



การศึกษากการพาความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการใส่วงแหวน 5 เหลี่ยม

Study of Convection Heat Transfer in Heat Exchanger Tube with Pentagonal Ring Inserts

นรินทร์ กุลนภาค¹, พงษ์เจต พรหมวงศ์² และ วิฑูรย์ ชิงถ้วยทอง^{3*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลยานยนต์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์
ถนนมรุพงษ์ อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

³ สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมืองลพบุรี จังหวัดลพบุรี 15000

*ติดต่อ: witoon_9912@hotmail.com, 0-3642-2125, 0-3642-2610

บทคัดย่อ

บทความนี้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานในท่อกลมที่ติดตั้งวงแหวน 5 เหลี่ยมวางเอียงภายใต้เงื่อนไขพลาซซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ โดยจัดวางวงแหวน 5 เหลี่ยม ที่มีอัตราส่วนการขวางการไหล (e/D , BR) เท่ากับ 0.20 วางเอียงทำมุมปะทะการไหล (α) = 45° ที่อัตราส่วนระยะห่างของแหวนต่อขนาดท่อ (P/D , PR) เท่ากับ 0.75, 1.0, 1.25, 1.5 และ 2.0 การทดสอบใช้ความเร็วของอากาศที่แสดงโดย เลขเรย์โนลด์ (Re) ในช่วง 5,000 ถึง 25,000 และได้ศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อนในรูปของเลขนัสเซลท์ (Nu) และการสูญเสียความดันในรูปของตัวประกอบเสียดทาน (f) เปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบ จากการศึกษาพบว่าการติดตั้งวงแหวน 5 เหลี่ยมสามารถเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้ โดยพบว่าเมื่ออัตราส่วนระยะพิชต์ลดลงมีผลให้มีการเพิ่มเลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทาน โดยท่อที่ติดตั้งวงแหวน 5 เหลี่ยมที่อัตราส่วนระยะพิชต์ เท่ากับ 1.5 ให้ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด

คำหลัก: วงแหวน 5 เหลี่ยม, การถ่ายเทความร้อน, ตัวประกอบเสียดทาน, ตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

Abstract

The paper presents the study of heat transfer and friction loss behaviors through a constant heat-fluxed tube fitted with inclined pentagonal rings. Measurements are carried out for the tube of blockage ratio (e/D , BR) = 0.2, attack angle (α) = 45° and pitch ratio (P/D , PR) = 0.75, 1.0, 1.25, 1.5 and 2.0. The flow rate is in terms of Reynolds numbers (Re) in the range of 5,000 – 25,000. The experimental results of heat transfer and pressure lose presented in term of Nusselt number and friction factor are compared between the inserted and the smooth tubes. It is found that the PR provide the significant effect on the thermal performance of the test tube. The decrease of the pitch ratio leads to an increase in the Nusselt number and friction factor. The results reveal that the $PR = 1.5$ provide the highest the thermal enhancement factor

Keywords: pentagonal rings, heat transfer, friction factor, thermal enhancement factor

1. บทนำ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีการถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในชีวิตประจำวัน และในงานอุตสาหกรรม เพื่อใช้ในกระบวนการด้านความร้อน เช่น กระบวนการเผาไหม้ กระบวนการทำความเย็น กระบวนการแลกเปลี่ยนทางความร้อน เป็นต้น ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีบทบาทสำคัญที่จะช่วยให้กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพ โดยการเพิ่ม การเพิ่ม การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะเป็นการช่วยให้เกิดผลประหยัดพลังงานและต้นทุนการผลิต ดังนั้นในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีความพยายามในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการแบบต่างๆ โดยเทคนิคในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถแบ่งได้ 2 วิธีการ คือ วิธีการแบบ Active เป็นวิธีที่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกเข้ามาช่วยในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เช่นการสั่นสะเทือน ใช้คลื่นเสียง เป็นต้น และ วิธีการแบบ Passive ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกเข้ามาช่วยในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยเป็นวิธีที่นักวิจัยจำนวนมากได้ทำการศึกษา ในรูปแบบพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่หลากหลาย ดังนี้

Han และคณะ [1] ทำการศึกษาผลของรูปร่างครีบบุมครีบบ และอัตราส่วนระยะพิตซ์ต่อความสูง มีผลต่อตัวประกอบเสียดทาน และการถ่ายเทความร้อนในท่อที่มีครีบบถูกติดบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้ามกับการให้ความร้อน ที่ค่าเลขเรย์โนลด์ 3,000 ถึง 30,000 พบว่าการจัดครีบบแบบสมมาตรมีผลเหมือนกับการจัดครีบบแนวเอียงกัน และรูปร่างของครีบบมีผลอย่างมากต่อตัวประกอบเสียดทาน และมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนไม่มากนัก จากผลการทดลองพบว่า การถ่ายเทความร้อนมากที่สุดที่ครีบบทำมุม 45°

