

อิทธิพลของวิธีฉีดอากาศทุติยภูมิต่อการกระจายตัวความหนาแน่นตามความสูงของห้องฟลูอิดไดซ์ แบบหมุนเวียน

Effect of secondary air injection modes on cross sectional average suspension density along a circulating fluidized bed riser

อิพิงษ์ อามาตสมบัติ¹ และ อนุสรณ์ ชินสุวรรณ^{*1}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ. ขอนแก่น 40002

*ติดต่อ: โทรศัพท์: 043 202 845, โทรสาร: 043 202 849

E-mail: anuchi@kku.ac.th

บทคัดย่อ

ในการทำวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจะศึกษาอิทธิพลของอากาศทุติยภูมิ (secondary air) ที่มีผลต่อการกระจายตัวของความหนาแน่นเฉลี่ยตลอดหน้าตัด (cross sectional average suspension density) ตลอดความสูงของห้องเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์แบบหมุนเวียน (circulating fluidized bed riser) การทดลองทำในระบบฟลูอิดไดซ์แบบหมุนเวียนที่ไม่มีการเผาไหม้ขนาดหน้าตัด 100x180 mm สูง 3.65 m ทางเข้าของอากาศทุติยภูมิมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 mm อนุภาคเบด (bed particle) เป็นทรายมีขนาดเฉลี่ย 230 μm มุมทางเข้าของอากาศทุติยภูมิสามแบบ 0 องศา 45 องศา และ 90 องศา กับแนวระดับได้ถูกพิจารณาในสภาวะความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด (superficial velocity) และอัตราส่วนของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศปฐมภูมิ (primary air) (SA/PA) ในช่วง 4-7 m/s และ 0-0.5 ตามลำดับ พบว่าความหนาแน่นเฉลี่ยตลอดหน้าตัด (cross sectional average suspension density) ลดลงตามความสูงของห้องฟลูอิดไดซ์เบด อัตราส่วนของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศปฐมภูมิมีผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของความหนาแน่นอากาศทุติยภูมิแบ่งการกระจายตัวของความหนาแน่นเป็นสองส่วน ส่วนที่อยู่ต่ำกว่าทางเข้าของอากาศทุติยภูมิจะมีความหนาแน่นสูงและในส่วนที่อยู่เหนือจากทางเข้ามีความหนาแน่นค่อนข้างเบาบาง ความสูงของจุดเปลี่ยนเว้านี้มีแนวโน้มสูงสุดเมื่อทางเข้าทำมุม 45 องศา กับแนวระดับ

Abstract

The purpose of this work was to study the influence of secondary air (SA) on cross sectional average suspension density along the height of a circulating fluidized bed (CFB) riser. The experiments were performed in a cold CFB model. The riser has a cross sectional area of 100x180 mm and height of 3.65 m. The secondary air ports have inside diameter of 13 mm. Sand having an average diameter of 230 μm was used as bed material. Three modes of injection, 0°, 45° and 90° with the horizontal plane, were investigated with superficial velocity and the ratio of secondary to primary air (SA/PA) in the range of 4-7m/s and 0-0.5 respectively. It was found that the cross sectional average suspension density decreased along the riser height and the SA/PA has direct influence on the suspension density distribution. The SA divided the suspension density into two zones: a dense zone below the air ports and a relative dilute zone above the air ports. The height of the inflection point trended to maximum when the ports were at 45° with the horizontal plane.

