

Analisis Karakteristik Butiran Terfluidisasi Berdasarkan Karakteristik Butiran dan Tekanan Gas dalam Fluidisasi

Hilman Fikry^{1,a)}, Alika Rahma Gumilar^{1,b)}, Aufa Numan Fadhilah Rudiawan^{2,c)}, Erlina^{3,d)} dan Sparisoma Viridi^{3,e)}

¹Program Studi Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

²Program Studi Magister Sains Komputasi,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

³Kelompok Keilmuan Fisika Nuklir dan Biofisika,
Program Studi Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

^{a)} hilman12fikry@gmail.com (corresponding author)

^{b)} alikagumilar@gmail.com

^{c)} aufa.rudiawan@gmail.com

^{d)} erlina@fi.itb.ac.id

^{e)} dudung@fi.itb.ac.id

Abstrak

Telah dibuat suatu rancangan yang berfungsi untuk melakukan fluidisasi pada butiran seperti pasir. Pembuatan rancangan ini secara garis besar menggunakan kompresor angin sebagai sumber aliran gas, pipa berlubang sebagai tempat keluarnya gas menuju butiran, dan kotak wadah sebagai tempat butiran tersebut diletakkan. Fluidisasi merupakan suatu proses perubahan keadaan butiran dari keadaan padat menjadi keadaan fluida. Proses tersebut terjadi ketika suatu gas dialirkan ke atas melalui butiran sehingga butiran tersebut bersifat sebagai fluida. Pada eksperimen ini ditentukan massa jenis butiran terfluidisasi, viskositas butiran terfluidisasi, penurunan tekanan butiran, dan kecepatan fluidisasi minimum. Eksperimen ini dilakukan dengan menggunakan bola tenis meja sebagai objek yang diukur besarnya. Massa jenis butiran terfluidisasi ditentukan dengan prinsip gaya apung dan gaya pegas. Viskositas butiran terfluidisasi ditentukan dengan melakukan tracking terhadap gerakan bola. Penurunan tekanan ditentukan melalui massa jenis butiran terfluidisasi. Kecepatan fluidisasi minimum ditentukan melalui pengaturan tekanan angin kompresor dalam eksperimen. Hasil yang diperoleh untuk butiran berjenis pasir bata dengan spesifikasi tertentu adalah massa jenis butiran terfluidisasi rata-rata 318.3102 kg/m^3 , viskositas butiran terfluidisasi rata-rata 13.92451 Pa s , penurunan tekanan butiran rata-rata 365 Pa , dan kecepatan fluidisasi minimum 69.9372 m/s . Hasil ini menunjukkan mengapa butiran terfluidisasi lebih dapat dengan mudah ditransfer dibandingkan butiran yang tidak difluidisasi dan juga menunjukkan berapa kecepatan superfisial angin minimal yang harus dibuat untuk dapat memfluidisasi butiran dengan efektif dalam percobaan ini.

Kata-kata kunci: Fluidisasi, Butiran terfluidisasi, Gaya apung

PENDAHULUAN

Fluidisasi butiran merupakan suatu proses perubahan keadaan butiran dari keadaan padat menjadi keadaan fluida. Fluidisasi terjadi ketika suatu gas dialirkan melewati butiran sehingga butiran tersebut bersifat sebagai fluida. Aliran gas tersebut menyebabkan butiran terangkat sehingga partikel butiran menjadi merenggang yang merupakan karakteristik dari fluida.

Butiran dapat terangkat karena gas yang dialirkan memberi gaya gesek kepada butiran tersebut sehingga gaya gesek yang diberikan dapat mengimbangi gaya gravitasi yang bekerja pada butiran tersebut. Gaya gesek oleh gas bermassa jenis ρ_f dengan kecepatan U_r kepada butiran dengan luas permukaan A_p diperoleh melalui persamaan pada makalah [1],

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho_f U_r^2 A_p \quad (1)$$

C_D merupakan koefisien gesek yang merupakan fungsi dari bilangan Reynolds dengan d_p adalah diameter rata-rata Sauter dan μ adalah nilai viskositas gas,

$$(\text{Re})_p = \frac{U_r d_p \rho_f}{\mu} \quad (2)$$

Berdasarkan besar bilangan Reynolds-nya, fungsi C_D dapat dibedakan menjadi tiga bagian, yaitu bagian Stokes, bagian intermediet, dan bagian hukum Newton.

