

การศึกษาการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นวางสลับ

Study on thermal performance enhancement in rectangular duct heat exchanger installed with staggered baffle

สมพล สกุลหลง¹, สุภัทรชัย สุวรรณพันธุ์² และ ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์^{3,*}

¹กลุ่มวิจัยระบบพลังงาน, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา พังงา สุราษฏร์ธานี ชลบุรี 20230

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ในเมือง เมือง ขอนแก่น 40000

³สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ทะเลชุมพร เมือง ลพบุรี 15000

Sompol Skullong¹, Supattarachai Suwannapan² and Panuwat Hoonpong^{3,*}

¹Energy System Research Group, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University Sriracha Campus, Thung Sukhla, Sriracha, Chon Buri, 20230, Thailand.

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khonkaen Campus, Nai Mueang, Mueang, Khon Kaen, 40000, Thailand.

³Department of Mechanical Technology, Faculty of Industrial Technology, Thepsatri Rajabhat University, Thale Chup Son, Mueang, Lopburi 15000, Thailand.

*Corresponding Author E-mail: panuwat.h@lawasri.tru.ac.th

Received: Sep 12, 2022; Revised: Dec 07, 2022; Accepted: Dec 19, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนและการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานภายในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นวางสลับ แบบให้ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวท่อคงที่ โดยการทดลองจะมีการปรับอัตราการไหลของอากาศอยู่ในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 5300 ถึง 24,000 ซึ่งลักษณะของแผ่นกั้นวางสลับมีอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นกับความสูงของท่อ ($P/H = PR = 1$) อัตราส่วนระหว่างความสูงของแผ่นกั้นกับความสูงของท่อ ($e/H = BR = 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4) และมุมปะทะการไหลของแผ่นกั้น ($\alpha = 45^\circ$) อิทธิพลของ BR ต่อพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อน การสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน และตัวประกอบค่าการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal Enhancement Factor, TEF) จะถูกศึกษาในการทดลองนี้ โดยที่การถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานจะถูกแสดงในเทอมของเลขนัสเซล (Nusselt Number, Nu) และตัวประกอบเสียดทาน (Friction Factor, f) ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าในการติดตั้งแผ่นกั้นที่มีค่า $BR = 0.4$ จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานสูงกว่าทุกกรณี ในขณะที่เมื่อพิจารณาตัวประกอบค่าการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนจะพบว่าที่ค่า $BR = 0.2$ จะให้ค่าสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.59

คำสำคัญ: แผ่นกั้นวางสลับ, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, การสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน, การเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน

Abstract

The research studies on thermal performance enhancement and friction loss behavior in a constant heat - fluxed rectangular duct heat exchanger installed with staggered baffle. The experiments were carried out by varying the airflow rate for Reynolds number from 5300 to 24,000. Several staggered baffle characteristics were introduced such as baffle pitch to duct height ratio ($P/H = PR = 1$), baffle to duct height ratio ($e/H = BR = 0.1, 0.2, 0.3$ and 0.4) and baffle attack angle ($\alpha = 45^\circ$). The effect of BR on heat transfer friction loss behaviors and thermal enhancement factor was experimentally investigated. The heat transfer and friction loss were presented in terms of Nusselt number and friction factor respectively. The experimental results reveal that the rectangular duct installed staggered baffle with $BR = 0.4$ provides higher heat transfer and friction loss than the other cases, while the duct with $BR = 0.2$ yields the highest thermal enhancement factor is about 1.59.

Keywords: staggered baffle, heat exchanger, friction loss, thermal performance enhancement

1. บทนำ

ความเจริญก้าวหน้าด้านต่างๆ บนโลกในปัจจุบันส่งผลทำให้เกิดการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของภาคอุตสาหกรรมขนาดใหญ่อันส่งผลให้เกิดการพัฒนาด้านเทคโนโลยีในการผลิตไม่ว่าจะเป็นลักษณะของผลิตภัณฑ์ วัสดุและอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆอันส่งผลทำให้มีการตอบสนองต่อผู้ใช้ไม่ว่าจะเป็นในส่วนของเอกชนและรัฐบาลทั่วโลกต่างมีความตระหนักและเห็นถึงความสำคัญด้านการใช้พลังงานที่มีความต้องการเป็นอย่างมากในปัจจุบันและมีการใช้กันอย่างต่อเนื่องจนอาจทำให้เกิดผลกระทบในเวลาต่อมา อย่างไรก็ตามผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อม มลพิษ วิกฤตราคาเชื้อเพลิงและวิกฤตเศรษฐกิจ อาจส่งผลทำให้ทรัพยากรต่างๆหมดไปมากที่สุด ฉะนั้นแล้วการนำเอาองค์ความรู้ที่มีมาใช้ในการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ อย่างจริงจังก็จะส่งผลช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวลดความสูญเสียและร้ายแรงที่อาจเกิดขึ้นได้ในที่สุด ดังนั้นในการพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในปัจจุบันถือว่ามีความเป็นอย่างมากโดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมเนื่องจากมีการนำเอาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้งานในระบบจึงทำให้การใช้พลังงานยิ่งสูงขึ้นเพราะอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงจะย่อมส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนที่ดีขึ้นดังนั้นจึงส่งผลทำให้การออกแบบและ

การประยุกต์ใช้งานในหลายอย่าง ได้แก่ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เตาเผา เครื่องอบแห้ง เครื่องทำความเย็น เครื่องควบแน่น เป็นต้น อย่างไรก็ตามหลักการในการออกแบบอุปกรณ์และระบบจำเป็นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติและการตอบสนองต่อความต้องการเป็นอย่างดีเพื่อทำให้เกิดความเชื่อมั่นและน่าเชื่อถือต่อบุคคลที่นำไปใช้งาน แต่อย่างไรก็ตามการลดการใช้พลังงานของระบบจะนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนอย่างต่อเนื่องและส่งผลทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรเชื้อเพลิงอย่างคุ้มค่า

