

การศึกษาถึงการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศและคุณลักษณะ การถ่ายเทความร้อนของท่อที่มีการสอดใส่วงแหวนข้าวหลามตัด- ข้าวหลามตัด

วิฑูรย์ ชิงถ้อยทอง¹, สุรียา โชคเพิ่มพูน², สัณหวัจน์ ทองแดง², อมร ดอนเมือง² และบัญชา ล้ำเลิศ^{2*}

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

²หน่วยวิจัยวิศวกรรมความร้อนและระบบของไหล สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

*ผู้วิจัยหลัก

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอถึงการศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนพฤติกรรมการไหลภายในท่อ แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการสอดใส่ตัวสร้างการไหลแบบหมุนวนรูปวงแหวนข้าวหลามตัด-ข้าวหลามตัด วงแหวนข้าวหลามตัด ถูกติดตั้งในลักษณะวางเอียงทำมุม 45° ภายในท่อช่วงทดสอบด้วยอัตราส่วนการขวางการไหลที่แตกต่างกันจำนวน 2 ค่า ($RB=e/D=0.15$ และ 0.20) และอัตราส่วนระยะพิตต์ที่แตกต่างกันจำนวน 4 ค่า ($RP=P/D=1.00, 1.25, 1.50$ และ 2.00) การศึกษากระทำภายใต้สภาวะพลักซ์ความร้อนที่ผิวท่อคงที่ โดยใช้อากาศเป็นของไหลทำงานด้วยความเร็วการไหลในรูปเลข เรย์โนลด์ (Re) ระหว่าง 4,000 ถึง 20,000 ผลการศึกษาพบว่าค่าการถ่ายเทความร้อน (Nu) และสูญเสียเนื่องจากการไหล (f) มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนระยะพิตต์ของแผ่นกั้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและที่อัตราส่วนการขวางการไหลมีค่าลดลง

คำสำคัญ: วงแหวนข้าวหลามตัด-ข้าวหลามตัด, สมรรถนะทางความร้อน, ตัวสร้างการไหลหมุนวน, เครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน

Study on Turbulent Air Flow and Heat Transfer Characteristics of a Tube Inserted the Diamond-diamond Rings Turbulator

Witoon Chingtuaythong¹, Suriya Chokphoemphun², Sanhawat Thongdaeng², Amon Donmuang² and Bancha Lamlerd^{2*}

¹Department of Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology, Thepsatri Rajabhat University.

²Thermal Engineering and Fluid System Research Unit (TEF), Mechanical Engineering, Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Isan Sakonnakhon Campus.

*Corresponding Author

Abstract

In this research, experimental investigation was presented heat transfer characteristics and fluid flow behavior of tube heat exchanger inserted the diamond-diamond rings turbulator. The rings turbulator elements with an inclination angle of 45° were inserted periodically into the test section of the test tube at two different blockage ratio ($RB=e/D=0.15$ and 0.20) and four different pitch length ratios ($RP=P/D=1.00, 1.25, 1.50$ and 2.00). The experiment was conducted in the tube heat exchanger having a uniform heat-fluxed wall. The experimental have been conducted for the air flow in terms of Reynolds numbers (Re) ranging from 4,000 to 20,000. It is observed that that both heat transfer (Nu) rate and friction loss (f) decreases with increment of pitch length and decreasing of flow blockage ratio.

Keywords: diamond-diamond rings, thermal performance, vortex generator, heat exchanger.