Fluidisasi dapat dimanfaatkan dalam berbagai bidang, salah satunya adalah dalam reaktor fluidisasi kimia. Fluidisasi memiliki manfaat yang banyak karena butiran terfluidisasi memiliki sifat sebagai berikut.

Butiran terfluidisasi memiliki luas permukaan kontak yang sangat tinggi karena partikelnya yang lebih renggang – besarnya luas permukaan kontak menyebabkan reaksi kimia menjadi lebih cepat dan efektif.

Butiran terfluidisasi mudah ditransfer – sifat fluida yang dimilikinya menyebabkan butiran dapat mengalir sehingga butiran terfluidisasi dapat dipindahkan dengan mudah.

Perpindahan kalor yang baik di dalam wadah yang terdapat campuran butiran terfluidisasi – sifat fluida menyebabkan butiran lebih tercampur secara merata sehingga perpindahan kalor juga lebih merata.

DASAR TEORI

Jenis-Jenis Fluidisasi

Fluidisasi dapat dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan kecepatan gas yang dialirkan. Kecepatan gas yang dialirkan cukup kecil sehingga hanya terdapat fluidisasi menyebabkan fluidisasi halus. Kecepatan gas yang diperbesar lagi sehingga terbentuk gelembung menyebabkan fluidisasi turbulen. Kecepatan gas yang sangat besar menyebabkan sebagian atau seluruh butiran berubah menjadi gas.

Sifat fluidisasi dapat diprediksi dengan menggunakan kriteria Geldart berdasarkan ukuran partikel diameter rata-rata Sauter d_p yang mengacu pada makalah [2]:

Kelompok A Geldart: ukuran partikel 30 μm sampai 125 μm ; butiran terfluidisasi dengan baik.

Kelompok B Geldart: ukuran partikel 150 μm sampai 1000 μm ; butiran cenderung terfluidisasi kurang baik.

Kelompok C Geldart: ukuran partikel lebih kecil dari 30 μm ; butiran sangat sulit terfluidisasi.

Kelompok D Geldart: ukuran partikel paling besar; dibutuhkan gas yang besar untuk memfluidisasi butiran.

Penurunan Tekanan Butiran dan Kecepatan Fluidisasi Minimum

Penurunan tekanan butiran dapat diperoleh melalui persamaan berdasarkan makalah [3],

$$\Delta P_{bed} = H_{bed} \frac{g}{g_c} (\rho_p (1 - \varepsilon) - \rho_g) = H_{bed} \frac{g}{g_c} \rho_{bulk} \quad (3)$$

dengan ΔP_{bed} adalah penurunan tekanan butiran, H_{bed} adalah ketinggian butiran, g adalah nilai percepatan gravitasi, g_c adalah faktor konversi gaya-berat, ρ_p adalah massa jenis butiran, ρ_g adalah massa jenis gas, ε adalah nilai celah butiran, dan ρ_{bulk} adalah massa jenis butiran dalam jumlah besar (*bulk density*).

Kecepatan fluidisasi minimum merupakan kecepatan superfisial minimum gas yang dibutuhkan untuk memfluidisasi butiran. Kecepatan superfisial merupakan kecepatan gas yang mengalir di setiap lubang pada alat fluidisasi dengan menganggap tidak ada butiran yang menghalangi lubang tersebut. Kecepatan fluidisasi

minimum dapat diperkirakan untuk partikel berbentuk bola dengan menghitung bilangan Archimedes Ar berdasarkan makalah [4],

$$Ar = \frac{\rho_g d_p^3 (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2} \tag{4}$$

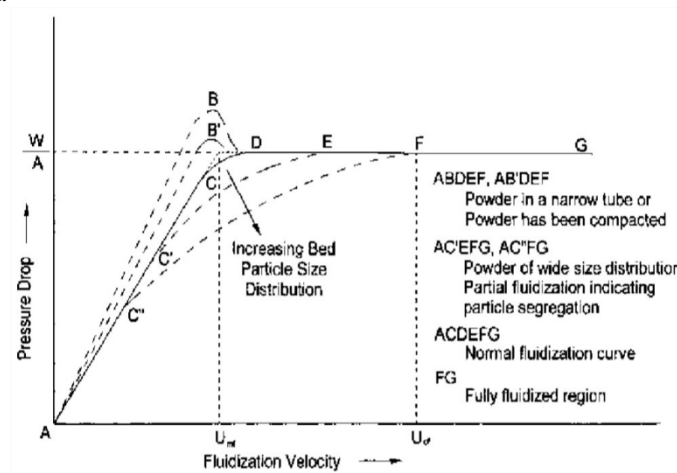
Untuk kondisi ketika fluidisasi minimum, berdasarkan makalah [5] bilangan Archimedes merupakan fungsi polinomial orde dua dari bilangan Reynolds,