1. บทนำ

เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (circulating fluidized bed boiler, CFB) ก็เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในโลกปัจจุบัน เนื่องจากมีข้อดีหลาย ๆ ด้าน เช่น ใช้กับเชื้อเพลิงได้หลากหลาย พร้อมทั้งเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงและยังช่วยลดมลพิษที่ปล่อยสู่บรรยากาศได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบอื่น

ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนจะขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นฟลูอิดไดซ์เบด (fluidized bed) กับแผงท่อน้ำ (membrane water tube) ที่อยู่ติดกับผนังห้องเผาไหม้ด้านใน ดังนั้นเมื่อมีการกระจายตัวของความหนาแน่นของอนุภาคในห้องเผาไหม้สูงจะส่งผลให้การถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้น

ที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาวิธีฉีดของทางเข้าของอากาศทุติยภูมิแบบต่าง ๆ ที่มีผลต่อการกระจายตัวในห้องเผาไหม้ และปริมาณอากาศทุติยภูมิที่ใช้ในห้องเผาไหม้ (3, 4, 5, 7, 8, 10) แต่ไม่มีรายงานวิจัยใดที่กล่าวถึงลักษณะของมุมการฉีดของอากาศทุติยภูมิที่มีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งตลอดความสูงของห้องฟลูอิดไดซ์เบด

2. ทฤษฎี

ความหนาแน่นเฉลี่ยตลอดหน้าตัดของของผสม (ρ) คืออัตราส่วนของมวลทั้งหมดต่อปริมาตรทั้งหมดของของผสมที่หน้าตัดนั้น ๆ ในห้องฟลูอิดไดซ์เบด เขียนแทนด้วยสมการดังนี้

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

โดยที่ V คือปริมาตรรวม และเป็นผลรวมของปริมาตรอากาศ V_a และปริมาตรของอนุภาค V_s ส่วน ρ_a คือความหนาแน่นของอากาศและ ρ_s คือความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง ความดันตกคร่อมห้องฟลูอิดไดซ์เบดมีความสัมพันธ์ดังนี้

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

ห้องฟลูอิดไดซ์เบดที่มีความสูง Δz มีพื้นที่ตลอดความสูงเป็น A_c ความดันที่หน้าตัดบนและหน้าตัดด้านล่างผิวควบคุมเป็น P_1 และ P_2 ตามลำดับ เมื่อไม่คิด

น้ำหนักของอากาศ แรงเสียดทานที่ผิวห้องฟลูอิดไดซ์เบดและความเร่ง

ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด (superficial velocity) ต้องมีค่ามากกว่าความเร็วสุดท้ายของอนุภาค (terminal velocity) หาได้ดังสมการนี้

$$A_1 V_a = A_2 U \quad (3)$$

เมื่อ A_1 คือพื้นที่หน้าตัดของท่อลมส่วนที่ต่อกับพัดลม, A_2 คือพื้นที่หน้าตัดของห้องฟลูอิดไดซ์เบด, V_a คือความเร็วลมที่วัดได้ และ U คือความเร็วของอากาศหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด วัดความเร็วลมโดยใช้ pitot tube หาได้ดังนี้

$$v_a = \sqrt{\frac{2\rho_w g h_m}{\rho_a}} \quad (4)$$

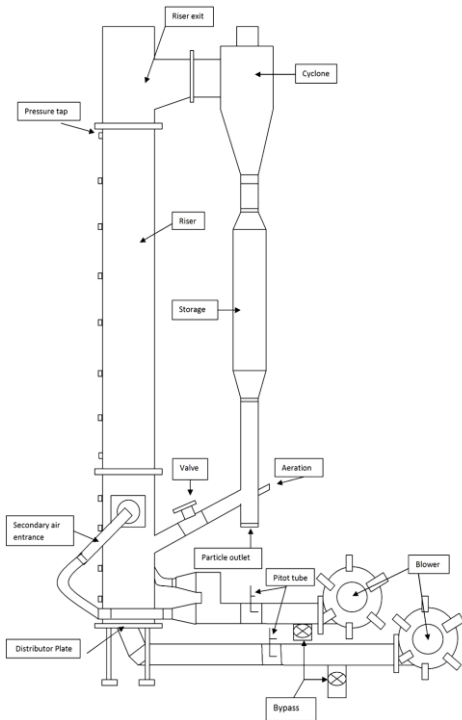
เมื่อ h_m คือผลต่างของความสูงของน้ำที่วัดได้จากมานอมิเตอร์, ρ_w คือค่าความหนาแน่นของน้ำ, g คือค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกและ ρ_a คือความหนาแน่นของอากาศ และสามารถหาความเร็วสุดท้าย (terminal velocity), u_t ได้ดังสมการนี้

