

อิทธิพลของการติดตั้งลิ่มสามเหลี่ยมในกลุ่มท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลต่อเกาะสะสม

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

ปศุญา 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 เป็นผลให้การสะสมเถ้าที่ลดลง 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

เครื่องกำเนิดไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงถ่านหินหรือชีวมวล จะมีบริเวณสำหรับติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Convective part) เพื่อนำความร้อนจากแก๊สไอเสีย (Flue gas) กลับมาใช้ใหม่ (Recovery boiler) เป็นการนำพลังงานให้คุ้มค่าที่สุด ก่อนที่จะปล่อยแก๊สไอเสียออกสู่บรรยากาศ เรียกว่า ส่วนของการนำความร้อนกลับมามาใช้ใหม่ [1] แต่ในแก๊สไอเสีย จะมีอนุภาคเถ้าลอยที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อแก๊สไอเสียกระทบกับผิวท่อที่มีอุณหภูมิต่ำ ทั้งแก๊สและอนุภาคเถ้าลอยเกิดการหลอมเหลวที่ผิวท่อ เกิดชั้นกาวเหนียว (Stick layer) รอบผิวท่อ อนุภาคเถ้าที่เคลื่อนผ่านชั้นกาวเหนียวรอบผิวท่อดังกล่าว จะสะสมจนเป็นชั้นเถ้าสะสม และหนาขึ้นตามเวลา ยิ่งชั้นเถ้าสะสมมีความหนามากขึ้นการนำความร้อนยิ่งลดลง จนเปรียบเสมือนการมีฉนวนที่ผิวท่อ ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อจึงมีประสิทธิภาพต่ำ จึงต้องมีการกำจัดเถ้าสะสมดังกล่าวทิ้งในขณะเวลาเดินเครื่อง และหลังจากการหยุดเดินเครื่องเมื่อเถ้าสะสมมากขึ้นจนกระทั่งไม่สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้

การกำจัดเถ้าสะสมที่ใช้กัน โดยทั่วไปในเครื่องกำเนิดไอน้ำ ทำโดยการฉีดอากาศแรงดันสูง (Soot Blow) เข้าไปทำลายการเกาะของเถ้าสะสมให้หลุดออก แต่ปัญหาของการฉีดอากาศแรงดันสูง จะทำให้ผนังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนบางส่วนเกิดการผุกร่อน (Corrosion) กัดกร่อน (Erosion)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับปรุงเงื่อนไขการเดินเครื่อง การปรับอัตราส่วนอากาศและเชื้อเพลิง [1] การปรับความเร็วการไหลของอากาศ [2] การปรับเปลี่ยนรูปแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การเปลี่ยนรูปร่างท่อแลกเปลี่ยนความร้อน [3] การเปลี่ยนระยะการจัดวางท่อการเปลี่ยนขนาดท่อ [4] แนวทางดังที่กล่าวมาข้างต้นล้วนแล้วแต่ส่งผลต่อความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเถ้าลอยที่เข้ามาเกาะติดที่ผิวท่อ [2,5] แสดงถึงความเร็ววิกฤติของอนุภาคเถ้า คือความเร็วต่ำที่สุดของอนุภาค ที่สามารถเอาชนะแรงยึดเกาะของชั้นกาวเหนียว ทำให้ไม่เกิดการสะสมของเถ้าที่ผิวท่อ โดยตัวแปรความเร็ววิกฤติดังกล่าวจะเกี่ยวเนื่องกับพฤติกรรมการเกาะติดของเถ้าสะสมซึ่งแบ่งเป็น 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

