

คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อกลม ด้วยแผ่นไบบิด

สุทิน พลบูรณ์*

บทคัดย่อ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนถูกนำไปใช้ในหลายอุตสาหกรรมไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมการปรับอากาศและการทำความเย็น เตปปฏิกรณ์เคมี และ โรงจักรผลิตไฟฟ้า เพื่อการแลกเปลี่ยนอัตราการถ่ายเทความร้อนในระบบ การใช้พาสซีฟเทคนิค (passive technique) โดยการใช้แผ่นไบบิด (Twisted Tape) นำไปประยุกต์ใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจึงมีความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพมากขึ้น ราคาถูกและง่ายต่อการขึ้นรูป บทความนี้จึงได้รวบรวมงานวิจัยที่ใช้แผ่นไบบิดในการประยุกต์ใช้งาน โดยพิจารณาในรูปของการถ่ายเทความร้อน การสูญเสียความดันและสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน โดยพบว่าการใช้แผ่นไบบิดแบบสลับแกนหมุนตามเข็มนาฬิกาให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 5.25 และการใช้แผ่นไบบิดในท่อกลมร่วมกับขดลวดให้การสูญเสียความดันมากที่สุดเท่ากับ 74 เท่าของท่อผิวเรียบ

คำสำคัญ : เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, แผ่น ไบบิด, พาสซีฟเทคนิค, การสูญเสียความดัน

สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล, คณะเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: suthin_27@hotmail.com รับเมื่อ 27 มิถุนายน 2557 ตอบรับเมื่อ 13 ตุลาคม 2557

Heat Transfer and Pressure Loss Characteristics in Circular Tube with Twisted Tape

Suthin Pholboorn *

Abstract

Heat exchanger was used in many industrials viz. automotive, air condition and refrigeration system, chemical reactor and power plant to exchanging of heat transfer rate in the system. Passive technique was the most popular technique in form of twisted tape because of the efficiency of heat transfer, cheap and easy to machine. This paper collected literatures which applied twisted tape to provide by heat transfer, pressure loss and heat transfer enhancement. The result reveal that the maximum heat transfer enhancement of the alternate clockwise and counter-clockwise twisted tape is 5.25 and the maximum pressure loss of 74 was found by the use of twisted tape and wire coil to compare with smooth tube.

Keywords : Heat exchanger, Twisted tape, Passive technique, Pressure loss

1. บทนำ

พลังงานมีความสำคัญในภาคอุตสาหกรรมเป็นอย่างมากไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมการปรับอากาศและห้องเย็น อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งทุกภาคอุตสาหกรรมต่างพยายามลดต้นทุนการผลิตด้วยการลดการใช้พลังงานด้วยการลดขนาดของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับความร้อนคือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) แต่ต้องทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงที่สุดในการทำงาน โดยการนี้จึงมีการค้นคว้าวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยวิธีแบบพาสซีฟ (passive method) ที่มีความนิยมมากโดยการสอดใส่แผ่นไบบิด (Twisted Tape, TT) [1, 4-6] และเพิ่มเทคนิคด้วยการปรับปรุงแผ่นไบบิดไม่ว่าจะเป็น การปรับเปลี่ยนความยาวช่วงการบิดการสลับแกนการบิด [7-9] ใช้หลายแผ่น [10-13] แบบมีแกนและเว้นช่วง [14-17] การติดครีป [18-22] การเจาะและการตัดบางส่วน [23-26] การใช้แบบเกลียว [27-30] การปรับปรุงพื้นผิว [31-32] และ การใช้แผ่นไบบิดร่วมกับอุปกรณ์อื่น [33-35] ซึ่งบทความนี้ได้รวบรวมงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้แผ่นไบบิดในลักษณะดังกล่าวข้างต้นเพื่อแสดงให้เห็นถึงการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันรวมทั้งสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเพื่อประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้ให้เหมาะสมกับความต้องการหรือการออกแบบ

2. พฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อที่ใส่แผ่นไบบิด

แผ่นไบบิด (Twisted Tape, TT) ทำมาจากแผ่นโลหะหรืออะลูมิเนียมขึ้นรูปด้วยการบิดขึ้นงานไปตามขนาดที่ต้องการด้วยอุปกรณ์ช่วยแรง โดยแผ่นไบบิดมีค่าจำกัดความที่สำคัญได้แก่ อัตราส่วนการบิด (Twisted ratio, $y=H/d$) คือ อัตราส่วนระหว่างระยะพิทช์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ, ระยะพิทช์ (Pitch, H) คือ ระยะระหว่างจุดสองจุดที่อยู่บนระนาบเดียวกันของแผ่นไบบิด เมื่อสอดใส่แผ่นไบบิดเข้าไปในท่อจะทำให้เกิดการไหลหมุนควง (Swirl flow) หรือการไหลชั้นที่สอง (Secondary flow) โดยของไหลจะมีลักษณะการไหลแบบเกลียวไปตามความยาวของแผ่นไบบิดส่งผลให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) และชั้นขีดของของไหลบริเวณใกล้ผนังท่อจะถูกทำลายให้มีขนาดเล็กลงพร้อมทั้งเพิ่มความเร็วให้กับของไหลจึงทำให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพมากขึ้น [2-3]

3. งานวิจัยประยุกต์ด้วยแผ่นไบบิด

บทความนี้ได้รวบรวมงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้แผ่นไบบิดและการปรับปรุงในรูปแบบที่แตกต่างกัน โดยแบ่งกลุ่มการพิจารณาออกเป็น 9 กลุ่ม สำหรับรายละเอียดโครงสร้างและรูปแบบแผ่นไบบิดที่มีการประยุกต์ใช้งานที่อ้างอิงถึงในบทความนี้แสดงดังตารางที่ 1

3.1 แผ่นไบบิดแบบทั่วไป

Noothong et al. [4] ได้ทดลองด้วยการสอดใส่แผ่นไบบิด (TT) ที่มีอัตราส่วนการบิด $y = 5$ และ 7

เลขเรย์โนลด์คืออยู่ในช่วง 2,000 ถึง 12,000 พบว่า เลขนัสเซิลท์เท่ากับ 188% และ 159% เมื่ออัตราส่วนการบิดเท่ากับ 5 และ 7 ตัวประกอบเสียดทานมีค่าเท่ากับ 3.37 และ 2.94 เมื่ออัตราส่วนการบิดเท่ากับ 5 และ 7 ตามลำดับ Sundar and Sharma [5] ได้ทดลองสอดใส่แผ่นใบบิดในท่อกลมโดยใช้น้ำและ Al_2O_3 เป็นของไหลทำงาน เลขเรย์โนลด์คืออยู่ในช่วง 10,000-22,000 และอัตราส่วนการบิดเท่ากับ 5, 10, 15 และ 83 พบว่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานของ Al_2O_3 เมื่ออัตราส่วนการบิดเท่ากับ 5 มีค่าเป็น 33.51 และ 1.096 เท่าของน้ำในท่อผิวเรียบ

