

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Fluidisasi merupakan salah satu cara mengontakkan butiran-butiran padat dengan fluida (gas atau cair). Ilustrasi fluidisasi ini dapat kita tinjau dari suatu bejana dengan menempatkan sebuah partikel padat berbentuk bola menjadi unggun. Kemudian, dialirkan gas dengan arah aliran dari bawah ke atas. Pada laju alir yang cukup rendah partikel akan diam. Peristiwa ini disebut sebagai unggun diam atau *fixed bed*. Ketika laju alir dinaikkan, padatan dalam unggun lama-kelamaan akan tersuspensi. Pada kondisi tersuspensi inilah sifat unggun akan menyerupai sifat cairan yang memiliki viskositas tinggi, memiliki kecenderungan mengalir, dan mempunyai sifat hidrostatis. Peristiwa ini disebut *fluidized bed*.

1.2 Rumusan Masalah

Pada percobaan ini akan diselidiki mengenai pengaruh perubahan kecepatan *superficial* fluida terhadap perubahan tekanan serta terhadap perubahan tinggi unggun.

1.3 Tujuan Percobaan

1. Dapat menentukan dan mengukur parameter-parameter dalam peristiwa fluidisasi yaitu densitas partikel, porositas, dan tinggi unggun fluida.
2. Dapat menentukan kurva karakteristik fluidisasi dan hubungan antara *pressure drop* dan laju alir.
3. Dapat menjelaskan fenomena-fenomena yang terjadi selama operasi fluidisasi berlangsung.
4. Dapat memahami cara kerja dari alat percobaan fluidisasi.

1.4 Manfaat Percobaan

1. Mahasiswa mampu menentukan dan mengukur parameter-parameter dalam peristiwa fluidisasi yaitu densitas partikel, porositas, dan tinggi unggun fluida.
2. Mahasiswa mampu menentukan kurva karakteristik fluidisasi dan hubungan antara *pressure drop* dan laju alir.
3. Mahasiswa mampu menjelaskan fenomena-fenomena yang terjadi selama operasi

fluidisasi berlangsung.

4. Mahasiswa mampu memahami cara kerja dari alat percobaan fluidisasi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Fluidisasi

Fluidisasi dipakai untuk menerangkan atau menggambarkan salah satu cara mengontakkan butiran-butiran padat dengan fluida (gas atau cair). Sebagai ilustrasi dengan apa yang dinamakan fluidisasi ini, kita tinjau suatu bejana dengan menempatkan sejumlah partikel padat berbentuk bola hingga membentuk unggun yang akan dialiri gas dengan arah aliran dari bawah ke atas. Pada laju alir yang cukup rendah partikel padat akan diam. Keadaan yang demikian disebut sebagai unggun diam atau *fixed bed*. Jika laju alir gas dinaikkan, maka partikel padat akan tersuspensi di dalam aliran gas yang melaluinya. Pada kondisi partikel yang tersuspensi ini, sifat unggun akan menyerupai sifat-sifat suatu cairan dengan viskositas tinggi. Misalnya, ada kecenderungan untuk mengalir dan mempunyai sifat hidrostatik. Keadaan tersebut dinamakan sebagai *fluidized bed*.

Fenomena fluidisasi terjadi ketika terdapat suatu aliran fluida yang melewati partikel unggun dalam suatu tabung, maka aliran tersebut memberikan suatu gaya dorong atau *drag force* pada partikel. Saat gaya tersebut melebihi gaya gravitasi dan gaya antar partikel, maka partikel tersebut akan terangkat dan menyebabkan hambatan terhadap aliran udara semakin kecil sehingga menimbulkan kehilangan tekanan (*pressure drop*) sepanjang partikel unggun.

2.2 Kehilangan Tekanan (*Pressure Drop*)

Aspek utama yang akan ditinjau di dalam percobaan ini adalah untuk mengetahui besarnya *pressure drop* di dalam unggun yang cukup penting karena selain erat sekali hubungannya dengan banyaknya energi yang diperlukan, juga bisa memberikan indikasi tentang kelakuan unggun selama operasi berlangsung. Korelasi matematik yang menggambarkan hubungan antara kehilangan tekanan dan laju alir fluida di dalam suatu sistem unggun diperoleh melalui beberapa metode yang bersifat semiempiris dengan menggunakan bilangan-bilangan tak berdimensi.

