

อิทธิพลของแผ่นบิดแบบสลับแกนต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะทาง ความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

Effect of alternate clockwise and counter-clockwise twisted-tapes on heat transfer and thermal performance characteristics in a heat exchanger tube

ชินรัชย์ เขียรพงษ์¹, ภูวนาท สัมเกลี้ยง^{1*} และ สมิทธิ์ เอี่ยมสะอาด²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร หนองจอก กรุงเทพฯ 10530

*ติดต่อ: โทรศัพท์: 0-2326-4197 โทรสาร: 0-2326-4198 E-mail: puwanat_kmittl_me@hotmail.com

ติดต่อ: โทรศัพท์: 0-2988-3666 ต่อ 3114 โทรสาร: 0-2988-3666 ต่อ 241

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของการสอดใส่แผ่นบิดแบบสลับแกนต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบความเสียดทาน และสมรรถนะเชิงความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ในการทดสอบได้ใช้แผ่นบิดแบบสลับแกนที่มีอัตราส่วนการบิด ($y/W = 3$) มีมุมการตัดสลับแกน ($\theta = 90^\circ$) และมีการตัดสลับแกนทุกๆ ช่วง $0.5y$, $1.0y$, $1.5y$ และ $2.0y$ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ทดสอบแผ่นบิดแบบดั้งเดิมเพื่อใช้สำหรับการเปรียบเทียบ การวัดอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดำเนินการภายใต้เงื่อนไขของไหลมีอุณหภูมิคงที่ การทดลองใช้น้ำเป็นของไหลทดสอบและได้ทำการทดสอบในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ตั้งแต่ 5000 ถึง 20,000 จากผลการทดลองพบว่าการสอดใส่แผ่นบิดแบบสลับแกนมีผลทำให้ของไหลภายในท่อเกิดความปั่นป่วนจากการสลับแกนการไหลและของไหลบริเวณผนังท่อและแกนกลางท่อผสมกันมากขึ้นจึงทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนในรูปของเลขนัสเซลท์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าประมาณ 102 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ค่าความเสียดทานสูงขึ้นเช่นเดียวกัน นอกจากนี้บทความนี้ได้นำเสนอสหสัมพันธ์สำหรับการทำนายการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบความเสียดทาน และสมรรถนะเชิงความร้อนไว้ด้วย

คำหลัก: การไหลหมุนควง, ความปั่นป่วน, แผ่นบิดสลับแกน, การถ่ายเทความร้อน, ความเสียดทาน

Abstract

The effects of alternate clockwise and counter-clockwise twisted-tapes on heat transfer and thermal performance characteristics in a heat exchanger tube were experimentally investigated. The counter-clockwise twisted-tapes with four different lengths between the adjacent alternating points: $0.5y$, $1.0y$, $1.5y$ and $2.0y$ and fixed twist ratio ($y/W = 3$), were subjected to the tests. Besides, the typical twisted tape with the identical twist ratio was also tested for comparison. The measurement of heat transfer rate was conducted under uniform heat flux condition (Constant heat flux) while that of friction factor was performed under isothermal condition (Isothermal condition), using water as a working fluid.

Reynolds number (Re) was varied from 5000 to 20,000. The experimental result showed that heat transfer in the tube with clockwise and counter-clockwise twisted-tape was considerably improved as compared to those in the plain tube and the tube with the typical twisted tape. This is responsible by a stronger turbulence intensity and better fluid mixing. The increases in average Nusselt number associated by counter-clockwise twisted-tapes were found to be around 102 percent compared to that in the plain tube. However, the augmented heat transfer was escorted with a significant increase of friction within the tube. The correlations for predicting Nusselt number, friction factor and thermal performance are also included in the present paper.

Keywords: Swirl flow, Turbulent, Clockwise and counter-clockwise twisted-tapes, Heat transfer, Friction

1. บทนำ

ปัจจุบันได้มีการออกแบบและปรับปรุงวิธีการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นมากมายเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การสอดใส่แผ่นบิดเป็นหนึ่งในเทคนิคการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่นิยมมากที่สุดเนื่องจากมีต้นทุนต่ำ สะดวกต่อการติดตั้งและการบำรุงรักษา โดยทั่วไปแผ่นบิดจะทำหน้าที่เสมือนเป็นเครื่องกำเนิดการไหลหมุนควงอย่างต่อเนื่อง การไหลหมุนควงจะทำให้เกิดความปั่นป่วนใกล้ผนังท่อและหน่วงเวลาในการไหลของของไหลภายในท่อให้นานขึ้น ทำให้ของไหลผสมกันและแลกเปลี่ยนความร้อนดียิ่งขึ้น การประยุกต์ใช้ของแผ่นบิดในภาคอุตสาหกรรม หลายงานวิจัยก่อนหน้าี้มีความต้องการที่จะเพิ่มการถ่ายเทความร้อน และสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้สูงขึ้น การออกแบบรูปร่างของแผ่นบิด การออกแบบที่เหมาะสมของแผ่นบิดจะช่วยให้เพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้นขณะที่ความดันที่สูญเสียมีการลดลงอย่างเหมาะสมซึ่งจะทำให้มีผลต่อการประหยัดการใช้พลังงาน มีหลายงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้แผ่นบิดสำหรับเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน Chang และคณะ [1] ได้ศึกษาแผ่นบิดที่มีการตัดขอบโดยที่พบว่าการตัดขอบนั้นจะตัดชั้นกระแสน้ำตามทิศทางการไหลทำให้กระแสน้ำไหลหมุนวนออกไปจากกระแสน้ำหลักในท่อ เมื่อเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าแผ่นบิดที่มีการตัดขอบทำให้ปัจจัยสมรรถนะภาพ

