

## การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมด้วยครีบริบและตัวสร้างกระแสวน Heat Transfer Enhancement in a Rectangular Duct with Ribs and Swirl Turbulators

ณรงค์ ทรัพย์พุทธิวิงษ์ ชนาธิป ชัยดิolkพัฒนกุล พงษ์เจต พรหมวงศ์ และ ชินารักษ์ เขียวพงษ์  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520  
โทรศัพท์ 0-2326-4197 โทรสาร 0-2326-4198 อีเมล: narong\_suppoo@yahoo.com และ kpongje@kmitl.ac.th

Narong Suppoosirivong, Chanatip Chaidilokpattanakul, Pongjet Promvong and Chinaruk Thianpong  
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,  
Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520  
Tel: 0-2326-4197 Fax: 0-2326-4198 E-mail: narong\_suppoo@yahoo.com and kpongje@kmitl.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ทำการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมด้วยครีบริบและตัวสร้างกระแสวน โดยทำการทดลองที่สภาวะผิวของท่อเป็นฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ ในการทดลองโดยปรับใช้ความเร็วลมหลายๆ ค่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ทำการเปรียบเทียบผลของท่อที่ไม่มีครีบริบโดยให้ลมไหลแบบตรง ท่อที่มีครีบริบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ท่อที่มีครีบริบรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก และท่อที่มีครีบริบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว ที่ผิวบนและผิวล่างท่อ แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน เพื่อพิจารณาค่าความดันลด และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน จากการทดลองพบว่า การไหลหมุนวน เป็นผลให้ค่าความดันลดและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างท่อที่มีครีบริบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ท่อที่มีครีบริบรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก และท่อที่มีครีบริบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน จะได้ว่าท่อที่มีครีบริบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน ให้ผลการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด

**คำสำคัญ** ครีบริบ ตัวสร้างกระแสวน ความดันลด สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

### Abstract

This paper presents the study of heat transfer enhancement in a rectangular duct with ribs and swirl turbulators. The experiments are made by varying air velocity for turbulent flow in the test section with a constant surface heat flux. Ribs mounted on the bottom and the top surfaces of the tested duct were placed in staggered or in-line arrangements. Swirl flow in the tested duct was produced by using twisted tape inserts in circular tubes placing across the duct upstream of the test section. The experimental result shows that the use of swirl flow generated by

twisted tapes and the triangular ribs mounted on the bottom and the top of the duct leads to the highest pressure drop and heat transfer rate in comparison with the duct without ribs and swirl flow.

**Key words:** Ribs, Swirl Turbulators, Pressure Drop, Heat Transfer Coefficient

### 1. บทนำ

การใช้ครีบริบจะมีผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน แบบการพาความร้อนแบบบังคับระหว่างผิวและของไหล Han, J.C., L.R. Glicksman, and W.M. Rohsenow, 1978 ทำการศึกษาผลของรูปร่างครีบริบ, มุม และอัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูง มีผลต่อตัวประกอบเสียดทาน และการถ่ายเทความร้อนในท่อที่มีครีบริบถูกติดบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม ที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์  $Re = 3000 - 30000$  พบว่าการจัดครีบริบแบบสมมาตรมีผลเหมือนกับการจัดครีบริบแนวเอียง, และรูปร่างของครีบริบมีผลอย่างมากต่อตัวประกอบเสียดทาน และมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนไม่มากนัก จากการทดลองพบว่า การถ่ายเทความร้อนมากที่สุดเมื่อครีบริบมีมุม  $45^\circ$  Metzger, D.E., C.S. Fan, and Y. Yu, 1990 ทำการศึกษาผลของมุมครีบริบและตำแหน่ง มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่จุดใดๆ ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส รูปแบบการไหลขึ้นอยู่กับการตำแหน่งของครีบริบ แบบแรกครีบริบถูกติดในแนวขนานบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม และอีกแบบครีบริบถูกติดในแนวตัดกันบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม พบว่าครีบริบมุม  $60^\circ$  ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด Han, J.C., Y.M. Zhang, and C.P. Lee, 1991 ทำการศึกษาผลของรูปร่างครีบริบตัววีมุม  $45^\circ$  และครีบริบตัววีมุม  $60^\circ$  แบบแรกแนวครีบริบตัววีมุม  $45^\circ$  และแนวครีบริบตัววีมุม  $60^\circ$  มีทิศทางเดียวกับการไหล และอีกแบบแนวครีบริบตัววีมุม  $45^\circ$  มีทิศทางเดียวกับการไหล และแนวครีบริบตัววีมุม  $60^\circ$  มีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหล ที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์  $Re = 15000 - 90000$  พบว่าแนวครีบริบตัว

วิธีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด ในขณะที่แนวครีบทวนมีทิศทางเดียวกับการไหลให้ค่าความดันลดมากที่สุด Taslim, M.E., T. Li, and D.M. Kercher, 1996 รายงานคานัสเซลล์ นัมเบอร์ที่จุดใดๆ ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความหยาบเนื่องจากมุมครีบทวน, รูปร่างครีบทวน และความไม่ต่อเนื่องครีบทวน (แนวครีบทวนมีทิศทางเดียวกับการไหลและมีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลสลับกันตลอดหน้าตัด) บนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม โดยให้ผิวท่อด้านหนึ่งถูกให้ความร้อนด้วย ฟลักซ์ความร้อนคงที่ ในขณะที่ผิวท่อด้านอื่นๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความร้อน พบว่าคานัสเซลล์นัมเบอร์มากที่สุดเมื่อแนวครีบทวนมีทิศทางเดียวกับการไหล Carl-Olof Olsson and Bengt Sundén, 1998 ทำการศึกษาแบบการไหล, ความดันลด และการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบทวน ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์  $Re = 500 - 15000$  ค่า aspect ratio ของท่อสี่เหลี่ยมคือ 1-8, และครีบทวนติดกับผิวท่อด้านตรงกันข้าม ทำการทดสอบครีบทวนต่างๆ ดังนี้ ครีบทวนติดในแนวตัดกันบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม, ครีบทวนติดในแนวขนานบนผิวท่อด้านที่อยู่ตรงกันข้าม, ครีบทวนติดในแนวตัดกันบนผิวท่อด้านที่อยู่ตรงกันข้าม, ครีบทวนติดในแนวขนานบนผิวท่อด้านที่อยู่ตรงกันข้าม และครีบทวนติดแบบสลับทิศทางกัน (แนวครีบทวนมีทิศทางเดียวกับการไหลและมีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลสลับกันตลอดหน้าตัด) บนผิวท่อด้านที่อยู่ตรงกันข้าม การถ่ายเทความร้อนและความดันลดถูกแสดงโดยตัวประกอบ  $j$  (Colburn heat transfer factor) และตัวประกอบ  $f$  (Fanning friction factor) พบว่าครีบทวนติดแบบสลับทิศทางกันให้ค่าตัวประกอบ  $j$  และค่าตัวประกอบ  $f$  มากกว่าครีบทวนอื่นๆ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์  $Re = 1000 - 2000$

กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสของไหลแตกต่างกัน 2 ชนิด เป็นสิ่งที่สำคัญมากและกระบวนการดังกล่าวพบได้บ่อยๆ ในทางวิศวกรรม หม้อน้ำ คอนเดนเซอร์ อุปกรณ์ให้ความร้อนแก่น้ำ หม้อน้ำรถยนต์ คอยล์ร้อน หรือคอยล์เย็น ฯลฯ ต่างเป็นตัวอย่างของกระบวนการที่ซึ่งความร้อนเกิดการแลกเปลี่ยนกันระหว่างของไหลร้อนและของไหลเย็น อุตสาหกรรมปิโตรเคมีสมัยใหม่ โรงงานผลิตพลังงาน ฯลฯ ต่างมีกระบวนการมากมายจนไม่สามารถนับได้ที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสของไหล 2 ชนิดโดยไม่มีการผสมกันทางกายภาพเลย โดยทั่วไปอุปกรณ์นั้นเรียกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ดังนั้นการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมด้วยครีบทวนและตัวสร้างกระแสนวนจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจต่อการค้นคว้าวิจัย เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

## 2. ทฤษฎี

การไหลภายในท่อมืดมีขอบเขตจำกัด โดยที่ความหนาของบาวนด์รีเลเยอร์ไม่สามารถเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ได้ เพราะว่าเมื่อไหลไปได้ระยะหนึ่งบาวนด์รีเลเยอร์ก็นอกตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อจึงไม่สามารถขยายออกไปได้อีก รูปร่างของความเร็วจะมีลักษณะชัดเจนแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีก ซึ่งการไหลลักษณะเช่นนี้เรียกว่าการไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว (fully developed flow) ส่วนการไหลก่อนหน้านี้เรียกว่าการไหลที่

