

การศึกษาการไหลในทางออกแบบของระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน A Study of Flow in Riser Exit of a Circulating Fluidized Bed Riser

นาถนลิน จันลาเศษ^{1*} อนุสรณ์ ชินสุวรรณ^{2*} เอกวุฒิ แสนคำวงษ์^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น จ. ขอนแก่น 40000

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ. ขอนแก่น 40002

*E-mail : nalin_en@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการไหลในทางออกแบบหักฉาก (sharp 90° exit) และทางออกแบบหักฉากที่มีส่วนยื่น (sharp 90° with projected end exit) ของระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (circulating fluidized bed, CFB) ที่มีหน้าตัดขนาด 100 mm x 100 mm สูง 4.8 m และ 4.9 m ทำการศึกษาในช่วงความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด (superficial velocity) ที่ 4 และ 7 m/s อัตราการไหลเวียนของอนุภาคภายนอก (external solid circulation flux rate, G_s) ที่ 10 kg/m² s ทราบขนาด 230 μ m ความหนาแน่น 2774 kg/m³ ใช้เป็นอนุภาคเบด (bed particle) ผลการทดลองและผลการจำลองด้วยวิธีทางพลศาสตร์เชิงคำนวณแสดงให้เห็นว่าอัตราการเข้าปะทะที่เพดานทางออกของอนุภาคและการสะสมของอนุภาคของแข็งจะมีอัตราสูงขึ้น เมื่อความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบดเพิ่มขึ้น รวมถึงรูปแบบทางออกของท่อขึ้นด้วย โดยที่ทางออกแบบหักฉากที่มีส่วนยื่นมีการสะสมของอนุภาคของแข็งมาก ส่วนทางออกแบบหักฉากจะมีอัตราการปะทะมาก

คำสำคัญ: ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน, การพาความร้อนด้วยอนุภาค

Abstract

The purpose of this research was to study the flow in the sharp 90°, and sharp 90° with projected end riser exits of a circulating fluidized bed riser. The riser has cross sectional area of 100mm x 100mm, 4.8 m height. The study was performed at superficial velocity of 4 and 7m/s, external solid circulation rate of 5 and 15kg/m²s. Sand having an average diameter of 230 μ m and solid density of 2774 kg/m³ was used as bed material. The results from the experiments and computational fluid dynamics simulation showed that the rate of collision of particles at the ceiling of the riser exit increased as superficial velocity And the accumulation of particulate solids increased. In addition, it was found that the tentative of the maximum collision point moved toward to the riser exit as the velocity increased. The scene is broken by design, have much impact.

Keywords: circulating fluidized bed, Two-phase heat transfer

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการใช้งานเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนมากขึ้น เนื่องจากเป็นเครื่องกำเนิดไอน้ำที่มีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงเมื่อเทียบกับเครื่องกำเนิดไอน้ำชนิดอื่น เช่น แบบที่ใช้หินถ่านเป็นเชื้อเพลิง (Basu , 2006) ซึ่งเครื่องกำเนิดไอน้ำชนิดนี้สามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้หลายชนิด นอกจากนี้ยังมี การปลดปล่อยปริมาณ SO_x และ NO_x ที่เป็นมลพิษต่อบรรยากาศ ซึ่งประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นฟลูอิดไดซ์เบด (fluidized bed) กับผนังห้องเผาไหม้และแผงท่อน้ำ ดังนั้นการเข้าใจรูปแบบทางไฮดรอดนามิกส์ (hydrodynamics) ที่เกิดขึ้นภายในห้องฟลูอิดไดซ์เบดจะทำให้สามารถกำหนดปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำชนิดนี้ ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนในห้องฟลูอิดไดซ์เบดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด จากการสำรวจวรรณกรรมพบว่ามีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาเฉพาะการถ่ายเท