ความร้อนสูงกว่าแผ่นบิดแบบดั้งเดิม Jaisankar และคณะ [2] รายงานผลของแผ่นบิดเกลียวความยาวตลอดท่อและมีการตัดขอบต่อการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบความเสียดทาน พวกเขาพบว่าแผ่นบิดที่มีเกลียวที่มีความยาวเต็มท่อจะทำให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนและความดันสูญเสียสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นบิดที่เว้นที่ปลายท่อ Rahimi [3] ตรวจสอบผลของแผ่นแบบดั้งเดิมและแผ่นบิดที่ลักษณะคล้ายฟันเลื่อย และพบว่าแผ่นบิดลักษณะคล้ายฟันเลื่อยมีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนดีกว่าแผ่นบิดแบบดั้งเดิมเนื่องจากความปั่นป่วนของของไหลใกล้ผนังท่อที่มีความรุนแรงสูงขึ้น Saha และคณะ [4] รายงานผลของแผ่นบิดแบบเว้นช่องต่อตัวประกอบความเสียดทานและการถ่ายเทความร้อนที่ช่วงการไหลแบบราบเรียบ Murugesan [5] ศึกษาแผ่นบิดตัดขอบรูปตัว V พบว่าการถ่ายความร้อนและความเสียดทานเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนความกว้างและความลึกของการตัด Eiamsa-ard และคณะ [6] ได้ศึกษาถึงสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการสอดใส่แผ่นบิดแบบสลับกั้นในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาโดยใช้แผ่นบิดทดลองที่อัตราส่วนบิด ($y/W = 3, 4, 5$) และมีมุมการตัดสลับกั้น ($\theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$) ทุกๆ ช่วง 1 รอบของการบิด ผลการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนบิด ($y/W = 3$) และมีมุมการตัดสลับกั้น ($\theta = 90^\circ$) ให้สมรรถนะทางความร้อนสูงสุด อีกครั้ง Eiamsa-ard และคณะ [7] ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการสอดใส่แผ่นบิดแบบตัดขอบ (Peripherally-cut)

และมีการตัดสลับแกนต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ผลการทดลองพบว่าแผ่น บิดแบบตัดขอบและมีการตัดสลับแกนทำให้อัตราการ ถ่ายเทความร้อนสูงถึง 184% เมื่อเปรียบเทียบกับท่อ เปล่าและสมรรถนะความร้อนสูงสุดที่ 1.25 แต่ในทาง กลับกันค่าความเสียดทานก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน จาก งานวิจัยในข้างต้นจึงนำไปสู่แนวคิดที่จะศึกษาการ ถ่ายเทความร้อนเพื่อให้สมรรถนะความร้อนสูงขึ้นด้วย การสอดใส่แผ่นบิดที่มีระยะการตัดสลับแกนทุก ๆ 0.5y, 1.0y, 1.5y, 2.0y เพื่อเพิ่มการผสมชั้นการไหล ระหว่างผนังท่อและกลางท่อให้มากขึ้น ทั้งยังเพิ่ม ความปั่นป่วนตลอดการไหลในท่อโดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาอิทธิพลของแผ่นบิดแบบสลับแกนต่อ พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะทาง ความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

2. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในท่อและค่าเลขนัสเซลท์เฉลี่ยสำหรับการ สอดใส่แผ่นบิดแบบสลับแกนสามารถหาได้จากสมการ ดังนี้ โดยค่าความร้อนที่ได้รับจากของไหลที่ค่าเลขเรย์ โนลด์์ใดๆ คือ

$$Q_w = MC_{p,w} (T_o - T_i) \quad (1)$$

โดยค่าการพาความร้อนที่ผิวสามารถเขียนได้ดังนี้

$$Q_c = hA(\tilde{T}_w - T_b) \quad (2)$$

เมื่อ

$$T_b = (T_o + T_i) / 2 \quad (3)$$

และ

$$\tilde{T}_w = \sum T_w / 12 \quad (4)$$

เมื่อ T_w เป็นค่าอุณหภูมิที่ผิวของท่อใน ซึ่งไม่คิด ผลกระทบจากความต้านทานความร้อนที่ผิวท่อ เนื่องจากผลของค่าการนำความร้อนของท่อที่สูงและ ขนาดความหนาของท่อที่บาง โดยทำการวัดอุณหภูมิ เฉลี่ยที่ผิวท่อจากทางเข้าถึงทางออกด้วยกัน 12 จุด ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) สามารถหา ได้จากการสมดุลความร้อน เมื่อ (Q) ในสมการที่ (1) และ (2) เท่ากัน ดังนี้

