http://jeet.siamtechu.net Research Article

อิทธิพลของท่อผิวครีบที่มีแผ่นบิดส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน

EFFECT OF RIBBED TUBE WITH TWISTED TAPE ON HEAT TRANSFER

เก่งกล้า กุณรักษ์[1,*] มิตภาณี พุ่มกล่อม [2] และ เชษฐ์ภณัฏ ปัญญวัชรวงศ์ [3]

Kengkla Kunnarak[1,*] Mitparnee Pumklom[2] and Chetphanat Panyawatchawoong [3]

[1] คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

[2] คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี

[3] คณะโลจิสติกส์และเทคโนโลยีการบิน วิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอก

* *Corresponding author* E-mail : kengkla_stc@hotmail.com

Received : 23 April 2021

Revised : 12 May 2021

Accepted : 15 June 2021

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของท่อผิวครีบที่มีแผ่นบิดส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนท่อทดลองมีความสูงของครีบ 1.0 มม. และระยะห่างครีบ 36 มม. แผ่นบิดมีขนาดความกว้าง 16 มม. มีอัตราส่วนการบิด 3 ค่า y/W=3.0, 4.0 และ 5.0 ดำเนินการทดลองในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น ใช้อากาศเป็นของไหลทดลองที่เลขเรย์โนลดส์ Re=5000-15,000 ผลการทดลองพบว่าท่อผิวครีบช่วยเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าท่อผิวเรียบ ผลการทดลองท่อผิวครีบที่มีแผ่นบิดพบว่าให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อผิวครีบ และท่อผิวเรียบ ตามลำดับ และท่อผิวครีบที่มีแผ่นบิดอัตราสวนการบิด y/W=3.0 ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด ในส่วนอิทธิพลของเลขเรย์โนลดส์ พบว่า การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเลขเรย์โนลดส์

คำสำคัญ: การถ่ายเทความร้อน, ท่อผิวครีบ, แผ่นบิด

ABSTRACT

This paper studied the effect of ribbed tube with twisted tape on heat transfer. The test tube has a ribbed height of 1.0 mm and a ribbed pitch of 36 mm. The tape has a width of 16 mm and three twist ratios (y/W) of 3.0, 4.0 and 5.0, respectively. A double-pipe heat exchanger was used as the test section. Experiments were performed using the air as the working fluid at Reynolds numbers (Re) 5000-15,000. It can be observed that heat transfer of the ribbed tube perform higher than those of the plain tube. The ribbed tube with twisted tape give higher heat transfer than the ribbed tube and the plain tube, respectively. The ribbed tube with twisted tape y/W=3.0 gives the highest heat transfer. The effect of Reynolds number, heat transfer increases with the increase of the Reynolds number.

Keywords: Heat transfer, ribbed tube, twisted tape

1. บทนำ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีความสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อาทิเช่น เครื่องอุ่นน้ำสำหรับการผลิต เครื่องระบายความร้อนเครื่องจักร เครื่องควบแน่น เป็นต้น จึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพการทำงานให้ดียิ่งขึ้น เพื่อช่วยลดค่าดำเนินการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ลดการใช้

