

การทบทวนการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยแผ่นกั้นสร้างความปั่นป่วน

A review of heat transfer enhancement with baffle turbulators

อานัติ พิลลา วรินทร์ เกียรติคุณ และ สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

พิชิต แก้วโกสุม

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
Email: 66016068@kmitl.ac.th

อนุชา สายสร้อย และ ขวัญชัย หนาแน่น

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ตำบล นาวิ้ง อำเภอมือง เพชรบุรี 76000

Manuscript Received June 17, 2024

Revised June 24, 2024

Accepted June 26, 2024

บทคัดย่อ

การปรับปรุงพื้นผิว การใส่แผ่นกั้นสร้างความปั่นป่วน รวมถึงการปรับเปลี่ยนรูปทรงของช่องหรือท่อ และการใช้นาโนฟลูอิด เป็นเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมากในปัจจุบัน การสร้างพื้นผิวหยาบเทียม เช่น การติดแผ่นกั้นและอุปกรณ์ที่รูปทรงคล้ายกัน เป็นหนึ่งในเทคนิคช่วยสร้างความปั่นป่วนในช่องอากาศที่ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อน และเครื่องอุณหภูมิล้างงานแสงอาทิตย์ โดยทั่วไปการปรับปรุงพื้นผิวหยาบส่งผลให้ทั้งเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นและเพิ่มแรงเสียดทานขึ้นด้วย เพื่อประเมินการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนโดยรวมจะประเมินโดยคำนึงถึงทั้งการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบความเสียดทานร่วมกัน แผ่นกั้นสร้างความปั่นป่วนเป็นหนึ่งในอุปกรณ์ของวิธีแบบพาสซีฟเพื่อใช้ในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน บทความนี้มุ่งเน้นไปที่การสำรวจวรรณกรรมเครื่องทำความร้อนอากาศจากแสงอาทิตย์ที่มีแผ่นกั้นสร้างความ

ปั่นป่วน ในบทความนี้ประกอบด้วยบททบทวนลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนของแผ่นกั้นสร้างความปั่นป่วนประเภทต่าง ๆ

คำสำคัญ: แผ่นกั้น การถ่ายเทความร้อน ค่าตัวประกอบความเสียดทาน วิธีแบบพาสซีฟ การเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน

ABSTRACT

Surface modification, turbulator insertion, duct/tube form modification, and nanofluid application are among the most extensively used heat transfer improvement techniques. Surface modification with artificial roughness, such as baffles and similar devices, is one of the most effective ways to generate turbulence in air channels used as heat exchangers, and solar air heaters. In general, the usage of rough surfaces resulted in both preferred heat transfer enhancement and an undesirable friction loss. To assess the augmented system's practical use, the overall thermal performance is assessed while

accounting for both heat transfer augmentation and friction loss. The baffle turbulator is one of the passive methods to improve heat transfer rates. This research focuses on a literature review of solar air heaters using baffle turbulators. The research discusses the heat transfer characteristics and thermal performance enhancements of several types of baffle turbulators.

Keywords: Baffle, heat transfer, friction factor, passive method, thermal performance enhancement

1. ข้อมูลทั่วไป

ปัจจุบันประเทศไทยมีแนวโน้มการใช้พลังงานสูงขึ้นทุกปี เนื่องจากความต้องการพลังงานมีการเพิ่มสูงขึ้นในทุกวัน ทั้งจากภาคครัวเรือน ภาคอุตสาหกรรม และ ภาคอื่น ๆ รวมทั้งอัตราค่าไฟฟ้าในปัจจุบันก็มีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จากการใช้พลังงานของภาคอุตสาหกรรมสูงขึ้น ทำให้เกิดต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์และสังคมที่สูงตามไปด้วย ส่งผลกระทบต่อวิถีชีวิตของผู้คนในสังคมที่มีค่าใช้จ่ายสูงตามไปด้วย ดังนั้นการมองหาแนวทางการลดพลังงานและแนวทางการลดใช้พลังงานหรือใช้พลังงานที่มีอยู่ในธรรมชาติจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการลดต้นทุนในภาคการผลิตและภาคส่วนอื่น ๆ ได้เป็นอย่างดี ทำให้เกิดการใช้พลังงานได้อย่างคุ้มค่าและยั่งยืน

เทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนถือเป็นหนึ่งในเทคนิคการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและลดการใช้พลังงาน ซึ่งถูกนำเสนอโดย Liu และ Sakr [1] แบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่หนึ่งแบบแอคทีฟ (Active Technique) เป็นเทคนิคที่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกเพื่อกระตุ้นการไหลให้เกิดการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน รูปแบบที่สองแบบพาสซีฟ (Passive Technique) เป็นวิธีที่ไม่ต้องการพลังงานจากภายนอกในการช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ทั้งนี้การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากการสร้างความปั่นป่วนของของไหล โดยเพิ่มชิ้นงานสอดใส่เข้าไปในช่อง หรือ มีการปรับปรุงสภาพพื้นผิวชิ้นงานรูปแบบต่าง ๆ เช่น การติดตั้งแผ่นกั้น (Baffle) การใช้ครีป (Ribs) หรือ ชิ้นงานสร้างความปั่นป่วนรูปทรงต่าง ๆ ซึ่งการสอดใส่อุปกรณ์เสริมเข้าไปเป็นการช่วยสร้างความปั่นป่วนการไหลบริเวณผิวท่อ ช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ผิวให้สูงขึ้น สำหรับรูปแบบที่ 3 เป็นวิธีที่นำวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มารวมกัน

เป็นเทคนิคการถ่ายเทความร้อนแบบผสม (Combination of the above Two Methods)

โดยทั่วไปในงานวิจัย นิยมนำวิธีเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบพาสซีฟ (Passive Technique) ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมอย่างแพร่หลายมาใช้เพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยการติดตั้งชิ้นงาน หรือ การปรับปรุงพื้นผิวรูปแบบต่าง ๆ เพื่อสร้างความปั่นป่วนที่ผิวท่อ ตัวอย่างการศึกษาเชิงทดลองและเชิงตัวเลข (Experimental and Numerical Studies) เพื่อค้นหารูปทรงที่เหมาะสมที่สุดของพื้นผิวที่ถูกดัดแปลงในหลากหลายรูปแบบ [2] – [11] การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยทำการประเมินจากค่าตัวประกอบของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Thermal Enhancement Factor : TEF) ซึ่งเป็นการประเมินที่พิจารณาร่วมกันทั้งการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานที่เกิดขึ้น โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะทางความร้อนของระบบระบายความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น การปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์รูปทรงทางเรขาคณิตของพื้นผิว ที่ทำการปรับเปลี่ยนไม่ว่าจะเป็น ความกว้าง ความยาว รูปร่าง ความหยาบ อัตราส่วนการบิด หรือ ทิศทางการบิด เป็นต้น และมีตัวอย่างงานวิจัยที่ทำการสอดใส่ ครีป หรือแผ่นกั้นหลากหลายรูปแบบ ได้แก่ แบบครีปตัวที (T-Ribs) กลับหัววางตามแนวขวาง (Transverse Inverted T-Ribs) [3] แบบผนังขวางแบบซีรีส์สามจุด (Three-Point Series Transverse Wall) [8] แบบครีปสามเหลี่ยมหยัก (The Serrated Triangle Ribs) [9] แบบครีปขวางและรูปตัววีแบบไม่ต่อเนื่อง (Transverse and V-Shaped Broken Ribs) [11] รวมถึงศึกษาผลกระทบของความหยาบผิว (The Effects of Roughness) [4-6] และอัตราส่วนการขวางกั้นของครีป (Blockage Ratio of Ribs) [2], [7] – [8], [10]