Bas and Ozceyhan [6] ได้ทดลองในท่อกลมด้วยการสอดใส่แผ่นใบบิดที่วางห่างผิวท่อ โดยมีอัตราส่วนการบิด $y/D = 2, 2.5, 3, 3.5$ และ 4 อัตราส่วนระยะห่างผิวท่อ $c/D = 0.0178$ และ 0.0357 พร้อมเปรียบเทียบกับแผ่นใบบิดวางชิดผิวท่อ ($c/D = 0$) เลขเรย์โนลด์คืออยู่ในช่วง 5,132 ถึง 24,989 พบว่าเลขนัสเซิลท์สูงสุดอยู่ในช่วง 95-175 เท่าของท่อผิวเรียบเมื่อ $y/D = 2$ และ $c/D = 0.0178$ และตัวประกอบเสียดทานสูงสุดเท่ากับ 4 เท่าของท่อผิวเรียบเมื่อ $y/D = 2$ และ $c/D = 0.0178$ สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.756 เมื่อ $c/D = 0.0178$ และ $y/D = 2$ เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 5,183

3.2 แผ่นใบบิดแบบปรับเปลี่ยนความยาว, สลับแกน

Eiamsa-ard et al. [7] ได้ศึกษาเชิงทดลองในท่อกลมสอดใส่แผ่นใบบิดแบบสั้นภายใต้เงื่อนไขฟลักซ์ความร้อนคงที่ อัตราส่วนการบิดของแผ่นใบบิดแบบเต็มความยาวที่ $y = 4.0$ อัตราส่วนความยาวของแผ่นใบบิดแบบสั้น ($LR = l_1/l_2 = 0.29, 0.43, 0.57$ และ 1.0) เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 4,000 ถึง 20,000 พบว่าแผ่นใบบิดแบบสั้น

$LR = 0.29, 0.43$ และ 0.57 มีค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานน้อยกว่าแผ่นใบบิดแบบเต็มความยาวเท่ากับ 14, 9.5 และ 6.7%; และ 21, 15.3 และ 10.5% ตามลำดับ

Wongcharee and Eiamsa-ard [8] ได้ทดลองศึกษาในท่อกลมด้วยการสอดใส่แผ่นใบบิดแบบสลับแกนหมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา (TA) ที่มีอัตราส่วนการบิด $y/W = 3, 4$ และ 5 ดังรูปที่ 1 เปรียบเทียบกับแผ่นใบบิด (TT) เลขเรย์โนลด์คืออยู่ในช่วง 830 ถึง 1,990 พบว่าเลขนัสเซิลท์ ตัวประกอบเสียดทานและตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนแบบ TA มีค่าสูงกว่าแบบ TT Eiamsa-ard et al. [9] ได้ทำการทดลองในท่อกลมด้วยการสอดใส่แผ่นบิดสลับแกนที่อัตราส่วนความยาวส่วนบิดต่อความยาวส่วนสลับ $l/y = 0.5, 1.0, 1.5$ และ 2.0 แผ่นใบบิดแบบสลับแกนมี 2 แบบ คือ แบบความยาวส่วนสลับเท่ากัน (TAs) และ ความยาวส่วนสลับไม่เท่ากัน (N-TAs) ดังรูปที่ 2 เลขเรย์โนลด์คืออยู่ในช่วง 5,000 ถึง 21,500 พบว่าเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวส่วนสลับลดลง การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานแบบ N-TAs ต่ำกว่าแบบ TAs ที่ $l/y = 0.5$ และ 1.0 แต่เมื่อ $l/y = 1.5$ และ 2.0 จะตรงกันข้ามและการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเมื่อใช้แบบ TAs ที่ $l/y = 0.5$

3.3 แผ่นใบบิดแบบหลายแผ่น

Eiamsa-ard et al. [10] ได้ทดลองในท่อกลมด้วยการสอดใส่แผ่นใบบิดแบบคู่ไหลทิศทางเดียวกัน (CoTs) และไหลสวนทิศทาง (CTs) ด้วยอัตราส่วนการบิด ($y/W = 2.5, 3.0, 3.5$ และ 4.0) เลขเรย์โนลด์คืออยู่ระหว่าง 3,700 ถึง 21,000 ภายใต้เงื่อนไขฟลักซ์ความร้อนคงที่

พบว่าเลขนัสเซลท์, ตัวประกอบเสียดทานและตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการบิดลดลง แผ่นใบบิดแบบ CTs ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแบบ CoTs โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนแบบ CTs อยู่ในช่วง 12.5-44.5 เท่าของแบบ CoTs ตัวประกอบเสียดทานแบบ CTs ที่ $y/W=2.5, 3.0, 3.5$ และ 4.0 มีค่าเท่ากับ 6.37, 5.33, 4.57 และ 3.95 เท่าของท่อผิวเรียบ และตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนสูงสุดแบบ CTs เท่ากับ 1.39 เมื่ออัตราส่วนการบิด $y/W=2.5$

Zhang et al.[11] ได้จำลองการศึกษาในท่อกลมช่วงการไหลแบบลามินาร์ด้วยการสอดใส่แผ่นใบบิดแบบสามแผ่นและสี่แผ่น ดังรูปที่ 3 เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 300 ถึง 1,800 พบว่าเลขนัสเซลท์เพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 171% และ 189% สำหรับแผ่นใบบิดแบบสามแผ่นและสี่แผ่นตามลำดับ ตัวประกอบเสียดทานสำหรับแผ่นใบบิดแบบสามแผ่นและสี่แผ่นอยู่ในช่วง 4.06-7.02 เท่าของท่อผิวเรียบ และสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนอยู่ระหว่าง 1.64 ถึง 2.46 Bhuiya et al. [12] ได้ศึกษาเชิงทดลองสอดใส่แผ่นใบบิดแบบสามแผ่นที่มีอัตราส่วนการบิด $y=1.92, 2.88, 4.81$ และ 6.79 เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 7,200 ถึง 50,200 ภายใต้เงื่อนไขพลาซึ่มความร้อนคงที่ พบว่าเลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นเป็น 3.85 และ 4.2 เท่าของท่อผิวเรียบ, ตามลำดับ และสมรรถนะทางความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.44

Bhuiya et al.[13] ได้ทดลองในท่อกลมด้วยการสอดใส่แผ่นใบบิดแบบคู่ไหลวนสวนทางกันโดยใช้อากาศเป็นของไหลทำงาน อัตราส่วนการบิด $y = 1.95, 3.85, 5.92$ และ 7.75 เลขเรย์โนลด์อยู่ระหว่าง 6,950 ถึง 50,050 พบว่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียด

