

PEMODELAN DAN STUDI EKSPERIMENTAL LAJU ALIR FLUIDA PADA FLUIDISASI MINIMUM

Diyono dan Suherman^{*)}

Abstrak

Laju alir fluida pada fluidisasi minimum telah ditelaah dengan pendekatan persamaan Ergun. Pada penelitian ini, laju alir fluida pada fluidisasi minimum ditelaah secara langsung dengan memvariasikan densitas partikel, diameter partikel dan tinggi unggun. Partikel padat yang digunakan adalah batu bara, batu bata, abu gosok, pasir dan zeolit sebagai representasi densitas. Diameter partikel berkisar rata-rata 0,054 – 0,338 mm. Densitas partikel berkisar 1 – 3 gr/cm³. Tinggi unggun berkisar 5 – 10 cm. Sedangkan fluida pembawanya adalah udara. Laju alir fluida pada fluidisasi minimum mengalami kenaikan seiring naiknya densitas partikel, diameter partikel dan tinggi unggun. Model persamaan matematis yang diperoleh adalah bentuk fungsi eksponensial dari kelompok-kelompok bilangan tak berdimensi dimana laju alir fluida pada fluidisasi minimum tergabung dalam kelompok bilangan Reynold. Hasil prediksi model memberikan hasil yang cukup baik bila dibandingkan dengan data eksperimental.

Kata kunci : fluidisasi minimum, laju alir fluida

Pendahuluan

Aplikasi fluidisasi di industri cukup banyak, antara lain pada proses reaksi kimia berupa fluida menggunakan katalis padat dalam reaktor fluidisasi, operasi pengeringan bahan padat bentuk butiran maupun pada pembakaran dengan bahan bakar bentuk partikel padat.

Perubahan dari unggun tetap menjadi unggun fluidisasi dengan meningkatkan laju alir fluida pembawanya, dapat diamati dari terjadinya perubahan penurunan tekanan atau terjadinya ekspansi unggun. Batas antara daerah unggun tetap dengan unggun fluidisasi atau merupakan titik awal terjadi unggun fluidisasi disebut sebagai fluidisasi minimum.

Kondisi fluidisasi minimum penting untuk ditelaah, karena merupakan titik awal dimulainya fluidisasi untuk berbagai unggun padat. Variabel yang penting dalam penelaahan adalah laju alir fluida sebagai pembawa unggun padat.

Faust (1980) melakukan pemodelan persamaan laju alir fluida pada fluidisasi minimum menggunakan persamaan Ergun, antara penurunan tekanan yang berlaku pada unggun tetap, dengan penurunan tekanan pada unggun fluidisasi. Pendekatan ini bisa dimaklumi, karena kondisi fluidisasi minimum merupakan batas berakhirnya unggun tetap dan dimulainya unggun fluidisasi.

Persamaan laju alir pada fluidisasi minimum dapat diperoleh dengan mengabaikan salah satu suku pada modifikasi persamaan Ergun sesuai kondisi unggun.

Persamaan laju alir untuk unggun tetap:

$$\frac{\Delta P_c \cdot g_c}{L} = \frac{150 \mu u_m (1-\epsilon)^2}{\phi^2 D_p^2 \epsilon^3} + \frac{1,75 \rho u_m^2 (1-\epsilon)}{\phi D_p \epsilon^3} \quad (1)$$

Persamaan laju alir untuk unggun fluidisasi:

$$\frac{\Delta P_c \cdot g_c}{L} = g(1-\epsilon)(\rho_p - \rho) \quad (2)$$

Pada fluidisasi minimum, dengan pendekatan pers. (1) dan pers. (2), diperoleh:

$$\frac{150 \mu u_m (1-\epsilon_m)}{\phi^2 D_p^2 \epsilon_m^3} + \frac{1,75 \rho u_m^2}{\phi D_p \epsilon_m^3} = g(\rho_p - \rho) \quad (3)$$

Untuk ukuran partikel halus dan N_{Re} kecil, suku ke dua bisa diabaikan, maka berlaku:

$$\frac{150 \mu u_m (1-\epsilon_m)}{\phi^2 D_p^2 \epsilon_m^3} = g(\rho_p - \rho) \quad (4)$$

