การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

การกระจายตัวของความหนาแน่นเฉลี่ยตลอดความสูงของห้องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน

Effect of Riser Exit Configuration on Cross Sectional Average Suspension Density Distribution along the Riser Height

จิระโรจน์ สมจันทร์[1] และ อนุสรณ์ ชินสุวรรณ[*1]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ. ขอนแก่น 40002
* ติดต่อ: โทรศัพท์: 043 202 845, โทรสาร: 043 202 849
E-mail: anuchi@kku.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษาการกระจายตัวของความหนาแน่นเฉลี่ยทั้งหน้าตัด (cross sectional average suspension density) ตลอดความสูงของห้องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (circulating fluidized bed riser) การทดลองทำในห้องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ไม่มีการเผาไหม้ขนาดหน้าตัด 100mm x 100mm สูง 4.9 m อนุภาคเบด (bed particle) เป็นทรายขนาดเฉลี่ย 230 μm ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด (superficial velocity) ในช่วง 4-7m/s อัตราการไหลเวียนของอนุภาคของแข็ง (solid circulation rate) ในช่วง 5.8-11.7 kg/m^2.s ผลการทดลองพบว่า ความหนาแน่นของชั้นฟลูอิดไดซ์เบดเฉลี่ยลดลงตามความสูง รูปร่างการกระจายตัวดังกล่าวขึ้นอยู่กับความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด อัตราการไหลเวียนของอนุภาคของแข็งและความดันตกคร่อมรวม จากข้อมูลที่ได้สามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์เพื่อทำนายการกระจายตัวของความหนาแน่นในรูปของ อัตราส่วนของความหนาแน่นของชั้นฟลูอิดไดซ์เบดต่อความหนาแน่นของอนุภาคเบด ตัวเลขฟรอด (Froude number) และอัตราส่วนของความสูงตำแหน่งที่พิจารณาต่อความสูงของห้องฟลูอิดไดซ์เบด

คำหลัก: ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน, ฟลูอิดไดซ์, ฟาสท์เบด

Abstract

The purpose of this work was to study the cross sectional average suspension density along the height of a circulating fluidized bed riser. The experiments were performed in the riser having a cross sectional area of 100mm x 100mm, height of 4.8m at the superficial velocity of 4-7m/s and solid circulation rate of 5.8-11.7kg/m2s. Sand to average diameter of 230 μm was used as the bed material. It was found that the suspension density decreased along the riser height. The profiles were depended on superficial velocity, solid circulation rate and total pressure drop across the riser height. From the experimental data, a correlation for predicting the suspension density profile was developed in the terms of the ratio of suspension to solid density, Froude number and the ratio of local to total height.

Keywords: Circulating Fluidized Bed, Fluidized bed, Fast fluidized bed.

1. บทนำ

เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (circulating fluidized bed boiler) เป็นที่นิยมเป็นอย่างมากในโลกปัจจุบันเนื่องด้วยข้อดีหลายๆด้าน เช่น ประสิทธิภาพทางการเผาไหม้ที่สูง สามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้หลากหลายประเภทและยังลดการปลดปล่อยสารมลพิษสู่บรรยากาศได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดไอน้ำรุ่นก่อน เช่น แบบใช้ถ่านหินผง (pulverized coal fire)(Basu, 2006)

การกระจายตัวของความหนาแน่นอนุภาคภายในเครื่องกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนส่งผลต่อ การกัดกร่อนแผงท่อน้ำ (water wall tube) และพลังงานของปั๊มในการเพิ่มความเร็วของอนุภาคให้เคลื่อนที่ขึ้นตามแนวความสูงของห้องฟลูอิไดซ์ ซึ่งการกระจายตัวดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด, อัตราการไหลเวียนของอนุภาคของแข็ง และความดันตกคร่อมรวม