$$h = MC_{p,water} (T_o - T_i) / A(\tilde{T}_w - T_b) \quad (5)$$

เลขนัสเซลท์

$$Nu = hD / k \quad (6)$$

สำหรับของไหลที่อุณหภูมิต่างๆ เลขเรย์โนลด์ส์หาได้ จาก

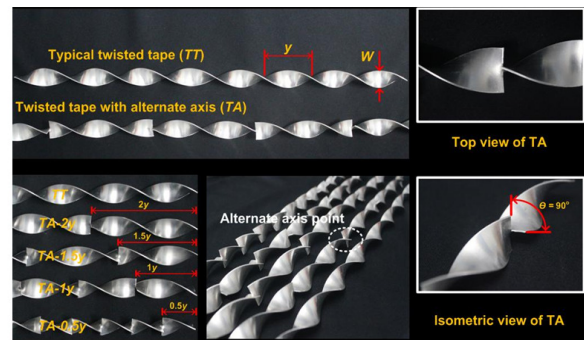
$$Re = \rho U D / \mu = U D / \nu \quad (7)$$

ค่าความเสียดทานหาได้จาก

$$f = \Delta P / ((L / D)(\rho U^2 / 2)) \quad (8)$$

สมรรถนะที่ก้ำกึ่งมีเท่ากัน พิจารณาได้จาก

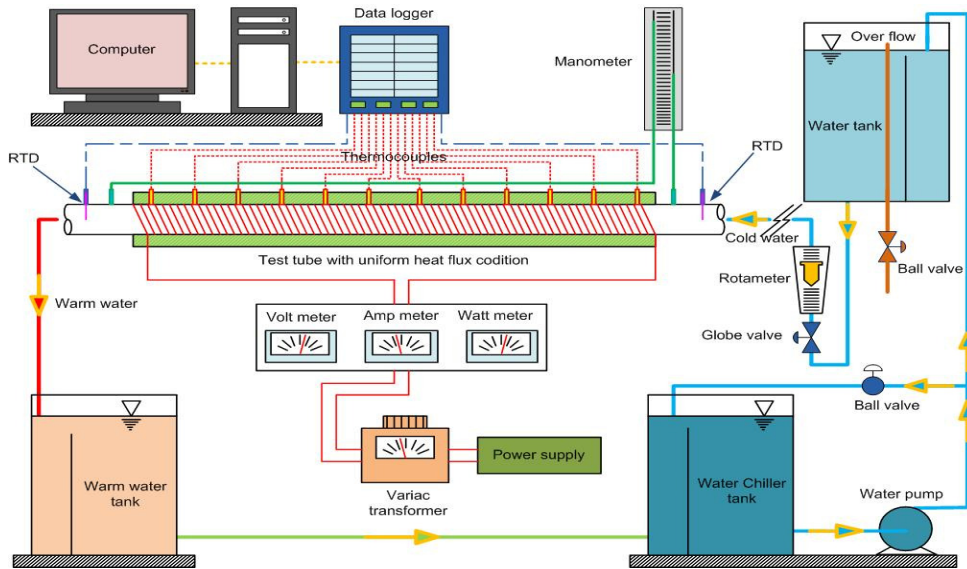
$$\eta = (Nu_t / Nu_p) / (f_t / f_p)^{1/3} \quad (9)$$



รูปที่ 1 แผ่นบิดแบบดั้งเดิม (TT) และแผ่นบิดแบบ สลับแกน (TA)

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ชุดอุปกรณ์ทดลองการแลกเปลี่ยนความร้อน ดัง ปรากฏในรูปที่ 2 ในการทดลองนำไหลผ่านท่อที่มีการ ให้ความร้อนที่ผิวสม่ำเสมอ ซึ่งทำมาจากท่อทองแดงที่ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 19.5 mm. มี ความยาว 1200 mm. มีความหนา 2 mm. ท่อทดสอบ มีการหุ้มฉนวนไว้เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนแก่ ภายนอก โดยใช้ Variac transformer เป็นตัวควบคุม แรงดันและกระแสไฟฟ้า โดยค่าแรงดันที่ใช้ในการ ทดสอบเท่ากับ 80 Volt ในการทดลองการไหลหมุน คงจะถูกสร้างโดยการติดตั้งแผ่นบิดแบบสลับแกน สำหรับการวัดอุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้า ทางออก และ อุณหภูมิที่ผิวท่อจะถูกตรวจวัดโดยเทอร์โมคัปเปิลแบบ K ซึ่งอุณหภูมิทั้งหมดถูกบันทึกค่าด้วยเครื่อง Data Logger ใช้โรตารีเตอร์สำหรับควบคุมและวัดอัตราการ ไหลของน้ำและน้ำจะไหลเข้าสู่ชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยน



รูปที่ 2 ชุดอุปกรณ์ทดลองการแลกเปลี่ยนความร้อน

ความร้อน โดยที่ทางเข้าและทางออกทำการติดตั้งจุดวัดความดันสำหรับหาค่าความดันตกคร่อมภายในท่อทดสอบโดยต่อเข้ากับมานอมิเตอร์สำหรับอ่านค่าผลต่างความสูง ในการทดสอบแต่ละครั้งจะทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ อัตราการไหลและความดันลดลงของน้ำ ภายหลังจากที่ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล ในระหว่างการทดลองจะทำการปรับค่าอัตราการไหลในช่วงเลขเรย์โนลด์ของน้ำที่ทางเข้าท่อระหว่าง 5000 ถึง 20,000 โดยที่คุณสมบัติต่างๆ ของไหลและการหาค่าเลขนี้สเซลท์จะพิจารณาจากค่าอุณหภูมิโดยเฉลี่ยที่ได้จากสมการที่ (3)

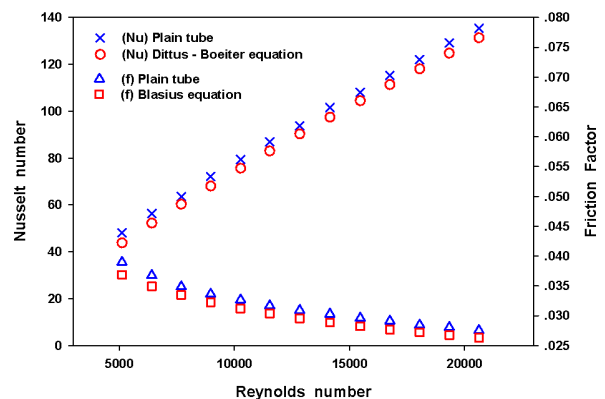
4. ผลการทดสอบและบทวิเคราะห์

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้คือการศึกษาดังผลการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการสอดใส่แผ่นบิตแบบสลับแกนโดยให้ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวสม่ำเสมอ

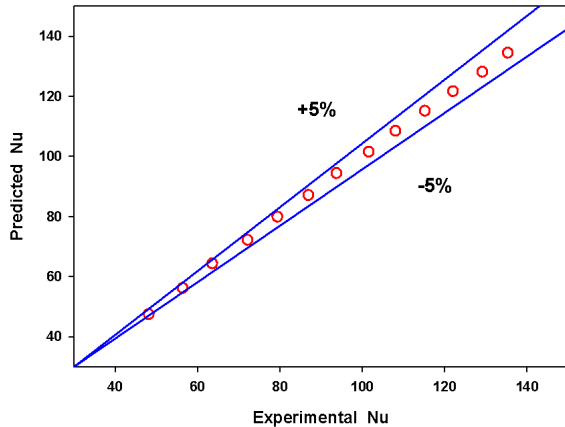
4.1 การตรวจสอบค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานในท่อเปล่า

ผลที่ได้จากการทดสอบท่อที่ไม่มีการสอดใส่แผ่นบิต (ท่อเปล่า) นำมาเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ในอดีตที่มีความเชื่อถือได้ ผลของการถ่ายเทความร้อนที่อยู่ในเทอมของเลขนี้สเซลท์จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Dittus และ Boelter ขณะที่ตัว

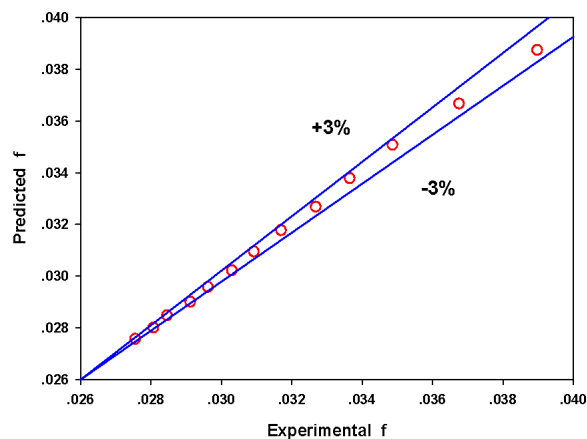
ประกอบความเสียดทานนำไปเปรียบเทียบสหสัมพันธ์ของ Blasius จากผลการทดลองท่อเปล่าพบว่าทั้งค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากสหสัมพันธ์ในข้างต้นไม่เกิน 8% และ 5% ตามลำดับ ดังปรากฏในรูปที่ 3 จากการตรวจสอบค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานของท่อเปล่าพบว่ามีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากสหสัมพันธ์ในอดีตไม่เกิน 8% จึงถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สามารถนำอุปกรณ์ทดลองการแลกเปลี่ยนความร้อนไปทดลองกับการสอดใส่แผ่นบิตกรณีต่างๆ ได้



