

อิทธิพลของการติดตั้งลิ่มสามเหลี่ยมในกลุ่มท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลต่อเถ้าสะสม

Effect of Triangular Cross-sectional Wedges Inserted into an In-line Tube Bundle on the Tube Deposition

ปัสญา ยี่สุนแซม* และ อนุสรณ์ ชินสุวรรณ

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Pasada Yisunzam* and Anusorn Chinsuwan

Department of Mechanical Engineering, Khon Kaen University

*Corresponding Author E-mail: cake_zza@hotmail.com

Received: September 9, 2020 Revised: November 28, 2020 Accepted: December 2, 2020

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบผลของการไหลตามขวางเนื่องจากลิ่มหน้าตัดรูปสามเหลี่ยมที่สอดเข้าไปในกลุ่มท่อ การทดลองดำเนินการในกลุ่มท่อ 6 แถว 3 คอลัมน์ โดยความสูงของลิ่มมีขนาดเท่ากัน ต่างกันที่มุมยอดของลิ่มสี่ขนาด คือ 3.58, 7.125, 14.036 และ 26.36 องศา ทำการทดลองที่ความเร็วอากาศคงที่และความเข้มข้นของเถ้าเท่ากับ 2.1 m/s และ 0.00365 kg/s ตามลำดับ โดยตำแหน่งการวางลิ่มจากระยะปากทางกลุ่มท่อเท่ากับ 7.1%, 29%, 57% และ 86% ของระยะความยาวกลุ่มท่อทั้งหมด พบว่าลิ่มไม่เพียงทำให้ ความเร็วในการไหลเพิ่มเท่านั้น แต่ยังทำให้ทิศทางการไหลเปลี่ยนไปด้วย เป็นผลให้การสะสมเถ้าที่ท่อลดลง ผลกระทบนี้จะเพิ่มขึ้นตามมุมยอดของลิ่ม นอกจากนี้การสะสมเถ้าจะต่ำที่สุดเมื่อลิ่มติดตั้งอยู่ที่ระยะ 29% ของระยะความยาวกลุ่มท่อทั้งหมด

คำสำคัญ : เถ้าลอยสะสม กลุ่มท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ลิ่ม เถ้าสะสม

Abstract

The purpose of this study is to investigate the effect of the transverse flow due to the triangular cross-sectional wedges inserted into an in-line bundle. The experiment was carried out on an in-line 6 rows – 3 columns tube bundle. The wedges have the same height with four difference apex angles: 3.58, 7.125, 14.036 and 26.36 degree. The experiment was performed at a constant air velocity and ash concentration of 2.1 m/s, and 0.00365 kg/s, respectively. Four wedge positions from the tube bundle inlet, 7.1%, 29%, 57% and 86% of the tube bundle length, were investigated. It was found that the wedge causes not only the increase in the flow velocity but also the change in flow direction. As a result, the tube deposition was decreased. This effect increases with the apex angle. In addition, the deposition was lowest when the wedges were at the distance of 29% the tube bundle length.

Keywords : fouling, tube bundle, wedge, deposition

1. บทนำ

เครื่องกำเนิดไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงถ่านหินหรือชีวมวลจะมีบริเวณสำหรับติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Convective part) เพื่อนำความร้อนจากแก๊สไอเสีย (Flue gas) กลับมาใช้ใหม่ (Recovery boiler) เป็นการใช้พลังงานให้คุ้มค่าที่สุด ก่อนที่จะปล่อยแก๊สไอเสียออกสู่บรรยากาศ เรียกว่า ส่วนของการนำความร้อนกลับมามีใหม่ [1] แต่ในแก๊สไอเสีย จะมีอนุภาคเถ้าลอยที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อแก๊สไอเสียกระทบกับผิวท่อที่มีอุณหภูมิต่ำ ทั้งแก๊สและอนุภาคเถ้าลอยเกิดการหลอมเหลวที่ผิวท่อ เกิดชั้นกาวเหนียว (Stick layer) รอบผิวท่อ อนุภาคเถ้าที่เคลื่อนผ่านชั้นกาวเหนียวรอบผิวท่อดังกล่าว จะสะสมจนเป็นชั้นเถ้าสะสม และหนาขึ้นตามเวลา ยิ่งชั้นเถ้าสะสมมีความหนามากขึ้นการนำความร้อนยิ่งลดลง จนเปรียบเสมือนการมีฉนวนที่ผิวท่อ ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อจึงมีประสิทธิภาพต่ำ จึงต้องมีการกำจัดเถ้าสะสมดังกล่าวทั้งในขณะเวลาเดินเครื่อง และหลังจากการหยุดเดินเครื่องเมื่อเถ้าสะสมมากขึ้นจนกระทั่งไม่สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้