ทานอยู่ในช่วง 60 ถึง 240 และ 91 ถึง 286 เท่าของท่อผิวเรียบ, ตามลำดับ สมรรถนะทางความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.34

3.4 แผ่นใบบิดแบบมีแกน, แบบเว้นช่วง

Eiamsa-ard et al. [14] ได้ทดลองสอดใส่แผ่นใบบิดแบบเว้นช่วงด้วยอัตราส่วนการเว้นช่วง ($S = 1.0, 2.0$ และ 3.0) โดยใช้แผ่นใบบิดแบบเต็มช่วงที่มีอัตราส่วนการบิด ($y = 6.0$ และ 8.0) เพื่อเปรียบเทียบ และเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 2,000 ถึง 12,000 พบว่าเลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอัตราส่วนการบิด แผ่นใบบิดแบบเต็มช่วงจะมีเลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานมากกว่าแบบเว้นช่วง แต่เมื่อเปรียบเทียบแผ่นใบบิดแบบเว้นช่วงจะได้ว่า $S=1.0$ เลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานจะมากกว่า $S=2.0$ และ 3.0 ตามลำดับ

Sivashanmugam and Suresh [15] ได้ทดลองสอดใส่สกรูแบบเกลียวบิดเต็มช่วงและเกลียวบิดเว้นช่วง 100, 200, 300 และ 400 mm ภายใต้เงื่อนไขพลาซึ่มความร้อนคงที่ อัตราส่วนการบิดอยู่ในช่วง 1.95 ถึง 4.89 ดังรูปที่ 4 เลขเรย์โนลด์อยู่ระหว่าง 6,000 ถึง 13,200 พบว่าเลขนัสเซลท์ลดลง 10% ตามการเพิ่มขึ้นของการเว้นช่วงการบิด ตัวประกอบเสียดทานของเกลียวบิดที่มีระยะเว้นช่วงการบิด 100 mm จะมีค่าใกล้เคียงกับเกลียวบิดแบบเต็มช่วงความยาวและลดลง 5% เมื่อเกลียวเว้นช่วงการบิดเพิ่มขึ้น Ananth and Jaisankar [16] ได้ทดลองระบบคัมน์น้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์โดยการสอดใส่แผ่นใบบิดแบบเต็มช่วงที่มีอัตราส่วนการบิดเท่ากับ 3, แผ่นใบบิดที่มีแกน (rod) และเว้นช่วงการบิดที่มีความยาว 125, 250 และ 500 mm เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 200 ถึง 1,200

พบว่าเลขนัสเซลท์ลดลงเมื่อเพิ่มความยาวแกนและช่วงการบิด ขณะที่ความดันลดลงจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดความยาวแกนและช่วงการบิดเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นใบบิดแบบเต็มช่วง

Eiamsa-ard et al. [17] ได้ทดลองในท่อกลมด้วยการสอดใส่แผ่นใบบิดแบบเว้นช่วง (RS-TT) ที่มีอัตราส่วนการบิด ($y=P/W=6.0$ และ 8.0) และอัตราส่วนระยะการเว้นช่วง ($s=S/P=1.0, 2.0$ และ 3.0) เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 5,000 ถึง 12,000 พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการบิดและอัตราส่วนการเว้นช่วงลดลง ในเงื่อนไขเดียวกันพบว่าแผ่นใบบิดแบบเต็มช่วงให้ค่าการถ่ายเทความร้อนตัวประกอบเสียดทานและตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนสูงกว่าแผ่นใบบิด RS-TT ($s = 1.0, 2.0$ และ 3.0)

3.5 แผ่นใบบิดแบบติดครีบ

Tijing et al. [18] ได้ทดลองสอดใส่ครีบแบบตรง (Straight fin) และแบบเกลียวบิด (Twisted fin) ที่มีระยะพิตซ์ $P=0.45$ และ 0.90 mm เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 1,900 ถึง 47,000 พบว่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 12-51 เท่าของท่อผิวเรียบขึ้นอยู่กับรูปร่างของครีบแบบเกลียว ความดันลดลงเพิ่มขึ้น 286 - 399% Eiamsa-ard et al. [19] ได้ทดลองสอดใส่แผ่นใบบิดแบบมีปีกตรงกลางและสลับแกน (WT-A) ดังรูปที่ 5 พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับแผ่นใบบิดอีก 3 เงื่อนไข คือ แผ่นใบบิดแบบมีปีกตรงกลาง (WT), แผ่นใบบิดแบบสลับแกน (T-A) และ แผ่นใบบิดแบบทั่วไป (TT) โดยทุกชนิดใช้อัตราส่วนการบิดคงที่ ($y/W=3.0$) ปีกทำตลอดแนวแกนกลางของแผ่นมีมุมปะทะ ($\beta = 43^\circ, 53^\circ, 74^\circ$) เลขเรย์โนลด์

อยู่ในช่วง 5,200 ถึง 22,000 พบว่าการถ่ายเทความร้อนของท่อที่สอดใส่แบบ WT-A มีค่ามากกว่าแบบ WT, T-A และ ท่อผิวเรียบ โดยเพิ่มขึ้นตามมุมปะทะ ท่อที่สอดใส่แบบ WT-A ที่มีมุมปะทะ ($\beta = 74^\circ$) ให้ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.4 อัตราส่วนเลขนัสเซลท์ (Nu_t / Nu_p) อยู่ในช่วง 1.6-2.4 และ 1.8-2.8 ในขณะที่อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f_t / f_p) อยู่ในช่วง 4.4-6.9 และ 6.48-8.4 สำหรับแผ่นใบบิดแบบ WT และ WT-A, ตามลำดับ

Eiamsa-ard et al. [20] ได้ศึกษาเชิงทดลองสอดใส่แผ่นใบบิดแบบมีปีก โดยศึกษาถึงอิทธิพลของปีกแบบเอียง (O-DWT) และ ปีกแบบตรง (S-DWT) อัตราส่วนการบิด $y/W=3, 4$ และ 5 อัตราส่วนความลึกของปีก ($DR=d/w=0.11, 0.21$ และ 0.32) เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 3,000 ถึง 27,000 ภายใต้เงื่อนไขฟลักซ์ความร้อนคงที่พบว่าเลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อลดอัตราส่วนการบิดและเพิ่ม DR และยังพบอีกว่า O-DWT จะให้การถ่ายเทความร้อนมากกว่า S-DWT ตลอดทุกค่าของเลขเรย์โนลด์พบว่าเลขนัสเซลท์ ตัวประกอบเสียดทานและตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนของ O-DWT อยู่ในช่วง 1.04-1.64, 1.09-1.95 และ 1.05-1.13 เท่าของท่อที่สอดใส่แบบ TT, ตามลำดับ