Untuk aliran laminar, terjadi kehilangan energi yang disebabkan oleh *viscous losses*. Blake memberikan hubungan sebagai berikut:

$$\frac{\Delta P}{L} \times g_c = \frac{k \cdot \mu \cdot s^2}{\varepsilon^3} \times V \quad (2.1)$$

dP/L : Kehilangan tekanan per satuan tinggi atau panjang ukuran
 gc : Faktor konversi
 μ : Viskositas fluida
 ε : Porositas unggun yang didefinisikan sebagai perbandingan volume ruang kosong di dalam unggun dengan volume unggunnya
 V : Kecepatan alir *superficial* fluida
 s : Luas permukaan spesifik partikel

Luas permukaan spesifik partikel (luas permukaan per satuan volume unggun) dihitung berdasarkan korelasi berikut:

$$s = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_p} \quad (2.2)$$

Sehingga Persamaan (2.1) menjadi:

$$\frac{\Delta P}{L} \times gc = \frac{36 k \mu (1-\varepsilon)^2}{d_p^2 \cdot \varepsilon^3} \times u \quad (2.3)$$

atau

$$\frac{\Delta P}{L} \times gc = \frac{k' \mu (1-\varepsilon)^2}{d_p^2 \cdot \varepsilon^3} \times u \quad (2.4)$$

Kemudian, Persamaan (2.4) diturunkan lagi oleh Kozeny (1927) dengan mengasumsikan bahwa unggun zat padat tersebut adalah ekuivalen dengan satu kumpulan saluran-saluran lurus yang partikelnya mempunyai luas permukaan dalam total dan volume total masing-masing sama dengan luas permukaan luar partikel dan volume ruang kosongnya. Harga konstanta k' yang diperoleh beberapa peneliti sedikit berbeda misalnya:

Kozeny (1927) $k' = 150$

Carman (1937) $k' = 180$

US Bureau of Mines (1951) $k' = 200$

Untuk aliran turbulen, Persamaan (2.4) tidak bisa digunakan lagi sehingga Ergun (1952) menurunkan rumus lain dengan mengilustrasikan kehilangan tekanan sebagai hubungan antara *viscous losses* dan *kinetic energy losses*.

$$\frac{\Delta P}{L} \cdot gc = \frac{k_1 \mu (1-\varepsilon)^2}{d_p^2 \cdot \varepsilon^3} \cdot u + \frac{k_2 (1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho g}{d_p} \cdot u^2 \quad (2.5)$$

Keterangan:

$k_1 = 150$

$k_2 = 1,75$

Pada tekanan ekstrem, yaitu:

1. Aliran laminar ($Re = 20$) sehingga *term* II bisa diabaikan.
2. Aliran turbulen ($Re = 1000$) sehingga *term* I bisa diabaikan.

2.3 Unggun Terfluidakan (*Fluidized Bed*)

Untuk ungun terfluidakan, persamaan yang menggambarkan *pressure drop* adalah persamaan Ergun, yaitu:

$$\frac{\Delta P}{L} \cdot g_c = \frac{150 \cdot (1 - \epsilon_f)^2}{d_p^2 \cdot \epsilon_f^3} \cdot u + \frac{1,75(1 - \epsilon_f)}{\epsilon_f} \cdot \frac{\rho_g}{d_p} \cdot u^2 \quad (2.6)$$

Dengan ϵ_f adalah porositas ungun pada keadaan terfluidakan. Pada keadaan ini, partikel-partikel zat padat seolah-olah terapung di dalam fluida karena terjadi kesetimbangan antara berat partikel dan gaya berat serta gaya apung dari fluida di sekelilingnya.

Gaya berat yang bekerja pada partikel dalam fluida yang naik merupakan selisih antara berat partikel dan gaya apung yang diterimanya. Secara matematis, hal ini dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\left[\begin{array}{c} \text{kehilangan} \\ \text{tekanan} \\ \text{pada ungun} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \text{luas} \\ \text{penampang} \end{array} \right] = \left[\text{volume} \right] \left[\begin{array}{c} \text{densitas} \\ \text{zat padat} \end{array} - \begin{array}{c} \text{densitas} \\ \text{fluida} \end{array} \right] \quad (2.7)$$

$$[\Delta P][A] = (A \cdot L)(1 - \epsilon_f)(\rho_p - \rho_f) \frac{g}{g_c} \quad (2.8)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = (1 - \epsilon_f)(\rho_p - \rho_f) \frac{g}{g_c} \quad (2.8)$$