$$Ar = 1,650 Re_{p,mf} + 24.5 Re_{p,mf}^2 \tag{5}$$

Kecepatan fluidisasi minimum dapat ditentukan melalui bilangan Reynolds,

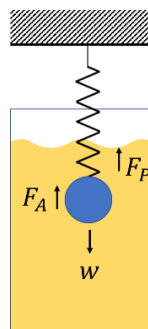
$$Re_{p,mf} = \frac{\rho_g u_{mf} d_p}{\mu} \tag{6}$$

dengan u_{mf} adalah kecepatan fluidisasi minimum dan μ adalah viskositas butiran terfluidisasi. Gambar 1 yang diperoleh dari makalah [6] menunjukkan grafik hubungan penurunan tekanan butiran terhadap kecepatan superfisial secara teori.



Gambar 1. Grafik penurunan tekanan butiran terhadap kecepatan superfisial secara teori.

Pengaruh Berat Benda, Gaya Pegas, Gaya Apung, dan Gaya Gesek dalam Percobaan



Gambar 2. Bola yang digantung dengan pegas berada dalam butiran terfluidisasi.

Gambar 2 menunjukkan bola tenis meja yang digantung dengan pegas berada dalam butiran terfluidisasi. Terdapat tiga gaya yang bekerja pada bola tersebut, yaitu berat bola, gaya apung oleh butiran terfluidisasi, dan gaya pegas. Oleh karena itu, terdapat pemendekan panjang pegas selama keadaan perubahan butiran yang awalnya dalam kondisi padat menjadi terfluidisasi. Jika pemendekan panjang pegas dapat diukur, massa jenis butiran terfluidisasi dapat ditentukan. Bola berada dalam keadaan diam ketika butiran terfluidisasi sehingga dapat digunakan hukum pertama Newton,

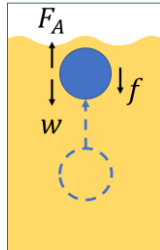
$$\sum F = 0$$

$$F_A + F_p - w = 0$$

$$\rho_{bf} g V_b - k \Delta x - mg = 0 \quad (7)$$

Dengan demikian, massa jenis butiran terfluidisasi ρ_{bf} adalah

$$\rho_{bf} = \frac{k \Delta x + mg}{g V_b} \quad (8)$$



Gambar 3. Bola yang berada di dalam butiran terfluidisasi bergerak mengapung ke atas.

Gambar 3 menunjukkan bola yang berada di dalam butiran terfluidisasi bergerak mengapung ke atas karena gaya apung yang jauh lebih besar dibandingkan berat bola dan gaya geseknya. Dengan mengasumsikan gaya gesek berada pada bagian Stokes, maka persamaan gerak dari bola ini adalah

$$\sum F = ma$$

$$F_A - f - w = ma$$

$$\rho_{bf} g V_{bola} - 6\pi\eta R v - mg = m \frac{dv}{dt} \quad (9)$$

$$\frac{\rho_{bf} V_{bola} - m}{m} g - \frac{6\pi\eta R}{m} v = \frac{dv}{dt}$$

$$A - Bv = \frac{dv}{dt}$$

dengan

$$A = \frac{\rho_{bf} V_{bola} - m}{m} g$$

$$B = \frac{6\pi\eta R}{m} \quad (10)$$

Solusi dari persamaan diferensial tersebut adalah

$$y = \frac{A}{B} t + \frac{A}{B^2} e^{-Bt} - \frac{A}{B^2} \quad (11)$$

Penurunan tekanan butiran diperoleh dari selisih tekanan di dasar wadah sebelum butiran terfluidisasi dengan tekanan di dasar wadah ketika butiran terfluidisasi. Tekanan di dasar wadah sebelum butiran terfluidisasi adalah