1. บทนำ

ในการศึกษาถึงการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นสามารถกระทำได้ทั้งวิธีการแบบแอคทีฟและพาสซีฟ โดยอาจมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนให้ดีขึ้นหรืออาจใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีขนาดเล็กแต่มีสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดี ซึ่งหนึ่งของวิธีการแบบพาสซีฟที่ได้รับความนิยมคือการใช้อุปกรณ์สร้างการไหลแบบปั่นป่วนภายในช่องทางการไหลของสารทำงานในระหว่างกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น ใบพัด [1-3] ลวดขัด [4-6] การประยุกต์ใช้ปีก ครีบและแผ่นกั้นการไหล [7-9] และการเจาะร่อง [10-11] เป็นต้น โดยในกลุ่มของใบพัดได้ทำการศึกษาอิทธิพลของรูปทรงใบพัด อัตราส่วนการบิด ในขณะที่กลุ่มของลวดขัดลวดที่หน้าตัดลวดแตกต่างกันไป อัตราส่วนการขดของลวด กลุ่มปีก ครีบและแผ่นกั้นการไหลทำการศึกษาอิทธิพลของรูปทรง มุมปะทะการไหลและตำแหน่งการติดตั้ง ส่วนการเจาะร่องนั้นนำเสนอถึงผลกระทบของรูปทรงการเจาะร่อง ความลึกและความกว้างของร่อง จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าในแต่ละรูปแบบอุปกรณ์สร้างการไหลแบบปั่นป่วนนั้นสามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ แต่อย่างไรก็ตามผลกระทบที่เกิดขึ้นตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้คือการสูญเสียเนื่องจากการไหลที่เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน

จากการศึกษาทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแผ่นกั้นการไหลเป็นหนึ่งในอุปกรณ์สร้างการไหลแบบปั่นป่วนที่น่าสนใจสำหรับการศึกษาสำหรับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูง โดยได้ทำการพัฒนารูปทรงของแผ่นกั้นการไหลให้มีลักษณะเป็นแบบแผ่นวงแหวนรูปข้าวหลามตัด-ข้าวหลามตัดและทำการติดตั้งในลักษณะวางเอียงทำมุมการเส้นทางการไหลเพื่อลดแรงปะทะอันจะนำไปสู่การสูญเสียเนื่องจากการไหลได้

2. ทฤษฎีและหลักการ

2.1 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เกิดจากกระบวนการพาความร้อนที่ใช้อากาศเป็นของไหลทำงาน ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่ได้รับโดยของไหลทำงาน

กับปริมาณการพาความร้อนที่เกิดขึ้นในการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และทำการนำเสนอค่าการถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้ในรูปตัวแปรไร้มิติคือเลขนัสเซลท์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนการพาความร้อนต่อการนำความร้อนภายในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใดๆ แสดงดังสมการที่ (1)

$$Nu = hD/k \quad (1)$$

เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ และ

k คือ ค่าการนำความร้อนของของไหลทำงาน

2.2 ตัวประกอบความเสียดทาน

ค่าตัวประกอบความเสียดทานเป็นตัวแปรไร้มิติของค่าความดันตกคร่อมสำหรับการไหลภายในท่อที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวท่อใดๆ ด้วยความเร็วของของไหลค่าหนึ่ง ดังแสดงสมการที่ (2)

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

เมื่อ ΔP คือ ความดันตกคร่อมบริเวณท่อทดสอบ

L คือ ความยาวท่อช่วงทดสอบ

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหลทำงาน และ

U คือ ความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน

โดยคุณสมบัติของอากาศพิจารณาที่อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศขาเข้าและขาออก (T_b)

2.3 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

การหาค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (η) พิจารณาจากการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียจากความเสียดทานของอุปกรณ์ซึ่งเกิดขึ้นควบคู่กันไป โดยการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยอัตราส่วนของเลขนัสเซลท์จากท่อที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ที่ช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนตัวเลขต่อตัวเลขเซลท์จากท่อที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ที่ช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Nu/Nu_0) ในทำนองเดียวกันอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานสามารถอธิบายได้ด้วยอัตราส่วนของตัวประกอบความเสียดทานจากท่อที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ที่ช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนต่อตัวประกอบความเสียดทานจากท่อที่ไม่มี

การติดตั้งอุปกรณ์ที่ช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (f/f_0) อัตราส่วนทั้งสองถูกนำไปประยุกต์สำหรับค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายใต้เงื่อนไขการควบคุมกำลังทำงานของปั๊มคงที่ สามารถแสดงสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ว่า

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

2.4 เลขเรย์โนลด์

เลขเรย์โนลด์เป็นตัวแปรที่ใช้แสดงเกี่ยวกับพฤติกรรม การไหลของของไหลทำงาน ซึ่งสามารถแสดงในรูปตัวแปรไร้มิติได้ดังนี้