$$u_t = \sqrt{\frac{4g(\rho_s - \rho)d_p}{3C_D \rho}} \quad (5)$$

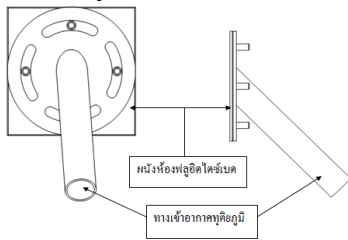
เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของของไหล, ρ_s คือความหนาแน่นของอนุภาค, d_p คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคและ C_D คือสัมประสิทธิ์แรงลากจูง (drag coefficient)

3. การทดลอง

การทำวิจัยในครั้งนี้ทำในห้องฟลูอิดไดซ์เบดจำลองดังรูปที่ 1 ที่มีความสูงตั้งแต่แผ่นกระจายลมจนถึงทางออกสูง 3.65 m หน้าตัดสี่เหลี่ยมหนา 2 mm ขนาด 100 x 180 mm ทางเข้าของอากาศทุติยภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 cm มีสองทางเข้าติดกับผนังห้องฟลูอิดไดซ์สามารถปรับมุมตามต้องการได้ดังรูปที่ 2



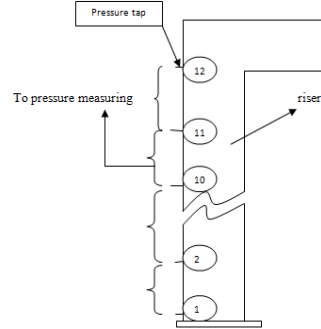
รูปที่ 1 ห้องฟลูอิดไคซ์เบดที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 2 ลักษณะของทางเข้าอากาศทุติยภูมิที่ปรับมุมได้ อากาศปฐมภูมิ (primary air) จากพัดลม (blower) ถูกส่งตามท่อทางเข้าห้องฟลูอิดไคซ์เบด (riser) โดยผ่านแผ่นกระจายลม หนา 3 mm เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 mm สัดส่วนของพื้นที่รูคิดเป็น 8 % ทรายมีขนาดเฉลี่ย 230 μm ใช้เป็นอนุภาคชั้นฟลูอิดไคซ์เบด ที่ปลายทางออกมีไซโคลนติดตั้งอยู่มีหน้าที่ดักจับอนุภาคที่ทางออกจากห้องฟลูอิดไคซ์เบดเพื่อให้อนุภาคกลับลงไปในส่วนของท่อป้อนกลับ (return)

ที่ผนังด้านนอกของห้องฟลูอิดไคซ์เบดติดตั้งตัววัดความดันตามแนวความสูงทั้งหมดสิบสองตัว และปลายท่อวัดความดันฝั่งตรงข้ามกับผนังห้องฟลูอิดไคซ์เบดจะต่อเข้ากับสายยางออกมาสำหรับวัดค่าความดันซึ่งจะต่อเข้ากับตัวรับสัญญาณ ผลต่าง ความดัน (Pressure differential sensor) การวัดความดันนั้นจะวัดความต่างของความดันแต่ละจุดที่ติดกัน เช่น จะวัดที่จุดที่ 1 กับจุดที่ 2, จุดที่ 2 กับจุดที่ 3 เรื่อยไปจนครบทั้งหมด 11 คู่ดังรูปที่ 3 โดยเครื่องมือวัดผลต่างความดันซึ่งมีความ

