

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

การส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนจากเบดสู่ผนังห้องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนด้วย
วงแหวนหันเหอนุภาครูปสี่เหลี่ยม
Heat transfer enhancement from bed to the wall of a circulating fluidized bed riser
by using wedge shaped deflector rings

เกษสินทร์ จุ่นหัวโตน¹, 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

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษาการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนจากเบดสู่ผนังห้องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (circulating fluidized bed) ด้วยวงแหวนหันเหอนุภาครูปสี่เหลี่ยม ห้องฟลูอิดไดซ์เบดเป็นชนิดที่ไม่มีการเผาไหม้ซึ่งมีขนาด พื้นที่หน้าตัด 100 mm x100 mm สูง 4.8 m วงแหวนวางห่างกัน 1.2 m ทรายขนาด 231 μm ใช้เป็นอนุภาคเบด (bed particle) ทำการทดลองที่ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด (superficial velocity) และอัตราการไหลเวียน (solid circulation rate) ในช่วง 4-7 m/s และ 5-15 $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ ตามลำดับ ผลจากการทดลองพบว่า วงแหวนสามารถส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนสู่ผนังห้องฟลูอิดไดซ์เบดเมื่อเทียบกับห้องฟลูอิดไดซ์เบดที่ไม่มีวงแหวน และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 12.64% จะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นเฉลี่ยของชั้นฟลูอิดไดซ์เบด (cross sectional average suspension density) เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน, การส่งเสริมการถ่ายเทความร้อน, การพาความร้อนด้วยอนุภาค

Abstract

The purpose of this work was to study the heat transfer enhancement from the bed to the wall of a circulating fluidized bed riser by using wedge shaped deflector rings. The cold fluidized bed riser having a cross sectional area of $100\text{mm} \times 100\text{mm}$, height of 4.8m , with distance between the rings was 1.2m . Sand having an average diameter of $231\mu\text{m}$ was used as the bed material. The experiments were performed at superficial velocity and solid circulation rate of $4-7\text{m}/\text{s}$ and $5-15\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ respectively. It was found that heat transfer coefficient of the riser with deflector rings was higher than that without the rings and that the heat transfer coefficient increased 12.64% as the cross sectional average suspension density increased.

Keywords: Circulating fluidized bed, Heat transfer enhancement, Particle convection

1. บทนำ

เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed boiler, CFB boiler) กำลังนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก เนื่องจากมีข้อดีหลาย ๆ ด้าน เช่น สามารถใช้กับเชื้อเพลิงหลากหลายประเภท ทั้งยังปลดปล่อยสารมลพิษ (SO₂, NO_x) สู่บรรยากาศน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบถ่านหินผง (Pulverized coal fired) [1] การถ่ายเทความร้อนสู่ผนังท่อน้ำ (water wall tube) ในห้องเผาไหม้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการถ่ายเทความร้อนจากกลุ่มอนุภาคของแข็ง (cluster) ในขณะที่มันไหลตัวลงมาตามผนังท่อ

ความสามารถของเครื่องกำเนิดไอน้ำ (boiler capacity) ชนิดนี้มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จาก 25MW_e ใน ค.ศ. 1997 เป็น 460MW_e ในอีก 9 ปีต่อมา และกำลังพัฒนาให้เครื่องมีความสามารถเป็น 600–800MW_e ในอนาคต [2] เพื่อให้สอดคล้องกับแนวโน้มดังกล่าว นักวิจัยได้พยายามหาวิธีลดขนาดเครื่องกำเนิดไอน้ำ เช่น การเพิ่มพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการติดครีป (fin) ที่ผิวด้านนอกของท่อน้ำ [3,4,5] นอกวิธีการดังกล่าวแล้ว การลดขนาดของเครื่องกำเนิดไอน้ำยังสามารถทำได้โดยการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสู่ผนังท่ออย่างไรก็พบว่าเป็นวิธีที่พบในวรรณกรรมน้อยมาก ดังนั้นในงานวิจัยในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนสู่ผนังห้องฟลูอิดไดซ์ด้วยการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสู่ผนังห้องโดยการใช้วงแหวนหินอ่อนภาครูปสี่เหลี่ยม

