

**อิทธิพลของความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดเซชันและปริมาณเบดที่ส่งผลต่อ
พลศาสตร์การไหลของอนุภาคภายในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียน
Effects of Fluidizing Velocity and Bed Weight on Hydrodynamics of Particles Inside
a Circulating Fluidized Bed Combustor (CFBC)**

ปรัชญา บุญประสิทธิ์¹ และ ฐานิตย์ เมธิยานนท์^{1*}

¹ ชื่อภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์
กระทุ่มราย นนทบุรี กรุงเทพมหานคร 10530

*ผู้ติดต่อ: E-mail: thanid_m@yahoo.com, เบอร์โทรศัพท์: 0-2988-3655, เบอร์โทรสาร: 0-2988-4040

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลกระทบของความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดเซชันและปริมาณของอนุภาคเบดที่มีผลต่อพฤติกรรมทางพลศาสตร์การไหลของอนุภาคภายในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียนที่ไม่มีการเผาไหม้ โดยชุดทดลองมีความสูง 6 m และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อไรเซอร์และดาวนคัมเมอร์เท่ากับ 150 และ 100 mm ตามลำดับ การป้อนกลับของอนุภาคถูกควบคุมโดยการเติมอากาศเข้าในบริเวณแอลลวาล์ว (L-valve) ในการศึกษาได้ปรับเปลี่ยนความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดเซชัน (U_f) ระหว่าง 3.5-4.5 m/s ปริมาณเบดทราย 20-25 kg และปริมาณอากาศที่ท่อเติมอากาศที่ L-Valve เท่ากับ 150 L/min ผลการทดลองพบว่าการเพิ่ม U_f ส่งผลให้ความดันภายในท่อไรเซอร์เพิ่มขึ้นจาก 137-303 mmH₂O เป็น 242-384 mmH₂O ในขณะที่สัดส่วนช่องว่าง (ε) ในช่วงระดับความสูง 0-2.3 m เพิ่มขึ้นจาก 0.966-0.995 เป็น 0.986-0.997 นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของ U_f ยังส่งผลให้อัตราการเวียนกลับของอนุภาคเพิ่มขึ้นด้วยซึ่งเป็นผลมาจากความดันตกคร่อม L-Valve ที่เพิ่มขึ้น ส่วน การเพิ่มปริมาณเบดทรายส่งผลให้ค่าสัดส่วนช่องว่างในช่วงความสูง 0-2.3 m ลดลงอย่างเห็นได้ชัดจาก 0.966-0.995 เหลือเพียง 0.887-0.998 ทั้งนี้จากการศึกษาจากกล่าวได้ว่าความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดเซชันมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของการกระจายความดันภายในเตาและอัตราการเวียนกลับของอนุภาคเบดมากกว่าปริมาณเบด โดยอัตราการเวียนกลับของอนุภาคจะแปรผันตรงกับความดันตกคร่อม L-Valve

คำหลัก: พลศาสตร์การไหล, ฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียน, สัดส่วนช่องว่าง, อนุภาคเบด

Abstract

This research presents the effects of the fluidizing air velocity and amount of bed material on hydrodynamics of the particles inside a non-reactive circulating fluidized-bed combustor (CFBC). The test rig, 6 m in height, has inside diameters of 150 mm for the riser and 150 mm for the downcomer. The circulation rate of the particles was controlled by an L-valve. In this study, the fluidizing velocity (U_f), ranging 3.5-4.5 m/s and the bed weight, varying between 20 and 25 kg, as well as the aeration at L-valve

of 150 L/min were employed. The results showed that an increase in fluidizing velocity resulted in the riser-pressure increments, increased from 137-303 mmH₂O to 242-384 mmH₂O, while the voidage (ϵ) in the level of 0-2.3 m increased from 0.966-0.995 to 0.986-0.997. Moreover, as U_f increased, solid circulation rate increased as a result of the rise in pressure drop at the L-valve. An increase in amount of bed weight significantly reduced the voidage at the level of 0-2.3m, decreased from 0.966-0.995 to 0.887-0.998. The results concluded that the fluidizing velocity had more effects on changes in pressure distribution, solid circulation rate than the amount of bed material. Finally, the circulation rate of solid normally directly proportioned to the pressure drop at the L-valve.