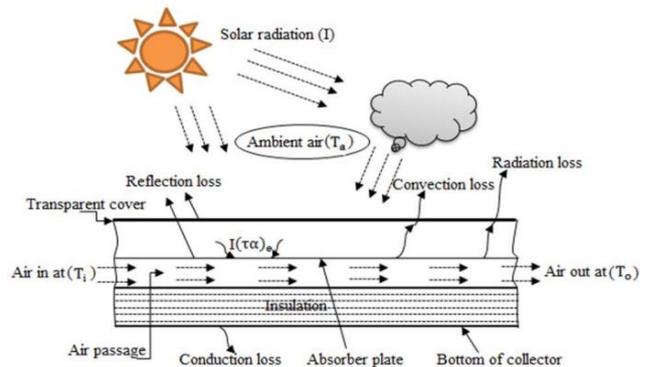
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นอุปกรณ์ที่มีการออกแบบมาเพื่อช่วยให้อุปกรณ์ดังกล่าวเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนจากของไหลที่มีอุณหภูมิสูงไปยังของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำ หรือ เพื่อถ่ายเทความร้อนออกจากพื้นผิวที่มีความร้อน จุดประสงค์ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีหลายประการตามการประยุกต์ใช้ในแต่ละอุปกรณ์ เช่น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่นำเทคนิคการพาความร้อนด้วยของไหล มาใช้ในการระบายความร้อน เช่น หม้อน้ำรถยนต์ หม้อต้มไอน้ำ เครื่องปรับอากาศด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การหล่อเย็นช่องภายในของใบกังหันก๊าซ เครื่องปรับอากาศ เป็นต้น โดยการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ก็เพื่อให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยน

ความร้อนนำเอาพลังงานความร้อนมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด รวมทั้งการออกแบบเพื่อให้ประหยัดพลังงาน การวางระบบการทำงานให้เป็นไปตามมาตรฐาน ทำงานได้เต็มประสิทธิภาพจึงเป็นเรื่องที่สำคัญ และ ช่วยให้ต้นทุนการใช้พลังงานลดลง รวมทั้งช่วยยืดอายุการใช้งานหรืออายุการทำงานของอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนให้ยาวนานออกไปได้

อุปกรณ์ที่มีความนิยมในการนำไปใช้งาน และศึกษาถึงแนวทางการลดพลังงานได้แก่ ท่ออุณหอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Air Heater) แบบช่องขนานผนังเรียบ ซึ่งจะเป็นการส่งผ่านความร้อนจากแสงอาทิตย์ผ่านลงมาในช่องเพื่อทำการสะสมความร้อนบริเวณผิวท่อ และจะมีการใช้วัสดุดูดซับความร้อน (Absorber Plate) วางในตำแหน่งพื้นด้านล่าง และส่งผ่านอากาศหรือลมเข้าไปในช่องเพื่อพาความร้อนที่สะสมไว้บริเวณพื้นผิว นำไปใช้ประโยชน์ต่อไป เช่น นำไปอุ่น หรือ อบให้ความร้อน กับการอบ หรือ ตากอาหารให้แห้งได้เร็วขึ้นโดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ซึ่งประหยัดกว่าการใช้พลังงานไฟฟ้า หรือ พลังงานจากเชื้อเพลิงเพียงอย่างเดียว ลักษณะการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนท่ออุณหอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ จะทำเป็นกล่อง (รูปร่างเหมือนช่องขนาน) มีช่องให้ลมเข้า และผนังด้านในบริเวณพื้นผิวที่รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ บุด้วยฉนวนกันความร้อนเพื่อเก็บความร้อนสะสมที่มาจากแดด แล้วปิดฝาข้างหน้าด้วยกระจกใส เมื่อวัสดุดูดซับความร้อนมีความร้อนสะสมอยู่ระดับที่สูงบริเวณผิวจะมีการส่งผ่านความร้อนโดยพาพัดที่สามารถดูดอากาศผ่านช่องขนานของท่ออุณหอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ และนำความร้อนจากลมที่ดูดผ่านแผ่นไปใช้งานต่างๆ เช่น การอบ การทำให้แห้ง นอกจากนี้การพาความร้อนผ่านพื้นผิวขรุขระช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ผิวได้ดีกว่าการพาความร้อนผ่านท่อผนังเรียบ(ท่อเปล่า) โดยลักษณะท่ออุณหอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 1

จากทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) หากช่องทางการไหลที่เป็นผนังเรียบของไหลที่ไหลผ่านพื้นผิวเรียบที่อยู่ติดกับที่ความหนืด (Viscosity) บริเวณผิวท่อจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็ว โดยบริเวณพื้นผิวเรียบจะมีความเร็วการไหลต่ำ และความเร็วของของไหลจะเพิ่มขึ้นเมื่อห่างจากผนังท่อออกไปเรื่อย ๆ จนถึงบริเวณกลางท่อของไหลจะมีความเร็วสูงสุด โดยเราจะเรียกชั้นการเปลี่ยนแปลงความเร็วนี้ว่าชั้นขอบเขต (Boundary Layer) จากสาเหตุที่บริเวณพื้นผิวจะมีชั้นขอบเขตของไหลที่มีความเร็วต่ำ ส่งผล

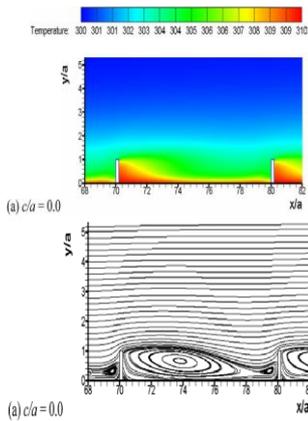
ให้ภายในชั้นขอบเขตบริเวณดังกล่าวแลกเปลี่ยนความร้อนได้ไม่ดี ดังนั้นในงานที่ต้องการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ผิวจึงมีการพยายามลดความหนาของชั้นขอบเขต (Boundary Layer) ของอากาศนิ่งที่บริเวณผิว โดยการเพิ่มความเร็วให้กับอากาศมากขึ้น (เพิ่มความแรงของพัดลมโบลเวอร์) แต่การเพิ่มความเร็วของอากาศส่งผลให้กำลังขับพัดลมโบลเวอร์ที่ใส่เข้าไปมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น เมื่อวัดในรูปตัวประกอบเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน (Thermal Enhancement Factor, TEF) พบว่าสมรรถนะการพาความร้อนเทียบกับกำลังขับ (พัดลมโบลเวอร์) เดียวกัน มีค่าการใช้พลังงานที่สูงกว่าการปรับปรุงผิวชิ้นงานเพื่อเพิ่มความปั่นป่วน (Turbulator) ที่ผิวท่อ ซึ่งช่วยเพิ่มการพาความร้อนและประหยัดพลังงานที่ใช้มากกว่า ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 ท่ออุณหอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบช่องทางที่มีผนังเรียบ (แหล่งที่มา: Kumar and Prasad [11])

การสร้างความปั่นป่วน (Turbulator) ที่ชั้นขอบเขต (Boundary Layer) ที่บริเวณผิว โดยการสร้างความขรุขระที่ผิว เช่น ครีบ (Rib) หรือ ครีบบาง (Fin) และอื่น ๆ ในรูปร่างต่างๆบนพื้นผิว เพื่อทำลายหรือรบกวนชั้นขอบเขตระหว่างของไหลกับพื้นผิวของท่อ จะทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณผิวมากขึ้น เนื่องจากของไหลที่ไหลผ่านจะเกิดกระแสหมุนวนขึ้นเมื่อผ่านชิ้นงานสร้างความปั่นป่วน [12] – [14] แต่ก็ยังมีข้อจำกัดคือบริเวณด้านหน้าและหลังของชิ้นงานจะมีการไหลหมุนวน (Eddy Motion) ซึ่งทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนต่ำในบริเวณดังกล่าว ส่งผลให้ค่าความดันในระบบสูงขึ้น และต้องใช้พลังงานในการขับพัดลมโบลเวอร์เพิ่มขึ้นเพื่อดึงความร้อนให้ได้มากขึ้น และใช้ต้นทุนพลังงานที่สูงตามไปด้วย ดังนั้น วัตถุประสงค์ของ

