

การศึกษาเชิงทบทวนการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในท่อกลม ด้วยการใช้ขดลวดและแหวน

สุทิน พลบูรณ์*

บทคัดย่อ

การเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนให้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการใช้ขดลวดและแหวน ถูกนำไปใช้ในหลายอุตสาหกรรมไม่ว่าจะเป็น โรงจักรต้นกำลัง ระบบการปรับอากาศและการทำความเย็น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมรถยนต์ หรือ เตาปฏิกรณ์เคมี โดยขดลวดและแหวนช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อน ทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นแต่ส่งผลให้เกิดความดันสูญเสียเพิ่มขึ้น บทความนี้ได้รวบรวมงานวิจัยที่ใช้ขดลวดและแหวนในรูปแบบต่างๆ โดยพิจารณาถึงเลขนัสเซลท์ ตัวประกอบเสียดทานและสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน โดยสามารถสรุปผลการรวบรวมได้ว่าการใช้แหวนแบบกรวยคดครึ่งภายในให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 2.4 เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 6,800

คำสำคัญ : เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, ขดลวดและแหวน, สมรรถนะการถ่ายเทความร้อน, การสูญเสียความดัน

สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล, คณะเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: suthin_27@hotmail.com รับเมื่อ 20 สิงหาคม 2557 ตอบรับเมื่อ 14 ตุลาคม 2557

A Review Study on Heat Transfer Performance Enhancement in a Circular Tube Using Wire Coils and Rings

Suthin Pholboorn*

Abstract

Heat transfer performance enhancement in heat exchanger by using wire coils and rings was used in many industries such as power plant, air condition and refrigeration systems, food industries, automotive industries or chemical reactors. Although wire coils and rings increased the convection heat transfer coefficient for enhancing the heat transfer, pressure loss was increased. This paper collected literatures which used wire coils and rings in many shapes provided by Nusselt number, friction factor and heat transfer performance. From the collection, it is found that the conical cut – out turbulators with internal fins shows the maximum heat transfer performance of 2.4 with Reynolds number of 6,800.

Keywords : Heat exchanger, Wire coils and rings, Heat transfer performance, Pressure loss

1. บทนำ

เทคนิคการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมี 3 วิธี [1] ได้แก่ วิธีแอคทีฟ (active method) เป็นวิธีที่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกเข้าไปเพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เช่น การใช้สนามแม่เหล็กเข้าไปรบกวนอนุภาคเล็กๆ ในเส้นทาง การไหล การทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่พื้นผิวสัมผัส การทำให้เกิดการสั่นสะเทือนกับของไหล การใช้ไฟฟ้าสถิตย์ เป็นต้น วิธีพาสซีฟ (passive method) เป็นวิธีที่ไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกแต่ใช้หลักการปรับปรุงพื้นผิวหรือโครงสร้างของช่องทางการไหลด้วยการสอดใส่หรือเพิ่มเติมอุปกรณ์ เช่น การสอดใส่ด้วยอุปกรณ์พิเศษ อุปกรณ์ทำให้เกิดการไหลหมุนวน (swirl flow) การทำให้พื้นผิวมีความขรุขระ (rough surfaces) การขยายพื้นผิว (extended surfaces) การใช้ท่อที่มีผิวเป็นเกลียว (coiled tubes) อุปกรณ์เพิ่มแรงดึงให้พื้นผิวและการเพิ่มสารบางอย่างให้กับของไหล และวิธีแบบผสม (compound method) เป็นการรวมกันของสองวิธีที่กล่าวมาแล้ว เช่น พื้นผิวขรุขระร่วมกับอุปกรณ์ทำให้เกิดการไหลวนด้วยแผ่นไบบิต พื้นผิวขรุขระรวมกับการสั่นสะเทือนของของไหล หรือ พื้นผิวขรุขระร่วมกับขดลวด เป็นต้น

การใช้ตัวสร้างความปั่นป่วน (turbulators) เป็นอีกวิธีหนึ่งของวิธีพาสซีฟเนื่องจากเป็นการสอดใส่อุปกรณ์เข้าไปในช่องทางการไหลประกอบไปด้วย ขดลวด (wire coils) แหวนแบบกรวย (conical ring) แผ่นไบบิต (twisted tape) ปีก (winglet) เป็นต้น ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการไหลหมุนวนหรือการไหลอันดับสอง (secondary flow) [2] ตัวสร้างความปั่นป่วนมีการนำไปใช้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอย่าง

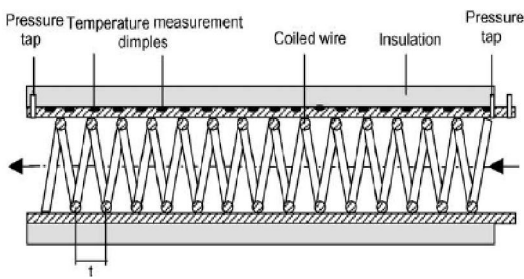
หลากหลายรูปแบบเพราะเมื่อสอดใส่ตัวสร้างความปั่นป่วนเข้าไปในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้ขอบชั้นขีดของของไหลมีการพัฒนาไปอย่างไม่ต่อเนื่อง มีการเพิ่มพื้นที่ของการถ่ายเทความร้อนส่งผลให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการไหลแบบปั่นป่วนอย่างรุนแรง [2-3]

บทความนี้พิจารณาตัวสร้างความปั่นป่วนเพียง 2 ชนิดคือ ขดลวด (wire coils) และ แหวน (rings) ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น โรงจักรต้นกำลัง ระบบการปรับอากาศและการทำความเย็น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมรถยนต์ หรือ เตาปฏิกรณ์เคมี โดยขดลวดเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้พื้นผิวมีความขรุขระส่งผลให้เกิดการไหลแบบหมุนวนและเป็นตัวเร่งการเปลี่ยนสภาวะการไหลจากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน [4] ส่วนแหวนเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการไหลแบบย้อนกลับ (reverse flow device) ส่งผลให้เกิดการไหลแบบย้อนกลับและเกิดการแยกขอบชั้นขีดของของไหลทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและการถ่ายเทโมเมนตัมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นแต่จะเกิดการสูญเสียความดันเพิ่มตามมา [5]

2. การประยุกต์ใช้ขดลวด (Wire coils)