Keywords: bed particle, Circulating fluidized-bed, Hydrodynamic, Voidage bed.

1. บทนำ

ปัจจุบันการแปรรูปพลังงานมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาด้านอุตสาหกรรม โดยเฉพาะการแปลงพลังงานจากเชื้อเพลิงต่างๆ ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือความร้อน ซึ่งการแปรรูปพลังงานจากเชื้อเพลิงนั้นสามารถทำได้หลายกระบวนการ เช่น การเผาไหม้โดยตรง ไฟโรโรซิซ และแก๊สซิฟิเคชัน โดยเทคโนโลยีการเผาไหม้ที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงและปลดปล่อยมลพิษน้อยคือการเผาไหม้ฟลูอิดไรซ์เบด เนื่องจากเชื้อเพลิงมีการเผาไหม้แบบปั่นป่วนภายในเบดซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อย เช่นทราย อยู่ภายใน โดยวัสดุเฉื่อยจะช่วยคูลเซลล์เชื้อเพลิงให้สัมผัสกับอากาศได้ดีขึ้น และยังทำหน้าที่ในการเก็บรักษาอุณหภูมิในเบดมีความเสถียร ซึ่งทำให้เตาเผาไหม้ชนิดนี้สามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูง [1-3] อย่างไรก็ตามเตาเผาไหม้ฟลูอิดไรซ์เบดแบบเดิมยังคงประสบกับปัญหาในการควบคุมมลพิษบางชนิด โดยเฉพาะไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) จึงได้มีการพัฒนาเตาเผาไหม้ฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized-bed combustor, CFBC) ซึ่งสามารถควบคุม NO_x ได้ต่ำกว่าเตาเผาไหม้แบบเดิม ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการนำเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น แกลบ [4], ฟางข้าว [5], กะลาปาล์ม [6], ชานอ้อย [7] เป็นต้น มาใช้ใน CFBC

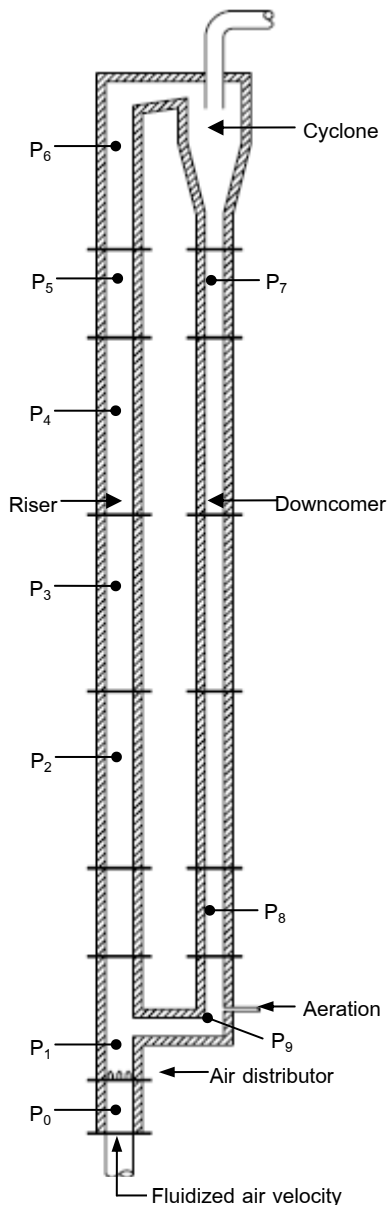
อย่างไรก็ตามการที่จะเข้าใจถึงการทำงานและคุณลักษณะต่างๆของเตาเผาไหม้ชนิดนี้ จำเป็นต้องมีการศึกษาถึงพฤติกรรมทางพลศาสตร์การไหลของ

