

เทคนิคการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนในท่อกลมด้วยแผ่นใบบิด

Thermal Enhancement Technique in Circular Duct with Twisted Tape

ธีรพัฒน์ ชมภูคำ

หน่วยวิจัยท่อความร้อนและออกแบบเครื่องมือทางความร้อน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

41/20 ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

Teerapat Chompookham

Heat Pipe and Thermal Tools Design Research Unit, HTDR, Faculty of Engineering,
Mahasarakham University. 41/20 Tambon Kamriang, Kantarawichai, Mahasarakham, 44150

Tel: 0-4375-4333 Ext. 3083 E-mail: teerapat.c@msu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการทบทวนเทคนิคในการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนในท่อกลมด้วยแผ่นใบบิด (twisted tape) อธิบายแนวคิดพื้นฐานการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาแบบบังคับภายในท่อกลม เทคนิคการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน 3 แบบ คือ เทคนิคแบบพาสซีฟ (passive technique) เทคนิคแบบแอคทีฟ (active technique) และเทคนิคแบบผสม (compound technique) การประยุกต์ใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนแบบแผ่นใบบิดในช่วงที่ผ่านมา

คำหลัก การถ่ายเทความร้อน สมรรถนะทางความร้อน แผ่นใบบิด การไหลแบบปั่นป่วน ตัวสร้างความปั่นป่วน การพาแบบบังคับ

Abstract

This paper is a review on the technique of heat transfer augmentation in circular duct with twisted tape. Fundamental concepts of internal forced convection analysis in circular tube are explained. Three different of thermal enhancement techniques are listed, i.e. passive technique, active technique and compound technique. The passive technique by using twisted tape in the recent past is reviewed.

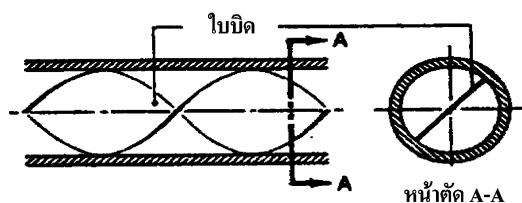
Keywords: Heat transfer, thermal enhancement, twisted tape, turbulent flow, turbulators, forced convection

1. บทนำ

การเจริญเติบโตและความก้าวหน้าในด้านต่าง ๆ ของโลกปัจจุบัน ทำให้มีความต้องการใช้พลังงานในปริมาณเพิ่มมากขึ้น ในภาคอุตสาหกรรมได้พัฒนาศักยภาพทั้งในด้านเทคโนโลยีการผลิต ลักษณะของผลิตภัณฑ์ วัตถุดิบและอุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ อย่างรวดเร็วเพื่อตอบสนองต่อความต้องการด้านต่าง ๆ โดยหลายหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนทั่วโลกต่างตระหนักถึงความสำคัญในการประหยัดพลังงาน ซึ่งก็คือ การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและประหยัดในส่วนที่ไม่จำเป็น อย่างไรก็ตามความต้องการใช้พลังงานก็ยังมีมากขึ้นตามกาลเวลา อันเนื่องจากการแข่งขันทางธุรกิจและจำนวนประชากรโลกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสิ่งเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ที่ตามมาอันได้แก่ ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มลพิษ ภาวะโลกร้อน วิกฤตราคาเชื้อเพลิงและวิกฤตเศรษฐกิจ เป็นต้น ฉะนั้นหากขาดการนำองค์ความรู้พื้นฐานที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ อย่างจริงจัง ปัญหาดังกล่าวก็จะมีทวีความรุนแรงมากขึ้นและยากที่จะเยียวยาได้

การพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นสิ่งจำเป็นในวงการอุตสาหกรรม ซึ่งได้นำเอาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาประยุกต์ใช้งานกับระบบต่าง ๆ ด้วยเหตุผลเนื่องจากการแข่งขันทางด้านการผลิตและการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีมากขึ้น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงยังต้องมีประสิทธิภาพที่สูงมากขึ้นตามไปด้วยเทคโนโลยีในการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนจึงสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบและการประยุกต์ใช้งานใน

หลาย ๆ ระบบ อาทิเช่น เครื่องอบแห้ง เตาดำ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แผงระบายความร้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องทำความเย็น เครื่องกลั่น เครื่องควบแน่น เครื่องยนต์ เครื่องจักรต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต เป็นต้น หลักการออกแบบอุปกรณ์หรือระบบที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดี ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติที่ตอบสนองต่อการต้องการของผู้ใช้ เช่น สามารถทำงานได้ตรงตามความต้องการ ราคาถูก สมรรถนะทางความร้อนสูง โครงสร้างไม่ซับซ้อน ขนาดกะทัดรัด อายุการใช้งานที่ยาวนาน การบำรุงรักษาและซ่อมแซมที่ไม่ยุ่งยาก รวมถึงมีความน่าเชื่อถือและปลอดภัยสูง เพื่อให้บรรลุคุณลักษณะที่ต้องการเหล่านี้ สิ่งสำคัญก็คือ การพัฒนาขีดความสามารถและศักยภาพของอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด เพื่อลดการใช้พลังงานของระบบและทำให้อุปกรณ์มีขนาดเหมาะสมและกะทัดรัด อีกทั้งช่วยลดการใช้วัสดุและพื้นที่ในการติดตั้งซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน ก่อให้เกิดการจัดสรรด้านการใช้ทรัพยากรเชื้อเพลิงและวัสดุเป็นไปอย่างคุ้มค่า



รูปที่ 1 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการติดแผ่นไบบิตในท่อ

แผ่นไบบิต (twisted tape) เป็นอุปกรณ์สร้างการปั่นป่วน (turbulator) ชนิดหนึ่งที่ใช้ในท่อกลม ดังแสดงในรูปที่ 1 การติดตั้งทำได้โดยการสอดเข้าไปในท่อ ซึ่งจะส่งผลให้ความเร็วของการไหลของของไหลเพิ่มขึ้น อีกทั้งมีความเร็วสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นบริเวณใกล้กับผนังท่อ [1-3] ซึ่งปัจจุบันถูกประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรมเพื่อเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนโดยการพาแบบบังคับ เนื่องจากส่งผลให้ระบบมีสมรรถนะที่ดีขึ้น การติดตั้งที่สะดวกและง่าย ซึ่งสิ่งเหล่านี้ส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานและปริมาณวัสดุในการสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เป็นให้ต้นทุนการผลิตลดลงและได้อุปกรณ์ที่มีสมรรถนะสูงขึ้นด้วย ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานแผ่นไบบิตในตัวทำความร้อนของรถยนต์และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 2 การประยุกต์ใช้งานแผ่นไบบิตในตัวทำความร้อนของรถยนต์ (ที่มาจาก <http://www.faculty.virginia.edu>)



รูปที่ 3 การประยุกต์ใช้งานแผ่นไบบิตในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของบริษัท Brown Fintube [3]

2. เทคนิคการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน

โดยทั่วไป เทคนิคการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนได้แบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม [2-3] คือ

กลุ่มที่ 1 แบบแอคทีฟ (active techniques) เป็นการนำเอาแหล่งพลังงานภายนอกเข้ามาช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เช่น อุปกรณ์ทางกล อุปกรณ์ทางไฟฟ้า ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการสั่นของผิว ทำให้ของไหลเกิดการสั่นสามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น

กลุ่มที่ 2 แบบพาสซีฟ (passive techniques) เป็นการออกแบบลักษณะพื้นผิวของท่อแบบพิเศษต่างไปจากผิวเรียบและปรับปรุงของไหลหรือสารทำงานเพื่อให้มีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีมากขึ้นโดยไม่มีพลังงานภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง

กลุ่มที่ 3 แบบผสม (compound techniques) เป็นการออกแบบโดยผสมผสานกันระหว่างเทคนิคการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนแบบแอคทีฟและแบบพาสซีฟ อาจจะเป็นการใช้แบบแอคทีฟหรือแบบพาสซีฟร่วมกันเองหรือการใช้แบบแอคทีฟร่วมกับแบบพาสซีฟก็ได้ ซึ่งการออกแบบมีความซับซ้อน เพื่อที่จะนำลักษณะเด่น

ของแต่ละวิธีการของแต่ละเทคนิคมาใช้ร่วมกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อจำกัดของการประยุกต์ใช้งานด้วย

ในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน วิธีที่ได้รับความนิยมกันส่วนมากก็คือ วิธีการแบบพาสซีฟ (passive method) โดยการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการปั่นป่วนเข้าไปภายในท่อเพื่อเพิ่มความเร็วของการไหลของของไหล ส่งผลทำให้ความเร็วสัมผัสในบริเวณใกล้กับผนังท่อมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น ส่งผลให้สมรรถนะทางความร้อนของระบบดีขึ้น การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในท่อกลม วิธีการหนึ่งที่ได้ผล การถ่ายเทความร้อนที่ดี คือ การสอดแผ่นไบบิตเข้าไปภายในท่อ โดยแผ่นไบบิตจะส่งผลให้ความรุนแรงของการไหลแบบปั่นป่วนมีค่ามากขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เป็นผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ถึงกระนั้นก็ตามการที่แผ่นไบบิตไปขวางการไหลก็ทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานของระบบเพิ่มขึ้นและเป็นผลต่อค่าการสูญเสียความดันก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

3. แนวคิดพื้นฐานการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาแบบบังคับภายในท่อกลม

เพื่อให้เข้าใจหลักการการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาแบบบังคับในท่อกลม ผู้อ่านควรเข้าใจแนวคิดพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาแบบบังคับในท่อกลม ที่มีสภาวะการไหลของของไหลในแบบปั่นป่วน เช่น สภาวะการไหลของของไหล สมดุลของพลังงาน การถ่ายเทความร้อน การสูญเสียความดันและสมรรถนะทางความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อติดตั้งแผ่นไบบิตเข้าไป เป็นต้น