Wojtkowiak and Hyun [2] จำลองการถ่ายเทความร้อน ในช่วงการไหลแบบราบเรียบในท่อโดยใส่แผ่น

จานตามแนวแกน (coaxial-disk) ซึ่งสามารถหมุนได้เข้าไปในท่อ โดยปรับขนาดของแผ่นจาน ตามอัตราส่วนรัศมีของแผ่นจานต่อรัศมีท่อเป็น 0.9, 0.95 และ 0.99 ซึ่งแผ่นจานนี้จะพิจารณาให้สามารถมีการหมุนได้เป็นเลขเรย์โนลด์ การหมุน คือ 0, 250, 500 และ 1,000 ซึ่งพบว่า ความเร็วในการหมุนของแผ่นจานจะมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน นั่นคือยิ่งความเร็วมากขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนจะมากขึ้นด้วย และในทุกกรณีจะทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนจะทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น แต่แผ่นจานที่มีขนาดใหญ่จะทำให้เกิดการสูญเสียความดันมากกว่า

Promvong and Eiamsa-ard [3] ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่มีการใส่ตัวสร้างความปั่นป่วนแบบแหวนกรวย(conical-ring) ในการทดลองได้แบ่งเป็น 2 แบบคือ ใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนแบบแหวนกรวยที่จัดวางแบบลู่ออก (D-nozzle arrangement) และแบบแหวนกรวยที่จัดวางแบบลู่เข้า (C-nozzle arrangement) นำมาใส่ในท่อทดลอง ซึ่งการทดสอบจะอยู่ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 8,000 ถึง 18,000 วางแหวนกรวยที่มีอัตราส่วนระยะพิตซ์ต่างๆ กัน คือ 2, 4 และ 7 พบว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นจะเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ แหวนกรวยแบบลู่ออกจะสร้างความปั่นป่วนได้มากกว่าแหวนกรวยแบบลู่เข้าเป็นผลให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่า ในขณะที่เดียวกันก็เป็นผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมากกว่าเช่นกัน แต่ทั้งสองแบบก็ยังให้การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่มากกว่าท่อผิวเรียบ ในช่วง 236 – 344% ขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์และการจัดวางตัวสร้างความปั่นป่วน

Promvong และคณะ [4] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยใช้วงแหวนวางเอียงในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยศึกษาการวางเอียงที่มุม 30° ที่อัตราส่วนการขวางการไหล (BR) 0.1, 0.15 และ 0.2 ทดลองในช่วงเลขเรย์โนลด์ 5,000 – 26,000 พบว่าที่อัตราส่วนการขวางการไหล ที่สูงจะทำให้เกิดวอร์เทกซ์ที่รุนแรงเป็นผลให้มีการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น แต่

จะทำให้เกิดความเสียหายที่สูงขึ้นเช่นกัน โดยที่อัตราส่วนระยะพิตช์ 0.5 และอัตราส่วนระยะพิตช์ 1.0 จะให้ค่าสมรรถนะความร้อนที่สูงที่สุด

Chingtuaythong และคณะ [5] ใช้วงแหวนรูปตัววี (V-shaped ring) ในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระยะพิตช์ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 และอัตราส่วนการวางการไหลที่ 0.1, 0.15 และ 0.2 พบว่าวงแหวนดังกล่าวสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ โดยการทำให้เกิดการไหลแบบวอร์เท็กซ์ด้านหลังของวงแหวน ซึ่งสามารถเพิ่มตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ถึง 1.63 ในช่วงที่มีค่าเลขเรย์โนลด์ต่ำ