2.4 Kecepatan Minimum Fluidisasi

Kecepatan *superficial* merupakan salah satu faktor penting dalam fluidisasi. Partikel ungun akan diam apabila kecepatan *superficial* rendah. Kecepatan minimum fluidisasi (U_{mf}) adalah kecepatan *superficial* fluida minimum ketika fluida mulai bergerak terangkat. Harga U_m bisa diperoleh dengan mengkombinasikan Persamaan (2.6) dengan Persamaan (2.8).

$$\frac{150(1 - \epsilon_{mf}) \cdot \rho_g}{\epsilon_{mf} \mu} \cdot u_{mf} + \frac{1,75 d_p^2}{\epsilon_{mf}^3 \mu^2} \cdot \epsilon_{mf}^2 = \frac{d_p^3 \cdot \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (2.9)$$

Untuk keadaan ekstrem, yaitu:

1. Aliran laminar ($Re = 20$) kecepatan fluidisasi minimumnya adalah:

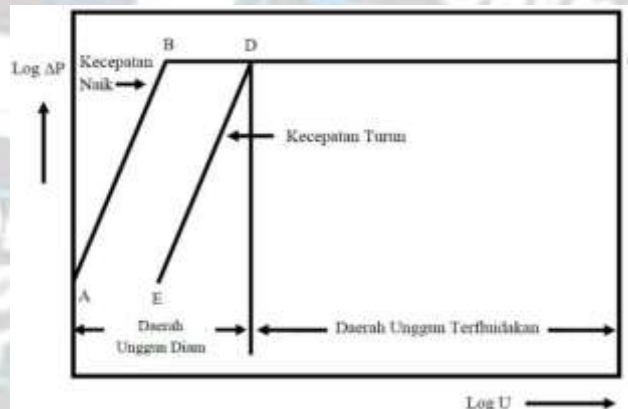
$$u_{mf} = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g)}{150 \mu} \cdot g \cdot \epsilon_{mf} \quad (2.10)$$

2. Aliran turbulen ($Re = 1000$) kecepatan fluidisasi minimumnya adalah:

$$umf = \frac{d_p(\rho_s - \rho_g)}{1,75\mu} \cdot g \cdot \epsilon_{mf} \quad (2.11)$$

2.5 Karakteristik Unggun Terfluidakan

Karakter unggun terfluidakan biasanya dinyatakan dalam bentuk grafik antara penurunan tekanan (ΔP) dan kecepatan *superficial* fluida (U). Untuk keadaan yang ideal, kurva hubungan ini berbentuk seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Hubungan penurunan tekanan dan kecepatan *superficial* fluida

Keterangan:

Garis AB : Menunjukkan kehilangan tekanan pada daerah unggun diam.

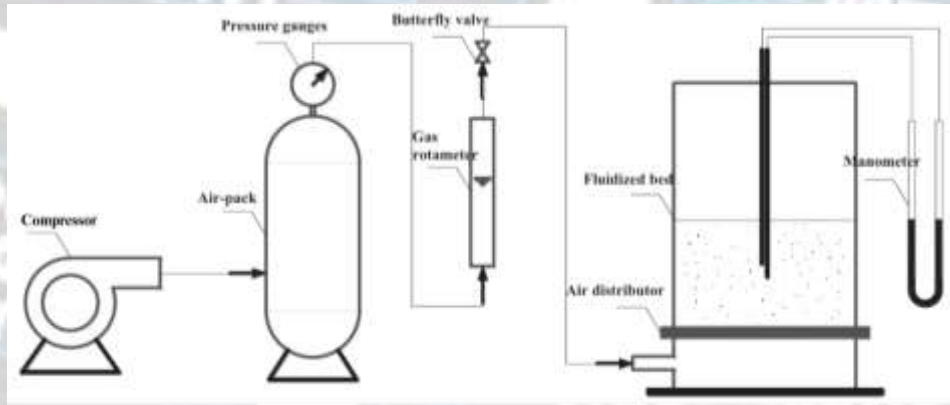
Garis BC : Menunjukkan keadaan unggun telah terfluidakan.

Garis DE : Menunjukkan kehilangan tekanan pada daerah unggun diam pada waktu kita menurunkan kecepatan alir fluida. Harga penurunan tekanan untuk kecepatan aliran fluida tertentu, sedikit lebih rendah daripada harga penurunan tekanan pada saat awal operasi.