อนุภาคเบด เช่น การกระจายความดันภายในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดไรเซชันและปริมาณของอนุภาคเบดที่มีผลต่อพลศาสตร์การไหลของอนุภาคเบดภายใน CFBC โดยพิจารณาการกระจายความดันและความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดไรเซชัน

2. อุปกรณ์การทดลองและการทำงาน

รูปที่ 1 เป็นลักษณะของเตาเผาไหม้ฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียนซึ่งประกอบไปด้วย ท่อไรเซอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm สูง 6 m ท่อดาวน์คัมเมอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 100 mm ไรเซอร์และดาวน์คัมเมอร์ถูกเชื่อมต่อกันทางด้านบนด้วยไซโคลนดักจับอนุภาคและลักษณะท่อป้อนกลับเป็นแบบ L-valve และมีตำแหน่งท่อเติมอากาศ (Aeration tap) สูงจากจุดศูนย์กลางท่อป้อนกลับ 1 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อป้อนกลับ แผ่นกระจายอากาศ (Distributor) เป็นแบบหัวฉีดจำนวน 6 หัว โดยมีจุดวัดความดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ทั้งหมด 10 จุด (P_0 - P_9) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะของ CFBC และตำแหน่งวัดความดัน การวัดความเร็วและปริมาณอากาศที่จ่ายให้ด้านไรเซอร์และด้าน L-valve ใช้เวนจูรีซึ่งได้ทำการสอบเทียบแล้วร่วมกับเซนเซอร์วัดความดันแตกต่างซึ่งมีความคลาดเคลื่อน $\pm 3\%$ ของย่านการวัด เป็นอุปกรณ์ในการวัดความเร็วและอัตราการไหลของอากาศ การวัดความดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ได้ใช้manoมิเตอร์น้ำในการวัดความดันเทียบกับความดันบรรยากาศ

หลักการทำงานของ CFBC อากาศจะถูกป้อนเข้าสู่ด้านไรเซอร์ผ่านแผ่นกระจายอากาศด้วยความเร็วฟลูอิดเซชันตามเงื่อนไขต่างๆ เพื่อให้อนุภาคเบตมีการเคลื่อนตัวจากด้านล่างจนออกจากไรเซอร์เข้าสู่โคลนดักจับอนุภาค อนุภาคเบตจะตกลงสู่ด้าน

ดาวนคัมเมอร์ ซึ่งด้านล่างของดาวนคัมเมอร์จะเป็นท่อป้อนกลับแบบ L-valve และในบริเวณนี้จะมีการเติมอากาศด้วยอัตราการไหลตามเงื่อนไขที่กำหนด ทำให้อนุภาคเบตที่อยู่ด้านดาวนคัมเมอร์ถูกป้อนกลับเข้าสู่ด้านไรเซอร์อีกครั้งหนึ่ง

3. การทดลองและผลการทดลอง

ในการทดลองแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ

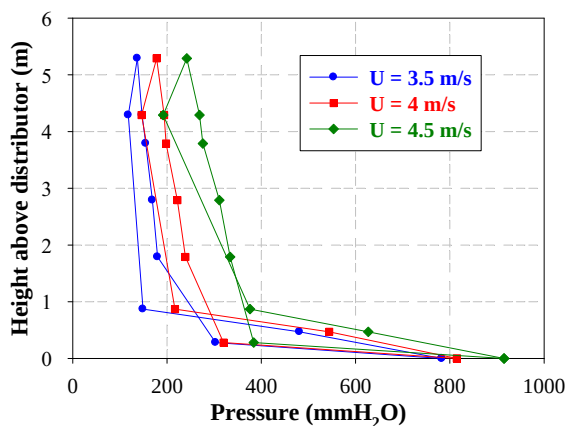
1. ศึกษาถึงอิทธิพลของความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดเซชันที่ส่งผลต่อพลศาสตร์การไหลภายในเตาเผาไหม้ฟลูอิดเบตแบบหมุนเวียน
2. ศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณเบตที่ส่งผลต่อพลศาสตร์การไหลภายในเตาเผาไหม้ฟลูอิดเบตแบบหมุนเวียน

