

การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่มีสปริง

Enhancement of Heat Transfer in a circular tube fitted with coil wires

วิฑูรย์ ชิงถ้วยทอง^{1*} สมิทธี เอี่ยมสะอาด² ดำริห์ จันทรแสงสุข¹ และ พงษ์เจต พรหมวงศ์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 0-2326-4197 โทรสาร 0-2326-4198 *อีเมล boy_8013@hotmail.com

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพฯ 10500

โทร 0-2988-3666 ต่อ 24 โทรสาร 0-2988-3666 ต่อ 24

Witoon Chingtuaythong^{1*} Smith Eiamsa-ard² Dumri Jansangsuk¹ and Pongjet Promvongse¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok

10520 Tel 0-2326-4197 Fax 0-2326-4198 * E-mail: boy_8013@hotmail.com

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok 10530

Tel 0-2988-3666 ext. 24 Fax 0-2988-3666 ext. 24

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมโดยการติดตั้งสปริงรูปแบบต่างๆภายในท่อพื้นที่หน้าตัดคงที่มีพลักซ์ความร้อนคงที่ (constant heat flux) ทำการศึกษาผลกระทบบของอัตราส่วนระยะพิท (P) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดสปริง (d), PR, การถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในท่อกลมที่ใช้ทดสอบ อัตราการไหลของอากาศทดสอบที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Numbers, Re) จะอยู่ช่วงระหว่าง 10,000 – 60,000 ที่ระยะ PR = 6, 8 และที่อัตราส่วน CPR = 8:6:4 และ CPR = 10:8:6:4 จัดวางสลับกัน โดยผลที่ได้จะทำการศึกษาเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยการเพิ่มของตัวเลขเรย์โนลด์และระยะ PR ที่สูงขึ้น

Keywords: การถ่ายเทความร้อน, สปริง, สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน, สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

Abstract

This paper presents an experimental study of heat transfer enhancement in a circular tube fitted with wire coils at a constant heat flux. Effects of ratio of pitch (P) to coil-wire diameter (d), PR, on heat transfer and friction loss in the tube are experimentally investigated. The air flow rate in this work is based on the Reynolds number at the tube inlet ranging from 10,000 to 60,000. The wire coils inserted are at PR = 6, 8 and at two varying combined pitch ratio, CPR = 8:6:4 and CPR = 10:8:6:4. The experimental result reveals that the heat transfer rate and friction loss from using the coil wires increase considerably with increasing Reynolds number and PR values.

Keywords: heat transfer, coil wires, friction factor, heat transfer coefficient

สัญลักษณ์

$\dot{W}_{in}$ = พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนอากาศ, W	d = เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวด, m	C_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะ, kJ/kg.K
Q = อัตราการไหลของของไหล, m^3/s	P = ระยะพิท, m	T_i = อุณหภูมิอากาศด้านทางเข้า, °C
Δp = ความดันตกคร่อมของของไหล, N/m ²	$\dot{m}$ = อัตราการไหลเชิงมวล, kg/s	T_o = อุณหภูมิอากาศด้านทางออก, °C
f = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	PR = อัตราส่วนพิทต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดที่ระยะพิทคงที่ (P/d)	h = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, W/m ² · K
ρ = ความหนาแน่นของของไหล, kg/m ³	CPR = อัตราส่วนพิทต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดที่ระยะพิทไม่คงที่ (Pn/d)	A_s = พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อน, m ²
L = ความยาวท่อ, m	$\dot{Q}$ = อัตราการถ่ายเทความร้อน, W	T_w = อุณหภูมิผิวเฉลี่ยผนังร้อน, °C
$\bar{V}$ = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s	k = สมบัติการนำความร้อน, W/m.K	ΔT_{lm} = ผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึม (LMTD)
D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ, m		Re = ค่าตัวเลขเรย์โนลด์
Nu_D = ค่าตัวเลขนัสเซลล์		μ = ค่าความหนืดสัมบูรณ์ของอากาศ, kg/m · s