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์กับเลขนี้สเซลท์และค่าตัวประกอบความเสียดทานในกรณีของท่อเปล่าเทียบกับสหสัมพันธ์ในอดีต



รูปที่ 4 การตรวจสอบความผิดพลาดของสหสัมพันธ์ เลขนัสเซิลท์



รูปที่ 5 การตรวจสอบความผิดพลาดของสหสัมพันธ์ ตัวประกอบความเสียดทาน

จากการทดลองทำให้สามารถสร้างสมการการถ่ายเทความร้อนและสมการค่าประกอบความเสียดทานกรณีท่อเปล่าได้ตั้งสมการที่ (10) และ (11) ตามลำดับ เมื่อนำสมการการถ่ายเทความร้อนและสมการตัวประกอบความเสียดทานที่ได้มาพล็อตเทียบกับผลการทดลองจริงพบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความเบี่ยงเบนของข้อมูลอยู่ในช่วง $\pm 5\%$ และ $\pm 3\%$ ดังในรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

สหสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนจากการทดลองกรณีท่อเปล่า

$$Nu_p = 0.040 Re_p^{0.747} Pr^{0.4} \quad (10)$$

สหสัมพันธ์ของตัวประกอบความเสียดทานร้อนจากการทดลองกรณีท่อเปล่า

$$f_p = 0.312 Re_p^{-0.244} \quad (11)$$

4.2 ผลของการสอดใส่แผ่นบิดแบบสลั้บแกนเทียบกับท่อเปล่า

4.2.1 การถ่ายเทความร้อน (Nu)

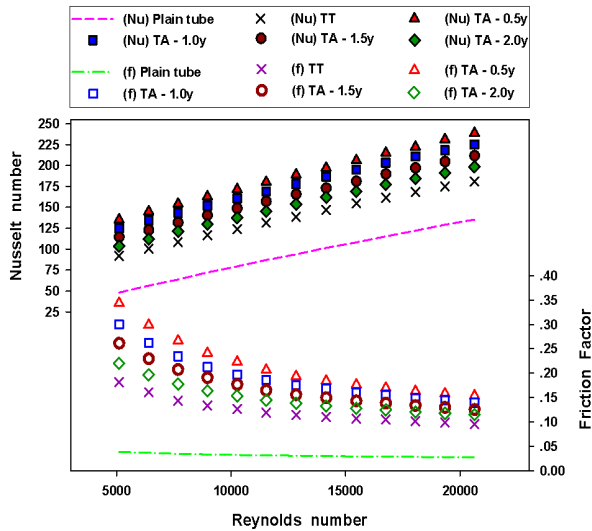
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคูณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะทางความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการสอดใส่แผ่นบิดแบบสลั้บแกน ผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการสอดใส่แผ่นบิดแบบสลั้บแกน (TA) ทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนในเทอมของเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นจากท่อเปล่าและแผ่นบิดแบบดั้งเดิม (TT) ประมาณ 102% และ 36% ตามลำดับ เมื่อสอดใส่แผ่นบิดที่ระยะการตัดสลั้บแกนน้อยที่สุด คือ ($TA-0.5y$) ทำให้ของไหลมีความปั่นป่วนเพิ่มขึ้น เกิดการถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อสู่กลางท่อมากขึ้นและหน่วงเวลาการไหลยาวนานที่สุดจึงทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนในเทอมของเลขนัสเซิลท์สูงกว่าแผ่นบิดที่มีระยะการตัดสลั้บแกนมากกว่า ดังปรากฏในรูปที่ 6

ผลของแผ่นบิดแบบสลั้บแกนต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบของ Nu_t / Nu_p ดังปรากฏในรูปที่ 7 จะเห็นว่ามีค่าสอดคล้องกับอัตราการถ่ายเทความร้อนในท่อด้วยแผ่นบิดแบบสลั้บแกน (TA) สูงกว่าท่อเปล่าและท่อที่มีการใส่แผ่นบิดแบบดั้งเดิม (TT) ซึ่งผลการทดสอบพบว่าการสอดใส่แผ่นบิดที่มีระยะการตัดสลั้บแกนน้อยที่สุด คือ ($TA-0.5y$) ให้อัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนสูงสุด 2.8 เท่า นอกจากนี้อัตราการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามระยะการตัดสลั้บแกนที่ลดลง มีความหมายว่าระยะการตัดสลั้บแกนที่ลดลงจะส่งเสริมต่อผลการปั่นป่วนและเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