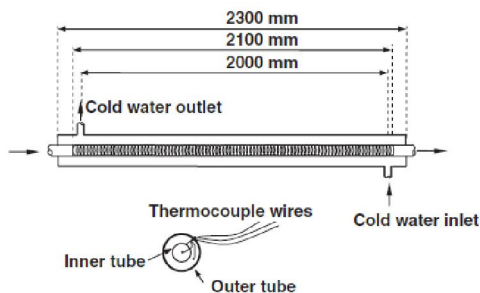
บทความนี้พิจารณาขดลวดแบ่งออกตามลักษณะการใช้งานดังนี้ การใช้ขดลวดอย่างเดียว [6-9] ขดลวดที่มีเส้นลวดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10] ขดลวดวงห่างผนังท่อ [11] ขดลวดที่มีเส้นลวดหน้าตัดสามเหลี่ยม [12] ใช้ขดลวดร่วมกับแผ่นไบบิต [13] และ การทำขดลวดสปริงรูปร่างคล้ายกรวย [14] รายละเอียดจะได้อธิบายเรียงตามลำดับปีที่มีการประยุกต์ใช้งาน

ในปี ค.ศ. 2004 Yakut and Sahin [6] ได้ทดลองใช้ขดลวดที่เส้นลวดมีหน้าตัดเท่ากับ 4 mm ระยะพิตช์เท่ากับ 10, 20 และ 30 mm ขดลวดมีความยาวรวม 1,240 mm ดังรูปที่ 1 เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 5,000 ถึง 35,000 พบว่าที่ระยะพิตช์เท่ากับ 30 mm ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมากกว่าท่อผิวเรียบเท่ากับ 70 – 140% และระยะพิตช์ที่ต่ำจะให้ความดันสูญเสียเพิ่มขึ้นเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น



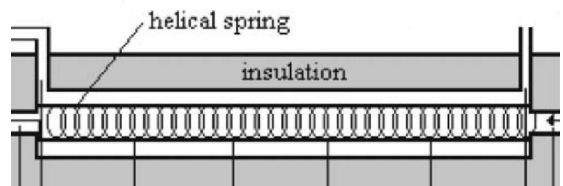
รูปที่ 1 ตัวสร้างความปั่นป่วนด้วยขดลวด [6]

ในปี ค.ศ. 2006 Naphon [7] ได้ทดลองใช้ขดลวดที่เส้นลวดมีหน้าตัดเท่ากับ 1 mm ระยะพิตช์เท่ากับ 3.18 และ 5.08 mm ขดลวดมีความยาวรวม 2,000 mm ดังรูปที่ 2 เลขเรย์โนลด์อยู่ระหว่าง 5,000 ถึง 25,000 พบว่าระยะพิตช์เท่ากับ 3.18 ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมากกว่าระยะพิตช์เท่ากับ 5.08 และ ระยะพิตช์เท่ากับ 5.08 ให้ตัวประกอบเสียดทานมากกว่าระยะพิตช์เท่ากับ 3.18



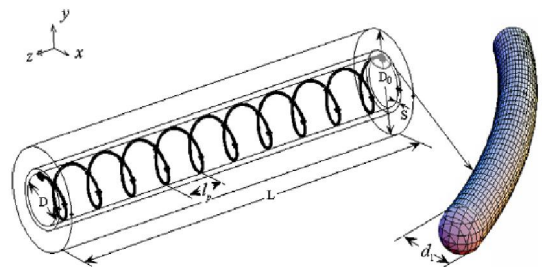
รูปที่ 2 การสอดใส่ด้วยขดลวด [7]

ในปี ค.ศ. 2006 Akpınar [8] ได้ทดลองใช้ขดลวดที่เส้นลวดมีหน้าตัดเท่ากับ 4 mm ระยะพิตช์เท่ากับ 9, 15 และ 21 mm โดยมีจำนวนเกลียวเท่ากับ 137, 84 และ 60, ตามลำดับ ดังรูปที่ 3 เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 6,500 ถึง 13,000 พบว่าเลขนัสเซลท์ของท่อที่สอดใส่ขดลวดมากกว่าท่อผิวเรียบเท่ากับ 2.64 เท่า และตัวประกอบเสียดทานมากกว่าท่อผิวเรียบเท่ากับ 2.74 เท่า



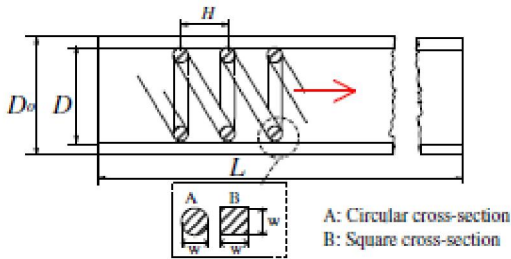
รูปที่ 3 ขดลวดสปริง [8]

ในปี ค.ศ. 2010 Zamankhan [9] ได้จำลองทางคณิตศาสตร์ของขดลวดที่มีความหนาของลวดเท่ากับ 0.6 mm โดยท่อในมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 12.56 mm มีความหนา 1.5 mm ท่อนอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 25.6 mm โดยมีจำนวนกริดเท่ากับ 500,000 ดังรูปที่ 4 เลขเรย์โนลด์อยู่ระหว่าง 200 ถึง 3,000 พบว่าตัวสร้างความปั่นป่วนที่เป็นขดลวดทำให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบแต่ส่งผลให้เกิดความดันลดมากขึ้น



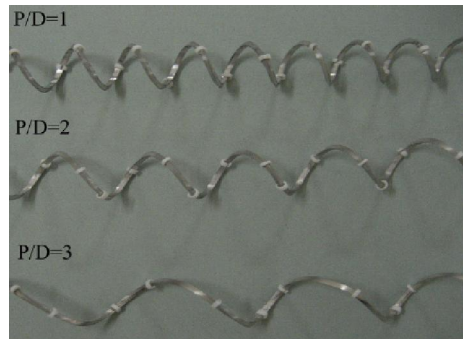
รูปที่ 4 แบบจำลองตัวสร้างความปั่นป่วนแบบเกลียว [9]

ในปี ค.ศ. 2008 Promvong [10] ได้ทดลองใช้ลวดที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 และ 3 mm ทำเป็นขดลวดสปริง ระยะพิทช์เท่ากับ 15 และ 20 mm ดังรูปที่ 5 เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 5,000 ถึง 25,000 พบว่าเลขนัสเซิลท์เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเลขเรย์โนลด์และการลดลงของระยะพิทช์ทั้งของลวดที่มีหน้าตัดแบบกลมและสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยขดลวดที่มีหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมากกว่าขดลวดที่มีหน้าตัดแบบกลม