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

ไหลของอากาศ แต่ในสภาวะการทำงานจริงจะมีอนุภาค
 ฝ้าลอยในอากาศด้วย รวมทั้งไม่ได้พิจารณาถึง ขนาดของ
 ฝั่มและตำแหน่งการติดตั้งฝั่ม ซึ่งมีความสำคัญต่อลักษณะ
 การไหลรอบผิวท่อ ดังนั้น ทั้งการไหลของอากาศที่มี
 อนุภาคฝ้าลอยผสมอยู่ด้วย และการพิจารณาถึงขนาดและ
 ตำแหน่งการติดตั้งฝั่ม จึงเป็นที่มาของการศึกษาวิจัยครั้งนี้
 โดยการทำการทดลองจำลองการเกาะติดฝ้าสะสมในกลุ่ม
 ท่อที่มีการจัดเรียงแบบเรียง 6 แถว 3 คอลัมน์พิจารณาที่
 เลขเรย์โนลด์ (Reynold number, Re) คัดจากขนาดเส้นผ่าน
 ศูนย์กลางท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 1800 โดย
 เลขเรย์โนลด์ ดังกล่าวอยู่ในช่วง 1800-22000 ซึ่งเป็นช่วง
 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในการเดินเครื่องบริเวณ
 ที่นำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ [8] โดยงานวิจัยนี้ศึกษาผล
 ของปริมาณฝ้าสะสมที่เกาะติดท่อในแต่ละแถว

2. เครื่องมือการทดลองและเงื่อนไขการทดลอง

การจำลองสภาวะการเกาะติดของฝ้าสะสมในกลุ่ม
 ท่อ ทำโดยใช้ท่อลมหุ้มฉนวนตลอดแนวการไหล (1)
 ขนาด 0.1425 x 0.1425 เมตร ดังรูปที่ 1 โดยใช้อากาศฝั่ง
 ด้านดูด (Suction) ของพัดลม (Blower) (19) ดูดอากาศ
 ไหลผ่านขดลวดความร้อน (2) ทำให้อากาศไหลแบบ
 สมมาตรตลอดพื้นที่หน้าตัดด้วยการปล่อยอากาศไหล
 ผ่านท่อเรียงฝั่ม (Straightener) (3) วัดความเร็วการไหลของ
 อากาศด้วยปีตอท (Pitot) ซึ่งสามารถปรับความเร็วการ
 ไหลของอากาศด้วยวาล์ว (20) ความเร็วของอากาศที่ใช้
 เท่ากับ 2.1 เมตร/วินาที (4) หลังจากนั้นจะปล่อยฝ้าจากถัง
 ป้อนฝ้า (5) โดยด้านล่างถังป้อนฝ้าจะเป็นเกลียวป้อน
 (Screw Feeder) ซึ่งจะป้อนฝ้าที่อัตรา 0.00365 กิโลกรัม/
 วินาที ซึ่งจำลองจากอยู่ในช่วงการกระจายตัวของฝ้าใน
 เตาเผา Vanbeek et. al. [8] ฝ้าถูกปล่อยลงมาด้วยแรงโน้ม
 ถ่วงของโลก ฝ้าผสมกับอากาศด้วย ใบพัดแบบหยุดนิ่ง
 (Fix Blade) (6) อากาศจะถูกทำให้ไหลสม่ำเสมออีกครั้ง
 ด้วยการผ่านท่อเรียงฝั่ม (7) ทั้งอากาศและอนุภาคจะเคลื่อนที่
 ผ่านชุดกลุ่มท่อทดสอบ (8) จุด (9)(10) วัดอุณหภูมิอากาศ
 ขาเข้าและขาออก ตามลำดับ วัดความดันลดคร่อมชุดกลุ่ม
 ท่อทดสอบด้วยมาร์นิโอมิเตอร์แบบเอียง (Inclined