Wongcharee and Eiamsa-ard [21] ได้ทดลองสอดใส่แผ่นใบบิดแบบปีกสามเหลี่ยม, สี่เหลี่ยม และ สี่เหลี่ยมคางหมูแบบสลับแกนที่มีอัตราส่วนการบิด $y/W=4.0$ และ อัตราส่วนความยาวของปีก ($d/W=0.1, 0.2$ และ 0.3) โดยหมุนแกนไป 60 องศา พบว่าเลขนัสเซลท์ ตัวประกอบเสียดทานและสมรรถนะทางความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนความยาว

ของปีก ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.42 เมื่อใช้แผ่นใบบิดแบบสลับแกนและปีกแบบสี่เหลี่ยมคางหมูที่ $d/W=0.3$ ในขณะที่อัตราการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 2.84 และ 8.02 เท่าของท่อผิวเรียบ

Thianpong et al. [22] ได้ค้นคว้าเชิงทดลองสอคใส่แผ่นใบบิดแบบเจาะรูพร้อมมีปีกแบบขนาน (PTT) อัตราส่วนการบิด ($y/W=3.0$) อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ ($d/W=0.11, 0.33$ และ 0.55) และอัตราส่วนความลึกของปีก ($w/W=0.11, 0.22$ และ 0.33) เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 5,500 ถึง 20,500 พบว่าการถ่ายเทความร้อนและความดันลดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม w/W และ ลด d/W อัตราการถ่ายเทความร้อนของอัตราส่วนความลึกมากที่สุด ($w/W=0.33$) มีค่ามากกว่าการถ่ายเทความร้อนของอัตราส่วนความลึก $w/W=0.22$ และ $w/W=0.11$ เท่ากับ 23% และ 49% ตามลำดับ และตัวประกอบเสียดทานของอัตราส่วนความลึกมากที่สุด ($w/W=0.33$) มีค่ามากกว่าอัตราส่วนความลึก $w/W=0.22$ และ $w/W=0.11$ เท่ากับ 18.3% และ 40.8% ตามลำดับ

3.6 แผ่นใบบิดแบบเจาะและตัดบางส่วน

Murugesan et al. [23] ได้ทดลองสอคใส่แผ่นใบบิดตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส (STT) และแบบทั่วไป (PTT) โดยใช้น้ำเป็นของไหลทำงาน แผ่นใบบิดมีอัตราส่วนการบิด ($y=2.0, 4.4$ และ 6.0) เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 2,000 ถึง 12,000 พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบเสียดทานและตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนของท่อที่สอคใส่แผ่นใบบิดแบบ STT จะมากกว่าแบบ PTT ทุกช่วงของเลขเรย์โนลด์พบว่าเลขนัสเซิลท์ตัวประกอบเสียดทานและตัวประกอบสมรรถนะทาง

ความร้อนของท่อที่สอคใส่แผ่นใบบิดแบบ STT จะมีค่าอยู่ในช่วง 1.03 ถึง 1.14, 1.05 ถึง 1.25 และ 1.02 ถึง 1.06 เท่าของท่อที่สอคใส่แผ่นใบบิดแบบ PTT ตามลำดับ

Murugesan et al. [24] ได้ทดลองสอคใส่แผ่นใบบิดแบบตัวรูปตัววี (VTT) ที่มีอัตราส่วนการบิด ($y=2.0, 4.4$ และ 6.0) ความกว้าง (w) และความลึก (d_c) ของรูปตัววีมีค่าเท่ากันสองค่าคือ 8 และ 10 mm โดยมีอัตราส่วนความลึก ($DR=d_c/W$) และอัตราส่วนความกว้าง ($WR=w/W$) ที่ต่างกันสามชุดคือ ($DR=0.34$ และ $WR=0.43, DR=0.34$ และ $WR=0.34, DR=0.43$ และ $WR=0.34$) เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 2,000 ถึง 12,000 พบว่าเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียดทานของแผ่นใบบิดแบบ VTT มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการบิด (y) อัตราส่วนความกว้าง (WR) มีค่าลดลงในขณะที่เพิ่มอัตราส่วนความลึก (DR)

Salam et al. [25] ได้ทดลองสอคใส่แผ่นใบบิดตัดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดความกว้างต่อความยาวเท่ากับ 8 mm ต่อ 14 mm อัตราส่วนการบิด $y/w=5.25$ ระยะพิตช์เท่ากับ 105 mm เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 10,000 ถึง 19,000 พบว่าเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นเป็น 2.3 ถึง 2.9 และ 1.4 ถึง 1.8 เท่าของท่อผิวเรียบ สมรรถนะทางความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 1.9 ถึง 2.3 โดยเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของเลขเรย์โนลด์

Bhuiya et al. [26] ได้ทดลองสอคใส่แผ่นใบบิดแบบเจาะรูที่มีขนาดของรูเจาะเท่ากับ 3, 5, 7 และ 9 mm เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 7,200 ถึง 49,800 พบว่าเลขนัสเซิลท์ตัวประกอบเสียดทานและตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนของท่อที่สอคใส่แผ่นใบบิดแบบเจาะรูมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 110 - 340, 110 - 360 และ 28 - 59 เท่าของท่อผิวเรียบ ตามลำดับ

สำหรับสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของแผ่นไบบิตรูปแบบต่างๆแสดงดังตารางที่ 2 โดยนำเสนออยู่ในรูปของเลขเรย์โนลด์ (Re) อัตราส่วนของเลขนัสเซลท์ที่มีการปรับปรุงการไหลต่อท่อผิวเรียบ (Nu_a/Nu_0) อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่มีการปรับปรุงการไหลต่อท่อผิวเรียบ (f_a/f_0) และสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (η)

3.7 แผ่นไบบิตแบบเกลียว

Jaisankar et al. [27] ได้ศึกษาเชิงทดลองระบบคัมน์น้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์โดยการสอดใส่แผ่นไบบิตแบบเกลียวที่มีอัตราส่วนการบิด ($Y=3, 4, 5$ และ 6) เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 3,000 ถึง 23,000 พบว่าการถ่ายเทความร้อนและความดันลดมีแนวโน้มสูงกว่าท่อผิวเรียบ โดยอัตราส่วนการบิด $Y=3$ ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 150-214 เท่าของท่อผิวเรียบ ตัวประกอบเสียดทานอยู่ในช่วง 150-320 เท่า และสมรรถนะทางความร้อนมีค่าสูงสุดถึง 75%

Eiamsa-ard et al. [28] ได้ทดลองสอดใส่แผ่นไบบิตแบบเกลียว (HTTs) ที่มีอัตราส่วนการบิด ($y/W=2, 2.5$ และ 3) อัตราส่วนระยะพิตช์ของเกลียว ($p/D=1, 1.5$ และ 2) เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 6,000 ถึง 20,000 พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการบิดและอัตราส่วนระยะพิตช์ลดลง ในขณะที่สมรรถนะทางความร้อนมีแนวโน้มตรงกันข้าม เมื่อสมรรถนะทางความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.29 ที่อัตราส่วนการบิด ($y/W=3$) อัตราส่วนระยะพิตช์ ($p/D=2$) ที่เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 6,000