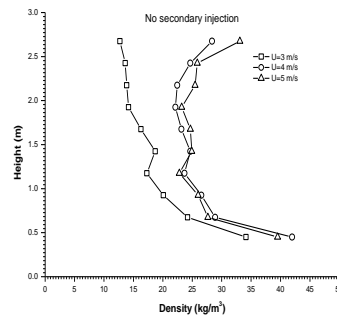
คลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 2.5\%$ ที่อุณหภูมิ +10 ถึง +60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3 การติดตั้งและการวัดความดันจากท่อวัดความดัน ค่าผลต่างความดันจะถูกบันทึกค่าทุกวินาที ด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) เป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 1 นาที และสามารถวัดความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไคซ์เบด (superficial velocity) โดยใช้ pitot tube

4. ผลการทดลอง

การทดลองทำที่ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไคซ์เบดที่ 3, 4 และ 5 m/s โดยการควบคุมเบด โดยพบว่าเมื่อไม่มีการฉีดอากาศทุติยภูมิการกระจายตัวของอนุภาคจะมากที่ส่วนล่างและจะลดตามความสูงของห้องเผาไหม้ (riser) และ เมื่อเพิ่มความเร็วหน้าชั้นจะมีผลให้การกระจายตัวตลอดความสูงเพิ่มตามดังรูปที่ 4

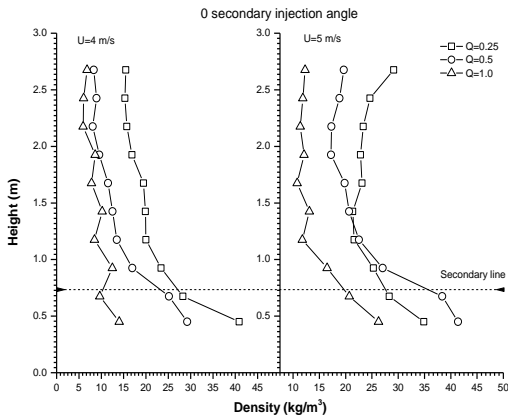


รูปที่ 4

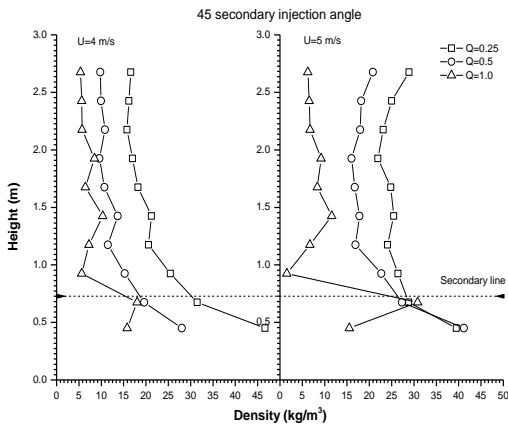
เมื่อมีการฉีดอากาศทุติยภูมิ (secondary air) จะพบจุดเปลี่ยนเว้า (Inflection point) ที่ตำแหน่งทางเข้าของอากาศทุติยภูมิ และพบว่าการกระจายตัวจะเพิ่มขึ้นตลอดความเมื่ออัตราส่วนอากาศปฐมภูมิต่ออากาศทุติยภูมิลดลงและความเร็วหน้าชั้นจะส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคสูงตาม ดังแสดงในรูปที่ 5-7

เมื่อมีการปรับมุมการฉีดอากาศทุติยภูมิพบว่ามุมทางเข้า 0 องศา จะทำให้การกระจายตัวของอนุภาคได้ดีกว่ามุม 45 และ 90 องศา เนื่องจากอากาศทางเข้ามุม 0 องศา จะขัดขวางการไหลของอากาศปฐมภูมิน้อยกว่า