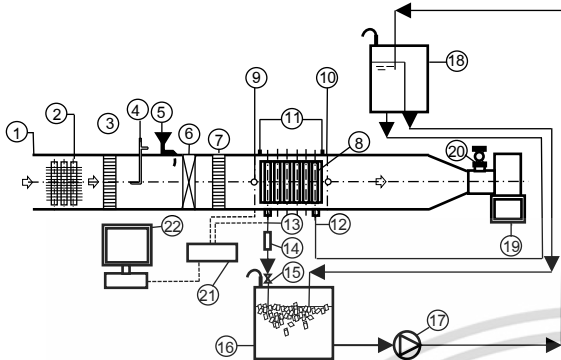
manometer) (11) โดยน้ำอุณหภูมิต่ำจากถังยกสูงจะไหลเข้า
 ชุดท่อกลุ่มท่อทดสอบ วัดอุณหภูมิหน้าขาเข้า (12) และขา
 ออก (13) วัดอัตราการไหลของน้ำด้วยโรตานิเตอร์
 (Rotameter) (14) ปรับอัตราการไหลของน้ำด้วยวาล์ว
 ควบคุมการไหล (15) หลังจากนั้นน้ำไหลออกจากชุดกลุ่มท่อ
 ทดสอบน้ำจะไหลกลับเข้ามาเก็บที่ถังน้ำเย็นซึ่งตั้งอยู่
 ด้านล่างชุดกลุ่มท่อทดสอบ (16) น้ำในถังดังกล่าวจะ
 รักษาให้อุณหภูมิเท่ากับ 0 องศาเซลเซียส ตลอดเวลาและ
 รักษาอุณหภูมิด้วยการเติมน้ำแข็ง น้ำในถังดังกล่าวจะถูก
 สูบขึ้นไปเก็บที่ถังยกสูง (18) เหนือชุดกลุ่มท่อทดสอบ 3
 เมตร การวัดอุณหภูมิทั้งหมดใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด T ต่อ
 เข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (21) และบันทึกข้อมูลลงเครื่อง
 คอมพิวเตอร์ (22)

ชุดกลุ่มท่อทดสอบและลักษณะรูปร่างของฝั่ม
 รวมถึงการติดตั้งฝั่ม แสดงในรูปที่ 2 ประกอบด้วยท่อ
 ทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 0.015 เมตร
 โดยใช้ท่อทั้งหมด 18 ท่อ การจัดเรียงตัวของกลุ่มท่อ
 แบ่งเป็น 3 คอลัมน์ 6 แถว ระยะในแนวขวาง (Transverse
 pitch, S_T) เท่ากับ 0.03 m. ระยะในแนวแนวยาว
 (Longitude pitch, S_L) เท่ากับ 0.0225 m. ฝั่มสามเหลี่ยม
 ทำจากเส้นใยเทอร์โมพลาสติกด้วยวิธีการพิมพ์จาก
 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ฐานของฝั่ม (Width, W) มีทั้งหมด 4
 ขนาด 0.001875, 0.00375, 0.0075 และ 0.015 เมตร ซึ่งจะ
 ทำให้ฝั่มมีมุมยอด (Apex angle; α) ทั้งหมด 4 ค่า คือ
 3.576, 7.125, 14.36 และ 26.256 องศา การวางตำแหน่ง
 ฝั่มพิจารณาในรูปแบบของอัตราส่วนระหว่างระยะจาก
 ปากทางเข้าสู่ชุดทดสอบ (S_x) เทียบกับความยาวของกลุ่ม
 ชุดทดสอบ (L) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1575 เมตร ทำให้เกิด
 อัตราส่วน S_x/L เท่ากับ 0.071, 0.29, 0.57 และ 0.86
 ตามลำดับ

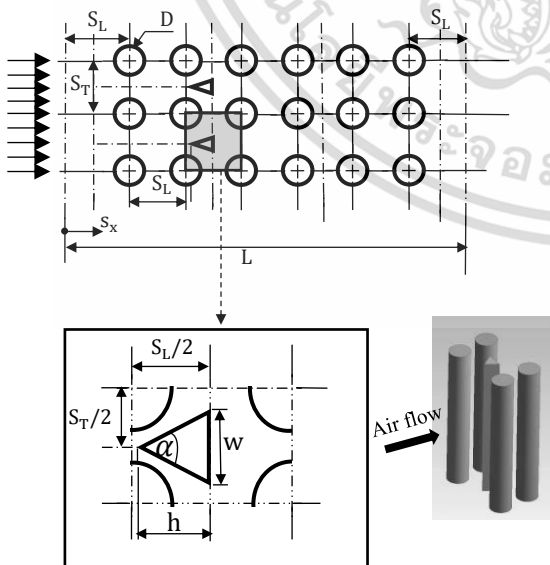
เงื่อนไขการทดลองทั้งหมดจะหยุดเมื่อการสะสม
 ของฝ้า เข้าสู่ภาวะอิมิตัว (Asymptotic) [12-13] ซึ่งเป็น
 สภาวะที่พบได้ทั่วไปสำหรับการเกิดฝ้าสะสมในเครื่อง
 แลกเปลี่ยนความร้อน โดยสำหรับการทดลองครั้งนี้ การ
 สะสมของฝ้าจะเข้าสู่สภาวะอิมิตัวที่เวลาประมาณ 3
 ชั่วโมง โดยทำการศึกษามวลฝ้าสะสมของแต่ละแถวกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



