

การเพิ่มสมรรถนะความร้อนในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีแหวนรูปตัววีแบบไม่ เต็มความยาว

THERMAL PERFORMANCE ENHANCEMENT IN A HEAT EXCHANGER TUBE FITTED WITH SHORT-LENGTH V-SHAPE RINGS

สุรียา โชคเพิ่มพูน¹

วิฑูรย์ ชิงถ้วยทอง²

พงษ์เจต พรหมวงศ์³

โชติวุฒิ ประสพสุข²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

วิทยาเขตสกลนคร 199 ม.3

ต.พังโคน อ.พังโคน จ.สกลนคร 47160

²สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

321 ต.ทะเลชุบศร อ.เมือง

จ.ลพบุรี 15000

³ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ

ทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง

กรุงเทพฯ 10520 โทร 0-2326-4197

โทรสาร 0-2326-4198

บทคัดย่อ การศึกษาเชิงทดลองถึงพฤติกรรมของการถ่ายโอนความร้อนและการไหลของของไหลในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีแหวนรูปตัววีภายใต้เงื่อนไขของเลขเรย์โนลด์สในช่วง 5000 ถึง 25,000 แหวนรูปตัววีถูกใช้เป็นตัวสร้างการไหลแบบพหุนวน (vortex flow) เพื่อสร้างการไหลแบบพหุนวนที่แข็งแรงภายในท่อทดสอบในการทดลองชิ้นส่วนแหวนรูปตัววีถูกติดตั้งบนโครงลวดด้วยระยะห่างเท่ากับ 50 มิลลิเมตร ตลอดความยาว 2000 มิลลิเมตร (ติดตั้งแหวนเต็มความยาวท่อทดสอบ) และกรณีติดตั้งแหวนรูปตัววีแบบไม่เต็มความยาวจะมีการศึกษาโดยการเว้นช่องว่างด้วยอัตราส่วนช่องว่าง (R_s) เท่ากับ 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 และ 0.9 ค่าการถ่ายเทความร้อนและความดันสูญเสียถูกนำเสนอในรูปแบบเลขนัสเซิลต์และตัวประกอบความเสียดทานตามลำดับ ผลการทดลองพบว่ากรณีใส่แหวนรูปตัววีที่ค่า $R_s = 0.9$ ให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุด

คำสำคัญ: การถ่ายเทความร้อน, ตัวประกอบความเสียดทาน, การไหลพหุนวน, แหวนตัววี, สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

Abstract An experimental investigation of heat transfer and fluid flow characteristics in a tube heat exchanger with V-Shape Rings insert under uniform wall heat flux boundary conditions. The air in the tube are presented for Reynolds number (Re) in a range of 5000 to 25,000. The V-Shape Rings is introduced as a vortex flow device for generating a strong vortex flow in the test tube. In the this work, a V-Shape Rings elements were mounted on the steel rod with a single pitch length (P) of 50 mm throughout 2000 mm (full-length) while the short-length mounted at the entry test section are used at several space ratios (SR) of 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 and 0.9. The variation of heat transfer and pressure loss are displayed in the form of Nusselt number (Nu) and friction factor (f), respectively. The experimental result indicates that V-Shape Rings at $R_s = 0.9$ provide the highest thermal performance.

Keywords: heat transfer, friction factor, vortex flow, V-Shape Rings, thermal performance

1. บทนำ

ปัจจุบันเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อต้องการเพื่อสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้สูงขึ้นเพื่อนำไปออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีขนาดเล็กลงในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนยังเท่าเดิม ซึ่งจะส่งผลให้สามารถลดต้นทุนการผลิตในอุตสาหกรรมได้ จากการศึกษาวิจัยพบว่าตัวแปรสำคัญในการพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีสมรรถนะความร้อนสูงขึ้นคือการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้นในขณะที่ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นไม่มาก สำหรับวิธีการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีอยู่ 2 วิธี คือ วิธีแบบ Active และ