3.1 ศึกษาถึงอิทธิพลของความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดเซชันที่ส่งผลต่อพลศาสตร์การไหลภายในเตาเผาไหม้ฟลูอิดเบตแบบหมุนเวียน

จากรูปที่ 2, 3 และ 4 เป็นการศึกษารายละเอียดของความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดเซชันที่ส่งผลต่อการกระจายความดันภายใน CFBC โดยความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดเซชัน (U_f) มีค่าเท่ากับ 3.5-4.5 m/s, ใช้ทรายขนาด 300 μm เป็นเบตที่น้ำหนัก 20 kg และเติมอากาศที่ L-valve ด้วยอัตราการไหล 150 L/min

จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อ U_f เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความดันภายใน CFBC มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 137-303 mmH₂O เป็น 242-384 mmH₂O โดยลักษณะการกระจายความดันภายในท่อไรเซอร์ในทุกความเร็วมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยที่จุดวัดความดัน P0 (ใต้แผ่นกระจายอากาศ) เป็นจุดวัดความดันที่มีความดันสูงที่สุด และความดันจะลดลงจนถึงจุดวัดความดัน P2 (ความสูงจากแผ่นกระจายอากาศ 1.8 m) และจากจุดวัดความดัน P3 (ความสูงจากแผ่นกระจายอากาศ 2.8 m) ถึง P6 มีลักษณะการลดลงของความดันน้อยกว่าในช่วง P1-P2 สาเหตุที่ทำให้ความดันในช่วงความสูง 0-1.8 m มีความดันสูงกว่าช่วงความสูง 1.8-5.3 m เพราะว่าในช่วงความสูง 0-1.8 m มีอนุภาคเบตอยู่อย่างหนาแน่น ส่วนในช่วงความสูง 1.8-5.3 m

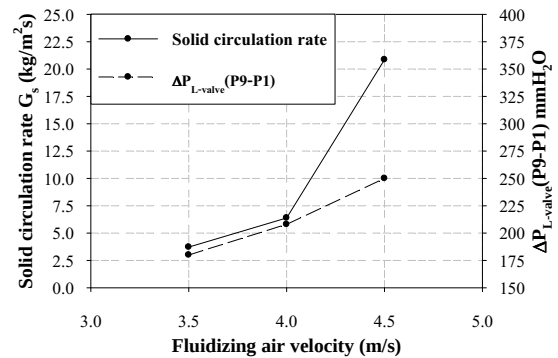
มีความดันต่ำกว่าช่วงความสูง 0-1.8 m เพราะว่ามี การกระจายตัวของอนุภาคแบบเบาบางตลอดความสูง ในช่วงนี้ และในด้านดาวน์คัมเมอร์ที่จุด P7 มีความดันลดลงจากจุด P6 เนื่องจากสูญเสียความดันให้กับไซโคลนดักจับอนุภาค และในระหว่างจุดวัดความดัน P8-P9 มีช่องเติมอากาศอยู่ ทำให้ความดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยที่ช่องเติมอากาศมีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 150 L/min



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความดันภายในเตา CFBC ที่ ปริมาณเบต 20 kg

หากพิจารณาที่บริเวณ L-valve พบว่าความดันที่จุด P8 ที่ความเร็ว U_f 4.5 m/s มีความดันสูงกว่าที่ความเร็ว 3.5 และ 4.0 m/s เนื่องจากมีระดับความสูงของเบตทรายสูงถึงจุดวัดความดัน P8 จึงมีความดันจากอากาศที่เติมเข้าช่องเติมอากาศเข้ามาที่จุด P8 ด้วย และหากพิจารณาความดันที่จุดวัดความดัน P9 และ P1 (ความดันตกคร่อม L-valve) จะเห็นได้ว่าที่จุด P9 มีความดันมากกว่าจุด P1 เป็นผลทำให้อนุภาคเบตที่อยู่ในด้านดาวน์คัมเมอร์เคลื่อนตัวผ่าน L-valve กลับเข้าสู่ด้านไโรเซอร์ได้ และยังพบอีกว่าอัตราการเวียนกลับของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นตามความดันตกคร่อม L-valve ดังรูปที่ 3