ครีป/แผ่นกั้นในลักษณะต่างๆ ถูกนำมาพัฒนาและมีบทบาทในการช่วยเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนที่ดีขึ้นโดยใช้หลักการพื้นฐานของการดูดซับความร้อนของชั้นความร้อน (Thermal Boundary Layer) ที่บริเวณชิดผนังตลอดความยาวท่อและพาความร้อนออกจากผนังท่อมายังบริเวณกลางท่อ อันเป็นผลทำให้เกิดการแยกตัวของของไหล การหมุนวนและการกระแทกเข้ากับผนังท่อ ซึ่งพฤติกรรมเหล่านี้เป็นสาเหตุนำไปสู่การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแต่อย่างไรก็ตามลักษณะของครีปที่จัดวางจะส่งผลให้การไหลเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับรูปทรงและลักษณะของทางจัดวางที่แตกต่างจนส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมไปถึงค่าสมรรถนะเชิงความร้อนโดยรวม

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการพัฒนารูปร่างของครีปในการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนจะส่งผลทำให้ค่า

สมรรถนะเชิงความร้อนดีขึ้นต่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ใน ท่อขนาน โดย Promthaisong and Promvong [1] ได้ ทำการศึกษาพฤติกรรมความร้อนในช่องขนานเครื่องอุ่น อากาศพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งครีบล้อกเหลี่ยมคางหมู วางเป็นรูปตัววีซึ่งพบว่าช่วยการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและ สมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศดีขึ้น Prasopsuk et al.[2] ได้ทำการทดลองติดตั้งปีกโค้งบนแผ่นดูดซับความร้อนภายในท่ออุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนให้ดีขึ้นโดยการทดลองช่วงเลขเรย์โนลด์อยู่ ระหว่าง 5400 ถึง 23,000 ซึ่งปีกโค้งจะทำมุมเอียง 45 องศา ตามทิศทางการไหลและยังพบว่าติดตั้งปีกโค้งจะให้ค่า อัตราการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานสูงกว่าท่อผนัง เรียบ Skullong et al. [3] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมความร้อน และการต้านทานการไหลภายในท่ออุ่นอากาศพลังงาน แสงอาทิตย์โดยใช้แผ่นดูดซับความร้อนชนิดร่องผสมปีก พูรณ โดยการทดลองพบว่าแผ่นดูดซับความร้อนดังกล่าวให้ ค่าการถ่ายเทความร้อนและการต้านทานการไหลสูงกว่าท่อ ผนังเรียบและมีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่าการใช้แผ่น ดูดซับความร้อนชนิดร่องเพียงอย่างเดียวในช่วง 37.7–46.3 เปอร์เซ็นต์ Skullong [4] ทำการศึกษาการทดลองเกี่ยวกับแรง เสียดทานของของไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่ออุ่น อากาศพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีติดตั้งครีบล้อกเหลี่ยมคางหมู บนแผ่นดูดซับความร้อน โดยศึกษาถึงประสิทธิภาพการ ระบายความร้อนที่มีผลต่อการติดตั้งครีบล้อกเอียงทำมุม ($\alpha = 45^\circ$ และ 60°) ซึ่งเงื่อนไขในการทดลองคือฟลักซ์ความร้อนคงที่ การไหลของอากาศภายในท่อเลขเรย์โนลด์ Reynolds (Re) อยู่ ระหว่าง 5300–23,000 ความสูงของครีบล้อกเท่ากับ ($b/H = BR = 0.1, 0.2$ และ 0.3) โดยพบว่าจากการทดลองการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบประมาณ 3.7–4.7 เท่า ในขณะที่ปัจจัยแรงเสียดทาน (f) ก็เพิ่มขึ้นเท่ากับ 24.4–70.7 เท่า Skullong et al. [5] ทำการศึกษาพฤติกรรม การถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการติดตั้งครีบบางบนแผ่นดูดซับความร้อนซึ่งพบว่า สามารถทำให้การถ่ายเทความร้อน ความเสียดทานและ สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีกว่าท่อผิวเรียบ Jim et al [6] ศึกษาเชิงตัวเลขของพฤติกรรม การไหลและการถ่ายเทความร้อน

ร้อนในเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยการติดตั้ง ครีบบรูปตัววีต่อเนื่องบนแผ่นดูดซับความร้อน พบว่าการ ติดตั้งครีบล้อกเอียง 45 องศาให้ค่าถ่ายเทความร้อนและค่า สมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด Chokphoemphun et al. [7] งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและแรงเสียด ทานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มี การติดตั้งแผ่นดูดซับความร้อนเซรามิกสามเหลี่ยมโดยมีมุม ปะทะที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 30 และ 45 องศาช่วงเลขเรย์ โนลด์อยู่ระหว่าง 6700 ถึง 17,000 จากการทดลองพบว่า การ ติดตั้งแผ่นดูดซับความร้อนที่ทำการเซรามิกสามเหลี่ยมจะ ช่วยในการเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนและแรงเสียดทานที่ สูงขึ้นและส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยมีค่าเท่ากับ 1.49 Promvong and Skullong [8] ได้ทำการศึกษาการติดตั้งปีกด้านบนแผ่นดูดซับ ความร้อนเพื่อเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนภายในท่อ แลกเปลี่ยนความร้อนทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยใช้ช่วงระยะเลข เรย์โนลด์อยู่ระหว่าง 4100 ถึง 25,500 และมีค่าอัตราการ ถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียแรงเสียดทานสูงกว่าท่อผนัง เรียบราว 5.7 และ 40 เท่า Promthaisong et al.[9] ได้ ทำการศึกษาเชิงทดลองสมรรถนะเชิงความร้อนภายในท่ออุ่น อากาศพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยการติดตั้งแผ่นดูดซับความ ร้อนแบบครีบล้อก โดยกรณีการศึกษาอิทธิพลของความสูงครีบล้อก จำนวน 4 ค่า ($e/H = 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4) มีอิทธิพลต่อการ ถ่ายเทความร้อน สัมประสิทธิ์ตัวประกอบเสียดทานและ สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อเทียบกับกรณีท่อผิวเรียบ Kumar et al.[10] ทำการทดลองเกี่ยวกับพฤติกรรมความร้อนและการ ไหลด้วยการติดตั้งครีบล้อกตัววีบนแผ่นดูดซับความร้อนภายใน เครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ผลการทดลองพบว่า การ ติดตั้งครีบล้อกตัววีมีค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 6.74 เท่า เมื่อเทียบกับแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบ Tamna et al.[11] ทำการทดลองร่วมกับการจำลองเชิงตัวเลขเกี่ยวกับการเพิ่ม การถ่ายเทความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีบนแผ่นดูดซับความร้อน จาก การวิจัยพบว่าติดตั้งแผ่นกั้นบนแผ่นดูดซับความร้อนให้ ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบ ถึง 622–753 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนอยู่