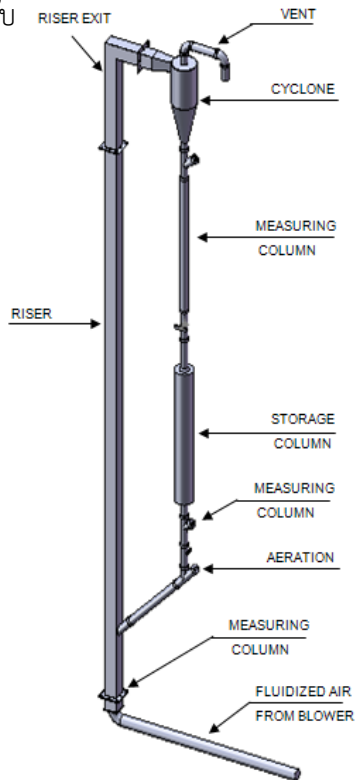
ความร้อนจากชั้นฟลูอิดไคต์เบตส์ฝุ่นหุ้งห้องเผาไหม้ (basu and cheng, 2000; Reddy and Nag, 1998; Lockhart et, al., 1995; Molerus, 1999) และที่บริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ก็เป็นส่วนที่สำคัญที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนภายในห้องฟลูอิดไคต์เบต นอกจากนี้จะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการไหลของอนุภาคของแข็งภายในห้องฟลูอิดไคต์เบต แล้วยังทำให้ทราบถึงแนวโน้มของการกักต้อนที่บริเวณทางออกและการออกแบบห้องฟลูอิดไคต์เบตอีกด้วย อย่างไรก็ตามสามารถบ่งชี้ความรู้ในวรรณกรรมน้อยมาก

2.อุปกรณ์ในการทดลอง

การทดลองทำในระบบฟลูอิดไคต์เบตแบบหมุนเวียนที่ไม่มีการเผาไหม้ หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 100 mm x 100 mm ทางออกเป็นแบบหักฉาก และทางออกแบบหักฉากที่มีส่วนยื่นที่มีความสูง 4900 mm และที่มีความสูง 4800 ดังรูปที่ 1 อากาศจากพัดลม (blower) ถูกส่งตามท่อเข้าห้องฟลูอิดไคต์ (riser) โดยผ่านแผ่นกระจายลม (air distributor) ที่อยู่ด้านล่างของห้อง โดยแผ่นกระจายลมนี้ทำจากแผ่นเหล็กหนา 6 mm เจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 mm โดยระยะห่างของแต่ละรูเป็น 10 mm ทำให้สัดส่วนของพื้นที่รูเปิดคิดเป็น 7.07% ของพื้นที่ ทราบขนาดเฉลี่ย 230 μm ใช้เป็นอนุภาคชั้นฟลูอิดไคต์เบต ที่ปลายทางออกมีไซโคลนติดตั้งอยู่ อากาศจะถูกแยกออกแล้วระบายออกด้านบน อนุภาคของแข็งที่แยกออกแล้วป้อนกลับสู่ห้องฟลูอิดไคต์เบต อัตราการไหลเวียนของอนุภาคของแข็ง (solid circulating rate, G_s) สามารถควบคุมได้ด้วยวาล์วควบคุมอนุภาค (particle control valve) ที่อยู่ด้านล่างของระบบท่อป้อนกลับ (return leg) การติดตั้งตัววัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสร้างขึ้นที่บริเวณทางออกของห้องฟลูอิดไคต์เบต ดังรูปที่ 2 จากการทดลองพบว่าการสูญเสียความร้อนที่ตัววัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยจึงประมาณได้ว่าพลังงานความร้อนทั้งหมดถ่ายเทไปยังชั้นฟลูอิดไคต์เบต เนื่องจากทองแดงมีค่าการนำความร้อนสูงและแผ่นทองแดงที่ใช้มีความหนาน้อยจึงสามารถประมาณได้ว่าอุณหภูมิที่อ่านได้ที่จุดติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเท่ากับอุณหภูมิที่หน้าแผ่นทองแดง ดังนั้นสัมประสิทธิ์การพาความร้อน(h)สามารถคำนวณได้จาก

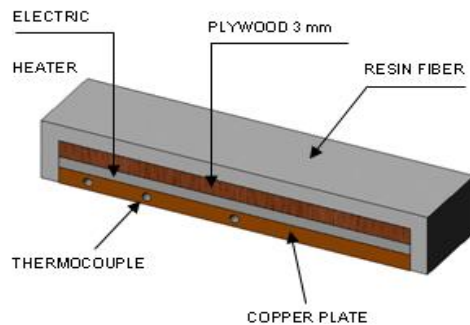
$$h = \frac{IV}{A(T_s - T_b)} \quad (1)$$