พลังงานในการผลิต วิธีที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นมีการวิจัยที่น่าสนใจที่ผ่านมา อาทิเช่น การปรับปรุงผิวท่อเพื่อสร้างการไหลปั่นป่วนบริเวณผิวท่อ และการติดตั้งแผ่นบิดในท่อเพื่อให้เกิดการไหลปั่นป่วนบริเวณกลางท่อ เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน มีงานวิจัยที่ผ่านมาดังนี้ Zimparov [1] ศึกษาผลกระทบของท่อผิวครีบร่วมกับแผ่นบิด ทำการทดลองช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่เลขเรย์โนลดส์ Re=7000-60,000 ผลการทดลองเผยให้เห็นว่าช่วยให้เพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีขึ้น การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มความสูงของครีบที่ผิวท่อ และการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามลดลงของระยะการบิดของแผ่นบิด Chen และคณะ [2] ศึกษาการเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยท่อผิวครีบ ดำเนินการทดลองที่เลขเรย์โนลดส์ Re=9000-35,000 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระยะห่างของครีบส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และยังพบว่าการแลกเปลี่ยนความดีขึ้นตามการเพิ่มความสูงของครีบ Jianfeng และคณะ [3] ศึกษาอิทธิพลของท่อผิวครีบที่มีความสูงของครีบต่างกัน ทดลองที่เลขเรย์โนลดส์ Re=10,607-30,004 ผลการทดลองพบว่าท่อผิวครีบช่วยให้เพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่าท่อผิวเรียบ และการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มความสูงของครีบ Huang และคณะ [4] ศึกษาอิทธิพลของท่อผิวครีบส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อน ทำการทดลองที่เลขเรย์โนลดส์ Re=3601-26,025 ผลการทดลองพบว่าการแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความสูงของครีบ และการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นตามการลดระยะห่างของครีบ Murugesan และคณะ [5] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนโดยการติดตั้งแผ่นบิดและแผ่นบิดที่มีลวดในท่อด้านในของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น ทำการทดลองที่เลขเรย์โนลดส์ Re=2000-12,000 ผลการทดลองพบว่าการติดตั้งแผ่นบิดช่วยให้เพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อน และการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นตามการลดระยะการบิด และยังพบว่าแผ่นบิดที่มีลวดช่วยเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดียิ่งขึ้น Bas และ Ozceyhan [6] ได้ศึกษาการเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการติดตั้งแผ่นบิดในท่อกลม การทดลองมีแผ่นบิดแบบเต็มท่อและแบบไม่เต็มท่อ ทำการทดลองที่เลขเรย์โนลดส์ Re=5000-25,000 ผลการทดลองเผยให้เห็นว่าการติดตั้งแผ่นบิดช่วยเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่าท่อเปล่า แผ่นบิดแบบเต็มท่อช่วยให้แลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่าแบบไม่เต็มท่อ และยังพบว่าการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นตามการลดลงของระยะบิดของแผ่นบิด

งานวิจัยผ่านมาได้มีการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนส่วนมากใช้ท่อผิวครีบเพียงอย่างเดียว และการติดตั้งแผ่นบิดภายในท่อเพียงอย่างเดียว ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้ได้มีแนวคิดใช้ท่อผิวครีบร่วมกับการติดตั้งแผ่นบิดภายในท่อเพื่อเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น อิทธิพลของท่อผิวครีบที่มีแผ่นบิดส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน ได้ออกแบบท่อผิวครีบที่มีความสูงครีบ 1.0 มม. และระยะห่างครีบ 36 มม. และได้มีการติดตั้งแผ่นบิดในท่อครีบ แผ่นบิดมีอัตราส่วนการบิดต่างกัน 3 ค่า y/W=3.0, 4.0 และ 5.0 ทดลองที่เลขเรย์โนลดส์ (Re) อยู่ในช่วงระหว่าง 5000 และ 15,000 นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของท่อผิวครีบส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของท่อผิวครีบที่มีแผ่นบิดส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน

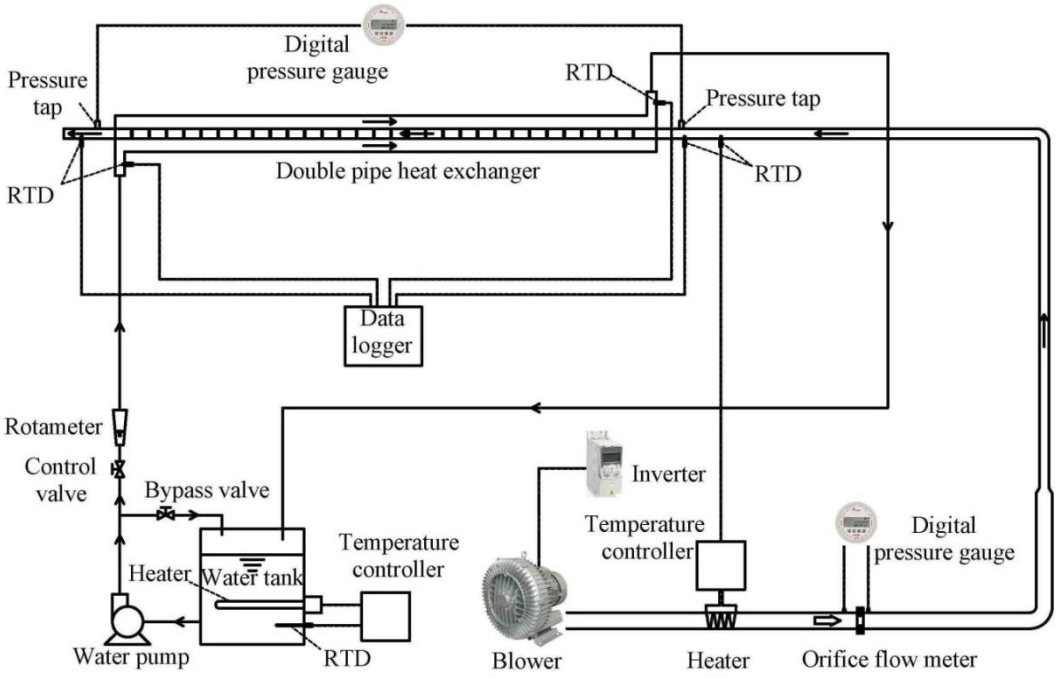
3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ชุดอุปกรณ์การทดลอง

