

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

**การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่บริเวณทางออกห้องฟลูอิดไดซ์
เบดแบบหักฉาก**
**Heat Transfer Coefficient Distributions in an L-shape Riser Exit of a Circulating
Fluidized Bed**

พฤษวิมล พิมล¹ และ อนุสรณ์ ชินสุวรรณ¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ. ขอนแก่น 40002

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

E-mail: anuchi@kku.ac.th

บทคัดย่อ

การทดลองเพื่อศึกษาการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่เกิดขึ้นบริเวณผนังของทางออกแบบหักฉากที่ไม่มีการเผาไหม้พื้นที่หน้าตัด 100 mm x 100 mm สูง 5.1 m โดยทรายที่มีความหนาแน่นเฉลี่ย 2774 kg/m³ และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 230 μm ใช้เป็นอนุภาคเบด ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด (superficial velocity) และอัตราการไหลเวียนของอนุภาคของแข็ง (solid circulation rate) ที่ใช้เป็น 4-7 m/s และ 0-15 kg/m².s ตามลำดับ ตัววัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งไว้ที่ผิวผนังด้านในของทางออก จะแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในบริเวณทางออก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่มีค่าสูงขึ้นเมื่อความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบดและอัตราการไหลเวียนของอนุภาคของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ ณ ระดับความสูงผนังห้องฟลูอิดไดซ์เบดเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ที่ผนังด้านตรงข้ามทางเข้าไซโคลนจะมีค่าสูงกว่าผนังด้านทางเข้าไซโคลนเล็กน้อย และมีค่าสูงที่สุดที่ผนังด้านตั้งฉากกับทางเข้าไซโคลน ส่วนค่าสูงสุดของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นที่ตำแหน่งบริเวณเพดานบนของทางออกห้องฟลูอิดไดซ์เบด และตำแหน่งดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะเยื้องเข้าหาทางเข้าไซโคลนเมื่อความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบดและอัตราการไหลเวียนของอนุภาคของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น

คำหลัก: ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน, ทางออกห้องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหักฉาก, การพาความร้อนด้วยอนุภาค

Abstract

Experiments were carried out in a cold model circulating fluidized bed with an L- shape riser exit having a riser cross-sectional area of 100 mm x 100 mm, height of 5.1 m and superficial velocity and solids circulation rate of 4 – 7 m/s and 5 – 15 kg/m².s, respectively. Sand having an average diameter and a density of 230 μm and 2774 kg/m³ was used as the bed material. The results showed that the local heat transfer increased as the bed superficial velocity or the solids circulation rate increased. At the same height as the riser, the local heat transfer at the wall which is opposite to the exit is higher than at the opposite side wall and the highest heat transfer occurred at the wall which is perpendicular to the exit.

The top ceiling wall has the maximum heat transfer coefficient and the point of maximum heat transfer coefficient trends to move toward the cyclone when the superficial velocity and the solids circulating rate are increased.

Keywords: Circulating Fluidized Bed, L-shape riser exit, Two-phase heat transfer.

1. บทนำ

เครื่องกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน (circulating fluidized bed boiler) กำลังเป็นที่นิยมเป็นอย่างมากในโลกปัจจุบัน เนื่องด้วยข้อดีหลายๆ ด้าน เช่น สามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้หลากหลายประเภทและยังลดการปลดปล่อยสารมลพิษสู่บรรยากาศได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดไอน้ำรุ่นก่อน เช่น เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบใช้ถ่านหินผง (pulverized coal fire)[1]

ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวนจะขึ้นอยู่กับอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นอนุภาคเบด (bed particle) และแผงท่อน้ำ (water wall tube) ที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษารายละเอียดการถ่ายเทความร้อนจากชั้นฟลูอิดไดซ์เบดสู่ผนังห้องเผาไหม้ [2-4] ซึ่งการถ่ายเทความร้อนที่บริเวณทางออกห้องฟลูอิดไดซ์เบดเป็นข้อมูลหนึ่งที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบห้องเผาไหม้ อย่างไรก็ตามยังไม่พบข้อมูลเหล่านี้ในวรรณกรรมที่ผ่านมา ดังนั้นการวิจัยในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษารายละเอียดการถ่ายเทความร้อนในบริเวณดังกล่าว

2. ทฤษฎี

การถ่ายเทความร้อนจากห้องฟลูอิดไดซ์เบดสู่ผนังห้องเกิดจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีของเฟสเจือจาง (dilute phase) และกลุ่มอนุภาคของแข็ง (cluster) สำหรับระบบที่มีอุณหภูมิของชั้นฟลูอิดไดซ์เบด (bed temperature) ต่ำๆแล้ว สามารถละทิ้งอิทธิพลของการแผ่รังสีที่เกิดขึ้นได้และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมสู่ผนังห้องสามารถหาได้ดังนี้ [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 อุณหภูมิของชั้นฟลูอิดไดซ์เบด และ Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน

เมื่อพิจารณาที่ตัววัด การถ่ายเทความร้อนในสภาวะทรงตัว (steady state) เนื่องจากตัววัดที่มีการหมุนวนที่ด้านนอกอย่างดี ดังนั้นจึงสามารถสมมติให้ความร้อนที่แผ่นทำความร้อนส่งให้แก่ตัววัดเข้าสู่ชั้นฟลูอิดไดซ์เบดเท่านั้น ดังนั้น

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

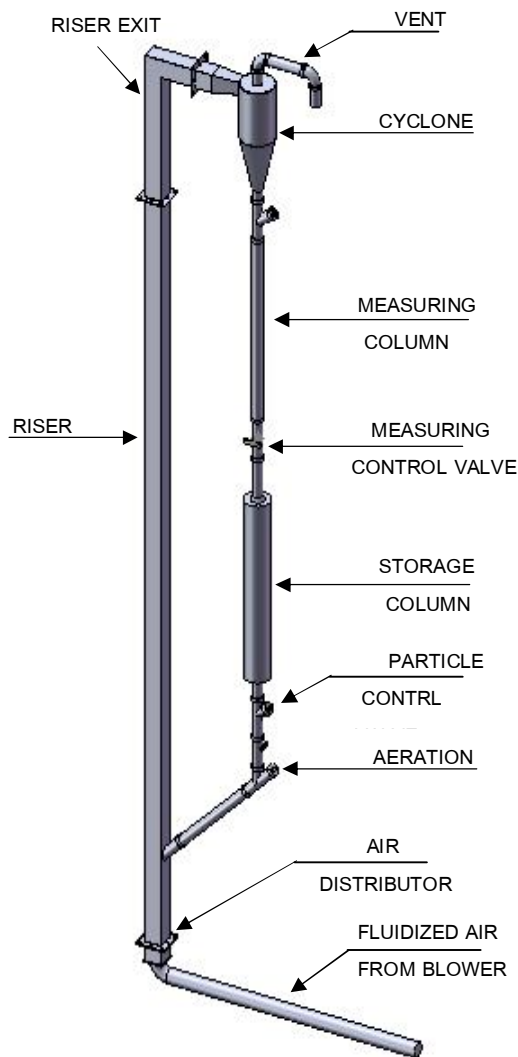
เมื่อ W คือ กำลังไฟฟ้าที่ให้แก่แผ่นตัววัด I และ V เป็นกระแสไฟที่ไหลผ่านและความต่างศักย์คัลลอมตัววัด ตามลำดับ

3. การทดลอง

ระบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้ประกอบด้วยห้องฟลูอิดไดซ์เบดที่ไม่มีการเผาไหม้ที่มีทางออกเป็นแบบหักฉาก พื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 100 mm x 100 mm สูง 5100 mm โดยมีส่วนทางออก (riser exit) สูง 600 mm ดังรูปที่ 1

อากาศจากพัดลม (blower) ถูกส่งตามท่อเข้าห้องฟลูอิดไดซ์เบด (riser) โดยผ่านแผ่นกระจายลม (air distributor) ที่อยู่ด้านล่างของห้อง โดยแผ่นนี้ทำจากแผ่นเหล็กหนา 6 mm เจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 mm ระยะห่างของแต่ละรูเป็น 10 mm ทำให้สัดส่วนของพื้นที่รูเปิดคิดเป็น 7.07% ของพื้นที่ที่รายนขนาดเฉลี่ย 230 μ m ถูกใช้เป็นอนุภาคเบด ที่ปลายทางออกมีไซโคลนติดตั้งอยู่ อากาศจะถูกแยกออกแล้วระบาย

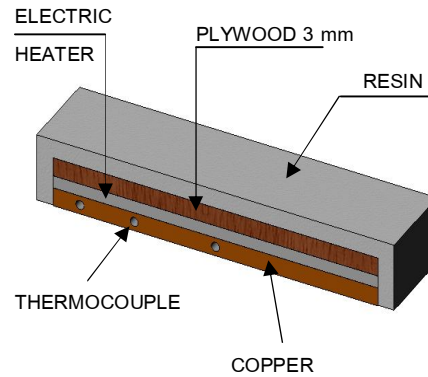
ออกด้านบน อนุภาคของแข็งที่แยกออกถูกป้อนกลับสู่ห้องฟลูอิดไดซ์เบด อัตราการไหลเวียนของอนุภาคของแข็ง (solid circulating rate, G_s) สามารถควบคุมได้ด้วยวาล์วควบคุมอนุภาค (particle control valve) ที่อยู่ด้านล่างของระบบท่อป้อนกลับ (return leg) การทดลองทำให้ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบดสูงสุดที่ 7 m/s