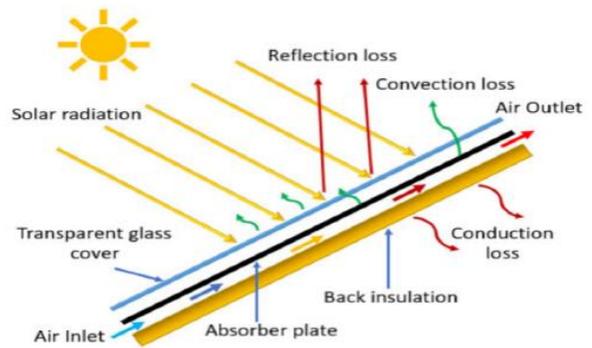
งานวิจัยนี้จึงต้องการปรับปรุงพื้นผิวหรือติดตั้งชิ้นงานอุปกรณ์เพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ผิว และ ลดความดันตกคร่อมในระบบให้น้อยที่สุด โดยพิจารณาค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน (Thermal Enhancement Factor, TEF) ซึ่งเป็นสัดส่วนสัมประสิทธิ์การพาความร้อนกับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของท่อผนังเรียบ ที่พิจารณาภายใต้สภาวะการใช้กำลังขับพัลลัมโบลเวอร์เดียวกัน



รูปที่ 2 รูปแบบของการไหลเมื่อเคลื่อนที่ผ่านชิ้นงานสร้างความปั่นป่วน (แหล่งที่มา: Changcharoen and Eiamsa-ard [12])

2. เครื่องอุณหอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Air Heater)

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานสะอาดปราศจากมลพิษ ถือได้ว่าแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีราคาถูกและมีศักยภาพมหาศาลในการนำไปใช้ หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมดก็ว่าได้ ทั้งนี้ ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตเส้นศูนย์สูตร จึงสามารถรับแสงและความร้อนจากดวงอาทิตย์ได้อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอทั้งปี โดยมีความเข้มเฉลี่ยต่อปี เท่ากับ 18 MJ/m²/วัน หรือ 5 KW_m/m²/วัน ซึ่งอยู่ในกลุ่มประเทศที่มีค่าปริมาณความร้อนที่สูงกว่าหลายๆประเทศ ซึ่งได้มีผู้นำประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เก็บสะสมไว้มาใช้ประโยชน์ที่หลากหลาย อาทิเช่น การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร การให้ความร้อนแก่น้ำที่ไหลเวียนเข้าสู่บ้านเรือนเพื่อลดพลังงานที่ใช้ในการต้มน้ำ เป็นต้น



รูปที่ 3 หลักการทำงานของเครื่องอุณหอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ [15]

หลักการทำงานของเครื่องอุณหอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นเทคโนโลยีการนำความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ โดยอุปกรณ์ดังกล่าวจะมีแผงรับแสงอาทิตย์และมีแผ่นดูดซับความร้อนที่ผิวโดยปกติจะใช้สีดำเนื่องจากสามารถดูดความร้อนได้ดีที่สุด และใช้พัดลมดูดความร้อนจากผิวดูดซับที่มีความร้อนอยู่ไปใช้ในงานด้านต่าง ๆ โดยหลักการทำงานของเครื่องอุณหอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ แสดงได้ดังรูปที่ 3

เทคโนโลยีที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อน ตัวอย่างเทคโนโลยีที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อน เช่น การผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

2.1 การผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ มี 3 ชนิด ได้แก่

- การผลิตน้ำร้อนชนิดไหลเวียนตามธรรมชาติ ใช้หลักการหมุนเวียนตามธรรมชาติ มีถังเก็บน้ำร้อนอยู่สูงกว่าแผงรับแสงอาทิตย์
- การผลิตน้ำร้อนชนิดใช้ปั๊มน้ำหมุนเวียนสำหรับผลิตน้ำอุ่นจำนวนมาก และ มีการใช้ต่อเนื่อง
- การผลิตน้ำร้อนชนิดผสมผสานเทคโนโลยีการผลิตน้ำร้อนจากแสงอาทิตย์ผสมผสานกับความร้อนที่เหลือจากการระบายความร้อนเครื่องทำความเย็นหรือเครื่องปรับอากาศผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

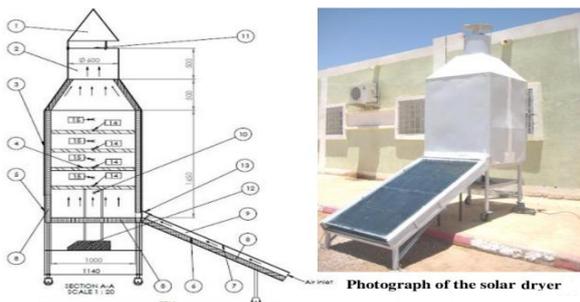
2.2 การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นอีกหนึ่งการประยุกต์ใช้งานที่เป็นที่นิยม ได้แก่ การอบแห้ง เพื่อป้องกันความชื้น ฝุ่นละออง

และแมลง โดยใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพัดลม เพื่อดูดความร้อนจากแผ่นดูดซับความร้อนเข้ามาอบวัสดุให้ลดความชื้นออกจากวัสดุ เป็นการลดเวลา ลดพลังงานที่ต้องใช้จำนวนมากกว่ารวมถึงสร้างมูลค่าเพิ่มให้พืชผลการเกษตร การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบหลัก ได้แก่ การอบแห้งแบบหมุนเวียนด้วยธรรมชาติ (Passive System) และแบบหมุนเวียนด้วยการบังคับ (Active System) โดยแต่ละรูปแบบมีลักษณะการทำงาน ดังนี้

2.2.1 เครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ชนิด Active System

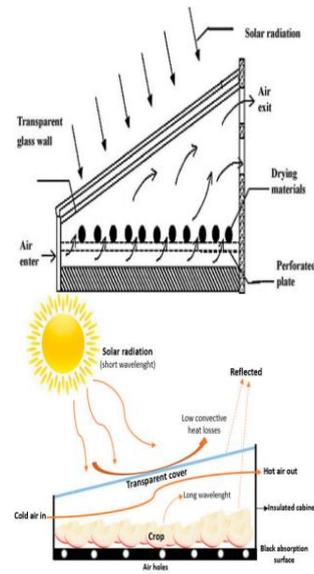
เป็นการใช้พัดลม ที่มีการติดตั้งในช่อง และควบคุมการไหลอากาศภายในตู้อบโดยพัดลมจะดูดอากาศภายนอกไหลผ่านแผ่นดูดซับความร้อนใต้แผงรับแสงอาทิตย์เพื่อรับความร้อนจากแผงรับแสงอาทิตย์ ทำให้อากาศร้อนที่ได้ไหลผ่านไปยังห้องอบแห้งมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าความชื้นของพืชผลที่นำมาอบแห้ง และทำให้ผลไม้ถึงความชื้นออกไปและแห้งได้เร็วขึ้น ซึ่งมีทั้งเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง (Direct Solar Dryers) และ แบบอ้อม (Indirect Solar Dryers) ซึ่งแบบทางอ้อมจะเป็นระบบอบแห้งที่ให้ความร้อนแก่อากาศในแผงรับรังสีอาทิตย์ แล้วส่งความร้อนจากอากาศร้อนผ่านท่อลมไปยังตู้อบแห้ง โดยอาจเป็นลักษณะจ่ายลมร้อนจากด้านล่างของตู้อบแห้งให้อากาศหลังผ่านวัสดุที่อบแห้งแล้วลอยสูงขึ้นแล้วปล่อยทิ้งไปทางด้านบน หรือ ด้านข้างของตู้อบแห้ง แสดงดังรูป 4