เมื่อทำการศึกษาควข้องกับการใช้อุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนหน้าตัดอื่นๆ เช่น ท่อหน้าตัดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส [6] และท่อหน้าตัดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า [7] พบว่าอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนที่ได้รับความนิยมและให้ผลลัพธ์ที่ดีนั้นคือการใช้ครีป ปีกและแผ่นกั้น โดยศึกษาถึงลักษณะรูปแบบต่างๆ ระยะเวลาจัดวาง เป็นต้น แต่การศึกษาเชิงทดลองที่ใช้แผ่นกั้น สำหรับเป็นอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนภายในท่อหน้าตัดกลมยังมีอยู่ในปริมาณน้อย งานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำแนวคิดการประยุกต์ติดตั้งวงแหวน 5 เหลี่ยมมาเป็นอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนของการไหลภายในท่อหน้าตัดกลม ที่อัตราส่วนการวางการไหล ($BR = e/D$) เป็น 0.2 และอัตราส่วนระยะพิตช์ ($PR = P/D$) เป็น 0.75, 1.0, 1.25, 1.5 และ 2.0 โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งแสดงในรูปแบบของเลขเรย์โนลด์ (Re) อยู่ในช่วงระหว่าง 5,000–25,000 ภายใต้เงื่อนไขของฟลักซ์ความร้อนที่ให้กับผนังของท่อทดลองคงที่ ในส่วนของผลการทดลองได้นำเสนอในรูปแบบของเลขนัสเซลท์ (Nu) และตัวประกอบความเสียหาย (f) สำหรับลักษณะของการถ่ายเทความร้อนและลักษณะของความดันตกคร่อมตามลำดับ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนใน

กรณีที่มีการใส่วงแหวน 5 เหลี่ยมที่มีอัตราส่วนการวางการไหล 0.2 และศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระยะพิตช์ของการวางวงแหวน 5 เหลี่ยมในท่อ

2. ทฤษฎีและการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้หาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อหน้าตัดวงกลมในรูปของเลขนัสเซลท์ โดยเลขเรย์โนลด์ในรูปของเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) สามารถเขียนได้เป็น

$$Re = UD / \nu \quad (1)$$

เมื่อ U และ ν เป็นความเร็วเฉลี่ยและความหนืดเชิงจลน์ของอากาศตามลำดับ

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (h) หาค่าได้จากการวัดอุณหภูมิและความร้อนที่ป้อนเข้าระบบความร้อนที่ให้กับอากาศ (Q_{air}) และความแตกต่างของอุณหภูมิผนังกับอุณหภูมิก๊าซ ($T_w - T_b$), สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยหาได้จากข้อมูลทดลองดังสมการ

$$Q_{air} = Q_{conv} = \dot{m} C_p (T_o - T_i) \quad (2)$$

$$h = \frac{Q_{conv}}{A(T_s - T_b)} \quad (3)$$

โดยที่ $T_b = (T_o - T_i) / 2 \quad (4)$

และ $\bar{T}_s = \sum T_s / 28 \quad (5)$

เมื่อ A คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อนแบบการพาของผนังที่ถูกให้ความร้อนของท่อหน้าตัดกลม \bar{T}_s คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ยที่ได้จากอุณหภูมิผิวในแต่ละจุด (T_s) ตามแนวยาวของท่อหน้าตัดกลม, T_i , T_o คือ อุณหภูมิทางเข้าและทางออกตามลำดับ \dot{m} และ C_p คือ อัตราการไหล

เชิงมวลของอากาศและค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ ตามลำดับ เลขนัสเซิลท์เฉลี่ย (Nu) เขียนได้เป็น

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (6)$$

ตัวประกอบเสียดทาน (f) หาได้จาก

$$f = \frac{2\Delta P}{(L/D_h)(\rho U^2)} \quad (7)$$

เมื่อ ΔP คือ ค่าความดันตกคร่อม และ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศ ถูกกำหนดที่อุณหภูมิของไหลเฉลี่ย T_b จากสมการ (4)

ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของการใส่วงแหวนภายในท่อแสดงในรูปของตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Thermal Enhancement Factor, TEF) นิยามโดยค่าอัตราส่วนของเลขนัสเซิลท์ต่อค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ที่ได้จากการทดลองที่กำลังขับเดียวกัน สามารถหาได้จากข้อเสนอแนะของ Webb [8]

$$TEF = \frac{h}{h_0} \bigg|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_0} \bigg|_{pp} = \left(\frac{Nu}{Nu_0} \right) \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-1/3} \quad (8)$$

3. การติดตั้งอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์สำหรับการทดสอบการเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 1 โดยใช้ท่อทดสอบเป็นท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (D_i) 50 มิลลิเมตร หนา (t) 1 มิลลิเมตร ยาว (L) 4,000 มิลลิเมตร และในช่วงการทดสอบความยาว 2,000 มิลลิเมตร ทำการติดตั้งฮีตเตอร์รัดท่อ (Band Heater) ขนาด 3,000 วัตต์ ไว้ที่ผิวท่อทดสอบพร้อมทั้งมีการหุ้มฉนวนกันความร้อนถ่ายเทออกสู่บรรยากาศ ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิผิวท่อโดยใช้หัววัด

แบบเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จำนวน 28 จุดตลอดความยาวท่อทดสอบ โดยตำแหน่งการติดตั้งมีระยะห่าง 75 มิลลิเมตร รวมทั้งติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบ RTD Pt100

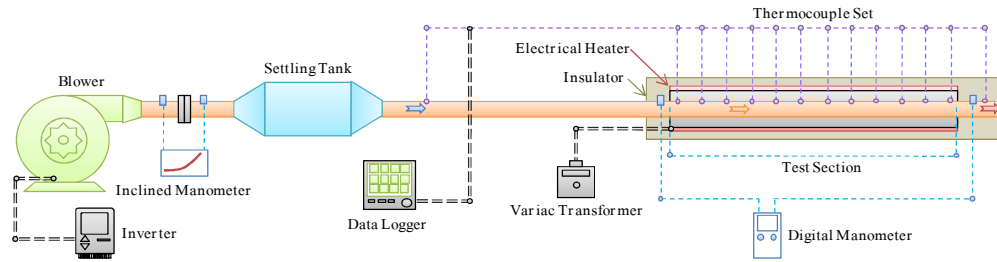
เพื่อวัดอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้า-ออกของท่อทดสอบจำนวน 2 จุดวัด บันทึกข้อมูลอุณหภูมิในคอมพิวเตอร์ พร้อมทั้งติดตั้งชุดวัดความดันลกระหว่างช่วงทดสอบ โดยใช้เครื่องมือวัดเครื่องวัดความดันตกคร่อม การปรับค่าอัตราการไหลของอากาศใช้การปรับความเร็วรอบมอเตอร์พัดลมโดยใช้อินเวอร์เตอร์ผ่านอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศชนิดออริฟิส

ชิ้นงานที่ใช้ใส่ในท่อทดสอบทำจากแผ่นอะครีลิก หนา 2 มิลลิเมตร ลักษณะวงนอกเป็นรูปวงแหวน 5 เหลี่ยม ด้านในเป็นรูปวงรี วางทำมุมปะทะกับทิศทางการไหลของอากาศที่เข้ามา 45° โดยวงแหวน 5 เหลี่ยม มีอัตราส่วนการขวางการไหล (Blockage ratio, BR) หรืออัตราส่วนระหว่างความสูงวงแหวนกับขนาดท่อ เท่ากับ 0.2 และมีค่าอัตราส่วนระยะพิต (Pitch ratio, PR) 0.75, 1.0, 1.25, 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ ดังรูปที่ 2 โดยทำการทดลองตามเงื่อนไขในตารางที่ 1

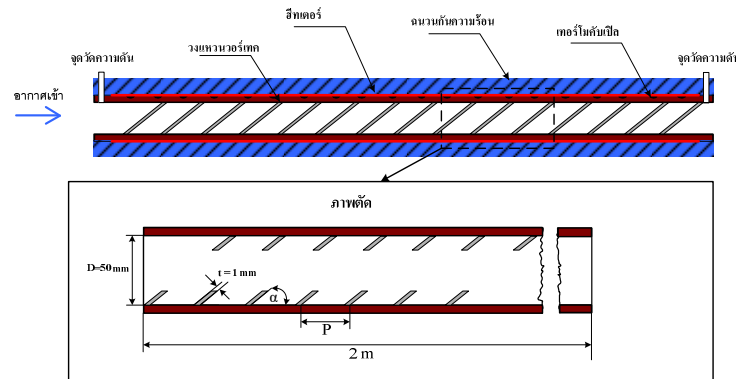
ตารางที่ 1 เงื่อนไขในการทดลอง

ของไหล	อากาศ
เลขเรย์โนลด์	5,000 – 25,000
เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทดลอง	50 mm
อัตราส่วนการด้าน, BR	0.20 (e=10 mm)
มุมปะทะ, α	45°
อัตราส่วนระยะพิต, PR	0.75, 1.0, 1.25, 1.5 และ 2.0