การกำจัดเถ้าสะสมที่ใช้กันโดยทั่วไปในเครื่องกำเนิดไอน้ำ ทำโดยการฉีดอากาศแรงดันสูง (Soot Blow) เข้าไปทำลายการเกาะของเถ้าสะสมให้หลุดออก แต่ปัญหาของการฉีดอากาศแรงดันสูง จะทำให้ผนังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนบางส่วนเกิดการผุกร่อน (Corrosion) กัดกร่อน (Erosion)

ปัจจุบันมีงานวิจัยมากมายที่ศึกษาถึงแนวทางการลดเถ้าสะสม โดยแบ่งเป็น 2 วิธี วิธีแรกคือวิธีโดยตรง (Active method) คือ การกำจัดเถ้าสะสม ยกตัวอย่างเช่น การฉีดอากาศแรงดันสูงเข้าไปทำลายการเกาะตัวของเถ้าดังที่กล่าวข้างต้น หรือหยุดเครื่องเพื่อระเบิดเถ้าสะสม ทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายสูง และเสียเวลาการทำงานสำหรับการเดินเครื่อง และในการเดินเครื่องใหม่ต้องใช้ระยะเวลา นานกว่าเครื่องจะเข้าสู่สภาวะการทำงาน นอกจากนี้ยังส่งผลให้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ได้รับความเสียหายด้วย วิธีที่สองคือแบบโดยอ้อม (Passive method) คือการป้องกันก่อนที่จะเกิดเถ้าสะสม ยกตัวอย่างเช่น การ

ปรับปรุงเงื่อนไขการเดินเครื่อง การปรับอัตราส่วนอากาศและเชื้อเพลิง [1] การปรับความเร็วการไหลของอากาศ [2] การปรับเปลี่ยนรูปแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การเปลี่ยนรูปร่างท่อแลกเปลี่ยนความร้อน [3] การเปลี่ยนระยะการจัดวางท่อการเปลี่ยนขนาดท่อ [4] แนวทางดังที่กล่าวมาข้างต้นล้วนแล้วแต่ส่งผลต่อความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเถ้าลอยที่เข้ามาเกาะติดที่ผิวท่อ [2,5] แสดงถึงความเร็ววิกฤติของอนุภาคเถ้า คือความเร็วต่ำที่สุดของอนุภาค ที่สามารถเอาชนะแรงยึดเกาะของชั้นกาวเหนียว ทำให้ไม่เกิดการสะสมของเถ้าที่ผิวท่อ โดยตัวแปรความเร็ววิกฤติดังกล่าวจะเกี่ยวเนื่องกับพฤติกรรมเกาะติดของเถ้าสะสมซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วน [6,8] คือ ส่วนของการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Transport) และส่วนของชั้นกาวเหนียว (Sticky Layer) ในส่วนของการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้น อนุภาคที่มีขนาดเล็กน้อยกว่า 10 ไมโครเมตร จะมีความเฉื่อยต่ำ เมื่อเคลื่อนที่ผ่านผิวท่อที่มีชั้นกาวเหนียว จะเกิดการเกาะติดที่ผิวท่อ แต่สำหรับอนุภาคขนาดมากกว่า 10 ไมโครเมตร จะมีความเฉื่อยอนุภาคสูง ทำให้ไหลไปตามกระแสอากาศหลัก (Main stream) คือบริเวณช่องการไหลระหว่างท่ออนุภาคขนาดใหญ่จึงไหลไปบริเวณดังกล่าวมากกว่าที่จะถูกยึดติดจากชั้นกาวเหนียวที่ผิวท่อ นั่นคือ ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่ประกอบกับความเร็วการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีค่าสูง จะส่งผลต่อพฤติกรรมเกาะติดของเถ้าสะสม ทำให้โอกาสที่จะเกิดการสะสมของเถ้าลดลง

เนื่องจากอนุภาคที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงถ่านหินโดยทั่วไป มีขนาดเท่ากับ 0-450 ไมโครเมตร ดังนั้นการเพิ่มความเฉื่อยของอนุภาคให้สูงขึ้น โดยการเพิ่มความเร็วของอนุภาครวมทั้งการปรับทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค เพื่อทำให้อนุภาคไหลเข้าสู่บริเวณกระแสอากาศหลักให้มากที่สุด จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยลดการสะสมของเถ้าได้ [7] พิจารณาการติดตั้งลิ้นสามเหลี่ยมภายในกลุ่มท่อ ด้วยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) เพื่อศึกษาการกระจายความเร็วที่เกิดขึ้นรอบท่อ แต่เป็นเพียงการศึกษาเฉพาะกรณีที่มีเฉพาะการ

