

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย



การศึกษาการกระจายตัวของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งเฉลี่ย ตลอดหน้าตัดตลอดความสูงของห้องฟลูอิดไดซ์เบด Investigation Cross Sectional Average Suspension Density Distribution along the Height of a CFB Riser Exit

นาฏนลิน จันลาเศษ^{1*} และ อนุสรณ์ ชินสุวรรณ^{2*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น จ. ขอนแก่น 40000 ² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ. ขอนแก่น 40002 *E-mail:nalin_en@hotmail.com, anuchi@kku.ac.th

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลในรูปแบบทางออกแบบหักฉากที่มีส่วนยื่นสูง 4.9 m แบบหักฉาก และแบบโค้งเรียบที่มีความสูง 4.8 m ของระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (circulating fluidized bed,CFB) ที่มี หน้าตัดขนาด 100 mm*100 mm ซึ่งได้ทำการศึกษาในช่วงความเร็ว 4 m/s และอัตราการไหลวน 5-15 kg/m²·s ทรายขนาด 230 μm ความหนาแน่น 2774 kg/m³ ใช้เป็นอนุภาคเบด (bed particle) ซึ่งผลการทดลองและผลจาก การจำลองด้วยวิธีทางพลศาสตร์เชิงคำนวณ แสดงให้เห็นว่าทางออกแบบหักฉากที่มีส่วนยื่นมีการกระจายตัวของความ หนาแน่นของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยตลอดหน้าตัดตลอดความสูงของห้องฟลูอิดไดซ์เบดดีที่สุดและทางออกแบบโค้ง เรียบน้อยที่สุด เมื่ออัตราการไหลวนที่ได้ศึกษาเพิ่มขึ้นทำให้บริเวณที่ทางออกแบบหักฉากที่มีส่วนยื่นและแบบหักฉากมี การเกิดไหลย้อนลงสู่ท่อยืนมีอัตราที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงสามารถนำเอาผลลัพธ์ดังกล่าวมาทำนายพฤติกรรมการไหลภายใน ห้องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนได้

คำสำคัญ: ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน,ฟลูอิดไดซ์เบด,การไหลย้อนกลับ

Abstract

In this study, we have investigated behaviors of the flow inside smooth, sharp 90°, and sharp 90° with projected end riser exits. The study was performed on a CFB system having cross sectional area of $0.1\text{m} \times 0.1$ m under superficial velocity of 4 m/s and external solids circulations rate of 5-15 kg/m²s. Sand having diameter of 230 µm was used as bed materials. The results of the experiments and the simulation by computational fluid dynamic, it has indicated that the type of sharp 90° with projected end riser exits had optimal performed the distribution of particle and the smooth riser exits had minimum performed the distribution of particle. When the external circulation rate in the study increased, it increasingly leads the sharp 90° with projected end riser exits of particle toward riser. So, we could make use of the result of experiment to predict the behavior of flow inside CFB boiler.

Keywords: Circulating Fluidized Bed, Fluidized bed, Reflux.

1.บทนำ

ในการเข้าใจพฤติกรรมทางไฮโดรไดนามิกส์ที่เกิดขึ้นภายในห้องฟลูอิดไดซ์เบดจะทำให้สามารถกำหนดปัจจัย ที่มีต่อประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนได้ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากอนุภาค ของแข็งมาสู่ผนังนั้นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเฉลี่ยตลอดหน้าตัดของห้องฟลูอิดไดซ์เบด จึงมีนักวิจัยหลายท่านได้ ทำการศึกษาการกระจายตัวของความหนาแน่นดังกล่าวตลอดทั้งความสูงของห้องฟลูอิดไดซ์เบด และศึกษาเฉพาะ



การถ่ายเทความร้อนจากอนุภาคของแข็งสู่ผนังห้องฟลูอิดไดซ์เบด นอกจากนี้การกระจายตัวของความหนาแน่นของ อนุภาคของแข็งยังขึ้นอยู่กับรูปร่างของทางออกห้องฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลของอนุภาคของแข็ง และการถ่ายเทความร้อนภายในห้องฟลูอิดไดซ์เบด อย่างไรก็ตาม พบว่านอกจากลักษณะของทางออกห้องฟลูอิดไดซ์ เบดที่มีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของความหนาแน่นตลอดความสูงและพฤติกรรมทางไฮโดรไดนามิกส์ภายในห้องฟลู อิดไดซ์เบดแล้ว ยังไม่พบว่ามีนักวิจัยท่านใดรายงานถึงอิทธิพลของอัตราการไหลเวียนของอนุภาคของแข็งและลักษณะ ของทางออกที่มีผลต่อการกระจายตัวของความหนาแน่นเฉลี่ยตลอดหน้าตลอดความสูงของห้องฟลูอิดไดซ์เบดของ ระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน

2.อุปกรณ์ในการทดลอง

การทดลองทำในระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบ หมุนเวียนที่ไม่มีการเผาไหม้ ซึ่งมีทางออกของท่อยืน 3 ทางออกแบบหักฉากที่มีส่วนยื่น แบบ ได้แก่ (a) (b)ทางออกแบบหักฉากและ (c)แบบโค้งเรียบ ดังรูปที 1 โดยท่อยืน (riser) มีขนาดหน้าตัด 0.1m x 0.1m สง 4.8 m และ 4.9 m อากาศจากพัดลม (blower) ถูกส่งตามท่อเข้าท่อยืน (riser) โดยผ่านแผ่นกระจาย ลม (air distributor) ที่อยู่ด้านล่าง โดยแผ่นกระจาย ้ลมนี้ทำมีรูเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 mm โดย ระยะห่างของแต่ละรูเป็น 10 mm ทำให้สัดส่วนของ พื้นที่รูเปิดคิดเป็น 7.07% ของพื้นที่ ทรายขนาดเฉลี่ย ใช้เป็นอนุภาคชั้นฟลูอิดไดซ์เบด ที่ 230 μm ปลายทางออกของท่อยืน (riser exit) มีไซโคลนติด ตั้งอยู่ อากาศจะถูกแยกออกแล้วระบายออกด้านบน ของไซโคลน อนุภาคของแข็งที่แยกออกแล้วจะถูก ป้อนกลับสู่ท่อยืนทางระบบท่อป้อนกลับ (return leg) ซึ่งประกอบด้วยท่อวัดอนุภาค (measuring column) และท่อเก็บอนุภาค (storage column) อัตราการ ใหลเวียนของอนุภาคของแข็งภายนอก (external solid circulating rate, G_{s}) สามารถควบคุมได้ด้วย วาล์วควบคุมอนุภาค (particle control valve) ที่อยู่ ด้านล่างของระบบท่อป้อนกลับ (return leg) การ ทดลองทำที่ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบดที่ 4 m/s อัตราการไหลเวียนของอนุภาคของแข็งภายนอก ในช่วง 5-15 kg/m²·s และติดตั้งช่องวัดความดัน จำนวน 14 ช่อง ตลอดทั้งความสูงของห้องฟลูอิดไดซ์ เบด โดยช่องวัดความดันช่องแรกมีระยะห่างจากแผ่น mm ส่วนนอกเหนือจากนั้นมี กระจายลม 300 ระยะห่างกัน 400 mm ในการวัดความดันนั้นจะวัด ความแตกต่างของความดันแต่ละจุดที่ติดกัน คือ จะวัด

3.การจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ความดันระหว่างจุด ที่ 1 กับจุดที่ 2 , จุดที่ 2 กับจุดที่ 3 เรื่อยไปจนครบทั้ง 12 คู่

ซึ่งสามารถหาความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง เฉลี่ยตลอดหน้าตัด(ρ) ตลอดความสูงในห้องฟลูอิด ไดซ์เบดจากความแตกต่างของความดันที่ระยะห่างสั้น ของห้องฟลูอิดไดซ์เบดได้ โดยไม่คิดแรงเสียดทานที่ ผนังห้องฟลูอิดไดซ์เบดและความเร่ง :

$$\rho = \frac{\Delta p}{g \Delta z}$$



รูปที่ 1: แผนภาพจำลองของระบบฟลูอิดไดซ์เบด แบบหมุนเวียนที่ไม่มีการเผาไหม้ (a)ทางออกแบบหัก ฉากที่มีส่วนยื่น (b) แบบหักฉาก (c) แบบโค้งเรียบ TSF