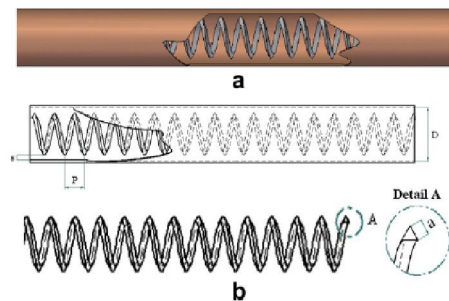
รูปที่ 5 ขดลวดที่มีหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10]

ในปี ค.ศ. 2010 Gunes et al. [11] ได้ทดลองใช้ขดลวดวางห่างจากผนังท่อโดยใช้ลวดที่มีความหนาคงที่เท่ากับ 6 mm อัตราส่วนระยะพิทช์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ($P/D = 1, 2$ และ 3) และระยะห่างจากผนังท่อ ($s = 1$ และ 2 mm) ดังรูปที่ 6 เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 4,105 ถึง 26,400 พบว่าเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะพิทช์และระยะห่างจากผนังท่อลดลง สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดถึง 50% เมื่อขดลวดมีอัตราส่วน $P/D = 1$ และ ระยะห่างจากผนังท่อ $s = 1$ mm เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 4,220



รูปที่ 6 ขดลวดวางห่างจากผนังท่อ [11]

ในปี ค.ศ. 2010 Gunes et al. [12] ได้ทดลองใช้ขดลวดวางห่างจากผนังท่อโดยใช้เส้นลวดที่มีหน้าตัดแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าด้วยอัตราส่วนของด้านต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ($a/D = 0.0714$ และ 0.0892) ระยะห่างท่อ ($s = 1$ mm) อัตราส่วนระยะพิทช์ของขดลวด ($P/D = 1, 2$ และ 3) ดังรูปที่ 7 เลขเรย์โนลด์อยู่ระหว่าง 3,500 ถึง 27,000 พบว่าเลขนัสเซิลท์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นและการลดลงของอัตราส่วนระยะพิทช์ สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดถึง 36.5% เมื่อขดลวดมีอัตราส่วน $a/D = 0.0892$ และอัตราส่วน $P/D = 1$ เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 3,858



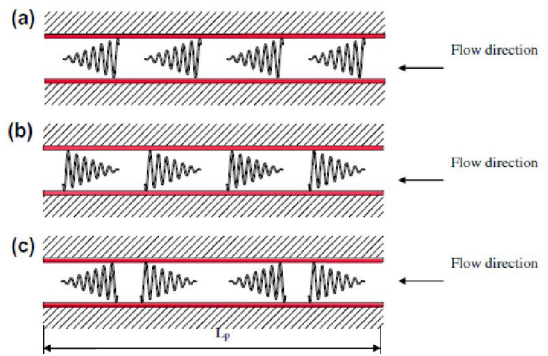
รูปที่ 7 ขดลวดที่มีหน้าตัดแบบสามเหลี่ยม [12]

ในปี ค.ศ.2010 Eiamsa-ard et al. [13] ได้ทดลองใช้ขดลวดร่วมกับแผ่นใบบีดโดยใช้ขดลวดที่มีระยะพิชชี่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ ขดลวดลดระยะพิชชี่ (D-coil) และ ขดลวดลด/เพิ่มระยะพิชชี่ (DI-coil) ทั้งนี้ได้ใช้ขดลวดที่มีอัตราส่วนระยะพิชชี่คงที่เท่ากับ 6 เพื่อทำการเปรียบเทียบ และใช้แผ่นใบบีดที่มีอัตราส่วนการบิด ($y/w=3$ และ 4) ดังรูปที่ 8 เลขเรย์โนลด์อยู่ระหว่าง 4,600 ถึง 20,000 พบว่าที่เลขเรย์โนลด์ต่ำ การใช้อุปกรณ์ร่วมระหว่างแผ่นใบบีดที่มี $y/w=3$ และ DI-coil ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 6.3%, 13.7%, 2.4% และ 3.7% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ขดลวดอย่างเดียว แผ่นใบบีดอย่างเดียว แผ่นใบบีดร่วมกับขดลวดที่มีระยะพิชชี่คงที่ และ แผ่นใบบีดร่วมกับขดลวดแบบ D-coil, ตามลำดับ



รูปที่ 8 ขดลวด DI-coil และ แผ่นใบบีด [13]

ในปี ค.ศ. 2013 Karakaya and Durmus [14] ได้ทดลองใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนแบบสปริงกรวย (CST) ที่มีมุมกรวย θ เท่ากับ $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ และมีการจัดเรียง CST ออกเป็น 3 แบบ คือ กรวยคู่ตามกระแส (DR), กรวยคู่ทวนกระแส (CR) และ กรวยคู่ตามและทวนกระแส (CDR) ดังรูปที่ 9 เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 10,000 ถึง 34,000 พบว่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของ CST แบบ DR มากกว่าแบบ CR และ CDR เป็น 35- 44% และ 18-27%, ตามลำดับ เลขนัสเซิลท์ของ CST แบบ DR มีค่าเป็น 133-333% มากกว่าท่อผิวเรียบ



รูปที่ 9 สปริงกรวยแบบ (a) DR, (b) CR และ (c) CDR [14]

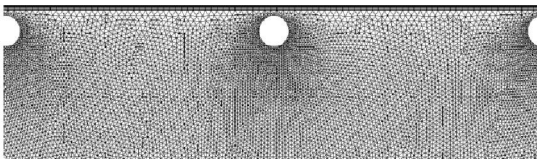
การใช้ขดลวดในเงื่อนไขที่แตกต่างกัน พบว่าการใช้ขดลวดวางห่างผนังท่อให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเนื่องจากขดลวดทำให้การไหลหมุนวนไปตลอดแนวความยาวของท่อ จึงเกิดการไหลแบบปั่นป่วนอย่างรุนแรงและทำให้ของไหลมีระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับผนังท่อได้นานขึ้น จึงทำให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีค่ามากขึ้น

3. การประยุกต์ใช้แหวน (Rings)

บทความนี้พิจารณาแหวนแบ่งออกตามลักษณะการใช้งานดังนี้ การใช้แหวนอย่างเดียว [15-17] การใช้แหวนแบบกรวย [18-23] และการใช้แหวนร่วมกับแผ่นใบบีด [24-25] รายละเอียดจะได้อธิบายเรียงตามลำดับปีที่มีการประยุกต์ใช้งาน