ไหลของอากาศ แต่ในสภาวะการทำงานจริงจะมีอนุภาคเฝ้าลอยในอากาศด้วย รวมทั้งไม่ได้พิจารณาถึง ขนาดของลิ่มและตำแหน่งการติดตั้งลิ่ม ซึ่งมีความสำคัญต่อลักษณะการไหลรอบผิวท่อ ดังนั้น ทั้งการไหลของอากาศที่มีอนุภาคเฝ้าลอยผสมอยู่ด้วย และการพิจารณาถึงขนาดและตำแหน่งการติดตั้งลิ่ม จึงเป็นที่มาของการศึกษาวิจัยครั้งนี้ โดยการทำการทดลองจำลองการเกาะติดเฝ้าสะสมในกลุ่มท่อที่มีการจัดเรียงแบบเรียง 6 แถว 3 คอลัมน์พิจารณาที่เลขเรย์โนลด์ (Reynold number, Re) คัดจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 1800 โดยเลขเรย์โนลด์ ดังกล่าวอยู่ในช่วง 1800-22000 ซึ่งเป็นช่วงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในการเดินเครื่องบริเวณที่นำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ [8] โดยงานวิจัยนี้ศึกษาผลของปริมาณเฝ้าสะสมที่เกาะติดท่อในแต่ละแถว

2.เครื่องมือการทดลองและเงื่อนไขการทดลอง

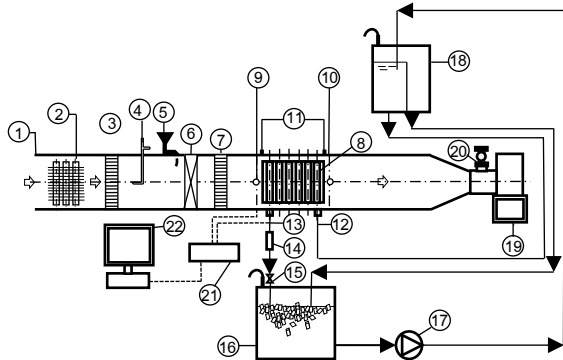
การจำลองสภาวะการเกาะติดของเฝ้าสะสมในกลุ่มท่อ ทำโดยใช้ท่อลมหมุนวนตลอดแนวการไหล (1) ขนาด 0.1425 x 0.1425 เมตร ดังรูปที่ 1 โดยใช้อากาศฝั่งดูด (Suction) ของพัดลม (Blower) (19) ดูดอากาศไหลผ่านขดลวดความร้อน (2) ทำให้อากาศไหลแบบสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดด้วยการปล่อยอากาศไหลผ่านท่อเรียง (Straightener) (3) วัดความเร็วการไหลของอากาศด้วยปีตอท (Pitot) ซึ่งสามารถปรับความเร็วการไหลของอากาศด้วยวาล์ว (20) ความเร็วของอากาศที่ใช้เท่ากับ 2.1 เมตร/วินาที (4) หลังจากนั้นจะปล่อยเฝ้าจากถังป้อนเฝ้า (5) โดยด้านล่างถังป้อนเฝ้าจะเป็นเกลียวป้อน (Screw Feeder) ซึ่งจะป้อนเฝ้าที่อัตรา 0.00365 กิโลกรัม/วินาที ซึ่งจำลองจากอยู่ในช่วงการกระจายตัวของเฝ้าในเตาเผา Vanbeek et. al. [8] เฝ้าถูกปล่อยลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก เฝ้าผสมกับอากาศด้วย ใบพัดแบบหยุดนิ่ง (Fix Blade) (6) อากาศจะถูกทำให้ไหลสม่ำเสมออีกครั้งด้วยการผ่านท่อเรียง (7) ทั้งอากาศและอนุภาคจะเคลื่อนที่ผ่านชุดกลุ่มท่อทดสอบ (8) จุด (9)(10) วัดอุณหภูมิอากาศขาเข้าและขาออก ตามลำดับ วัดความดันลดคร่อมชุดกลุ่มท่อทดสอบด้วยมาร์นีมิเตอร์แบบเอียง (Inclined