เมื่อ w คือ กำลังไฟฟ้าที่ให้แก่แผ่นทำความร้อน I และ V เป็นกระแสไฟที่ไหลผ่านและความต่างศักย์คล่อมแผ่นทำความร้อน ตามลำดับ

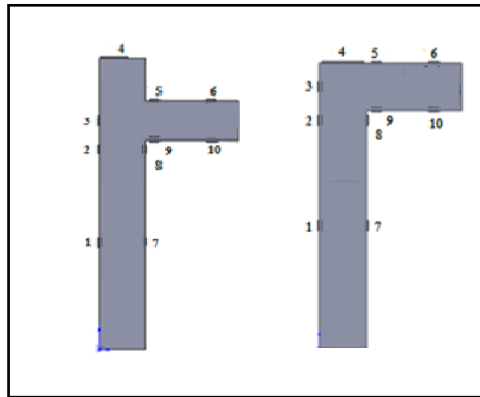


รูปที่ 1 อุปกรณ์ในการทดลอง

ตัววัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนถูกติดตั้งที่ตำแหน่งต่างๆ บริเวณส่วนทางออก 10 ตัว ดังในรูปที่ 3



รูปที่ 2 ตัววัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 3 ตำแหน่งที่ติดตั้งตัววัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของทางออกแบบหักฉากที่มีส่วนยื่นและแบบหักฉาก

3. การจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

งานวิจัยนี้จึงได้นำเอาแนวคิดของ Eulerian (Eulerian Approach) ซึ่งแนวคิดดังกล่าวจะสนใจพฤติกรรมการไหลแบบต่อเนื่อง โดยจะไม่สนใจติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคจึงสามารถนำมาพิจารณาวิเคราะห์วิวัฒนาการของของแข็ง (sand) ที่มีพฤติกรรมการไหลคล้ายกับของไหล และได้นำเอาแบบจำลองทฤษฎีจลน์ของการไหลของของแข็ง (Kinetic Theory of Granular Flow) มาใช้ด้วย ซึ่งจะสมมติให้อนุภาคของแข็งมีพฤติกรรมการไหลคล้ายกับอากาศตามทฤษฎีจลน์ของแก๊ส (Kinetic Theory of Gas) สำหรับงานวิจัยนี้ได้จำลองการไหลแบบปั่นป่วนจึงใช้แบบจำลองการปั่นป่วนเป็นแบบ $k-\epsilon$, swirl-modified RNG และ dispersed multiphase approach และสมการของ Gidaspow ใช้ในการคำนวณอันตรกิริยาระหว่างเฟสของแรงต้านการเคลื่อนที่ (interphase drag coefficient) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเอา FLUENT มาใช้ในการจำลองพฤติกรรมการไหลของของไหลในรูปแบบ 2 มิติ

3.1 การจำลองการไหลของแก๊สและของแข็งภายในห้องฟลูอิดไดซ์เบดโดยโปรแกรม Fluent

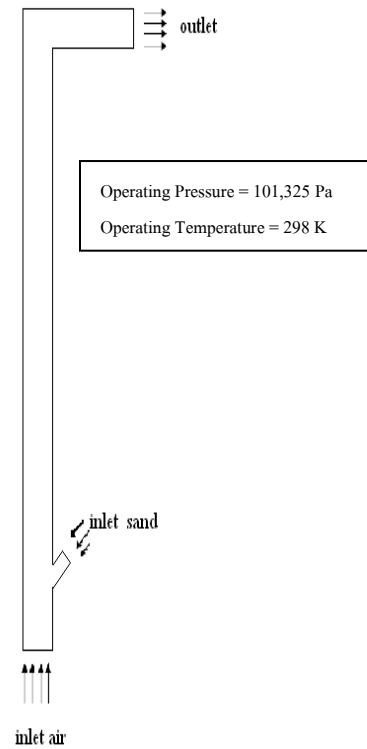
การจำลองพฤติกรรมของของไหลโดยโปรแกรม Fluent จะทำการกำหนดรูปแบบของการคำนวณที่ใช้ โดยเลือกแบบจำลองการไหลที่จะใช้คำนวณในการจำลองพฤติกรรมการไหล กำหนดค่าขอบเขต ค่าเริ่มต้นในการจำลองพฤติกรรมการไหล และจากรูปที่ 4