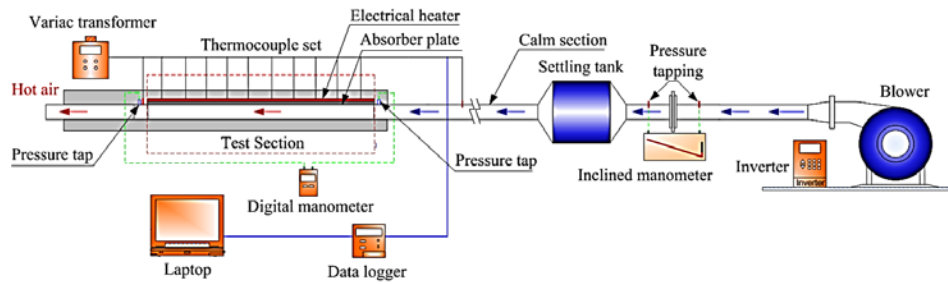
ที่ 1.83 โดยผลการทดลองมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลการจำลองเชิงตัวเลข Skullong et al.[12] ทำการทดลองเพื่อเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนให้แก่เครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์โดยติดตั้งแผ่นดูดซับความร้อนแบบร่องผสมปีกเจาะรู จากการทดลองพบว่าผลการติดตั้งแผ่นดูดซับความร้อนแบบร่องผสมปีกเจาะรูมีค่าการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อผนังเรียบ Hoonpong and Skullong [13] ทำการติดตั้งแผ่นกันตัววี้เพื่อเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งพบว่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 2.32–4.3 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบ Xiao et al.[14] ได้ศึกษาการจำลองเชิงตัวเลขถึงการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งครีบลีเหลี่ยมคางหมู โดยพบว่าแผ่นที่มีการติดตั้งครีบลีเหลี่ยมคางหมูจะสร้างการไหลที่ช่วยให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าแผ่นดูดซับผิวเรียบ Dong et al.[15] ได้ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการจำลองเชิงตัวเลขที่มีการติดตั้งครีบลีเหลี่ยมคางหมูที่มีมุมปะทะต่างๆ และทำการเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบ ซึ่งพบว่าครีบลีเหลี่ยมคางหมูมุมปะทะ 60 องศาจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด Promvong and Skullong [16] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยการติดแผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบลีเหลี่ยมคางหมู ผลการทดลองพบว่าผลการถ่ายเทความร้อนในกรณีที่ใช้ครีบลีเหลี่ยมคางหมูจะให้ค่าที่ดีกว่าการใช้ร่องเพียงอย่างเดียว Promvong and Skullong [17] ได้ทำการพัฒนาแผ่นกันติดตั้งกับแผ่นดูดซับความร้อนรูปตัววีผสมร่องเพื่อใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานเพื่อเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบ Promvong et al.[18] ได้ทำการศึกษาการจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์โดยมีการติดตั้งปีกรูปตัววีเจาะรูบนแผ่นดูดซับความร้อนและเปรียบเทียบกับแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบ โดยการศึกษาพบว่าผลการติดตั้งครีบลีเหลี่ยมคางหมูบนแผ่นดูดซับความร้อนจะช่วยให้ภายในเครื่องอุ่นอากาศมีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าแผ่นดูดซับความร้อนผนังเรียบเท่ากับ 17.1–78.21 เปอร์เซ็นต์และมีสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 2.1 Jayranaiwachira

et al.[19] ได้ทำการทดลองหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งแผ่นดูดซับความร้อนแบบเจาะรูร่องมีครีบลีเหลี่ยมคางหมูเรียงทำมุม 0, 45, 90 และ 135 องศา ซึ่งจากการศึกษาพบว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 4.94–5.10 Baissi et al.[20] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมความร้อนที่มีผลต่อการไหลภายในท่ออุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยการติดตั้งครีบลีเหลี่ยมคางหมู 45 องศา บนแผ่นดูดซับความร้อน ซึ่งการทดลองพบว่าค่าการถ่ายเทความร้อนและการต้านทานการไหลสูงกว่าท่อผนังเรียบ

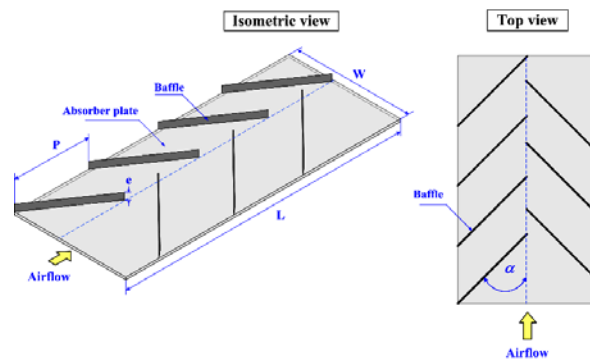
จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าผลการติดตั้งแผ่นกันจะช่วยให้เกิดการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้เป็นอย่างดีดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมีแนวทางในการพัฒนาแผ่นกันเพื่อติดตั้งภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทรงรีเหลี่ยมคางหมูเพื่อให้เกิดการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นและทำการเปรียบเทียบอิทธิพลการติดตั้งผลต่างของความสูงแผ่นกันต่างๆ กับท่อผนังเรียบว่ามีผลต่อการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในสภาวะปลั๊กความร้อนคงที่ โดยการทดลองการศึกษาดังกล่าวใช้อากาศเป็นของไหลในการทดสอบซึ่งการไหลแบบปั่นป่วนที่มีค่าเลขเรย์โนลด์อยู่ระหว่าง 5300 ถึง 24,000