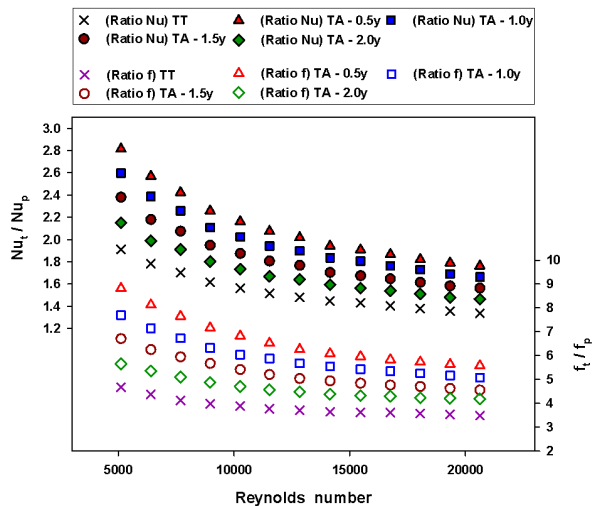
ตารางที่ 1 สหสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อน

แผ่นบิด	สหสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อน
TA-0.5y	$Nu_{TA-0.5y} = 1.844 Re^{0.418} Pr^{0.4} \quad (12)$
TA-1.0y	$Nu_{TA-1.0y} = 1.414 Re^{0.440} Pr^{0.4} \quad (13)$
TA-1.5y	$Nu_{TA-1.5y} = 1.112 Re^{0.457} Pr^{0.4} \quad (14)$
TA-2.0y	$Nu_{TA-2.0y} = 0.841 Re^{0.479} Pr^{0.4} \quad (15)$

จากการทดลองกรณีท่อที่มีการสอดใส่แผ่นบิดทำ
ให้สามารถสร้างสหสัมพันธ์การถ่ายเทความร้อนได้
ตามสมการที่ (12-15) ดังปรากฏในตารางที่ 1 เมื่อ
นำมาพล็อตเทียบกับผลการทดลองจริงพบว่า
สหสัมพันธ์มีเปอร์เซ็นต์ความเบี่ยงเบนของข้อมูลสูงสุด
อยู่ในช่วง $\pm 7\%$ ดังปรากฏในรูปที่ 9



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบความเสียดทาน



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับอัตราส่วน
เลขนัสเซิลท์และอัตราส่วนตัวประกอบความ
เสียดทาน

4.2.2 ค่าตัวประกอบความเสียดทาน (f)

จากการทดลองพบค่าประกอบความเสียดทานจะ
สูงสุดที่การสอดใส่แผ่นบิดที่มีระยะการตัดสลับแกน
น้อยที่สุด คือ (TA-0.5y) และลดลงตามการเพิ่มขึ้น

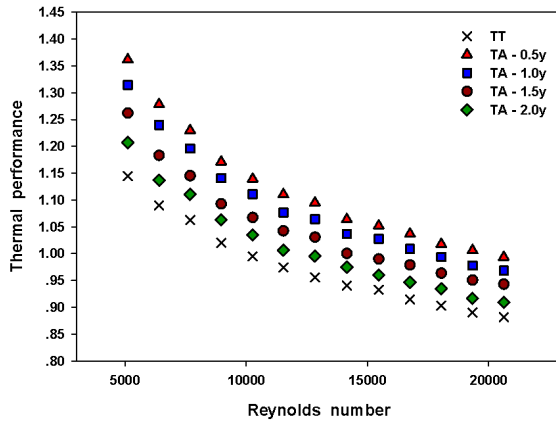
ของระยะการตัดสลับแกน เป็นผลที่เกิดจากระยะการ
ตัดสลับแกนที่น้อยทำให้เกิดการไหลหมุนควงปั่นป่วน
และหน่วงการไหลเพิ่มมากขึ้น ผลก็คือแรงต้านการ
ไหลจะมีค่าสูงขึ้นตาม รวมทั้งเมื่อมีการไหลหมุนควง
สูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิต่ำลงส่งผลให้ค่าความ
หนืดผิวท่อสูง ซึ่งทั้งหมดเป็นผลให้ค่าประกอบความ
เสียดทานสูงขึ้น โดยผลการทดสอบพบว่าแผ่นบิดแบบ
สลับแกน (TA-0.5y) มีค่าประกอบความเสียดทานสูง
กว่าท่อเปล่าและแผ่นบิดแบบดั้งเดิม (TT) ประมาณ
573% และ 74% ตามลำดับ ดังปรากฏในรูปที่ 6

การสอดใส่แผ่นบิดแบบสลับแกน (TA) จะมีผลต่อ
การสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในเทอมของ
 f_t / f_p ดังปรากฏในรูปที่ 7 ในทำนองเดียวกันอัตรา
การถ่ายเทความร้อน พบว่าแผ่นบิดแบบสลับแกน
(TA-0.5y) มีตัวประกอบความเสียดทานสูงกว่าท่อ
เปล่าและท่อที่มีการติดตั้งแผ่นบิดแบบดั้งเดิม (TT)
ประมาณ 8.8 เท่า และ 1.9 เท่า ตามลำดับ โดยทั่วไป
การหมุนควงและปั่นป่วนจะก่อให้เกิดตัวประกอบ
ความเสียดทานมากระหว่างส่วนทดสอบ โดยทดลอง
พบว่าตัวประกอบความเสียดทานจะเพิ่มขึ้นตามการ
ลดลงของระยะการตัดสลับแกน