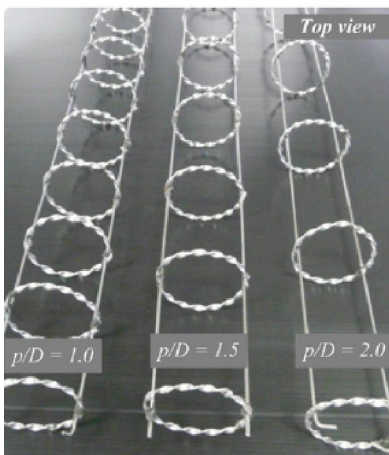
ในปี ค.ศ. 2008 Ozceyhan et al. [15] ได้มีการจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการใช้แหวนที่มีหน้าตัดแบบวงกลมสอดใส่เข้าไปในท่อกลมด้วยอัตราส่วนระยะวงแหวนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 5 ค่าคือ $p/d=0.5, 1, 1.5, 2$ และ 3 การจำลองใช้กริดจำนวน 815,680 เซลล์ ดังรูปที่ 10 เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 4,475 ถึง 43,725

พบว่าเลขนัสเซลที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มลดลงเมื่อเลขเรย์โนลด์์เพิ่มขึ้น เลขนัสเซลที่และตัวประกอบเสียดทานสูงสุดพบได้ในกรณี $p/d=0.5$ สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดมีค่าถึง 18% เมื่ออัตราส่วน $p/d=1.5$ เลขเรย์โนลด์์เท่ากับ 15,600



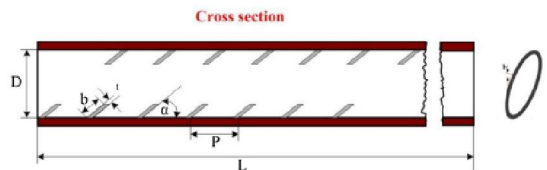
รูปที่ 10 แบบจำลองแหวนวางห่างผนังท่อ [15]

ในปี ค.ศ. 2012 Thianpong et al. [16] ได้ทดลองใช้แหวนไบบิต (TRs) ที่มีอัตราส่วนความกว้าง ($W/D=0.05, 0.1$ และ 0.15) อัตราส่วนระยะพิตซ์ ($p/D=1, 1.5$ และ 2) ดังรูปที่ 11 เลขเรย์โนลด์์อยู่ระหว่าง 6,000 ถึง 20,000 พบว่าแหวนแบบ TRs ให้เลขนัสเซลที่และตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความกว้างเพิ่มขึ้นและอัตราส่วนระยะพิตซ์ลดลง สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.24 เมื่อแหวนแบบ TRs ที่อัตราส่วน $W/D=0.05$ และอัตราส่วน $p/D=1.0$ ที่เลขเรย์โนลด์์เท่ากับ 6,000



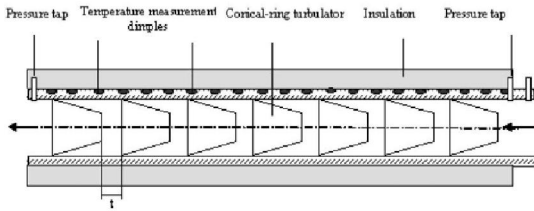
รูปที่ 11 แหวนแบบแผ่น ไบบิต [16]

ในปี ค.ศ. 2014 Promvong et al. [17] ได้ทดลองใช้แหวนหมุนวนแบบเอียง (VRs) โดยมุมเอียงเท่ากับ 30° อัตราส่วนความกว้างของแหวนสัมผัส ($BR=b/D=0.1, 0.15$ และ 0.2) อัตราส่วนระยะพิตซ์ของแหวนสัมผัส ($PR=P/D=0.5, 1.0, 1.5$ และ 2.0) ดังรูปที่ 12 เลขเรย์โนลด์์อยู่ในช่วง 5,000 ถึง 26,000 พบว่า BR ค่าที่มากมีแนวโน้มให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนและความดันตกที่มากกว่าท่อผิวเรียบ ในขณะที่ PR จะให้ค่าในแนวโน้มตรงกันข้าม สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.4 เมื่อ $BR=0.1$ และ $PR=0.5$ เลขเรย์โนลด์์ที่ต่ำ



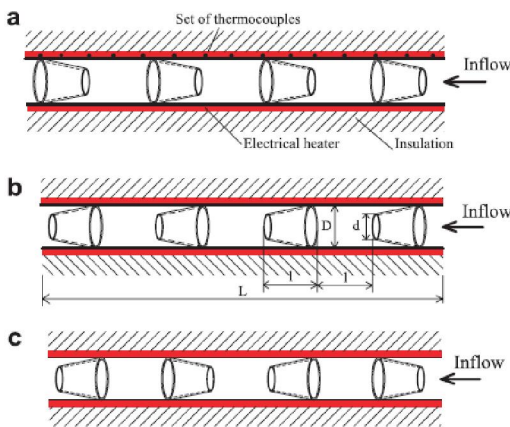
รูปที่ 12 แหวนหมุนวนแบบเอียง [17]

ในปี ค.ศ. 2004 Yakut and Sahin [18] ได้ทดลองใช้แหวนแบบกรวยที่มีความยาว 1,240 mm เส้นผ่านศูนย์กลางเล็กและใหญ่เท่ากับ 24 mm และ 44 mm, ตามลำดับ ระยะพิตซ์เท่ากับ 10, 20 และ 30 mm ดังรูปที่ 13 เลขเรย์โนลด์์อยู่ระหว่าง 5,000 ถึง 20,000 พบว่าเลขนัสเซลที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเลขเรย์โนลด์์และตามการลดลงของระยะพิตซ์ โดยสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นกับระยะพิตซ์ 10 mm มีค่ามากถึง 250% เมื่อเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบ



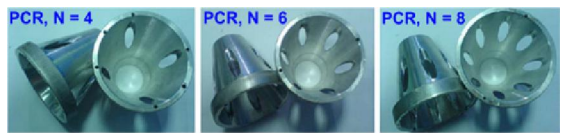
รูปที่ 13 แหวนแบบกรวย [18]