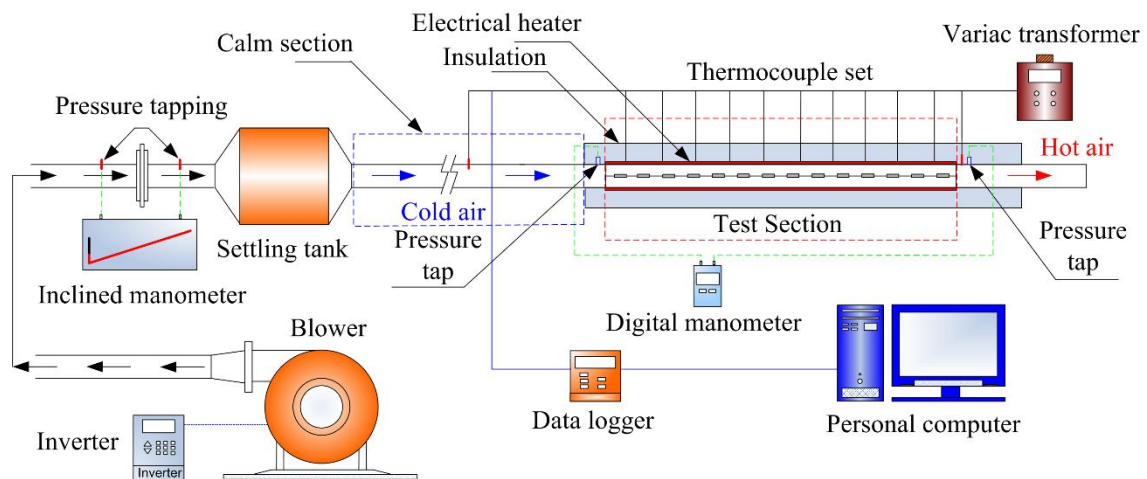
$$Re = UD/\nu \quad (4)$$

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

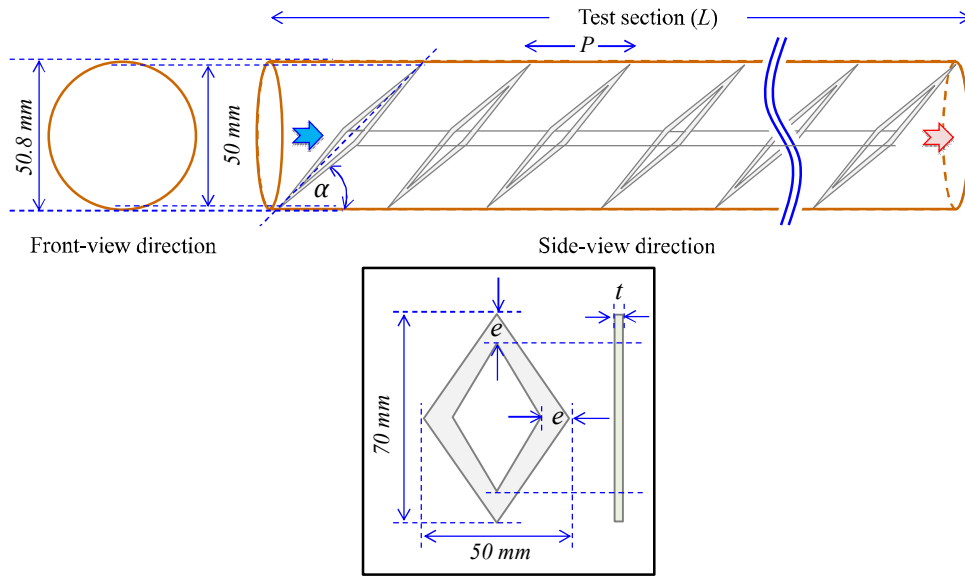
3.1 ชุดอุปกรณ์การทดลอง

ชุดท่อทดสอบการแลกเปลี่ยนความร้อนใช้ท่อทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 50.8 mm ความหนา 2 mm ความยาวรวม 4000 mm แบ่งเป็นความยาวช่วง ทดสอบ 2000 mm พื้นผิวด้านนอกของท่อช่วงทดสอบมีการติดตั้งขดลวดความร้อนเพื่อให้ความร้อนภายใต้สภาวะ