3.2 การกำหนดคุณสมบัติต่างๆของแบบจำลอง

การกำหนดให้วัฏภาคแก๊สเป็นวัฏภาคหลัก (Primary Phase) และของแข็งเป็นวัฏภาครอง (Secondary Phase) และกำหนดให้ใช้สมการของ Gidaspow ในการคำนวณอันตรกิริยาระหว่าง วัฏภาคของแรงต้านการเคลื่อนที่ (Interphase Drag Coefficient) และค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการจำลองในงานวิจัยดังตารางที่ 1 สำหรับงานวิจัยนี้ได้จำลองการไหลแบบปั่นป่วนจึงใช้แบบจำลอง $k-\epsilon$, swirl-modified RNG และ the dispersed multiphase approach ดังตารางที่ 2 และจากตารางที่ 3 แสดงค่าขอบเขตเริ่มต้นของขอบเขตต่างๆ ของแบบจำลองการไหลของห้องฟลูอิดไดซ์เบด โดยผู้ใช้งานจะต้องทำการกำหนดค่าขอบเขตเริ่มต้นเหล่านี้ก่อนที่จะทำการจำลองภาวะเพื่อที่เป็นการบอกให้โปรแกรม Fluent รู้ว่าค่าต่างๆ เหล่านี้จะถูกกำหนดให้ขอบเขตใดบ้างในการคำนวณ

ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการจำลอง

parameters	values
Particle diameter, d_p (μm)	230
Particle density, ρ_s (kg/m^3)	2774
Riser height, H (m)	4.8
Riser cross-sectional area, A (m^2)	0.1x0.1
Superficial gas velocity, U_g (m/s)	4,5,6,7
External solids flux, G_s ($\text{kg/m}^2\text{s}$)	5,10,15
Packed solid volume fraction, ϵ_{sm} (-)	0.6
Coefficient of restitution, e (-)	0.99
Calculation time (s)	50



ตารางที่ 2 การกำหนดค่าขอบเขตเริ่มต้นในการจำลองภาวะ

Models	PDE formulation
Turbulence model	<i>RNG k-ε, dispersed</i>
Drag model	EMMS, $e_{ss}=0.99$

รูปที่ 4 ขอบเขตของแบบจำลองการไหลของห้องฟลูอิดไดซ์เบด

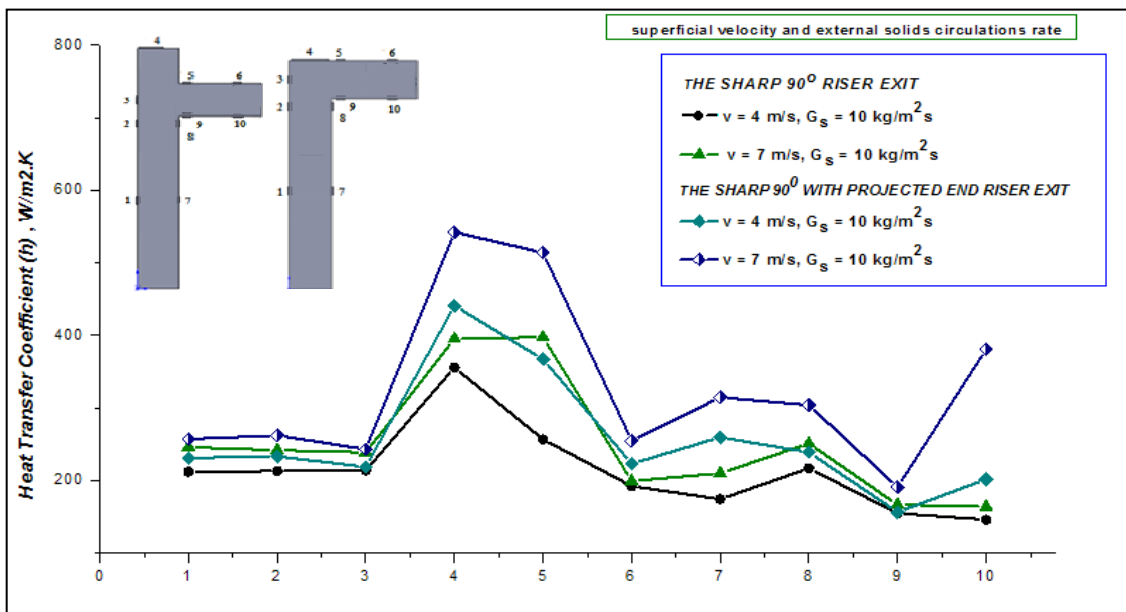
ตารางที่ 3 แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณ

Boundary Type	Inlet air	Inlet sand	Outlet
	velocity-inlet	velocity-inlet	pressure-outlet
Solid Velocity (m/s)	-	0.09	-
Gas Velocity (m/s)	4,7	-	-
Solid Volume Fraction	-	0.63	-
Gauge Pressure (Pa)	-	-	0

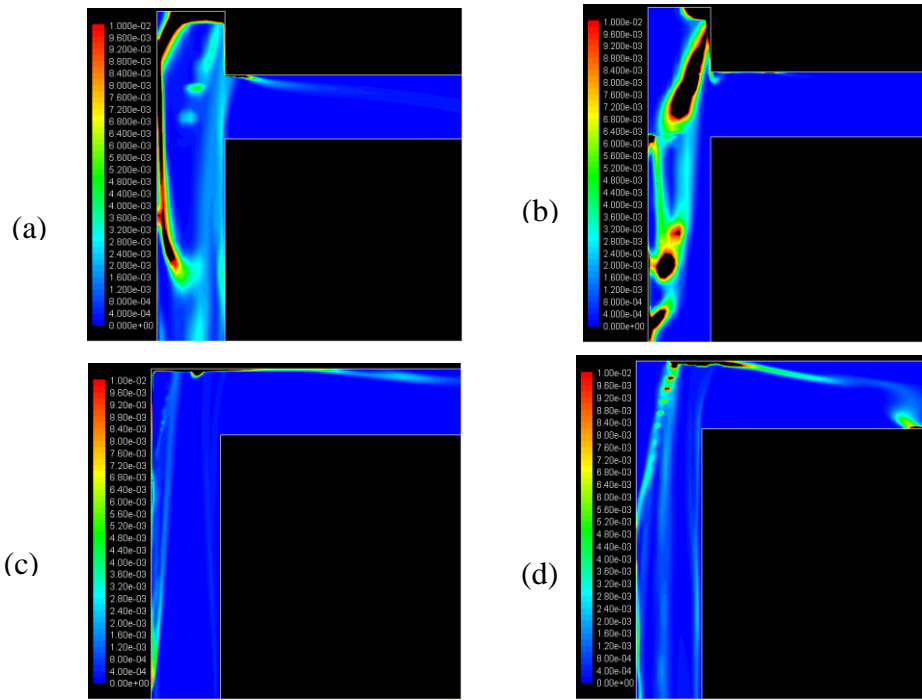
4.ผลและอภิปรายผล

จากผลการทดลองและผลจากการจำลองพฤติกรรมการไหลภายในท่อเย็นที่มีบริเวณทางออก ของท่อเย็นจะเห็นได้ว่าทางออกแบบหักฉากที่มีส่วนยื่นที่อัตราการไหลเวียนของอนุภาคภายนอกที่คงที่ $10 \text{ kg/m}^2\text{s}$ แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของทางออกของท่อเย็นทั้งสองนั้นตรงที่บริเวณของทางออกของท่อเย็นจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบดเพิ่มขึ้น โดยที่ทางออกแบบหักฉากที่มีส่วนยื่นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากกว่าทางออกแบบหักฉาก ซึ่งจะเห็นในชุดที่บริเวณเพดานของทางออกตรงที่จุด 4 ,5 และ 6 เนื่องมาจากการเพิ่มความเร็วน้ำชั้นฟลูอิดไดซ์เบดรวมถึงรูปแบบของทางออกของท่อเย็นนั้นเป็นการเพิ่มพลังให้อ่อนภาค จึงทำให้อ่อนภาคของแข็งตัวใหม่เข้าปะทะกับบริเวณทางออกด้วยอัตราที่เพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าผลการทดลองและผลจากการจำลองพฤติกรรมการไหลเป็นไปในทางเดียว