Nanan et al. [29] ได้ทดลองสอดใส่แผ่นไบบิตแบบเกลียว C-HTT และ Co-HTT อัตราส่วนการบิด ($y/w=3.0$) อัตราส่วนระยะพิตช์ของเกลียว ($p/D=1.0, 1.5$ และ 2.0) เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 6,000 ถึง 20,000 พบว่าเกลียวแบบ C-HTT ให้เลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานที่สูงกว่าแต่ให้สมรรถนะทางความร้อนที่ต่ำกว่าแบบ Co-HTT เลขนัสเซลท์ของเกลียวแบบ C-HTT จะสูงกว่าเกลียวแบบ Co-HTT เท่ากับ 37.6% ถึง 42.8% ในขณะที่ตัวประกอบเสียดทานของเกลียวแบบ C-HTT จะสูงกว่าเกลียวแบบ Co-HTT เท่ากับ 193% ถึง 207%

Nanan et al. [30] ได้ทดลองสอดใส่แผ่นไบบิตแบบเกลียวเจาะรู (P-HTT) อัตราส่วนระยะพิตช์ของเกลียวและอัตราส่วนการบิดคงที่ ($P/D=2$ และ $y/w=3$) P-HTT มีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ ($d/w=0.2, 0.4$ และ 0.6) และอัตราส่วนระยะพิตช์ของรูเจาะ ($s/w=1, 1.5$ และ 2.0) เลขเรย์โนลด์อยู่ระหว่าง 6,000 ถึง 20,000 พบว่าการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบเสียดทานและสมรรถนะทางความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ d/w ลดลง แต่ s/w เพิ่มขึ้น เกลียวแบบ P-HTT ที่มี $d/w=0.2$ เลขนัสเซลท์มีแนวโน้มมากกว่า $d/w=0.4$ และ $d/w=0.6$ เท่ากับ 2.9% ถึง 3.2% และ 6.8% ถึง 9.3% ในขณะที่ P-HTT ที่มี $s/w=2.0$ เลขนัสเซลท์มีแนวโน้มมากกว่า $s/w=1.0$ และ 1.5 เท่ากับ 5.2% ถึง 7.6% และ 1.5% ถึง 2.8%, ตามลำดับ และเกลียวแบบ P-HTT ที่มี $d/w=0.4$ และ 0.6 ตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มต่ำกว่า $d/w=0.2$ เท่ากับ 1.6% ถึง 4.2% และ 3.7% ถึง 11.8% ในขณะเดียวกัน P-HTT ที่มี $s/w=1.0$ และ 1.5 ตัวประกอบ

เสียดทานมีแนวโน้มต่ำกว่า $s/w=2.0$ เท่ากับ 2.7% ถึง 10.9% และ 1.2% ถึง 4.4% ตามลำดับ

3.8 แผ่นใบบิดแบบปรับปรุงพื้นผิว

Murugesan et al. [31] ได้ทดลองสอดใส่แผ่นใบบิดเสียดตะปู (WN-TT) ที่มีอัตราส่วนการบิด ($y=2.0, 4.4$ และ 6.0) เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 2,000 ถึง 12,000 พบว่าเลขนัสเซิลต์ ตัวประกอบเสียดทานและตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนของท่อที่สอดใส่ WN-TT มีค่าอยู่ในช่วง 1.08 ถึง 1.31, 1.1 ถึง 1.75 และ 1.05 ถึง 1.13 เท่าของท่อที่สอดใส่แผ่นใบบิดทั่วไป (P-TT) ตามลำดับ

Promvong et al. [32] ได้ทดลองท่อผิวกริบแบบเกลียวด้วยการสอดใส่แผ่นใบบิดคู่ที่มีอัตราส่วนการบิดอยู่ในช่วง 2.17 ถึง 9.39 อัตราส่วนความสูงกริบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ $e/D_H=0.06$ และ อัตราส่วนระยะพิชชของกริบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ $P/D_H=0.27$ เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 6,000 ถึง 60,000 พบว่าท่อผิวกริบแบบเกลียวสอดใส่แผ่นใบบิดคู่ให้เลขนัสเซิลต์มากกว่าท่อผิวกริบแบบเกลียวและท่อผิวเรียบในช่วง 4% ถึง 75% และ 150% ถึง 320%, ตามลำดับ และให้ตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 1.7-3.6 เท่าของท่อผิวกริบแบบเกลียวและ 6.0-19.2 เท่าของท่อผิวเรียบ

3.9 แผ่นใบบิดร่วมกับอุปกรณ์อื่น

Promvong and Eiamsa-ard [33] ได้ทดลองสอดใส่แผ่นใบบิดร่วมกับแหวนแบบกรวย (conical-ring) อัตราส่วนการบิด $Y=3.75$ และ 7.5 โดยแหวนแบบกรวยทำจากอลูมิเนียม $D=48$ mm และ $d=24$ mm และเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 6,000 ถึง 26,000 พบว่าเลขนัสเซิลต์ของท่อที่สอดใส่แผ่นใบบิดคู่ร่วมกับแหวนแบบกรวยที่

$Y=3.75$ และ 7.5 มีค่าเท่ากับ 367 และ 350 เท่าของท่อผิวเรียบ และตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นเป็น 145 เท่าของท่อผิวเรียบ ที่อัตราส่วนการบิด $Y=3.75$

Promvong [34] ได้ศึกษาเชิงทดลองสอดใส่แผ่นใบบิดร่วมกับขดลวด อัตราส่วนการบิด ($Y=P/w=4$ และ 6) อัตราส่วนระยะพิชชของขดลวด ($CR=H/d=4, 6$ และ 8) ดังรูปที่ 6 เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 3,000 ถึง 18,000 พบว่าการใช้แผ่นใบบิดร่วมกับขดลวดทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นมากกว่าการใช้ขดลวดหรือแผ่นใบบิดเพียงอย่างเดียว เลขนัสเซิลต์เพิ่มขึ้นเป็น 300-685 เท่าของท่อผิวเรียบ และตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 30-68 เท่าของท่อผิวเรียบ ในขณะที่ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.5