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดเซชันส่งผลให้ความดันตกคร่อม L-valve มีค่าสูงขึ้นและยังส่งผลให้อัตราการเวียนกลับของอนุภาคเบต (G_s) มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย โดยอัตราการเวียนกลับจะเพิ่มขึ้นตามผลต่างของความดันตกคร่อม L-valve



รูปที่ 3 อัตราการเวียนกลับของอนุภาคเบตและความดันตกคร่อม L-valve ของเบตทราย 20 kg ที่ความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดเซชันต่างๆ หากนำผลของการกระจายความดันภายใน CFBC ด้านไโรเซอร์ ไปคำนวณหาสัดส่วนช่องว่างตามสมการที่ (1) (Li, Z.Q. และคณะ) [8] สามารถแสดงถึงการกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างได้ดังรูปที่ 4

$$\varepsilon = 1 - \frac{\Delta P}{\Delta L g \rho_s} \quad (1)$$

โดย

ε = สัดส่วนช่องว่าง (-)

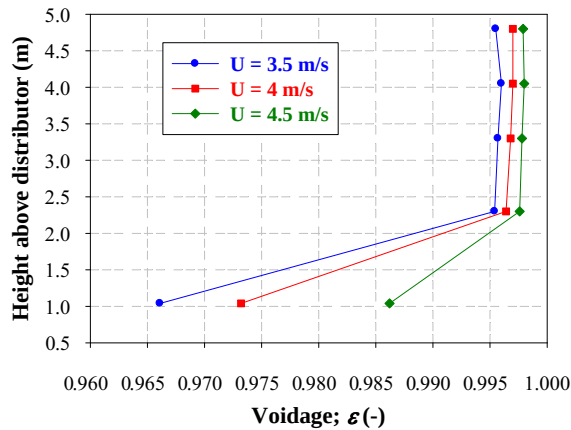
ΔP = ผลต่างความดันของอากาศของสองตำแหน่งติดกัน (Pa)

ΔL = ระยะห่างระหว่างจุดวัดความดันอากาศสองตำแหน่งติดกัน (m)

ρ_s = ความหนาแน่นของของแข็ง (kg/mm^3)

g = แรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ 9.81 m/s^2

รูปที่ 4 เป็นผลการคำนวณหาค่าสัดส่วนช่องว่างพบว่าค่าสัดส่วนช่องว่างในทุกๆเงื่อนไขช่วงความสูง 0-1.8 m มีค่าสัดส่วนช่องว่างน้อยกว่าในช่วงความสูง 2.3-6 m แสดงว่าในช่วงความสูง 0-1.8 m มีปริมาณเบตอยู่อย่างหนาแน่น และในช่วงความสูงต่อจากนี้ไปจนถึงทางออกของท่อไโรเซอร์มีค่าสัดส่วนช่องว่างน้อยเนื่องจากมีปริมาณอนุภาคเบตอยู่อย่างเบาบาง



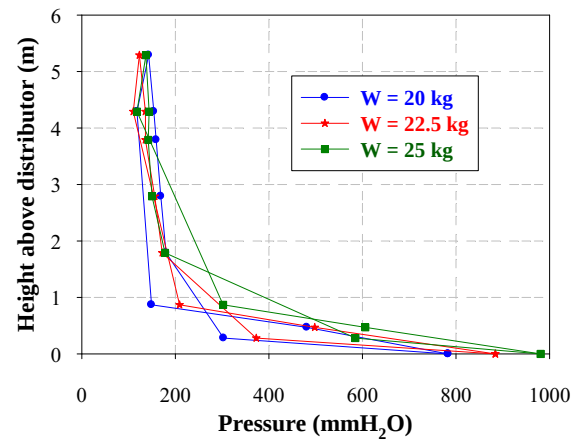
รูปที่ 4 สัดส่วนช่องว่างภายในโรเตอร์ที่ปริมาณเบต 20 kg