3.1 สภาวะการไหลของของไหล

สำหรับการพิจารณาการไหลภายในท่อกลมนั้น จะต้องคำนึงถึงการขยายตัวของช่วงบริเวณทางเข้า (entry region) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับว่า การไหลนั้นเป็นในรูปแบบใด แบบราบเรียบ (laminar flow) หรือแบบปั่นป่วน (turbulent flow) โดยสามารถพิจารณาจากค่าของเลขเรย์โนลด์วิกฤติ (Re_c) สำหรับการไหลในช่วงของการเปลี่ยนแปลงของการไหล (transition flow) โดยจะเปลี่ยนแปลงจากการไหลแบบราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วน เริ่มต้นจาก $Re_c \approx 2,300$ และการไหลเป็นแบบปั่นป่วนเต็มที่ จะเกิดขึ้นเมื่อ $Re_c \geq 4,000$ [1] ส่วน

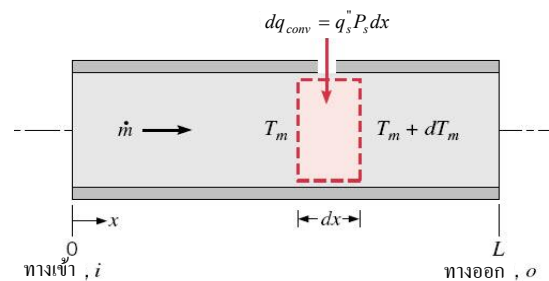
ความเร็วของของไหลพิจารณาเป็นความเร็วเฉลี่ย (mean velocity) เนื่องจากความเร็วภายในท่อจะแปรเปลี่ยนทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของท่อ จึงไม่สามารถใช้ความเร็วของกระแสของของไหลได้ โดยคำนวณได้จากสมการที่ (1) สำหรับเลขเรย์โนลด์เป็นฟังก์ชันของเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (D_h) ดังสมการที่ (2) ซึ่งสำหรับท่อกลมมีค่าเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ($D_h = D$)

$$\dot{m} = \rho U \frac{\pi D_h^2}{4} \quad (1)$$

$$Re = UD_h / \nu \quad (2)$$

เมื่อ ρ , U และ ν คือ คือ ความหนาแน่นของของไหลทำงาน ความเร็วเฉลี่ยและความหนืดเชิงจลน์ของของไหลทำงาน ตามลำดับ

3.2 สมดุลของพลังงาน



รูปที่ 4 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลภายในท่อ [1]

การพิจารณาการไหลในท่อตามรูปที่ 4 ของไหลไหลด้วยอัตราการไหลเชิงมวลคงที่ $\dot{m}$ และมีการพาความร้อนเกิดขึ้นที่ผิวภายใน โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของของไหล รวมทั้งการนำความร้อนในทิศทางตามแนวแกนจะไม่ถูกนำมาพิจารณา ดังนั้นถ้าไม่มีงานเพลาส่งกระทำโดยของไหลขณะไหลผ่านท่อ จะมีเพียงอิทธิพลที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนและงานจากการไหลเท่านั้น โดยการประยุกต์การอนุรักษ์พลังงานต่อปริมาตรควบคุม จะสามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อน ได้ดังสมการที่ (3)

$$dq_{conv} = q_s'' P_s dx = \dot{m} C_p dT_m \quad (3)$$

โดยที่ T_m , P_s , $\dot{m}$, C_p คือ อุณหภูมิเฉลี่ย เส้นรอบรูป ($P_s = \pi D_h$), อัตราการไหลเชิงมวลและค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหลทำงาน ตามลำดับ

ในการพิจารณาเงื่อนไขของท่อตลอดความยาวทั้งหมด การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (h) หาค่าได้จากการวัดอุณหภูมิและความร้อนที่ป้อนเข้าระบบ เมื่อพิจารณาความร้อนที่ให้กับของไหลทำงาน (q_f) มีค่าเท่ากับความร้อนที่เกิดจากการพาแบบบังคับ (q_{conv}) และความแตกต่างของอุณหภูมิผนังกับอุณหภูมิของไหลทำงาน ($T_s - T_b$), สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยหาได้จากข้อมูลทดลอง ดังสมการ

$$q_f = q_{conv} = \dot{m}C_p(T_{m,o} - T_{m,i}) \quad (3)$$

$$h = \frac{q_{conv}}{A(\bar{T}_s - T_b)} \quad (4)$$

โดยที่ $T_b = (T_{m,o} + T_{m,i})/2$ (5)

และ $\bar{T}_s = \sum T_s / n$ (6)

พจน์ A คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อนแบบการพาของผนังด้านของท่อที่ถูกให้ความร้อน เมื่อ $\bar{T}_s$ คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ยที่ได้จากอุณหภูมิผิวในแต่ละจุด (T_s) ตามแนวยาวของท่อ $T_{m,i}$, $T_{m,o}$, n คือ อุณหภูมิทางเข้า, อุณหภูมิทางออกและจำนวนจุดวัดอุณหภูมิผิวท่อตามลำดับ

3.3 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนภายในท่อ พิจารณาในพจน์ของเลขนัสเซลล์เฉลี่ย (Nu) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (h) หาค่าได้จากสมการที่ (4) สามารถเขียนสมการหาค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ย ได้ดังสมการที่ (7)

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (7)$$

k คือ ค่าการนำความร้อนของของไหลทำงาน คุณสมบัติทางกายภาพของของไหลทำงานถูกกำหนดที่อุณหภูมิของไหลเฉลี่ย (T_b) จากสมการที่ (5)

3.4 การสูญเสียความดัน

ในการออกแบบทางวิศวกรรม สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องออกแบบมาพิจารณา คือ การสูญเสียความดันของการไหลภายในท่อ เนื่องจากเป็นตัวพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการหาขนาดกำลังของปั๊มหรือพัดลม ซึ่งจะพิจารณาในพจน์ของตัวประกอบเสียดทาน (f) หาค่าได้จากสมการที่ (8)

$$f = \frac{2}{(L/D_h)} \frac{\Delta P}{\rho U^2} \quad (8)$$

เมื่อ ΔP คือ ค่าความดันตกคร่อมและ L คือ ความยาวท่อทดสอบ

3.5 การทวนสอบข้อผิดพลาด

การไหลภายในท่อเป็นการไหลในขอบเขตจำกัดโดยที่ความหนาของชั้นขอบเขตการไหลไม่สามารถเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ได้ เพราะว่าเมื่อไหลไปได้ระยะหนึ่งชั้นขอบเขตการไหลก็จะก่อตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อ รูปร่างของความเร็วจึงมีลักษณะชัดเจนแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีก ซึ่งการไหลลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า การไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว (fully developed flow)

การทวนสอบข้อผิดพลาด เป็นขั้นตอนหนึ่งของการตรวจสอบลักษณะคุณสมบัติของท่อทดสอบ ส่วนของการถ่ายเทความร้อนอยู่ในพจน์ของเลขนัสเซลล์และส่วนของการสูญเสียความดันอยู่ในพจน์ของตัวประกอบเสียดทาน โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับสหสัมพันธ์ที่เชื่อถือได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมภาวะการไหลของของไหลและเงื่อนไขการให้ความร้อนของผิวท่อที่พิจารณา [1-3]

เลขนัสเซลล์ สำหรับการพาความร้อนการไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อผิวเรียบกลม สามารถหาได้จากสมการที่ (9) และ (10) [1] เพื่อเปรียบเทียบ

$$Nu = 4.36, \text{ เมื่อ } q_s'' \text{ คงที่} \quad (9)$$

$$Nu = 3.657, \text{ เมื่อ } T_s \text{ คงที่} \quad (10)$$

ตัวประกอบเสียดทาน สำหรับการพาความร้อนการไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อผิวเรียบกลม สามารถหาได้จากสมการที่ (11) [1] เพื่อเปรียบเทียบ

$$f = \frac{64}{Re} \quad (11)$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อผิวเรียบกลม ที่มีเงื่อนไขการให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ การวิเคราะห์จะมีความยุ่งยากมาก เลขนัสเซลล์ นิยมเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter ดังสมการที่ (12) หรือสหสัมพันธ์ของ Gnielinski ดังสมการที่ (13) [1] ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเลขเรย์โนลด์และเลขพรันท (Pr) ดังนี้

$$Nu = 0.023 Re^{4/5} Pr^n \quad (12)$$

สำหรับช่วงพารามิเตอร์:

$$\left[\begin{array}{l} 6,000 \leq Re \leq 10^7 \\ 0.5 \leq Pr \leq 120 \\ L/D_h \geq 60 \end{array} \right]$$

โดยที่ $n=0.4$ สำหรับการทำให้ร้อน ($T_s > T_m$)
และ $n=0.3$ สำหรับการทำให้เย็น ($T_s < T_m$)

$$Nu = \frac{(f/8)(Re-1,000)Pr}{1+12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)} \quad (13)$$

สำหรับช่วงพารามิเตอร์: $3,000 < Re < 5 \times 10^6$

ตัวประกอบเสียดทาน สำหรับการพาความร้อนด้วยการไหลแบบปั่นป่วนที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อกลมผิวเรียบ เงื่อนไขการให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ตัวประกอบเสียดทานนิยมเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับสหสัมพันธ์ของ Blasius ดังสมการที่ (14) หรือสหสัมพันธ์ของ Petukhov ดังสมการที่ (15) [1] ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเลขเรย์โนลด์ ดังนี้

$$f = 0.316 Re^{-0.25} \quad (14)$$

สำหรับ $3,000 \leq Re \leq 20,000$

$$f = (0.79 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (15)$$

สำหรับ $3,000 \leq Re \leq 5 \times 10^6$

3.6 สมรรถนะทางความร้อน

เมื่อพิจารณาที่สภาวะกำลังขับ (Pumping power) เดียวกัน สำหรับกรณีท่อผนังเรียบกับกรณีทดสอบเมื่อติดตั้งแผ่นใบบิต เขียนได้ดังสมการที่ (16)

$$(\dot{V} \Delta P)_b = (\dot{V} \Delta P) \quad (16)$$

เมื่อ $\dot{V}$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหลทำงาน สามารถเขียนในพจน์ตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ ได้ดังสมการที่ (17)

$$\begin{aligned} (f Re^3)_b &= (f Re^3) \\ Re_0 &= Re(f/f_0)^{1/3} \end{aligned} \quad (17)$$

ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (η ; thermal enhancement factor) คือ อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นผิวทดสอบ (h) เทียบกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนผนังเรียบ (h_0) ที่กำลังขับเดียวกัน หาได้จากสมการที่ (18) [3]

$$\eta = \frac{h}{h_0} \bigg|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_0} \bigg|_{pp} = \left(\frac{Nu}{Nu_0} \right) \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-1/3} \quad (18)$$

เมื่อ ตัวห้อย pp คือ การพิจารณาที่กำลังขับเดียวกัน

0 คือ กรณีท่อผนังเรียบ

4. งานวิจัยการประยุกต์ใช้แผ่นใบบิตที่ผ่านมา

แผ่นใบบิต โดยส่วนใหญ่ทำมาจากแถบโลหะนำมาบิดด้วยเทคนิคที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ขนาดและรูปทรงตามที่ต้องการไว้ การประยุกต์ใช้งานแผ่นใบบิตถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเนื่องจากการใช้งานแผ่นใบบิตช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน แต่ให้ค่าตัวประกอบเสียดทานที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแบบพาสซีฟในรูปแบบอื่น ๆ ที่กำลังขับเดียวกัน [2-3] การใช้แผ่นใบบิตเป็นหนึ่งในเทคนิคการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนแบบพาสซีฟ ที่ให้ผลต่อการสร้างการหมุนวนในการไหลหลัก และการทำลายชั้นขอบเขตผิวความร้อนเนื่องจากการไหลที่มีการหมุนแบบวอร์เทกซ์ช่วยให้ชั้นขอบเขตทางความร้อนที่ผิวท่อบางลง เป็นผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นส่งผลต่อเนื่องให้การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่สิ่งที่เป็นผลในด้านตรงข้าม คือ การสูญเสียความดันก็จะเพิ่มขึ้นตามมาด้วยเช่นกัน เนื่องจากการที่แผ่นใบบิตไปขวางการไหล ดังนั้นจึงมีงานวิจัยหลาย ๆ งาน ทั้งแบบการทดลองและแบบการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่พยายามออกแบบเพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนที่สูงที่สุดและให้ผลของการสูญเสียความดันมีค่าน้อยที่สุด นั่นคือ สิ่งที่นักวิจัยมุ่งหมายโดยทั่วไปตามลักษณะโครงสร้างของแผ่นใบบิต ค่าสมรรถนะทางความร้อนจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนพิตช์ (pitch ratio) และอัตราส่วนการบิด (twist ratio) โดยอัตราส่วนพิตช์ คือ อัตราส่วนของระยะพิตช์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อและอัตราส่วนการบิด คือ ระยะระหว่างตำแหน่งเดียวกันของโครงสร้างของแผ่นใบบิตสองจุดที่อยู่ในระนาบเดียวกันโดยวัดขนานกับแกนของแผ่นใบบิต

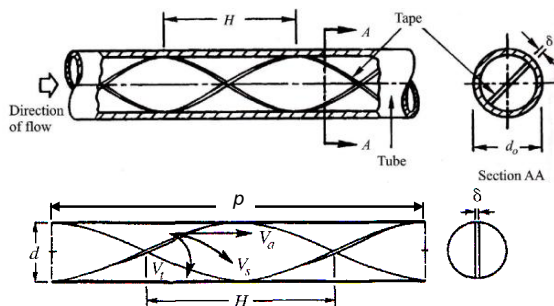
จากงานวิจัยที่ผ่านมา เราสามารถจำแนกลักษณะของแผ่นใบบิตที่ประยุกต์ใช้งานในระบบแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ ได้เป็น 8 กลุ่ม ดังนี้

1. แผ่นใบบิตแบบทั่วไป โดยมีความยาวแผ่นใบบิตเท่ากับความยาวของท่อทดสอบ [4-6]
2. แผ่นใบบิตแบบปรับเปลี่ยนความยาว ระยะพิตช์ และการสลับแกน โดยปรับเปลี่ยนความยาวแผ่นใบบิตไม่เท่ากับ ความยาวของท่อหรือแผ่นใบบิตแบบสลับกับการเว้นช่วง ที่ระยะพิตช์ต่าง ๆ หรือลักษณะการบิดร่วมกับการสลับแกน [7-11]

3. แผ่นไบบิตแบบใช้งานหลายแผ่น [12]
4. แผ่นไบบิตแบบมีแกน (rod) และตัวเว้นช่วง (spacer) [13-16]
5. แผ่นไบบิตแบบติดครีป [17-20]
6. แผ่นไบบิตแบบตัดช่อง เจาะรูและตัดบางส่วน [21-26]
7. แผ่นไบบิตแบบเกลียว [27-29]
8. แผ่นไบบิตแบบปรับพื้นผิว [30-32]

4.1 แผ่นไบบิตแบบทั่วไป (typical twisted tape)

แผ่นไบบิตแบบทั่วไป โครงสร้างของแผ่นไบบิตแบบทั่วไปนี้ ดังแสดงในรูปที่ 5 ประกอบด้วย ระยะพิทช์ (H) คือ ระยะเมื่อบิดแผ่นไปจากปกติเป็นมุม 180° , ความหนาแผ่นไบบิต (δ), ความกว้างแผ่นไบบิตซึ่งปกติจะมีค่าเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ (d) เป็นชนิดแผ่นไบบิตที่มีโครงสร้างของความยาวเท่ากับ ความยาวของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน มีอัตราส่วนพิทช์ (p/d) และอัตราส่วนการบิด (H/d) เท่ากันตลอดทั้งแผ่น



รูปที่ 5 โครงสร้างของแผ่นไบบิตแบบทั่วไป [4]

Kumar และ Prasad [4] นำเสนอการพัฒนาตัวสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบทำน้ำร้อนโดยใช้แผ่นไบบิตสอดเข้าไปในท่อ โดยศึกษาถึงผลของอัตราส่วนพิทช์ของการบิดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ในช่วงค่าตั้งแต่ 3 ถึง 12 ที่อัตราการไหลต่าง ๆ พบว่า การถ่ายเทความร้อนเมื่อติดตั้งแผ่นไบบิตเพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 18-70 ความดันสูญเสียเพิ่มขึ้นร้อยละ 87-132 เมื่อเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบ การประยุกต์ใช้งานแผ่นไบบิตสามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องทำความร้อนระบบพลังงานแสงอาทิตย์ได้ถึงร้อยละ 30 เมื่อพิจารณาที่สภาวะการทำงานเดียวกัน

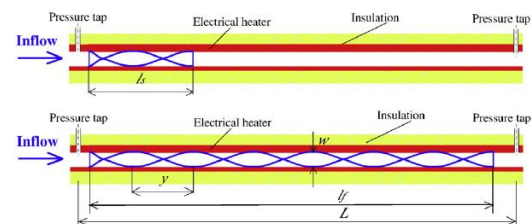
Noonthong และคณะ [5] ศึกษาถึงอิทธิพลของการใช้แผ่นไบบิตต่อการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความ

ดันภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น โดยติดตั้งแผ่นไบบิตที่ท่อชั้นใน ที่อัตราส่วนการบิดเท่ากับ 5 และ 7 พบว่า การใช้แผ่นไบบิตสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้สูงกว่าท่อผิวเรียบถึงร้อยละ 188 และร้อยละ 159 ที่อัตราส่วนการบิดเท่ากับ 5 และ 7 ตามลำดับ อัตราการถ่ายเทความร้อน การสูญเสียความดันและสมรรถนะทางความร้อนจะลดลงเมื่ออัตราส่วนการบิดมีค่าลดลง

Sarada และคณะ [6] ศึกษาเชิงทดลองการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนด้วยแผ่นไบบิตในท่อกลมแนวตั้งที่มีการไหลแบบปั่นป่วน ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 6,000 ถึง 13,500 ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ภายใต้เงื่อนไขการให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ท่อทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 27.5 มิลลิเมตร แผ่นไบบิตความกว้างเท่ากับ 10, 14, 18, 22 และ 26 มิลลิเมตร อัตราส่วนการบิดเท่ากับ 3, 4 และ 5 พบว่า การติดตั้งแผ่นไบบิตช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบได้ถึงร้อยละ 36-48 และร้อยละ 33-39 สำหรับความกว้างแผ่นไบบิตที่ 26 และ 22 มิลลิเมตรตามลำดับ

4.2 แผ่นไบบิตแบบปรับเปลี่ยนความยาว ระยะพิทช์ และการสลับแกน

แผ่นไบบิตแบบทั่วไป เป็นชนิดแผ่นไบบิตที่มีการเปลี่ยนโครงสร้าง โดยปรับค่าความยาว ระยะพิทช์และการสลับแกนของแผ่นไบบิต งานวิจัยที่นำแผ่นไบบิตแบบนี้ไปทดสอบและประยุกต์ใช้งาน มีดังนี้

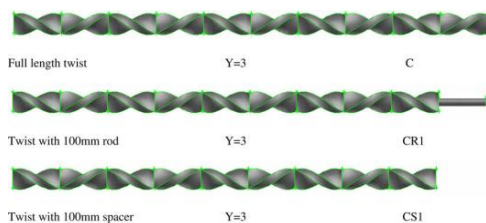


รูปที่ 6 แผ่นไบบิตทดสอบของ Eiamsa-ard และคณะ [7]

Eiamsa-ard และคณะ [7] ศึกษาเชิงทดลองอิทธิพลของความยาวแผ่นไบบิตแบบสั้นต่อการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อกลม ภายใต้เงื่อนไขการให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 4,000 ถึง 20,000 โดยแผ่นไบบิต ดังแสดงในรูปที่ 6 มีอัตราส่วนความยาว (LR = l_s/l_f) เท่ากับ 0.29, 0.43,