manometer) (11) โดยน้ำอุณหภูมิต่ำจากถังยกสูงจะไหลเข้าสู่ชุดท่อกลุ่มท่อทดสอบ วัดอุณหภูมิน้ำขาเข้า (12) และขาออก (13) วัดอัตราการไหลของน้ำด้วยโรตามิเตอร์ (Rotameter) (14) ปรับอัตราการไหลของน้ำด้วยวาล์วควบคุมการไหล (15) หลังจากนั้นน้ำไหลออกจากชุดกลุ่มท่อทดสอบน้ำจะไหลกลับเข้ามาเก็บที่ถังน้ำเย็นซึ่งตั้งอยู่ด้านล่างชุดกลุ่มท่อทดสอบ (16) น้ำในถังดังกล่าวจะรักษาให้อุณหภูมิเท่ากับ 0 องศาเซลเซียส ตลอดเวลาและรักษาอุณหภูมิด้วยการเติมน้ำแข็ง น้ำในถังดังกล่าวจะถูกสูบขึ้นไปเก็บที่ถังยกสูง (18) เหนือชุดกลุ่มท่อทดสอบ 3 เมตร การวัดอุณหภูมิทั้งหมดใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด T ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (21) และบันทึกข้อมูลลงเครื่องคอมพิวเตอร์ (22)

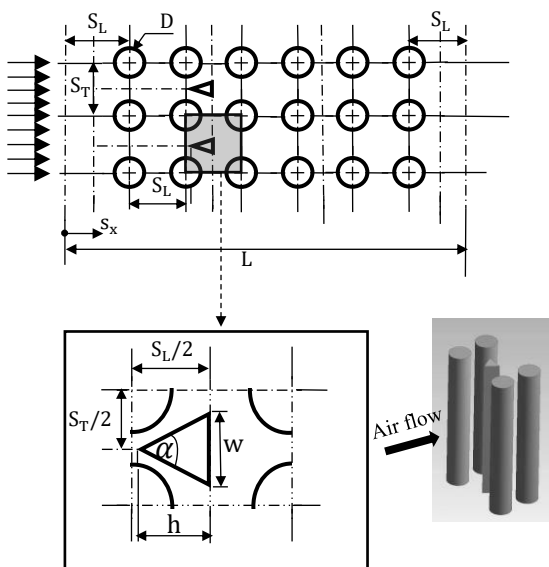
ชุดกลุ่มท่อทดสอบและลักษณะรูปร่างของลิ่ม รวมถึงการติดตั้งลิ่ม แสดงในรูปที่ 2 ประกอบด้วยท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 0.015 เมตร โดยใช้ท่อทั้งหมด 18 ท่อ การจัดเรียงตัวของกลุ่มท่อแบ่งเป็น 3 คอลัมน์ 6 แถว ระยะในแนวขวาง (Transverse pitch, S_T) เท่ากับ 0.03 m. ระยะในแนวแนวยาว (Longitude pitch, S_L) เท่ากับ 0.0225 m. ลิ่มสามเหลี่ยมทำจากเส้นใยเทอร์โมพลาสติกด้วยวิธีการพิมพ์จากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ฐานของลิ่ม (Width, W) มีทั้งหมด 4 ขนาด 0.001875, 0.00375, 0.0075 และ 0.015 เมตร ซึ่งจะทำให้ลิ่มมีมุมยอด (Apex angle; α) ทั้งหมด 4 ค่า คือ 3.576, 7.125, 14.36 และ 26.256 องศา การวางตำแหน่งลิ่มพิจารณาในรูปแบบของอัตราส่วนระหว่างระยะจากปากทางเข้าสู่ชุดทดสอบ (S_x) เทียบกับความยาวของกลุ่มท่อทดสอบ (L) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1575 เมตร ทำให้เกิดอัตราส่วน S_x/L เท่ากับ 0.071, 0.29, 0.57 และ 0.86 ตามลำดับ

เงื่อนไขการทดลองทั้งหมดจะหยุดเมื่อการสะสมของเฝ้า เข้าสู่ภาวะอิ่มตัว (Asymptotic) [12-13] ซึ่งเป็นสภาวะที่พบได้ทั่วไปสำหรับการเกิดเฝ้าสะสมในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยสำหรับการทดลองครั้งนี้ การสะสมของเฝ้าจะเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวที่เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง โดยทำการศึกษามวลเฝ้าสะสมของแต่ละแถวกรณี

ก่อนติดลิ้ม (m) และหลังติดลิ้ม (m_w) ตามลำดับ มวลทั้งหมดของอนุภาคเถ้าลอยที่ปล่อย (m_o)



รูปที่ 1 เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับการทดลอง ประกอบด้วย (1) ท่อลม (2) ขดลวดทำความร้อน (3) ท่อรังผึ้ง (4) ปิดท่อ (5) ถังป้อนเถ้า (6) ใบพัดผสมเถ้า (7) ท่อรังผึ้ง (8) ชุดทดสอบ (9) จุดวัดอุณหภูมิอากาศขาเข้า (10) จุดวัดอุณหภูมิอากาศขาออก (11) มานอร์มิเตอร์แบบเอียงวัดความดันลดคร่อมชุดกลุ่มท่อทดสอบ (12) จุดวัดอุณหภูมิน้ำขาเข้า (13) จุดวัดอุณหภูมิน้ำขาออก (14) โรตาริมิเตอร์ (15) วาล์วควบคุมการไหลของน้ำ (16) ถังน้ำเย็น (17) ปั๊มน้ำ (18) ถังยกสูง (19) พัดลม (20) วาล์วควบคุมความเร็วอากาศ (21) เครื่องบันทึกข้อมูล (22) คอมพิวเตอร์