2. ทฤษฎี

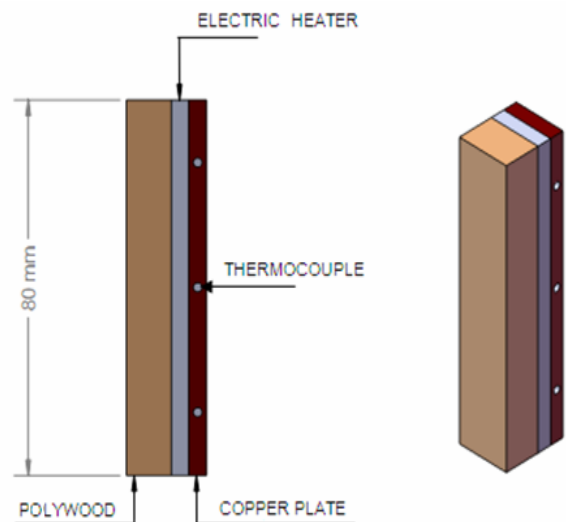
การถ่ายเทความร้อนจากห้องฟลูอิดไดซ์เบดสู่ผนังห้องโดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีของเฟสเจือจาง (dilute phase) และกลุ่มอนุภาคของแข็ง (cluster) สำหรับระบบที่มีอุณหภูมิของชั้นฟลูอิดไดซ์เบด (bed temperature) ต่ำๆแล้ว สามารถละทิ้งอิทธิพลของการ

แผ่รังสีที่เกิดขึ้นได้และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมสู่ผนังห้องสามารถหาได้ดังนี้ [6]

$$h = \frac{Q}{A(T_s - T_b)} \dots\dots\dots(1)$$

เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเฉพาะที่ (local heat transfer coefficient) A คือ พื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อน T_s คือ อุณหภูมิที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน T_b คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นฟลูอิดไดซ์เบด และ Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน

เมื่อพิจารณาที่ตัววัดการถ่ายเทความร้อนแสดงดังรูปที่ 1 ในสภาวะทรงตัว (steady state) เนื่องจากตัววัดที่มีการหุ้มฉนวนที่ด้านนอกอย่างดี ดังนั้นจึงสามารถสมมติให้ความร้อนที่แผ่นทำความร้อนส่งให้แก่ตัววัดเข้าสู่ชั้นฟลูอิดไดซ์เบดเท่านั้น ดังนั้น



รูปที่ 1 ชุดให้ความร้อนและตัววัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

$$h = \frac{W}{A(T_s - T_b)} = \frac{IV}{A(T_s - T_b)} \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อ W คือ กำลังไฟฟ้าที่ให้แก่แผ่นทำความร้อน I และ V เป็นกระแสไฟที่ไหลผ่านและความต่างศักย์คล่อมแผ่นทำความร้อน ตามลำดับ

การถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเฉลี่ย (average suspension density, ρ) ตลอดหน้าตัดของท่อไรเซอร์และความสูง [7] โดย

$$\rho = \frac{\Delta P}{gH} \dots\dots\dots (3)$$

เมื่อ ΔP คือ ความแตกต่างความดันระหว่างจุดวัด g คือแรงโน้มถ่วงของโลก และ H คือความสูงหรือระยะห่างระหว่างจุดวัดความดัน