ที่ผ่านมามีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคภายในห้องฟลูอิไดซ์เบด (7, 6, 10,2)ซึ่งพิจารณาที่อิทธิพลของลักษณะทางออกเพียงอย่างเดียวและยังไม่พบว่ามีการวิเคราะห์อิทธิพลของความดันด้วย จนกระทั่งมีนักวิจัย (5) ซึ่งได้กล่าวว่าความดันมีผลต่อความหนาแน่นของอนุภาคตลอดทั้งห้องฟลูอิไดซ์อย่างมาก ซึ่งนอกเหนือจากการเพิ่มการกระจายตัวของความหนาแน่นของอนุภาคโดยใช้ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิไดซ์และอัตราการไหลเวียนของอนุภาคของแข็ง แล้วยังสามารถเพิ่ม-ลดความดันภายในห้องฟลูอิไดซ์ด้วยการปรับเปลี่ยนปริมาณเบดซึ่งมีผลกระทบมีผลต่อพลังงานของปั๊มและการกัดกร่อนแผงท่อน้ำ ความสูง

2. ทฤษฎี

ความหนาแน่นของอนุภาคตามแนวหน้าตัดตลอดความสูงคืออัตราส่วนของมวลทั้งหมดต่อปริมาตรของทรายรวมกับอากาศในห้องฟลูอิไดซ์ ซึ่งอยู่ในรูปของสมการดังนี้

$$\rho = \frac{m_{total}}{V} = \frac{V_a\rho_a + V_s\rho_s}{V} \qquad (1)$$

โดยที่ V คือปริมาตรรวม(ปริมาตรอากาศ V_a + ปริมาตรของของแข็ง V_s) ρ_a คือความหนาแน่นของอากาศ และ ρ_s คือความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง ความดันคร่อมห้องฟลูอิไดซ์มีความสัมพันธ์ดังนี้ ห้องฟลูอิไดซ์ที่มีความสูง Δz พื้นที่หน้าตัดเป็น A_c ความดันที่หน้าตัดบนและล่างเป็น P_1 และ P_2 ตามลำดับ จะสามารถเขียนสมการเคลื่อนที่ของผิวควบคุมนี้ได้เป็น

$$\rho = \frac{\Delta P}{\Delta z g} \qquad (2)$$

โดยที่ $\Delta P = P_2 - P_1$ และไม่คิดแรงเนื่องจากน้ำหนักของอากาศและแรงเสียดทานที่ผิวของห้องฟลูอิไดซ์เบด

อัตราการไหลเวียนของอนุภาคของแข็งหาได้จากน้ำหนักของอนุภาคของแข็ง m ต่อ พื้นที่หน้าตัดของห้องฟลูอิไดซ์เบด A_c ในหนึ่งหน่วยเวลา มีความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเป็น

$$\frac{\rho V}{A_c} \qquad (3)$$

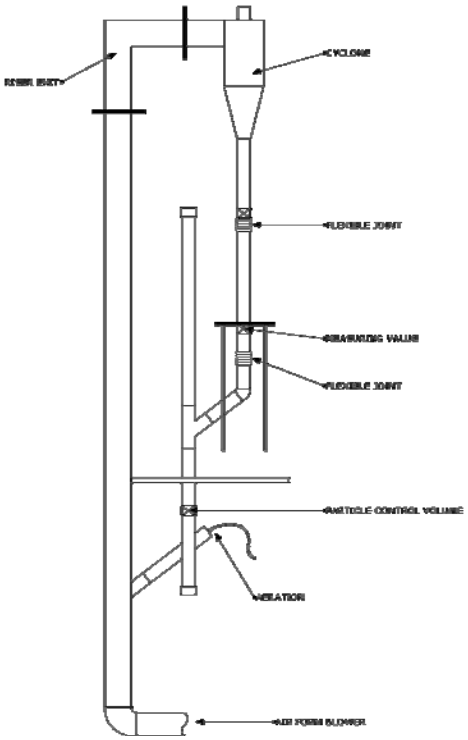
โดยที่ $m = \rho V$ และ ρ ,V คือความหนาแน่นและปริมาตรของอนุภาคตามลำดับ