1. บทนำ

ในปัจจุบันการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้มีการพัฒนาเพื่อต้องการลดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและต้นทุนในการผลิตในขณะที่อัตราการถ่ายเทความร้อนยังสูงอยู่ ซึ่งตัวแปรสำคัญในการลดขนาดและค่าใช้จ่ายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้นหรือการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน โดยการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนหรือการสร้างความปั่นป่วนของของไหลเป็นเทคนิคแบบหนึ่งที่ใช้ในการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนซึ่งในทางปฏิบัติสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น ซึ่งการไหลแบบหมุนวนสามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ การไหลแบบหมุนวนต่อเนื่อง (continuous swirl flow) และการไหลแบบหมุนวนเฉพาะช่วงเริ่มต้น (decaying swirl flow) การไหลแบบหมุนวนแบบต่อเนื่องจะเกิดการหมุนวนตลอดความยาวของท่อ ในขณะที่การไหลแบบหมุนวนเฉพาะช่วงเริ่มต้นจะเกิดการหมุนวนสูงสุดที่บริเวณช่วงต้นท่อและค่อยๆ เสื่อมสลายลงตามแนวแกนการไหล

สำหรับงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้สปริงติดตั้งภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อสร้างการไหลแบบหมุนวนภายในท่อซึ่งเป็นรูปแบบการไหลแบบหมุนวนแบบต่อเนื่องซึ่งส่งผลให้เกิดการหมุนวนของของไหลตลอดความยาว โดยส่งผลโดยตรงทำให้บริเวณชั้นขอบเขตความหนาและความร้อนบางลงและลดค่าความหนืดบริเวณผิวท่อส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น โดยสปริงเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจที่ใช้ในการศึกษาในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน โดยข้อมูลที่จะศึกษาจะนำไปเผยแพร่เกี่ยวกับเทคนิคแบบนี้ ในขณะที่เดียวกันการใช้เทคนิคแบบแผ่นบิดไม่ใช่อุปกรณ์ที่ดีที่สุดในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน [1] แต่ว่าอุปกรณ์แบบแผ่นบิดเป็นที่สนใจมากกว่าอุปกรณ์แบบสปริง เพราะอุปกรณ์ดังกล่าวถูกออกแบบสหพันธ์ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ ช่วงการเปลี่ยนแปลงการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน และการไหลแบบปั่นป่วน ศึกษาโดย Novozhilov and Migai [1] การสร้างสหพันธ์การถ่ายเทความร้อนสำหรับท่อที่ใช้สปริงในการไหลแบบปั่นป่วน การถ่ายเทความร้อนโดยการติดตั้งสปริงภายในท่อโดยใช้สาร non-Newtonian fluid โดย Oliver and Shoji [2]. การศึกษาการถ่ายเทความร้อนโดยใช้สปริงหลายรูปแบบในการความคิดพื้นฐานในการวิเคราะห์ exergy โดย Prasad and Shen [3]. Arici and Asan [4]

สำหรับบทความฉบับนี้ได้ทำการศึกษาการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดยทดสอบที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Numbers, Re) จะอยู่ช่วงระหว่าง 10,000 – 60,000 โดยการเว้นช่วงระยะพิท (P) สปริงที่ติดตั้งภายในท่อทดสอบที่ PR = 8, 6 และ CPR = 8:6:4, 10:8:6:4 ต่อการถ่ายเทความร้อนและแรงเสียดทานที่เกิดภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตามรูปที่ 1

2. ทฤษฎี

การพิจารณาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมหน้าตัดคงที่ที่มีการติดตั้งสปริงภายในจำเป็นต้องพิจารณา ทั้งในส่วนของพลังงานที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนพัลล์และการถ่ายเทความร้อนให้กับ

อากาศที่ไหลผ่าน โดยพลังงานที่พัลล์ใช้ในการขับเคลื่อนอากาศให้ไหลผ่านท่อกลมสามารถพิจารณาได้คือ

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

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

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

การสมดุลพลังงานกรณีฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Constant Heat flux)