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาลักษณะการทดลองการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนโดยใช้แผ่นกันวางสลับภายในท่อรีเหลี่ยมคางหมู ซึ่งการทดลองจะใช้ขนาดความสูงท่อเท่ากับ 30 มิลลิเมตร มีความยาวของแผ่นดูดซับความร้อนที่ทำการติดแผ่นกันวางสลับเท่ากับ 420 มิลลิเมตร กว้าง 300 มิลลิเมตร โดยการทดลองจะมีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนความสูงแผ่นกันต่อความสูงท่อเท่ากับ $(c/H = BR)$ 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 และใช้ช่วงในการควบคุมความเร็วลมให้อยู่ในช่วงเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 5300 ถึง 24,000 ในช่วงเวลาการทดสอบจะต้องรอให้อุณหภูมิผิวภายในทั้ง 12 จุดและอุณหภูมิเข้าออก 2 จุดมีค่าคงที่ก่อนจึงจะบันทึกค่าในขณะเดียวกันจะต้องดำเนินการวัดค่าความดันตกคร่อมระหว่างส่วนทดสอบด้วย โดยแสดงในรูปที่ 1 และตำแหน่งการติดตั้ง-จุดวัดของชุดทดลองดังรูปที่ 2

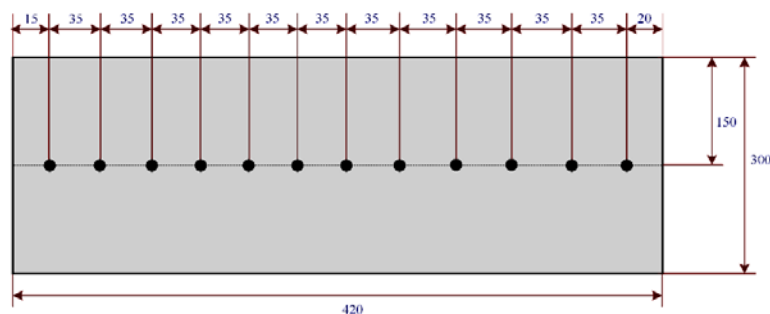


รูปที่ 1 โดอะแกรมชุดทดลองเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า



(ก)

All dimensions in mm



(ข)

รูปที่ 2 แสดงลักษณะตำแหน่งการติดตั้งและจุดวัดของชุดทดลอง (ก) ส่วนทดสอบที่มีการติดตั้งแผ่นกั้น และ (ข) ตำแหน่งติดตั้งจุดวัดอุณหภูมิ

จากตารางที่ 1 เป็นการแสดงถึงค่าความแม่นยำของเครื่องมือวัดและค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง [20]

การทดลองจะเริ่มตั้งแต่เปิดสวิตช์พัดลมแรงดันขนาด 3 กิโลวัตต์ ซึ่งการไหลของแรงดันอากาศจะไหลผ่านแผ่นออริฟิซสำหรับวัดอัตราการไหลของอากาศก่อนเข้าสู่แท่งปรับสภาพการไหล (Settling tank) ของอากาศและมีช่องปรับสภาพการไหล (Calm section) ของอากาศให้มีลักษณะพัฒนาเต็มที่ (Fully developed flow) ดังแสดงใน รูปที่ 2 (ก) ก่อนเข้าสู่ส่วนทดสอบ (แผ่นดูดซับความร้อนที่ติดตั้งแผ่นกั้น

วางสลับ) โดยช่วงทดสอบจะมีการติดตั้งดังแสดงใน รูปที่ 2 (ข) เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (K-type thermocouple) จำนวน 12 โดยมีระยะ จุดทำหน้าที่วัดอุณหภูมิผิวแผ่นดูดซับความร้อนและเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดอาร์ทีดี (RTD PT100) จำนวน 2 จุดใช้วัดอุณหภูมิทางเข้าทางออก ซึ่งข้อมูลอุณหภูมิจะส่งสัญญาณไปยังเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger FLUKE 2680A) และประมวลผลมายังเครื่องคอมพิวเตอร์ ในส่วนของดิจิทัลโวลต์มิเตอร์จะถูกนำมาใช้ในการวัดค่าความดันตกคร่อมส่วนทดสอบ จากนั้นนำผลการทดลองมาพิจารณาตามทฤษฎีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1 แสดงถึงความแม่นยำของเครื่องมือวัด

เครื่องมือวัด	ความแม่นยำ
เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดอาร์ทีดี (RTD PT100)	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (K-type thermocouple)	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
มานอมิเตอร์ (Manometer)	$\pm 0.5\%$
ตัวแปร	ความคลาดเคลื่อน
เลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re)	$\pm 4.5\%$
เลขนัสเซล (Nusselt number, Nu)	$\pm 5.2\%$
ประกอบเสียดทาน (Friction factor, f)	$\pm 6.1\%$

การหาค่าการถ่ายเทความร้อนภายในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยเลขเรย์โนลด์ในท่อนของไฮดรอลิกส์ไดมิเตอร์ (D_h) สามารถเขียนได้ดัง สมการที่ (1)