3. การทดลอง

ระบบฟลูอิไดซ์เบดที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้ประกอบด้วยห้องฟลูอิดไดซ์เบดที่ไม่มีการเผาไหม้หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 100 mm x 100 mm ทางออกเป็นแบบหักฉาก ที่มีความสูงรวม 4900 mm โดยมีส่วนทางออก (riser exit) สูง 600 mm ดังรูปที่ 1

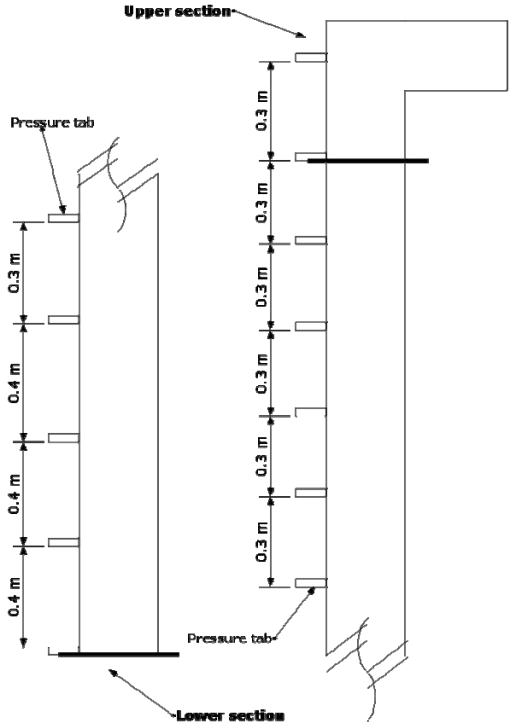
อากาศจากพัดลม (blower) ถูกส่งตามท่อเข้าห้องฟลูอิไดซ์ (riser) โดยผ่านแผ่นกระจายลม (air distributor) ที่อยู่ด้านล่างของห้อง ซึ่งแผ่นกระจายลมนี้ทำจากแผ่นเหล็กหนา 6 mm เจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 mm โดยระยะห่างของแต่ละรูเป็น 10 mm ทำให้สัดส่วนของพื้นที่รูเปิดคิดเป็น 7.07% ของพื้นที่ ทรายขนาดเฉลี่ย 230 μm ใช้เป็นอนุภาคชั้นฟลูอิไดซ์เบด ที่ปลายทางออกมีไซโคลนติดตั้งอยู่

อากาศจะถูกแยกออกแล้วระบายออกด้านบน อนุภาคของแข็งที่แยกออกแล้วป้อนกลับสู่ห้องฟลูอิไดซ์เบด อัตราการไหลเวียนของอนุภาคของแข็ง (solid circulating rate, G_s) สามารถ



รูปที่ 1 ห้องฟลูอิไดซ์เบดที่ใช้ในการทดสอบ

ควบคุมได้ด้วยวาล์วควบคุมอนุภาค (particle control valve) ที่อยู่ด้านล่างของระบบท่อป้อนกลับ (return leg) อัตราการไหลเวียนสามารถหาได้จากน้ำหนักของอนุภาคที่สะสมในท่อวัดปริมาณอนุภาค (measuring column) ที่อยู่เหนือวาล์ววัดปริมาณอนุภาค (measuring valve) การทดลองทำที่ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิไดซ์เบดสูงสุดที่ 7 m/s



รูปที่ 2 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องวัดความดัน (pressure tab)

ที่ผนังด้านนอกของห้องฟลูอิไดซ์เบดติดตั้งตัววัดความดันตามแนวความสูงเป็นจำนวนทั้งสิ้นสิบสามตัว มีระยะห่างคือ ตัววัดสี่ตัวติดตั้งที่ด้านล่างขึ้นไปเริ่มตั้งแต่แผ่นกระจายลมตามแนวผนังของห้องฟลูอิไดซ์ในแนวดิ่งระยะห่างของแต่ละจุดคือ 300 mm ที่เหลืออีกเก้าตัวติดตั้งถัดจากตัวสุดท้ายของชุดแรกเป็นระยะทางรวมทั้งสิ้น 1.6 m เรื่อยไปโดยมีระยะห่างแต่ละจุด 400 mm ตัวที่สิบสามจะอยู่บริเวณกึ่งกลางของทางออกพอดีรวมระยะทางทั้งสิ้นตั้งแต่ตัวแรกถึงตัวที่สิบสาม 4.8 m แต่ละจุดที่ติดตั้งถูกต่อด้วยสายยางเพื่อวัดความแตกต่างดันของแต่ละจุดที่อยู่ติดกัน เช่น จุด 1-2; จุด 2-3 เป็นต้น โดยใช้เครื่องวัดผลต่างความดัน (pressure differential) ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน +/-2.5% ที่อุณหภูมิ +10°C ถึง +60°C