รูปที่ 4 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม [16]

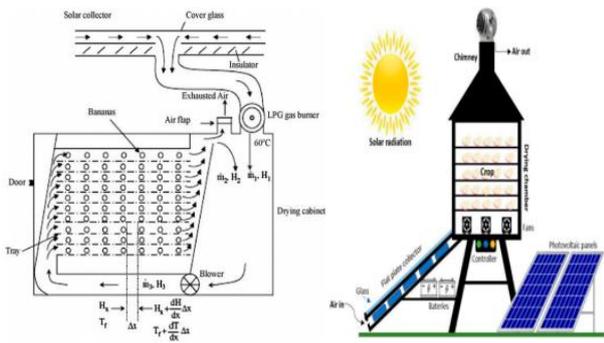
2.2.2 เครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ชนิด Passive System

การอบแห้งระบบ Passive เป็นระบบของการอบแห้งที่ใช้หลักการการทำงานที่อาศัยพลังงานแสงอาทิตย์และกระแสลมตามธรรมชาติ แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การอบแห้ง แบบที่ได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้ในการอบโดยตรง ซึ่งวัสดุที่ถูกรอบจะอยู่ในเครื่องอบแห้งที่มีแผ่นแก้วโปร่งใสอยู่ด้านบน และใช้ความร้อนจากการดูดกลืนพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้อบแห้งโดยตรง ร่วมกับหลักการขยายตัวของอากาศที่ร้อนภายในตู้อบแห้ง มีการติดตั้งพัดลมช่วยให้เกิดการหมุนเวียนอากาศและเพิ่มการถ่ายเทอากาศให้สูงขึ้น แสดงดังรูป 5



รูปที่ 5 การอบแห้งแบบได้รับแสงอาทิตย์โดยตรง [17]

นอกจากนี้ยังมีการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน เช่น เครื่องอบแห้งที่ได้รับความร้อน 2 ทาง ทั้งความร้อนทางตรงจากพลังงานแสงอาทิตย์และความร้อนทางอ้อมจากแหล่งอื่น ๆ ก่อนที่จะส่งผ่านความร้อนไปยังวัสดุที่ต้องการอบแห้ง ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสม [17] [18]

3. งานวิจัยที่ผ่านมา

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในท่อสี่เหลี่ยมมีผู้ให้ความสนใจศึกษาทางานวิจัยที่เกี่ยวข้องค่อนข้างมาก โดยเฉพาะในการทดลองกับเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar air heater) โดยทำในรูปแบบการปรับปรุงพื้นผิวในรูปแบบต่าง ๆ โดยเทคนิควิธีพาสซีฟ (เทคนิคที่ใช้วิธีการปรับปรุงพื้นผิวของท่อหรือการติดตั้งชิ้นสร้างเพื่อช่วยสร้างการปั่นป่วนภายในท่อ) ทั้งในการทดลอง และการคำนวณเชิงตัวเลขหรือทั้งสองวิธีร่วมกัน เพื่อศึกษาถึงปัจจัยและแนวทางที่ช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้ดีขึ้น ซึ่งสามารถนำไปพัฒนารูปแบบพื้นผิวและวิเคราะห์การไหลที่ช่วยให้เกิดการถ่ายเทความร้อนในช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ดีขึ้นต่อไป

3.1 ประวัติความเป็นมาของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อมีความเป็นมาของการพัฒนาเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อ

แสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความเป็นมาของการพัฒนาเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อ

นักวิจัย ปี ค.ศ.	แนวความคิดการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน
Joule, J.P., 1861 [22]	นำเสนอแนวคิดในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อน้ำร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน
Webb, R.L. และคณะ [23]	ดำเนินการศึกษาทดลองเกี่ยวกับการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อที่ติดตั้งครีบริบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ผลลัพธ์ที่พวกเขาค้นพบได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อนและความต้านทานที่เกิดจากแรงเสียดทานและเทคนิคที่ใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนรวมถึงการถ่ายเทมวล
Lewis, M.J. [24]	กำหนดปัจจัยใหม่ที่เรียกว่า ประสิทธิภาพทางเทอร์โมไฮดรอลิก (Thermohydraulic Performance) ของพื้นผิวขรุขระ และนำมาเปรียบเทียบกับลักษณะของท่อที่มีผนังเรียบ
Han, J.C., 1978-1984 [25-28]	งานวิจัยจำนวนมาก ได้แสดงถึงผลของคุณสมบัติต่าง ๆ อาทิ รูปร่างของครีบริบ มุมการไหล สัดส่วนของระยะพิทช์ต่อความสูงของท่อ และระยะห่างระหว่างครีบริบ รวมถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ การศึกษาเหล่านี้ได้รับการตรวจสอบโดย Han, J.C. พบว่า ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบความเสียดทานมีค่าสูงสุดเมื่อติดตั้งครีบริบทำมุม 45° พร้อมอัตราส่วนความสูงต่อระยะพิทช์ = 10
Ravigururajan, T.S. และ Bergles, A.E., 1985 [29]	พัฒนาระดับความสำคัญทางสถิติเพื่อการพยากรณ์คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อที่มีรูปร่างหลากหลายรูปแบบ เช่น รูปร่างแบบวงกลม, รูปร่างแบบวงรี, รูปร่างแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า และรูปร่างแบบสามเหลี่ยม เป็นต้น
Lau, S.C. และคณะ [30]	ติดตั้งครีบริบตรงและครีบริบเอียงต่อเนื่องในท่อสี่เหลี่ยม ซึ่งสร้างกระแสไหลใกล้บริเวณติดตั้งครีบริบและเป็นสาเหตุให้เกิดการแยกชั้นของการไหล ซึ่งส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้สูงขึ้น
Lau, S.C. และคณะ [31-32]	ทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อศึกษาผลการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบริบเรียงและครีบริบเซาะร่อง
Tastim, M.E. และคณะ [33], Olsson, C.O. และ Sunden, B. [34]	ศึกษาผลกระทบของครีบริบรูปตัววี พบว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับครีบริบวงเอียงและครีบริบวงวาง ข้อมูลนี้พบว่า ครีบริบรูปตัววีซึ่งตามทิศทางของการไหลของอากาศให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่มากกว่าการทวนทิศทางการไหลเนื่องจากอากาศที่รับความร้อนจะถูกนำไปสู่บริเวณชั้นด้านบนของครีบริบและเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบริเวณปลายแหลม
Cho, H.H. และทีมงาน [35]	สำรวจผลกระทบของระยะห่างระหว่างครีบริบเอียงต่อการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยม รายงานระบุว่า การเพิ่มระยะห่างระหว่างครีบริบเอียงทำให้ความเร็วของการไหลเพิ่มขึ้นและเพิ่มความปั่นป่วนภายในท่อ จนเกิดการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นตามลำดับ
Chang, S.W. และคณะ [36]	ศึกษาคุณสมบัติเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนในช่องขนานที่มีรูปแบบรอยนูนบนผนังทั้งสองด้าน การศึกษานี้ครอบคลุมค่าเลขเรย์โนลด์ส์ในช่วง 1,500 ถึง 11,000 และพบว่าผลกระทบของตำแหน่งรอยนูน, ความยาวของครีบริบต่อความสูงของช่องขนาน, และค่าเลขเรย์โนลด์ส์มีผลต่อประสิทธิภาพมากกว่าการถ่ายเทความร้อนในกรณีที่มีการติดตั้งครีบริบ

Prasad, K. และ Mullick, S.C. [37]	วิธีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้โครงสร้างลวดขนาดเล็กที่ติดตั้งบริเวณด้านล่างของพื้นผิวที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
Varun [38], Hans [39], Bhushan [40], Patil, A.K. [41], Roy, P.K. [42], Kumar, T.S. [43]	ทบทวนการออกแบบและพัฒนาารูปแบบและลักษณะของชิ้นงานที่สร้างการปั่นป่วนภายในท่อที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจากงานวิจัยต่างๆ ที่ใช้กับเครื่องอุณหอากาศพลิงงานแสงอาทิตย์