กำลังปรับตัว (developing flow) และเรียกช่วงระยะของการไหลแบบนี้ว่า Hydrodynamic entrance region

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Enhancement)

การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการทำให้เกิดการหมุนวนด้วยการสอดใส่แผ่นเกลียวบิด การสอดแทรกนี้ประกอบด้วยแผ่นบางที่ถูกบิดเป็นคาบของมุม  $360^\circ$  เป็นผลให้ความเร็วของการไหลเพิ่ม เนื่องจากความเร็วสัมผัสเพิ่มใกล้ผนังท่อ การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นผลให้เกิดความดันลด (pressure drop) มากขึ้น

ตัวพารามิเตอร์ความดันลดเกี่ยวข้องกับกำลังงานของพัดลมโดยตรง ยิ่งความดันลดมากจำเป็นต้องใช้กำลังขับเคลื่อนของไหลมาก

การจ่ายกำลังให้พัดลม,  $\dot{W}_{in}$  Watt

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

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

เมื่อ  $Q$  คือ อัตราการไหลของของไหล,  $m^3/s$

$\Delta p$  คือ ความดันลดของของไหล,  $N/m^2$

$f$  คือ ตัวประกอบเสียดทาน

$\rho$  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) โดยติดแผ่นฮีตเตอร์ที่ผิวครีบทวน

เรย์โนลด์นัมเบอร์,  $Re_D$

$$Re_D = \frac{\rho \bar{V} D_h}{\mu} \quad (3)$$

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

$$h = \frac{\dot{m} C_p (T_{m,o} - T_{m,i})}{A_s (T_s - T_b)} \quad (4)$$

$$T_b = \frac{T_{m,i} + T_{m,o}}{2} \quad (5)$$

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

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

$A_s$  คือ พื้นที่ผิว,  $m^2$

$T_s$  คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ย,  $^\circ C$

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

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

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

นัสเซลล์นัมเบอร์,  $Nu_D$

$$Nu_D = \frac{hD_h}{k} \quad (6)$$

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (7)$$

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

$A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ,  $m^2$

$P$  คือ เส้นรอบรูปของท่อ,  $m$

### 3. อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ต่างๆ ได้ถูกแสดงในรูปที่ 1, 2, 3, และ 4 ซึ่งประกอบด้วย ชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทำจากอะคริลิกใสขนาดหน้าตัดกว้าง 30 เซนติเมตร สูง 2.5 เซนติเมตร และมีความยาว 176 เซนติเมตร สอดใส่แผ่นบางที่ถูกปิดตามเข็มนาฬิกา เป็นคาบของมุม  $360^{\circ}$  ในท่อกลมเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.1 เซนติเมตร มีความยาว 20 เซนติเมตร และมีจำนวน 11 ท่อ โดยวางในแนวทิศทางของความเร็วลมตลอดหน้าตัด ตรีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ตรีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก และตรีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 มิลลิเมตร กว้าง 2 เซนติเมตร และยาว 30 เซนติเมตร

พัดลมขนาด 7.46 กิโลวัตต์ มีอินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบขับลมผ่านท่อ โดยที่ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าจะถูกวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วลม อากาศในชุดทดลองถูกทำให้ร้อนขึ้นด้วยแผ่นฮีตเตอร์ขนาด 500 วัตต์ จำนวน 2 แผ่น โดยติดแผ่นฮีตเตอร์ซึ่งมีพื้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร และยาว 38 เซนติเมตร ที่ผิวครีบทอง โดยติดครีบทองและผิวล่างท่อ ผิวภายนอกชุดทดลองถูกหุ้มด้วยฉนวนในช่วงระยะการทำความร้อนโดยแผ่นฮีตเตอร์ การวัดอุณหภูมิผิวครีบทองแต่ละแผ่นถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จำนวน 4 ตัว และอ่านค่าจาก Data Logger ความดันลดระหว่างตำแหน่งทางเข้า 3.5 เซนติเมตร ข้างหน้าครีบทองและตำแหน่งทางออก 3.5 เซนติเมตร ข้างหลังครีบทอง อ่านค่าจากเครื่องวัดความดันลด

### 4. วิธีการทดลอง

พิจารณาผลของท่อที่มีครีบทองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และตรีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วที่ผิวบนและผิวล่างท่อ แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเฉียง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน

เปิดสวิทช์เดินเครื่องพัดลม ให้อากาศไหลผ่านชุดทดลอง และเปิดเครื่องให้ความร้อน โดยให้ผิวท่อได้รับความร้อนด้วยฟลักซ์ความร้อน