รูปที่ 1 ระบบฟลูอิดไดซ์เบด

ตัววัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสร้างขึ้นจากแผ่นทำความร้อนกำลัง 150 W และ 100 W ซึ่งมีขนาด 15 mm x 80 mm และ 15 mm x 60 mm ตามลำดับ ที่หน้าประกบเข้ากับแผ่นทองแดงหนา

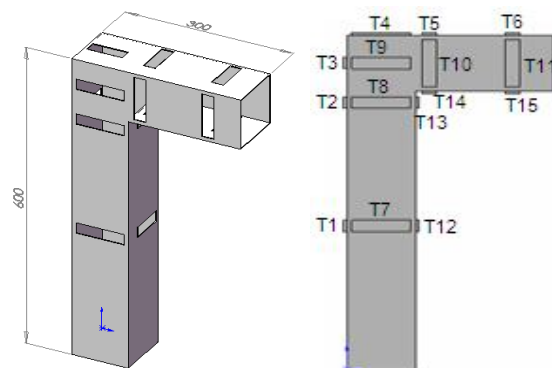
3 mm เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ถูกติดตั้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางความกว้างของแผ่นทองแดง ด้านหลังประกบกับแผ่นไม้อัดหนา 3 mm ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัววัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

เนื่องจากทองแดงที่ใช้มีความหนาแน่นน้อยมาก และทองแดงเป็นโลหะที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) สูง ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าอุณหภูมิที่อ่านได้เป็นอุณหภูมิที่ผิวหน้าแผ่นทำความร้อน

ตัววัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนถูกติดตั้งที่ตำแหน่งต่างๆ บริเวณส่วนทางออก 15 ตัว ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยผิวของแผ่นทองแดงอยู่ราบเรียบเสมอกับผนังของห้องฟลูอิดไดซ์เพื่อหลีกเลี่ยงการบวม การไหล ที่ผิวด้านนอกของตัววัดซึ่งประกบด้วยแผ่นไม้อัดยึดเกาะกับผิวของส่วนทางออกด้วยเรซินไฟเบอร์

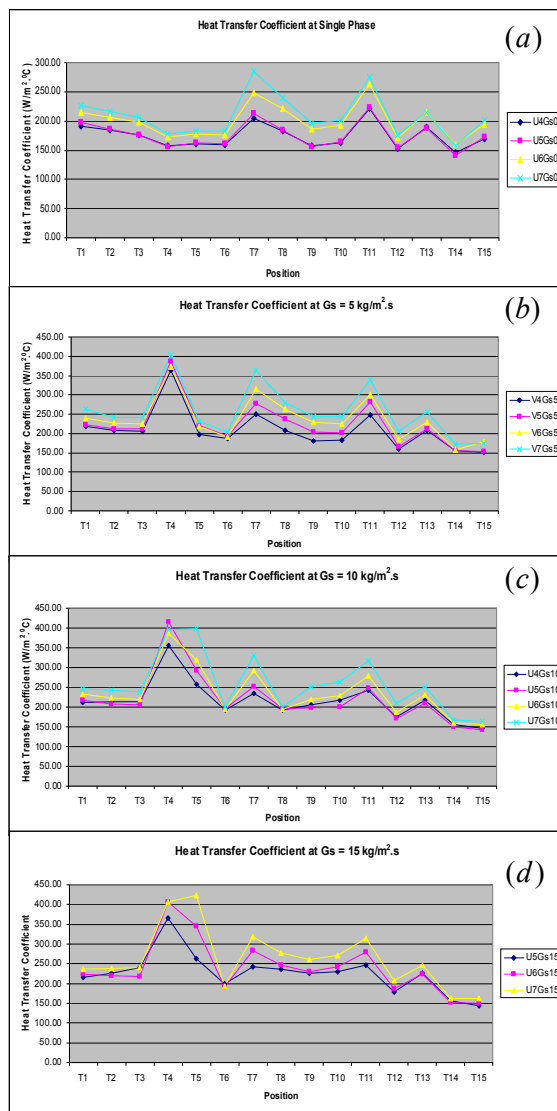


รูปที่ 3 ส่วนทางออก

ที่ตำแหน่งห่างจากตัววัดตัวสุดท้าย 50 mm มีเทอร์โมคัปเปิลคู่หนึ่งติดตั้งไว้เพื่อใช้วัดอุณหภูมิของชั้นฟลูอิดไดซ์เบด