3.2 พฤติกรรมการไหลในท่อและการไหลผ่านครีบบของของไหล

เมื่ออากาศไหลผ่านพื้นผิวของท่อที่มีความร้อน การเกิดขึ้นบางๆ ที่ตั้งอยู่ใต้แกนกลางของการไหลที่แบ่งออกเป็นชั้นขึ้นเนื่องจากความหนืดของอากาศเราเรียกมันว่า "ชั้นฟิล์มของอากาศนิ่ง (laminar sub layer) เนื่องจากฟิล์มนี้เป็นชั้นของอากาศที่เคลื่อนไหวช้าและมีความหนืด สิ่งนี้ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวไปสู่อากาศมีค่าต่ำมาก การใช้พารามิเตอร์ความขรุขระเพื่อยับยั้งการเกิดขึ้นฟิล์มของอากาศนิ่งและสร้างความเร็วในรูปแบบต่าง ๆ บนผนังภายในท่อนี้ทำให้เกิดการแยกหรือข้ามชั้นการไหล รวมถึงการเกิดการปะทะของแกนกลางและชิ้นงานที่ติดตั้ง ดังนั้น ความเร็วที่เกิดจากพารามิเตอร์ความขรุขระในรูปแบบต่าง ๆ เป็นสิ่งสำคัญต่อการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นที่ที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านของไหล เช่น อากาศหรือน้ำ เป็นต้น

3.3 พารามิเตอร์ของความขรุขระ

พารามิเตอร์ที่สำคัญในการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อ ในงานวิจัยที่ผ่านมา มักพิจารณาอัตราส่วนต่างๆ ซึ่งสรุปได้ดังนี้

3.3.1 อัตราส่วนของกรบล้อกการไหล (relative roughness height, e/D_n) เป็นสัดส่วนระหว่างความสูงของครีบบ (e) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของท่อ (D_n)

3.3.2 อัตราส่วนของระยะพิชต์ (relative roughness pitch, P/e) เป็นสัดส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างครีบบ (P) ต่อความสูงของครีบบ (e)

3.3.3 มุมปะทะของการไหล (angle of attack, α) เป็นมุม

เอียงของครีบบที่มีทิศทางกับการไหลของอากาศภายในท่อ

3.3.4 อัตราส่วนรูปร่างของท่อ (aspect ratio, AR) เป็นสัดส่วนความกว้างของท่อ (W) ต่อความสูงของท่อ (H)

3.4 ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากพารามิเตอร์ความขรุขระ

ผลกระทบของพารามิเตอร์ความขรุขระและรูปทรงเรขาคณิตของความขรุขระที่ส่งผลต่อตัวประกอบความเสียดทาน และการถ่ายเทความร้อน สามารถสรุปได้ดังนี้

3.4.1 ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากค่าเลขเรย์โนลด์ส

เมื่อค่าเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลง เนื่องจากจะเกิดการรบกวนชั้นฟิล์มความหนืดในทางกลับกันค่าเลขเนสเซลท์เพิ่มขึ้นเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าเลขเนสเซลท์แปรผันโดยตรงกับสัดส่วนของความต้านของการนำความร้อน (Conductive Resistance) ต่อความต้านของการพาความร้อน (Convective Resistance) ในการไหล และเมื่อเพิ่มค่าเลขเรย์โนลด์สส่งผลให้ความหนาของชั้นฟิล์มความหนืดของอากาศนิ่งลดลง ทำให้ความต้านทานการพาความร้อนลดลง ส่งผลต่อค่าเลขเนสเซลท์ให้เพิ่มขึ้น

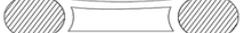
3.4.2 ผลกระทบของครีบบ

ผลกระทบของครีบบต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหล สามารถสร้างการแยกชั้นและรูปแบบการไหลโดยมีการเกิดขึ้นได้ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของครีบบ เนื่องจากการปั่นป่วนทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวน (Eddy Motion) และเกิดจุดการไหลปะทะ (Reattachment Point) ด้านหลังครีบบ ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่ก็ตามมาด้วยความดันจากความเสียดทานในท่อเพิ่มสูงขึ้นด้วย

3.4.3 มุมปะทะของการไหล (Angle of Attack, α)

งานวิจัยจำนวนมากได้แสดงถึงผลลัพธ์จากการศึกษาการเชิงทดลองที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของมุมปะทะที่มีผลต่อรูปแบบการไหล นอกจากอัตราส่วนของกรบล้อก (e/D_n) และอัตราส่วนของระยะพิชต์ (P/e) มีพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่มีผลต่อ

การถ่ายเทความร้อน คือ มุมปะทะของการไหล (α) ยกตัวอย่าง เช่น ครีบที่วางเอียงจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับครีบที่วางเริ่มต้น นั่นเป็นเพราะชั้นที่มีการไหลครีบที่สองขณะผนังของครีบตลอดระยะความยาวที่ขวางเส้นที่เข้ามากระทบต่อชั้นฟิล์มความหนืดและสร้างความปั่นป่วนบริเวณขอบเขตผนังภายในของท่อ

e/D	Pattern of Flow
e_1/D	
e_2/D	
e_3/D	
e_4/D	
e_5/D	

รูปที่ 7 รูปแบบของการไหลผ่านครีบที่มีปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของการบล็อกการไหล (แหล่งที่มา: Prasad, B.N. และ Saini, J.S. [44])

3.4.4 ผลกระทบของอัตราส่วนของการบล็อก (e/D_n)

ในรูปที่ 7 แสดงแนวโน้มของการไหลผ่านครีบและผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อความสูงของครีบเปลี่ยนแปลง การเพิ่มความสูงของครีบมีผลต่อชั้นฟิล์มของอากาศนี้โดยตรง ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากเริ่มเกิดความปั่นป่วนที่บริเวณผนังภายในท่อ แต่ในกรณีที่ความสูงของครีบมากกว่าความหนาของชั้นฟิล์มความหนืด จะส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันเพิ่มความเสี่ยงของความดันในระบบ สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานคือเมื่อความสูงของครีบมากกว่าความหนาของชั้นฟิล์มของอากาศที่อยู่ในช่วงของการเปลี่ยนแปลง (Transition Sub Layer) ให้ทำลายชั้นฟิล์มที่มีขนาดบางลง

3.4.5 อัตราส่วนของระยะพิชต์ (P/e)

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนของระยะพิชต์ (P/e) ซึ่งมีผลต่อรูปแบบการไหล สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน รวมถึงตัวประกอบความเสียหาย ค่าอัตราส่วนของระยะพิชต์ (P/e)

ที่ให้ค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่มีค่าสูงสุดสำหรับกรณี ที่รูปร่างของครีบมีระยะพิชต์ (P/e) แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 9. รูปแบบของการไหลผ่านครีบที่มีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนของระยะพิชต์ (P/e) หากครีบมีค่าอัตราส่วนของระยะพิชต์ 8 ถึง 10 จะเกิดการไหลปะทะที่บริเวณผนังของท่อระหว่างครีบ ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น โดยทั่วไป ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลงหากอัตราส่วนของระยะพิชต์ (P/e) น้อยกว่า 6 เนื่องจากจะไม่มีจุดปะทะ (reattachment point) ที่ผิวท่อ ขณะเดียวกันตัวประกอบความเสียหายจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างครีบลง รวมถึงหากเพิ่มอัตราส่วนของระยะพิชต์ (P/e) มากกว่า 10 จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง งานวิจัยหลาย ๆ งานจึงปรับค่าอัตราส่วนของระยะพิชต์ (P/e) อยู่ระหว่าง 6 - 10 [38], [44]