เงื่อนไขพลศาสตร์ความร้อนที่ผิวคงที่ โดยใช้หม้อแปลงปรับ แรงดันไฟฟ้าชนิดแกนหมุนเป็นอุปกรณ์ควบคุมปริมาณความร้อนและมีการหุ้มฉนวนป้องกันความร้อนสูญเสียออกจากระบบ ในการทดสอบใช้อากาศเป็นของไหลทำงาน มีพัดลม ขนาด 1.5 kW ทำหน้าที่จ่ายอากาศเข้าสู่ระบบซึ่งควบคุมความเร็วของพัดลมผ่านอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้ปริมาณอัตราการไหลของอากาศที่ต้องการ อัตราการไหลของอากาศคำนวณได้จากการวัดค่าความดันตกคร่อมแผ่นออริฟิสโดยอ่านค่าความดันตกคร่อมผ่านมาโนมิเตอร์แบบท่อเอียง สำหรับการวัดค่าอุณหภูมิผิวท่อใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K จำนวน 42 ตัว ที่ติดตั้งอย่างสม่ำเสมอรอบท่อช่วงทดสอบ ส่วนการวัดค่าอุณหภูมิของอากาศขาเข้าและขาออกจากท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด RTD PT-100 ซึ่งถูกติดตั้งที่ต้นทางเข้าและปลายทางออกของท่อทดสอบ ตำแหน่งละ 1 ตัว ค่าอุณหภูมิทั้งหมดแสดงผลผ่านเครื่องแสดงและบันทึกผลอุณหภูมิ เครื่องมาโนมิเตอร์แบบดิจิทัลถูกใช้สำหรับอ่านค่าความดันตกคร่อมที่วัดได้จากจุดวัดค่าความดันที่อยู่คร่อมท่อช่วงทดสอบ การติดตั้งชุดท่อทดสอบ การแลกเปลี่ยนความร้อน อุปกรณ์และเครื่องมือวัด นำเสนอในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดสอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 2 ลักษณะแผ่นวงแหวนรูปข้าวหลามตัด-ข้าวหลามตัด

3.2 ตัวสร้างความปั่นป่วน

ลักษณะแผ่นวงแหวนรูปข้าวหลามตัด-ข้าวหลามตัด ความสูงและความกว้างเท่ากับ 70 และ 50 mm ตามลำดับ ทำจากแผ่นอะคริลิกใสความหนา (t) 2 mm ตามที่เสนอใน รูปที่ 2 มีระยะห่างระหว่างตำแหน่งมุมของรูปข้าวหลามตัด (e) ซึ่งนำเสนอในรูปของอัตราส่วนการวางการไหลที่ แตกต่างกันจำนวน 2 ค่า (RB=e/D) เท่ากับ 0.15 และ 0.20 และระยะห่างระหว่างแผ่นวงแหวนซึ่งนำเสนอในรูป อัตราส่วนระยะพิตต์ที่แตกต่างกันจำนวน 4 ค่า (RP=P/D) เท่ากับ 1.00, 1.25, 1.50 และ 2.00 แผ่นรูปวงแหวนถูก ติดตั้งบนเส้นลวดในลักษณะวางเอียงทำมุมกับทิศทางการ ไหลของอากาศเท่ากับ 45°