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



รูปที่ 2 การจัดเรียงกลุ่มท่อและการจัดวางตำแหน่งลิ้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทฤษฎี

ในการพิจารณาภาวะเข้าสู่จุดอิมตัว 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

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

โดย Q_w คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนสู่น้ำ หาได้จากสมการที่ 3 $\sum A_o$ คือ พื้นที่ผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ΔT_{In} 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

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

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

ความดันลดคร่อมชุดกลุ่มท่อทดสอบ สามารถคำนวณได้ตามสมการ ดังต่อไปนี้

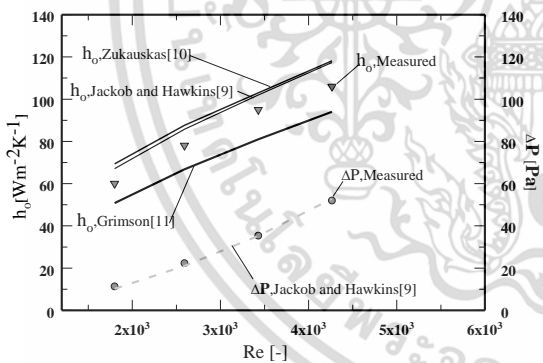
$$\Delta P = \rho g h_w \quad (5)$$

โดย ρ_a คือ ความหนาแน่นอากาศ g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, h_w คือ ความแตกต่างของระดับน้ำเนื่องจากความดัน

4. ผลการคำนวณและการอภิปราย

4.1 การสอบทานผลที่ได้จากอุปกรณ์ทดลอง

การพิจารณาความถูกต้องของเครื่องมือวัด ทำโดยการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลดคร่อมกลุ่มท่อที่เลขเรโนลด์ต่างๆ 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

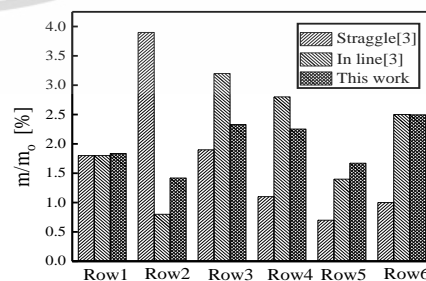
4.2 ปริมาณสัดส่วนเถ้าสะสมเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น

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 เข้าสู่กระแสน้ำแล้วผ่านท่อแถว 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



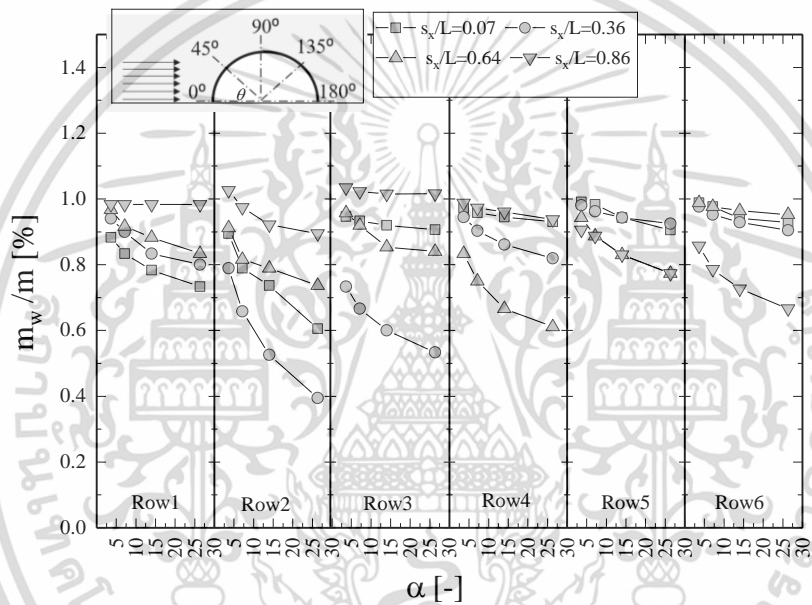
รูปที่ 5 เปรอ์เซ็นต์มวลเถ้าสะสม (m_o/m) ในแต่ละแถวเปรียบเทียบกับ Bouris et al. [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 อิทธิพลของลิ่มที่มีต่อเสถียรภาพแต่ละแถว