2.6 Jenis-Jenis *Fluidized Bed*

2.6.1 *Gas-Solid Fluidized Bed*

Gas-Solid Fluidized Bed adalah fenomena ketika partikel padat tersuspensi dalam aliran gas sehingga berperilaku seperti fluida. Proses ini terjadi ketika kecepatan gas melewati kecepatan minimum fluidisasi (U_{mf}) sehingga gaya *drag* dari gas mampu mengimbangi berat efektif partikel. Dalam kondisi ini, unggun padat mengembang, porositas meningkat, dan partikel mengalami pergerakan acak akibat tumbukan antarpartikel serta interaksi dengan gelembung gas. Sistem ini banyak digunakan dalam pemisahan partikel berdasarkan densitas.

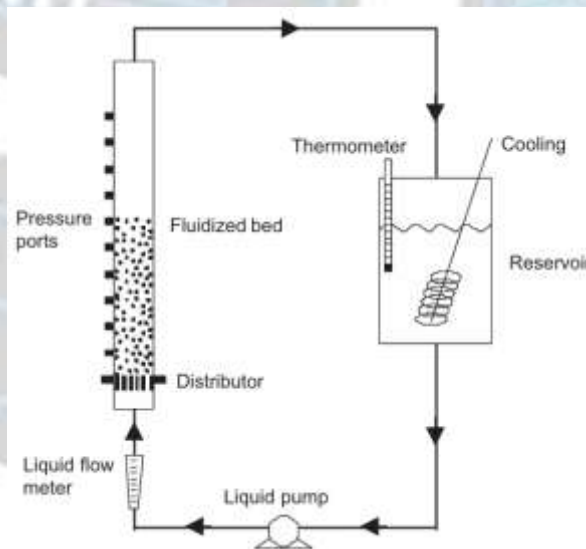


Gambar 2.2 Skema sistem proses *gas–solid fluidized bed*

Pada proses fluidisasi fluida gas ini, udara bertekanan dihasilkan oleh *compressor* dan dialirkan ke *air-pack* yang berfungsi menyimpan sekaligus menstabilkan suplai udara sebelum masuk ke kolom. Selanjutnya, laju aliran gas diatur menggunakan *butterfly valve* dan diukur dengan *gas rotameter* untuk memastikan kondisi operasi sesuai target. Kemudian, udara yang sudah terkontrol ini dialirkan ke *air distributor* di bagian bawah kolom, yang membagi aliran secara merata sehingga mencegah terbentuknya *channeling*. Di dalam *fluidized bed*, partikel padat seperti bubuk akan terfluidisasi oleh aliran udara sehingga membentuk campuran seperti fluida yang memungkinkan proses pemisahan berdasarkan densitas. Sepanjang proses, *pressure gauges* memantau tekanan udara, sedangkan *manometer* mengukur perbedaan tekanan di berbagai titik dalam unggun.

2.6.2 *Liquid–Solid Fluidized Bed*

Liquid–Solid Fluidized Bed adalah kondisi ketika partikel padat unggun tersuspensi dan bergerak bebas di dalam aliran fluida cair akibat gaya angkat yang dihasilkan oleh fluida melebihi gaya berat efektif partikel sehingga unggun berperilaku seperti fluida kental. Pada sistem *Liquid–Solid Fluidized Bed* (LSFB), fluida cair yang digunakan biasanya adalah air atau larutan tertentu, sedangkan fase padat bisa berupa partikel tunggal atau campuran dua jenis partikel (*binary particles*) dengan perbedaan ukuran, massa jenis, atau bentuk.