ในปี ค.ศ. 2008 Promvong [19] ได้ทดลองใช้แหวนแบบกรวยที่มีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง ($d/D=0.5, 0.6, 0.7$) การจัดเรียงแหวนแบบกรวยมี 3 แบบ คือ กรวยคู่ตามกระแส (DR) กรวยคู่ทวนกระแส (CR) และ กรวยคู่ตามและทวนกระแส (CDR) ดังรูปที่ 14 เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 6,000 ถึง 26,000 พบว่าการจัดเรียงแบบ DR ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีกว่าการจัดเรียงแบบอื่น การจัดเรียงแหวนแบบกรวย CR, DR และ CDR ให้เลขนัสเซิลท์เท่ากับ 197%, 333% และ 237%, ตามลำดับ สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.8 เมื่อแหวนแบบกรวยจัดเรียงแบบ DR อัตราส่วน $d/D=0.5$



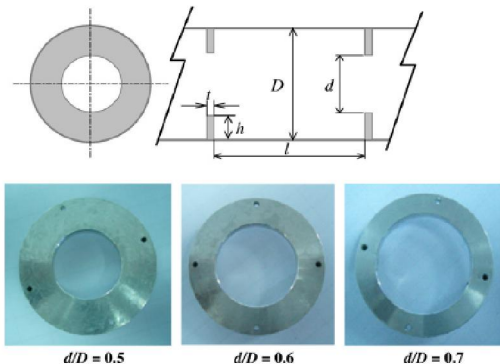
รูปที่ 14 แหวนแบบกรวย (a) DR, (b) CR และ (c) CDR [19]

ในปี ค.ศ. 2010 Kongkaitpaiboon et al. [20] ได้ทดลองใช้แหวนแบบกรวยเจาะรู (PCR) ที่มีอัตราส่วนระยะพิทช์ ($PR=p/D=4, 6$ และ 12) จำนวนรูเจาะ ($N=4, 6$ และ 8) ดังรูปที่ 15 เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 4,000 ถึง 20,000 พบว่าแหวนแบบกรวย PCR ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนถึง 137% มากกว่าท่อผิวเรียบ โดยสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 0.92 เมื่อ $PR=4$ และ $N=8$ เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 4,000



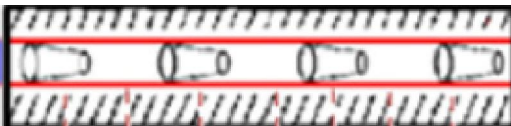
รูปที่ 15 แหวนแบบกรวยเจาะรู (PCR) [20]

ในปี ค.ศ. 2010 Kongkaitpaiboon et al. [21] ได้ทดลองใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนแหวนแบบวงกลม (CRT) ที่มีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง ($DR=d/D=0.5, 0.6$ และ 0.7) อัตราส่วนระยะพิทช์ ($PR=p/D=6, 8$ และ 12) ดังรูปที่ 16 เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 4,000 ถึง 20,000 พบว่าแหวนแบบ CRT ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 57% ถึง 195% เมื่อเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบ สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.07 เมื่อแหวน CRT มี $DR=0.7$ และ $PR=6$ เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 4,000



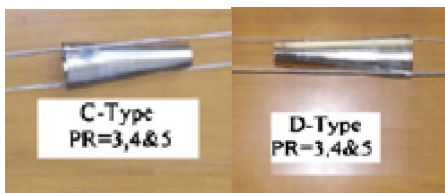
รูปที่ 16 ตัวสร้างความปั่นป่วนแหวนแบบวงกลม [21]

ในปี ค.ศ. 2011 Anvari et al. [22] ได้ทดลองใช้แหวนแบบกรวยที่มีความยาว 138 mm เส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่และเล็กของแหวนแบบกรวยเท่ากับ 136 mm และ 68 mm, ตามลำดับ การจัดเรียงแหวนมี 2 แบบ คือ กรวยคู่ตามกระแส (DR) และ กรวยคู่ทวนกระแส (CR) ดังรูปที่ 17 เลขเรย์โนลด์อยู่ระหว่าง 2,500 ถึง 9,500 พบว่าเลขนัสเซิลท์ของการจัดเรียงแหวนแบบ DR มีค่ามากถึง 521% และ จัดเรียงแบบ CR มีค่าสูงสุดถึง 355% ความดันลดของการจัดเรียงแบบ DR มากกว่าแบบ CR



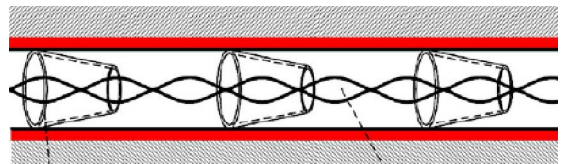
รูปที่ 17 แหวนแบบกรวย [22]

ในปี ค.ศ. 2013 Muthusamy et al. [23] ได้ทดลองใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนแบบกรวยดัดคียบภายในที่มีอัตราส่วนระยะพิทซ์ (PR=3, 4 และ 5) และมีการจัดเรียง 2 แบบ คือ กรวยคู่ตามกระแส (C-turbulators) และ กรวยคู่ทวนกระแส (D-turbulators) ดังรูปที่ 18 เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 6,800 ถึง 9,700 พบว่าการจัดเรียงแบบ D-turbulators ที่มี PR=3 ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดถึง 315% โดยที่สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 2.4 และ ตัวประกอบเสียดทานมีค่าเป็น 3.2 เท่าของท่อผิวเรียบ



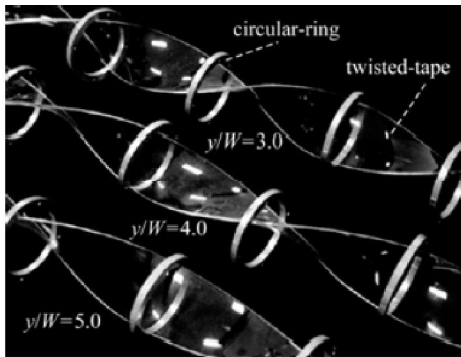
รูปที่ 18 ตัวสร้างความปั่นป่วนแบบกรวยดัดคียบแบบ C-turbulators และ D-turbulators [23]

ในปี ค.ศ. 2007 Promvonge and Eiamsa-ard [24] ได้ทดลองใช้แหวนแบบกรวยร่วมกับแผ่นไบบิต โดยใช้แหวนแบบกรวยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กและใหญ่เท่ากับ 24 mm และ 48 mm, ตามลำดับ อัตราส่วนการบิดของแผ่นไบบิต ($Y=y/w=3.75$ และ 7.5) ดังรูปที่ 19 เลขเรย์โนลด์อยู่ระหว่าง 6,000 ถึง 26,000 พบว่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการใช้แหวนแบบกรวยร่วมกับแผ่นไบบิตที่มี $Y=3.75$ และ 7.5 มีค่าเป็น 367% และ 350% มากกว่าท่อผิวเรียบ สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.96 เมื่อใช้แหวนแบบกรวยร่วมกับแผ่นไบบิตที่มี $Y=3.75$



