

การเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยเทคนิคหมุนวน

Performance Enhancement of a Heat Exchanger with Swirl Technique

ณรงค์ ทรัพย์พุทธิวิงษ์ พงษ์เจต พรหมวงค์* ชินรัชช์ เรียงพงษ์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
โทรศัพท์ 0-2326-4197 โทรสาร 0-2326-4198 *E-mail: kppongje@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ทำการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยเทคนิคหมุนวน โดยทำการทดลองที่สภาวะผิวของท่อเป็นฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ ในการทดลองใช้ความเร็วลม 12.0, 15.5, 19.5, 22.7 และ 27.5 เมตรต่อวินาที ทำการเปรียบเทียบผลของลมไหลแบบตรงโดยไม่ใช้แผ่นบิดและลมไหลแบบหมุนวนภายในท่อโดยใช้แผ่นบางที่ถูกบิดเป็นคาบของมุม 180° และ 360° รวมทั้งทำการเปรียบเทียบผลของท่อที่ไม่มีครีบบนผิวโดยให้ลมไหลแบบตรง, ท่อที่มีครีบบนผิวที่เคลือบผิวด้วยฟลักซ์ความร้อนและผิวล่างท่อ แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเฉียง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน เพื่อพิจารณาค่าความดันลด และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

จากการทดลองพบว่าเทคนิคหมุนวน เป็นผลให้ค่าความดันลดและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างท่อที่มีแผ่นบิดมุม 180° และ 360° จะได้ว่าท่อที่มีแผ่นบิดมุม 360° ให้ผลการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด

Abstract

This paper presents the study of performance enhancement in a rectangular duct using swirl technique. The experiments are made by varying air velocity in the test section to be 12.0, 15.5, 19.5, 22.7 and 27.5 m/s at constant surface heat flux. At the inlet, air is induced to be swirling flow using 180° or 360° twisted-tape inserts in a number of tubes placing at the entrance of the test section. Experimental results are compared with the results without swirl from the tape. In addition, ribs mounted on the bottom and the top of the duct were placed in stagger or in-line arrangements.

The experimental result shows that the use of swirl flow generated by twisted tapes leads to higher pressure drop and heat transfer rate. The tape twisted with 360° yields better heat transfer rate than that with 180° .

1. บทนำ

การใช้ครีบบนผิวท่อจะส่งผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน แบบการพาความร้อนแบบบังคับระหว่างผิวและของไหล Hanet al. [1] ทำการ

ศึกษาผลของรูปร่างครีบบ, มุม และอัตราส่วนระยะพิชิตต่อความสูง มีผลต่อตัวประกอบเสียดทานและการถ่ายเทความร้อนในท่อ ที่ค่าเรโนลด์ส์ นัมเบอร์ $Re = 3000 - 30000$ พบว่าการจัดครีบบแบบสมมาตรบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้ามมีผลเหมือนกับการจัดครีบบแนวเฉียง, และรูปร่างของครีบบมีผลอย่างมากต่อตัวประกอบเสียดทาน และมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนไม่มากนัก จากการทดลองพบว่าผลการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดเมื่อครีบบมีมุม 45° Metzger et al. [2] ทำการศึกษาผลของมุมครีบบและตำแหน่ง มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่จุดใดๆ ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส รูปแบบการไหลขึ้นอยู่กับตำแหน่งของครีบบ แบบแรกครีบบถูกติดตั้งในแนวขนานบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม และอีกแบบครีบบถูกติดตั้งในแนวตัดกันบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม พบว่าครีบบมุม 60° ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด Han et al. [3] ทำการศึกษาผลของรูปร่างครีบบตัววีมุม 45° และครีบบตัววีมุม 60° แบบแรกแนวครีบบตัววีมุม 45° และแนวครีบบตัววีมุม 60° มีทิศทางเดียวกับการไหล และอีกแบบแนวครีบบตัววีมุม 45° มีทิศทางเดียวกับการไหลและแนวครีบบตัววีมุม 60° มีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหล ที่ค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ $Re = 15000 - 90000$ พบว่าแนวครีบบตัววีมีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลให้ผลการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด ในขณะที่แนวครีบบตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหลให้ค่าความดันลดมากที่สุด Taslim et al. [4] รายงานค่านัสเซลส์นัมเบอร์ที่จุดใดๆ ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความหยาบเนื่องจากมุมครีบบ, รูปร่างครีบบตัววี และความไม่ต่อเนื่องครีบบ (แนวครีบบตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหลและมีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลสลับกันตลอดหน้าตัด) บนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม โดยให้ผิวท่อด้านหนึ่งถูกให้ความร้อนด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่ ในขณะที่ผิวท่อด้านอื่นๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความร้อน พบว่าค่านัสเซลส์นัมเบอร์มากที่สุดเมื่อแนวครีบบตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหล

ขบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสของไหลแตกต่างกัน 2 ชนิด เป็นสิ่งที่สำคัญมากและขบวนการดังกล่าวพบได้บ่อยๆ ในทางวิศวกรรม หม้อน้ำ คอนเดนเซอร์ อุปกรณ์ให้ความร้อนแก่น้ำ หม้อน้ำรถยนต์ คอยล์ร้อน หรือคอยล์เย็น ฯลฯ ต่างเป็นตัวอย่างของขบวนการที่ซึ่งความร้อนเกิดการแลกเปลี่ยนกันระหว่างของไหลร้อนและของไหลเย็น อุตสาหกรรมปิโตรเคมีสมัยใหม่ โรงงานผลิตพลังงาน ฯลฯ ต่างมีขบวนการมากมายจนไม่สามารถนับได้ที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสของไหล 2 ชนิดโดยไม่มี

การผสมกันทางกายภาพเลย โดยทั่วไปอุปกรณ์นั้นเรียกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ดังนั้นการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยเทคนิคหมุนวนจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจต่อการค้นคว้าวิจัย เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

2. ทฤษฎี

ตัวพารามิเตอร์ความดันลดเกี่ยวข้องกับกำลังงานของพัดลมโดยตรง ยิ่งความดันลดมากจำเป็นต้องใช้กำลังขับเคลื่อนของไหลมาก

การจ่ายกำลังให้พัดลม, $\dot{W}_{in}$ J/s

$$\dot{W}_{in} = Q\Delta p \quad (1)$$

$$\Delta p = f \frac{\rho L \bar{V}^2}{2D_h} \quad (2)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหลของของไหล, m^3/s

Δp คือ ความดันลดของของไหล, N/m^2

f คือ ตัวประกอบเสียดทาน

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3

L คือ ความยาวท่อ, m

$\bar{V}$ คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s

D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter), m

เงื่อนไขความร้อนที่ผิวคือฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ (Constant Surface Heat Flux)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, h $W/m^2 \cdot K$

$$h = \frac{\dot{m} C_p (T_{m,o} - T_{m,i})}{A_s (T_s - T_b)} \quad (3)$$

$$T_b = \frac{T_{m,i} + T_{m,o}}{2} \quad (4)$$

เมื่อ $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลของของไหล, kg/s

C_p คือ ความร้อนจำเพาะของของไหล, $J/kg \cdot K$

A_s คือ พื้นที่ผิว, m^2

T_s คือ อุณหภูมิเฉลี่ยผิวท่อ, $^{\circ}C$

$T_{m,i}$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อที่ทางเข้า, $^{\circ}C$

$T_{m,o}$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อที่ทางออก, $^{\circ}C$

T_b คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล, $^{\circ}C$

นัสเซิลส์นัมเบอร์, Nu_D

$$Nu_D = \frac{hD_h}{k} \quad (5)$$

เมื่อ k คือ ค่าการนำความร้อน, $W/m \cdot K$

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Enhancement)

การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการทำให้เกิดการหมุนวนด้วยการสอดใส่แผ่นเกลียวบิด การสอดแทรกนี้ประกอบด้วยแผ่นบางที่ถูกบิดเป็นคาบของมุม 360° เป็นผลให้ความเร็วของการไหลเพิ่ม เนื่องจากความเร็วสัมผัสเพิ่มใกล้เคียงท่อ การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นผลให้เกิดความดันลด (pressure drop) มากขึ้น

3. อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเทคนิคหมุนวน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเทคนิคหมุนวน และอุปกรณ์ต่างๆ ได้ถูกแสดงในรูปที่ 1, 2, และ 3 ซึ่งประกอบด้วยชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทำจากอะคริลิกใสขนาดหน้าตัดกว้าง 0.3 เมตร สูง 0.025 เมตร และมีความยาว 1.764 เมตร สอดใส่แผ่นบางที่ถูกบิดตามเข็มนาฬิกา เป็นคาบของมุม 180° และ 360° ในท่อกลมเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.021 เมตร มีความยาว 0.20 เมตร และมีจำนวน 11 ท่อ โดยวางในแนวทิศทางการไหลวนตลอดหน้าตัด ครีบริบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหนา 0.006 เมตร กว้าง 0.01 เมตร และยาว 0.3 เมตร

พัดลมขนาด 7.46 กิโลวัตต์ มีอินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบขับเคลื่อนท่อ มีอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ โดยที่ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าจะถูกวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วลม อากาศในชุดทดลองถูกทำให้ร้อนขึ้นด้วยฮีตเตอร์ขนาด 0.2 กิโลวัตต์ โดยติดแผ่นฮีตเตอร์ซึ่งมีพื้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 0.29 เมตร และยาว 0.38 เมตร ที่ผิวบนและผิวล่างท่อ ผิวภายนอกชุดทดลองถูกหุ้มด้วยฉนวนในช่วงระยะการทำความร้อนโดยแผ่นฮีตเตอร์ การวัดอุณหภูมิผิวท่อถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จำนวน 4 ตัว และอ่านค่าจาก Digital Thermometer ความดันลดระหว่างตำแหน่งทางเข้า 0.055 เมตร ข้างหน้าครีบริบและตำแหน่งทางออก 0.055 เมตร ข้างหลังครีบริบ อ่านค่าจาก Digital Differential Pressure

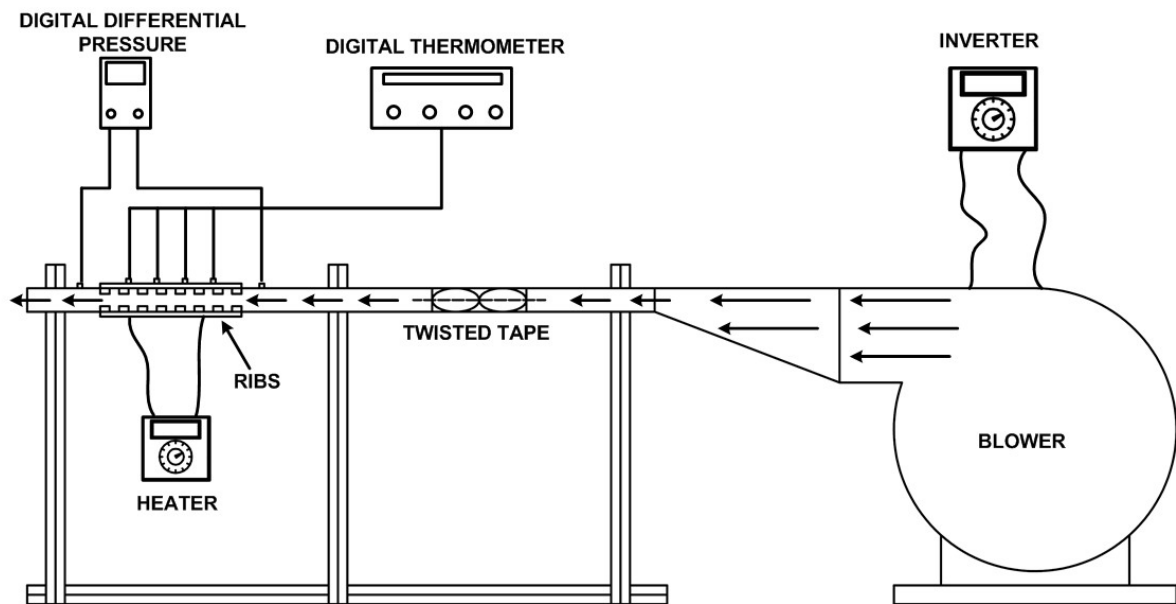
4. วิธีการทดลอง

พิจารณาผลของลมไหลแบบหมุนวนภายในท่อ โดยใช้แผ่นบางที่ถูกบิดเป็นคาบของมุม 180° และ 360°