Passive โดยการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีแบบ Active เป็นการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้สามารถนำกลไกติดตั้งเข้ากับระบบของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งวิธีการนี้จะมีค่าใช้จ่ายพลังงานเพิ่มทำให้ของไหลเกิดการเปลี่ยนรูปแบบการไหลภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน และการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีแบบ Passive เป็นวิธีการคล้ายกับวิธีการแบบ Active คือการทำให้ของไหลเกิดการเปลี่ยนรูปแบบการไหลแต่วิธีแบบ Passive จะอาศัยตัวสร้างกระแสปั่นป่วนในลักษณะติดตั้งภายในท่อ ซึ่งวิธีการนี้ไม่ต้องการจ่ายพลังงานเพิ่มและยังเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน สำหรับวิธีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบ Passive ที่ได้มีการศึกษาวิจัยมา

ตลอดจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ 1. การติดตั้งตัวสร้างความปั่นป่วนที่ทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวน ซึ่งเทคนิคการสร้างการไหลแบบหมุนวนสามารถแบ่งออกได้อีก 2 แบบ คือ การไหลแบบหมุนวนต่อเนื่อง (continuous swirl flow) และการไหลแบบหมุนวนเฉพาะช่วงเริ่มต้น (decaying swirl flow) การไหลแบบหมุนวนต่อเนื่องจะเกิดการหมุนวนตลอดความยาวของท่อ ในขณะที่การไหลแบบหมุนวนเฉพาะช่วงเริ่มต้นจะเกิดการหมุนวนสูงสุดที่บริเวณช่วงต้นท่อและค่อยๆเสื่อมสลายลงตามแนวแกนการไหล 2. การติดตั้งตัวสร้างความปั่นป่วนที่ทำให้เกิดการหมุนวนหรือการกระแทกบริเวณตัวสร้างความปั่นป่วน (vortex flow) ซึ่งเป็นวิธีการที่กำลังได้รับสนใจในขณะนี้เนื่องจากวิธีการดังกล่าวสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้สูงมาก แต่ก็มีข้อเสียที่การดังกล่าวจะทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นมาก

งานวิจัยได้ให้ความสนใจการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้เทคนิคการติดตั้งตัวสร้างความปั่นป่วนที่ทำให้เกิดการหมุนวนหรือการกระแทกบริเวณตัวสร้างความปั่นป่วน (vortex flow) ซึ่งมีข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้ **ซึ่งถ้อยทอง [1]** ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมโดยการติดตั้งตัวสร้างความปั่นป่วนภายในท่อที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ (constant heat-flux) โดยใช้ ลวดขดเป็นตัวสร้างความปั่นป่วน ใส่ภายในท่อทดสอบซึ่งมีการใส่ใบปิดไว้ภายในลวดขดตลอด ความยาวเพื่อสร้างการไหลแบบหมุนวนบริเวณผิวท่อทดสอบ อิทธิพลของค่าอัตราส่วนระยะพิชต์ลวดขด (P_c) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวด (d_c) และอัตราส่วนระยะพิชต์ใบปิด (P) ต่อความกว้างใบปิด (W), $[CR : y]$ ในการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานใน ท่อกลมที่ใช้ในการทดสอบ อัตราการไหลของอากาศใช้ทดสอบที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Numbers, Re) ระหว่าง 3000 – 20,000 ผลจากการทดลองนำไปเปรียบเทียบกับกรณีใส่ลวดขดหรือใบปิดอย่างเดียวในท่อผิวเรียบ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการใส่ลวดขดพร้อมใบปิดสามารถทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีใส่ลวดขดหรือใบปิดอย่างเดียว การใส่ลวดขดและใบปิดร่วมกันที่ค่าอัตราส่วนการบิดและอัตราส่วนลวดขดที่ค่าร้อยละ จะสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าค่าอัตราส่วนการบิดและอัตราส่วนลวดขดที่มีค่าสูงๆ ภายใต้เงื่อนไขที่เหมือนกัน **P. Promvong et al. [2]** ศึกษาอิทธิพลของการติดตั้งวงแหวน (VR) เอียงทำมุม 30° ภายในท่อถ่ายเทความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่และการทดลองได้ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ 1) อัตราส่วนความกว้างวงแหวน ($BR = B / D = 0.1, 0.15$ และ 0.2) และ 2) อัตราส่วนระยะพิชต์ วงแหวน ($PR = P / D = 0.5, 1.0, 1.5$ และ 2.0) ใช้อากาศเป็นของเหลวในการทดสอบ สำหรับเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 5000 ถึง 26,000 มีปัจจัยให้วงแหวนที่ใช้สร้างวอร์เทกซ์หมุนอยู่ในท่อเพื่อช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อน โดยอัตราส่วนความกว้างวงแหวน (BR) จะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันภายในท่อได้ดีที่สุด ซึ่งผลการทดลองพบว่าค่าการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันที่ค่าอัตราส่วนความกว้างวงแหวน (BR) จะให้ค่าสูงกว่าท่อผนังเรียบ โดยเฉพาะค่า $BR = 0.2$ จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันมากกว่าอัตราส่วนความกว้างวงแหวน $BR = 0.15$ และ 0.1