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (1)$$

เมื่อ V เป็นความเร็วเฉลี่ย, μ เป็นความหนืดสมบูรณ์ของของไหล และ h เป็นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย ซึ่งหาได้จากการวัดอุณหภูมิและความร้อนที่ป้อนเข้าระบบ ความร้อนที่ให้กับอากาศและความแตกต่างของอุณหภูมิผนังและอุณหภูมิอากาศ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยหาได้จากสมการ

$$h = \frac{Q}{A(T_w - T_b)} \quad (2)$$

เมื่อ A คือพื้นที่ผิวสัมผัสการถ่ายเทความร้อน, T_w คือค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่วัดจากจุดแต่ละจุดของผนังจำนวน 12 จุด, T_b คืออุณหภูมิของกลุ่มอากาศโดยสามารถคำนวณได้จาก $T_b = (T_i + T_o)/2$, โดย T_i และ T_o คืออุณหภูมิทางเข้าและอุณหภูมิทางออก ในท่อนของ Q สามารถหาได้จาก $Q = \dot{m} C_p \Delta T$ โดยที่ $\dot{m}$ คืออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ และ ΔT คือค่าผลต่างของอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออก เลขนัสเซลเขียนได้เป็น

$$Nu = \frac{h D_h}{k} \quad (3)$$

ตัวประกอบแรงเสียดทานเขียนได้เป็น สมการที่ (4)

$$f = \frac{2 D_h \Delta P}{\rho U^2 L} \quad (4)$$

โดยที่ ΔP คือความดันตกคร่อม และ ρ คือความหนาแน่นของอากาศ

ซึ่งการหาค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$TEF = \left(\frac{Nu}{Nu_o} \right) \left(\frac{f}{f_o} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

ในการทดลองมีการหาค่าความแม่นยำของเครื่องมือวัดรวมถึงค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองจากเอกสารอ้างอิง [21] และมีการทดลองซ้ำเพื่อความถูกต้องของข้อมูลในงานวิจัย

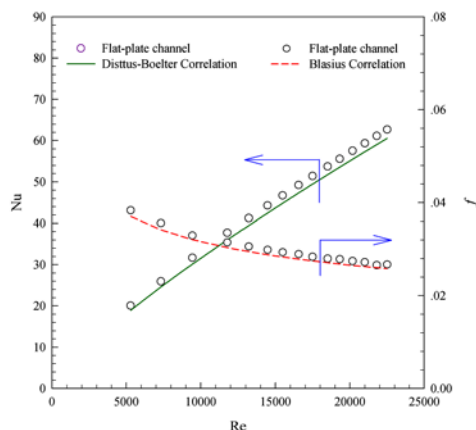
3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 การตรวจสอบท่อผนังเรียบ

การทดลองเป็นการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนโดยใช้แผ่นกั้นวางสลับภายในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีความสูงของช่องขนานเท่ากับ 30 มิลลิเมตร ($AR = 10$), ความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงท่อที่ ($BR = e/H = 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4), ที่มุมปะทะ ($\alpha = 45^{\circ}$) การจัดวางระยะพิคต์ ($P = 30$ มิลลิเมตร) โดยมีช่วงระยะแผ่นดูดซับความร้อน (Test section) ความยาวเท่ากับ 420 มิลลิเมตร ซึ่งการทดลองดังกล่าวจะแสดงผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานกรณีท่อ

ผนังเรียบเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์จากเอกสารอ้างอิง Dewitt et al.[21], แสดงผลของความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลกับเลขเรย์โนลด์, แสดงผลของความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนเลขนัสเซลกับเลขเรย์โนลด์, แสดงผลของความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์, แสดงผลของความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ และ แสดงผลการเปรียบเทียบเลขเรย์โนลด์กับสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 3 เป็นผลการทดลองเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานกรณีท่อผนังเรียบเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter และ Blasius สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อจากเอกสารอ้างอิง Dewitt et al.[21] โดยแสดงการเปรียบเทียบค่า Nu และ f ระหว่างผลการทดลองกรณีแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบกับสหสัมพันธ์จากสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ พบว่า ค่า Nu มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 6.6% ขณะที่ f มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 7.3% ทั้งนี้เป็นการเปรียบเทียบเพื่อความแม่นยำของชุดทดสอบ โดยผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับสหสัมพันธ์



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลกับเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์กรณีท่อผนังเรียบ

สหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter

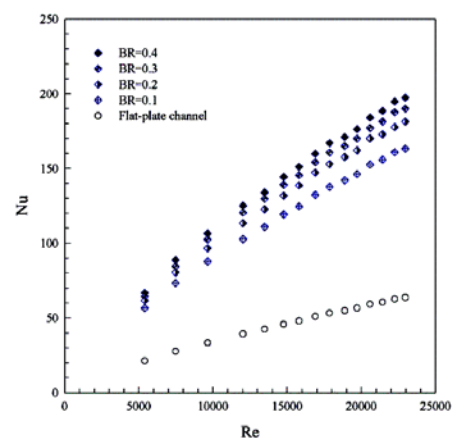
$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (6)$$

สหสัมพันธ์ของ Blasius

$$f = 0.316Re^{-0.25} \quad (7)$$

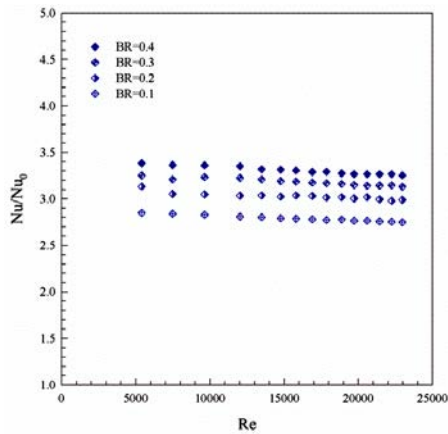
3.2 การถ่ายเทความร้อน ความเสียดทาน และสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนในพจน์ (Nu) กับค่าการไหลในพจน์ (Re) จากการทดลองพบว่าการติดตั้งแผ่นกั้นที่ความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงท่อ ($BR=0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4) จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของการไหลในพจน์ (Re) โดยแผ่นกั้นความสูงที่ $BR=0.4$ จะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนดีที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่นๆ เนื่องจากของไหลที่ไหลผ่านแผ่นกั้นที่มีความสูงมากจะมีระดับความปั่นป่วนในท่อนามากและส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวท่อที่มีอุณหภูมิสูงและของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าได้ดี