0.57 และ 1.00 อัตราส่วนการบิดคองที่เท่ากับ 4.0 พบว่า การใช้แผ่นใบบิดแบบสั้นที่ $LR = 0.29, 0.43$ และ 0.57 ให้การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานน้อยกว่าแผ่นใบบิดแบบเต็มช่วงที่ $LR = 1.00$ เท่ากับร้อยละ 14, 9.5 และ 6.7, ร้อยละ 21.0, 15.3 และ 10.5 ตามลำดับ ประสิทธิภาพสมรรถนะทางความร้อนของการใช้แผ่นใบบิดแบบสั้นให้ค่าต่ำกว่าแบบเต็มช่วง

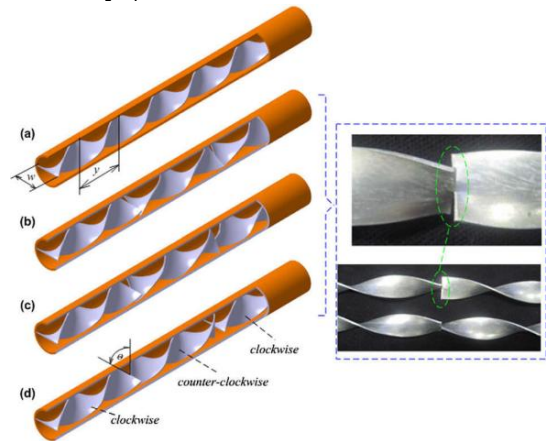
Jaisankar และคณะ [8] ศึกษาเชิงทดลองการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานของเครื่องทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ระบบเทอร์โมไซฟอน ด้วยการใช้แผ่นใบบิดแบบสลับซ้าย-ขวา แบบมีแท่งแกนและตัวเว้นช่วง ความยาว 100, 200 และ 300 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนการบิด 3 และ 5 ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่า การใช้แผ่นใบบิดแบบมีแกนและตัวเว้นช่วงให้ค่าเลขนัสเซิลต์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแบบเต็มช่วงเท่ากับร้อยละ 11 และ 19 ตามลำดับ ตัวประกอบเสียดทานให้ค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแบบเต็มช่วงเท่ากับร้อยละ 18 และ 29 ตามลำดับ และค่าสมรรถนะทางความร้อนของแผ่นบิดแบบมีแกนและตัวเว้นช่วงให้ค่าน้อยกว่าแบบเต็มช่วง



รูปที่ 7 แผ่นใบบิดทดสอบของ Jaisankar และคณะ [8]

Eiamsa-ard และ Promvong [9] ศึกษาเชิงทดลองการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานในท่อกลมที่ใช้แผ่นใบบิดแบบติดตั้งแผ่นใบบิด โดยแผ่นใบบิด ดังแสดงในรูปที่ 8 มี 2 แบบ คือ แบบทั่วไปและแบบเปลี่ยนแกนตามและทวนเข็มนาฬิกาสลับกัน (C-CC) ที่อัตราส่วนการบิด (y/w) เท่ากับ 3.0, 4.0 และ 5.0 มุมบิด (θ) เท่ากับ 30° , 60° และ 90° ทดสอบในช่วงเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 3,000-27,000 ใช้ น้ำเป็นของไหลทดสอบ พบว่า การติดตั้งแผ่นใบบิดแบบเปลี่ยนแกนตามและทวนเข็มนาฬิกาสลับกันให้ค่าอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอัตราส่วนการบิดและการเพิ่มขึ้นมุมบิด โดยค่าการถ่ายเท

ความร้อนสูงกว่าแบบทั่วไปร้อยละ 12.8-41.9 และสูงกว่าท่อผิวเรียบร้อยละ 27.3-90.5 และให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงสุดที่ $y/w = 3.0$, $\theta = 90^\circ$

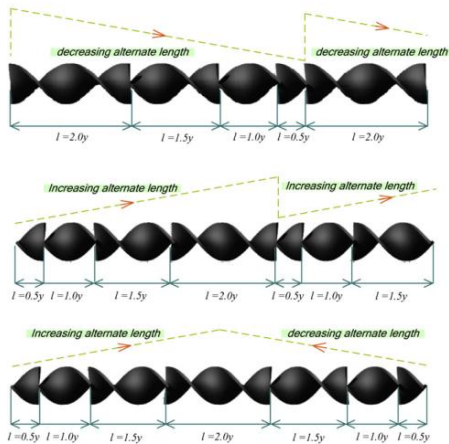


รูปที่ 8 การติดตั้งแผ่นใบบิดแบบเปลี่ยนแกนตามและทวนเข็มนาฬิกาของ Eiamsa-ard และ Promvong [9]

Wongcharee and Eiamsa-ard [10] ศึกษาเชิงทดลองแผ่นใบบิดแบบสลับแกน (TA) ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 830 ถึง 1,990 ที่อัตราการบิด (y/W) เท่ากับ 3, 4 และ 5 พบว่า การติดตั้งแผ่นใบบิดแบบสลับแกนส่งผลให้เลขนัสเซิลต์ ตัวประกอบเสียดทานและตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนมีค่าสูงกว่าการใช้งานแผ่นใบบิดแบบทั่วไป (TT) โดยให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงสุดเมื่อใช้แผ่นใบบิดแบบสลับแกนที่อัตราส่วนการบิดเท่ากับ 3

Eiamsa-ard และคณะ [11] ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนในท่อกลมโดยใช้แผ่นใบบิดแบบสลับแกน ที่อัตราส่วนของความยาวส่วนสลับต่อความส่วนการบิด (l/y) เท่ากับ 0.50, 1.00, 1.50 และ 2.00 แผ่นใบบิดแบบสลับแกนมี 2 แบบ คือ แบบความยาวส่วนสลับเท่ากัน (TAs) และความยาวส่วนสลับไม่เท่ากัน (N-TAs) ดังแสดงในรูปที่ 9 ทดสอบในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 5,000 ถึง 21,500 พบว่า แผ่นใบบิดแบบความยาวส่วนสลับเท่ากันและความยาวส่วนสลับไม่เท่ากันให้ค่าเลขนัสเซิลต์และตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าแผ่นใบบิดแบบทั่วไป โดยเลขนัสเซิลต์และตัวประกอบเสียดทานให้ค่าเพิ่มขึ้นตามการลดลงของความยาวส่วนสลับ (l) การใช้แผ่นใบบิดแบบความยาวส่วนสลับไม่เท่ากันการแปรเปลี่ยนของค่าเลขนัสเซิลต์และตัวประกอบเสียดทานเป็นผลมาจากความยาวส่วนสลับมากกว่าการ

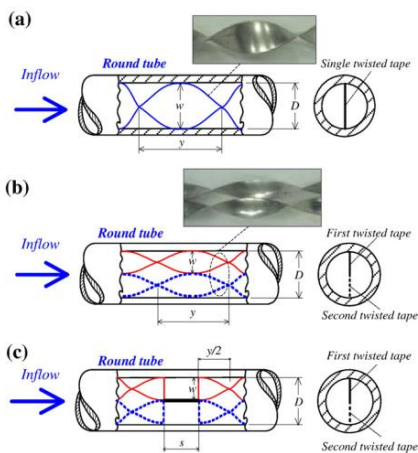
เปลี่ยนแปลงความยาว การใช้งานแผ่นไบตแบบ TA ที่ $l/y = 0.5$ ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนสูงสุด



รูปที่ 9 แผ่นไบตแบบสลับแกนความยาวไม่เท่ากัน (N-TA) ของ Eiamsa-ard และคณะ [11]

4.3 แผ่นไบตแบบใช้งานหลายแผ่น

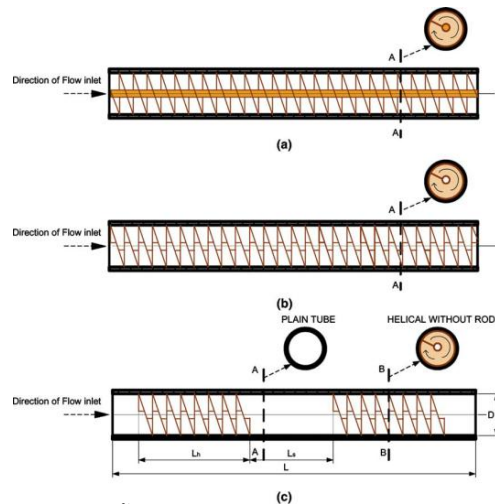
Eiamsa-ard และคณะ [12] ศึกษาเชิงทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลของการใช้งานแผ่นไบตแบบใช้แผ่นเดียวและแบบใช้สองแผ่นในท่อกลม ภายใต้เงื่อนไขการให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 4,000 ถึง 19,000 แผ่นไบต มีอัตราส่วนการบิดเท่ากับ 3, 4 และ 5 และอัตราส่วนช่องว่างเท่ากับ 0.75, 1.50 และ 2.25 ดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่า การใช้งานแผ่นไบตแบบคู่ให้การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแผ่นเดียว เลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอัตราส่วนการบิด ค่าสมรรถนะทางความร้อนแบบเว้นช่องว่างจะให้ค่าต่ำกว่าแบบเต็มช่อง



รูปที่ 10 แผ่นไบตและท่อทดสอบของ Eiamsa-ard และคณะ [12]

4.4 แผ่นไบตแบบมีแกน (rod) และตัวเว้นช่วง (spacer)

Eiamsa-ard และคณะ [13] ศึกษาเชิงทดลองอิทธิพลของแผ่นไบตแบบเกลียวต่อการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน การทดสอบติดตั้งแผ่นไบตแบบเกลียว 3 รูปแบบ คือ แผ่นไบตเต็มช่วงแบบมีแกน แผ่นไบตแบบทั่วไป (ไม่มีแกน) และแผ่นไบตแบบตัวเว้นช่วง ดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่า เมื่อใช้แผ่นไบตเต็มช่วงแบบมีแกนจะส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงสุดเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 160 สำหรับการใส่แผ่นไบตเต็มช่วงอย่างเดียวเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 150 และสำหรับการใส่แผ่นไบตแบบตัวเว้นช่วงที่ระยะช่องว่างเท่ากับ 0.5 เมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 145