ตามลำดับ อย่างไรก็ตามอิทธิพลของการติดตั้ง วงแหวน (VR) ที่ $BR = 0.1$ และระยะพิชต์ $PR = 0.5$ จะให้ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการถ่ายเท ความร้อนที่ดีที่สุด **S. Chokphoeophon et al. [3]** บทความนี้ ได้ทำการศึกษาอิทธิพลการจัดวางแบบ Wing Vortex Generators (WVGs) เพื่อช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและการทดลองเป็นแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ โดยมีท่อไหลอยู่ช่วงเรย์โนลด์ ตั้งแต่ 5300 – 24,000 จากการทดลอง (WVGs) ได้ทำการศึกษาที่มุม 30° ระยะพิชต์ ($RP = P / D$) และอัตราส่วนความกว้าง ($RB = E / D$) ซึ่งผลการทดลองพบว่าที่ระยะพิชต์และอัตราส่วนความกว้าง ต่างๆ เมื่อเทียบกับท่อเรียบหรือท่อที่ใส่ใบปิดขดตลอด จะพบว่าอิทธิพลการจัดวางแบบ Wing Vortex Generators (WVGs) จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานมากกว่า โดยค่าการถ่ายเทความร้อน (Nusselt) เฉลี่ยจะอยู่ในช่วง 2.03-2.34 แต่กรณีขดตลอดและใบปิดจะอยู่ในช่วง 1.35-1.59 **S. Skullong et al. [4]** งานวิจัยนี้ได้ศึกษาลักษณะความร้อนและการไหลภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งแผ่นเจาะติดปีก (WPT) ดังรูปที่ 2.23 การทดลองเป็นแบบฟลักซ์ ความร้อนคงที่ การไหลของอากาศจะมีค่าเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 4180 - 26,000 งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายของการใช้แผ่นเจาะติดปีก (WPT) คือ เพื่อการสร้างกระแสของการหมุนวนไปทำลายชั้นขอบเขตความร้อนบนผนังท่อ โดยทำการทดลองที่มุมเอียงของปีกเท่ากับ 30° ที่อัตราส่วนความสูงปีกต่อความสูงท่อ ($BR = 0.1, 0.15, 0.2, 0.25$ และ 0.3) และระยะพิชต์ ($PR = 0.5, 1.0$ และ 1.5) เพื่อหาการประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันเนื่องจากการไหลภายในท่อ ซึ่งผลการทดลองพบว่าค่าไนสเซลท์ (Nu) และแรงเสียดทาน (f) จะเพิ่มขึ้นที่ค่า BR สูงและจะลดลงที่ค่า BR ต่ำตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงสุด (TEF) เท่ากับ 1.71 เมื่อเทียบกับแผ่นที่มีการติดปีกและใบปิดจะให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงกว่าประมาณ 1.2 เท่า