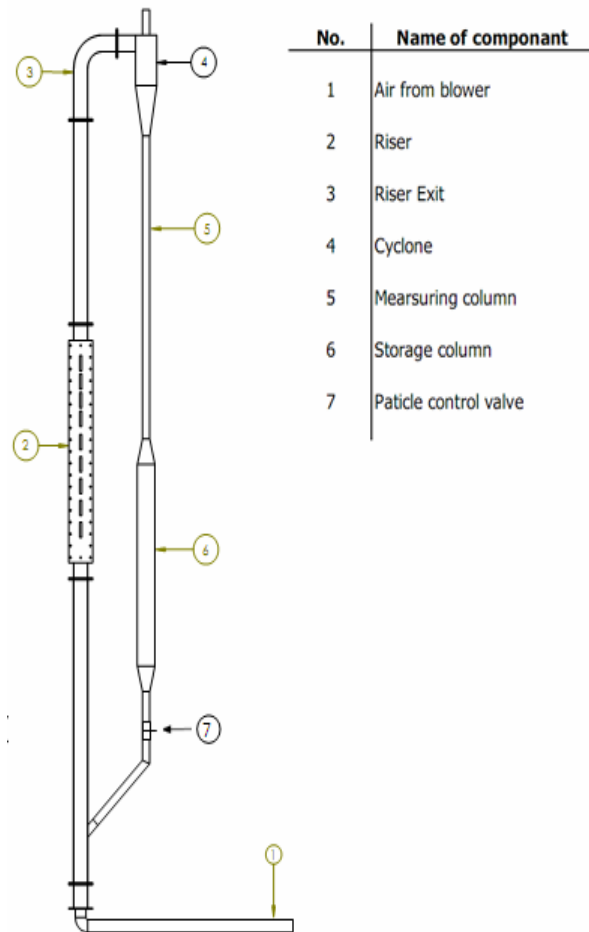
3. การทดลอง

ระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่มีการเผาไหม้ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 100 mm x 100 mm ความสูง 4800 mm โดยที่ช่วงทดลอง (test section) สูง 1200 mm ดังรูปที่ 2

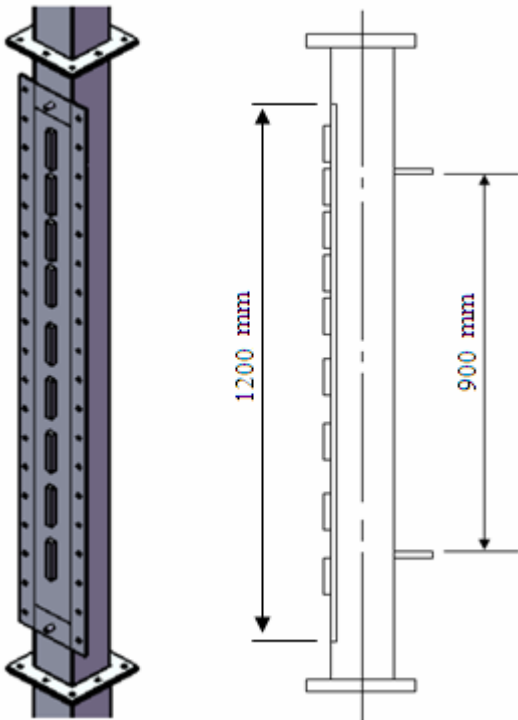
การทดลองทำที่ความเร็ว 6 m/s อากาศจากพัดลม (blower) ถูกส่งตามท่อเข้าห้องเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์ (riser) โดยผ่านแผ่นกระจายลม (air distributor) ที่อยู่ด้านล่างของห้องฟลูอิดไดซ์โดยแผ่นกระจายลม ทำจากเหล็กหนา 6mm เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm โดยระยะห่างของแต่ละรู 10 mm ทำให้สัดส่วนของพื้นที่รูเปิดคิดเป็น 7.07 % ของพื้นที่ ทราบขนาดเฉลี่ย 231 μm ใช้เป็นอนุภาคชั้นฟลูอิดไดซ์เบด อนุภาคของแข็งออกจากด้านบนของห้องฟลูอิดไดซ์จะถูกแยกออกด้วยไซโคลนแล้วถูกป้อนกลับสู่ห้องฟลูอิดไดซ์เบดโดยผ่านระบบท่อน้ำกลับ (return pipe) ที่ต่ออยู่ที่ปลายทางออกของไซโคลน ความหนาแน่นเฉลี่ย (suspension density, ρ) สามารถควบคุมได้ด้วย วาล์วควบคุมอนุภาค (particle control valve) ที่อยู่ด้านล่างของท่อป้อนกลับ

ตัววัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ทำจากแผ่นทำความร้อนกำลัง และ 150 W ซึ่งมีขนาด 15 mm x 80 mm ที่ด้านหน้าประกบเข้ากับแผ่น

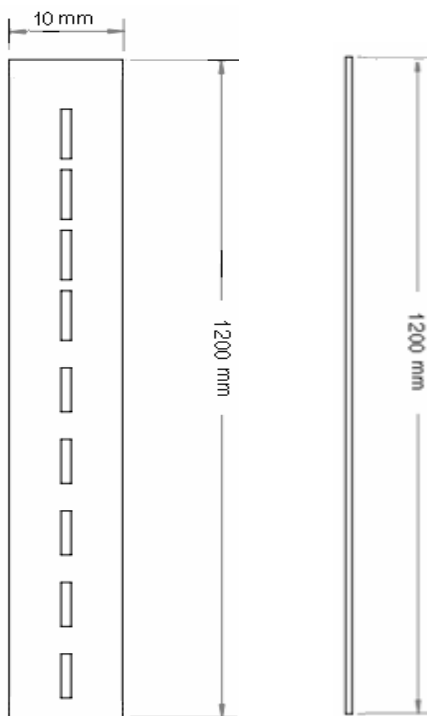
ทองแดงหนา 4 mm เทอร์โมคัปเปิลชนิดที่ (T-Type) ถูกติดตั้งไว้กึ่งกลางความหนาของแผ่นทองแดง ด้านหลังประกบกับไม้อัด หนา 12 mm ดังรูปที่ 1 เนื่องจากความหนาของทองแดงที่ใช้มีค่าน้อยมากและตัวมันเองมีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง (thermal conductivity) ดังนั้นจึงประมาณได้ว่าอุณหภูมิที่อ่านได้ที่กึ่งกลางความหนาของแผ่นทองแดงเท่ากับอุณหภูมิของผิวหน้าของแผ่นทำความร้อน



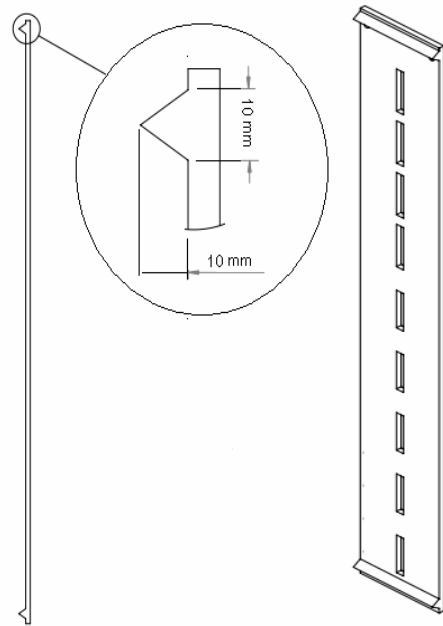
รูปที่ 2 ระบบฟลูอิดไดซ์เบด



รูปที่ 3 ช่วงทดสอบ



(a)



(b)

รูปที่ 4 ส่วนทดสอบ a) ส่วนทดสอบที่ไม่มีวงแหวน
 หันเหอนุภาค b) ส่วนทดสอบที่มีวงแหวนหันเห
 อนุภาค