รูปที่ 2 การจัดเรียงกลุ่มท่อและการจัดวางตำแหน่งลิ้ม

3. ทฤษฎี

ในการพิจารณาภาวะเข้าสู่จุดอิ่มตัว Elhady et al. [12] คือ เมื่อเวลาผ่านไปถึงจุดหนึ่ง อัตราการสะสมของเถ้าเท่ากับอัตราการหลุดออกของเถ้าสะสม ทำให้การเปลี่ยนแปลงความต้านทานความร้อนคงที่ ณ เวลาดังกล่าวเป็นต้นไป โดยการพิจารณาความต้านทานความร้อน R_f ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา หาได้จากสมการที่ (1)

$$R_f = \frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_c} \quad (1)$$

U คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม หาได้จากสมการที่ 2 ตัวห้อย f และ c คือสภาวะที่เกิดเถ้าสะสมบนผิวท่อและสภาวะที่ผิวท่อสะอาด ตามลำดับ

$$U = \frac{Q_w}{\sum A_o \Delta T_{ln}} \quad (2)$$

โดย Q_w คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนสู่น้ำ หาได้จากสมการที่ 3 $\sum A_o$ คือ พื้นที่ผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ΔT_{ln} คือ ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อก (Logarithm Mean Temperature Difference, LMTD) ซึ่งหาได้จากสมการ สมการ 4

$$Q_w = \dot{m} C_{p,w} (T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (3)$$

โดย $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ $T_{w,out}$ คืออุณหภูมิน้ำขาออก $T_{w,in}$ คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้า

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_{a,in} - T_{w,out}) - (T_{a,out} - T_{w,in})}{\ln \left(\frac{T_{a,in} - T_{w,out}}{T_{a,out} - T_{w,in}} \right)} \quad (4)$$

เมื่อ $T_{a,in}$ คือ อุณหภูมิอากาศขาเข้า $T_{a,out}$ คือ อุณหภูมิอากาศขาออก $T_{w,in}$ คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้า $T_{w,out}$ คือ อุณหภูมิน้ำขาออก โดยการสูญเสียความร้อนพิจารณาจากความแตกต่างของอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวด้านท่อน้ำและผิวด้านอากาศโดยมีค่าการสูญเสียความร้อนเท่ากับ 3 %

ความดันลดคร่อมชุดกลุ่มท่อทดสอบ สามารถคำนวณได้ตามสมการ ดังต่อไปนี้

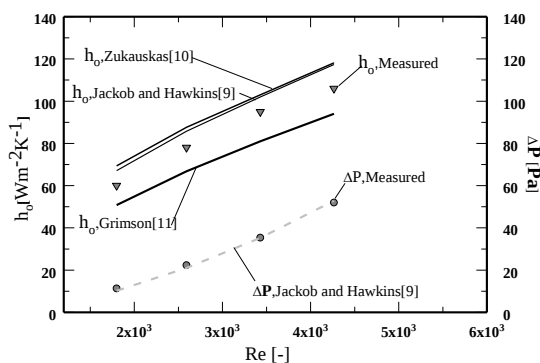
$$\Delta P = \rho g h_w \quad (5)$$

โดย ρ_a คือ ความหนาแน่นอากาศ g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, h_w คือ ความแตกต่างของระดับน้ำเนื่องจากความดัน

4.ผลการคำนวณและการอภิปราย

4.1 การสอบทานผลที่ได้จากอุปกรณ์ทดลอง

การพิจารณาความถูกต้องของเครื่องมือวัด ทำโดยการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลดคร่อมกลุ่มท่อที่เลขเรโนลด์ ต่างๆ โดยเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลองกับค่าสหสัมพันธ์ของ George et al., Özişik et al. และ Frank et al. [9 - 11] มีความแตกต่างเท่ากับ 7%, 10% และ 10% ตามลำดับ และค่าความดันลดระหว่างการทดลองและค่าสหสัมพันธ์ของ George et al. และ Özişik et al. [9,10] มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและความดันลดระหว่างการทดลองกับผลของนักวิจัยท่านอื่น