Eiamsa-ard et al. [35] ได้ทดลองสอดใส่แผ่นใบบิด (TT) ร่วมกับตัวทำให้ปั่นป่วนด้วยแหวนกลม (CRT) ที่มีอัตราส่วนระยะพิชชของแหวน ($I/D=1.0, 1.5$ และ 2.0) อัตราส่วนการบิด ($y/W=3, 4$ และ 5) ดังรูปที่ 7 เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 6,000 ถึง 20,000 พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ใช้อุปกรณ์ร่วมกันมีค่ามากกว่าที่ใช้เฉพาะแหวนเท่ากับ 25.8% ตัวประกอบเสียดทานที่มีอัตราส่วนการบิด ($y/W=3$) และ อัตราส่วนระยะพิชช ($I/D=1.0, 1.5$ และ 2.0) มีค่าเป็น 33.8, 22.7 และ 17 เท่าของท่อผิวเรียบ สมรรถนะทางความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.42

4. สรุปผล

แผ่นใบบิดมีความนิยมนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากแผ่นใบบิดทำให้เกิดการไหลแบบหมุนควง และทำให้ความหนาของชั้นจลน์ของของไหลบริเวณใกล้กับผนังท่อมีขนาดเล็กและลักษณะการไหลจะหมุนไป

คล้ายๆ เกิดขดลวดความยาวของแผ่นไบบิต จึงช่วยเพิ่มความเร็วให้กับของไหล ทำให้ของไหลเกิดการไหลแบบปั่นป่วนมากขึ้น จึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพมากขึ้น บทความนี้ได้รวบรวมงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้แผ่นไบบิตในลักษณะที่แตกต่างกัน เพื่อประกอบการเลือกใช้ให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยสามารถสรุปผลการทบทวนงานวิจัยได้ดังนี้

1) สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 5.25 เมื่อใช้แผ่นไบบิตแบบสลับแกนหมุนตามเข็มนาฬิกา

2) การใช้แผ่นไบบิตร่วมกับขดลวดมีแนวโน้มให้การสูญเสียความดันมากที่สุด 74 เท่าของท่อผิวเรียบ

5. เอกสารอ้างอิง









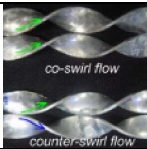







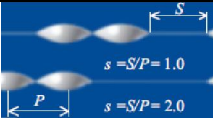
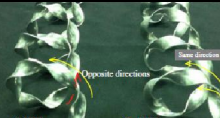

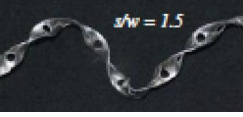



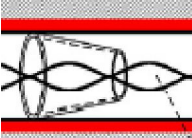
- [1] C. Prajapati, P. Patel, J. Patel and U. Patel, “A review of heat transfer enhancement using twisted tape”, *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies* 2, 2012, pp. 162-164.
- [2] S. Liu and M. Sakr, “A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19, 2013, pp. 64-81.
- [3] A. Hasanpour, M. Farhadi and K. Sedighi, “A review study on twisted tape inserts on turbulent flow heat exchangers: The overall enhancement ratio criteria”, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 55, 2014, pp. 53-62.
- [4] W. Noothong, S. Eiamsa-ard and P. Promvonge, “Effect of Twisted-tape Inserts on Heat Transfer in a Tube”, *Proceedings of the 2nd Joint International Conference on “Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)”*, Bangkok, Thailand, 2006, pp. 1-5.
- [5] L. S. Sundar and K.V. Sharma, “Turbulent heat transfer and friction factor of Al₂O₃ Nanofluid in circular tube with twisted tape inserts”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53, 2010, pp. 1409-1416.
- [6] H. Bas and V. Ozceyhan, “Heat transfer enhancement in a tube with twisted tape inserts placed separately from the tube wall”, *Experimental Thermal and Fluid Science* 41, 2012, pp. 51-58.
- [7] S. Eiamsa-ard, C. Thianpong, P. Eiamsa-ard and P. Promvonge, “Convective heat transfer in a circular tube with short-length twisted tape insert”, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 36, 2009, pp. 365-371.
- [8] K. Wongcharee and S. Eiamsa-ard, “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, 2011, pp. 348-352.

- [9] S. Eiamsa-ard, P. Somkleang, C. Nuntadusit and C. Thianpong, "Heat transfer enhancement in tube by inserting uniform/non-uniform twisted tapes with alternate axes : Effect of rotated-axes length", *Applied Thermal Engineering* 54, 2013, pp. 289-309.
- [10] S. Eiamsa-ard, C. Thianpong and P. Eiamsa-ard, "Turbulent heat transfer enhancement by counter/co-swirling flow in a tube fitted with twin twisted tapes", *Experimental Thermal and Fluid Science* 34, 2010, pp. 53-62.
- [11] X. Zhang, Z. Liu and W. Liu, "Numerical studies on heat transfer and flow characteristics for laminar flow in a tube with multiple regularly spaced twisted tapes", *International Journal of Thermal Sciences* 58, 2012, pp. 157-167.
- [12] M.M.K. Bhuiya, M.S.U. Chowdhury, M. Shahabuddin, M. Saha and L.A. Memon, "Thermal characteristics in a heat exchanger tube fitted with triple twisted tape inserts", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 48, 2013, pp. 124-132.
- [13] M.M.K. Bhuiya, A.S.M. Sayem, M. Islam, M.S.U. Chowdhury and M. Shahabuddin, "Performance assessment in a heat exchanger tube fitted with double counter twisted tape inserts", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 50, 2014, pp. 25-33.
- [14] S. Eiamsa-ard, C. Thianpong and P. Promvonge, "Experimental investigation of heat transfer and flow friction in a circular tube fitted with regularly spaced twisted tape elements", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 33, 2006, pp. 1225-1233.
- [15] P. Sivashanmugam and S. Suresh, "Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of turbulent flow through a circular tube fitted with regularly spaced helical screw-tape inserts", *Applied Thermal Engineering* 27, 2007, pp. 1311-1319.
- [16] J. Ananth and S. Jaisankar, "Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of thermosyphon solar water heating system fitted with regularly spaced twisted tape with rod and spacer", *Energy Conversion and Management* 73, 2013, pp. 207-213.
- [17] P. Eiamsa-ard, N. Piriyaungjooj, C. Thianpong and S. Eiamsa-ard, "A case study on thermal performance assessment of a heat exchanger tube equipped with regularly-spaced twisted tapes as swirl generators", *Case Studies in Thermal Engineering* 3, 2014, pp. 86-102.
- [18] L.D. Tijing, B.C. Pak, B.J. Baek and D.H. Lee, "A study on heat transfer enhancement using straight and twisted internal fin inserts", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 33, 2006, pp. 719-726.