Sehingga diperoleh:

$$u_m = \frac{g(\rho_p - \rho)}{150 \mu} \frac{\epsilon_m^3}{(1-\epsilon_m)} \phi^2 D_p^2 \quad (5)$$

Sedangkan untuk partikel yang kasar ($D_p > 1$ mm) dan $N_{Re} > 1000$, berlaku:

$$\frac{1,75 \rho u_m^2}{\phi D_p \epsilon_m^3} = g(\rho_p - \rho) \quad (6)$$

Sehingga diperoleh:

^{*)} Jurusan Teknik Kimia, Universitas Diponegoro
 Jl. Prof. Soedarto, SH. Kampus Tembalang, Semarang, 50239
 E-mail: suherman@alumni.undip.ac.id

$$u_m = \left(\frac{\phi D_p g (\rho_p - \rho) \epsilon_m^3}{1,75 \rho} \right)^{0,5} \quad (7)$$

Cara lain untuk mendapatkan laju alir fluida pada fluidisasi minimum menurut McCabe (1985) adalah dalam bentuk persamaan perbandingan antara laju terminal dengan laju alir fluida pada fluidisasi minimum. Metoda ini memerlukan penghitungan laju alir terminalnya terlebih dahulu.

Oleh karena itu, pada penelitian ini akan menelaah laju alir fluida pada fluidisasi minimum secara langsung, yaitu mengacu pada batas antara unggun tetap dan unggun fluidisasi.

Penelaahan dari percobaan pendahuluan, menyimpulkan bahwa laju alir fluida merupakan fungsi dari variabel-variabel proses sebagai berikut:

$$u = f(\rho, g, D_p, \rho_p, \mu, \epsilon, \phi, L) \quad (8)$$

Menurut Leva (1959) dari hasil penelitian pada "US Bureau of Mine" menyatakan bahwa pada kondisi fluidisasi minimum, pengaruh porositas (ϵ) dan speritas (ϕ) dapat diabaikan, dan cukup diwakili dengan diameter rata-rata partikel (D_p).

Dengan demikian, pada fluidisasi minimum pers. (8) dapat dituliskan kembali dalam bentuk:

$$u_m = f(\rho, g, D_p, \rho_p, \mu, L) \quad (9)$$

Model persamaan dari fungsi tersebut dapat didekati menggunakan model persamaan eksponensial, sebagai berikut:

$$u_m = K (\rho)^a (g)^b (D_p)^c (\rho_p)^d (\mu)^e (L)^f \quad (10)$$

Bila dinyatakan dalam dimensi dasarnya, adalah:

$$\left(\frac{L}{t} \right) = K \left(\frac{M}{L^3} \right)^a \left(\frac{L}{t^2} \right)^b (L)^c \left(\frac{M}{L^3} \right)^d \left(\frac{M}{Lt} \right)^e (L)^f \quad (11)$$

Penyelesaian dengan metoda analisis dimensi, akan memperoleh model persamaan antar kelompok bilangan tak berdimensi, sebagai berikut:

$$\left(\frac{\rho D_p u_m}{\mu} \right) = K \left(\frac{\rho^2 g D_p^3}{\mu^2} \right)^b \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right)^d \left(\frac{L}{D_p} \right)^f \quad (12)$$

Selanjutnya harga konstanta K, b, d, dan f pada pers. (12) dapat dihitung dengan cara linearisasi persamaan dalam bentuk logaritmanya, sebagai berikut:

$$\log \left(\frac{\rho D_p u_m}{\mu} \right) = \log K + b \log \left(\frac{\rho^2 g D_p^3}{\mu^2} \right) + d \log \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right) + f \log \left(\frac{L}{D_p} \right) \quad (13)$$

Percobaan dirancang pada luas penampang kolom tertentu dan diisi dengan partikel padat. Sebagai fluida pembawa digunakan udara bertekanan dari kompresor. Tinggi unggun, densitas partikel, dan diameter partikel sebagai variabel. Untuk