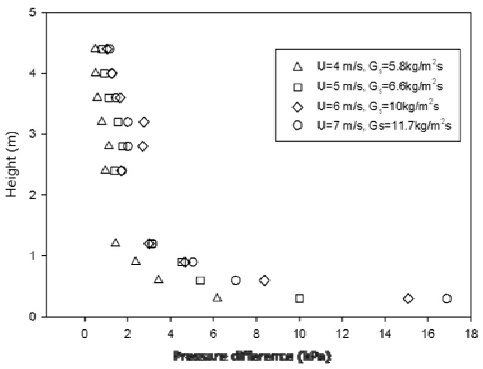
ค่าผลต่างความดันจะถูกบันทึกค่าทุกวินาทีด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) เป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 3 นาที และทำการเก็บข้อมูลซ้ำสามครั้งในแต่ละ

ความเร็ว ความเร็วหน้าห้องฟลูอิดไดซ์เบด (superficial velocity) วัดโดย pitot tube

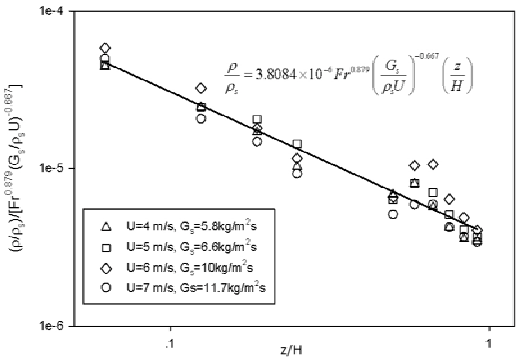
ส่วน return ติดตั้งชุด load cell ที่มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.001 kg ต่อ 10 kg เพื่อใช้วัดน้ำหนักของอนุภาคของแข็งในท่อวัดอนุภาค (measuring column) อัตราการไหลเวียนของอนุภาคของแข็งหาได้จากน้ำหนักที่วัดได้และเวลาที่ใช้

4. ผลการทดลอง

การทดลองทำที่ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิไดซ์เบดที่ 4, 5, 6 และ 7 m/s อัตราการไหลเวียนของอนุภาคของแข็ง (solid circulation rate, G_s) ที่ 5.8, 6.6, 10, 11.7 kg/m^2.s แสดงดังรูปที่ 3และ 4



รูปที่ 3 การกระจายตัวของความหนาแน่นของอนุภาคตลอดความสูงของห้องฟลูอิไดซ์



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์การกระจายตัวของความหนาแน่นของอนุภาคที่เป็นฟังก์ชันของ Fr, Gs และ z/H

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อกำหนดให้ความดันคร่อมคงที่ การกระจายตัวของความหนาแน่นของอนุภาคจะลดลงตามความสูงของห้องฟลูอิไดซ์ ความแตกต่างของการกระจายตัวของความหนาแน่นจะมากขึ้นตามอัตราการไหลเวียนของอนุภาค และ ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิไดซ์ที่มากขึ้น โดยที่ด้านล่างของห้องฟลูอิไดซ์มีค่าความหนาแน่นมากที่สุดและลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งความสูงมากกว่า 2 m ความหนาแน่นของอนุภาคจะเริ่มคงที่ผลที่ได้สอดคล้องกับโครงสร้างแบบฟาส์ทเบด (fast bed) (8) การกระจายตัวของอนุภาคจึงค่อนข้างคงที่ แต่เมื่อใกล้กับทางออกความหนาแน่นของอนุภาคกลับเพิ่มมากขึ้นอีก เนื่องจากอิทธิพลของทางออก (4,6) สอดคล้องกับผลการทดลองของ (5) ที่แสดงให้เห็นว่าอนุภาคจะหนาแน่นมากที่บริเวณกึ่งกลางของห้องเผาไหม้