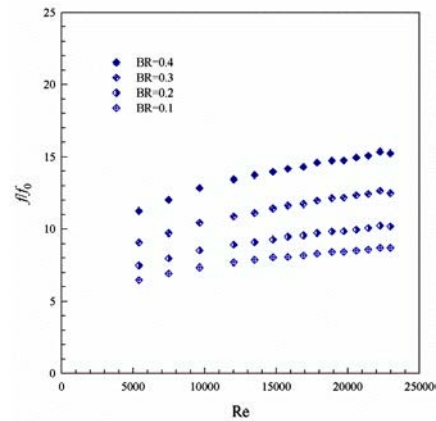


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับเลขนัสเซล

รูปที่ 5 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลกรณีติดตั้งแผ่นกั้นวางสลับต่อเลขนัสเซลผนังเรียบ (Nu/Nu_0) กับค่าการไหลที่พจน์ (Re) จากการทดลองพบว่าค่า (Nu/Nu_0) มีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น โดยค่า (Nu/Nu_0) กรณี ($e/H=0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.89, 3.21, 3.36 และ 3.4 เท่าตามลำดับ

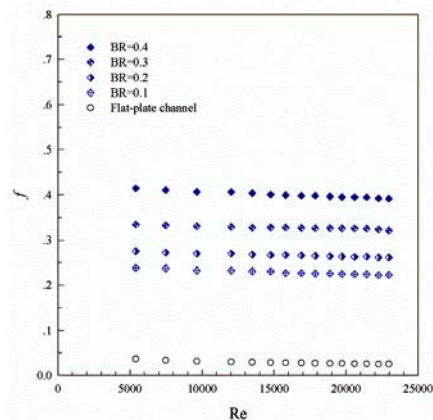


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับสัดส่วนเลขนัสเซล



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับสัดส่วนตัวประกอบเสียดทาน

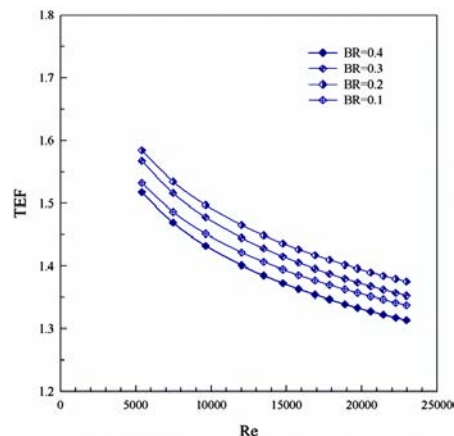
รูปที่ 6 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเสียดทาน (f) กับการไหลในพจน์ (Re) จากการทดลองพบว่าการติดตั้งแผ่นกั้นที่มีความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงท่อ ($BR = b/H$) จะให้ค่าความเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความสูงแผ่นกั้น โดยแผ่นกั้นที่มีความสูง $BR = 0.4$ จะขัดขวางการไหลของของไหลกว่ากรณีอื่นๆ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับตัวประกอบเสียดทาน

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเสียดทานกรณีติดตั้งแผ่นกั้นกับความเสียดทานท่อผนังเรียบ (f/f_0) จากการทดลองพบว่าค่า (f/f_0) มีแนวโน้มค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น โดยผลการทดลองพบว่ากรณี $e/H = 0.4$ มีค่าความเสียดทานสูงสุดตามด้วย $e/H = 0.3, 0.2$ และ 0.1 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 14.6, 11.2, 8.6 และ 6.2 ตามลำดับ

รูปที่ 8 เป็นการประเมินผลของสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากสมการที่ (5) ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ในรูปของสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TEF) กับการไหลในพจน์ Re โดยพบว่าการติดตั้งแผ่นกั้นวางสลับที่มีความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงท่อ $BR = 0.2$ จะให้ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนความสูงที่สุดเท่ากับ 1.59 และตามด้วย $BR = 0.3, 0.1$ และ 0.4 มีค่าเท่ากับ 1.56, 1.54 และ 1.52 ตามลำดับ

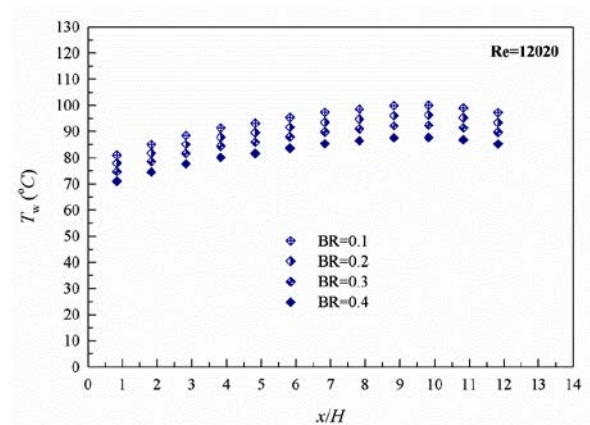


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์

3.3 ผลกระทบระหว่างอุณหภูมิผิวกับระยะช่วงทดสอบ

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิว (T_w) กับระยะช่วงทดสอบ (x/H) ระหว่าง 1 ถึง 12 ของการเปรียบเทียบตามสัดส่วนความสูงของแผ่นกั้น ($BR = 0.1$,