สำหรับบทความฉบับนี้ได้ทำการศึกษาการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดยใช้เทคนิคการติดตั้งตัวสร้างความปั่นป่วนที่ทำให้เกิดการหมุนวนหรือการกระแทกบริเวณตัวสร้างความปั่นป่วน (vortex flow) สำหรับตัวสร้างความปั่นป่วนภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นแบบแหวนตัววี ซึ่งตัวสร้างความปั่นป่วนรูปแบบดังกล่าวสามารถเพิ่มความเข้มของกระแสหมุนวนสูงมาก (vortex flow) โดยทำการทดสอบที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Numbers, Re) จะอยู่ช่วงระหว่าง 5,000 – 25,000

สัญลักษณ์

A	= พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน (m^2)
C_p	= ความจุความร้อนจำเพาะ ($J/kg K$)
D	= เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)
f	= ตัวประกอบความเสียดทาน
f_p	= ตัวประกอบความเสียดทานท่อเปล่า
h	= สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($w/m^2 K$)
I	= กระแสไฟฟ้า (A)
k	= ค่าการนำความร้อน ($W/m K$)

L	= ความยาวท่อทดสอบ (m)
$\dot{m}$	= อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
Nu	= เลขนัสเซลท์
Nu_p	= เลขนัสเซลท์ของท่อเปล่า
P	= ความดัน (Pa)
Q_{air}	= อัตราการถ่ายเทความร้อนอากาศ (W)
Q_{conv}	= อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา (W)
Re	= เลขเรย์โนลด์
T_b	= อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)
T_i	= อุณหภูมิที่ทางเข้า ($^{\circ}\text{C}$)
T_o	= อุณหภูมิที่ทางออก ($^{\circ}\text{C}$)
$\bar{T}_w$	= อุณหภูมิที่ผิวท่อเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)
U	= ความเร็วเฉลี่ยของไหล (m/s)
V	= แรงดันไฟฟ้า (Voltage)
W	= ความกว้างแผ่นกัน (m)
y	= ระยะการบิด (m)
ρ	= ความหนาแน่นของไหล (kg/m^3)
μ	= ความหนืดสัมบูรณ์ (Pa s)
η	= สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (-)

2. สมมุติฐานและทฤษฎี

การพิจารณาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมหน้าตัดคงที่ที่มีการสอดใส่ชิ้นงานทดสอบไว้ภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน จำเป็นจะต้องพิจารณาทั้งในส่วนพลังงานที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนพัดลมและการถ่ายเทความร้อน โดยพลังงานที่พัดลมใช้ในการขับเคลื่อนอากาศให้ไหลผ่านท่อกลมสามารถพิจารณาได้คือ

$$\dot{W}_p = Q\Delta P \quad (1)$$

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

$$\Delta P = \rho_{water} gh \quad (3)$$

การสมดุลพลังงานกรณีฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Constant Heat flux)

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p(T_i - T_o) = hA_s(\bar{T}_s - T_b) \quad (4)$$

$$\text{โดยที่ } T_b = (T_o + T_i)/2$$

ค่าตัวเลขนัสเซลล์ (Nusselt Number, Nu_D)

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

ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Raynold number, Re)

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} \quad (6)$$

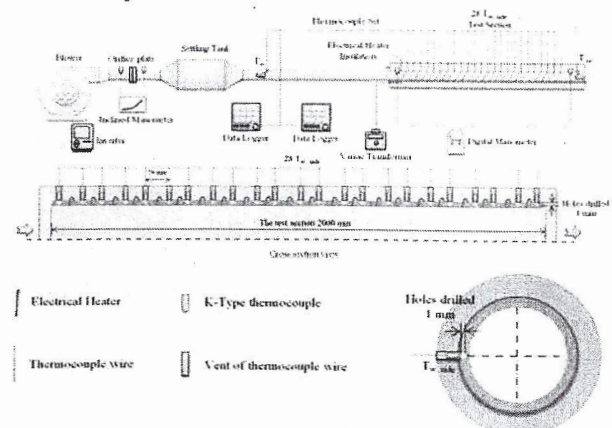
ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (η_{pp})