การเพิ่มขึ้นของ U_f ส่งผลให้ค่าสัดส่วนช่องว่างในช่วงความสูง 0-1.8 m เพิ่มขึ้นจาก 0.966-0.995 เป็น 0.986-0.997 ในขณะที่ช่วงความสูง 2.3-6 m (เบตเบาบาง) มีค่าต่างกันไม่มากนัก

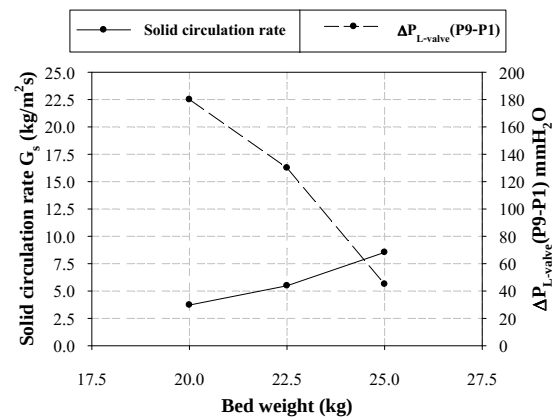
3.2 ศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณเบตที่ส่งผลต่อพลศาสตร์การไหลภายในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไชเบตแบบหมุนเวียน

จากรูปที่ 5, 6 และ 7 เป็นการศึกษาผลของปริมาณเบตที่ส่งผลต่อการกระจายความดันภายใน CFBC ใช้ทรายขนาด 300 μm เป็นเบตน้ำหนัก 20, 22.5 และ 25 kg, ความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดไชเซชันเท่ากับ 3.5 m/s และเติมอากาศที่ L-valve ด้วยอัตราการไหล 150 L/min

จากรูปที่ 5 พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณเบตส่งผลให้ความดันภายใน CFBC มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของ U_f โดยมีความดันเพิ่มขึ้นจาก 137-303 mmH₂O เป็น 137-583 mmH₂O ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณเบตส่งผลให้ความดันในช่วงความสูง 0-1.8 m (ความสูงด้านล่าง) เพิ่มขึ้น แต่ในช่วงความสูง 1.8-5.3 m มีความดันแตกต่างกันไม่มากนัก

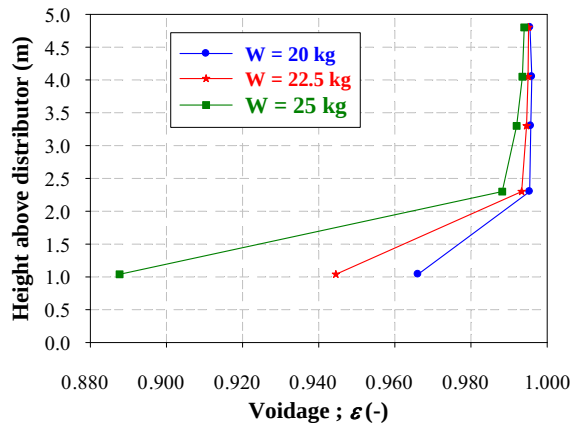


รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงความดันภายใน CFBC ที่ความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดไชเซชันเท่ากับ 3.5 m/s



รูปที่ 6 อัตราการเวียนกลับของอนุภาคเบตและความดันตกคร่อม L-valve ของความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดไชเซชัน 3.5 m/s ที่ปริมาณเบตต่างๆ

หากพิจารณาบริเวณ L-valve พบว่าเมื่อปริมาณเบตเพิ่มขึ้นกลับส่งผลให้ความดันตกคร่อม L-valve ลดลง ซึ่งแตกต่างจากผลการทดลองก่อนหน้านี้ สาเหตุเนื่องมาจากปริมาณเบตที่เพิ่มมากขึ้นทำให้มีอนุภาคเบตสะสมอยู่ในช่วงความสูงด้านล่างมากขึ้นทำให้ความดันที่จุด P1 มีความดันสูงขึ้นมาก ซึ่งตำแหน่งของจุดวัดความดัน P1 อยู่ต่ำกว่า L-valve และการเพิ่มขึ้นของปริมาณเบตยังส่งผลให้อัตราการเวียนกลับของอนุภาคเบตเพิ่มขึ้นเล็กน้อยดังรูปที่ 6