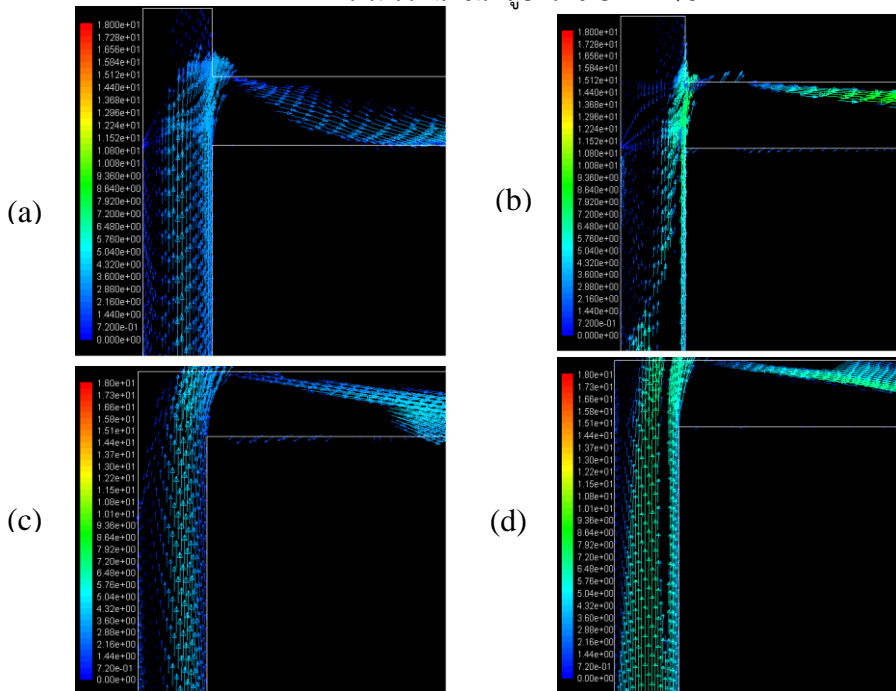
จากดังรูปที่ 6 และ 7 เมื่อพิจารณาตามทิศทางการไหลจากจุดที่ 4 ,5 และ 6 เมื่อพิจารณาตามทิศทางการไหลจากจุด 4 ซึ่งเป็นจุดบนเพดานที่อยู่ตรงกับท่อเย็น จุด 2 ซึ่งเป็นตำแหน่งบนเพดานทางออกที่ตำแหน่งทางออกของท่อเย็นไปยังจุด 3 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่บนเพดานทางออกที่อยู่บริเวณก่อนเข้าไซโคลอน พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลงตามทิศทางการไหลตั้งแต่จุด 4 ถึงจุด 6 อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเร็วจนถึง 7 m/s สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่จุด 5 จะสูงสุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบดสูงขึ้น อนุภาคจะมีแนวโน้มการเคลื่อนตัวเข้าหาปากทางออกของท่อเย็น หลังจากอนุภาคเคลื่อนตัวเข้าปะทะเพดานที่จุด 2 แล้วจะสะท้อนกลับสู่ผนังทางออกด้านล่างแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งส่งผลทำให้ที่จุด 6 มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำสุด ส่วนที่จุด 10 จะให้ได้ว่าทิศทางการไหลของอนุภาคตกลงที่จุด 10 จึงทำให้ มีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่บริเวณทาง



รูปที่ 6 พฤติกรรมการไหลที่อัตราการไหลเวียนอนุภาคของแข็งที่ $10 \text{ kg/m}^2\text{s}$ a) สัดส่วนปริมาตรอนุภาคของแข็งของทางออกแบบหักฉากที่มีส่วนยื่น ที่ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด 4 m/s b) สัดส่วนปริมาตรอนุภาคของแข็ง ของทางออกแบบหักฉากที่มีส่วนยื่น ที่ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด 7 m/s c) สัดส่วนปริมาตรอนุภาคของแข็งของทางออกแบบหักฉาก ที่ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด 4 m/s d) สัดส่วนปริมาตรอนุภาคของแข็ง ของทางออกแบบหักฉาก ที่ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด 7 m/s