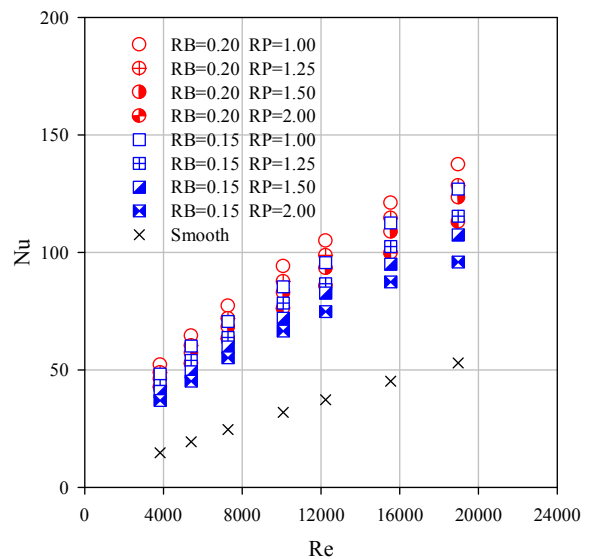
4. ผลการทดลอง

4.1 การถ่ายเทความร้อน

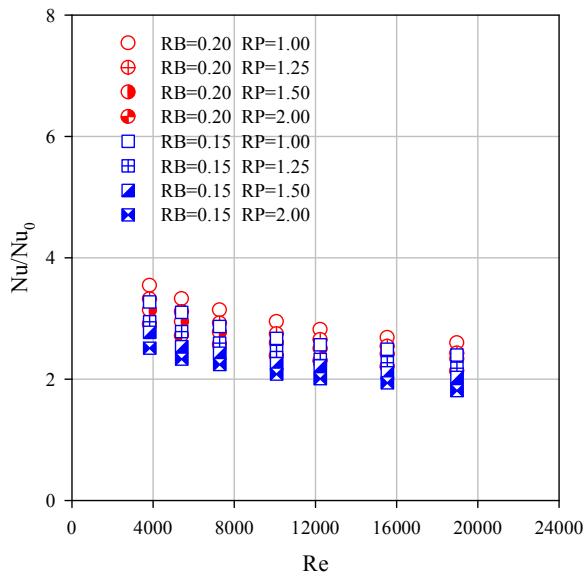
การทดสอบถึงการถ่ายเทความร้อนของชุดทดสอบ การแลกเปลี่ยนความร้อนกรณีท่อพื้นผิวเรียบในรูปของ เลขนัสเซลท์โดยเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์การถ่ายเทความร้อนของ Dittus-Borlter [12] พบว่ามีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ย เท่ากับ ±8%

การถ่ายเทความร้อนของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการสอดใส่แผ่นวงแหวนรูปข้าวหลามตัด-ข้าวหลามตัด เปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบที่ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ นำเสนอใน

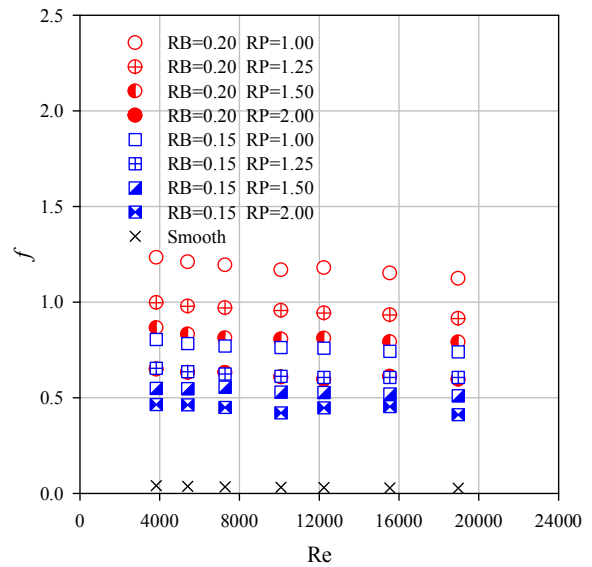
รูปที่ 3 และ 4 สำหรับเลขนัสเซลท์และอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ ตามลำดับ พบว่าท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการสอด ใส่แผ่นวงแหวนรูปข้าวหลามตัด-ข้าวหลามให้ค่าการถ่ายเท ความร้อนที่สูงกว่ากรณีท่อผิวเรียบ 1.8–3.5 เท่าขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนการวางการไหลและอัตราส่วนระยะพิตต์ ซึ่งค่า การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนการวาง การไหลมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเมื่ออัตราส่วนระยะพิตต์ที่ค่า ลดลง