รูปที่ 7 สัดส่วนช่องว่างภายในโรเตอร์ที่ความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดเซชัน 3.5 m/s

รูปที่ 7 เป็นผลมาจากการคำนวณสัดส่วนช่องว่างจากผลของความดันในถังโรเตอร์ พบว่าในช่วงความสูง 0-1.8 m มีค่าสัดส่วนช่องว่างลดลงจาก 0.966-0.995 เป็น 0.887-0.988 ส่วนในช่วงความสูง 2.3-6 m มีค่าสัดส่วนช่องว่างใกล้เคียงกัน หากสังเกตที่ปริมาณเบต 25 kg พบว่าในช่วงความสูงด้านบน (2.3-6 m) มีค่าสัดส่วนช่องว่างลดลงเล็กน้อยเนื่องจากเมื่อปริมาณเบตเพิ่มขึ้นทำให้มีอนุภาคเบตสะสมอยู่ในช่วงความสูงด้านล่างอยู่เป็นจำนวนมากจึงทำให้การกระจายตัวของอนุภาคเบตมีการกระจายตัวสูงขึ้น

4. สรุปผลการทดลอง

- 1) ความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดเซชันมีอิทธิพลต่อการกระจายความดัน อัตราการเวียนกลับของอนุภาคเบตมากกว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณเบต
- 2) อัตราการเวียนกลับของอนุภาคเบตจะแปรผันตรงกับความดันตกคร่อม L-valve
- 3) การเพิ่มขึ้นของปริมาณเบตส่งผลให้ค่าสัดส่วนช่องว่างในช่วงความสูง 0-2.3 m มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด (มีอนุภาคเบตหนาแน่นมากขึ้น)

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Natarajan, E., Nordin, A. and Rao, A.N. (1998). Overview of combustion and gasification of rice husk in fluidized bed reactors, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 14, pp. 533 – 546.
- [2] Armesto, L., Bahillo, A., Veijonen, K., Cabanillas, A. and Otero, J. (2002). Combustion behaviour of rice husk in a bubbling fluidised bed, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 23, pp. 171 – 179.
- [3] Fang, M., Yang, L., Chen, G., Shi, Z., Luo, Z. and Cen. K. (2004). Experimental study on rice husk combustion in a circulating fluidized bed, *Fuel Processing Technology*, Vol. 85, pp.1273 – 1282.
- [4] Madhiyanon, T., Lapirattanakun, A., Sathitruangsak, P. and Soponronnarit, S. (2006). A novel cyclonic fluidized-bed combustor (ψ -FBC): Combustion and thermal efficiency, temperature distributions, combustion intensity, and emission of pollutants, *Combustion and Flame*, Vol.146, pp. 232 – 245.
- [5] Lin, W., Kim, D-J. and Frandsen, F. (2003). Agglomeration in bio-fuel fired fluidized bed combustors, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 96, pp. 171 – 185.
- [6] Ghani, W.A.W.A.K., Alias, A.B., Savory, R.M. and Cliffe, K.R. (2009). Co-combustion of agricultural residues with coal in a fluidized bed combustor, *Waste Management*, Vol. 29, pp. 767 – 773.
- [7] Permchart, W. and Kouprianov, V.I. (2004). Emission performance and combustion efficiency of a conical fluidized-bed combustor firing various biomass fuels, *Bioresource Technology*, Vol. 92, pp. 83 – 91.
- [8] Li, Z.Q., Wu, C.N., Wei, F. and Jin, Y. (2004). Experimental study of high-density gas–solids flow in a new coupled circulating fluidized bed, *Powder Technology*, Vol. 139, pp. 214 – 220.