รูปที่ 19 แหวนแบบกรวยและแผ่น ไบบิต [24]

ในปี ค.ศ. 2013 Eiamsa-ard et al. [25] ได้ทดลองใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนแหวนแบบวงกลม (CRT) ร่วมกับแผ่นไบบิต (TT) โดยอัตราส่วนระยะพิทซ์ของแหวน CRT ($I/D=1.0, 1.5$ และ 2.0) และ อัตราส่วนการบิดของ TT ($y/W=3, 4$ และ 5) ดังรูปที่ 20 เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 6,000 ถึง 20,000 พบว่าตัวประกอบเสียดทานและสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการใช้อุปกรณ์ร่วม CRT และ TT มีแนวโน้มมากกว่าการใช้ CRT เพียงอย่างเดียว ซึ่งให้เลขนัสเซิลท์ ตัวประกอบเสียดทานและสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเป็น 25.8%, 82.8% และ 6.3%, ตามลำดับ โดยสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.42 ของการใช้ CRT ที่มี $I/D=1.0$ และ TT ที่มี $y/W=3$



รูปที่ 20 แหวนแบบวงกลมและแผ่นใบบิด [25]

การใช้แหวนแบบกรวยติดครีบกภายในให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วนอย่างรุนแรงและความหนาขอบชั้นขีดของของไหลมีขนาดเล็กลง ทั้งนี้ครีบกที่ติดตั้งภายในทำให้พื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีค่ามากขึ้น

ตารางที่ 1 สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของขดลวดและแหวนแต่ละรูปแบบ

ผู้วิจัย	ขดลวดและแหวน	เงื่อนไข	Re	Nu_a / Nu_0	f_a / f_0	η
Yakut and Sahin [6]	ขดลวด	t=10, 20, 30 mm	5,000 – 35,000	2.3 – 1.8	38.5 – 13.0	-
Naphon [7]	ขดลวด	H=3.18, 5.08 mm	5,000 - 25,000	-	-	-
Akpinar [8]	ขดลวดสปริง	P=9, 15, 21 mm	6,500 – 13,000	2.64 – 2.38	2.47 – 2.33	-
Zamankhan [9]	ขดลวด	t=0.6 mm	200 – 3,000	-	-	-
Promvongse [10]	ขดลวดสี่เหลี่ยม	H= 15, 20 mm t=2, 3 mm	5,000 – 25,000	2.6 – 2.1	8.4 – 9.0	1.23 – 1.02
Gunes et al. [11]	ขดลวด	P/D=1, 2, 3 s=1, 2 mm	4,105 – 26,400	3.0 – 2.4	7.83 – 7.20	1.5 – 1.24
Gunes et al. [12]	ขดลวดสามเหลี่ยม	P/D=1, 2, 3 a/D=0.0714, 0.0892 s= 1 mm	3,500 – 27,000	2.5 – 2.02	6.35 - 6.1	1.36 - 1.12
Eiamsa-ard et al. [13]	ขดลวดและแผ่นใบบิด	D, DI –coil Y=3,4	4,600 – 20,000	3.6 – 3.0	27 - 29	1.25 – 1.0
Karakaya and Durmus [14]	สปริงกรวย	$\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ DR, CR, CDR	10,000 – 34,000	4.33 – 2.73	85 – 45	-
Ozceyhan et al. [15]	แหวน	p/d= 0.5, 1, 1.5, 2, 3	4,475 – 43,725	1.75 – 1.60	4.21 – 4.78	1.16 – 1.13
Thianpong et al. [16]	แหวนแผ่นใบบิด	W/D=0.05, 0.1, 0.15 p/D=1, 1.5, 2	6,000 – 20,000	3.38 – 2.85	38 - 50	1.24 - 1.02
Promvongse et al. [17]	แหวนวนแบบเอียง	PR=P/D=0.5, 1.0, 1.5, 2.0 BR=b/D=0.1, 0.15, 0.2	5,000 - 26,000	4.4 – 3.6	35 - 37	1.4 – 1.14
Yakut and Sahin [18]	แหวนแบบกรวย	t=10, 20, 30 mm	5,000 – 20,000	3.39 – 2.32	-	-
Promvongse [19]	แหวนแบบกรวย	d/D=0.5, 0.6, 0.7 DR, CR, CDR	6,000 – 26,000	6 – 3.4	28 - 18	1.8 – 0.93

ตารางที่ 1 สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของขดลวดและแหวนแต่ละรูปแบบ (ต่อ)

ผู้วิจัย	ขดลวดและแหวน	เงื่อนไข	Re	Nu_a / Nu_0	f_a / f_0	η
Kongkaitpaiboon et al. [20]	แหวนแบบกรวยเจาะรู	PR=p/D=4, 6, 12 N=4, 6, 8	4000 – 20,000	3.2 – 3.45	28.5 – 22.5	0.92 – 0.83
Kongkaitpaiboon et al. [21]	แหวนวงกลม	DR=d/D=0.5, 0.6, 0.7 PR=p/D=6, 8, 12	4,000 – 20,000	2.89 – 2.94	50 - 70	1.07 – 0.95
Anvari et al. [22]	แหวนแบบกรวย	d=68mm, D=136 mm DR, CR	2,500 – 9500	6.1 – 2.57	-	-
Muthusamy et al. [23]	แหวนแบบกรวย ติดครีบกภายใน	PR=3, 4, 5 C, D – turbulators	6,800 – 9700	2.48 – 2.75	6.5 – 4.7	2.4 – 2.1
Promvongse and Eiamsa-ard [24]	แหวนแบบกรวยและ แผ่นใบบิด	d=24 mm, D=48 mm y/w=3.75, 7.5	6,000 – 26,000	6.35 – 3.62	30.5 - 20	1.95 – 1.01
Eiamsa-ard et al. [25]	แหวนกลมและ แผ่นใบบิด	l/D=1, 1.5, 2 y/W=3, 4, 5	6,000 – 20,000	4.49 – 4.09	31 - 36	1.42 – 1.24