คงที่ ปรับความเร็วลมในชุดทดลองให้ได้เท่ากับ 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, และ 12 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ สอดใส่แผ่นบางที่ถูกปิดเป็นคาบของมุม  $360^{\circ}$  ในท่อกลมจำนวน 11 ท่อ และใส่ลงในชุดทดลอง เพื่อให้ลมเกิดการหมุนวน ทำการติดครีบทองที่ผิวบนและผิวล่าง แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเฉียง ตามลำดับ บันทึกผลของความดันลด อุณหภูมิผิวครีบทอง อุณหภูมิที่ทางเข้าครีบทอง และอุณหภูมิที่ทางออกครีบทอง

พิจารณาผลของท่อที่มีครีบทองรูปสามเหลี่ยมมุมฉากที่ผิวบนและผิวล่างท่อ แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเฉียง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน

เปิดสวิทช์เดินเครื่องพัดลม ให้อากาศไหลผ่านชุดทดลอง และเปิดเครื่องให้ความร้อน โดยให้ผิวท่อได้รับความร้อนด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่ ปรับความเร็วลมในชุดทดลองให้ได้เท่ากับ 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, และ 12 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ สอดใส่แผ่นบางที่ถูกปิดเป็นคาบของมุม  $360^{\circ}$  ในท่อกลมจำนวน 11 ท่อ และใส่ลงในชุดทดลอง เพื่อให้ลมเกิดการหมุนวน ทำการติดครีบทองที่ผิวบนและผิวล่าง แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเฉียง ตามลำดับ โดยให้พื้นผิวครีบทองด้านตรงกันข้ามมุมฉากสัมผัสกับทิศทางการไหลของลม บันทึกผลของความดันลด อุณหภูมิผิวครีบทอง อุณหภูมิที่ทางเข้าครีบทอง และอุณหภูมิที่ทางออกครีบทอง

### 5. ผลการทดลอง

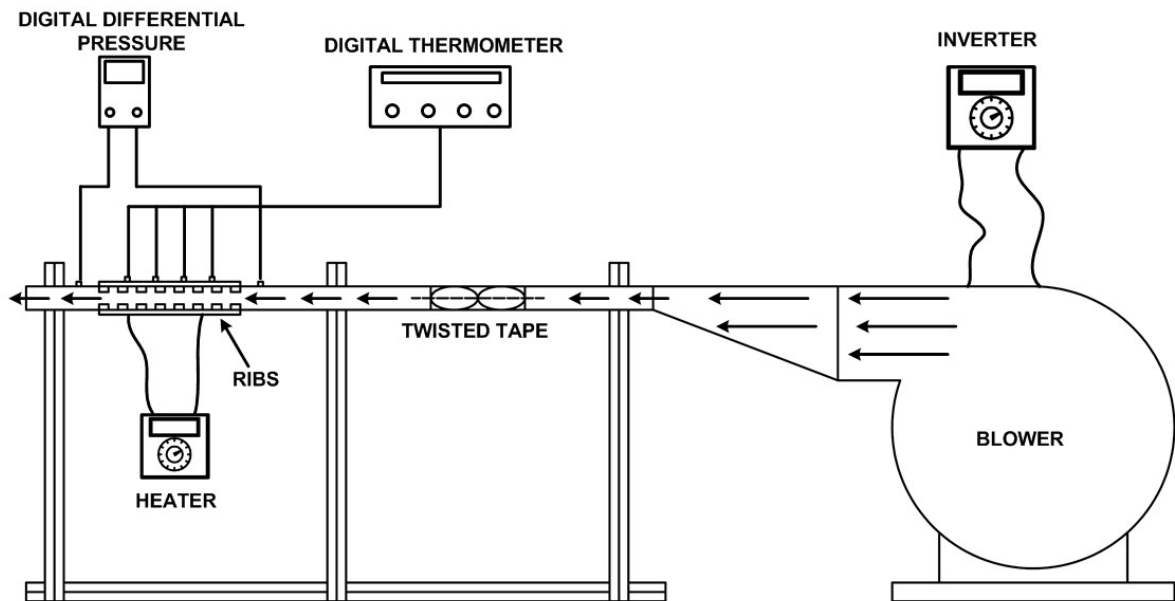
พิจารณาผลของท่อที่มีครีบทองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ผิวบนและผิวล่างท่อ แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเฉียง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน

ในรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์นัมเบอร์กับความดันลด ที่ความเร็วลม 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, และ 12 เมตรต่อวินาที ของท่อที่ไม่มีครีบทอง โดยให้ลมไหลแบบตรง, ท่อที่มีครีบทองที่ผิวบนและผิวล่าง แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเฉียง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวนโดยใช้แผ่นบิตมูม  $360^{\circ}$  ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นว่าเรโนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันลดเพิ่มขึ้น ความดันลดจะมีค่าขึ้นอยู่กับเรโนลด์นัมเบอร์, สภาวะการหมุนวนของลม และการติดตั้งครีบทอง ซึ่งจะมีค่าน้อยสำหรับท่อไม่มีครีบทอง, เพิ่มขึ้นเมื่อท่อมีครีบทองแนวเฉียง และเพิ่มมากขึ้นเมื่อท่อมีครีบทองแนวเดียวกัน

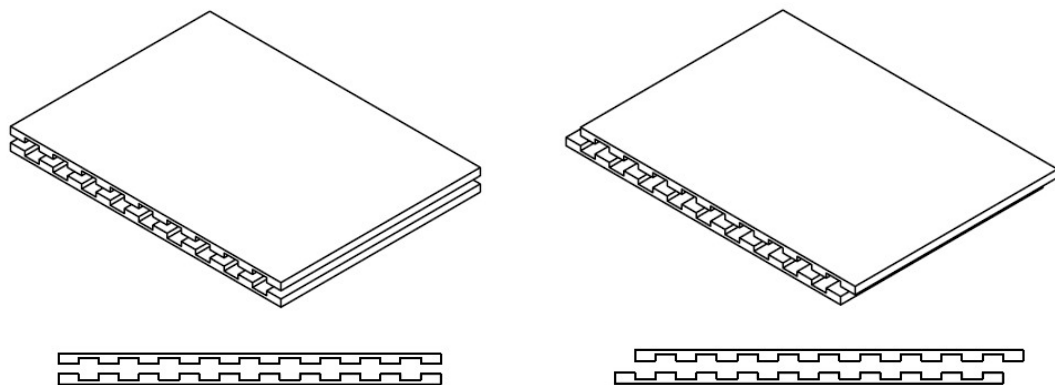
ในรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์นัมเบอร์กับนัสเซลล์นัมเบอร์ ที่ความเร็วลม 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, และ 12 เมตรต่อวินาที ของท่อที่ไม่มีครีบทอง โดยให้ลมไหลแบบตรง, ท่อที่มีครีบทองที่ผิวบนและผิวล่าง แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเฉียง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวนโดยใช้แผ่นบิตมูม  $360^{\circ}$  ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นว่าเรโนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะให้นัสเซลล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น นัสเซลล์นัมเบอร์จะมีค่าขึ้นอยู่กับเรโนลด์นัมเบอร์, สภาวะการหมุนวนของลม และการติดตั้งครีบทอง ซึ่งจะมีค่าน้อยสำหรับท่อไม่มีครีบทอง และเพิ่มขึ้นเมื่อท่อมีครีบทองแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเฉียง โดยท่อที่มีครีบทองแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเฉียงให้นัสเซลล์นัมเบอร์ใกล้เคียงกัน

พิจารณาผลของท่อที่มีครีบทองรูปสามเหลี่ยมมุมฉากที่ผิวบนและผิวล่างท่อ แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเฉียง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน

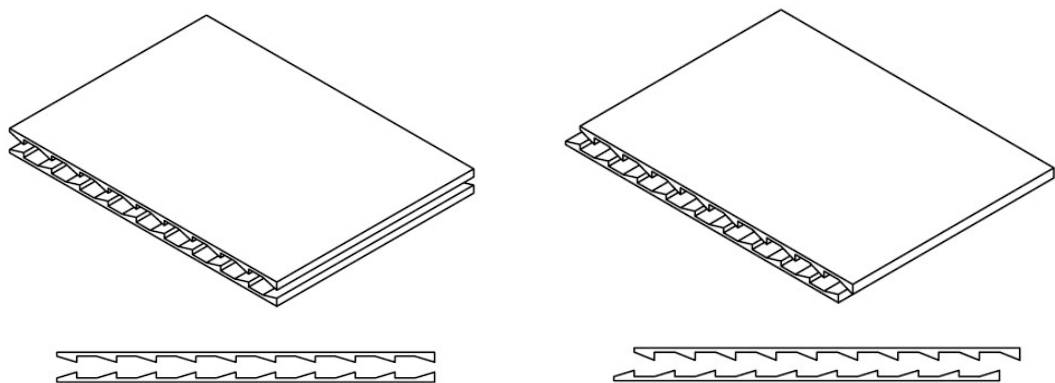
ในรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์นัมเบอร์กับความดันลด ที่ความเร็วลม 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, และ 12 เมตรต่อวินาที ของท่อที่ไม่มีครีบทอง โดยให้ลมไหลแบบตรง, ท่อที่มีครีบทองที่ผิวบนและผิวล่าง แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเฉียง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวนโดย



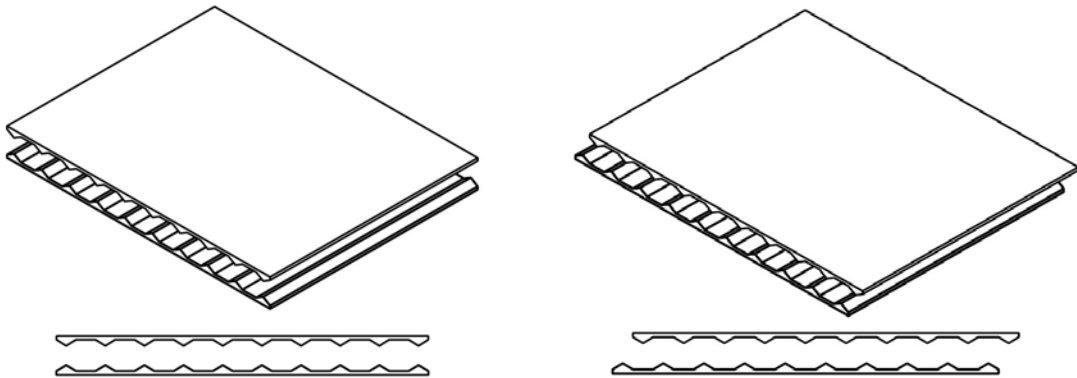
รูปที่ 1. แสดงอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 2. แสดงครีบริบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง



รูปที่ 3. แสดงครีบริบรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง



รูปที่ 4. แสดงครีบริบสามเหลี่ยมหน้าจั่ว แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง

ใช้แผ่นบิตูม 360° ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นว่าเรโนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันลดเพิ่มขึ้น ความดันลดจะมีค่าขึ้นอยู่กับเรโนลด์นัมเบอร์, สภาวะการหมุนวนของลม และการติดตั้งครีบริบ ซึ่งจะมีค่าน้อยสำหรับท่อไม่มีครีบริบ, เพิ่มขึ้นเมื่อท่อมีครีบริบแนวเอียง และเพิ่มมากขึ้นเมื่อท่อมีครีบริบแนวเดียวกัน

ในรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์นัมเบอร์กับนัสเซลล์นัมเบอร์ ที่ความเร็วลม 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, และ 12 เมตรต่อวินาที ของท่อที่ไม่มีครีบริบโดยให้ลมไหลแบบตรง, ท่อที่มีครีบริบที่ผิวบนและผิวล่าง แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวนโดยใช้แผ่นบิตูม 360° ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นว่าเรโนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ นัสเซลล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น นัสเซลล์นัมเบอร์จะมีค่าขึ้นอยู่กับเรโนลด์นัมเบอร์, สภาวะการหมุนวนของลม และการติดตั้งครีบริบ ซึ่งจะมีค่าน้อยสำหรับท่อไม่มีครีบริบ และเพิ่มขึ้นเมื่อท่อมีครีบริบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง โดยท่อที่มีครีบริบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงให้ค่า นัสเซลล์นัมเบอร์ใกล้เคียงกัน

พิจารณาผลของท่อที่มีครีบริบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วที่ผิวบนและผิวล่างท่อ แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน

ในรูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์นัมเบอร์กับความดันลด ที่ความเร็วลม 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, และ 12 เมตรต่อวินาที ของท่อที่ไม่มีครีบริบโดยให้ลมไหลแบบตรง, ท่อที่มีครีบริบที่ผิวบนและผิวล่าง แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวนโดยใช้แผ่นบิตูม 360° ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นว่าเรโนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันลดเพิ่มขึ้น ความดันลดจะมีค่าขึ้นอยู่กับเรโนลด์นัมเบอร์, สภาวะการหมุนวนของลม และการติดตั้งครีบริบ ซึ่งจะมีค่าน้อยสำหรับท่อไม่มีครีบริบ, เพิ่มขึ้นเมื่อท่อมีครีบริบแนวเอียง และเพิ่มมากขึ้นเมื่อท่อมีครีบริบแนวเดียวกัน

ในรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์นัมเบอร์กับนัสเซลล์นัมเบอร์ ที่ความเร็วลม 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, และ 12 เมตรต่อวินาที ของท่อที่ไม่มีครีบริบโดยให้ลมไหลแบบตรง, ท่อที่มีครีบริบที่ผิวบนและผิวล่าง แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน

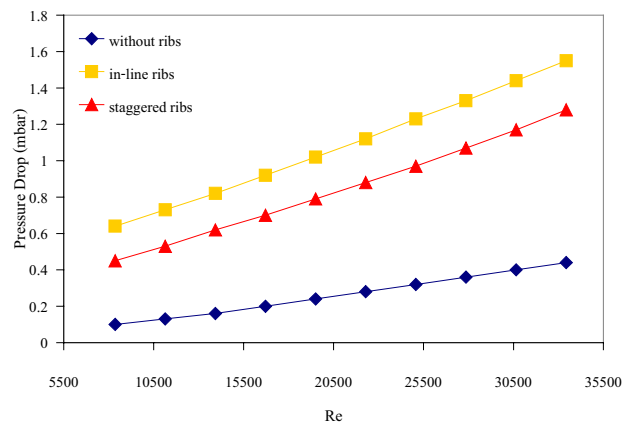
วนโดยใช้แผ่นบิตูม 360° ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นว่าเรโนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ นัสเซลล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น นัสเซลล์นัมเบอร์จะมีค่าขึ้นอยู่กับเรโนลด์นัมเบอร์, สภาวะการหมุนวนของลม และการติดตั้งครีบริบ ซึ่งจะมีค่าน้อยสำหรับท่อไม่มีครีบริบ และเพิ่มขึ้นเมื่อท่อมีครีบริบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง โดยท่อที่มีครีบริบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงให้ค่า นัสเซลล์นัมเบอร์ใกล้เคียงกัน

ค่าพลังงานไฟฟ้าขับพัดลม

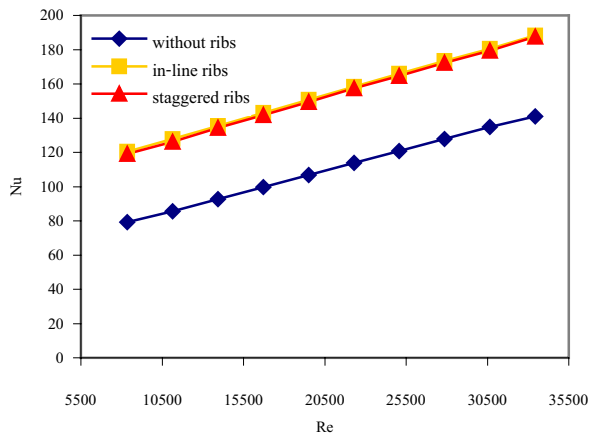
ท่อที่มีครีบริบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว แบบมีแนวเอียง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน ใช้พลังงานไฟฟ้าขับพัดลมมากขึ้น 2.58 W โดยเปรียบเทียบกับท่อที่ไม่มีครีบริบโดยให้ลมไหลแบบตรง ที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์  $Re = 33434$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

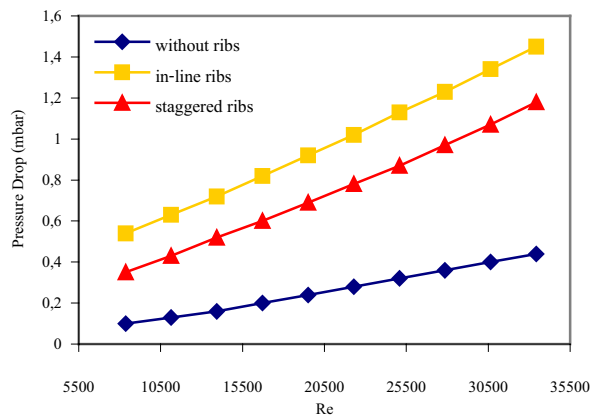
ท่อที่มีครีบริบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว แบบมีแนวเอียง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน สามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ 45.49 % โดยเปรียบเทียบกับท่อที่ไม่มีครีบริบโดยให้ลมไหลแบบตรง ที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์  $Re = 33434$