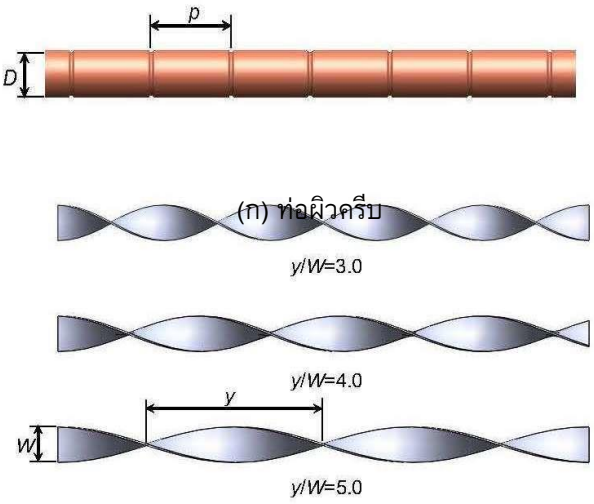
ชุดอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วย 1) เครื่องอัดอากาศ 2) อินเวอร์เตอร์ 3) ชุดอุปกรณ์วัดอัตราการไหลอากาศแบบออริฟิสร่วมกับเครื่องวัดความดันต่าง 4) ชุดควบคุมอุณหภูมิอากาศทางเข้าชุดทดลองประกอบด้วย เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ฮีตเตอร์ลมร้อน และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ RTD 5) ชุดทดลองเครื่อง

แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น 6) ชุดเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ RTD ใช้วัดอุณหภูมิของไหลที่ทางเข้าและทางออกร่วมกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ 7) ถังน้ำร้อนที่ติดตั้งเครื่องควบคุมอุณหภูมิ 8) ปั๊มน้ำร้อน 9) ชุดอุปกรณ์วัดอัตราการไหลน้ำแบบโรตามิเตอร์

ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นมีความยาวช่วงทดสอบ 1,200 มม. ท่อด้านนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 41 มม. ท่อด้านในหรือท่อผิวเรียบที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 18 มม. ท่อผิวครีบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันกับท่อผิวเรียบ มีระยะห่างครีบ (p) 36 มม. และความสูงครีบ 1.0 มม. แผ่นบิดที่ติดตั้งในท่อผิวครีบมีความกว้าง (W) 16 มม. และอัตราส่วนการบิดต่างกัน 3 ค่า y/W=3.0, 4.0 และ 5.0 ดังแสดงในรูปที่ 2 นำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ



รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์การทดลอง



(ก) ท่อผิวครีบ

(ข) แผ่นบิด

รูปที่ 2 ท่อผิวครีบและแผ่นบิด

3.2 วิธีการทดลอง

ดำเนินการทดลองการถ่ายเทความในเครื่องแลกแบบท่อสองชั้น ท่อด้านนอกใช้น้ำเป็นของไหลร้อน และท่อด้านในใช้อากาศเป็นของไหลเย็น มีวิธีการทดลองดังนี้ เปิดชุดควบคุมอุณหภูมิน้ำร้อนและตั้งค่าคงที่ 50 ºC ตลอดการทดลอง และเปิดปั๊มน้ำร้อนทำหน้าที่ส่งน้ำร้อนไปยังท่อด้านนอกของชุดทดลอง ปรับอัตราการไหลคงที่ 5 ลิตรต่อนาที ซึ่งวัดอัตราการไหลน้ำด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบโรตามิเตอร์ เปิดอินเวอร์เตอร์ซึ่งทำหน้าที่ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องอัดอากาศหรือควบคุมอัตราการไหลอากาศที่ส่งไปยังท่อด้านในของชุดทดลอง ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิซึ่งตั้งค่า 27 ºC วัดอัตราการไหลด้วยชุดอุปกรณ์วัดอัตราการไหลอากาศแบบออริฟิสร่วมกับเครื่องวัดความดันต่าง ซึ่งปรับอัตราการไหลอากาศในรูปของเลขเรย์โนลดส์ (Re) ตามที่กำหนด รอจนกว่าอุณหภูมิทั้ง 4 จุด (1. อุณหภูมิทางเข้าของท่อด้านใน 2. อุณหภูมิทางออกของท่อด้านใน 3. อุณหภูมิทางเข้าของท่อด้านนอก 4. อุณหภูมิทางออกของท่อด้านนอก) ของเครื่องแลกแลกเปลี่ยนความร้อนอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน บันทึกผลการทดลองด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