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์

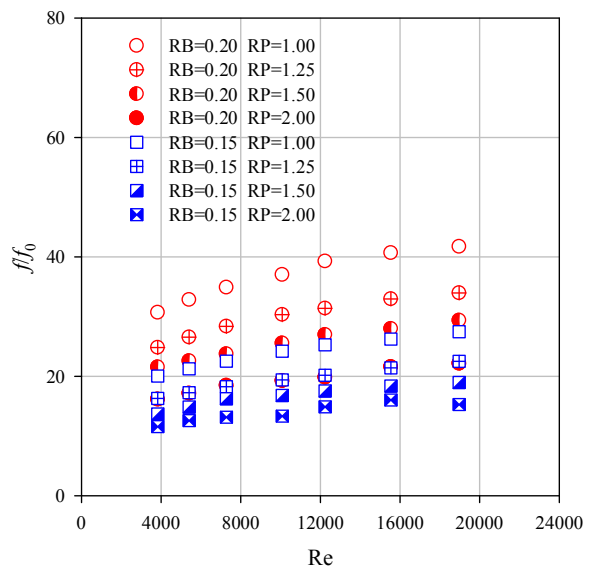


รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์

4.2 การสูญเสียเนื่องจากการไหล

สำหรับการทดสอบถึงการสูญเสียเนื่องจากการไหลของชุดท่อทดสอบการแลกเปลี่ยนความร้อนที่พื้นผิวเรียบในรูปของตัวประกอบความเสียดทานโดยเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ตัวประกอบความเสียดทานของ Blasius [13] พบว่ามีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ $\pm 4\%$

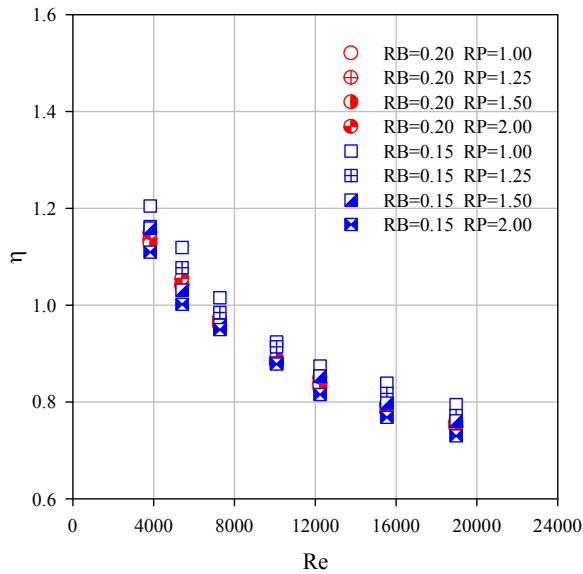
การสูญเสียเนื่องจากการไหลภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการสอดใส่แผ่นวงแหวนรูปข้าวหลามตัด-ข้าวหลามตัดเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบที่ค่าเลขเรย์โนลด์ใดๆ นำเสนอในรูปที่ 5 และ 6 สำหรับตัวประกอบความเสียดทานและอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทาน ตามลำดับพบว่าท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการสอดใส่แผ่นวงแหวนรูปข้าวหลามตัด-ข้าวหลามตัดให้ค่าการสูญเสียเนื่องจากการไหลที่สูงกว่ากรณีท่อผิวเรียบ 11-42 เท่า ขึ้นอยู่อัตราส่วนการวางการไหลและอัตราส่วนระยะพิตต์ ซึ่งค่าการสูญเสียเนื่องจากการไหลมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนการวางการไหลมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเมื่ออัตราส่วนระยะพิตต์ที่ค่าลดลง



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์

4.3 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการสอดใส่แผ่นวงแหวนรูปข้าวหลามตัด-ข้าวหลามตัดแสดงในรูปที่ 7 พบว่าค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงกว่า 1 เมื่อเลขเรย์โนลด์มีค่าต่ำกว่าประมาณ 5500 โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.20 เกิดขึ้นในกรณีอัตราส่วนการวางการไหลเท่ากับ 0.15 และอัตราส่วนระยะพิตต์เท่ากับ 0.10