0.2, 0.3 และ 0.4) ที่เลขเรย์โนลด์ 12,020 โดยเมื่อพิจารณาจากการทดลองพบว่าเมื่อระยะช่วงทดสอบที่ยาวขึ้น อุณหภูมิจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มเป็นเชิงเส้นและจะลดลงเล็กน้อยที่บริเวณทางออกของท่อเนื่องจากผลกระทบที่ทางออกซึ่งอากาศร้อนภายในท่อไหลไปสู่อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำด้านนอกท่อ โดยการติดตั้งแผ่นกั้นที่ $BR = 0.1$ มีค่าอุณหภูมิผิวสูงสุด ตามด้วย $BR = 0.2, 0.3$ และ 0.4 ตามลำดับ เนื่องจากของไหลที่ไหลผ่านแผ่นกั้นที่มีความสูงน้อยจะเกิดการไหลหมุนวนน้อยส่งผลให้เกิดการระบายความร้อนบริเวณผิวท่อน้อยตามเมื่อเทียบกับแผ่นกั้นที่มีความสูงมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4 และสมการที่ (2) คือ กรณี $BR = 0.4$ ให้ค่า T_w น้อย เมื่อนำไปคำนวณในสมการที่ (2) จะทำให้ h มีค่ามาก และเมื่อนำไปแทนในสมการที่ (3) จะส่งผลให้ Nu มีค่าสูงสุดสำหรับกรณีทดสอบนี้ โดยจะเห็นได้ชัดเจนจากรูปที่ 4

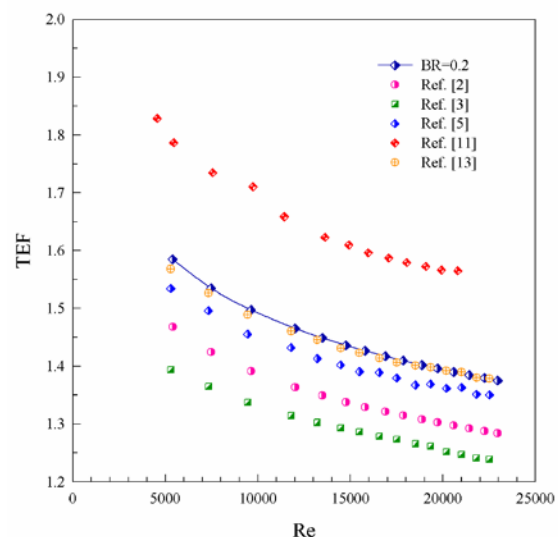


รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิว (T_w) กับ ระยะช่วงทดสอบ (x/H)

3.4 การเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับงานวิจัยในอดีต

การเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของงานวิจัยปัจจุบันกับงานวิจัยในอดีตแสดงในรูปที่ 10 โดยคัดเลือกค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงสุด (Maximum TEF, TEF_{Max}) ของงานวิจัยนี้ เปรียบเทียบกับ TEF_{Max} ของงานวิจัยในอดีตจากเอกสารอ้างอิง [2],[3],[5],[11] และ [13] จากการเปรียบเทียบพบว่า TEF_{Max} ของงานวิจัยนี้มี

ค่าสูงกว่า TEF_{Max} ของงานวิจัยในอดีตจากเอกสารอ้างอิง [2],[3],[5] และ [13] อยู่ที่ 1–13% แต่มีค่าต่ำกว่างานวิจัยในอดีตจากเอกสารอ้างอิง [11] เฉลี่ย 11% เนื่องจากงานวิจัยในอดีตจากเอกสารอ้างอิง [11] ทำการจัดวางแผ่นกั้นแบบต่อเนื่อง ทำให้มีค่าการถ่ายเทความร้อนสูง แต่ค่าความเสียดทานก็เพิ่มขึ้นสูงมากเช่นกัน ซึ่งโดยภาพรวมเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยส่วนใหญ่ในอดีตแล้ว การติดตั้งแผ่นกั้นวางสลับของงานวิจัยนี้ถือว่ามีข้อได้เปรียบในแง่ของสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน อย่างไรก็ตาม คณะผู้วิจัยจะทำการออกแบบแผ่นกั้นรูปทรงใหม่ๆ และทำการทดสอบเพื่อให้ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงๆ และให้มีค่าความเสียดทานต่ำๆ อันจะส่งผลทำให้สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงยิ่งขึ้นต่อไปในงานวิจัยเรื่องถัดไป



รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของงานวิจัยปัจจุบันกับงานวิจัยในอดีต

4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสรุปได้ว่าการติดตั้งแผ่นกั้นวางสลับภายในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อหาค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและค่าความเสียดทานที่ผลต่ออิทธิพลการติดตั้งแผ่นกั้นวางสลับที่มีการปรับเปลี่ยนตามสัดส่วนความสูงของแผ่นกั้น ($BR = 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4) มีผลต่อการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน โดยการทดสอบจะใช้

อากาศในการทำงานแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงในเทอมของเลขเรย์โนลด์ (Re) ในช่วงระหว่าง 5300 ถึง 24,000 ซึ่งจากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การติดตั้งแผ่นกั้นภายในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นแต่ในขณะเดียวกันยังส่งผลทำให้เกิดแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามในการติดตั้งแผ่นกั้นดังกล่าวจะส่งผลดีต่ออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นกว่าท่อผนังเรียบเท่ากับ 2.8 ถึง 3.4 เท่า

2) เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นภายในท่อยังส่งผลทำให้ทราบถึงผลที่มีต่อความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงท่อในการถ่ายเทความร้อนและการเกิดแรงเสียดทานภายในท่อ โดยพบว่าเมื่อติดตั้งแผ่นกั้นที่มีความสูงจะช่วยให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นเพราะของไหล (อากาศ) จะไปกระทบกับผิวร้อนจะส่งผลให้ของไหลไปทำลายชั้นขอบเขตความร้อนเพื่อให้เกิดการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นที่ $(b/H = BR)$ 0.4, 0.3, 0.2 และ 0.1 ตามลำดับ

3) จากการเปรียบเทียบการติดตั้งแผ่นกั้นกับกรณีท่อผนังเรียบพบว่าที่การติดตั้งแผ่นกั้น $(b/H = BR)$ เท่ากับ 0.2 จะให้ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด (TEF) โดยจะให้ค่าสูงสุดเท่ากับ 1.59

5. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยดังกล่าวสามารถนำไปพัฒนาเกี่ยวกับระบบแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้อากาศเป็นของไหลในการทำงานได้และยังสามารถนำไปเป็นต้นแบบในการพัฒนาระบบอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ได้เช่นเดียวกันซึ่งจะทำให้เกิดสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีขึ้นกว่าระบบเดิม

เอกสารอ้างอิง

[1] P. Promthaisong and P. Promvonge, "Thermal behaviors in solar air heater channel with v-shaped trapexoidal-ribs on absorber plate," *Engineering Transactions*, vol 21, no. 1, pp. 62–80, 2018.