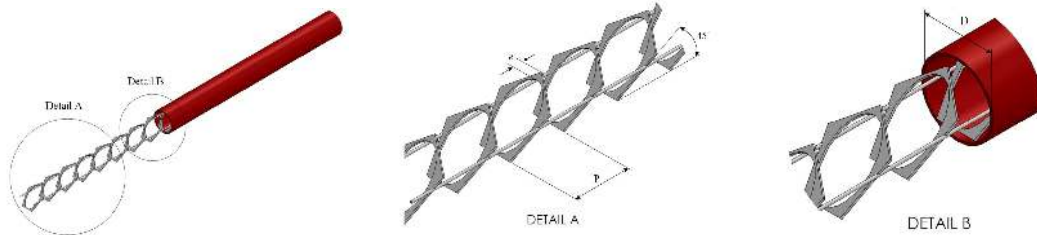
รูปที่ 3 แสดงลักษณะของการใส่วงแหวน 5 เหลี่ยมเข้าไปภายในท่อทดสอบ โดยภาพ (A) แสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับชิ้นงานวงแหวน 5 เหลี่ยม และภาพ (B) แสดงลักษณะการใส่วงแหวนและการวางภายในท่อทดสอบ



รูปที่ 1 ชุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 2 การติดตั้งวงแหวน 5 เหลี่ยมเอียงในท่อทดสอบ



รูปที่ 3 วงแหวน 5 เหลี่ยมวางเอียง และลักษณะการวางภายในท่อ

4. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 การทวนสอบท่อผิวเรียบ

การทดสอบเพื่อหาอัตราการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดัน จะแสดงในรูปของตัวแปรไร้มิติ คือ เลขนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียดทาน ตามลำดับ ซึ่งการทวนสอบชุดทดลองสำหรับท่อผิวเรียบนั้น จะมีการทดสอบและเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ที่เป็นที่ยอมรับ โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนแสดงในรูปของเลขนัสเซิลท์และเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Gnielinski ส่วนการสูญเสียความดันแสดงในรูปของตัว

ประกอบเสียดทานและเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Petukhov ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน [9] โดยสมการทั้ง 2 แสดงในสมการที่ (9) และ (10) ตามลำดับ

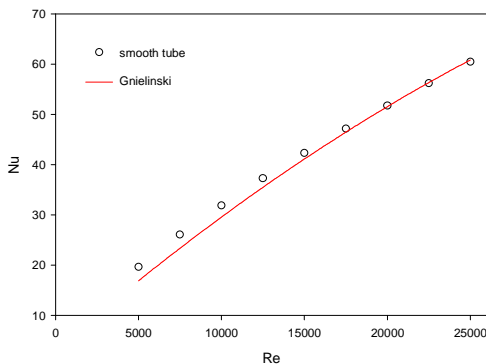
สหสัมพันธ์ของ Gnielinski,

$$Nu = \frac{(f/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (9)$$

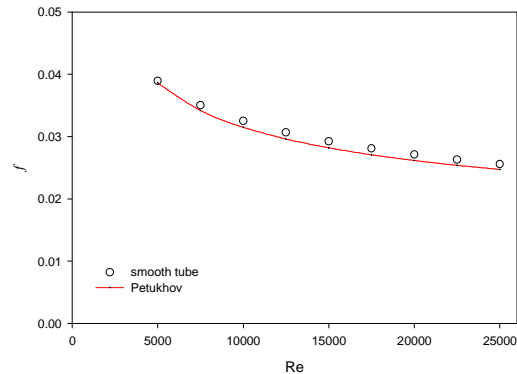
สหสัมพันธ์ของ Petukhov

$$f = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (10)$$

จากการทดลองท่อผิวเรียบเพื่อเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ดังกล่าว แสดงในรูปที่ 4 และ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนคือ 5,000 – 25,000 พบว่าเลขนัสเซิลท์ของท่อทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับสหสัมพันธ์จาก สมการที่ (9) โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย $\pm 5\%$ แสดงในรูปที่ 4 และความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ กับตัวประกอบเสียดทาน พบว่าตัวประกอบเสียดทานท่อทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับสหสัมพันธ์จากสมการที่ (10) มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในช่วง $\pm 6\%$ ซึ่งถือว่าเป็นช่วงที่ยอมรับได้ของชุดทดสอบท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้สร้างขึ้น



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับตัวประกอบเสียดทานในกรณีท่อผิวเรียบ

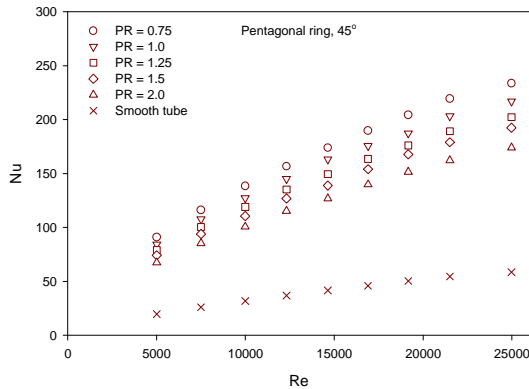


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับตัวประกอบเสียดทานในกรณีท่อผิวเรียบ