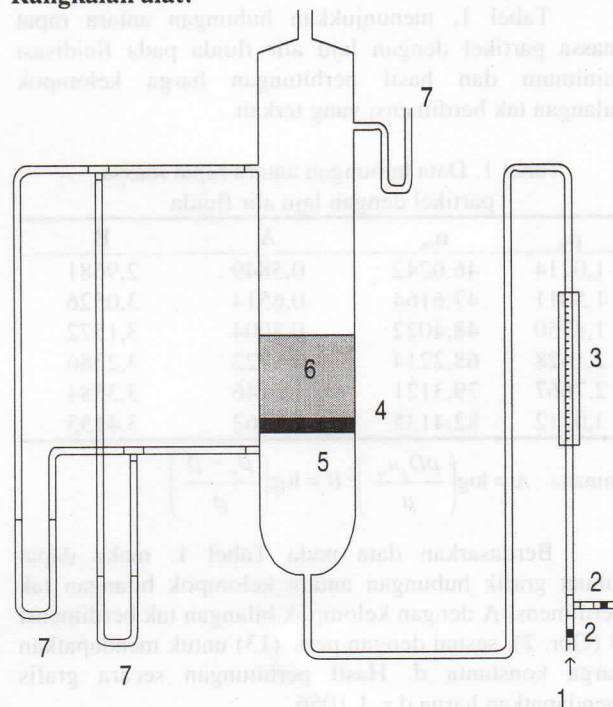
memvariasikan densitas partikel digunakan beberapa jenis partikel tertentu. Pengaruh variabel-variabel ini terhadap laju alir fluida diamati pada kondisi fluidisasi minimum. Selanjutnya data yang diperoleh dimasukkan ke dalam pers. (13), sehingga dapat dibuat grafik secukupnya untuk mendapatkan harga konstanta-konstanta yang diinginkan.

Metode Penelitian

Bahan:

- Partikel padat: batubara, batu bata, abu gosok, batu kapur, pasir dan zeolit. Dengan kisaran diameter rata-rata: 0,045 – 0,425 mm.
- Fluida : udara

Rangkaian alat:



Gambar 1. Rangkaian Alat Percobaan

Keterangan gambar:

1. Udara dari kompresor.
2. Kerangan.
3. Meteran alir.
4. Kolom.
5. Penyangga kasa.
6. Unggun partikel padat.
7. Manometer.

Langkah percobaan:

1. Pengukuran sifat fisik, yaitu diameter dan rapat massa partikel padat serta porositas unggun.
2. Kalibrasi alat ukur.
3. Pengisian kolom dengan partikel padat jenis dan diameter rata-rata tertentu pada tinggi unggun tertentu (kisaran: 50 – 100 mm).

4. Pengaliran udara kompresi melalui kolom bagian bawah. Laju alir udara diatur menggunakan kerangan melalui pengamatan penunjukan meteran alir yang terpasang.
5. Pengamatan penurunan tekanan yang terjadi melalui penunjukan manometer terpasang.
6. Mengulangi langkah (4) dan (5) sampai mendapatkan posisi pada kondisi fluidisasi minimum. Kemudian dicatat penunjukan manometer yang diperhitungkan sebagai laju alir fluida pada fluidisasi minimum.
7. Mengulangi langkah (3) sampai (6) untuk berbagai variasi, yaitu: jenis partikel padat, diameter partikel dan tinggi unggun.

Hasil dan Pembahasan

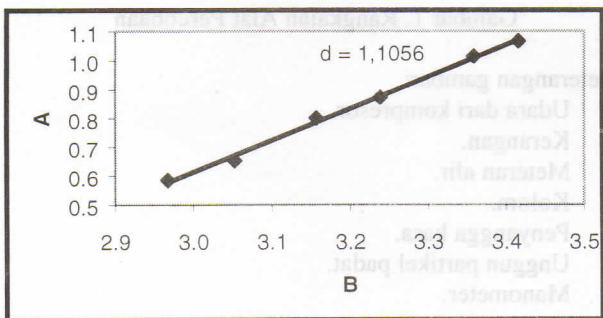
Tabel 1, menunjukkan hubungan antara rapat massa partikel dengan laju alir fluida pada fluidisasi minimum dan hasil perhitungan harga kelompok bilangan tak berdimensi yang terkait.