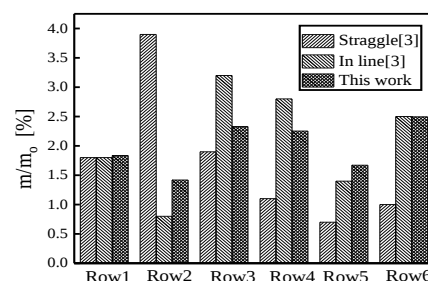
4.2 ปริมาณสัดส่วนเถ้าสะสมเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น

การสะสมตัวของเถ้าในกลุ่มท่อชุดทดสอบที่สภาวะเข้าสู่จุดอิมพัลส์ มีลักษณะดังรูป 4 โดยสมมติฐานของเถ้าสะสมที่เกาะติดรอบท่อคงที่ตลอดความยาวท่อ [12]



รูปที่ 4 ลักษณะการเกาะตัวของเถ้าสะสมในกลุ่มท่อชุดทดสอบ

เมื่อพิจารณาอัตราส่วน m/m_o ของการไหลผ่านกลุ่มท่อที่มีการจัดเรียงท่อแบบเรียง (In-Line Arrangement) พบว่าผลของการวิจัยครั้งนี้แนวโน้มของ m/m_o ของท่อแต่ละแถวเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับ Bouris et al. [3] ดังรูป 5 ตั้งแต่แถวที่ 1 ถึงแถวที่ 6 โดยพบว่าแถวที่ 2 มีเถ้าสะสมต่ำที่สุด เนื่องจากการกระดอน (Rebound) ของอนุภาคเถ้าลอยที่ท่อฝั่งด้านข้างท่อแถว 1 เข้าสู่กระแสน้ำหลักแล้วผ่านท่อแถว 2 อนุภาคเถ้าลอยบางส่วนได้รับอิทธิพลจากการไหลวนหลังท่อแถว 2 ทำให้เกิดการสะสมบริเวณที่ท่อแถว 3 เป็นจำนวนมากและท่อแถวที่ 4-5 มีการสะสมเถ้าลดลงจากท่อแถวที่ 3 ตามลำดับ เนื่องจากอนุภาคเถ้าลอยที่มีความเฉื่อยต่ำ ที่มา 1-3 ขัดขวางการไหล และเกิดการเกาะติดท่อไปบางส่วน อนุภาคเถ้าลอยที่ผ่านมาจึงเกิดการสะสมลดลง ที่แถวที่ 4 และ 5 แต่แถวที่ 6 ไม่มีกลุ่มท่อด้านหลัง ทำให้เกิดการไหลวนปั่นป่วนที่ฝั่งด้านหลัง อนุภาคจึงมีการกระทบที่ผิวท่อทำให้มีการสะสมของเถ้ามากขึ้น

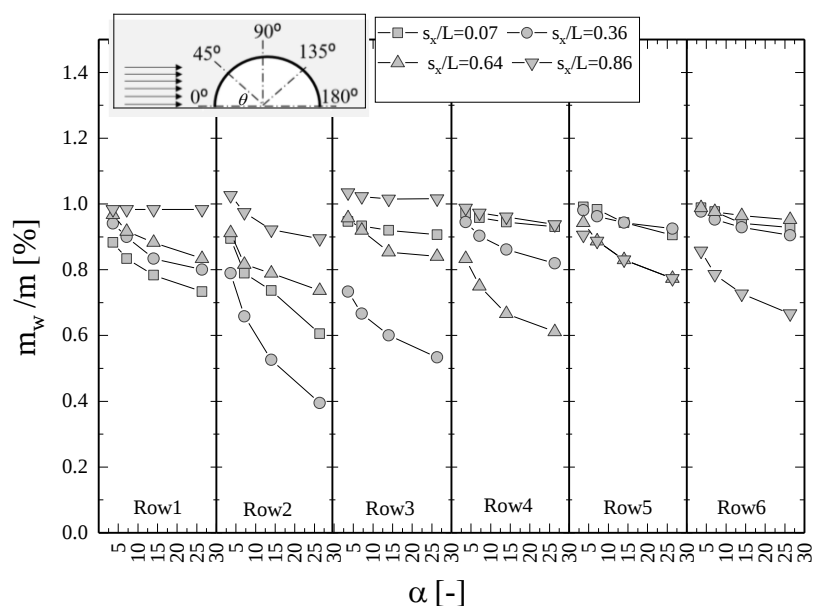


รูปที่ 5 เปรอ์เซ็นต์มวลเถ้าสะสม (m_o/m) ในแต่ละแถวเปรียบเทียบกับ Bouris et al. [3]