การสร้างแบบจำลองทางกายภาพ (physical model) และแบ่งเมช (mesh) ด้วยโปรแกรม GAMBIT และใช้ FLUENT เป็นโปรแกรมในการคำนวณ (solver) งานวิจัยนี้ได้เลือก สมการความต่อเนื่อง (continuity equation) และ สมการโมเมนตัม (momentum equation) ของการไหลหลายเฟส (multi phase flow) ตามแนวคิดแบบ Eulerian (Eulerian approach) มาใช้โดยการกำหนดให้เฟสแก๊สเป็นเฟสหลัก (primary Phase) และเฟสของแข็งเป็นเฟสรอง (secondary phase) สมการของ Gidaspow ใช้ในการคำนวณอันตรกิริยาระหว่างเฟสของแรงต้านการเคลื่อนที่ (inter phase drag Coefficient) แบบจำลองการปั่นป่วนเป็นแบบ _{k-s}, swirl-modified RNG และ dispersed multiphase approach ซึ่งค่าตัวแปรที่ใช้ในการจำลองดังตารางที่ 1 และ แบบจำลองทางกายภาพเป็นดังรูปที่ 2 และค่าสภาวะ ขอบเขตเป็นดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการจำลอง

parameters	values
Particle diameter, d _p (μ m)	230
Particle density, ${oldsymbol ho}_{ m s}$ (kg/m ³)	2774
Riser height, H (m)	4.8
Riser cross-sectional area, A (m ²)	0.1×0.1
Superficial gas velocity, Ug (m/s)	4
External solids flux, G _s (kg/m ² s)	5,10,15
Packed solid volume fraction, ${m \epsilon}_{ m sm}$ (-)	0.6
Coefficient of restitution, e (-)	0.99
Calculation time (s)	50



รูปที่ 2 ขอบเขตของแบบจำลองการไหลของห้องฟลูอิดไดซ์เบด

ตารางที่ 2 การกำหนดค่าขอบเขตเริ่มต้นในการจำลองภาวะ

	Inlet air	Inlet sand	Outlet
Boundary Type	velocity-	velocity-inlet	pressure-
	inlet		outlet
Solid Velocity (m/s) Gas Velocity (m/s) Solid Volume Fraction Gauge Pressure (Pa)	- 4 -	0.0024,0.003,0.009 - 0.63 -	- - - 0



4.ผลและอภิปรายผล

จากผลการทดลองที่ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด 4 m/s และอัตราการไหลเวียนอนุภาคของแข็ 5-15 kg/m²s ของทางออกห้องฟลูอิดไดซ์ทั้ง 3 แบบ ดังรูปที่ 3 (a) พบว่าอัตราการไหลเวียนอนุภาคของแข็ง 5 kg/m²·s รูปแบบ ทางออกของท่อยืนทั้ง 3 แบบมีค่าความ หนาแน่นของอนุภาคของแข็งดังกล่าวใกล้เคียงกันและเบาบางมาก อัตราการ ไหลเวียนอนุภาคของแข็งที่ป้อนเข้าสู่ระบบนั้นน้อยมากจึงทำให้พัดพาออกจากระบบอย่างรวดเร็วดังรูป 4-6 (a) และจาก รูปที่ 3 (b) และ (c) จะพบว่าเมื่ออัตราการไหลวน (a external solid circulating rate) เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ ความ หนาแน่นของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยตลอดหน้าตัดตลอดความสูงของห้องฟลูอิดไดซ์เบดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่บริเวณ ทางออกแบบหักฉากที่มีส่วนยื่นมีช่องว่างที่ยื่นจึงสามารถทำให้มีการสะสมของอนุภาคของแข็งและเกิดการไหลย้อนกลับลง สู่ท่อยื่นอีกครั้ง ส่วนทางออกแบบหักฉากและทางออกแบบโค้งเรียบมีค่าความหนาแน่นลดลงตามความสูง โดยปริมาณ ความหนาแน่นมากที่บริเวณด้างล่างและเบาบางที่บริเวณด้านบนของท่อยืนดังรูป 4 -6 ซึ่งที่บริเวณทางออกของแบบหัก ฉาก (sharp 90° riser exit) เกิดการไหลย้อนกลับ (reflux)เช่นกันกับทางออกแบบหักฉากที่มีส่วนยื่น (sharp 90° with projected end riser exit) แต่น้อยกว่าและการปะทะ (impact) ของอนุภาค (particle) ที่ผนัง (wall) ทางออกของท่อ ยืน(riser exit)เช่นเดียวกันกับทางออกแบบโค้งเรียบ (smooth riser exit)