Gambar 2.3 Skema sistem proses *liquid–solid fluidized bed*

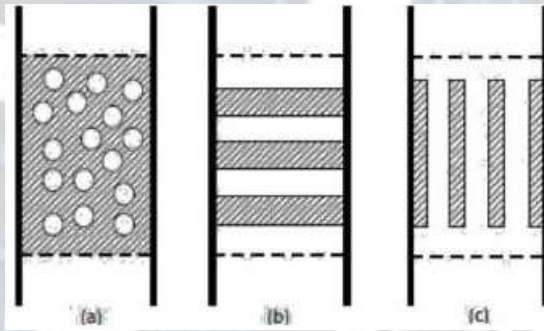
Pada proses fluidisasi fluida cair ini, air disimpan di dalam *reservoir* yang dilengkapi dengan koil pendingin untuk menjaga suhu tetap konstan serta termometer untuk memantau temperatur. Dari *reservoir*, cairan dipompa menuju kolom fluidisasi dengan melewati *flow meter* yang berfungsi mengukur laju alir fluida masuk. Di dasar kolom terdapat *distributor* berupa plat berlubang yang menyebarkan aliran fluida secara merata sehingga menghindari terbentuknya zona aliran *jet*. Ketika laju alir melebihi kecepatan minimum fluidisasi (U_{mf}), partikel-partikel ini akan tersuspensi dan unggun mengembang. Sepanjang kolom terdapat beberapa *pressure ports* yang digunakan untuk mengukur penurunan tekanan dan menghitung nilai *voidage* unggun. Setelah melewati kolom, cairan mengalir kembali ke *reservoir* sehingga membentuk sistem sirkulasi tertutup.

2.7 Fluidisasi Heterogen (*Aggregative Fluidization*)

Apabila dalam fluidisasi partikel-partikel padatnya terpisah secara sempurna tetapi berkelompok membentuk suatu agregat, keadaan yang seperti ini disebut sebagai fluidisasi heterogen (*aggregative fluidization*). Tiga jenis fluidisasi yang biasa terjadi adalah karena timbulnya:

- Penggelembungan (*bubbling*).
- Penolakan (*slugging*).

c. Saluran-saluran fluida yang terpisah (*channeling*).



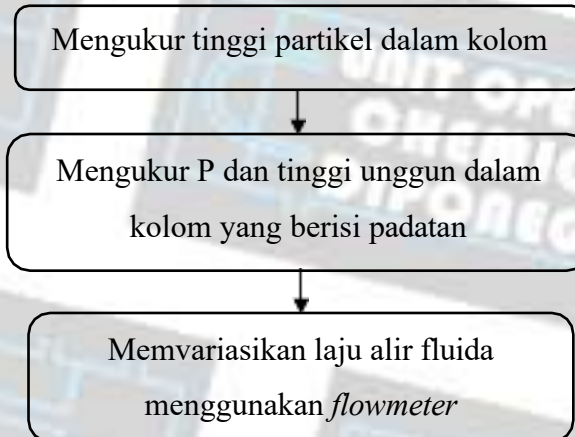
Gambar 2.4 Tiga jenis fluidisasi heterogen

BAB III

METODE PRAKTIKUM

3.1 Rancangan Percobaan

3.1.1 Rancangan Praktikum



Gambar 3.1 Skema rancangan praktikum

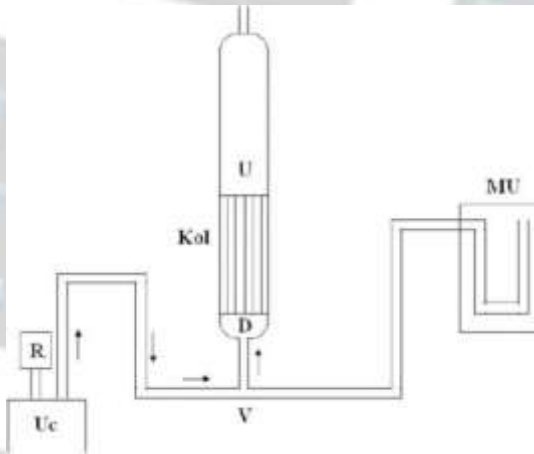
3.1.2 Penetapan Variabel

- A. Variabel Tetap
 - Jenis Partikel : resin
 - Tinggi Unggun Awal :
- B. Variabel Berubah
 - Laju Alir Fluida :

3.2 Bahan dan Alat yang Digunakan

- A. Bahan yang Digunakan
 - Partikel padat: resin
- B. Alat yang Digunakan
 - 1. Kolom Fluidisasi
 - 2. Kompresor
 - 3. *Flowmeter*
 - 4. *Pressure Gauge*
 - 5. Penggaris
 - 6. Jangka Sorong

3.3 Gambar Rangkaian Alat



Gambar 3.2 Rangkaian alat fluidisasi fluida gas

Keterangan:

- D : Distributor (*grid*)
- U : Unggun partikel padat
- Kol : Kolom fluidisasi
- Uc : Udara kompresor
- R : *Flowmeter*
- MU : *Pressure gauge*
- V : *Valve*



Gambar 3.3 Rangkaian alat fluidisasi fluida cair

Keterangan:

- 1 : *Reservoir*
- 2 : *Pompa liquid*
- 3 : *Flowmeter*
- 4 : *Distributor*

5 : Kolom fluidisasi

3.4 Respons

Pressure drop (ΔP) udara yang melewati kolom yang diukur tiap laju alir yang berbeda.