ตารางที่ 1 เป็นการแสดงสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของขดลวดและแหวนแต่ละรูปแบบการประยุกต์ใช้งาน โดยนำเสนออยู่ในรูปของผู้วิจัยแต่ละงาน ขดลวดและแหวน เงื่อนไขของขดลวดและแหวน เลขเรย์โนลด์ที่ใช้ทดลอง (Re) อัตราส่วนของเลขนัสเซิลท์ที่มีการปรับปรุงการไหลต่อท่อผิวเรียบ (Nu_a / Nu_0) อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่มีการปรับปรุงการไหลต่อท่อผิวเรียบ (f_a / f_0) และสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (η) จากตารางพบว่าการใช้แหวนแบบกรวยติดครีบกภายในให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 2.4 ส่วนการใช้ขดลวดแบบวางห่างผนังท่อเท่ากับ 1 mm ให้สมรรถนะการถ่ายเท ความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.5

ตารางที่ 2 สมการสหพันธ์ทางความร้อนของขดลวดและแหวนแต่ละงานวิจัย

ผู้วิจัย	สมการสหพันธ์ทางความร้อน
Yakut and Sahin [6]	$Nu = 0.91 Re^{0.522} Pr^{0.4} \left(\frac{t}{D}\right)^{0.128}$ $f = 4.44 Re^{(-0.218)} \left(\frac{t}{D}\right)^{(-0.223)}$
Naphon [7]	$Nu = 0.156 Re^{0.512} Pr^{1/3} \left(\frac{H}{d_i}\right)^{0.253}$ $f = 322.92 (\ln Re)^{-1.849} \left(\frac{H}{d_i}\right)^{0.061}$
Akpinar [8]	$Nu = 0.661 Re^{0.876} Pr^{15.028} hm^{0.374}$ $f = 0.0333 Re^{-0.514} hm^{0.445}$ $hm =$ จำนวนเกลียว
Zamankhan [9]	-
Promvongse [10]	$Nu = 0.01926 Re^{0.804} Pr^{0.4}$ $f = 0.423 Re^{-0.275}$
Gunes et al. [11]	$Nu = 0.077156 Re^{0.716692} (P/D)^{-0.253417} (s/D)^{-0.124383} Pr^{0.0}$ $f = 3.970492 Re^{-0.367485} (P/D)^{-0.31182} (s/D)^{-0.157719}$
Gunes et al. [12]	$Nu = 0.598417 Re^{0.745064} (P/D)^{-0.268374} (a/D)^{0.813205} Pr^{0.3}$ $f = 83.70924 Re^{-0.305268} (P/D)^{-0.388} (a/D)^{1.319018}$

ตารางที่ 2 สมการสหพันธ์ทางความร้อนของขดลวด และแหวนแต่ละงานวิจัย (ต่อ)

ผู้วิจัย	สมการสหพันธ์ทางความร้อน
Eiamsa-ard et al. [13]	$Nu = 0.186 Re^{0.713} Pr^{0.4} (y/w)^{-0.249}$ $f = 22.366 Re^{-0.277} (y/w) - 0.449$
Karakaya and Durmus [14]	-
Ozceyhan et al. [15]	$Nu = 0.524 Re^{0.6} Pr^{0.4} (p/d)^{-0.285}$ $f = 107 Re^{-0.42} (p/d)^{-0.68}$
Thianpong et al. [16]	$Nu = 0.097 Re^{0.833} Pr^{0.4} (W/D)^{0.408} (p/D)^{-0.181}$ $f = 112.795 Re^{-0.159} (W/D)^{1.665} (p/D)^{-0.736}$
Promvonge et al. [17]	$Nu = 0.165 Re^{0.698} Pr^{0.4} (BR+1)^{3.063} (PR+1)^{-0.549}$ $f = 1.709 Re^{-0.209} (BR+1)^{10.753} (PR+1)^{-1.433}$
Yakut and Sahin [18]	$Nu = 4.497 Re^{0.367} Pr^{0.4} \left(\frac{t}{D}\right)^{-0.0716}$ $f = 97.417 Re^{-0.332} \left(\frac{t}{D}\right)^{-0.149}$
Promvonge [19]	CR : $Nu = 0.09155 Re^{0.655} Pr^{0.4} (d/D)^{-1.31}$ $f = 1.12 Re^{-0.258} (d/D)^{-4.4}$ DR : $Nu = 0.863 Re^{0.459} Pr^{0.4} (d/D)^{-1.32}$ $f = 12.52 Re^{-0.42} (d/D)^{4.31}$ CDR : $Nu = 0.1986 Re^{0.586} Pr^{0.4} (d/D)^{-1.34}$ $f = 1.038 Re^{-0.23} (d/D)^{-4.58}$
Kongkaiipaiboon et al. [20]	$Nu = 1.258 Re^{0.606} PR^{-0.39} N^{-0.31} Pr^{0.4}$ $f = 985.48 Re^{-0.368} PR^{-0.747} N^{-1.253}$
Kongkaiipaiboon et al. [21]	$Nu = 0.354 Re^{0.697} Pr^{0.4} DR^{-0.555} PR^{-0.598}$ $f = 0.715 Re^{-0.081} DR^{-4.775} PR^{-0.846}$
Anvari et al. [22]	DR : $Nu = 0.1438 Re^{0.26} Pr^{2.66}$ CR : $Nu = 0.0767 Re^{0.37} Pr^{2.31}$
Muthusamy et al. [23]	C-turbulators : $Nu = 0.0016 Re^{1.09} Pr^{0.4} PR^{0.98}$ D-turbulators : $Nu = 0.005 Re^{1.15} Pr^{0.4} PR^{-0.229}$
Promvonge and Eiamsa-ard [24]	$Nu = 1.356 Re^{0.433} Pr^{0.4} (d/D)^{-1.23} (y/w)^{-0.053}$ $f = 24.87 Re^{-0.43} (d/D)^{-3.99} (y/w)^{-0.16}$
Eiamsa-ard et al. [25]	$Nu = 0.326 Re^{0.724} Pr^{0.4} (l/D)^{-0.475} (y/W)^{-0.406}$ $f = 13.99 Re^{-0.202} (l/D)^{-0.927} (y/W)^{-0.619}$

ตารางที่ 2 เป็นสมการสหพันธ์ทางความร้อนของขดลวดและแหวนแต่ละงานวิจัย โดยนำเสนอในรูปแบบของเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียดทาน เพื่อใช้ประกอบการคำนวณเมื่อเลือกใช้เงื่อนไขเหล่านั้น