Tabel 1. Data hubungan antara rapat massa partikel dengan laju alir fluida

ρ_p	u_m	A	B
1,0714	46,0242	0,5849	2,9681
1,5011	47,6164	0,6514	3,0526
1,8750	48,4022	0,8004	3,1572
2,1428	68,2214	0,8722	3,2386
2,7667	79,3121	1,0146	3,3584
3,0212	82,4135	1,0662	3,4155

dimana : $A = \log\left(\frac{\rho D_p u_m}{\mu}\right)$; $B = \log\left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho}\right)$

Berdasarkan data pada Tabel 1, maka dapat dibuat grafik hubungan antara kelompok bilangan tak berdimensi A dengan kelompok bilangan tak berdimensi B (Gbr. 2), sesuai dengan pers. (13) untuk mendapatkan harga konstanta d. Hasil perhitungan secara grafis mendapatkan harga $d = 1,1056$



Gambar 2. Hubungan antara kelompok bilangan tak berdimensi A dengan kelompok bilangan tak berdimensi B

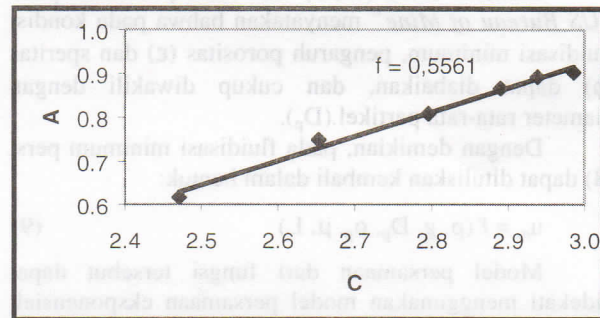
Tabel 2, menunjukkan hubungan antara tinggi unggun dengan laju alir fluida pada fluidisasi minimum, dan hasil perhitungan harga kelompok bilangan tak berdimensi yang terkait.

Tabel 2. Data hubungan antara tinggi unggun dan laju alir fluida

L	u_m	A	C
5,0	46,7401	0,6162	2,4711
6,0	52,2681	0,7481	2,6532
7,0	58,1147	0,8083	2,7959
8,0	62,8262	0,8664	2,8904
9,0	69,7326	0,8927	2,9388
10,0	72,1242	0,9022	2,9862

dimana : $A = \log\left(\frac{\rho D_p u_m}{\mu}\right)$; $C = \log\left(\frac{L}{D_p}\right)$

Berdasarkan data pada Tabel 2, maka dapat dibuat grafik hubungan antara kelompok bilangan tak berdimensi A dengan kelompok bilangan tak berdimensi C (Gbr. 3.), sesuai dengan pers. (13) untuk mendapatkan harga konstanta f. Hasil perhitungan secara grafis mendapatkan harga $f = 0,5561$.



Gambar 3. Hubungan antara kelompok bilangan tak berdimensi A dengan kelompok bilangan tak berdimensi C

Setelah mendapatkan harga konstanta d dan konstanta f maka dapat dilakukan modifikasi terhadap pers. (13) menjadi:

$$\log\left(\frac{\rho D_p u_m}{\mu}\right) \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho}\right)^{-d} \left(\frac{L}{D_p}\right)^{-f} = b \log\left(\frac{\rho^2 g D_p^3}{\mu^2}\right) + \log K \tag{14}$$

Sehingga harga konstanta b dan K dapat dihitung.

Tabel 3, menunjukkan hubungan antara diameter partikel dengan laju alir fluida pada fluidisasi minimum, dan hasil perhitungan harga kelompok bilangan tak berdimensi yang terkait.

Tabel 3. Data hubungan antara diameter partikel dan laju alir fluida

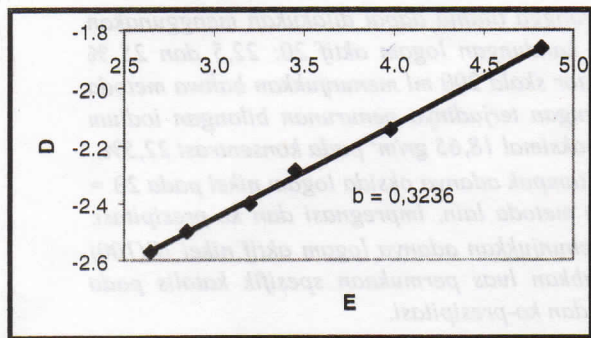
D_p	u_m	D	E
0,0054	46,1314	-2,5706	2,6464
0,0069	52,9212	-2,4985	2,8499
0,0091	61,7411	-2,4012	3,1976
0,0128	68,6024	-2,2863	3,4501
0,0202	66,7416	-2,1447	3,9786