รูปที่ 11 การติดตั้งแผ่นไบตแต่ละแบบ (a) แผ่นไบตเต็มช่วงแบบมีแกน (b) แผ่นไบตแบบทั่วไปและ (c) แผ่นไบตแบบตัวเว้นช่วง ของ Eiamsa-ard และคณะ [13]

Jaisankar และคณะ [14] ศึกษาเชิงทดลองผลของการติดตั้งแผ่นไบตแบบมีแกนและตัวเว้นช่วงในระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบเทอร์โมไฮฟอนที่ระยะจากขอบเท่ากับ 100, 200 และ 300 มิลลิเมตรที่อัตราส่วนการบิดเท่ากับ 3 และ 5 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นไบตแบบเต็ม แผ่นไบตแบบมีแกนให้เลขนัสเซลท์ต่ำสุดของการทดสอบ ส่วนแผ่นไบตแบบตัวเว้นช่วงให้ผลของเลขนัสเซลท์ไม่ต่างกันมากนัก ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใช้แผ่นไบตแบบตัวเว้นช่วงทำให้ค่าลดลงมากที่สุดและสมรรถนะทางความร้อนโดยรวมของ

การใช้แผ่นใบบิดแบบมีแกนให้ค่าสูงกว่าการใช้แผ่นใบบิดแบบตัวเว้นช่วง

Krishna และคณะ [15] ศึกษาเชิงทดลองการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมโดยใช้แผ่นใบบิดแบบตัวเว้นช่วง ดังแสดงในรูปที่ 12 พบว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของเลขเรย์โนลด์และการลดลงของระยะช่องว่าง ให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงสุดที่เลขเรย์โนลด์ 2,550



รูปที่ 12 แผ่นใบบิดทดสอบของ Krishna และคณะ [15]

Bas และ Ozceyhan [16] ศึกษาเชิงทดลองการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานการไหลในท่อกลมที่ติดตั้งตัวสร้างการหมุนวนแบบแผ่นใบบิด ดังแสดงในรูปที่ 13 มีอัตราส่วนการบิด (y/D) เท่ากับ 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 และ 4.0 อัตราส่วนช่องว่าง (c/D) เท่ากับ 0.0178 และ 0.0357 ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 5,132 ถึง 24,989 ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ พบว่า การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอัตราส่วนช่องว่างและอัตราส่วนการบิด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มขึ้น ที่ $c/D = 0.0178$ และ $y/D = 2$ เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 5,183 ให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.756 ซึ่งเป็นเลขเรย์โนลด์ต่ำสุด

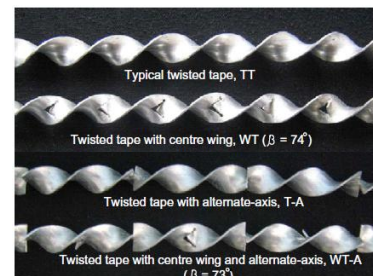


รูปที่ 13 แผ่นใบบิดของ Bas and Ozceyhan [16]

4.5 แผ่นใบบิดแบบติดครีป

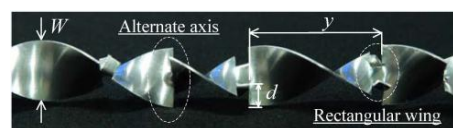
Eiamsa-ard และคณะ [17] ศึกษาเชิงทดลองผลของแผ่นใบบิดแบบมีปีกและสลักแกน (WT-A) ดังแสดงในรูปที่ 14 ใช้น้ำเป็นของไหลทดสอบ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 5,200 ถึง 22,000 แผ่นใบบิดมี 4 แบบ คือ แผ่นใบบิดแบบมีปีก (WT), แผ่นใบบิดแบบสลักแกน (T-A), แผ่นใบบิดแบบมีปีกและสลักแกน (WT-A) และแผ่น

ใบบิดแบบทั่วไป (TT) ที่ความยาวการบิดคงที่ (y) เท่ากับ 57 มิลลิเมตร อัตราการบิด (y/w) เท่ากับ 3.0 ปีกมีมุมปะทะ (β) = 43° , 53° และ 74° พบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนของแผ่นใบบิดแบบ WT-A ให้ค่าสูงกว่าแบบ WT, T-A และท่อผิวเรียบ ตามลำดับ อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของมุมปะทะ การประยุกต์ใช้งานแผ่นใบบิดแบบมีปีกและสลักแกนที่มุมปะทะ 74° ให้ค่าตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน อัตราการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานสูงสุดในการทดสอบนี้



รูปที่ 14 แผ่นใบบิดทดสอบของ Eiamsa-ard และคณะ [17]

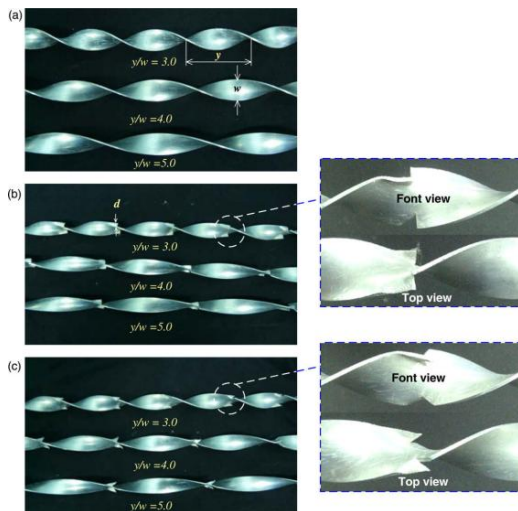
Eiamsa-ard และคณะ [18] ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานในท่อกลมโดยใช้แผ่นใบบิดแบบปีกสี่เหลี่ยม (TT-RWs) มี 2 แบบ คือ แบบทั่วไป (TT) และแบบเลือกแกนใต้ (TA) ดังแสดงในรูปที่ 15 อัตราส่วนความลึกปีก (d/W) ค่าระหว่าง 0.1 ถึง 0.3 อัตราส่วนการบิด (y/W) = 4.0 ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 5,500 ถึง 20,200 โดยใช้น้ำเป็นของไหลทดสอบ พบว่า การใช้แผ่นใบบิดแบบปีกสี่เหลี่ยมที่ $d/W = 0.3$ ให้ค่าเลขนัสเซลล์ที่สูงที่สุด ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อผิวเรียบประมาณร้อยละ 100 และค่าตัวประกอบประสิทธิภาพทางความร้อนเท่ากับ 1.36



รูปที่ 15 แผ่นใบบิดแบบปีกสี่เหลี่ยมของ Eiamsa-ard และคณะ [18]

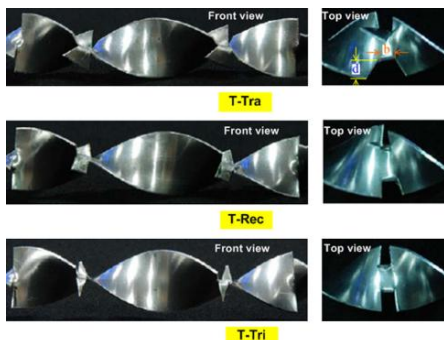
Eiamsa-ard และคณะ [19] ศึกษาเชิงทดลองการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานการไหลและสมรรถนะทางความร้อนโดยใช้แผ่นใบบิดแบบปีกสามเหลี่ยมเอียง (O-DWT) และปีกสามเหลี่ยมตรง (S-DWT) ดังแสดงในรูปที่ 16 ที่อัตราส่วนการบิดเท่ากับ 3,

4 และ 5 อัตราความลึกการตัด (d/W) เท่ากับ 0.11, 0.21 และ 0.32 พบว่า แผ่นใบบิตแบบปีกสามเหลี่ยมให้ค่าเลขนัสเซลล์และตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอัตราส่วนการบิตและการเพิ่มขึ้นของระยะตัดปีก โดยปีกสามเหลี่ยมแบบเอียงจะให้การถ่ายเทความร้อนดีกว่าแบบตรง



รูปที่ 16 แผ่นใบบิตแบบปีกสามเหลี่ยมของ Eiamsa-ard และคณะ [19]

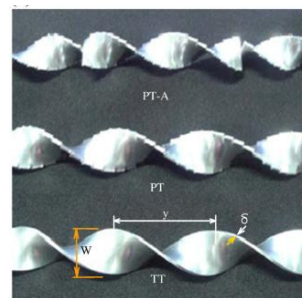
Wongcharee และคณะ [20] ศึกษาถึงผลของแผ่นใบบิตแบบสลักแกนและมีปีก โดยปีกมี 3 รูปทรง คือ สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมและสี่เหลี่ยมคางหมู ดังแสดงในรูปที่ 17 ที่อัตราส่วนการตัด (d/W) เท่ากับ 0.1, 0.2 และ 0.3 อัตราส่วนการบิตเท่ากับ 4 สลักแกนต่อเนื่องทุก 60 องศา พบว่า การใช้แผ่นใบบิตแบบสลักแกนและมีปีกให้การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าแบบทั่วไป ซึ่งการใช้แผ่นใบบิตแบบสลักแกนและมีปีกสี่เหลี่ยมคางหมูที่ $d/w = 0.3$ ให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.42



รูปที่ 17 แผ่นใบบิตแบบสลักแกนและมีปีกของ Wongcharee และคณะ [20]

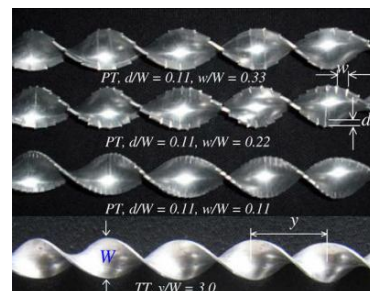
4.6 แผ่นใบบิตแบบตัดช่อง เจาะรูและตัดบางส่วน