$$TEF = (Nu_T / Nu_p) / (f_T / f_p)^{1/3} \quad (7)$$

3. อุปกรณ์ทดลองและวิธีการทดลอง

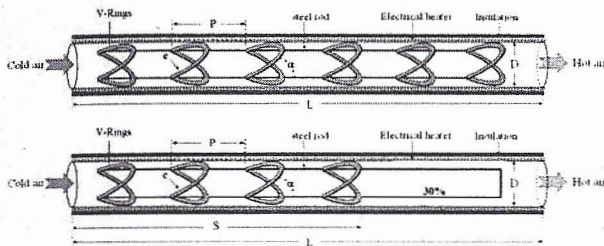
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ตามรูปที่ 1 โดยใช้เครื่องกำเนิดลม (blower) ขนาด 2 HP เป็นแหล่งกำเนิดลม ซึ่งควบคุมปริมาณลมไหลเข้าเครื่องทดสอบโดยเครื่องควบคุมการจ่ายปริมาณกระแสไฟฟ้า (inverter) ของเครื่องกำเนิดลม โดยปริมาณลมแต่ละช่วงการทดลองจะถูกวัดโดยเครื่องมือวัดความเร็ว (orifice meter) อากาศที่ไหลเข้าสู่ชุดทดสอบจะต้องไหลผ่านท่อกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่เท่าเครื่องทดสอบและมีระยะมากกว่าหรือเท่ากับระยะ Hydrodynamic development length ซึ่งมีหน้าที่ทำให้การไหลของอากาศที่ไหลเข้าสู่ชุดทดสอบมีลักษณะเป็นการไหลแบบ fully develop และไหลเข้าเครื่องทดสอบ โดยเครื่องทดสอบได้มีการติดตั้งอุปกรณ์กำเนิดความร้อน (heater) ตลอดความยาวท่อขนาด 2000 มิลลิเมตร ที่ผิวท่อด้านนอกถูกติดตั้งสายวัดอุณหภูมิ (thermocouple type K) จำนวน 28 จุดตลอดความยาวท่อและที่ทางเข้าและทางออกของท่อ ได้ติดตั้งสายวัดอุณหภูมิแบบ RTD PT100 โดยสายวัดอุณหภูมิถูกเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องวัดอุณหภูมิ (Data logger) จำนวน 2 เครื่อง และที่ทางเข้าและทางออกของท่อมีการติดตั้งชุดวัดความดันตกคร่อม (Manometer)

ชิ้นงานทดสอบเป็นแบบแหวนวงรี (V-Shape Rings Turbulator) ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Nu) ตัวประกอบเสียดทาน (f) และสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TEF) โดยศึกษาที่ค่าอัตราส่วนการขวางการไหล (R_b)=0.15 ค่าอัตราส่วนระยะพิท (R_p) = 1.0 และค่าอัตราส่วนระหว่างส่วนที่ไม่ติดตั้งแหวนวงรีต่อความยาวท่อ (R_s) = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 ขนาดของแหวนวงรีมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวขนาด 48 มิลลิเมตรและยาว 2000 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยเครื่องทดสอบจะต้องมีการหุ้มฉนวนกันความร้อนอย่างดีเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนจากเครื่องกำเนิดความร้อนไหลออกสู่บรรยากาศภายนอก