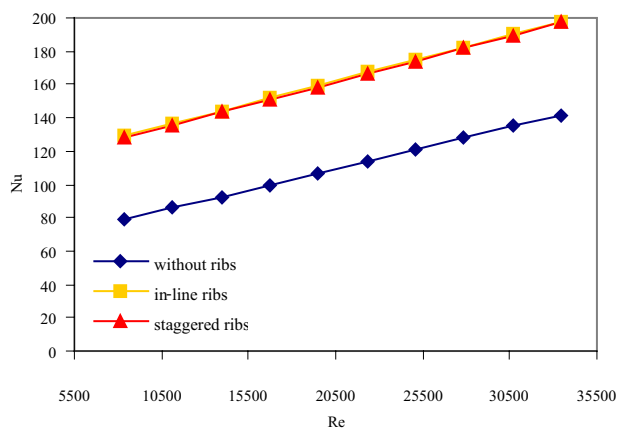
รูปที่ 5. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับเรย์โนลด์นัมเบอร์กรณีครีบริบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน



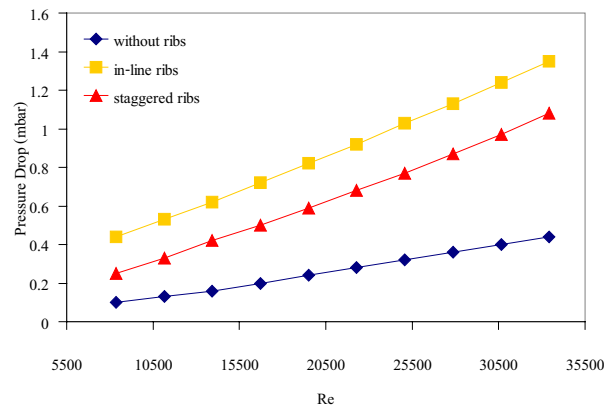
รูปที่ 6. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซลล์นัมเบอร์กับเรย์โนลด์ส นัมเบอร์ กรณีครีบริบสามเหลี่ยมผืนผ้า โดยให้ลมไหลแบบ หมุนวน



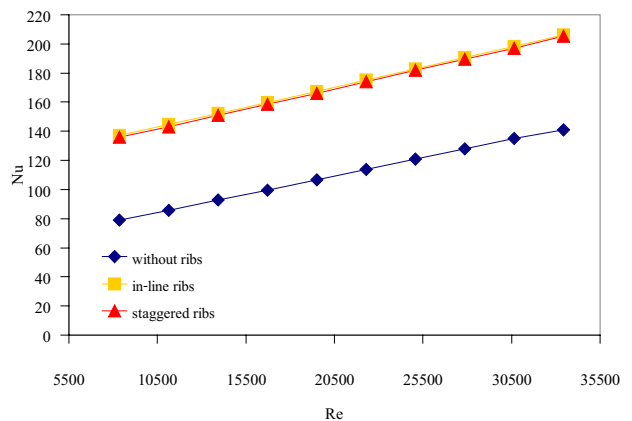
รูปที่ 7. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกกับเรย์โนลด์ส นัมเบอร์ กรณีครีบริบสามเหลี่ยมมุมฉาก โดยให้ลมไหลแบบ หมุนวน



รูปที่ 8. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซลล์นัมเบอร์กับเรย์โนลด์ส นัมเบอร์ กรณีครีบริบสามเหลี่ยมมุมฉาก โดยให้ลมไหล แบบหมุนวน



รูปที่ 9. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกกับเรย์โนลด์ส นัมเบอร์ กรณีครีบริบสามเหลี่ยมหน้าจั่ว โดยให้ลมไหลแบบ หมุนวน



รูปที่ 10. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซลล์นัมเบอร์กับเรย์โนลด์ส นัมเบอร์ กรณีครีบริบสามเหลี่ยมหน้าจั่ว โดยให้ลมไหล แบบหมุนวน

## 6. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าชุดทดลองที่มีครีบริบและลมไหลแบบหมุนวนช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ท่อที่มีครีบริบสามเหลี่ยมหน้าจั่ว โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากที่สุด ท่อที่มีครีบริบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกัน การติดครีบริบแบบมีแนวเอียงให้ค่าความดันตกน้อยกว่าการติดครีบริบแบบมีแนวเดียวกัน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] พงษ์เจต พรหมวงศ์ “การถ่ายเทความร้อน” ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2542 หน้า 225-252.
- [2] 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.

- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Carl-Olof Olsson and Bengt Sunden, Experimental study of flow and heat transfer in rib-roughened rectangular channels, Experimental Thermal and Fluid Science 16 1998, pp. 349-365.
- [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.