ส่วนทดสอบ (test section) ถูกติดตั้งที่ตำแหน่งสูงจาก
 แผ่นกระจายลมเป็นระยะ 1800mm ซึ่งส่วนทดสอบ
 ประกอบด้วย แผ่นเหล็กขนาด 100 mm x 1200 mm
 หนา 1.2 mm ที่มีตัววัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความ
 ร้อนมีทั้งหมด 9 ตัวติดตั้งอยู่บริเวณกึ่งกลางความ
 กว้างของห้องฟลูอิดไดซ์เบด การทดสอบกระทำกับ
 ส่วนทดสอบสองแบบคือ แบบที่ไม่มีวงแหวนหันเห
 อนุภาค และแบบที่มีวงแหวนหันเหอนุภาค วงแหวน
 รูปสี่เหลี่ยม (wedge shaped) มี ขนาด 10mm x 100 mm
 สูง 10mm ดังรูปที่ 4

เงื่อนไขการทดลองแสดงตารางที่ 1

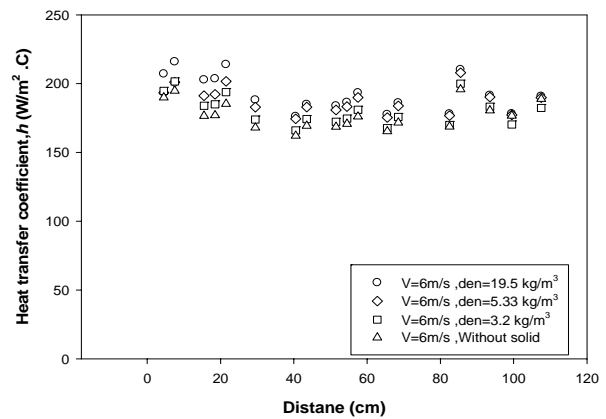
ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดลอง

Mean particle size, d_p	231 μm
Particle density, ρ_s	2774 kg m^{-3}
Superficial velocity, U	6 m s^{-1}
Suspension density, ρ	3-20 kg m^{-3}
Bed temperature, T_b	30-60 $^{\circ}\text{C}$

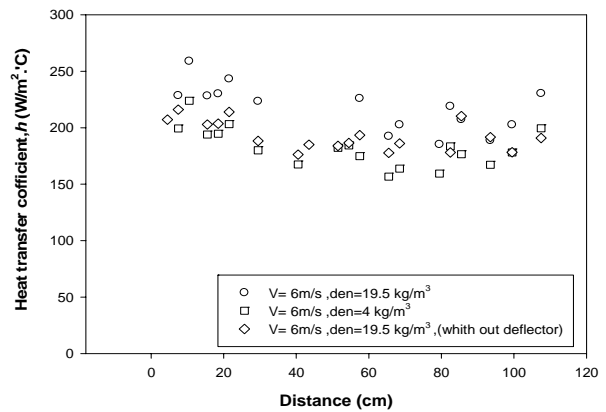
การทดลองครั้งนี้ทำที่ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไต่ซึ่เบด (superficial velocity, V_s) คงที่ ที่ 6 m/s เพื่อศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นเฉลี่ยตลอดหน้าตัดของชั้นฟลูอิดไต่ซึ่เบด (cross section average suspension density) และอิทธิพลของวงแหวนหันเหอนุภาค (deflector) ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน ความร้อนสู่ผนังห้องฟลูอิดไต่ซึ่เบด