$$P_0 = \rho_b (1 - \varepsilon) g H \quad (12)$$

Tekanan di dasar wadah setelah butiran terfluidisasi adalah

$$P = \rho_{bf} (1 - \varepsilon) g H \quad (13)$$

Dengan demikian penurunan tekanan butiran diperoleh dari selisih persamaan (12) dan (13),

$$\Delta P = gH(1 - \varepsilon)(\rho_b - \rho_{bf})$$

$$\Delta P = \frac{M_b}{\rho_b A} g(\rho_b - \rho_{bf}) \quad (14)$$

$$= \frac{M_b}{A} \frac{\rho_b - \rho_{bf}}{\rho_b} g$$

Dengan menggunakan persamaan Bernoulli, dapat diperoleh kecepatan superfisial angin dengan p_k adalah tekanan kompresor, ρ_a adalah massa jenis angin, dan n adalah jumlah lubang pada pipa PVC,

$$v_a = \sqrt{\frac{2p_k}{\rho_a n}} \quad (15)$$

METODE PERCOBAAN

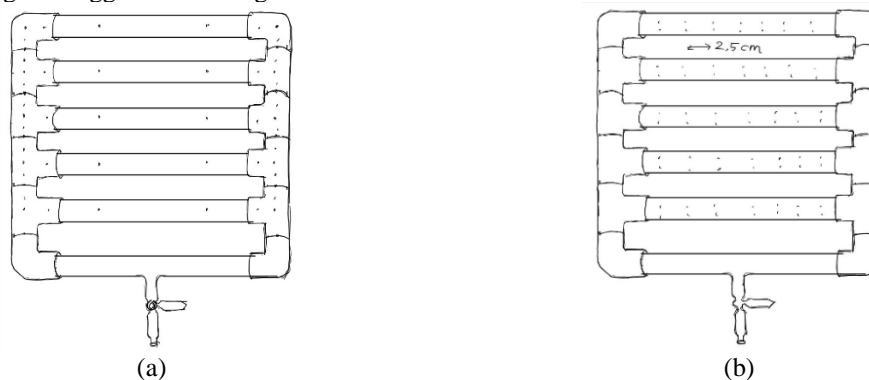
Rancangan Alat Fluidisasi Butiran



Gambar 4. Alat fluidisasi butiran yang digunakan dalam percobaan.

Untuk melakukan percobaan ini, dibuat alat fluidisasi butiran yang dapat dilihat pada gambar 4. Secara garis besar, pembuatan alat ini menggunakan kompresor angin sebagai sumber aliran gas, pipa berlubang sebagai tempat keluarnya gas menuju butiran, dan kotak wadah sebagai tempat butiran tersebut diletakkan. Terdapat 174 lubang pada pipa. Ukuran kotak wadah yang digunakan adalah $45.75 \times 30.5 \times 26 \text{ cm}^3$.

Alat dan bahan yang dibutuhkan dalam pembuatan alat ini adalah kotak wadah, pipa PVC, bor listrik, kompresor angin, selang, keran, dan meteran. Proses pembuatannya adalah sebagai berikut. Pertama, pipa PVC dipotong sepanjang ukuran dimensi panjang kotak wadah. Kemudian, pipa PVC dilubangi menggunakan bor dengan diameter lubang 1 mm. Lalu pipa PVC dirangkai seperti desain pada gambar 5. Kemudian rangkaian diletakkan ke dalam kotak wadah. Terakhir, keran yang telah terpasang pada rangkaian disambungkan dengan kompresor angin menggunakan selang.



Gambar 5. Desain rangkaian pipa PVC beserta lubangnya dengan (a) tampak atas dan (b) tampak bawah.

Eksperimen

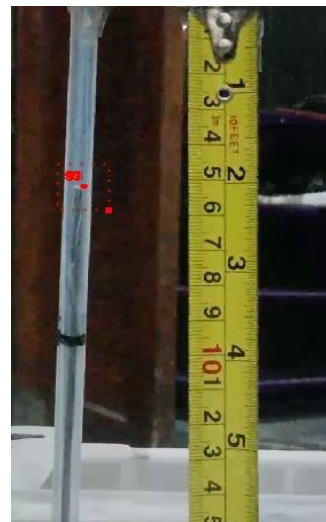
Dilakukan empat macam percobaan: penentuan massa jenis butiran terfluidisasi rata-rata, viskositas butiran terfluidisasi rata-rata, penurunan tekanan butiran rata-rata, dan kecepatan fluidisasi minimum. Berikut dipaparkan lebih lanjut mengenai langkah kerja yang dilakukan.