4. สรุปผล

บทความนี้ได้รวบรวมงานวิจัยการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการใช้ขดลวดและแหวน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการไหลหมุนวนและการไหลแบบย้อนกลับซึ่งส่งผลให้สัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้การเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น ขณะเดียวกันก็ทำให้เกิดความดันลดตามมา โดยสามารถสรุปการประยุกต์ใช้ขดลวดและแหวนที่น่าสนใจได้ดังนี้

- 1) สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น
- 2) ตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเลขเรย์โนลด์
- 3) การใช้แหวนมีแนวโน้มให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมากกว่าการใช้ขดลวดในช่วงเลขเรย์โนลด์ต่ำ ในขณะที่เดียวกัน มีแนวโน้มให้ตัวประกอบเสียดทานน้อยกว่าอีกด้วย
- 4) การใช้ขดลวดที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 1 และวางห่างผิวท่อเท่ากับ 1 mm ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.5
- 5) การใช้แหวนแบบกรวยติดครีบบนภายในที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์เท่ากับ 3 ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 2.4
- 6) เมื่อต้องการสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมาก ๆ ควรเลือกใช้แหวนแบบกรวยที่ติดครีบบนและให้

ตัวประกอบเสียดทานที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขอื่นๆ ทำให้ใช้พลังงานในการขับเคลื่อนน้อยแต่มีการประกอบที่ยากกว่า ในทางตรงกันข้าม หากไม่ต้องการสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่สูงมากนักสามารถเลือกใช้ขดลวดที่มีอัตราส่วนระยะพิชท์เท่ากับ 1 เนื่องจากให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนไม่สูงมากในขณะที่เดียวกัน ตัวประกอบเสียดทานน้อยกว่า ทำให้ใช้พลังงานขับเคลื่อนน้อยกว่าและสามารถประกอบได้ง่ายอีกด้วย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] 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.
- [2] P. Promvong, “Thermal augmentation in circular tube with twisted tape and wire coil turbulators”, *Energy Conversion and Management* 49, 2008, pp. 2949-2955.
- [3] K. Yakut, B. Sahin and S. Canbazoglu, “Performance and flow-induced vibration characteristics for conical-ring turbulators”, *Applied Energy* 79, 2004, pp. 65-76.
- [4] D.M. Esparza and E.S. Rojas, “Numerical simulations of the laminar flow in pipes with wire coil inserts”, *Computers & Fluids* 44, 2011, pp. 169-177.
- [5] P. Promvong and S. Eiamsa-ard, “Heat transfer and turbulent flow friction in a circular tube fitted with conical-nozzle turbulators”, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 34, 2007, pp. 72-82.
- [6] K. Yakut and B. Sahin, “The effects of vortex characteristics on performance of coiled wire turbulators used for heat transfer augmentation”, *Applied Thermal Engineering* 24, 2004, pp. 2427-2438.
- [7] P. Naphon, “Effect of coil-wire inserts on heat transfer enhancement and pressure drop of the horizontal concentric tubes”, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 33, 2006, pp. 753-763.
- [8] E.K. Akpınar, “Evaluation of heat transfer and exergy loss in a concentric double pipe exchanger equipped with helical wires”, *Energy Conversion and Management* 47, 2006, pp. 3473-3486.
- [9] P. Zamankhan, “Heat transfer in counterflow heat exchangers with helical turbulators”, *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat* 15, 2010, pp. 2894-2907.
- [10] P. Promvong, “Thermal performance in circular tube fitted with coiled square wires”, *Energy Conversion and Management* 49, 2008, pp. 980-987.
- [11] S. Gunes, V. Ozceyhan and O. Buyukalaca, “The experimental investigation of heat transfer and pressure drop in a tube with coiled wire inserts placed separately from the tube wall”, *Applied Thermal Engineering* 30, 2010, pp. 1719-1725.
- [12] S. Gunes, V. Ozceyhan and O. Buyukalaca, “Heat transfer enhancement in a tube with equilateral triangle cross sectioned coiled wire inserts”, *Experimental Thermal and Fluid Science* 34, 2010, pp. 684-691.

- [13] S. Eiamsa-ard, P. Nivesrangsan, S. Chokphoemphun and P. Promvonge, "Influence of combined non-uniform wire coil and twisted tape inserts on thermal performance characteristics", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37, 2010, pp. 850-856.
- [14] H. Karakaya and A. Durmus, "Heat transfer and exergy loss in conical spring turbulators", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 60, 2013, pp. 756-762.
- [15] V. Ozceyhan, S. Gunes, O. Buyukalaca and N. Altuntop, "Heat transfer enhancement in a tube using circular cross sectional rings separately from wall", *Applied Energy* 85, 2008, pp. 988-1001.
- [16] C. Thianpong, K. Yongsiri, K. Nanan and S. Eiamsa-ard, "Thermal performance evaluation of heat exchangers fitted with twisted-ring turbulators", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 39, 2012, pp. 861-868.
- [17] P. Promvonge, N. Koolnapadol, M. Pimsarn and C. Thianpong, "Thermal performance enhancement in a heat exchanger tube fitted with inclined vortex rings", *Applied Thermal Engineering* 62, 2014, pp. 285-292.
- [18] K. Yakut and B. Sahin, "Flow-induced vibration analysis of conical rings used for heat transfer enhancement in heat exchangers", *Applied Energy* 78, 2004, pp. 273-288.
- [19] P. Promvonge, "Heat transfer behaviors in round tube with conical ring inserts", *Energy Conversion and Management* 49, 2008, pp. 8-15.
- [20] V. Kongkaitpaiboon, K. Nanan and S. Eiamsa-ard, "Experimental investigation of heat transfer and turbulent flow friction in a tube fitted with perforated conical-rings", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37, 2010, pp. 560-567.
- [21] V. Kongkaitpaiboon, K. Nanan and S. Eiamsa-ard, "Experimental investigation of convective heat transfer and pressure loss in a round tube fitted with circular-ring turbulators", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37, 2010, pp. 568-574.
- [22] A.R. Anvari, R. Lotfi, A.M. Rashidi and S. Sattari, "Experimental research on heat transfer of water in tubes with conical ring inserts in transient regime", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 38, 2011, pp. 668-671.
- [23] C. Muthusamy, M. Vivar, I. Skryabin and K. Srithar, "Effect of conical cut-out turbulators with internal fins in a circular tube on heat transfer and friction factor", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 44, 2013, pp. 64-68.
- [24] P. Promvonge 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.

- [25] S. Eiamsa-ard, V. Kongkai-paipboon 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.