Seemawute และ Eiamsa-ard [21] ศึกษาเชิงทดลองการไหลและการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่ติดตั้งแผ่นใบบิตแบบตัดขอบและเปลี่ยนแกน (PT-A) ดังแสดงในรูปที่ 18 ใช้น้ำเป็นของไหลทดสอบ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 5,000 ถึง 20,000 แผ่นใบบิตมี 3 แบบ คือ แบบตัดขอบและเปลี่ยนแกน (PT-A), แบบตัดขอบ (PT) และแบบทั่วไป (TT) พบว่า แผ่นใบบิตแบบ PTA, PT และ TT ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อผิวเรียบเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 184, 102 และ 57 ตามลำดับ และให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.25, 1.11 และ 1.02 ตามลำดับ



รูปที่ 18 แผ่นใบบิตแบบตัดขอบและเปลี่ยนแกนของ Seemawute และ Eiamsa-ard [21]

Eiamsa-ard และคณะ [22] ศึกษาเชิงทดลองการถ่ายเทความร้อน การสูญเสียความดันและตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนโดยใช้แผ่นใบบิตแบบตัดขอบ ดังแสดงในรูปที่ 19 อัตราส่วนการบิตเท่ากับ 3 อัตราส่วนความลึก (d/W) เท่ากับ 0.11, 0.22 และ 0.33 อัตราส่วนความกว้าง (w/W) เท่ากับ 0.11, 0.22 และ 0.33 พบว่า การใช้แผ่นใบบิตแบบตัดขอบให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานมากกว่าแบบทั่วไป ซึ่งสมรรถนะทางความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความลึกและการลดลงของอัตราส่วนความกว้าง



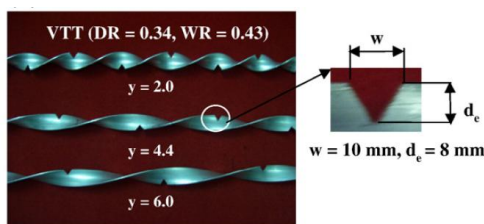
รูปที่ 19 แผ่นใบบิตแบบตัดขอบของ Eiamsa-ard และคณะ [22]

Murugesan และคณะ [23] ศึกษาการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบเสียดทานและตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นโดยใช้แผ่นไบบิตแบบตัดรูปสี่เหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 20 ที่อัตราส่วนการบิดเท่ากับ 2.0, 4.4 และ 6.0 ในรูปเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 2,000 ถึง 12,000 พบว่า การใช้แผ่นไบบิตแบบตัดสี่เหลี่ยมให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบเสียดทานและตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนสูงกว่าแบบทั่วไป



รูปที่ 20 แผ่นไบบิตแบบตัดรูปสี่เหลี่ยมของ Murugesan และคณะ [23]

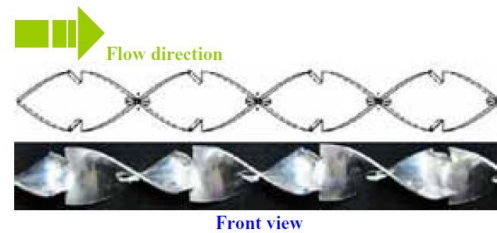
Murugesan และคณะ [24] ศึกษาผลของแผ่นไบบิตแบบตัดรูปตัววี (VTT) ดังแสดงในรูปที่ 21 ต่อค่าการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบเสียดทานและตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน ที่อัตราส่วนการบิดเท่ากับ 2.0, 4.4 และ 6.0 เมื่อ $DR = 0.34$ และ $WR = 0.43$, $DR = 0.34$ และ $WR = 0.34$, $DR = 0.43$ และ $WR = 0.34$ พบว่า การใช้แผ่นไบบิตแบบตัดรูปตัววีให้ค่าเลขนัสเซลล์ต์และตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอัตราส่วนการบิด อัตราส่วนความกว้างและตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความลึก



รูปที่ 21 แผ่นไบบิตแบบตัดรูปตัววีของ Murugesan และคณะ [24]

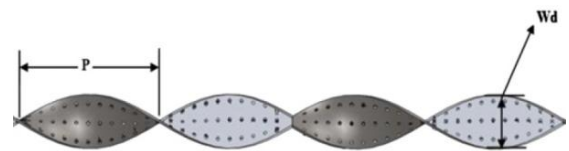
Thianpong และคณะ [25] ศึกษาเชิงทดลองการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อกลมเมื่อติดตั้งแผ่นไบบิตแบบเจาะรูและมีปีก (PTT) ดังแสดงในรูปที่ 22 ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 5,500 ถึง 20,500 ที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางรู (d/W) เท่ากับ 0.11, 0.33

และ 0.55 อัตราส่วนความลึกปีก (w/W) เท่ากับ 0.11, 0.22 และ 0.33 พบว่า การติดตั้งแผ่นไบบิตให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบเท่ากับร้อยละ 208 และ 190 สำหรับแผ่นไบบิตแบบเจาะรูมีปีก (PTT) และแบบทั่วไปตามลำดับ และเมื่อใช้แผ่นไบบิตแบบ PTT ที่ $d/W = 0.11$ และ $w/W = 0.33$ ให้ตัวประกอบประสิทธิภาพทางความร้อนรวมเท่ากับ 1.32 ที่เลขเรย์โนลด์ต่ำสุด



รูปที่ 22 แผ่นไบบิตแบบเจาะรูและมีปีกของ Thianpong และคณะ [25]

Bhuiya และคณะ [26] ศึกษาเชิงทดลองการถ่ายเทความร้อน การสูญเสียความดันและตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนโดยใช้แผ่นไบบิตแบบเจาะรู ดังแสดงในรูปที่ 23 ที่ความพรุน (R_p) เท่ากับร้อยละ 1.6, 4.5, 8.9 และ 14.7 ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 7,200 ถึง 49,800 ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ พบว่า การใช้แผ่นไบบิตแบบเจาะรูให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อผิวเรียบ ค่าเลขนัสเซลล์ต์ ตัวประกอบเสียดทานและสมรรถนะทางความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบสูงกว่าคิดเป็นร้อยละ 110-340, 110-360 และ 28-59 ตามลำดับ

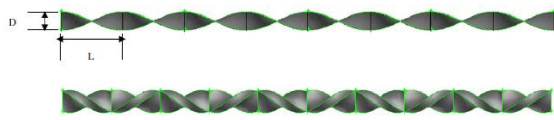


รูปที่ 23 แผ่นไบบิตแบบเจาะรูของ Bhuiya และคณะ [26]

4.7 แผ่นไบบิตแบบเกลียว, สลับซ้าย-ขวา

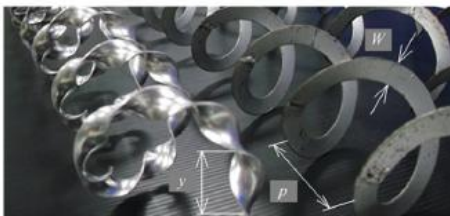
Jaisankar และคณะ [27] ศึกษาเชิงทดลองการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบเสียดทานและสมรรถนะทางความร้อนของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบเทอร์โมโฟนอนโดยใช้แผ่นไบบิตแบบเกลียวและสลับซ้าย-ขวา ที่อัตราส่วนการบิดเท่ากับ 3 ดังแสดงในรูปที่

24 พบว่า เมื่อใช้แผ่นไบบิตแบบเกลียวและสลับซ้าย-ขวา ให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงกว่าท่อผิวเรียบ

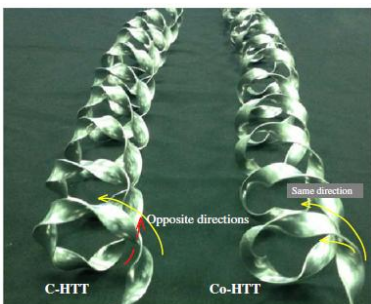


รูปที่ 24 แผ่นไบบิตของ Jaisankar และคณะ [27]

Eiamsa-ard และคณะ [28] ศึกษาถึงวิธีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้แผ่นไบบิตแบบเกลียว (Helically Twisted Tapes: HTTs) โดยแผ่นไบบิตแบบเกลียวทำมาจากแผ่นไบบิตทั่วไปนำมาบิดให้เป็นรูปเกลียว ดังแสดงในรูปที่ 25 ที่อัตราการบิด (y/W) เท่ากับ 2.0, 2.5 และ 3.0 อัตราพิตช์ของเกลียว (p/D) เท่ากับ 1.0, 1.5 และ 2.0 ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 6,000 ถึง 20,000 พบว่า การใช้งานแผ่นไบบิตแบบเกลียวให้ค่าเลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานน้อยกว่าแผ่นแบบเกลียว (Conventional Helical Tape: CHT) แต่ให้สมรรถนะทางความร้อนที่สูงกว่า อัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอัตราส่วนการบิดและอัตราส่วนพิตช์เกลียว แต่สมรรถนะทางความร้อนจะมีลักษณะตรงกันข้าม



รูปที่ 25 แผ่นไบบิตแบบเกลียว (HTT) และแผ่นแบบเกลียว (CHT) ของ Eiamsa-ard และคณะ [28]



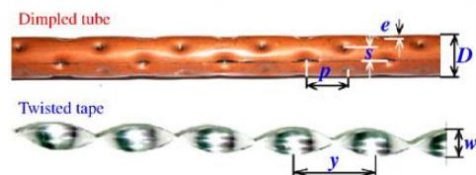
รูปที่ 26 แผ่นไบบิตแบบเกลียวของ Nanan และคณะ [29]

Nanan และคณะ [29] ศึกษาเชิงทดลองการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนด้วยแผ่นไบบิตแบบเกลียวชนิด