- [19] S. Eiamsa-ard, K. Wongcharee, P. Eiamsa-ard and C. Thianpong, "Thermohydraulic investigation of turbulent flow through a round tube equipped with twisted tapes consisting of centre wings and alternate-axes", *Experimental Thermal and Fluid Science* 34, 2010, pp. 1151-1161.
- [20] S. Eiamsa-ard, K. Wongcharee, P. Eiamsa-ard and C. Thianpong, "Heat transfer enhancement in a tube using delta-winglet twisted tape inserts", *Applied Thermal Engineering* 30, 2010, pp. 310-318.
- [21] K. Wongcharee and S. Eiamsa-ard, "Heat transfer enhancement by twisted tapes with alternate-axes and triangular, rectangular and trapezoidal wings", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 50, 2011, pp. 211-219.
- [22] C. Thianpong, P. Eiamsa-ard, P. Promvong and S. Eiamsa-ard, "Effect of perforated twisted-tape with parallel wings on heat transfer enhancement in a heat exchanger tube", *Energy Procedia* 14, 2012, pp. 1117-1123.
- [23] P. Murugesan, K. Mayilsamy and S. Suresh, "Turbulent Heat Transfer and Pressure Drop in Tube Fitted with Square-cut Twisted Tape", *Chinese Journal of Chemical Engineering* 18, 2010, pp. 609-617.
- [24] P. Murugesan, K. Mayilsamy, S. Suresh and P.S.S. Srinivasan, "Heat transfer and pressure drop characteristics in a circular tube fitted with and without V-cut twisted tape inserts", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 38, 2011, pp. 329-334.
- [25] B. Salam, S. Biswas, S. Saha and M.M.K. Bhuiya, "Heat transfer enhancement in a tube using rectangular-cut twisted tape insert", *Procedia Engineering* 56, 2013, pp. 96-103.
- [26] M.M.K. Bhuiya, M.S.U. Chowdhury, M. Saha and M.T. Islam, "Heat transfer and friction factor characteristics in turbulent flow through a tube fitted with perforated twisted tape inserts", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 46, 2013, pp. 49-57.
- [27] S. Jaisankar, T.K. Radhakrishnan and K.N. Sheeba, "Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of forced circulation solar water heater system fitted with helical twisted tapes", *Solar Energy* 83, 2009, pp. 1943-1952.
- [28] S. Eiamsa-ard, K. Yongsiri, K. Nanan and C. Thianpong, "Heat transfer augmentation by helically twisted tapes as swirl and turbulence promoters", *Chemical Engineering and Processing : Process Intensification* 60, 2012, pp. 42-48.

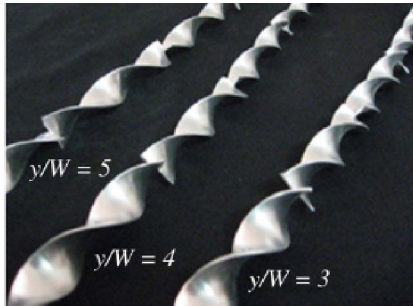
- [29] K. Nanan, K. Yongsiri, K. Wongcharee, C. Thianpong and S. Eiamsa-ard, "Heat transfer enhancement by helically twisted tape inducing co-and counter-swirl flows", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 46, 2013, pp. 67-73.
- [30] K. Nanan, C. Thianpong, P. Promong and S. Eiamsa-ard, "Investigation of heat transfer enhancement by perforated helical twisted-tapes", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 52, 2014, pp. 106-112.
- [31] P. Murugesan, K. Mayilsamy and S. Suresh, "Heat Transfer and Friction Factor Studies in a Circular Tube Fitted with Twisted Tape Consisting of Wire-nails", *Chinese Journal of Chemical Engineering* 18, 2010, pp. 1038-1042.
- [32] P. Promvong, S. Pethkool, M. Pimsarn and C. Thianpong, "Heat transfer augmentation in a helical-ribbed tube with double twisted tape inserts", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 39, 2012, pp. 953-959.
- [33] P. Promvong and S. Eiamsa-ard, "Heat transfer behaviors in a tube with combined conical-ring and twisted-tape insert", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 34, 2007, pp. 849-859.
- [34] P. Promvong, "Thermal augmentation in circular tube with twisted tape and wire coil turbulators", *Energy Conversion and Management* 49, 2008, pp. 2949-2955.
- [35] S. Eiamsa-ard, V. Kongkaitpaiboon and K. Nanan, "Thermohydraulics of Turbulent Flow Through Heat Exchanger Tubes Fitted with Circular-rings and Twisted Tapes", *Chinese Journal of Chemical Engineering* 21, 2013, pp. 585-593.

ตารางที่ 1 รูปแบบแผ่นใบบิดที่ผู้วิจัยประยุกต์ใช้

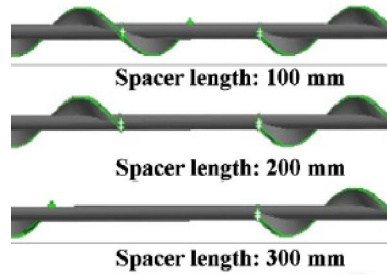
ผู้วิจัย	รูป	รูปแบบ TT	ผู้วิจัย	รูป	รูปแบบ TT
Noothong et al. [4]		แบบทั่วไป	Wongcharae and Eiamsa-ard [21]		ปีกสามเหลี่ยม สลับแกน
Shandar and Sharma [5]		แบบทั่วไป	Thianpong et al. [22]		ปีกขนานและ เจาะ
Bas and Ozceyhan [6]		วางห่างผนังท่อ	Murugesan et al. [23]		ตัดสี่เหลี่ยม จักรีส (STT)
Eiamsa-ard et al. [7]		แบบสั้นยาว	Murugesan et al. [24]		ตัดรูปตัววี (VTT)
Eiamsa-ard et al. [10]		CTs และ CoTs	Salam et al. [25]		ตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า
Bhuiya et al. [12]		สามแผ่น	Bhuiya et al. [26]		เจาะรู
Bhuiya et al. [13]		แบบคู่สวนทางกัน	Jaisankar et al. [27]		บิดแบบเกลียว
Eiamsa-ard et al. [14]		เว้นช่วง	Eiamsa-ard et al. [28]		บิดแบบเกลียว
Eiamsa-ard et al. [17]		เว้นช่วง	Nanan et al. [29]		บิดเกลียว C-HTT และ Co-HTT
Tijing et al. [18]		ครึ่งแบบบิด	Nanan et al. [30]		บิดเกลียวเจาะ $s/w = 1.5$
Eiamsa-ard et al. [20]		มีปีก	Murugesan et al. [31]		เสียบตะปู
Promvongse et al. [32]		ผิวครึ่งเกลียวร่วมใบบิดคู่	Promvongse and Eiamsa-ard [33]		แหวนกรวยร่วมใบบิด

ตารางที่ 2 สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของแผ่นใบพัดแต่ละรูปแบบ