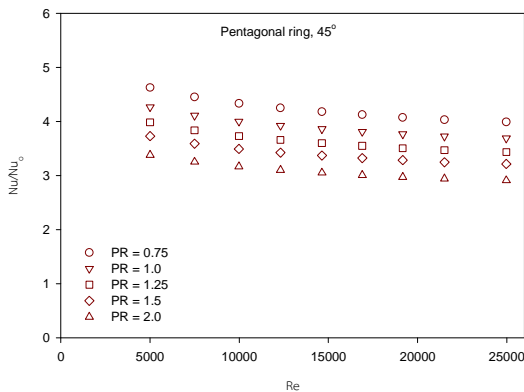
4.2 การถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับเลขนัสเซิลท์ ของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใส่วงแหวน 5 เหลี่ยมเอียงเทียบกับท่อผิวเรียบ จากการทดลองพบว่า การใส่วงแหวน 5 เหลี่ยมเอียงมุมปะทะการไหล 45° อัตราส่วนการขวางการไหล 2.0 ที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.75, 1.0, 1.25, 1.5 และ 2.0 ทุกกรณีสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ โดยลักษณะของเส้นกราฟพบว่า เลขนัสเซิลท์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น โดยกรณีที่อัตราส่วนระยะพิตช์น้อยจะให้ค่าเลขนัสเซิลท์ที่สูงกว่าอัตราส่วนระยะพิตช์มาก เนื่องจากมีจำนวนวงแหวนที่มากกว่า เป็นการเพิ่มพื้นที่ทำให้เกิดการปั่นป่วนบริเวณชั้นขีดผิวความร้อนอย่างต่อเนื่องจากผลของการไหลแบบวอร์เทค ส่งผลให้มีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้มากกว่า

รูปที่ 7 แสดงอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กรณีใส่วงแหวน 5 เหลี่ยมวางเอียงกับกรณีท่อผิวเรียบ พบว่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์มีค่าในช่วง 3.9 – 4.6, 3.7 – 4.3, 3.4 – 4.0, 3.2 – 3.7 และ 2.9 – 3.4 เท่า ที่อัตราส่วนระยะพิตช์ 0.75, 1.0, 1.25, 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับเลขนัสเซลท์

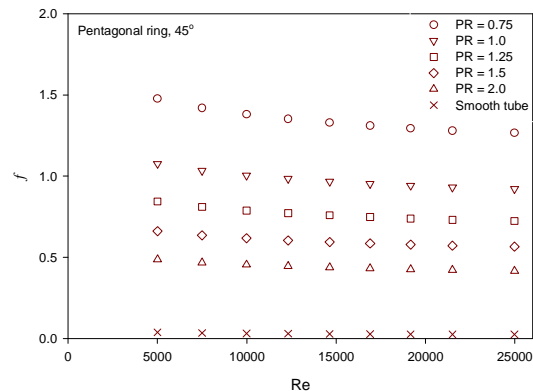


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับอัตราส่วนเลขนัสเซลท์

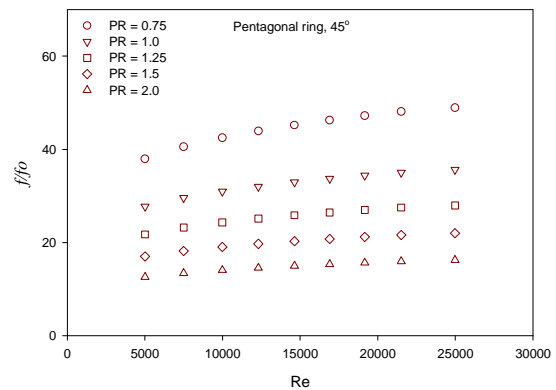
4.3 การสูญเสียความดัน

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทาน พบว่าแนวโน้มตัวประกอบเสียดทานมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนระยะพิตซ์น้อย PR = 0.75 มีตัวประกอบเสียดทานมากที่สุด และลดลงเมื่อมีอัตราส่วนระยะพิตซ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อัตราส่วนระยะพิตซ์น้อยจะมีจำนวนวงแหวนมากทำให้มีการต้านการไหลมาก โดยที่ PR = 0.75 ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงสุดถึง 49 เท่า เมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบในกรณีที่เลขเรย์โนลด์ 25,000 และจะมีค่าสูงกว่ากรณีอื่นมาก เนื่องจากการมีวงแหวน 5 เหลี่ยมวางเอียงจำนวนมากจะไปขวางการไหลของอากาศทำให้มีพื้นที่ในการปะทะการไหลมาก