Dalam penentuan massa jenis butiran terfluidisasi rata-rata digunakan sebuah bola tenis meja berdiameter 4 cm dan sebuah pegas. Pertama, bola diisi pasir agar bola menjadi lebih berat. Selanjutnya massa bola dan panjang awal pegas diukur. Kemudian, bola digantungkan ke pegas sehingga pegas bertambah panjang. Dengan mengetahui berat bola dan pertambahan panjang pegas, konstanta pegas dapat dihitung. Selanjutnya, bola yang masih terikat dengan pegas ditanam ke dalam pasir dengan kedalaman tertentu tanpa mengubah panjang pegas dan bagian atas pegas diikat ke sebuah batang yang ketinggiannya dan keadaannya tetap. Kemudian, dipasang meteran disamping pegas yang berfungsi sebagai alat kalibrasi panjang ketika panjang pegas dianalisis menggunakan *software Tracker* yang diperoleh dari *website open source Tracker* [7]. Selanjutnya, keran dibuka untuk memfluidisasi pasir sehingga pegas memendek akibat gaya apung. Rekaman dari pemendekan pegas dianalisis dengan menggunakan *software Tracker*. Percobaan ini dilakukan delapan kali dengan tekanan kompresor angin tetap 5 bar. Dengan demikian, massa jenis butiran terfluidisasi rata-rata dapat ditentukan berdasarkan persamaan (8). Gambar 6(a) menunjukkan pengukuran pemendekan panjang pegas.

Dalam penentuan viskositas butiran terfluidisasi rata-rata digunakan sebuah bola tenis meja berdiameter 4 cm, lidi, dan sedotan. Pertama, massa bola diukur. Kemudian, lidi ditancapkan pada permukaan bola. Sedotan ditempelkan ke sebuah batang yang ketinggiannya dan keadaannya tetap sehingga sedotan berada dalam keadaan tetap dan tegak lurus di atas permukaan pasir. Lalu lidi yang telah ditancapkan ke permukaan bola dimasukkan ke dalam sedotan melalui bagian bawahnya, sedangkan bola ditanam ke dalam pasir dengan kedalaman tertentu. Kemudian, dipasang meteran disamping sedotan yang berfungsi sebagai alat kalibrasi panjang ketika gerakan lidi dianalisis menggunakan *software Tracker*. Lalu keran dibuka sehingga pasir terfluidisasi menyebabkan bola dan juga lidi bergerak naik akibat gaya apung dari pasir terfluidisasi terhadap bola tersebut. Rekaman dari gerakan naiknya lidi dianalisis dengan menggunakan *software Tracker*. Percobaan ini dilakukan lima kali dengan tekanan kompresor angin tetap 5 bar. Dengan demikian, viskositas butiran terfluidisasi rata-rata dapat ditentukan berdasarkan persamaan (11). Gambar 6(b) menunjukkan analisis gerakan naiknya lidi dengan menggunakan *software Tracker*.



(a)



(b)

Gambar 6. Pengukuran (a) pemendekan panjang pegas dan (b) gerakan naiknya lidi dengan menggunakan *software Tracker*.

Dalam penentuan penurunan tekanan butiran rata-rata dapat dimanfaatkan hasil yang didapat dari penentuan massa jenis butiran terfluidisasi rata-rata dan pengukuran beberapa besaran lainnya yang diperlukan pada persamaan (14) baris terakhir, yaitu massa jenis pasir, massa total pasir, dan luas permukaan dari bak pasir. Dengan demikian, penurunan tekanan butiran rata-rata dapat ditentukan berdasarkan persamaan (14) baris terakhir.

Dalam penentuan kecepatan fluidisasi minimum dilakukan ulang percobaan pertama dengan variasi tekanan kompresor angin mulai dari 1 bar sampai 8 bar dengan selisih 1 bar untuk mendapatkan penurunan tekanan butiran. Kecepatan superfisial dapat dihitung berdasarkan tekanan kompresor angin melalui persamaan (15). Kecepatan fluidisasi minimum dapat ditentukan dengan melakukan plot grafik penurunan tekanan butiran terhadap kecepatan superfisial.