3.3 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์

อัตราการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนใช้ค่าเฉลี่ยระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลร้อนและอัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลเย็น สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q_{ave} = \frac{(Q_h + Q_c)}{2} \tag{1}$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ท่อด้านนอกหรืออัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลร้อน

$$Q_h = \dot{m}_h c_{p,h}\left(T_{h,in} - T_{h,out}\right) \tag{2}$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ท่อด้านในหรืออัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลเย็น

$$Q_c = \dot{m}_c c_{p,c}\left(T_{c,out} - T_{c,in}\right) \tag{3}$$

ชุดทดลองเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนบนพื้นผิวของท่อตลอดความยาว สามารถพิจารณาด้วยวิธีความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก

$$Q_{ave} = UA\Delta T_{LMTD} \tag{4}$$

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนด้านนอกใช้สมการการถ่ายเทความร้อน

$$\frac{h_o D_{h,o}}{k} = 0.023\, Re_o^{4/5}\, Pr_o^{0.3} \tag{5}$$

พิจารณาจากสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะได้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนด้านใน

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \tag{6}$$

การถ่ายเทความร้อนในรูปของเลขนัสเซลต์ที่ท่อด้านใน

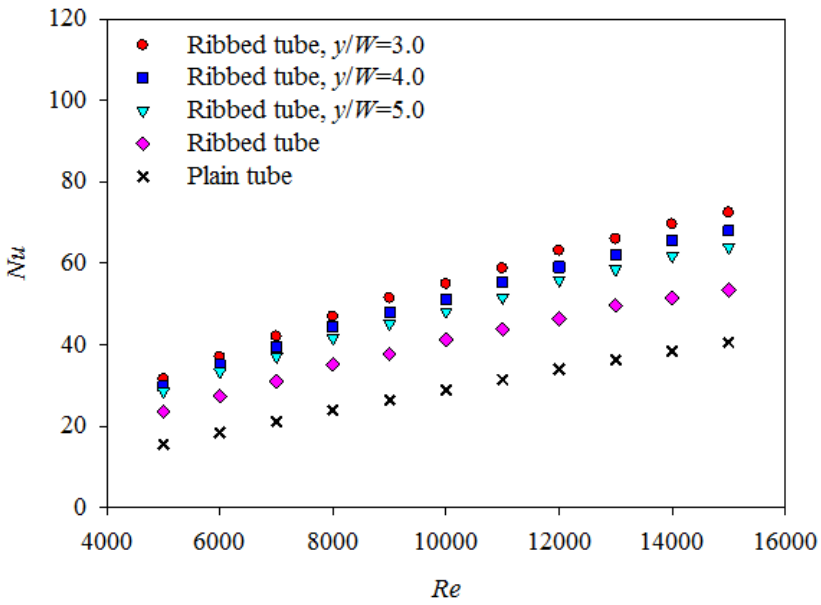
$$Nu = \frac{h_i D_i}{k} \tag{7}$$

อัตราการไหลของของไหลในรูปของเลขเรย์โนลดส์ที่ท่อด้านใน

$$Re = \frac{\rho V D_i}{\mu} \tag{8}$$

4. ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

การศึกษาอิทธิพลของท่อผิวครีบ และท่อผิวครีบที่มีแผ่นบิดส่งผลต่อการถ่ายเทความความร้อน ได้นำเสนอการถ่ายเทความร้อนในรูปของเลขนัสเซลต์ และอัตราการไหลของของไหลในรูปของเลขเรย์โนลดส์ Re=5000-15,000 ดังแสดงในรูปที่ 3 ผลการทดลองเผยให้เห็นว่าการติดตั้งท่อผิวครีบแทนที่ท่อผิวเรียบในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นช่วยให้เพิ่มการถ่ายเทความร้อน ทั้งนี้อาจเกิดจากของไหลบริเวณใกล้ผังหนังท่อปะทะผิวครีบของท่อที่ยื่นออกทำให้ของไหลเกิดการไหลแบบปั่นป่วนเกิดการผสมกันและแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลได้ดีขึ้น ในส่วนอิทธิพลของท่อผิวครีบที่มีแผ่นบิดอัตราส่วนการบิด (y/W=3.0, 4.0 และ 5.0) ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนพบว่าให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อผิวครีบเปล่า และท่อผิวเรียบเปล่า ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเกิดจากการติดแผ่นบิดในท่อผิวครีบทำให้ของไหลเกิดการไหลแบบหมุนควงและเกิดการไหลแบบปั่นป่วนที่รุนแรงยิ่งขึ้น และยังเพิ่มระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอัตราส่วนการบิด ท่อผิวครีบที่มีแผ่นบิดอัตราส่วนการบิด (y/W=3.0) ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด และสูงกว่าท่อผิวครีบที่มีแผ่นบิดอัตราส่วนการบิด (y/W=4.0 และ 5.0) ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเกิดจากการลดลงของอัตราส่วนการบิดทำให้ของไหลเปลี่ยนทิศทางการไหลตามแนวแกนของท่อเป็นการไหลหมุนควงตามแนวรัศมีทำให้เพิ่มความปั่นป่วนและเพิ่มระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นอีกส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงยิ่งขึ้น และยังพบว่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราการไหลในรูปของเลขเรย์โนลดส์สำหรับการทดลองทุกกรณี