รูปที่ 3: ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยตลอดทั้งความสูงของท่อยืนทางออกแบบหักฉาก แบบหักฉากที่มีส่วนยื่น และ แบบโค้งเรียบเรียบที่ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด 4 m/sอัตราการไหลเวียนอนุภาคของแข็ง 5 kg/m²s (a) อัตราการไหลเวียน อนุภาคของแข็ง 5 kg/m²s (b) อัตราการไหลเวียนอนุภาคของแข็ง 10 kg/m²s(c) อัตราการไหลเวียนอนุภาคของแข็ง 15 kg/m²s







รูปที่ 4: สัดส่วนปริมาตรอนุภาคของแข็งภายในระบบของทางออกแบบหักฉากที่มีส่วนยื่น ที่ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด 4 m/s a) 5 kg/m²s, b) 10 kg/m²s, c) 15 kg/m²s





รูปที่ 5 สัดส่วนปริมาตรอนุภาคของแข็งภายในระบบของทางออกแบบหักฉาก ที่ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด 4 m/s a) 5 kg/m²s, b) 10 kg/m²s, c) 15 kg/m²s







รูปที่ 6 สัดส่วนปริมาตรอนุภาคของแข็งภายในระบบของทางออกแบบโค้งเรียบ ที่ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด 4 m/s a) 5 kg/m²s, b) 10 kg/m²s, c) 15 kg/m²s





5.สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองและผลจากการจำลองด้วยวิธีทางพลศาสตร์เชิงคำนวณ(Computational fluid dynamic)แสดง ให้เห็นว่าเมื่ออัตราการไหลเวียน(a external solid circulating rate)เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ภายในท่อยืนที่มีทางออกแบบ หักฉากที่มีส่วนยื่น(sharp 90° with projected end riser exit)มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตลอดความสูงและมีการกระจาย ตัวดีที่สุด ส่วนทางออกแบบหักฉาก(sharp 90° riser exit)เกิดการปะทะที่ผนังเพดานทางออกมากขึ้นและทางออกแบบ โค้ง(smooth riser exit)ไม่มีผลต่อพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในท่อยืน(riser)

6.กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ให้การสนับสนุนทุน และภาควิชา วิศวกรรมเกษตร และสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขต ขอนแก่นที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือวัดสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

7.เอกสารอ้างอิง

- A. Svensson, F. Johnsson and B. Leckner, "Bottom bed regimes in a Circulating Fluidized Bed Boiler," Int. J. Multiphase Flow Vol. 22, No. 6, pp. 1187-1204, 29 April 1996.
- [2] E.H. van der Meer, R.B. Thrope, J.F. Davison, "Dimensionless groups for practicable similarity of circulating fluidized beds," Chemical Engineering Science Vol. 54, 1999, pp. 5369–5376.
- [3] H. Yang, H. Zhang, S. Yang, G. Yue, J. Su and Z. Fu, "Effect of bed pressure drop on performance of a CFB boiler," Energy & Fuels Vol. 23, 2009, pp. 2886-2890, 4 April 2009.
- [4] P. Basu and S.A. Fraser, Circulating Fluidized Bed Boilers-Design and Operation, Butterworths-Heinemann, Stoneham, 1991.
- [5] Wen-Ching Yang, Fluidization solid handling and processing Industrial Applications, Noyes Publications, New Jersey, 1998.
- Yu.S. Teplitskiy, G.A. Ryabov, "Scaling in a circulating fluidized bed: particle concentration and heat transfer coefficient in a transport zone," International Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 42, No. 3, 1999, pp. 4065—4075.
- [7] Ernst-Ulrich Hartge, Lars Ratschow, Reiner Wischnewski, JoachimWerther (2009). CFD simulation of a circulating fluidized bed riser, *International Journal of Particuology 283-296*
- [8] Liu Guodong, Sun Dan, Lu Huilin,*, Jacques Bouillard, Bai Yinghua,and Wang Shuai (2005).Computations of Fluid Dynamics of a 50 MWe Circulating Fluidized Bed Combustor.