Pengolahan Data

Pemendekan panjang pegas yang diamati tidak hanya memendek secara vertikal saja (ke atas), tetapi juga dapat memendek secara horizontal (kiri-kanan dan depan-belakang). Oleh karena itu, pemendekan ke arah kiri-kanan juga diperhitungkan, meskipun pemendekan ke arah depan-belakang tidak diperhitungkan karena pemendekan dalam arah depan-belakang tidak dapat terekam oleh kamera. Dengan demikian perubahan panjang pegas dalam percobaan ini ditentukan melalui persamaan

$$\Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \tag{16}$$

Dengan menggunakan persamaan (8) diperoleh massa jenis butiran terfluidisasi rata-rata untuk pasir bata dalam percobaan sebesar 318.3102 kg/m³.

Penentuan nilai viskositas butiran terfluidisasi diperoleh melalui konstanta B pada persamaan (11). Konstanta A dapat dihitung dengan menggunakan massa jenis butiran terfluidisasi yang telah diperoleh melalui percobaan sebelumnya. Dengan demikian, dapat digunakan metode Newton (Newton-Raphson) untuk memperoleh nilai B dari persamaan (11),

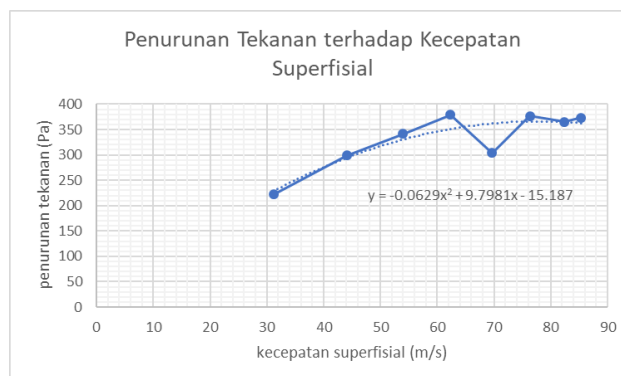
$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \tag{17}$$

$$B_{n+1} = B_n + \frac{\left(t + \frac{1}{B_n} e^{-B_n t} - \frac{1}{B_n} - \frac{B_n}{A} y \right) B_n^2}{B_n t e^{-B_n t} + 2e^{-B_n t} + B_n t - 2} \tag{18}$$

Dengan menggunakan persamaan (18) dan persamaan (10) baris terakhir, diperoleh nilai viskositas butiran terfluidisasi rata-rata sebesar 13.92451 Pa s.

Penentuan penurunan tekanan butiran dapat diperoleh melalui persamaan (14) baris terakhir. Dengan memasukkan besar massa total pasir, massa jenis pasir, luas permukaan kotak wadah pasir, percepatan gravitasi, dan massa jenis pasir terfluidisasi, dapat diperoleh nilai penurunan tekanan butiran rata-rata 365 Pa.

Besar penurunan tekanan butiran dengan variasi tekanan kompresor angin mulai dari 1 bar sampai dengan 8 bar dengan rentang 1 bar dapat dilihat dalam grafik penurunan tekanan butiran terhadap kecepatan superfisial angin beserta regresi polinomial orde duanya pada gambar 7. Tekanan butiran yang cenderung konstan didefinisikan sebagai penurunan tekanan sebesar 1 Pa atau kurang dengan kenaikan kecepatan superfisial sebesar 1 m/s. Artinya, titik pada grafik regresi yang menunjukkan kecepatan fluidisasi minimum adalah titik dengan gradien 1. Berdasarkan persamaan regresi pada gambar 7, diperoleh kecepatan fluidisasi minimum percobaan sebesar 69.9372 m/s.



Gambar 7. Grafik penurunan tekanan butiran terhadap kecepatan superfisial angin beserta regresi polinomial orde duanya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari eksperimen ini adalah diperolehnya nilai besaran berikut untuk pasir bata dengan massa jenis 938 kg/m³ dan volume total pasir 7800.56 cm³ dalam alat fluidisasi butiran dengan spesifikasi yang telah disebutkan pada bagian rancangan alat fluidisasi butiran: massa jenis butiran terfluidisasi rata-rata 318.3102 kg/m³, viskositas butiran terfluidisasi rata-rata 13.92451 Pa s, penurunan tekanan butiran rata-rata 365 Pa, dan kecepatan fluidisasi minimum 69.9372 m/s.