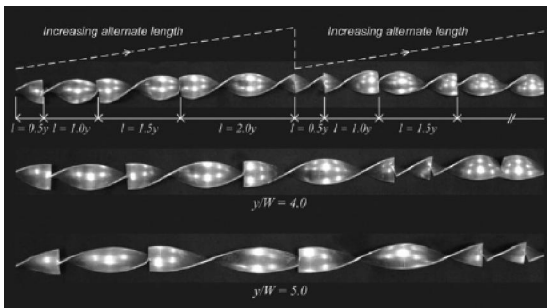
หมายเลข อ้างอิง	รูปแบบ TT	Re	Nu_s/Nu_o	f_s/f_o	η
[4]	ทั่วไป	2,000 – 12,000	1.9 – 2.125	2.8 – 4.61	1.55 - 2.05
[5]	ทั่วไป	10,000 – 22,000	-	-	-
[6]	ทั่วไปห่างผนังท่อ	5,132 – 24,989	1.8 – 2.6	3.33 – 4.16	1.57 - 1.75
[7]	เปลี่ยนความยาว	4,000 – 20,000	1.06 – 1.31	1.87 – 2.12	0.95 – 1.04
[8]	แบบสลักแกนหมุนตามเข็มนาฬิกา และทวนเข็มนาฬิกา	830 – 1,990	5.8 – 12.9	8.0 – 14.6	2.68 – 5.25
[9]	สลักแกน, ยาวไม่เท่ากัน	5,000 – 21,5000	1.83 – 2.94	4.9 – 10	1.07 - 1.39
[10]	แผ่นคู่ไหลวนทางเดียวกันและสวนทางกัน	3,700 – 21,000	2.19 - 2.93	7.5 – 7.95	1.01 - 1.39
[11]	หลายแผ่นเว้นช่วง	300 – 1,800	2.30 – 3.67	6.1 - 19	1.64 - 2.46
[12]	สามแผ่น	7,200 – 50,200	2.30 – 3.85	2.62 – 4.22	1.18 – 1.44
[13]	แผ่นคู่ไหลวนสวนทางกัน	6,950 – 50,050	2.12 – 3.37	2.62 – 3.86	1.1 – 1.34
[14]	เว้นช่วง	2,000 – 12,000	1.45 – 1.79	2.61 – 3.36	-
[15]	เกลียวเว้นช่วง	6,000 – 13,200	1.71 - 2.64	13.75 - 14.4	-
[16]	เว้นช่วงแบบมีแกน	200 – 1,200	-	-	1.13
[17]	เว้นช่วง	5,000 – 12,000	1.33 – 1.46	3.6 – 3.9	0.84 – 0.93
[18]	ครีบบนเกลียว	1,900 – 47,000	-	-	-
[19]	มีปีกแบบสลักแกน	5,200 – 22,000	2.1 – 2.8	7.5 – 8.4	1.05 – 1.4
[20]	มีปีกแบบเอียง	3,000 – 27,000	1.6 - 2.5	5.2 – 7.2	1.14- 1.24
[21]	ปีกสี่เหลี่ยมคางหมูสลักแกน	5,500 – 20,200	1.91 – 2.85	5.6 – 8.0	1.1 – 1.4
[22]	ปีกขนานแบบเจาะ	5,500 – 20,500	2.25 – 2.90	10.7 – 11.6	0.91 – 1.32
[23]	ตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส	2,000 – 12,000	2.1 – 2.6	3.6 – 4.4	1.19 – 1.27
[24]	ตัดรูปตัววี	2,000 – 12,000	1.9 - 2.5	3.8 – 5.7	1.26 – 1.27
[25]	ตัดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	10,000 – 19,000	-	-	1.9 – 2.3
[26]	เจาะรู	72,000 – 49,800	2.6 – 4.4	2.6 – 4.6	1.40 – 1.58
[27]	บิดแบบเกลียว	3,000 -23,000	2.11 - 2.8	2.0 – 9.4	-
[28]	บิดแบบเกลียว	6,000 -20,000	2.09 – 2.45	17.1 – 17.8	1.05 -1.28
[29]	บิดเกลียว C-HTT และ Co-HTT	6,000 – 20,000	1.8 – 2.05	4.0 – 4.9	1.07 – 1.3
[30]	บิดแบบเกลียวเจาะรู	6,000 – 20,000	1.66 – 1.94	3.84 – 4.12	1.03 – 1.22
[31]	เสียบตะปู	2,000 – 12,000	1.9 - 2.3	4.6 – 5.8	1.27 – 1.32
[32]	ใบพัดคู่และผนังครีบบนเกลียว	6,000 – 60,000	3.6 – 5.6	6.7 – 9.9	1.85 – 2.60
[33]	ร่วมกับแหวนแบบกรวย	6,000 – 26,000	3.72 - 6.25	-	1.01 – 1.95
[34]	ร่วมกับขดลวด	3,000 -18,000	3.7 – 6.4	57 – 74	1.0 – 1.5
[35]	ร่วมกับแหวนวงกลม	6,000 - 20,000	4.1 – 4.4	31 - 36	1.23 – 1.42



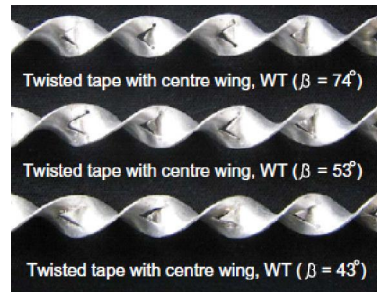
รูปที่ 1 แผ่นใบบิดแบบ TA [8]



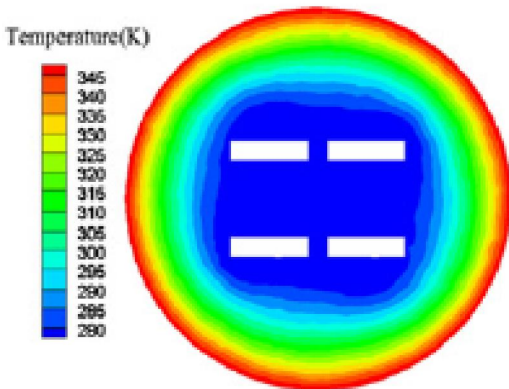
รูปที่ 4 สกรูเกลียวบิดเว้นช่วง [15]



รูปที่ 2 แผ่นใบบิดแบบ N-TAs [9]



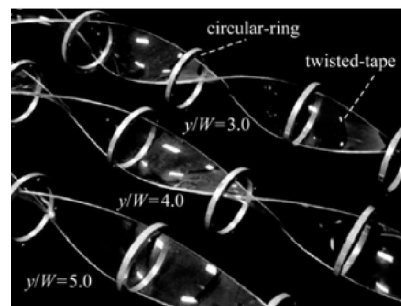
รูปที่ 5 แผ่นใบบิดแบบ WT-A [19]



รูปที่ 3 การกระจายอุณหภูมิรอบแผ่นใบบิด [11]



รูปที่ 6 แผ่นใบบิดร่วมกับขดลวด [34]



รูปที่ 7 แผ่นใบบิดร่วมกับแหวนกลม [35]