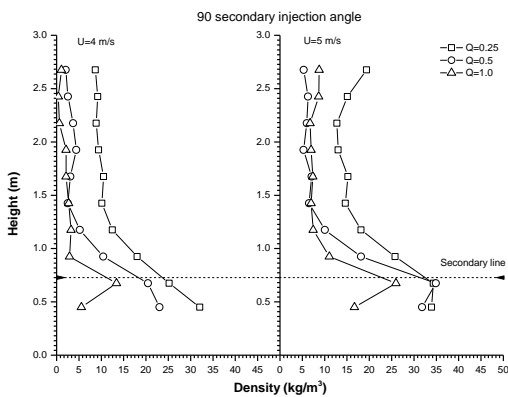
มุมอื่น และมุมทางเข้า 90 องศา จะพบการกระจายตัวตามแนวความสูงน้อยที่สุด



รูปที่ 5 การกระจายความหนาแน่นตลอดแนวความสูงเมื่อมุมการฉีดอากาศทุติยภูมิเป็น 0 องศา



รูปที่ 6 การกระจายความหนาแน่นตลอดแนวความสูงเมื่อมุมการฉีดอากาศทุติยภูมิเป็น 45 องศา



รูปที่ 7 การกระจายความหนาแน่นตลอดแนวความสูงเมื่อมุมการฉีดอากาศทุติยภูมิเป็น 90 องศา

5. สรุป

ทางเข้าของอากาศทุติยภูมิมีผลต่อการกระจายความหนาแน่นเฉลี่ยที่ ส่วนที่อยู่ต่ำกว่าทางเข้าของอากาศทุติยภูมิ (primary zone) แต่ไม่มีผลต่อส่วนที่อยู่เหนือจากทางเข้า(secondary zone) ซึ่งมุมทางเข้าของอากาศทุติยภูมิ และอัตราส่วนของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศปฐมภูมิ (SA/PA) ล้วนมีผลต่อการกระจายความหนาแน่นทั้งสิ้น โดยจะมีผลต่อความหนาแน่นใต้ทางเข้าของอากาศทุติยภูมิเป็นสำคัญ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว สกอ. กรุงเทพฯ และศูนย์วิจัยเครื่องจักรกลเกษตรและวิทยาการหลังเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างเครื่องทดลอง

7. เอกสารอ้างอิง

1. Daizo Kunii, Octave Levenspiel, Fluidization engineering (second edition), Butterworth-Heinemann 313 Washington Street Newton, MA 02158-1626.
2. Prabir Basu, Combustion and gasification in fluidized beds
3. Yong Jun Cho, Won Namkung, Sang Dong Kim and Sunwon Park, Effect of secondary air injection on axial solid holdup distribution in a circulating fluidized bed, Science and Technology.
4. Antonio Marzocchella, Umberto Arena, Hydrodynamics of a circulating fluidized bed operated with different secondary air injection devices, Power Technology (1995)
5. Daizo Kunii, Octave Levenspiel, Effect of exit geometry on the vertical distribution of solids in circulating fluidized bed, Power Technology (1995)
6. Jeong-Hoo Choi, Kyu-Jong Kim, Sang-Done Kim, Effect of secondary gas injection on

the particle entrainment rate in a gas fluidized bed, Power Technology (1996)

7. Yu.S Teplitskiy, G.A. Rrabov, Scaling in a circulating fluidized bed : particle concentration and heat transfer coefficient in a transport zone, International Journal of Heat and Mass Transfer (1999)

8. Yong Kang, Pyung S. Song, Jong S. Yun, Yi Y. Jeong and Sang D. Kim, Effects of secondary air injection on gas-solid flow behavior in circulating fluidized beds, Science and Technology. (1999)

9. L.E. Ersoy, M.R. Golriz, M. Koksai, F. Hamdullahpur, Circulating fluidized bed hydrodynamics with air staging an experimental study, Power Technology. (2004)

10. M. KOKSAL and F. HAMDULLAHPUR, Gas mixing in circulating fluidized beds with secondary air injection, Institution of Chemical Engineers, (2004)

11. A. Chinsuwan, A. Dutta, Empirical model for predicting cross-sectional averaged suspension density in commercial circulating fluidized bed boiler, Journal of the Energy Institute (2008)