Terlihat bahwa terdapat penurunan massa jenis yang cukup besar ketika butiran terfluidisasi terhadap massa jenis awal butiran. Hasil massa jenis butiran terfluidisasi rata-rata, viskositas butiran terfluidisasi rata-rata, dan penurunan tekanan rata-rata yang diperoleh dapat memberikan gambaran mengapa butiran terfluidisasi lebih dapat dengan mudah ditransfer dibandingkan butiran yang tidak difluidisasi. Hasil kecepatan fluidisasi minimum yang diperoleh memberi gambaran berapa kecepatan superfisial angin minimal yang harus dibuat untuk dapat memfluidisasi butiran dengan efektif. Dengan mengonversi kembali kecepatan fluidisasi minimum menjadi tekanan kompresor angin melalui persamaan (15), diperoleh tekanan kompresor angin minimal yang harus dibuat untuk memfluidisasi butiran dengan efektif adalah 5.0379 bar.

Kecepatan fluidisasi minimum juga dapat diperoleh melalui persamaan (4), (5), dan (6). Namun, dalam percobaan ini belum didapatkan ukuran diameter dari pasir bata sehingga kecepatan fluidisasi minimum tidak dihitung melalui pendekatan ini. Selain itu, kendalanya adalah sangat beragamnya ukuran pasir bata yang diamati sehingga dalam menentukan ukuran pasirnya harus menggunakan banyak sampel dari butiran ini.

Selain hasil yang diperoleh di atas, diamati juga bahwa persebaran massa jenis butiran terfluidisasi tidak merata. Hal ini dapat diamati dari percobaan dengan memasukkan beberapa bola berongga yang sama di berbagai daerah dalam pasir tersebut. Hasilnya adalah ketika keran dibuka untuk memfluidisasi butiran, hanya beberapa bola yang berada di dekat pojok kotak wadah saja yang dapat terapung sementara bola lainnya tetap berada di dalam pasir. Hal ini menunjukkan bahwa butiran lebih terfluidisasi dengan baik ketika berada di dekat dinding wadah. Hal ini sesuai dengan penjelasan efek dinding dalam fluidisasi yang dijelaskan dalam makalah [1], yaitu keberadaan dinding wadah dapat memperbesar gaya gesek angin dengan butiran sehingga butiran lebih mudah terangkat yang menyebabkan butiran lebih terfluidisasi dengan baik. Hubungan antara gaya gesek F_s dengan jarak butiran terhadap dinding L_w adalah

$$F_s = 3\pi d_p \mu U_r \left(1 + k_c \frac{d_p}{L_w} \right), \quad (19)$$

dengan k_c merupakan konstanta yang nilainya bergantung kepada dindingnya. $k_c = 0.563$ jika dindingnya satu, $k_c = 1.004$ jika dindingnya dua, dan $k_c = 2.104$ jika dindingnya silinder.

Dalam melakukan percobaan ini terdapat beberapa masalah yang sebagian besar belum dapat diatasi sehingga percobaan ini bukanlah percobaan yang sempurna. Pertama, jumlah lubang yang tidak cukup banyak pada alat fluidisasi butiran menyebabkan gagalnya alat dalam memfluidisasi butiran. Hal ini karena angin belum tersebar merata sehingga daerah yang tidak memiliki lubang angin tidak ikut terfluidisasi. Hal ini dapat diatasi dengan menambah lubang pipa secara merata. Kedua, tidak semua butiran dapat terfluidisasi dengan baik. Hal ini sesuai dengan kriteria Geldart yang telah dijelaskan dalam bagian dasar teori. Misalnya, sebelum menggunakan pasir bata (kelompok B Geldart), pada percobaan ini digunakan tepung (butiran dengan ukuran yang sangat kecil sehingga termasuk kelompok C Geldart). Yang terjadi adalah butiran berukuran sangat kecil ini tidak dapat terfluidisasi karena muncul rongga yang dapat melewatkan angin dari pipa. Hal ini disebabkan butiran ini lebih cenderung bersifat mengumpul dibandingkan tunggal. Ketiga, kompresor yang digunakan dalam percobaan memiliki kapasitas yang sangat kecil. Akibatnya, tekanan angin kompresor menurun dengan sangat cepat. Hal ini memiliki dampak yang cukup besar terhadap hasil percobaannya. Hal ini dapat diatasi dengan menggunakan kompresor angin yang memiliki kapasitas volume yang cukup besar atau dengan menggunakan tabung gas seperti gas nitrogen, tetapi diperlukan biaya yang cukup besar untuk membeli alat tersebut.