3.5 รูปทรงเรขาคณิตของชิ้นงานสร้างความปั่นป่วนที่ในท่อ แลกเปลี่ยนความร้อน

มีงานวิจัยที่หลากหลายในการพัฒนาแผ่นกั้นขวางรูปแบบต่างๆ เพื่อสร้างความปั่นป่วนหลังแผ่นกั้น เพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ดังตารางที่ 2 นอกจากนี้ยังมีการออกแบบเพื่อลดความเสียหายในท่อ โดยออกแบบครีบหรือแผ่นกั้นที่ลดความเสียหายลง แสดงดังตารางที่ 3

p/e	Flow patterns
∞	
10	
6	
5	
2	
0.75-1.25	

รูปที่ 8 รูปแบบของการไหลผ่านครีบที่มีปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของระยะพิชต์ (แหล่งที่มา: Prasad, B.N. และ Saini, J.S. [44])

ตารางที่ 2 การติดตั้งอุปกรณ์ในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น
กันรูปร่างต่าง ๆ

ผู้วิจัย	เงื่อนไขและผลลัพธ์	รูปร่าง
Yadav และ Bhagoria 2014 [45]	การใส่ครีบริบสามเหลี่ยมบนแผ่นดูดซับหยาบ อากาศ : $Re = 5,000 - 20,000$ Relative roughness pitch 7.14–35.71 Relative roughness height 0.021–0.042 Nu/Nu_0 ff_0 η 3.1-3.2 3.4-3.8 2.0-2.1	
Gawande และคณะ (2015) [46]	แผ่นกันครีบริบสามเหลี่ยมมุมฉากด้านขวาบนแผ่นดูดซับหยาบ อากาศ : $Re = 5,000 - 20,000$ Relative roughness pitch 7.14–35.71 Relative roughness height 0.021–0.042 Nu/Nu_0 ff_0 η 2.9-3.1 3.2-3.7 1.98-2.0	
Layek และคณะ 2007 [47]	การผสมระหว่าง การใส่แผ่นกันแบบ แผ่นกัน ขวางลบมุม และ แบบร่อง อากาศ : $Re = 3000 - 21,000$ Relative roughness height $(e/D_n) = 0.0181 - 0.0363$, Relative groove position $(g/p) = 0.3 - 0.7$, Relative roughness pitch $(P/e) = 4.5 - 10$, $Re = 3000 - 21,000$ Nu/Nu_0 ff_0 η 1.82 - 2.6 2.2-3.4 1.4-1.7	
Prasad, B.N. และ	การใส่ครีบริบวงขวางที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก	

Saini, J.S. 1988 [44]	ขนาดเล็ก	
	อากาศ : -	
	อัตราส่วน $P/e = 10, 15$ และ 20 อัตราส่วน $e/D_n = 0.02, 0.027, 0.033$ ค่าที่ดีที่สุด อัตราส่วน $P/e = 10$ Nu f η 2.38 4.3 -	
Sahu, M.M. และ Bhagoria, J.L. 2005 [48]	การติดตั้งครีบริบวงขวางแบบแยกตัว ระยะห่างระหว่างครีบริบวงขวางให้แยกตัวออกจากกันและทำมุม 90° กับทิศทางการไหล	
	อากาศ : $Re = 3,000 - 12,000$ - ค่า P ช่วง 10-30 มม. - ค่า e เท่ากับ 1.5 มม. - ค่า W/H เท่ากับ 8 Nu/Nu_0 ff_0 η 1.3-1.4 - -	
Yang และคณะ 2017 [02]	การติดตั้งครีบริบวงขวางตรงกัน และแบบเหลื่อมกัน	
	อากาศ : $Re = 1,400 - 9,000$ -ค่า S/e อยู่ในช่วง 5-15 -ค่า $e/H = 0.2, 0.33$ Nu/Nu_0 ff_0 η 6-7 6.5-10 -	
	$(S/e : 7.7 : 10)$ $(S/e : 10)$	
Mahana nd และ Senapati 2020 [03]	การใส่ครีบริบตัว T กลับหัวตามขวาง	
	อากาศ : $Re = 3,800 - 18,000$ อัตราส่วน P/e เท่ากับ 7.14, 10.71, 14.29 และ 17.86 อัตราส่วน $e/D_n = 0.042$ ค่าดีที่สุดที่อัตราส่วน P/e เท่ากับ 7.14 Nu f η 2.75 3.4 1.86	

ผู้วิจัย	เงื่อนไขและผลลัพธ์	รูปร่าง						
Yadav และ Bhagoria 2014 [04]	การติดตั้งครีบบางขวาง ตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าของเครื่องทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ อากาศ : $Re = 3,800-18,000$ - ค่า P/e อยู่ในช่วง 7.14-35.71 - ค่า e/D เท่ากับ 0.21-0.042							
Karwa 2003 [49]	การติดตั้งครีบบางขวางสี่เหลี่ยม อากาศ : $Re = 2,800-18,000$ - ค่า AR 7.19-7.75 - ค่า $P/e = 10$ - ค่า $e/D_h = 0.02$							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nu/Nu_0</th> <th>f/f_0</th> <th>η</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2.86</td> <td>3.8</td> <td>1.2-1.9</td> </tr> </tbody> </table>	Nu/Nu_0	f/f_0	η	2.86	3.8	1.2-1.9	
Nu/Nu_0	f/f_0	η						
2.86	3.8	1.2-1.9						
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nu/Nu_0</th> <th>f/f_0</th> <th>η</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.65-1.9</td> <td>2.7-2.9</td> <td>1.2-1.4</td> </tr> </tbody> </table>	Nu/Nu_0	f/f_0	η	1.65-1.9	2.7-2.9	1.2-1.4	
Nu/Nu_0	f/f_0	η						
1.65-1.9	2.7-2.9	1.2-1.4						

ตารางที่ 3 การติดตั้งอุปกรณ์ในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นกั้น ที่มีการออกแบบเพื่อลดความเสียหายในท่อ

ผู้วิจัย	เงื่อนไขและผลลัพธ์	รูปร่าง						
Eiamsa-ard S. และคณะ 2022 [51]	การติดตั้งแผ่นกั้นขวางปีกสี่เหลี่ยม อากาศ : $Re = 6,000 - 24,000$ อัตราส่วนการกั้นเท่ากับ 0.2 อัตราส่วนระยะพิชิตเท่ากับ 1.5 มุมของปีกสี่เหลี่ยมเท่ากับ $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ$ และ 90° อัตราส่วนความพรุนเท่ากับ 0.21 อัตราส่วนภาพ 3.75							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nu/Nu_0</th> <th>f/f_0</th> <th>η</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.7-2.8</td> <td>8.9-12.4</td> <td>0.7-1.3</td> </tr> </tbody> </table>	Nu/Nu_0	f/f_0	η	1.7-2.8	8.9-12.4	0.7-1.3	
Nu/Nu_0	f/f_0	η						
1.7-2.8	8.9-12.4	0.7-1.3						
Ary และคณะ 2012 [52]	อิทธิพลแผ่นกั้นเอียงเจาะรู อากาศ : $Re = 23,000 - 57,000$							