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลดส์

5. สรุปผลงานวิจัย

การศึกษาอิทธิพลของท่อผิวครีบ ท่อผิวครีบที่มีแผ่นบิด และเลขเรย์โนลดส์ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต ท่อผิวครีบช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่าท่อผิวเรียบ การติดตั้งแผ่นบิดช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการลดอัตราส่วนการบิดของแผ่นบิดซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bas และ Ozceyhan [6] จากผลการทดลองครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่า

1. ท่อผิวครีบที่ติดตั้งในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนช่วยเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าท่อผิวเรียบ อาจเกิดจากผิวครีบทำลายชั้นขอบเขตบริเวณใกล้ผนังท่อทำให้เกิดการไหลปั่นป่วนส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น

2. ท่อผิวครีบที่มีแผ่นบิดให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อผิวครีบอย่างเดียว และท่อผิวเรียบตามลำดับ และพบว่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการลดอัตราส่วนการบิดของแผ่นบิด ท่อผิวครีบที่มีแผ่นบิดอัตราส่วนการบิด (y/W=3.0) ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด อาจเกิดจากการติดตั้งแผ่นบิดในท่อครีบทำให้เกิดการไหลหมุนควงและเกิดการไหลแบบปั่นป่วนอย่างรุนแรงส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น

3. ผลการทดลองพบว่าทั้งกรณีท่อเปล่า ท่อผิวครีบ และท่อผิวครีบที่มีแผ่นบิดให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเลขเรย์โนลดส์ อาจเกิดจากการเพิ่มอัตราการไหลของของไหลในท่อด้านในของชุดทดลองทำให้เพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อนด้านในหรือเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน

6. รายการสัญลักษณ์

A พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)

c_p ความจุความร้อนจำเพาะ (J/kg ^oC)

D ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)

h สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m^2 ^oC)

k ค่าการนำความร้อน (W/m ^oC)

L ความยาวชุดทดลอง (m)

$\dot{m}$ อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)

Nu เลขนัสเซลต์ (-)

Pr เลขแพรนด์เทิล (-)

Q อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

Re เลขเรย์โนลดส์ (-)

T อุณหภูมิของของไหล (^oC)

U สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (W/m^2 ^oC)

V ความเร็วเฉลี่ยของการไหล (m/s)

สัญลักษณ์กรีก

ρ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

μ ความหนืดพลวัตของของไหล (N s/m^2)

สัญลักษณ์ตัวห้อย

c ของไหลเย็น

h ของไหลร้อน

i ด้านใน

in ด้านทางเข้า

o ด้านนอก

out ด้านทางออก

7. เอกสารอ้างอิง

[1] V. Zimparov, “Prediction of friction factors and heat transfer coefficients for turbulent flow in corrugated tubes combined with twisted tape inserts. Part 2: heat transfer coefficients”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 47, 385-393., 2004.

[2] C. Chen, Y.T. Wu, S.T. Wang and C.F. Ma, “Experimental investigation on enhanced heat transfer in transversally corrugated tube with molten salt”, Experimental Thermal and Fluid Science, 47, 108-116., 2013.

[3] L. Jianfeng, S. Xiangyang, D. Jing, P. Qiang and W. Yuliang, “Convective heat transfer of high temperature molten salt in transversely grooved tube”, Applied Thermal Engineering, 61, 157-162., 2013.

[4] W.C. Huang, C.A. Chen, C. Chen and Y.J. San, “Effects of characteristic parameters on heat transfer enhancement of repeated ring-type ribs in circular tubes”, Experimental Thermal and Fluid Science, 68, 371-380., 2015.

[5] 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, 1038-1042., 2010.

[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, 51-58., 2012.