4. ผลการทดลอง

การทดลองทำที่ความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบดที่ 4, 5, 6 และ 7 m/s อัตราการไหลเวียนของอนุภาคของแข็ง (solid circulation rate, G_s) ที่ 0, 5, 10 และ $15 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4a-4d



รูปที่ 4 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ (a) การไหลแบบเฟสเดียว, (b) $G_s = 5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, (c) $G_s = 10 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, และ (d) $G_s = 15 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สำหรับการไหลแบบเฟสเดียว (single phase, $G_s = 0 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$) แล้วสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ในบริเวณทางออกของห้องฟลูอิดไดซ์เบดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบด ดังแสดงในรูปที่ 4a ผลการทดลองสอดคล้องกับการพาความร้อนแบบบังคับภายในท่อซึ่งสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) เพิ่มขึ้น [7] ในกรณีการพาความร้อนด้วยอนุภาค (two-phase) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเวียนของอนุภาคของแข็งเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4a-4d

เมื่อเปรียบเทียบแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ตามความสูงห้องฟลูอิดไดซ์พบว่าที่ผนังด้านตรงข้ามทางเข้าไซโคลนและด้านตั้งฉากกับทางเข้าไซโคลนมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ลดลงตามความสูงของห้องฟลูอิดไดซ์ ดังแสดงในช่วง T1-T2-T3 และ T7-T8-T9 แต่ผนังด้านทางเข้าไซโคลนจะมีพฤติกรรมในทางตรงข้าม ดังแสดงในรูปที่ 4b-4d ช่วง T12-T13 ทั้งนี้เนื่องจากความหนาแน่นเฉลี่ยของชั้นฟลูอิดไดซ์เบด (average suspension density) ลดลงตามความสูงของห้องฟลูอิดไดซ์เบด [8] ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง [9]

เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ที่ ณ ความสูงห้องฟลูอิดไดซ์เบดเดียวกันค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผนังด้านตรงข้ามทางเข้าไซโคลนจะมีค่าสูงกว่าด้านทางเข้าไซโคลนและที่ผนังด้านตั้งฉากกับทางเข้าไซโคลนจะมีค่าสูงสุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการสัมผัสของกลุ่มอนุภาคใหม่ (renewal cluster) ที่บริเวณนี้มากกว่า [10]

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่มีค่าสูงสุดที่ผนังเพดานบนของทางออก และมีแนวโน้มเยื้องเข้าสู่ทางเข้าไซโคลนเมื่อความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์และอัตราการไหลเวียนของอนุภาคของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4c และ 4d ในช่วง T4-T5

5.สรุป

การศึกษาโดยการทดลองในครั้งนี้เพื่อศึกษาการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยอนุภาคที่บริเวณทางออกแบบหักฉากของระบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ไม่มีการเผาไหม้ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบดและอัตราการไหลเวียนของอนุภาคของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น ตำแหน่งที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณเพดานบนของทางออกและมีแนวโน้มเยื้องเข้าสู่ทางเข้าไซโคลนยิ่งขึ้นเมื่อความเร็วหน้าชั้นฟลูอิดไดซ์เบดและอัตราการไหลเวียนของแข็งเพิ่มขึ้น

ที่ความสูงของห้องฟลูอิดไดซ์เบดเดียวกัน การแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผนังด้านตรงข้ามทางเข้าไซโคลนจะมีค่าสูงกว่าด้านทางเข้าไซโคลน โดยที่ผนังด้านตั้งฉากกับทางเข้าไซโคลนจะมีค่ามากที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาในครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากโครงการสนับสนุนการวิจัย แผนเพิ่มประสิทธิภาพสำนักงานนโยบายและวางแผนพลังงาน ปี 2552 และทุนอุดหนุนและสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ ปีการศึกษา 2552 มหาวิทยาลัยขอนแก่น ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณศูนย์วิจัยเครื่องจักรกลเกษตรและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือวัดและเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างเครื่องทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Basu, P. (2006). *Combustion and gasification in fluidized beds*. CRC Press, FL.
- [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] 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.

- [4] 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.

- [5] Molerus, O., (1999). Arguments on heat transfer in gas fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, 48, 761-770.

- [6] Basu, P. and Fraser, S.A., (1991). *Circulating Fluidized Bed Boilers-Design and Operation*, Butterworths-Heinemann, Stoneham.

- [7] Özisik, M.N., (1985). *Heat Transfer: A Basic Approach*. McGraw-Hill, 73-76.

- [8] Chinsuwan, A., Dutta, A. An empirical model for predicting the cross sectional averaged suspension density in commercial circulating fluidized bed boilers, *Journal of the Energy Institute* (2008), 81(2), 69-75.

- [9] 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.

- [10] 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.