0,0338	79,7022	-1,8624	4,8235
--------	---------	---------	--------

dimana $D = \log \left(\frac{\rho D_p u_m}{\mu} \right) \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right)^{-1,1056} \left(\frac{L}{D_p} \right)^{-0,5561}$

$E = \log \left(\frac{\rho^2 g D_p^3}{\mu^2} \right)$

Berdasarkan data pada Tabel 3. maka dapat dibuat grafik hubungan antara kelompok bilangan tak berdimensi D dengan kelompok bilangan tak berdimensi E (Gbr. 4). sesuai dengan pers. (14) untuk mendapatkan harga konstanta b dan K.



Gambar 4. Hubungan antara kelompok bilangan tak berdimensi D dengan kelompok bilangan tak berdimensi E

Hasil perhitungan grafis diatas memperoleh angka arah sebagai $b = 0,3236$ dan intersep sebagai $\log K = -3,4237$, sehingga $K = 3,7696 \times 10^{-4}$.

Dengan demikian, maka persamaan yang diperoleh sesuai pers. (12) adalah:

$$\left(\frac{\rho D_p u_m}{\mu} \right) = 3,7696 \times 10^{-4} \left(\frac{\rho^2 g D_p^3}{\mu^2} \right)^{0,3236} \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right)^{1,1056} \left(\frac{L}{D_p} \right)^{0,5561} \quad (15)$$

Model persamaan matematis yang dihasilkan merupakan fungsi eksponensial dari kelompok-kelompok bilangan tak berdimensi. Laju alir fluida pada fluidisasi minimum tergabung dalam kelompok bilangan Reynold.

Kesimpulan

Hasil penelitian menyimpulkan bahwa laju alir fluida pada fluidisasi minimum selain bisa ditelaah dari pendekatan persamaan Ergun dan persamaan perbandingan dengan laju terminal, juga bisa ditelaah dengan model persamaan antar kelompok bilangan tak berdimensi. Model matematis yang tersusun adalah fungsi eksponensial dari kelompok-kelompok bilangan tak berdimensi. Laju alir fluida pada fluidisasi minimum (u_m) tergabung dalam kelompok bilangan Reynold, yang merupakan karakter tipe aliran fluida sebagai fluida pembawa dalam sistem unggun fluidisasi.

Keterangan Notasi:

- D_p : diameter partikel (cm)
- g : percepatan gravitasi ($\text{cm} \cdot \text{det}^{-2}$)
- L : tinggi unggun (cm)
- u : laju alir fluida ($\text{cm} \cdot \text{det}^{-1}$)
- u_m : laju alir fluida pada fluidisasi min. ($\text{cm} \cdot \text{det}^{-1}$)
- ϵ : porositas, (-)
- ϕ : speritas (-)
- ρ : rapat massa fluida ($\text{gr} \cdot \text{cm}^{-3}$)
- ρ_p : rapat massa partikel padat ($\text{gr} \cdot \text{cm}^{-3}$)
- μ : viskositas fluida ($\text{gr} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{det}^{-1}$)

Daftar Pustaka

Bogere, M.N., (1996), "A Rigorous Description of Gas-Solid Fluidized Bed", Chem. Eng. Sci., vol. 51
 Elderedge, H.B. dan Brown, D.C., (1999), "Solid Flow and Mixing Model for Fluidized Bed Coating and Calcinations Process", Chem. Eng. Sci., vol. 54
 Foust, A.S., (1980), "Principles of Unit Operations", 2nd ed., John Wiley and Sons Inc., New York
 Gibson, W.D., (1998), "Taking the Measure of Mass Flow", Chem. Eng. Prog., vol. 105
 Holland, F.A. dan Bragg, R., (1995), "Fluid Flow for Chemical Engineering", 2nd ed., Edward Arnold, London
 Kunii, D. and Levenspiel, O., (1969), "Fluidization Engineering", Wiley International Edition, Wiley & Sons., Inc., New York
 Leva, M., (1959), "Fluidization", Mc Graw Hill Book Co. Inc., New York
 McCabe, W.L., Smith, L.C., dan Harriot, P., (1985), "Unit Operations of Chemical Engineering", 2nd ed., Mc Graw Hill Book Co. Inc., New York