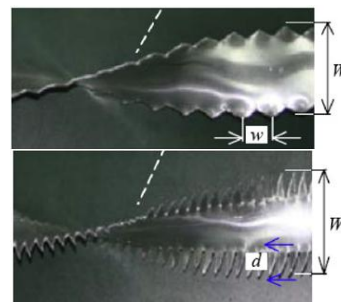
Co-HTT และ C-HTT ดังแสดงในรูปที่ 26 ที่อัตราส่วนระยะพิตช์ระหว่าง 1.0 และ 2.0 โดยอัตราส่วนความกว้างและอัตราส่วนการบิดคงที่ค่าเท่ากับ 0.2 และ 3.0 ตามลำดับ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 6,000 ถึง 20,000 เงื่อนไขการให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ พบว่าการใช้แผ่นไบบิตแบบ Co-HTT เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานแผ่นไบบิตแบบ C-HTT ให้ค่าเลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานต่ำกว่าแต่ให้ค่าตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนที่สูงกว่า

4.8 แผ่นไบบิตแบบปรับแต่งพื้นผิว

Thianpong และคณะ [30] ศึกษาถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันของการใช้แผ่นไบบิตในท่อกลมบุ๋ม (dimpled tube) ที่อัตราส่วนพิตช์เท่ากับ 0.7 และ 1.0 อัตราการบิดเท่ากับ 3, 5 และ 7 ดังแสดงในรูปที่ 27 ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 12,000 ถึง 44,000 พบว่า การใช้ท่อบุ๋มร่วมกับแผ่นไบบิตให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อบุ๋มอย่างเดียวและท่อผิวเรียบ สมรรถนะทางความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอัตราส่วนพิตช์และการลดลงของอัตราส่วนบิด



รูปที่ 27 ท่อทดสอบและแผ่นไบบิตของ Thianpong และคณะ [30]



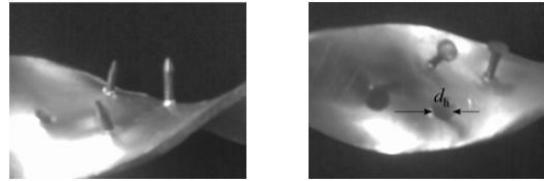
รูปที่ 28 แผ่นไบบิตของ Eiamsa-ard and Promvong [31]

Eiamsa-ard และ Promvong [31] ศึกษาผลของแผ่นไบบิตแบบขอบฟันเลื่อย (STT) ดังแสดงในรูปที่ 28 ต่อค่าการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดัน โดยพิจารณาที่ผลของอัตราส่วนความกว้างและอัตราส่วนความลึกของขอบฟันเลื่อย ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ

ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 4,000 ถึง 20,000 พบว่า การใช้แผ่นใบบิตแบบขอบฟันเลื่อยให้ค่าการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบเสียดทานและสมรรถนะทางความร้อนสูงกว่าแผ่นใบบิตแบบทั่วไป (TT) เลขนัสเซลท์เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอัตราส่วนความลึกและการลดลงของอัตราส่วนความกว้าง

Murugesan และคณะ [32] ศึกษาเชิงทดลองผลการประยุกต์ใช้งานใช้แผ่นใบบิตแบบเสียบตะปู (WN-TT) ดังแสดงในรูปที่ 29 ต่อค่าของเลขนัสเซลท์ ตัวประกอบเสียดทานและตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นเปรียบเทียบกับแผ่นใบบิตทั่วไป (P-TT) ที่อัตราส่วนการบิตเท่ากับ 2.0, 4.4

และ 6.0 ใช้น้ำเป็นของไหลทดสอบ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 2,000 ถึง 12,000 พบว่า เลขนัสเซลท์ ตัวประกอบเสียดทานและตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนของการใช้แผ่นใบบิตแบบ WN-TT ให้ค่าสูงกว่าแบบ P-TT



รูปที่ 29 แผ่นใบบิตของ Murugesan และคณะ [32]

ตารางที่ 1 สรุปงานวิจัยของการประยุกต์ใช้งานแผ่นใบบิตในแบบต่าง ๆ

ผู้วิจัย	ของไหล	โครงสร้าง	Re	Nu/Nu_0	f/f_0	η
Kumar and Prasad [4]	น้ำ	แบบทั่วไป	4,000-21,000	1.3-2.7	1.8-2.3	-
Noothong et al. [5]	น้ำ	แบบทั่วไป	2,000-12,000	1.59-1.88	2.94-3.37	1.3-2.1
Sarada et al. [6]	อากาศ	แบบทั่วไป	6,000-13,500	1.33-1.48	1.17-1.18	1.32-1.39
Eiamsa-ard et al. [7]	อากาศ	แบบปรับเปลี่ยนความยาว	4,000-20,000	1.0-1.4	1.5-2.5	0.85-1.04
Jaisankar et al. [8]	น้ำ	แบบสลักแกน	100-1,600	-	-	-
Eiamsa-ard and Promvonge [9]	น้ำ	แบบสลักแกน	3,000-27,000	1.27-1.90	2.7-5.1	0.8-1.4
Wongcharee and Eiamsa-ard [10]	น้ำ	แบบสลักแกน	830-1990	2.0-12.10	3.9-14.0	1.05-5.25
Eiamsa-ard et al. [11]	น้ำ	แบบสลักแกนและปรับเปลี่ยนความยาว	5,000-21,500	1.30-1.55	2.5-10.0	0.8-1.4
Eiamsa-ard et al. [12]	อากาศ	แบบหลายแผ่น	4,000-19,000	1.40-1.54	1.3-1.6	0.99-1.11
Eiamsa-ard et al. [13]	อากาศและน้ำ	แบบเกลียวและมีแกน	2,300-8800	1.29-1.65	-	-
Jaisankar et al. [14]	น้ำ	แบบมีแกนและตัวเว้นช่วง	100-600	-	-	-
Krishna et al. [15]	น้ำ	แบบตัวเว้นช่วง	300-3,000	-	-	0.5-1.06
Bas and Ozceyhan [16]	อากาศ	แบบเว้นช่องว่าง	5,132-24,989	1.39-2.57	2.5-4.0	1.1-1.79
Eiamsa-ard et al. [17]	น้ำ	แบบมีปีกและสลักแกน	5,000-22,000	1.6-2.8	4.4-8.4	0.9-1.4
Eiamsa-ard et al. [18]	น้ำ	แบบปีกสี่เหลี่ยม	5,000-20,200	1.78-2.00	1.46-4.18	0.85-1.36
Eiamsa-ard et al. [19]	น้ำ	แบบปีกสามเหลี่ยม	3,000-27,000	1.02-2.55	1.08-7.02	0.88-1.24
Wongcharee et al. [20]	น้ำ	แบบสลักแกนและมีปีก	5,500-20,200	1.2-2.82	2.8-8.02	1.05-1.42
Seemawute and Eiamsa-ard [21]	น้ำ	แบบตัดขอบและเปลี่ยนแกน	5,000-20,000	1.5-2.84	6-11	0.8-1.25
Eiamsa-ard et al. [22]	น้ำ	แบบตัดขอบ	1,000-20,000	1.3-3.3	3.9-12.1	0.88-4.88
Murugesan et al. [23]	น้ำ	แบบตัดรูปสี่เหลี่ยม	2,000-12,000	1.49-1.92	2.5-5.2	1.09-1.2
Murugesan et al. [24]	น้ำ	แบบตัดรูปตัววี	3,000-11,000	1.79-3.17	10.3-26.7	1.02-1.18
Thianpong et al. [25]	น้ำ	แบบเจาะรูและมีปีก	5,500-20,500	1.05-3.08	5-13	0.71-1.32
Bhuiya et al. [26]	อากาศ	แบบเจาะรู	7,200-49,800	1.10-3.40	1.1-3.6	1.28-1.59
Jaisankar et al. [27]	น้ำ	แบบเกลียวและสลักซี่ขาว	100-600	2.71-3.75	2.3-2.5	1.21-1.42
Eiamsa-ard et al. [28]	อากาศ	แบบเกลียว	6,000-20,000	1.7-2.75	5-47	0.6-1.29
Nanan et al. [29]	อากาศ	แบบเกลียว	6,000-20,000	1.68-3.25	4.1-36.7	0.83-1.29
Thianpong et al. [30]	อากาศ	แผ่นใบบิตในท่อกลมมุม	12,000-44,000	1.66-3.03	5-6.31	-
Eiamsa-ard and Promvonge [31]	อากาศ	แบบขอบฟันเลื่อย	4,000-20,000	1.32-1.72	2.47-3.33	0.96-1.17
Murugesan et al. [32]	น้ำ	แบบเสียบตะปู	2,000-12,000	1.47-1.98	3.22-4.26	1.11-1.33

ตารางที่ 1 แสดงสรุปงานวิจัยของการประยุกต์ใช้งานแผ่นใบบิตในแบบต่าง ๆ ตามชนิดของไหลทำงาน โครงสร้างลักษณะของแผ่นใบบิต ช่วงเลขเรย์โนลด์ที่ใช้ทดสอบ โดยแสดงค่าเปรียบเทียบของช่วงค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนของแต่ละงานวิจัยเพื่อเพิ่มความสะดวกสำหรับผู้ที่ต้องการนำไปประยุกต์ใช้งานพบว่า งานวิจัยของ Wongcharee และ Eiamsa-ard [10] ให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงถึง 5.25 รองลงมา คือ งานวิจัยของ Eiamsa-ard และคณะ [22] ให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนเท่ากับ 4.88 ซึ่งการนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบใด ๆ นั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของระบบว่า ช่วงการทำงานอยู่ในช่วงของเลขเรย์โนลด์เท่าไรและมีของไหลทำงานเป็นสารชนิดใด เพื่อให้ได้ลักษณะการใช้งานตามวัตถุประสงค์และได้ค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงสุด

5. บทสรุป

บทความนี้ทบทวนการใช้งานเทคนิคการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนในท่อกลมด้วยแผ่นใบบิต จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา แสดงให้เห็นถึงการใช้แผ่นใบบิตในการปรับปรุงสมรรถนะของการแลกเปลี่ยนความร้อน พิจารณาที่การถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันเป็นหลัก โดยมีการพัฒนาปรับปรุงโครงสร้างของแผ่นใบบิตในรูปแบบต่าง ๆ พบข้อสังเกต ดังนี้

1. การประยุกต์ใช้งานแผ่นใบบิต ช่วยสร้างการไหลแบบปั่นป่วนที่สูงขึ้นพร้อมกับเกิดการไหลแบบหมุนวน ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้น แต่การสูญเสียความดันก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน
2. การไหลแบบหมุนวนที่เกิดขึ้นจะช่วยลดความหนาของชั้นขอบเขตทางความร้อนของของไหลและช่วยเพิ่มระยะเวลาการอยู่ในท่อให้มากขึ้น
3. อัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอัตราส่วนการบิดและอัตราส่วนพิทช์
4. การใช้แผ่นใบบิตแบบสันติดตั้งที่ทางเข้าของท่อและการใช้แผ่นใบบิตแบบสันหลายแผ่นติดตั้งภายในท่อและเว้นช่วง ช่วยลดการสูญเสียความดันภายในท่อได้ เมื่อเทียบกับแผ่นใบบิตแบบเต็มช่วงที่อัตราส่วนการบิดเดียวกัน
5. การใช้แผ่นใบบิตแบบคู่ที่อัตราส่วนช่องว่างค่า

น้อย ๆ ให้สมรรถนะทางความร้อนสูงกว่าการใช้แผ่นใบบิตแบบเดี่ยว

6. สมรรถนะความร้อนเมื่อใช้แผ่นใบบิตแบบเต็มช่วงให้ค่าสูงกว่าแบบมีแท่งแกนและตัวเว้นช่วง
7. การใช้แผ่นใบบิตแบบติดครีบช่วยเพิ่มค่าของการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทาน
8. สมรรถนะทางความร้อนเมื่อใช้แผ่นใบบิตแบบเกลียวและสลัษั้ย-ขวาให้ค่าสูงกว่าท่อผิวเรียบ
9. สมรรถนะทางความร้อนเมื่อใช้แผ่นใบบิตแบบและสลัษัแกนให้ค่าสูงกว่าแบบตัดขอบอย่างเดียวหรือแบบสลัษัแกนเพียงอย่างเดียว
10. สมรรถนะทางความร้อนเมื่อใช้แผ่นใบบิตแบบสลัษัแกนและมีปีกให้ค่าสูงกว่าแบบสลัษัแกนอย่างเดียวหรือแบบมีปีกเพียงอย่างเดียว
11. การใช้แผ่นใบบิตแบบขอบฟันเลื่อยให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าแผ่นใบบิตแบบทั่วไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณรายได้ปีงบประมาณ 2556 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Incropera, F. and Dewitt, P.D. 2007. Introduction to heat transfer, 6th edition, John Wiley & Sons.
- [2] Webb, R. L. 1992. Principles of Enhanced Heat Transfer, New York: John-Wiley & Sons.
- [3] Bejan, A. and Kraus, A.D. 2003. Heat transfer handbook, New Jersey: John-Wiley & Sons.
- [4] Kumar, A. and Prasad, B.N. 2000. Investigation of twisted tape inserted solar water heaters-heat transfer, friction factor and thermal performance results. Renewable Energy, 19: 379-98.
- [5] Noothong, W., Eiamsa-ard, S. and Promvong, P. 2006. Effect of twisted-tape inserts on heat transfer in a tube. The 2nd Joint International

- conference on "Sustainable Energy and Environment (SEE2006)", Bangkok, Thailand Nov.21-23. 2006.
- [6] Sarada, N., Raju, S., Kalyani Radha, A.V. and Shyam K. 2010. Enhancement of heat transfer using varying width twisted tape inserts. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2(6): 107–18.
- [7] Eiamsa-ard, S., Thianpong, C., Eiamsa-ard, P. and Promvonge, P. 2009. Convective heat transfer in a circular tube with short-length twisted tape insert. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36: 365–71.
- [8] Jaisankar, S., Radhakrishnan T.K., Sheeba K.N. and Suresh, S. 2009. Experimental investigation of heat transfer and friction factor characteristics of thermosyphon solar water heater system fitted with spacer at the trailing edge of left–right twisted tapes. *Energy Conversion and Management*. 50: 2638-2649.
- [9] Eiamsa-ard, S. and Promvonge, P. 2010. Performance assessment in a heat exchanger tube with alternate clockwise and counter-clockwise twisted-tape inserts. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53: 1364-1372.
- [10] Wongcharee, K. and Eiamsa-ard, S. 2011. Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through the round tubes inserted with alternate clockwise and counter-clockwise twisted-tapes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38: 348-52.
- [11] Eiamsa-ard, S., Somkleang, P., Nuntadusit, C. and Thianpong C. 2013. Heat transfer enhancement in tube by inserting uniform/non-uniform twisted-tapes with alternate axes: Effect of rotated-axis length. *Applied Thermal Engineering*, 54(1): 289-309.
- [12] Eiamsa-ard, S., Thianpong, C., Eiamsa-ard, P. and Promvonge, P. 2010. Thermal characteristics in a heat exchanger tube fitted with dual twisted tape elements in tandem. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37: 39-46.
- [13] Eiamsa-ard, S. and Promvonge, P. 2005. Enhancement of heat transfer in a tube with regularly-spaced helical tape swirl generators. *Solar Energy*, 78: 483–494.
- [14] Jaisankar, S., Radhakrishnan, T.K. and Sheeba, K.N. 2009. Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of thermosyphon solar water heater system fitted with spacer at the trailing edge of twisted tapes. *Applied Thermal Engineering*, 29: 1224-1231.
- [15] Krishna, S.R., Pathipaka, G. and Sivashanmugam, P. 2009. Heat transfer and pressure drop studies in a circular tube fitted with straight full twist. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33: 431-8.
- [16] Bas, H. and Ozceyhan, V. 2012. Heat transfer enhancement in a tube with twisted tape inserts placed separately from the tube wall. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 41: 51–58.
- [17] Eiamsa-ard, S., Wongcharee, K., Eiamsa-ard, P. and Thianpong, C. 2010. Thermohydraulic investigation of turbulent flow through around tube equipped with twisted tapes consisting of centre wings and alternate-axes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34: 1151-1161.
- [18] Eiamsa-ard, P., Thianpong, C. and Eiamsa-ard, S. 2011. Influences of Twisted-Tape with Parallel Rectangular-Wing on Thermal Performance of a Heat Exchanger. 2011 International Conference and Utility Exhibition on Power and Energy Systems: Issues & Prospects for Asia (ICUE), Pattaya, Thailand,

- Sept. 28-30, 2011.
- [19] Eiamsa-ard, S., Wongcharee, K., Eiamsa-ard, P. and Thianpong, C. 2010. Heat transfer enhancement in a tube using delta-winglet twisted tape inserts. *Applied Thermal Engineering*, 30: 310-8.
- [20] Wongcharee, K. and Eiamsa-ard, S. 2011. Heat transfer enhancement by twisted tapes with alternate-axes and triangular, rectangular and trapezoidal wings. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 50: 211-219.
- [21] Seemawute, P. and Eiamsa-ard, S. 2010. Thermohydraulics of turbulent flow through a round tube by a peripherally-cut twisted tape with an alternate axis. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37: 652-659.
- [22] Eiamsa-ard, S., Seemawute, P. and Wongcharee, K. 2010. Influences of peripherally-cut twisted tape insert on heat transfer and thermal performance characteristics in laminar and turbulent tube flows. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34: 711-719.
- [23] Murugesan, P., Mayilsamy, K. and Suresh, S. 2010. Turbulent Heat Transfer and Pressure Drop in Tube Fitted with Square-cut Twisted Tape. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 18(4): 609-617.
- [24] Murugesan, P., Mayilsamy, K., Suresh, S. and Srinivasan, P.S.S. 2011. Heat transfer and pressure drop characteristics in a circular tube fitted with and without V-cut twisted tape insert. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38: 329-234.
- [25] Thianpong, C., Eiamsa-ard, P., Promvonge, P. and Eiamsa-ard, S. 2012. Effect of perforated twisted-tapes with parallel wings on heat transfer enhancement in a heat exchanger tube. *Energy Procedia*, 14: 1117-1123.
- [26] Bhuiya, M.M.K., Chowdhury, M.S.U., Saha, M. and Islam, M.T. 2013. Heat transfer and friction factor characteristics in turbulent flow through a tube fitted with perforated twisted tape inserts. *International Communications Heat and Mass Transfer*, 46: 49-57.
- [27] Jaisankar, S., Radhakrishnan, T.K. and Sheeba, K.N. 2011. Experimental studies on heat transfer and thermal performance characteristics of thermosyphon solar water heating system with helical and left-right twisted tapes. *Energy Conversion and Management*, 52: 2048-2055.
- [28] Eiamsa-ard, S., Yongsiri, K., Nanan, K. and Thianpong, C. 2012. Heat transfer augmentation by helically twisted tapes as swirl and turbulence promoters. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 60: 42-48.
- [29] Nanan, K., Yongsiri, K., Wongcharee, K., Thianpong, C. and Eiamsa-ard, S. 2013. Heat transfer enhancement by helically twisted tapes inducing co- and counter-swirl flows. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 46: 67-73.
- [30] Thianpong, C., Eiamsa-ard, P., Wongcharee, K. and Eiamsa-ard, S. 2009. Compound heat transfer enhancement of a dimpled tube with a twisted tape swirl generator. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36: 698-704.
- [31] Eiamsa-ard, S. and Promvonge, P. 2010. Thermal characteristics in round tube fitted with serrated twisted tape. *Applied Thermal Engineering*, 30: 1673-1682.
- [32] Murugesan, P., Mayilsamy, K. and Suresh, S. 2010. Heat transfer and friction factor studies in a circular tube fitted with twisted tape consisting of wire-nails. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 18: 1038-1042.