ตารางที่ 2 สหสัมพันธ์ของตัวประกอบความเสียดทาน

แผ่นบิด	สหสัมพันธ์ของตัวประกอบความเสียดทาน
TA-0.5y	$f_{TA-0.5y} = 50.505Re^{-0.587}$ (16)
TA-1.0y	$f_{TA-1.0y} = 32.567Re^{-0.551}$ (17)
TA-1.5y	$f_{TA-1.5y} = 24.073Re^{-0.532}$ (18)
TA-2.0y	$f_{TA-2.0y} = 11.756Re^{-0.470}$ (19)

จากการทดลองกรณีท่อที่มีการสอดใส่แผ่นบิดทำ
ให้สามารถสร้างสหสัมพันธ์ตัวประกอบความเสียด
ทานได้ตามสมการที่ (16-19) ดังปรากฏในตารางที่ 2
และเมื่อนำมาพล็อตเทียบกับผลการทดลองจริงพบว่า
สหสัมพันธ์ตัวประกอบความเสียดทานมีเปอร์เซ็นต์
ความเบี่ยงเบนของข้อมูลสูงสุดอยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ดัง
ปรากฏในรูปที่ 10



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์สกับ
สมรรถนะทางความร้อน

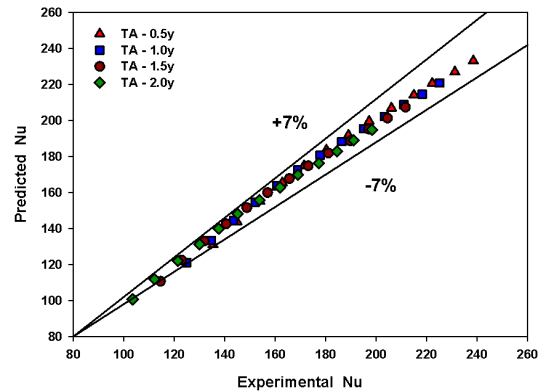
4.2.3 สมรรถนะทางความร้อน (η)

จากการทดลองการสอดใส่แผ่นบิดแบบสลับกแกน
ในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มสมรรถนะทาง
ความร้อนในกรณีต่างๆ ดังปรากฏในรูปที่ 8 พบว่า
สมรรถนะความร้อนของแผ่นบิดแบบสลับกแกนอยู่
ในช่วงระหว่าง 0.99 และ 1.36 ในขณะที่เดียวกันผล
สมรรถนะความร้อนของแผ่นบิดแบบดั้งเดิมปรากฏว่า
อยู่ในช่วงระหว่าง 0.88 และ 1.14 ส่วนนี้แสดงให้เห็น
ว่าประโยชน์ของแผ่นบิดแบบสลับกแกนใช้ได้ทั้งด้าน
ความร้อนที่มีสมรรถนะความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อ
เปรียบเทียบกับ การสอดใส่แผ่นบิดแบบดั้งเดิม
นอกเหนือจากนี้สมรรถนะความร้อนจะเพิ่มขึ้นด้วยการ
ลดลงของระยะการตัดสลับกแกน จากการทดลองแผ่น
บิดที่มีระยะการตัดสลับกแกนน้อยที่สุด (TA-0.5y) ให้
สมรรถนะความร้อนสูงกว่าแผ่นบิด (TA-1y), (TA-
1.5y), (TA-2.0y) และแผ่นบิดแบบดั้งเดิม (TT)
ประมาณ 3%, 7%, 11% และ 15% ตามลำดับ

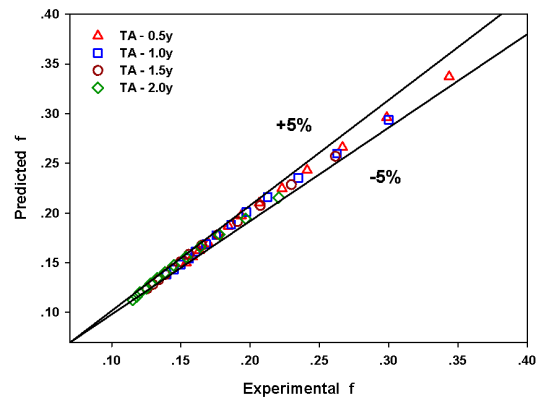
ตารางที่ 3 สหสัมพันธ์ของสมรรถนะความร้อน

แผ่นบิด	สหสัมพันธ์ของสมรรถนะความร้อน
TA- 0.5y	$\eta_{TA-0.5y} = 9.070Re^{-0.224}$ (20)
TA-1.0y	$\eta_{TA-1.0y} = 8.569Re^{-0.221}$ (21)
TA-1.5y	$\eta_{TA-1.5y} = 7.255Re^{-0.207}$ (22)
TA-2.0y	$\eta_{TA-2.0y} = 6.632Re^{-0.201}$ (23)