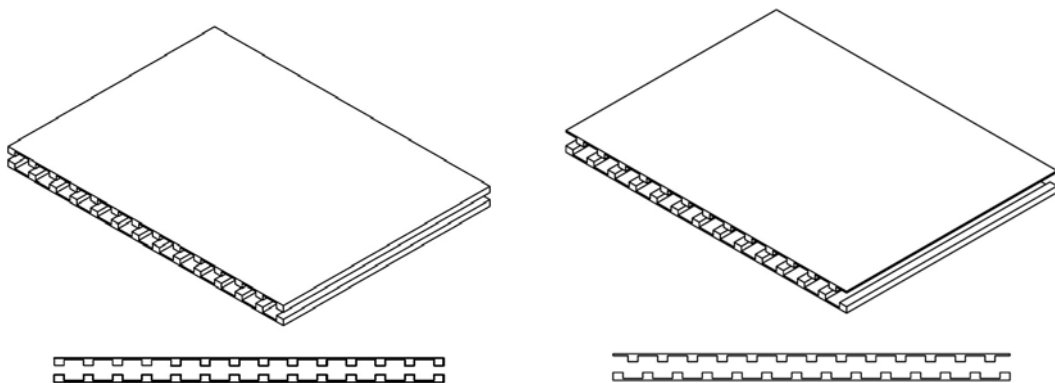
เปิดสวิทช์เดินเครื่องพัดลม ให้อากาศไหลผ่านชุดทดลอง และเปิดเครื่องให้ความร้อน โดยให้ผิวท่อได้รับความร้อนด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่ ปรับความเร็วลมในชุดทดลองให้ได้เท่ากับ 12.0, 15.5, 19.5, 22.7, และ 27.5 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ สอดใส่แผ่นบางที่ถูกบิดเป็นคาบของมุม 180° และ 360° ในท่อกลมจำนวน 11 ท่อ ตามลำดับ และใส่ลงในชุดทดลอง เพื่อให้ลมเกิดการหมุนวน บันทึกผลของความดันลดอุณหภูมิผิวท่อ อุณหภูมิที่ทางเข้า และอุณหภูมิที่ทางออก



รูปที่ 1. แสดงรูปอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 2. แสดงอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 3. แสดงกริบบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง

พิจารณาผลของท่อที่มีครีบริบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ผิวบนและผิวล่าง ท่อ แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน

เปิดสวิทช์เดินเครื่องพัดลม ให้อากาศไหลผ่านชุดทดลอง และ เปิดเครื่องให้ความร้อน โดยให้ผิวท่อได้รับความร้อนด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่ ปรับความเร็วลมในชุดทดลองให้ได้เท่ากับ 12.0, 15.5, 19.5, 22.7, และ 27.5 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ สอดใส่แผ่นบางที่ถูกบิดเป็น คาบของมุม 360° ในท่อกลมจำนวน 11 ท่อ และใส่ลงในชุดทดลอง เพื่อให้เกิดการหมุนวน ทำการติดครีบริบที่ผิวบนและผิวล่าง แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง ตามลำดับ บันทึกผลของความดันลด อุณหภูมิ ผิวท่อ อุณหภูมิที่ทางเข้า และอุณหภูมิที่ทางออก

5. ผลการทดลอง

ในรูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์ส์นัมเบอร์กับความดันลด ที่ความเร็วลม 12.0, 15.5, 19.5, 22.7 และ 27.5 เมตรต่อวินาที ของท่อที่ไม่มีแผ่นบิด, ท่อที่มีแผ่นบางที่ถูกบิดเป็นคาบของมุม 180° และ 360° ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นว่าเรโนลด์ส์ นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันลดเพิ่มขึ้น ความดันลดจะมีค่าขึ้นอยู่กับเรโนลด์ส์นัมเบอร์และสภาวะการหมุนวนของลม ซึ่งจะมีค่าน้อย สำหรับท่อที่ไม่มีแผ่นบิด และเพิ่มมากขึ้นเมื่อท่อมีมุมของแผ่นบิดเพิ่มขึ้น

ในรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์ส์นัมเบอร์ กับนัสเซลล์นัมเบอร์ ที่ความเร็วลม 12.0, 15.5, 19.5, 22.7 และ 27.5 เมตรต่อวินาที ของท่อที่ไม่มีแผ่นบิด, ท่อที่มีแผ่นบางที่ถูกบิดเป็นคาบของมุม 180° และ 360° ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นได้ว่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ นัสเซลล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น นัสเซลล์ นัมเบอร์จะมีค่าขึ้นอยู่กับเรโนลด์ส์นัมเบอร์และสภาวะการหมุนวนของลม ซึ่งจะมีค่าน้อยสำหรับท่อที่ไม่มีแผ่นบิด, เพิ่มขึ้นเมื่อท่อมีแผ่นบิดมุม 180° โดยท่อที่ไม่มีแผ่นบิดและมีแผ่นบิดมุม 180° ให้ค่านัสเซลล์นัมเบอร์ใกล้เคียงกัน และเพิ่มมากขึ้นเมื่อท่อมีแผ่นบิดมุม 360°

ในรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์ส์นัมเบอร์กับความดันลด ที่ความเร็วลม 12.0, 15.5, 19.5, 22.7 และ 27.5 เมตรต่อวินาที ของท่อที่ไม่มีครีบริบโดยให้ลมไหลแบบตรง, ท่อที่มีครีบริบที่ผิวบนและผิวล่าง แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวนโดยใช้แผ่นบิดมุม 360° ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นได้ว่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ นัสเซลล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น นัสเซลล์นัมเบอร์จะมีค่าขึ้นอยู่กับเรโนลด์ส์นัมเบอร์, สภาวะการหมุนวนของลม และการติดตั้งครีบริบ ซึ่งจะมีค่าน้อยสำหรับท่อที่ไม่มีครีบริบ และเพิ่มขึ้นเมื่อท่อมีครีบริบบนมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง โดยท่อที่มี ครีบริบบนมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงให้ค่านัสเซลล์นัมเบอร์ใกล้เคียง กัน

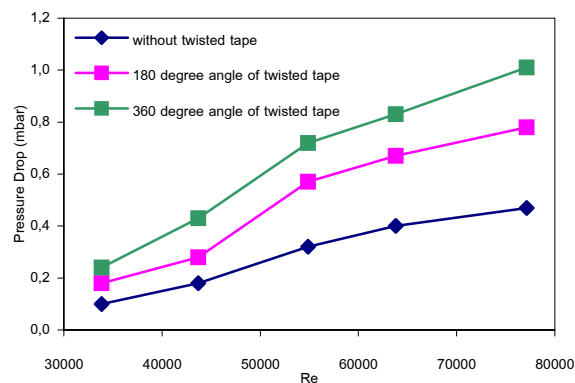
ในรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์ส์นัมเบอร์ กับนัสเซลล์นัมเบอร์ ที่ความเร็วลม 12.0, 15.5, 19.5, 22.7 และ 27.5 เมตรต่อวินาที ของท่อที่ไม่มีครีบริบโดยให้ลมไหลแบบตรง, ท่อที่มีครีบริบที่ ผิวบนและผิวล่าง แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวนโดยใช้แผ่นบิดมุม 360° ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นได้ว่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ นัสเซลล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น นัสเซลล์นัมเบอร์จะมีค่าขึ้นอยู่กับเรโนลด์ส์นัมเบอร์, สภาวะการ หมุนวนของลม และการติดตั้งครีบริบ ซึ่งจะมีค่าน้อยสำหรับท่อที่ไม่มีครีบริบ และเพิ่มขึ้นเมื่อท่อมีครีบริบบนมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง โดยท่อที่มี ครีบริบบนมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงให้ค่านัสเซลล์นัมเบอร์ใกล้เคียง กัน

ค่าพลังงานไฟฟ้าขับพัดลม

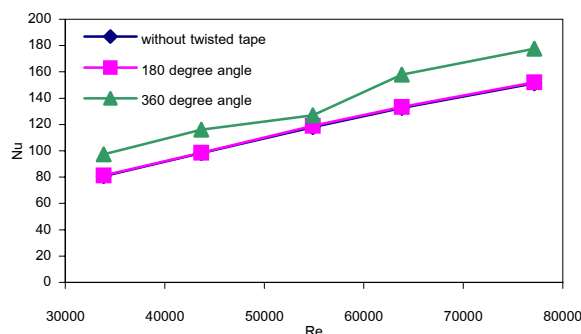
ท่อที่มีแผ่นบิดมุม 360° ใช้พลังงานไฟฟ้าขับพัดลมมากขึ้น 2.47 J/s โดยเปรียบเทียบกับท่อที่ไม่มีแผ่นบิด ที่ความเร็วลม 27.5 เมตร ต่อวินาที