	-ความกว้างแผ่นกั้น 19.8cm. -ช่องสี่เหลี่ยมกว้าง 2.55 cm. - inclination angle of 5°	(a) single baffle 						
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nu/Nu_0</th> <th>f/f_0</th> <th>η</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5.2</td> <td>20.2</td> <td>1.2</td> </tr> </tbody> </table>	Nu/Nu_0	f/f_0	η	5.2	20.2	1.2	(b) two baffles
Nu/Nu_0	f/f_0	η						
5.2	20.2	1.2						
Nuntadus it และคณะ 2015 [53]	การถ่ายเทความร้อนในช่องที่ติดตั้งแผ่นกั้นแบบซิกแซก อากาศ : $Re = 20,000$ ใช้แผ่นกั้นแบบซิกแซก 3 มิติ -แผ่นกั้นตรง -ซิกแซกสี่เหลี่ยม -สามเหลี่ยมซิกแซก 45° -สามเหลี่ยมซิกแซก 90° -ความสูงแผ่นกั้น $H = 15$ -ระยะห่างที่ระยะห่างของแผ่นกั้น $P/H = 4, 6$ และ 8 (H : ความสูงของแผ่นกั้น)							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nu</th> <th>f</th> <th>η</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>97-125</td> <td>0.02-0.06</td> <td>1.2-1.8</td> </tr> </tbody> </table>	Nu	f	η	97-125	0.02-0.06	1.2-1.8	
Nu	f	η						
97-125	0.02-0.06	1.2-1.8						
Park และคณะ 2020 [08]	การถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่มีการแผ่นกั้นขวางแบบมีรู และ แบบผนังด้านข้างเป็นร่อง อากาศ : $Re = 3,800-18,000$ -ขนาดรู เท่ากับ 12-20 มม. -ระยะระหว่างรู 17.5-40 มม. -ความสูงของรู 28.8 มม. -จำนวนรู 7-11 -มุมของรู $0-135^\circ$							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nu</th> <th>f</th> <th>η</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>22% กรณี กว้าง 7 รู บน-ล่าง</td> <td>7 รู ความเสียหายที่สูงสุด</td> <td>25 % กรณี ร่องนูน เล็ก</td> </tr> </tbody> </table>	Nu	f	η	22% กรณี กว้าง 7 รู บน-ล่าง	7 รู ความเสียหายที่สูงสุด	25 % กรณี ร่องนูน เล็ก	
Nu	f	η						
22% กรณี กว้าง 7 รู บน-ล่าง	7 รู ความเสียหายที่สูงสุด	25 % กรณี ร่องนูน เล็ก						
Tanda 2011 [50]	ประสิทธิภาพของท่อเครื่องทำความร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ที่มีการใส่ ครีบบางแบบต่างๆ อากาศ : $Re = 9,000 - 36,000$							

จุดเหมาะสมในการนำไปออกแบบแผ่นกั้นที่เหมาะสมในการใช้งานต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Liu and M. Sakr, "A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 64-81, 2013.
- [2] W. Yang, S. Xue, Y. He, and W. Li, "Experimental study on the heat transfer characteristics of high blockage ribs channel," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 83, pp. 248–259, 2017.
- [3] Y. Mahanand, and J. R. Senapati, "Thermal enhancement study of a transverse inverted-T shaped ribbed solar air heater," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 119, 104922, 2020.
- [4] S. Yadav, and J. L. Bhagoria., "A numerical investigation of square-sectioned transverse rib roughened solar air heater," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 79, pp. 111-131, 2014.
- [5] A. K. Behura, B. N. Prasad, and L. Prasad, "Heat transfer, friction factor and thermal performance of three sides artificially roughened solar air heaters," *Solar Energy*, vol. 130, pp. 46-59, 2016.
- [6] B. N. Prasad, "Thermal performance of artificially roughened solar air heater," *Solar Energy*, vol. 91, pp 59-67, 2013.
- [7] A. Vyas, B. Mishra, and A. Srivastava, "Investigation of the effect of blockage ratio on flow and heat transfer in the wake region of a cylinder embedded in a channel using whole field dynamic measurements," *International Journal of Thermal Sciences.*, vol. 153, pp. 106322, 2020.
- [8] J. S. Park, Y. H. Jo, and J. S. Kwak, "Heat transfer in a rectangular duct with perforated blockages and dimpled side walls," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 97, pp. 224-231, 2020.
- [9] P. Promthaisong, and S. Eiamsa-ard, "Fully developed periodic and thermal performance evaluation of a solar air heater channel with wavy-triangular ribs placed on an absorber plate," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 140, pp. 413-428, 2019.
- [10] M. Ansari, and M. Bazargan, "Optimization of Flat Plate Solar Air Heaters with Ribbed Surfaces," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 136, pp 356-363, 2018.
- [11] D. Kumar, and L. Prasad, "Heat Transfer Augmentation of Various Roughness Geometry used in Solar Air Heater," *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, vol. 8(12), pp. 491–508, December 2017.
- [12] W. Changcharoen, and S. Eiamsa-ard, "Numerical Investigation of Turbulent Heat Transfer in Channels with Detached Rib-Arrays," *Heat Transfer—Asian Research*, vol. 40(5), pp. 431–447, 2011.
- [13] J.W. Baughn, "Liquid crystal methods for studying turbulent heat transfer," *International Journal Heat and Fluid Flow*, vol.16(5), pp. 365-375, 1995.
- [14] W.M. Yan, H.C. Liu, C.Y. Soong, and W.J. Yang, "Experiment study of impinging heat transfer along rib-roughened walls by using transient liquid crystal technique," *International Journal Heat and Mass Transfer*, vol. 48(12), pp. 2420-2428, 2005.
- [15] Karmveer, N.K. Gupta, M.I.H. Siddiqui, D. Dobrotă, T. Alam, M.S. Ali, and M. Orfi, "The Effect of Roughness in Absorbing Materials on Solar Air Heater Performance," *Materials*, vol.15(9), pp.3088, 2022.
- [16] D. R. Khama, F. A. Benissad, and R. Alkama, "Design and Performance Testing of an Industrial-Scale Indirect Solar Dryer," *Journal of Engineering Science and Technology*, vol.11(9), pp.1263 - 1281, 2016.
- [17] L. Fernandes, and P.B. Tavares," A Review on Solar Drying Devices: Heat Transfer, Air Movement and Type of Chambers," *Solar*, Vol. 4(1), pp.15–42, 2024.
- [18] O. Prakash, and A. Kumar, "Historical Review and Recent Trends in Solar Drying Systems," *International Journal of Green Energy*, vol. 10, pp.690–738, 2013.
- [19] B.R. Munson, D.F. Young, T.H. Okiishi, and W.W. Huebsch, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, Sixth Edition, United States of America: John Wiley & Sons, 2013.
- [20] S. Donjatee, *Fluid Mechanics*, Kasetsart University, 2014
- [21] R. K. Shah, and D. P. Sekulić, *Fundamentals of Heat Exchanger Design*, Published by John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey, Published simultaneously in Canada, ISBN 0-471-32171-0, 2003.
- [22] J.P. Joule, "On the surface condensation of steam," *Philos Trans R Soc Lond*, Vol.151, pp.133-160, 1861.
- [23] R.L. Webb, E.R.G. Eckert, and R. J. Goldstein, "Heat transfer and friction in tubes with repeated rib roughness," *International Journal Heat and Mass Transfer*, vol.14(4), pp. 601-617, 1971.
- [24] M.J. Lewis, "Optimizing the thermohydraulic performance of rough surfaces," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.18(11), pp.1243-1248, 1975.
- [25] J.C. Han, L.R. Glicksman, and W.M. Rohsenow, "Heat transfer and friction for rib roughened surfaces," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.21, pp.1143-1156, 1978.
- [26] J.C. Han, "Heat transfer and friction in channels with opposite rib roughened walls," *ASME Journal Heat and Mass Transfer*, Vol.106(4), pp. 774-781, 1984.
- [27] J.C. Han, and J.S. Park, "Developing heat transfer in a rectangular channel with rib turbulators," *ASME Journal Heat and Mass Transfer*, vol.31, pp.183-195, 1988.
- [28] J.C. Han, J.S. Park, and C.K. Lei, "Augmented heat transfer in rectangular channel of narrow aspect ratios with rib turbulators," *International Journal Heat and Mass Transfer*, vol.32(9), pp.1619-1630, 1989.
- [29] T.S. Ravigururajan, and A.E. Bergles, "General correlations for pressure drop and heat transfer for single-phase turbulent flow in internally ribbed tubes," *Journal. ASME*, vol. 52, pp. 9-20, 1985.
- [30] S.C. Lau, R.D. McMillin, and J.C. Han, "Turbulent heat transfer and friction in a square channel with discrete rib turbulators," *ASME Journal of Turbomachinery*, vol. 113(3), pp. 360-366, 1991.
- [31] S.C. Lau, R.D. McMillin, and J.C. Han, "Heat transfer characteristics of turbulent flow in a square channel with angled rib," *ASME Journal of Turbomachinery*, vol.113(3), pp. 367-374, 1991.
- [32] S.C. Lau, R.T. Kukreja and R.D. McMillin "Effects of V shaped rib arrays on turbulent heat transfer and friction of fully developed flow in a square channel," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.34(7), pp.1605-1616, 1991.
- [33] M.E. Taslim, T. Li, and D.M. Kercher, "Experimental heat transfer and friction in channels roughened with angled, V-shaped and discrete ribs on two opposite walls," *Journal of Turbomachinery*, vol. 118, pp.20-28, 1996.
- [34] C.O. Olsson and B. Sundén, "Thermal and hydraulic performance of a rectangular duct with multiple V-shaped ribs," *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 120(4), pp. 1072-1077, 1998.
- [35] H.H. Cho, Y.Y. Kim, D.H. Rhee, S.Y. Lee, and S.J. Wu, "The effect of gap position in discrete ribs on local heat/mass transfer in a square duct," *Journal of Enhanced Heat Transfer*, vol.10(3), pp. 287-300, 2003.
- [36] S.W. Chang, K.F. Chiang T.L., Yang, and C.C. Huang, "Heat