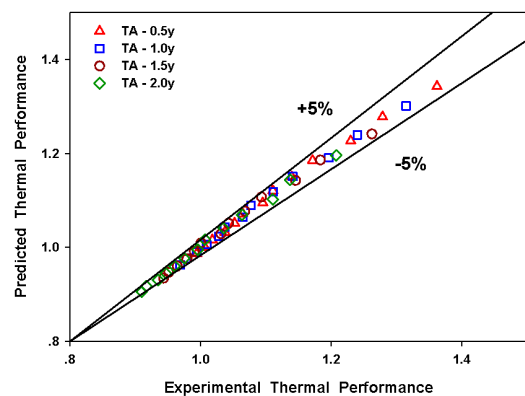
จากการทดลองกรณีท่อที่มีการสอดใส่แผ่นบิดทำ
ให้สามารถสร้างสหสัมพันธ์สมรรถนะความร้อนได้ตาม
สมการที่ (20-23) ดังปรากฏในตารางที่ 3 เมื่อนำมา
พล็อตเทียบกับผลการทดลองจริงพบว่าสหสัมพันธ์มี
เปอร์เซ็นต์ความเบี่ยงเบนของข้อมูลสูงสุดอยู่ในช่วง
 $\pm 5\%$ ดังปรากฏในรูปที่ 11



รูปที่ 9 การตรวจสอบความผิดพลาดของสหสัมพันธ์
เลขนัสเซลท์



รูปที่ 10 การตรวจสอบความผิดพลาดของสหสัมพันธ์
ตัวประกอบความเสียดทาน



รูปที่ 11 การตรวจสอบความผิดพลาดของสหสัมพันธ์
สมรรถนะความร้อน

5. สรุปผลการทดสอบ

ผลของแผ่นบิดแบบสลับแกนต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ความเสียดทาน สมรรถนะความร้อน การทดสอบที่ช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ (Reynolds number, Re) ตั้งแต่ 5000 ถึง 20,000 โดยทำการศึกษาแผ่นบิดที่มีความแตกต่างของระยะการตัดสลับแกนคือ ทุกๆ ช่วง 0.5y, 1.0y, 1.5y, 2.0y และแผ่นบิดแบบดั้งเดิม (TT) ทดสอบโดยใช้น้ำเป็นของไหลทำงาน สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. แผ่นบิดแบบสลับแกนทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อน ความเสียดทานและสมรรถนะความร้อนสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นบิดแบบดั้งเดิม แผ่นบิดแบบสลับแกนจะตัดชั้นกระแสน้ำตามทิศทางการไหลให้เกิดการไหลหมุนควงออกจากกระแสน้ำหลักในท่อ ทำให้การผสมกันดีกว่าแผ่นบิดแบบดั้งเดิมและเพิ่มความปั่นป่วนของของไหลบริเวณที่ผนังท่อและหน่วงการไหลในท่อยาวนานขึ้น การหมุนควงที่เกิดขึ้นโดยแผ่นบิดแบบสลับแกนเป็นเหตุผลที่ทำให้การถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะสูงขึ้น

2. แผ่นบิดแบบสลับแกนจะมีผลทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบความเสียดทานและสมรรถนะความร้อนมีการเพิ่มสูงขึ้นตามการลดลงของระยะการตัดสลับแกน

3. ช่วงการทดสอบที่สมรรถนะความร้อนสูงสุดคือ 1.36 โดยพบที่การใช้แผ่นบิดที่มีระยะการตัดสลับแกน 0.5y (TA-0.5y)

6. เอกสารอ้างอิง

[1] S.W.Chang, T.L. Yang, J.S. Liou, (2007). Heat transfer and pressure drop in tube with broken twisted tape insert, *Experimental Thermal and Fluid Science* 32, 2007, pp. 489 - 501.

[2] S. Jaisankar, T.K. Radhakrishnan, K.N. Sheeba, (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, 2009, pp. 1224-1231.

[3] M. Rahimi, S.R. Shabanian, A.A. Alsairafi, (2009) Experimental and CFD studies on heat transfer and friction factor characteristics of a tube equipped with modified twisted tape inserts, *Chemical Engineering and Processing* 48, 2009, pp. 762-770.

[4] S.K. Saha, A. Dutta, S.K. Dhal , (2001) Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through a circular tube fitted with regularly spaced twisted-tape elements, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 44, 2001, pp. 4211-4223.

[5] P. Murugesan, K. Mayilsamy, S. Suresh, P.S.S. Srinivasan, (2011) Heat transfer and pressure drop characteristics in a circular tube fitted with and without V-cut twisted tape insert, *International Journal of Heat Transfer* 38, 2011, pp. 329-334.

[6] S. Eiamsa-ard, P. Promvong, (2009). Performance assessment in a heat exchanger tube with alternate clockwise and counter-clockwise twisted-tape inserts, *International Journal of Heat Transfer* 53, 2010, pp. 1364-1372.

[7] K. Wongcharee, S. Eiamsa-ard, (2009). Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through the round tube inserted alternate clockwise and counter-clockwise twisted-tapes, *International Journal of Heat Transfer* 38, 2011, pp. 348-352.