- [2] C. Prasopsuk, W.Chingtuaythong, P. Promvonge, S. Wittayapiyanon and S. Skullong, "Heat transfer and friction in solar air heater duct with curved-winglet roughness on absorber plate," in *Me-nett 31st*, Nakhon Nayok, Thailand, Jul. 4–7, 2017, pp. 1161–1168.
- [3] S. Skullong, "Performance Enhancement in a Solar air heater duct with inclined ribs mounted on the absorber," *Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 55–64, 2017, doi: 10.14456/jrame.2017.5.
- [4] S. Skullong, P. Promvonge, C. Thianpong and M. Pimsarn, "Thermal Performance in Solar Air Heater Channel with Combined Wavy-groove and Perforated-delta Wing Vortex Generators," *Applied Thermal Engineering*, vol. 100, pp. 611–620, 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.107.
- [5] S. Skullong, C. Thianpong and P. Promvonge, "Effects of rib size and arrangement on forced convective heat transfer in a solar air heater channel," *Heat Mass Transfer*, vol. 51, pp. 475–1485, 2015, doi: 10.1007/s00231-015-1515-5.
- [6] D. Jin, M. Zhang, P. Wang and S. Xu, "Numerical investigation of heat transfer and fluid flow in a solar air heater duct with multi V-shaped ribs on the absorber plate," *Energy*, vol. 89, pp. 178–190, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.07.069.
- [7] S. Chokphoemphun, S. Hongkong, S. Thongdaeng and S. Chokphoemphun, "Experimental study and neural networks prediction on thermal performance assessment of grooved channel air heater," *International Journal of Heat and Mass Transfer* vol. 163, 2020, Art. no. 120397, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120397.
- [8] P. Promvonge and S. Skullong, "Enhanced heat transfer in rectangular duct with punched winglets," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 28, no. 3, pp. 660–671, 2020, 10.1016/j.cjche.2019.09.012.

- [9] P. Promthaisong, P. Hoonpong, P. Eiamsa-ard, N. Koolnapadol, P. Promvonge and S. Skullong, "Experimental Investigation on Thermal Performance in a Solar Air Heater with Ribbed Absorber Plate," *Journal of Renewable Energy for Community*, vol. 5, no. 1, pp. 80–89, 2022.
- [10] A. Kumar, R. P. Saini and J. S. Saini, "Development of correlations for Nusselt number and friction factor for solar air heater with roughened duct having multi v-shaped with gap ribs as artificial roughness," *Renewable Energy*, vol. 58, pp. 151–163, 2013, doi: 10.1016/j.renene.2013.03.013.
- [11] S. Tamna, S. Skullong, C. Thianpong and P. Promvonge, "Heat transfer behaviors in a solar air heater channel with multiple V-baffle vortex generators," *Solar Energy*, vol. 110, pp. 720–735, 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.10.020.
- [12] P. Hoonpong and S. Skullong, "Performance improvement of solar air heater with v-baffles on absorber plate," *Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 29–39, 2018, doi: 10.14456/jrame.2018.4.
- [13] H. Xiao, Z. Dong, Z. Liu and W. Liu, "Heat transfer performance and flow characteristics of solar air heaters with inclined trapezoidal vortex generators," *Applied Thermal Engineering*, vol. 179, 2020, Art. no. 115484, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115484.
- [14] Z. Dong, P. Liu, H. Xiao, Z. Liu and W. Liu, "A study on heat transfer enhancement for solar air heaters with ripple surface," *Renewable Energy*, vol. 172, pp. 477–487, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.03.042.
- [15] P. Promvonge and S. Skullong, "Heat transfer in solar receiver heat exchanger with combined punched-V-ribs and chamfer-V-grooves," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 143, pp. 1–15, 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118486.
- [16] P. Promvonge and S. Skullong, "Thermal characteristics in solar air duct with V-shaped flapped-baffles and chamfered-grooves," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 172, 2021, Art. no. 121220, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121220.
- [17] P. Promvonge, P. Promthaisong and S. Skullong, "Numerical heat transfer in a solar air heater duct with punched delta-winglet vortex generators," *Case studies in thermal engineering*, vol. 26, 2021, Art. no. 101088, doi: 10.1016/j.csite.2021.101088.
- [18] N. Jayranaiwachira, P. Promvonge and S. Skullong, "Thermal-hydraulic performance of solar receiver duct with inclined punched-ribs and grooves," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 39, 2022, Art. no. 102437, doi: 10.1016/j.csite.2022.102437.
- [19] M. T. Baissi, A. Brima, K. Aoues, R. Khanniche and N. Moummi, "Thermal behavior in a solar air heater channel roughened with delta-shaped vortex generators," *Applied Thermal Engineering*, vol. 165, 2020, Art. no. 113563, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.134.
- [20] R.J. Moffat, "Describing the uncertainties in experimental results," *Thermal and Fluid Science*, vol. 1, no. 1, pp. 3–17, 1988, doi: 10.1016/0894-1777(88)90043-X.
- [21] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman and A. S. Lavine, "Internal Flow," in *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Hoboken, NJ, USA: John-Wiley & Sons, 2006, ch. 8, sec. 8.5–8.10, pp. 514–532.