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 เปรียบเทียบมวลเสถียรภาพระหว่างกรณีติดลิ่มเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีลิ่ม (m_w/m) ที่มุมยอดของลิ่ม (α) และตำแหน่งการวางลิ่ม (s_x/L) ต่างๆ

จะเห็นว่า α ที่มีขนาดใหญ่ หรือการที่มุมยอดของลิ่มกว้าง ลิ่มจะมีฐานที่กว้าง ส่งผลให้พื้นที่การไหลระหว่างรอบท่อและลิ่มแคบ ความเร็วการไหลบริเวณพื้นที่ดังกล่าวสูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิที่ความถี่ต่ำเมื่อเคลื่อนที่ผ่านบริเวณดังกล่าว ความถี่มีค่าสูงขึ้น ซึ่งลักษณะการไหลด้านหลังลิ่มอาจจะมีส่วนทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคเฝ้าลอย กลับเข้าสู่กระแสอากาศหลัก ทำให้การสะสมเฝ้าที่ผิวท่อลดลง ปริมาณเฝ้าสะสมที่เกาะติดที่ผิวท่อจึงลดลงตามไปด้วยและข้อสังเกตที่เห็นได้ชัดที่ตำแหน่ง $s_x/L = 0.36$ ส่งผลให้

m_w/m ของท่อแถว 2, 3, 4 ก่อนข้างต่ำกว่าตำแหน่ง s_x/L อื่นๆ และเมื่อพิจารณาตำแหน่ง s_x/L อื่นๆ มีแนวโน้มคล้ายกันคือ ท่อที่อยู่ฝั่งด้านหน้า และท่อด้านหลังลิ่มถัดไปอีก 2-3 แถว จะได้รับอิทธิพลของการติดลิ่มด้วย ส่งผลให้การสะสมเฝ้าต่ำ

5. สรุป

การติดตั้งลิ่มในกลุ่มท่อ โดยอิทธิพลของขนาดลิ่มและตำแหน่งการติดตั้งลิ่ม จะช่วยส่งผลให้เสถียรภาพที่ท่อแต่ละแถวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการติดลิ่มจะส่งผลให้ความถี่ของการเคลื่อนที่ของอนุภาคเฝ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลอยสูงขึ้น สามารถเคลื่อนผ่านผิวท่อโดยไม่เกิดการสะสมหรือการเกาะติดที่ผิวท่อ เป็นสาเหตุที่ทำให้การสะสมเถ้าที่ท่อแต่ละแถวลดลง โดยลิ้มที่มีขนาดใหญ่จะยิ่งส่งผลให้เถ้าสะสมของแต่ละท่อลดลง และตำแหน่งการติดตั้งลิ้มที่ติดตั้งภายในกลุ่มท่อ จะส่งอิทธิพลต่อการสะสมเถ้าของท่อแต่ละแถวมากกว่า การติดตั้งลิ้มที่ฝั่งทางเข้าและทางออกของกลุ่มท่อ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณทุนสนับสนุนจากบัณฑิตวิศวกรรมศาสตร์ เป็นทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ดุษฎีนิพนธ์ หรือการศึกษาอิสระสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

คำสัญลักษณ์

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

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

ตัวอักษรกรีก

ρ	ความหนาแน่นอากาศ [kg. 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [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. Özisik, "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.