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรย์โนลด์

5. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนพฤติกรรมการไหลภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการสอดใส่ตัวสร้างการไหลแบบหมุนวนรูปวงแหวน ขั้วหลามตัด-ขั้วหลามตัดวางเอียงทำมุม 45° ภายในท่อช่วงทดสอบของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยอัตราส่วนการขวางการไหลที่แตกต่างกันจำนวน 2 ค่า ($RB=e/D=0.15$ และ 0.20) และอัตราส่วนระยะพิตต์ที่แตกต่างกันจำนวน 4 ค่า ($RP=P/D=1.00, 1.25, 1.50$ และ 2.00) การศึกษากระทำภายใต้สภาวะพลั๊กความร้อนที่ผิวท่อคงที่ โดยใช้อากาศเป็นของไหลทำงานด้วยความเร็วการไหลในรูปเลขเรย์โนลด์ (Re) ระหว่าง 4,000 ถึง 20,000 ผลการศึกษาพบว่าค่าการถ่ายเทความร้อน (Nu) และสูญเสียเนื่องจากการไหล (f) มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนระยะพิตต์ของแผ่นกั้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและที่อัตราส่วนการขวางการไหลมีค่าลดลง โดยให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่ากรณีท่อผิวเรียบ 1.8–3.5 เท่าและการสูญเสียเนื่องจากการไหลที่สูงกว่ากรณีท่อผิวเรียบ 11–42 เท่าค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงสุดภายใต้ขอบเขตการศึกษานี้มีค่าเท่ากับ 1.20 เกิดขึ้นในกรณีอัตราส่วนการขวางการไหลเท่ากับ 0.15 และอัตราส่วนระยะพิตต์เท่ากับ 0.10

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] 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. Vol. 43, 2013, pp. 49–57.
- [2] S. Eiamsa-ard and P. Promvonge, "Performance Assessment in a Heat Exchanger Tube with Alternate Clockwise and Counter-clockwise Twisted-tape Inserts", International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 52, 2010, pp. 1364–1372.
- [3] 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 Insert", International Communications in Heat and Mass Transfer. Vol. 38, 2011, pp. 329–334.
- [4] 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. Vol. 30, 2010, pp. 1719–1725.
- [5] 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. Vol. 37, 2010, pp. 850–856.
- [6] M.R.J. Nasr, A.H. Khalaj and S.H. Mozaffari, "Modeling of Heat Transfer Enhancement by Wire Coil Inserts Using Artificial Neural Network Analysis", Applied Thermal Engineering. Vol. 30, 2010, pp. 143–151.

- [7] A.M.E. Momin, J.S. Saini and S.C. Solanki, "Heat Transfer and Friction in Solar Air Heater Duct with V-shaped Rib Roughness on Absorber Plate," *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 45, 2002, pp. 3383–3396.
- [8] K.R. Agarwal, B.K. Gandhi and J.S. Saini, "Experimental Investigation on Heat Transfer Enhancement due to a Gap in an Inclined Continuous Rib Arrangement in a Rectangular Duct of Solar Air Heater", *Renewable Energy*. Vol. 33, 2008, pp. 585–596.
- [9] S.R.P. Varun and S.K. Singal, "Investigation of Thermal Performance of Solar Air Heater having Roughness Elements as a Combination of Inclined and Transverse Ribs on the Absorber Plate", *Renewable Energy*. Vol. 33, 2008, pp. 1398–1405.
- [10] S. Eiamsa-ard and P. Promvonge, "Thermal Characteristics of Turbulent Rib-grooved Channel Flows", *International Communications in Heat and Mass Transfer*. Vol. 36, 2009, pp. 705–711.
- [11] S. Eiamsa-ard and P. Promvonge, "Numerical Study on Heat Transfer of Turbulent Channel Flow over Periodic Grooves", *International Communications in Heat and Mass Transfer*. Vol. 35, 2008, pp. 844–852.
- [12] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, T.L. Bergman and A.S. Lavine, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 6th edition, John Wiley & Sons, Asia, 2007.
- [13] F.M. White, "Fluid Mechanics", 4th edition, McGraw-Hill, New York, 1999.