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

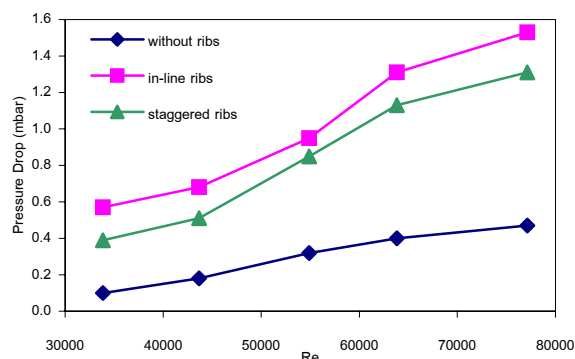
ท่อที่มีแผ่นบิดมุม 360° สามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท ความร้อนได้ 17.48 % โดยเปรียบเทียบกับท่อที่ไม่มีแผ่นบิด ที่ ความเร็วลม 27.5 เมตรต่อวินาที



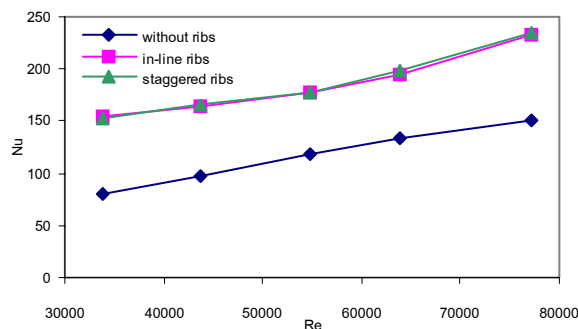
รูปที่ 4. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับเรโนลด์ส์นัมเบอร์ กรณีแผ่นเรียบ



รูปที่ 5. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์ส์ นัมเบอร์ กรณีแผ่นเรียบ



รูปที่ 6. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับเรโนลด์ส์นัมเบอร์ กรณีแผ่นบิดมุม 360°



รูปที่ 7. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์
นัมเบอร์ กรณีแผ่นบิดมุม 360°

6. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าการใส่แผ่นบิดช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ท่อที่มีแผ่นบิดมุม 360° ให้ค่าความดันลดและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากที่สุด ท่อที่มีครีบบนมีแนวเดียวกัน และมีแนวเอียงให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.C. Han, L.R. Glicksman, W.M. Rohsenow, An investigation of heat transfer and friction for rib-roughened surfaces, Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 21, 1978, pp. 1143-1156.
- [2] D.E. Metzger, C.S. Fan, Y. Yu, Effects of Rib Angle and Orientation on Local Heat Transfer in Square Channels With Angled Roughness Ribs, in: R.K. Shah, A.D. Kraus, D.E. Metzger, Compact Heat Exchangers, Hemisphere, Washington, 1990.
- [3] J.C. Han, Y.M. Zhang, C.P. Lee, Augmented heat transfer in square channels with parallel, crossed, and V-shaped angled ribs, ASME J. Heat Transfer Vol. 113, 1991, pp. 590-596.
- [4] M.E. Taslim, T. Li, D.M. Kercher, Experimental heat transfer and friction in channels roughened with angled, V-shaped, and discrete ribs on two opposite walls, ASME J. Turbomachinery Vol. 118, 1996, pp. 20-28.
- [5] Carl-Olof Olsson and Bengt Sundén, Experimental study of flow and heat transfer in rib-roughened rectangular channels, Experimental Thermal and Fluid Science 16 1998, pp. 349-365.
- [6] พงษ์เจต พรหมวงศ์ “การถ่ายเทความร้อน” ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2542 หน้า 225-252.
- [7] Fox, Robert W., and Alan T. McDonald: Introduction to Fluid Mechanics, Wiley, New York, 1998, pp. 332-395.

- [8] Incropera, Frank P., and David P. Dewitt: Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Wiley, New York, 1996, pp. 419-461.
- [9] Holman, J.P. : Heat Transfer, McGraw-Hill, New York, 1990, pp. 217-321.