Selain itu, terdapat juga masalah pada beberapa bagian percobaan. Pada percobaan penentuan massa jenis butiran terfluidisasi dengan menggunakan pegas, pegas tidak hanya memendek ke arah atas-bawah, tetapi juga ke arah kiri-kanan dan depan-belakang. Pemendekan pegas ke arah depan-belakang dalam percobaan ini diabaikan karena tidak dapat direkam menggunakan kamera sehingga tidak dapat diukur. Hal ini menyebabkan adanya sedikit nilai error pada hasil yang diperoleh. Hal ini dapat diatasi dengan menggantikan pegas dengan dinamometer sehingga pengukuran gaya pegas menjadi lebih praktis. Pada percobaan penentuan viskositas butiran terfluidisasi, terdapat juga gaya gesek antara lidi dengan sedotan sehingga dapat mengurangi kecepatan gerakan bola mengapung, padahal perhitungannya dalam percobaan ini diabaikan. Gaya gesek antara lidi

dengan sedotan ini dapat diperkecil dengan melapisi lidi dan bagian dalam sedotan dengan sesuatu yang lebih licin seperti selotip bening atau minyak sehingga gaya gesek ini dapat diabaikan dalam perhitungan.

KESIMPULAN

Telah dibuat suatu alat yang berfungsi untuk memfluidisasi butiran. Pembuatan rancangan alat fluidisasi butiran ini secara garis besar menggunakan kompresor angin sebagai sumber aliran gas, pipa berlubang sebagai tempat keluarnya gas menuju butiran, dan kotak wadah sebagai tempat butiran tersebut diletakkan.

Pada eksperimen ini, dengan menggunakan pasir bata yang massa jenisnya 938 kg/m^3 dan volume totalnya 7800.56 cm^3 dalam alat fluidisasi butiran dengan spesifikasi yang telah disebutkan pada bagian rancangan alat fluidisasi butiran, diperoleh massa jenis butiran terfluidisasi rata-rata 318.3102 kg/m^3 , viskositas butiran terfluidisasi rata-rata 13.92451 Pa s , penurunan tekanan butiran rata-rata 365 Pa , dan kecepatan fluidisasi minimum 69.9372 m/s . Hasil massa jenis butiran terfluidisasi rata-rata, viskositas butiran terfluidisasi rata-rata, dan penurunan tekanan rata-rata yang diperoleh dapat memberikan gambaran mengapa butiran terfluidisasi lebih dapat dengan mudah ditransfer dibandingkan butiran yang tidak difluidisasi. Hasil kecepatan fluidisasi minimum yang diperoleh memberi gambaran berapa kecepatan superfisial angin minimal yang harus dibuat untuk dapat memfluidisasi butiran dengan efektif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua yang telah berkontribusi dalam pembuatan alat fluidisasi butiran ini dan kepada semua yang telah memberi masukan.

REFERENSI

1. Wen, C. Y., "Particle Characterization and Dynamics," *Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems*, Marcel Dekker Inc., New York (2003).
2. Geldart, D., "Types of Gas Fluidization," *Powder Technology* (1972).
3. ASTM International, "Standard Test Method for Measuring the Minimum Fluidization Velocity of Free Flow Powders," *ASTM D7743-12*, ASTM, West Conshohocken, PA (2012).
4. Cocco, R., et al., "Introduction to Fluidization," *AICHE Journal* (2014).
5. Wen, C. Y., and Y. H. Yu, "A Generalized Method for Predicting the Minimum Fluidization Velocity," *AICHE Journal*, 12 (1966).
6. Wen, C. Y., "Bubbling Fluidized Bed," *Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems*, Marcel Dekker Inc., New York (2003).
7. [...], *Tracker Video Analysis and Modeling Tool*, <http://physlets.org/tracker/>, diakses tanggal 15 Maret 2019.