transfer and pressure drop in dimpled fin channels,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.33(1), pp.23-40, 2008.

[37] K. Prasad, and S.C. Mullick, “Heat transfer characteristics of a solar air heater used for drying purposes,” *Applied Energy*, vol.13(2), pp.83-93, 1983.

[38] Varun, R.P. Saini, and S.K. Singal, “A review on roughness geometry used in solar air heaters,” *Solar Energy*, vol.81(11), pp.1340-1350, 2007.

[39] V.S. Hans, R.P. Saini, and J.S. Saini, “Performance of artificially roughened solar air heaters-A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.13(8), pp. 1854-1869, 2009.

[40] B. Bhushan, and R. Singh, “A review on methodology of artificial roughness used in duct of solar air heaters,” *Energy*, Vol.35(1), pp.202-212, 2010.

[41] A.K. Patil J.S. Saini, and K. Kumar, “A Comprehensive Review on Roughness Geometries and Investigation Techniques Used in Artificially Roughened Solar Air Heaters,” *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol.2(1), pp. 1-15, 2012.

[42] P.K. Roy, and K. Chakrabarti “A review on Heat transfer & friction factor characteristics of artificial roughened solar air heater duct,” *Asian Journal of Science and Technology*, vol.4(7), pp.45-56, 2013.

[43] T.S. Kumar, N.S. Thakur, A. Kumar and V. Mittal “Use of artificial roughness to enhance heat transfer in solar air heaters,” *Journal of Energy in Southern Africa*, vol.21(1), pp.35-51, 2010.

[44] B.N. Prasad, and J.S. Saini, “Effect of artificial roughness on heat transfer and friction factor in a solar air heater,” *Solar Energy*, vol.41(6), pp. 555-560, 1988.

[45] A.S. Yadav, J.L. Bhagoria, “A CFD based thermo-hydraulic performance analysis of an artificially roughened solar air heater having equilateral triangular sectioned rib roughness on the absorber plate,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.70, pp.1016-1039, 2014.

[46] Gawande V.B., Dhoble A.S., Zodpe D.B., Chamoli S, “Experimental and CFD-based thermal performance prediction of solar air heater provided with right-angle triangular rib as artificial roughness,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 38(2), 2015.

[47] A. Layek, J.S. Saini, and S.C. Solanki, “Heat transfer and friction characteristics for artificially roughened ducts with compound turbulators,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.50(23-24), pp. 4845-4854, 2007.

[48] M.M. Sahu and J.L. Bhagoria, “Augmentation of heat transfer coefficient by using 90° broken transverse ribs on absorber plate of solar air heater,” *Renewable. Energy*, vol.30(13), pp. 2057-2073, 2005.

[49] R. Karwa, “Experimental studies of augmented heat transfer and friction in asym metrically heated rectangular ducts with ribs on the heated wall in transverse, inclined, V-continuous and V-discrete pattern,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.30(2), pp. 241-250, 2003.

[50] G. Tanda, “Performance of solar air heater ducts with different types of ribs on the absorber plate,” *Energy*, vol.36(11), pp. 6651-6660, 2011.

[51] S. Eiamsa-ard, A. Phila, K. Wongcharee, V. Chuwattanakul, M. Pimsard, N. Maruyama and M. Hirota, “Thermal Visualization and Performance Analysis in a Channel Installing Transverse Baffles with Square Wings,” *Energies*, vol.15(22), pp.1-19, 2022.

[52] B.K.P. Ary, M.S. Lee, S.W. Ahn, D.H. Lee, “The effect of the inclined perforated baffle on heat transfer and flow patterns in the channel,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.39(10), pp.1578-1583, 2012.

[53] C. Nuntadusit I. Piya M. Wae-hayee, and S. Eiamsa-ard, “Heat transfer characteristics in a channel fitted with zigzag-cut baffles,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol.29(6),

pp.2547-2554, 2015.

[54] M. A. El Habet S. A. Ahmed, and M.A. Saleh, “The effect of using staggered and partially tilted perforated baffles on heat transfer and flow characteristics in a rectangular channel,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol.174, pp.107422, 2022.

[55] G.A. Xie, S. Zheng, W. Zhan, and B. Sundén, “A numerical study of flow structure and heat transfer in a square channel with ribs combined downstream half-size or same-size ribs,” *Applied Thermal Engineering*, vol.61(2), pp. 289-300, 2013.



ศ.ดร. สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ระดับปริญญาโท-เอก สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และระดับปริญญาเอกวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมระบบ มหาวิทยาลัยมิเอะ ประเทศญี่ปุ่น เริ่มทำงานที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครในปี พ.ศ. 2539 มีความสนใจงานวิจัยในเรื่องเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง งานทางด้านของไหลและความร้อน และงานด้านเทคนิค visualization ต่างๆ สำหรับศึกษาพฤติกรรมการไหลและความร้อน



ผศ.ดร. อาณัติ พิลลา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกสาขาวิศวกรรมเครื่องกลจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เริ่มทำงานที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครในปี พ.ศ. 2549 มีความสนใจงานวิจัยในเรื่องเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เทคโนโลยีการอบแห้งและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง



ผศ.ดร. วรินทร์ เกียรติคุณกุล สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรมจากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตร์สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรมจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และ ปริญญาเอกวิศวกรรมศาสตร์สาขาวิศวกรรมเครื่องกลจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร เริ่มทำงานที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครในปี พ.ศ. 2551 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมกระบวนการและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร มีความสนใจในงานวิจัยในเรื่องการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน งานทางด้านของไหลและความร้อน และ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



พิชิต แก้วโกสุม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี-โท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปัจจุบันศึกษาต่อระดับปริญญาเอกสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีความสนใจในงานวิจัยในเรื่องการเพิ่มการถ่ายเท

ความร้อนจากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน งานทางด้านพฤติกรรมการไหลและความร้อน และการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ



ผศ.ดร. อนุชา สายสร้อย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และปริญญาเอกวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร เริ่มทำงานที่

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรีตั้งแต่ปี 2012 มีความสนใจในงานวิจัยในเรื่อง การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) การถ่ายเทความร้อน การไหลของของไหล และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



ผศ.ดร. ขวัญชัย หนาแน่น สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี-โท-เอก วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี มีความสนใจในงานวิจัยในเรื่องการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน งานทางด้านของไหลและ

ความร้อน และการไหลเจ็ทพุ่งชน