4.3 อิทธิพลของลิ้มที่มีต่อเสถียรภาพแต่ละแถว

เมื่อพิจารณารูป 6 ที่ตำแหน่ง s_x/L คงที่ m_w/m ของท่อแถวจะลดลงตาม α ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อพิจารณา ท่อแถวที่ 1 กรณีที่ $s_x/L = 0.07$ ค่าของ m_w/m จะให้ค่าต่ำสุด และ $s_x/L = 0.86$ แทบจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า m_w/m ที่ท่อแถวที่ 2 กรณีเมื่อ $s_x/L = 0.36$ ค่าของ m_w/m จะต่ำสุด และ $s_x/L = 0.86$

ค่า m_w/m สูงสุด เช่นเดียวกับท่อแถวที่ 3 ที่ท่อแถวที่ 4 $s_x/L = 0.64$ ค่าของ m_w/m จะให้ค่าต่ำสุด และ $s_x/L = 0.07$ และ 0.86 ให้ค่า m_w/m สูงสุดใกล้เคียงกันและเป็นค่าสูงสุด ที่ท่อแถวที่ 5 ที่ $s_x/L = 0.64$ ค่าของ m_w/m จะให้ค่าต่ำสุด และ $s_x/L = 0.07, 0.86$ ค่า m_w/m สูงสุดให้ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาที่ท่อแถวที่ 6 $s_x/L = 0.86$ ค่าของ m_w/m จะให้ค่าต่ำสุด และ $s_x/L = 0.07, 0.36$ และ 0.86 ค่า m_w/m ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 6 เปอร์เซ็นมวลเสถียรภาพระหว่างกรณีติดลิ้มเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีลิ้ม (m_w/m) ที่มุมยอดของลิ้ม (α) และตำแหน่งการวางลิ้ม (s_x/L) ต่างๆ

จะเห็นว่า α ที่มีขนาดใหญ่ หรือการที่มุมยอดของลิ้มกว้าง ลิ้มจะมีฐานที่กว้าง ส่งผลให้พื้นที่การไหลระหว่างรอบท่อและลิ้มแคบ ความเร็วการไหลบริเวณพื้นที่ดังกล่าวสูงขึ้น ส่งผลให้อนุภาคเด้งลอยที่มีความเฉื่อยต่ำเมื่อเคลื่อนที่ผ่านบริเวณดังกล่าว ความเฉื่อยมีค่าสูงขึ้น ซึ่งลักษณะการไหลด้านหลังลิ้มอาจจะมีส่วนทำให้เกิดทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเด้งลอย กลับเข้าสู่กระแสอากาศหลัก ทำให้การสะสมเถ้าที่ผิวท่อลดลง ปริมาณเถ้าสะสมที่เกาะติดที่ผิวท่อจึงลดลงตามไปด้วยและข้อสังเกตที่เห็นได้ชัดที่ตำแหน่ง $s_x/L = 0.36$ ส่งผลให้

m_w/m ของท่อแถว 2, 3, 4 ก่อนข้างต่ำกว่าตำแหน่ง s_x/L อื่นๆ และเมื่อพิจารณาค่าตำแหน่ง s_x/L อื่นๆ มีแนวโน้มคล้ายกันคือ ท่อที่อยู่ฝั่งด้านหน้า และท่อด้านหลังลิ้มถัดไปอีก 2-3 แถว จะได้รับอิทธิพลของการติดลิ้มด้วย ส่งผลให้การสะสมเถ้าต่ำ

5. สรุป

การติดตั้งลิ้มในกลุ่มท่อ โดยอิทธิพลของขนาดลิ้มและตำแหน่งการติดตั้งลิ้ม จะช่วยส่งผลให้เสถียรภาพที่ท่อแต่ละแถวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการติดลิ้มจะส่งผลให้ความเฉื่อยของการเคลื่อนที่ของอนุภาคเด้ง

ลอยสูงขึ้น สามารถเคลื่อนผ่านผิวท่อโดยไม่เกิดการสะสมหรือการเกาะติดที่ผิวท่อ เป็นสาเหตุที่ทำให้การสะสมเถ้าที่ท่อแต่ละแถวลดลง โดยลิมที่มีขนาดใหญ่จะยิ่งส่งผลให้เถ้าสะสมของแต่ละท่อลดลง และตำแหน่งการติดตั้งลิมที่ติดตั้งภายในกลุ่มท่อ จะส่งอิทธิพลต่อการสะสมเถ้าของท่อแต่ละแถวมากกว่า การติดตั้งลิมที่ฝั่งทางเข้าและทางออกของกลุ่มท่อ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณทุนสนับสนุนจากบัณฑิตวิศวกรรมศาสตร์ เป็นทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ดุษฎีนิพนธ์ หรือการศึกษาอิสระสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