รูปที่ 7 พฤติกรรมการไหลที่อัตราการไหลเวียนอนุภาคของแข็งที่ $10 \text{ kg/m}^2\text{s}$ a) เวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคของแข็งทางออกแบบหักฉากที่มีส่วนยื่น ที่ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด 4 m/s b) เวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคของแข็งทางออกแบบหักฉากที่มีส่วนยื่น ที่ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด 7 m/s c) เวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคของแข็งทางออกแบบหักฉาก ที่ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด 4 m/s d) เวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคของแข็งทางออกแบบหักฉาก ที่ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด 7 m/s

5. สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองและผลการจำลองด้วยวิธีทางพลศาสตร์เชิงคำนวณแสดงให้เห็นว่าอัตราการเข้าปะทะที่เพดานทางออกของอนุภาคมีอัตราสูงขึ้นเมื่อความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบดเพิ่มขึ้น และจุดที่เกิดการปะทะสูงสุดมีแนวโน้มเข้าสู่ปากทางออกเมื่อความเร็วดังกล่าวสูงขึ้น และที่บริเวณทางออกแบบหักฉากที่มีส่วนยื่นและแบบหักฉากจะมีอนุภาคของแข็งสะสม และเกิดการปะทะของอนุภาคของแข็งที่ผนังเพดานทางออกในแนวระดับพร้อมกับเกิดการไหลย้อนกลับลงไปสู่ท่ออื่น ซึ่งทางออกแบบหักฉากที่มีส่วนยื่นนั้นทำให้อนุภาคของแข็งสามารถไปสะสมอยู่ตรงบริเวณช่องว่างของผนังเพดานทางออกมากกว่าทางออกแบบหักฉาก เนื่องจากมีส่วนที่ยื่นออกมา ส่วนเกิดการปะทะของอนุภาคของแข็งที่ผนังเพดานทางออกของทางออกแบบหักฉากจะมีการปะทะมากกว่าทางออกแบบหักฉากที่มีส่วนยื่น ซึ่งผลดังกล่าวมีผลค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ให้การสนับสนุนทุน และภาควิชาวิศวกรรมเกษตร และสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือวัดสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Basu, P. and Fraser, S.A., (1991). Circulating Fluidized Bed Boilers-Design and Operation, Butterworths-Heinemann, Stoneham.
- [2] Basu, P. and Cheng, L., (2000). An experimental and theoretical investigation into the heat transfer of a finned water wall tube in a circulating fluidized bed boiler. International Journal of Energy Research, 24, 291-308.
- [3] Basu, P. (2006). Combustion and gasification in fluidized beds. CRC Press, FL.
- [4] Chinsuwan, A., Dutta, A., (2009a). An investigation of the heat transfer behavior of longitudinal finned membrane water wall tubes in circulating fluidized bed boilers, Powder Technology, 193(2), 187-194.
- [5] Chinsuwan, A., Dutta, A. (2009b). An experimental investigation on the effect of longitudinal fin orientation on heat transfer in membrane water wall tubes in a circulating fluidized bed, International Journal of Heat and Mass Transfer, 52(5-6), 1552-1560.
- [6] Lockhart, C., Zhu, J., Brereton, C.M.H., Lim, C.J. and Grace, J.R., (1995). Local heat transfer, solids concentration and erosion around membrane tubes in a cold model circulating fluidized bed. Int. J. Heat Mass Transfer, 38(13), 2403-2410.
- [7] Molerus, O., (1999). Arguments on heat transfer in gas fluidized beds. Chemical Engineering Science, 48, 761-770.
- [8] Özisik, M.N., (1985). Heat Transfer: A Basic Approach. McGraw-Hill, 73-76.
- Reddy, B.V., and Nag, P.K., (1998). Effect of lateral and extended fins on heat transfer in a circulating fluidized bed. Int. J. Heat Mass Transfer, 41(1), 139-146
- [9] Ernst-Ulrich Hartge, Lars Ratschow, Reiner Wischnewski, Joachim Werther (2009). CFD – simulation of a circulating fluidized bed riser, International Journal of Particology 283-296
- [10] 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.