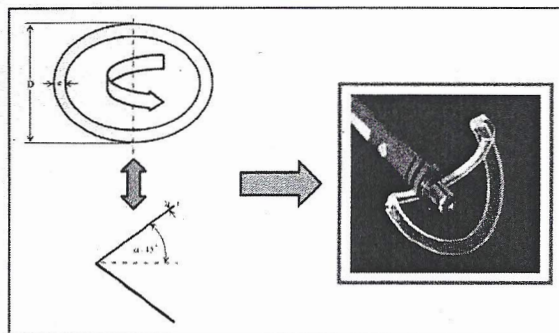


รูปที่ 1 โดยแกรมชุดทดสอบ

การทดสอบโดยการใส่แหวนรูปตัววีด้านข้าง (side) อยู่ตรงจุดวัดอุณหภูมิผิว หลังจากนั้นทำการเปิดเครื่องกำเนิดความร้อนโดยและเครื่องกำเนิดลม (blower) ทำการปรับปริมาณการไหลของอากาศให้ได้ตามที่ต้องการผ่านเครื่องควบคุมอัตราการไหล (inverter) ให้อยู่ในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ 5000 – 25000 โดยในแต่ช่วงที่ทดสอบ จะต้องรอให้อุณหภูมิผิวที่ทดสอบและอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของท่อคงที่ก่อนทำการบันทึกค่า โดยทำการวัดค่าอุณหภูมิผิวที่ทั้งหมด 28 จุดและอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของท่ออีก 2 จุด และบันทึกค่าความดันตกคร่อมระหว่างทางเข้าและทางออก หลังจากทดสอบเรียบร้อยแล้วทำการหมุนชิ้นงานให้แหวนชิ้นงานด้านบน (top) อยู่ตรงจุดวัดอุณหภูมิผิว และทำการทดสอบอีกรอบ



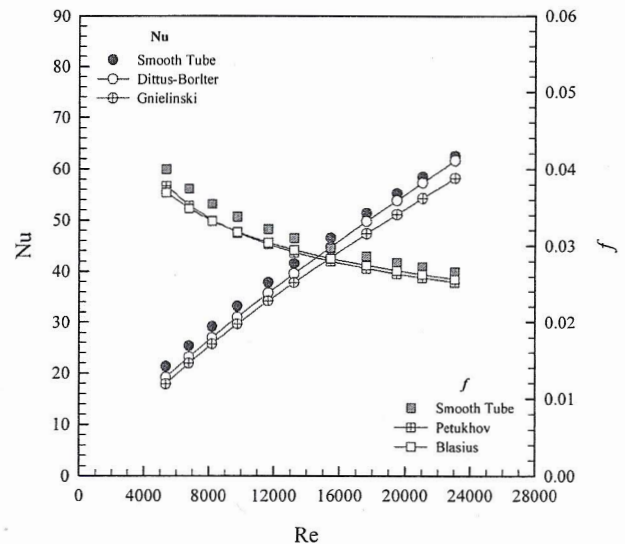
รูปที่ 2 ลักษณะการจัดวางแหวนรูปตัววี



รูปที่ 3 ลักษณะแหวนรูปตัววีที่ค่า $R_g = 0.15$

4.ผลการทดลอง

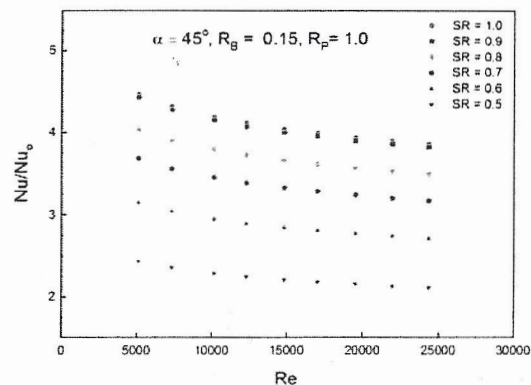
จากรูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ในช่วง $5000 < Re < 25000$ และค่าตัวเลขนัสเซลล์ (Nusselt numbers; Nu) เป็นการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซลล์ที่ได้จากการทดสอบท่อผิวเรียบกับสหพันธ์ของ Dittus-Borltter และค่าตัวประกอบเสียดทาน (f) ได้เปรียบเทียบกับสหพันธ์ของ Blasius จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าตัวเลขนัสเซลล์และตัวประกอบเสียดทานมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์ และ ตัวเลขนัสเซลล์ของท่อเปล่า

จากรูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวเลขนัสเซลล์กรณีที่มีการใส่แหวนรูปตัววีที่มีค่า R_s ต่างๆ จากการทดลองพบว่าการใส่แหวนรูปตัววีที่มีค่า R_s ต่างๆ สามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้ โดยแหวนรูปตัววีที่มีค่า $R_s = 1.0$ (แหวนถูกติดตั้งเต็มตลอดความยาวท่อ) และ 0.9 สามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้ใกล้เคียงกัน และลดลงที่ค่า $R_s = 0.8, 0.7, 0.6$ และ 0.5 ตามลำดับ การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากท่อผิวเรียบเกิดจากการใส่แหวนรูปตัววีภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจะไปสร้างการไหลแบบวน (vortex flow) บริเวณแหวนรูปตัววีส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สูงกว่าบริเวณที่ไม่มีแหวนรูปตัววี