3.5 Data yang Dibutuhkan

1. Tekanan pada *pressure gauge*.
2. Tinggi unggun.

3.6 Prosedur Praktikum

3.6.1 Fluidisasi Fluida Gas

1. Mencolokkan kabel kompresor ke stop kontak dan tunggu hingga kompresor penuh.
2. Mengukur diameter tabung fluidisasi dengan jangka sorong.
3. Mengukur ketinggian unggun diam dengan penggaris.
4. Nyalakan kompresor dan atur *flowrate* sesuai variabel.
5. Mengukur ΔP dan tinggi unggun dalam kolom yang berisi padatan untuk laju alir fluida yang berbeda.
6. Laju alir fluida divariasikan menggunakan *flowmeter* mulai dari kecepatan rendah sampai tidak terdapat lagi perbedaan tinggi pada *pressure gauge*. Laju alir fluida diturunkan kembali perlahan-lahan sampai unggun kembali diam.

3.6.2 Fluidisasi Fluida Cair

1. Memasukkan fluida cair ke dalam tangki *reservoir*.
2. Mengukur diameter tabung fluidisasi dengan jangka sorong.
3. Nyalakan alat fluidisasi fluida cair dan atur *flowrate* sesuai variabel.
4. Mengukur ΔP dan tinggi unggun dalam kolom yang berisi padatan untuk laju alir fluida yang berbeda.
5. Laju alir fluida divariasikan menggunakan *flowmeter* mulai dari kecepatan rendah sampai tidak terdapat lagi perbedaan tinggi pada *pressure gauge*. Laju alir fluida diturunkan kembali perlahan-lahan sampai unggun kembali diam.

3.7 Matriks Hasil Percobaan

Tabel 3.1 Matriks hasil percobaan

Q	Tinggi Unggun (cm)		ΔP	
	Naik	Turun	Naik	Turun

DAFTAR PUSTAKA

- Cornelissen, J. T., Taghipour, F., Escudie, R., Ellis, N., & Grace, J. R. (2007). CFD modelling of a liquid–solid fluidized bed. *Journal of Chemical Engineering Science*, 62, 6334–6348. doi:10.1016/j.ces.2007.07.014
- Davidson, J. F., & Horison, D. (1963). Fluidized particles. *Journal of Fluid Mechanics*, 33(3), 622–624. <https://doi.org/10.1017/S0022112068221560>
- Fu, Y., Chen, W., Su, D., Lv, B., & Luo, Z. (2020). Spatial characteristics of fluidization and separation in a gas-solid dense-phase fluidized bed. *Journal of Powder Technology*, 362, 245–246. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.065>
- Horio, M., Kiyota, H., & Muchi, I. (1980). Particle movement on a perforated plate distributor of fluidized bed. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 13(2), 137–142. <https://doi.org/10.1252/jcej.13.137>
- Lee, J. C., & Buckley, P. S. (1981). *Fluid mechanics and aeration characteristics of fluidized beds*. Chap. 4, 62, Ellis Horwood Publishers, Chichester : England.
- Nurman, A. (2011). *Studi Karakteristik Pembakaran Biomassa Tempurung Kelapa pada Fluidized Bed Combustor Universitas Indonesia dengan Partikel Bed Berukuran Mesh 40-50*. Depok: Universitas Indonesia.
- Rachmanto, T. A., & Laksmono, R. (2013). Pengembangan persamaan porositas dan ergun pada unggun fluidisasi tiga fasa. *Jurnal Teknik Kimia*, 7(2), 36–42.
- Ribeiro, A., Neto, P., & Pinho, C. (2010). Mean porosity and pressure drop measurement in packed beds of monosized spheres: side wall effects. *International Review of Chemical Engineering (I.RE.C.H.E.)*, 2(1), 40–46.
- Wen, C. Y. & Chen, L. H. (1988). Fluidized Bed Freeboard Phenomena: Entrainment and Elutriation. *AIChE Journal* 28(1), 117–128. <https://doi.org/10.1002/aic.690280117>