5. สรุป

ในการศึกษาการกระจายตัวของความหนาแน่นของอนุภาคตลอดความสูงของห้องฟลูอิไดซ์ซึ่งใช้ทางออกแบบหักฉากของระบบฟลูอิไดซ์เบดที่ไม่มีการเผาไหม้ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ความหนาของชั้นฟลูอิไดซ์เบดเฉลี่ยลดลงตามความสูง รูปร่างการกระจายตัวดังกล่าวขึ้นอยู่กับความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด, อัตราการไหลเวียนของอนุภาคของแข็ง และความดันตกคร่อมรวม จากข้อมูลที่ได้สามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์เพื่อทำนายการกระจายตัวของความหนาแน่นในรูปของ อัตราส่วนของความหนาแน่นของชั้นฟลูอิดไดซ์เบดต่อความหนาแน่นของอนุภาคเบด ตัวเลขฟรอด (Froude number) และอัตราส่วนของความสูงตำแหน่งที่พิจารณาต่อความสูงของห้องฟลูอิดไดซ์เบด ได้เป็น

$$\frac{\rho}{\rho_s} = 3.8084\times10^{-6} Fr^{0.879}\left(\frac{G_s}{\rho_s U}\right)^{-0.667}\left(\frac{z}{H}\right) \quad (4)$$

โดยมีค่า r^2 = 0.933

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณศูนย์วิจัยเครื่องจักรกลเกษตรและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือวัดและเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างเครื่องทดลอง

7. เอกสารอ้างอิง

[1]Basu, P. and Fraser, S.A., (1991). *Circulating Fluidized Bed Boilers-Design and Operation*, Butterworths-Heinemann, Stoneham.

[2]Chinsuwan, A., Dutta, A. (2008). An Empirical model for predicting the cross sectional averaged suspension density in commercial circulating fluidized bed boilers, *Journal of the Energy Institute*, 81(2), 69-75.

[3]Daizo Kunii,Octave Levenspiel, *Fluidization engineering (second edition)*, Butterworth-Heinemann 313 Washington Street Newton, MA 02158-1626.

[4]E.H,van der Meer., Thrope, R.B., and Davidson, J.F., (1999). Dimensionless groups for practicable similarity of circulating fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, 54, 5369-5376.

[5]Hairui Yang, Hai Zhang, Shi Yang, Guangxi Yue, Jun Su, and Zhiping Fu, (2009). Effect of bed pressure drop on performance of a CFB boiler, *Energy & Fuels,* 23,2886-2993

[6]Johnsson, F., and Leckner, B., (1995). Vertical distribution of solids in CFB-furnace, in: K.J. Heinschel, Ed., *Processding of the 13th International Conference on Fluidized Bed Combustion,* New York, pp. 671-679.

[7]Kunii, D., and Levenspiel, O., (1995). Effect of exit geometry on vertical distribution of solids in circulating beds, Part I: Solution of fundamental equations; Part II Analysis of reported data and prediction,*Powder Technology*, 84,83-90.

[8]Rhodes, M.J., Sollaart, M. and Wang, X.S., (1998). Flow structure in a fast fluid bed. *Powder Technology*, 99, 194-200.

[9]Suneel K. Gupta, Franco Berruti, (2000). Evaluation of the gas-solid suspension density in CFB risers with exit effect, *Powder Technology* 108 21-31.

[10]Teplistkiy, Y.S., and Ryabov, G.A., (1999). Scaling in a circulating fluidized bed: particle concentration and heat transfer coefficient in a transport zone, *International Journal of Heat Transfer*, 42,4065-4075.