สำหรับการใส่แหวนรูปตัววีในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อสนใจค่าการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น (Nu/Nu_0) พบว่าการใส่แหวนรูปตัววีสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้สูงสุดที่ค่า $R_s = 1.0$ และ 0.9 อยู่ในช่วง 3.8-4.4 จากท่อผิวเรียบ

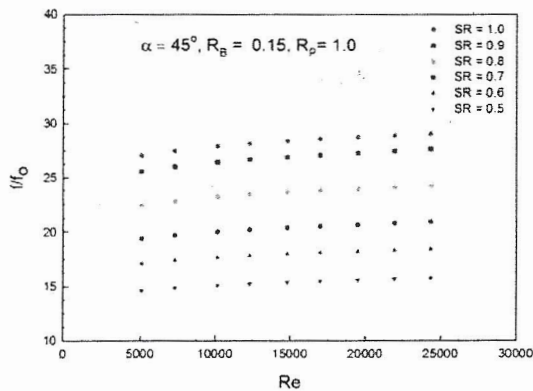


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวเลขนัสเซลล์

จากรูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และสัดส่วนตัวประกอบเสียดทานกรณีที่มีการใส่แหวนรูปตัววีที่มีค่า R_s ต่างๆ จากการทดลองพบว่าการใส่แหวนรูปตัววีที่มีค่า R_s ต่างๆ

สามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้ โดยหาเลขเรย์โนลด์ที่ค่า $Re = 1.0$ จะทำให้เกิดแรงต้านของอากาศสูงสุดและลดลงที่ค่า $Re = 0.9, 0.8, 0.7, 0.6$ และ 0.5 ตามลำดับ เนื่องจากการใส่แหวนรูปตัววีในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจะสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้นได้ แต่ผลของการใส่แหวนรูปตัววีจะไปขวางการไหลภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้อากาศภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนมีการไหลในรูปแบบที่เปลี่ยนไปในลักษณะเป็นกลุ่มกระแสไหลวน ส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นจากท่อผิวเรียบ

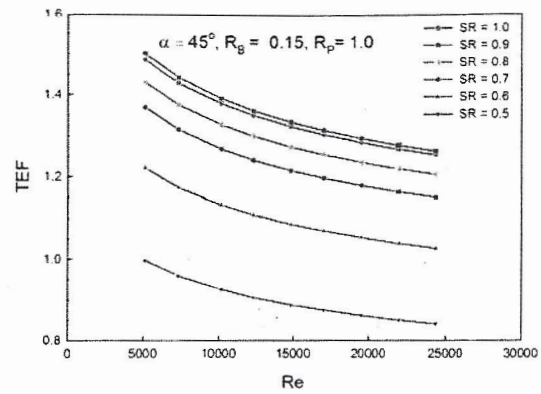
สำหรับการใส่แหวนรูปตัววีในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อสนใจค่าตัวประกอบเสียดทานที่เพิ่มขึ้น (f/f_0) พบว่าการใส่แหวนรูปตัววีสามารถทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ค่า $Re = 1.0$ อยู่ในช่วง 27-29 เท่าจากท่อผิวเรียบ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และสัดส่วนตัวประกอบเสียดทาน