รูปที่ 9 แสดงอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานซึ่งเป็นการเทียบตัวประกอบเสียดทานกรณีใส่วงแหวน 5 เหลี่ยมกับกรณีท่อผิวเรียบ พบว่า มีค่าในช่วง 38.9-48.8, 35.6-27.7, 21.7-27.9, 17.0-21.9 และ 12.6-16.2 ที่อัตราส่วนระยะพิตซ์ 0.75, 1.0, 1.25, 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับตัวประกอบเสียดทาน

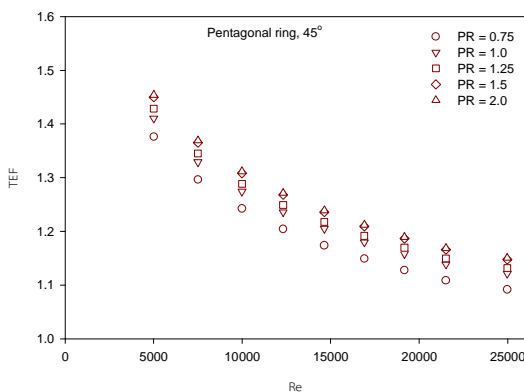


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

4.4 ตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ กับตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ซึ่งพิจารณาจากการถ่ายเทความร้อนกับการสูญเสียความดัน พบว่าเมื่อใส่วงแหวนภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่ง

สามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้นแต่จะส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นสูงเช่นเดียวกัน โดยเมื่อนำมาวิเคราะห์กรณีศึกษาที่กำลังขับเท่ากับท่อผิวเรียบ และที่ค่าการไหลเดียวกัน พบว่าการติดตั้งวงแหวน 5 เหลี่ยม ที่มีค่า BR = 0.20 ค่าตัวประกอบเพิ่มการถ่ายเท ความร้อนมีค่าลดลงเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น โดยในทุกกรณีที่ใช้วงแหวน 5 เหลี่ยมสามารถเพิ่มตัวประกอบเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อผิวเรียบทุกกรณี (ในทุกกรณีมีค่ามากกว่า 1) โดยที่อัตราส่วนระยะพิตซ์ 2.0 จะมีค่าตัวประกอบเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดถึง 1.46 เมื่อเทียบกับกรณีท่อผิวเรียบ ที่ค่าเลขเรย์โนลด์ต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากที่อัตราส่วนระยะพิตซ์น้อยสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้มากกว่าการเพิ่มของตัวประกอบเสียดทาน โดยที่ PR=0.75 จะสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้นมากถึง 3.9 – 4.6 เท่า แต่ก็ส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นเช่นกันเนื่องจากจำนวนของวงแหวนอาจจะมากเกินไปทำให้มีการต้านการไหลมากเกินไปทำให้ค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นไม่มากเมื่อเทียบกับค่า PR อื่นๆ



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับตัวประกอบเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

4.5 สหสัมพันธ์ของวงแหวน 5 เหลี่ยม

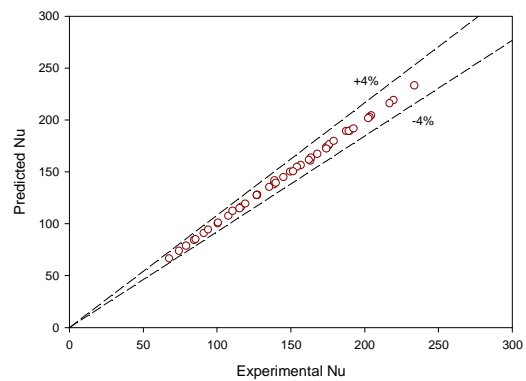
สำหรับวงแหวน 5 เหลี่ยมเอียงมุม 45° และมีอัตราส่วนการต้าน 0.20 พบว่าเลขนัสเซิลท์มีความสัมพันธ์กับเลขเรย์โนลด์ เลขพรานท์(Prandtl Number) และอัตราส่วนระยะพิตซ์ ได้ดังสมการที่ (11) ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ ±4% และแสดงในรูปที่ 11 ส่วนสหสัมพันธ์สำหรับตัวประกอบเสียดทานมีความสัมพันธ์กับเลขเรย์โนลด์ และอัตราส่วนระยะพิตซ์เขียนได้ดังสมการที่ (12) มีความคลาดเคลื่อนที่ ±5% และแสดงในรูปที่ 12

สหสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์

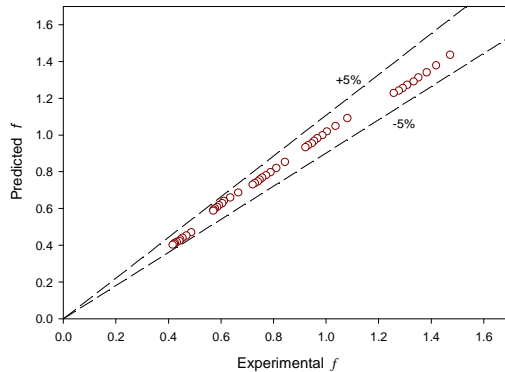
$$Nu = 0.848Re^{0.604}Pr^{0.4}(PR + 1)^{-0.586} \quad (11)$$

สหสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทาน

$$f = 10.557Re^{-0.098}PR^{-2.065} \quad (12)$$



รูปที่ 11 ข้อมูลเลขนัสเซิลท์จากการทดลองและจากสมการสหสัมพันธ์



รูปที่ 12 ข้อมูลตัวประกอบเสียดทานจากการทดลองและ
จากสมการสหสัมพันธ์

5. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาวิจัยพบว่า การใส่วงแหวน 5 เหลี่ยมวางเอียงเข้าไปในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้นได้ ซึ่งวงแหวนนี้ช่วยให้เกิดการไหลแบบวอร์เทกซ์แนวยาว (longitudinal vortex) ด้านหลังของวงแหวน ซึ่งจะเป็น การรบกวนชั้นขีดผิวความร้อนของการไหล ส่งผลให้ เลขนัสเซลล์มีค่าสูงขึ้นโดยวงแหวน 5 เหลี่ยมเอียงที่มีมุมปะทะการไหล $\alpha = 45^\circ$ และมีอัตราส่วนการขวางการไหล, $BR = 0.20$ โดยที่อัตราส่วนระยะพิตซ์น้อยจะเพิ่ม ค่าการถ่ายเทความร้อนได้สูงขึ้นมากประมาณ 3.9 – 4.6 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบ แต่ก็ส่งผลให้มีตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และเมื่อพิจารณา ประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนโดยพิจารณาในรูป ของตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน พบว่าวงแหวน 5 เหลี่ยมวางเอียงสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ในทุกช่วงของเลขเรย์โนลด์ โดยเฉพาะในช่วงที่มีค่า เลขเรย์โนลด์ต่ำจะทำให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่สูงที่สุด ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์และ มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ที่สนับสนุนงบประมาณในการดำเนินการงานวิจัยนี้รวมทั้งทุนในการนำเสนอ งานวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุเคราะห์สถานที่ในการทดลองงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Han, J.C., Glicksman, L.R. and Rohsenow, W.M. (1978). An investigation of heat transfer and friction for rib-roughened surfaces. *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 21, pp. 1143-1156.
- [2] Wojtkowiak, J., and Hyun, J.M. (2000). Flow and heat transfer in pipe containing a coaxially-rotating disk. *Fluid Dynamics Research*, vol.26, pp. 377-391.
- [3] Promvong, P., and Eiamsa-ard, S. (2006). Heat transfer enhancement in a tube with combined conical-nozzle inserts and swirl generator. *Energy Conversion and Management*, vol. 47, pp. 2867-2882.
- [4] Promvong P., Koolnapadol N., Pimsarn M. and Thianpong, C. (2014). Thermal performance enhancement in a heat exchanger tube fitted with inclined vortex rings. *Applied Thermal Engineering*. Vol.62, pp. 285-292.
- [5] Chingtuaythong, W., Promvong, P., Thianpong, C. and Pimsarn, M. (2017). Heat transfer characterization in a turbular heat exchanger with V-shaped rings. *Applied Thermal Engineering*. Vol.110, pp. 1164-1171.
- [6] Suwannapan, S. Chompookham, T. Tamna, S. Skullong, S. Thianpong, C. and Promvong,



P. (2012). Augmented Heat Transfer in Square Channel with 45° Inline Baffles, International Conference on Green and Sustainable Innovation, Chiang Mai, Thailand.

[7] Chokphoemphun, S., Chompookham, T., Skullong, S. and Promvongse, P. (2012). Heat Transfer in Solar Air Heater Channel with Inline 45° Wavy-Ribs, International Conference on Green and Sustainable Innovation, Chiang Mai, Thailand.

[8] Webb, R.L. (1994). Principles of Enhanced Heat Transfer. John Wiley & Sons, New York.

[9] Incropera, F. and Dewitt, P.D. (1996). Introduction to Heat Transfer. 3rd edition, John Wiley & Sons Inc.