vs Penurunan Tekanan”.

Dari grafik pada gambar 3.7 dapat dilihat bahwa tinggi hamparan tidak berubah saat kecepatan superfisial dinaikkan sampai mendekati sebelum kecepatan fluidisasi minimum. Namun saat kecepatan superfisial sudah melewati kecepatan fluidisasi minimum, tinggi hamparan akan meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan superfisial. Begitu pula sebaliknya saat kecepatan superfisial berkurang sampai pada kecepatan fluidisasi minimum, tinggi hamparan akan menurun. Namun tidak seperti saat kecepatan superfisial dinaikkan, tinggi hamparan akan tetap saat kecepatan superfisial diturunkan sampai nilai nol. Sehingga tinggi hamparan pada kondisi *fixed bed* (hamparan diam) akan berbeda saat sebelum dan sesudah fluidisasi.



Gambar 3.7. Grafik “Kecepatan Superfisial vs Tinggi Hampanan”



Gambar 3.8. Grafik “Kecepatan Superfisial vs Penurunan Tekanan”

Pada gambar 3.8 dapat dilihat sebuah grafik “Kecepatan Superfisial vs Penurunan Tekanan” yang mana menunjukkan pengaruh kecepatan superfisial terhadap perubahan tekanan pada *bed chamber*. Nilai penurunan tekanan akan semakin besar seiring dengan bertambahnya kecepatan superfisial. Namun nilai penurunan tekanan akan menjadi konstan saat kecepatan superfisial sudah melewati kecepatan fluidisasi minimum. Begitu juga sebaliknya saat kecepatan superfisial diturunkan sampai mendekati kecepatan fluidisasi minimum, nilai penurunan tekanan akan tetap dan nilainya akan sama dengan saat kecepatan superfisial dinaikkan setelah melewati kecepatan fluidisasi minimum. Namun sebelum melewati kecepatan fluidisasi minimum, nilai penurunan tekanan akan mulai berkurang saat kecepatan superfisial diturunkan. Sehingga terlihat jelas bahwa kedua garis pada grafik di atas memperlihatkan tren yang sedikit berbeda.