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

จากรูปที่ 5 พบว่าเมื่อความเร็วคงที่แล้วความหนาแน่นของอนุภาคต่างกัน จะส่งผลให้ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าต่างกันโดย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนี้จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเฉลี่ยยิ่งความหนาแน่นมากก็จะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chinsuwan and Dutta (2009a) และ Luan et. al. (2000) [3,8] การถ่ายเทความร้อนที่ผนังห้องฟลูอิดไต่ซึ่เบดนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากการการถ่ายเทความร้อนระหว่างกลุ่มอนุภาค (cluster) ไถลตัวไปตามผนังห้องซึ่งการไถลตัวนี้มีระยะประมาณ 1-1.2 m [6] ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจึงลดลงตามระยะเนื่องจากกลุ่มอนุภาคมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดผลต่างอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิของผนังห้องและกลุ่มอนุภาคที่เข้ามาแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าลดลง [9] จากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของตัวที่ติด และไม่ได้ติดวงแหวนหันเหอนุภาคพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของตัวที่ติดวงแหวนหันเหอนุภาค จะเพิ่มขึ้น 12.64 % แสดงดังรูปที่ 6 ทั้งนี้สาเหตุน่าจะเนื่องมาจากวงแหวนทำให้กลุ่มอนุภาคที่เข้ามาแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผนังห้องไถลตัวตามผนังห้องสั้นลงแล้วมีกลุ่มอนุภาคใหม่ (renewal cluster) ที่เข้ามาแทนที่ ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงขึ้น เป็นที่น่าสังเกตว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลงตามระยะทาง แล้วกลับเพิ่มขึ้นอีกที่บริเวณใกล้ๆ วงแหวนตัวล่างซึ่งแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลทางไฮโดรไดนามิกส์ของวงแหวน



รูปที่ 5. อิทธิพลของความหนาแน่นเฉลี่ยตลอดหน้าตัดต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไต่ซึ่เบด (superficial velocity) ที่ 6m/s



รูปที่ 6. อิทธิพลของวงแหวนหันเหอนุภาคต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไต่ซึ่เบด (superficial velocity) ที่ 6 m/s

5. สรุปผลการทดลอง

จากวิจัยในครั้งนี้เพื่อจะศึกษาถึงอิทธิพลของการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนสู่ผนังห้องฟลูอิดไต่ซึ่เบดด้วยวงแหวนหันเหอนุภาค จากการที่นำวงแหวนหันเหอนุภาคมาติดตั้งที่ระยะห่างกัน 1.2 m ของระบบฟลูอิดไต่ซึ่เบดแบบไม่มีการเผาไหม้ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้น 12.64 % เนื่องจากวงแหวนทำให้กลุ่มอนุภาคที่เข้ามาแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผนังห้องไถลตัวสั้นลงและกลุ่มอนุภาคใหม่ เข้ามาแทนที่จึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สูงขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยขอนแก่น ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยเครื่องจักรกลเกษตรและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือวัดและเครื่องมือที่ใช้สร้างเครื่องทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Basu, P. (2006). *Combustion and gasification in fluidized beds*. CRC Press, FL
- [2] Jäntti, T.; Eriksson, T.; Hotta, A.; Hyppänen, T.; Nuortimo, K. Circulating Fluidized-bed Technology toward zero CO₂ Emissions. POWER-GEN Europe 2006, Cologne, Germany.
- [3] Chinsuwan, A., Dutta, A. (2009a). 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.
- [4] Chinsuwan, A., Dutta, A., (2009b). An investigation of the heat transfer behavior of longitudinal finned membrane water wall tubes in circulating fluidized bed boilers, *Powder Technology*, In press.
- [5] 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.
- [6] Basu, P. and Fraser, S.A., (1991). *Circulating Fluidized Bed Boilers-Design and Operation* Butterworths-Heinemann, Stoneham.
- [7] Kunii, D., and Levenspiel, O., (1991). *Fluidization Engineering*. Butterworths-Heinemann, Stoneham.
- [8] Luan, W., Bowen, B.D., Lim, C.J., Brereton, C.M.H., and Grace, J.R., (2000). Suspension-to-membrane-wall heat transfer in a circulating fluidized bed combustor. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 1173-1185.
- [9] Glicksman, L.R., (1997). Heat transfer in circulating fluidized beds. in: Grace, J.R., Avidan, A.A. and Knowlton T.M., Eds., *Circulating Fluidized Beds*, Chapman & Hall, London.