คำสัญลักษณ์

ΣA_o	พื้นที่ผิวท่อถ่ายเทความร้อน [m^2]
h_o	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมภายนอกท่อ [$Wm^{-2}^{\circ}C^{-1}$]
h_{ow}	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมท่อ [$Wm^{-2}^{\circ}C^{-1}$]
m_o	มวลของเถ้าสะสมทั้งหมด [kg]
m_w	มวลเถ้าสะสมกรณีติดตั้งลิม [kg]
r_i	รัศมีภายในท่อ [m]
r_o	รัศมีภายนอกท่อ [m]
$T_{a,i}$	อุณหภูมิอากาศขาเข้า [$^{\circ}C$]
$T_{a,o}$	อุณหภูมิอากาศขาออก [$^{\circ}C$]
$T_{w,i}$	อุณหภูมิน้ำขาเข้า [$^{\circ}C$]
$T_{w,o}$	อุณหภูมิน้ำขาออก [$^{\circ}C$]
ΔT_{lm}	ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อก [$^{\circ}C$]
ΔP	ความดันลด [Pa]
D	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ [m]
L	ระยะกลุ่มท่อ [m]
v	ความเร็วอากาศเฉลี่ย [ms^{-1}]
h_i	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของไหลท่อ [$Wm^{-2}^{\circ}C^{-1}$]

m	มวลเถ้าสะสม [kg]
k	ค่าการนำความร้อน [$Wm^{-1}^{\circ}C^{-1}$]
$R_{f,i}$	ค่าความต้านทานความร้อน [$W^{-1}m^{\circ}C$]
Re	เลขเรโนลด์ $Re = \frac{\rho v D}{\mu}$ [-]
U	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม [$Wm^{-2}^{\circ}C^{-1}$]

ตัวอักษรกรีก

ρ	ความหนาแน่นอากาศ [$kg \cdot m^{-3}$]
μ	สัมประสิทธิ์ความหนืด [Pa. s]

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Walawiak, S. Kalisz, "Using fluent code to predic deposit during combustion of solid fuels". Proceedings of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning . Crete Island. Greece, Jun, 2011.
- [2] M.S. Abd-Elhady, C. C. M. Rindt, J. G. Wijers, A. A. Steenhoven, "Modelling the Impaction of a Micron Particle with a Powdery Layer," Powder Technology, Vol.168, pp.111-124, Oct, 2006.
- [3] D. Bouris, G. Papadakis, G. Bergeles, "Numerical Evaluation of Alternate Tube Configurations for Particle Deposition Rate Reduction in Heat Exchanger Tube Bundles", International Journal of Heat and Fluid Flow, pp.525-536, Oct, 2001.
- [4] D. Bouris, E. Konstantinidis, S. Balabani, D. Castiglia, and G. Bergeles, "Design of a Novel, Intensified Heat Exchanger for Reduced Fouling Rates," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.48, pp.3817-3832, Aug, 2005.
- [5] M.S. Abd-Elhady, C.C.M. Rindt, J.G. Wijers, A.A. van Steenhoven, E.A. Bramer, T.van der Meer, "Minimum gas speed in heat exchangers to avoid particulate fouling," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.47 pp.3943-3955, Aug, 2004.

-
- [6] M.J. Li, S.Z. Tang, F. Wang, Q.X. Zhao, W.Q. Tao, "Gas-side fouling erosion and corrosion of heat exchangers for middle/low temperature waste heat utilization: A review on simulation and experiment," *Applied Thermal Engineering*, Vol.126, pp.737–761, Nov, 2017.
 - [7] B. Kilkovský, V. Turek, Z. Jegla, P. Stehlík, "Aspects of Fouling in Case of Heat Exchangers with Pollutes Gas," *International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, Pointe Aux Piments. Mauritius, Jul, 2011.
 - [8] M.C. Vanbeek, "Gas-side fouling in heat recovery boilers," Degree of Doctor of Philosophy Thesis, Eindhoven University of technology, Eindhoven, Netherlands, 2001.
 - [9] M. George A. Hawkins Jakob, "Elements of Heat Transfer, John Wiley & Sons, 1957.
 - [10] M.N. Özışık, "Heat Transfer: A Basic Approach, McGraw-Hill, 1985.
 - [11] P. Incropera, P. Dewitt "Introduction to Heat Transfer, John Wiley & Sons, 1985.
 - [12] M.S. Abd-Elhady, M.R. Malayeri, "Asymptotic characteristics of particulate deposit formation in exhaust gas recirculation (EGR) coolers," *Applied Thermal Engineering*, Vol.60, pp.96–104. Oct, 2013.
 - [13] P. Yisunzam, A. Chinsuwan, Effect of transverse triangular cross-sectional wedges on the asymptotic fouling deposition behavior of the flow through an inline tube bundle, *International journal of heat and mass transfer*, In press.