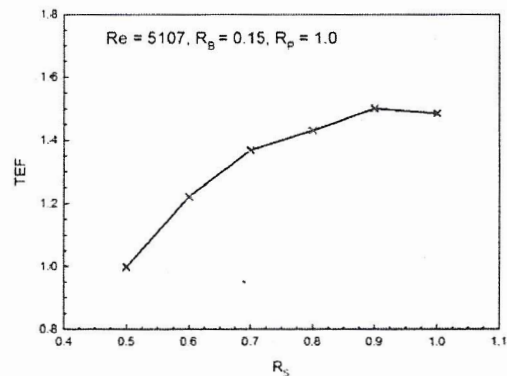
จากรูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์ และสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกรณีที่มีการใส่แหวนรูปตัววีที่มีค่า Re ต่างๆ ผลของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานจากการใส่แหวนรูปตัววีที่ค่า Re ต่างๆ กรณีใดสามารถดึงสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนออกมาได้สูงสุดโดยนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังขับพัดลมเดียวกับท่อผิวเรียบ พบว่าแหวนรูปตัววีที่ค่า $Re = 0.9$ จะทำให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงสุดและลดลงที่ค่า $Re = 1.0, 0.8, 0.7, 0.6$ และ 0.5 ตามลำดับ เนื่องจากการใส่แหวนรูปตัววีที่ค่า $Re = 0.9$ สามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้ใกล้เคียงกับค่า $Re = 1.0$ ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าน้อยกว่า เนื่องจากผลของช่องว่างของแหวนรูปตัววี 10% ที่หายไปไม่ส่งผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแต่กลับส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานลดลง

สำหรับการใส่แหวนรูปตัววีในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ยังพบว่าการใส่แหวนรูปตัววีสามารถทำให้ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ค่า $Re = 0.9$ อยู่ในช่วง 1.3-1.5 เท่าจากท่อผิวเรียบ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์ และสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

จากรูปที่ 8 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากการใส่แหวนรูปตัววีที่มีค่า Re ต่างๆ ที่ค่า $Re = 5107$ พบว่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าสูงสุดที่ค่า $Re = 0.9$ และมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วที่ค่า $Re = 0.8, 0.7, 0.6$ และ 0.5 ตามลำดับ ในขณะที่ค่า $Re = 1.0$ ก็มีค่าลดลงจากค่า $Re = 0.9$ เล็กน้อย



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนช่องว่างและสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

ตารางที่ 1 การถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบเสียดทานและสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

กรณีศึกษา	Nu/Nu_0	f/f_0	TEF
แหวนรูปตัววี: $Re=1.0$	3.9-4.5	27-29	1.25-1.49
แหวนรูปตัววี: $Re=0.9$	3.8-4.4	26-28	1.26-1.50
แหวนรูปตัววี: $Re=0.8$	3.5-4.0	22-24	1.21-1.43
แหวนรูปตัววี: $Re=0.7$	3.2-3.7	19-21	1.15-1.37
แหวนรูปตัววี: $Re=0.6$	2.7-3.1	17-18	1.03-1.22
แหวนรูปตัววี: $Re=0.5$	2.1-2.4	15-16	0.84-1.00

5. สรุปผลการทดลอง

จากการวิจัยพบว่าการใส่แหวนรูปตัววีในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้นถึง 4.4-4.5 เท่า จากท่อผิวเรียบที่ค่า $Re = 1.0$ และ 0.9 และยังพบว่าการใส่แหวนตัววีจะทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยจะเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ค่า $Re = 1.0$ เท่ากับ 29 เท่า และเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดที่ค่า $Re = 0.5$ เท่ากับ 15 เท่าจากท่อผิวเรียบ เมื่อทราบถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการใส่แหวนรูปตัววีในรูปของการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทาน ยังพบว่าค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับค่าตัวประกอบเสียดทานที่เพิ่มขึ้น (TEF) จะอยู่ที่ค่า $Re = 0.9$ และมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 1.5

เอกสารอ้างอิง

- [1] วิฑูรย์ ชิงฉ้ายทอง, "การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมโดยใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนเป็น Coiled-wire และใบพัด", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.
- [2] P. Promvong, N. Koolnapadol, M. Pimsarn and C. Thianpong, Thermal performance enhancement in a tube fitted with inclined vortex rings, Applied Thermal Engineering, 62 (2014) 285-292.
- [3] S. Chokphoephun, M. Pimsarn, C. Thianpong and P. Promvong, Heat transfer augmentation in a circular tube with winglet vortex generators, Chinese Journal of Chemical Engineering, 23 (2015) 605-614.
- [4] S. Skullong, P. Promvong, C. Thianpong and M. Pimsarn, Heat transfer and turbulent flow friction in a round tube with staggered-winglet perforated-tapes, International Journal of Heat and Mass Transfer, 95 (2016) 230-242.