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_i - T_o) = h A_s \Delta T_{lm} \quad (4)$$

โดยที่

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_o - \Delta T_i}{\ln(\Delta T_o / \Delta T_i)} \quad (5)$$

ค่าตัวเลขนัสเซลล์ (Nusselt Number, Nu_D)

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

ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Raynold number, Re)

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} \quad (7)$$

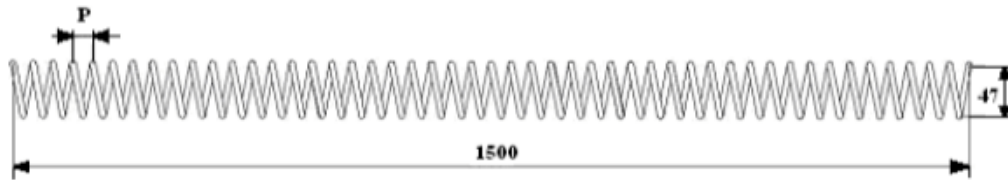
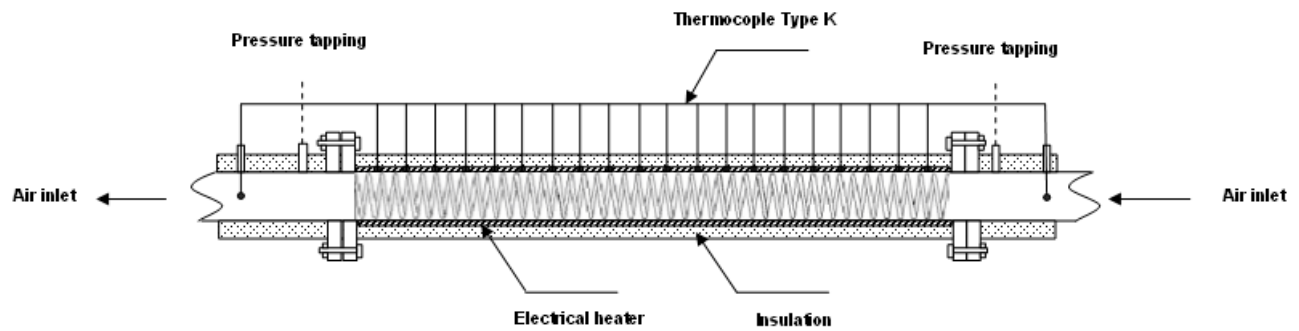
ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (η)

$$\eta = (Nu / Nu_o) / (f / f_o)^{1/3} \quad (8)$$

3. อุปกรณ์ทดลอง

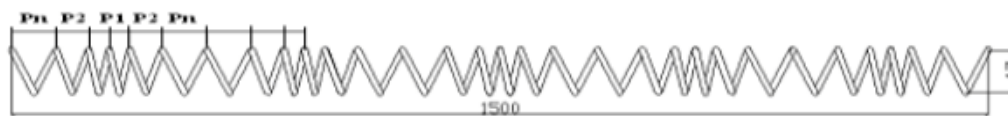
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ตามรูปที่ (1) โดยใช้เครื่องกำเนิดลม (Bower) (1) ขนาดพิทัก 10 HP เป็นแหล่งกำเนิดลม ซึ่งควบคุมปริมาณลมไหลเข้าเครื่องทดสอบโดยเครื่องควบคุมการจ่ายปริมาณกระแสไฟฟ้า (Inverter) ที่จ่ายให้แก่เครื่องกำเนิดลม (2) โดยปริมาณลมแต่ละครั้งในการทดสอบจะถูกวัดโดยเครื่องมือวัดความเร็วอากาศ (Rota meters) (3) อากาศที่จะไหลผ่านเข้าสู่ชุดทดสอบจะต้องไหลผ่านท่อกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่เท่าเครื่องทดสอบ และมีระยะเท่ากับ Hydrodynamic development length ซึ่งมีหน้าที่ทำให้เป็นการไหลของอากาศที่ไหลเข้าสู่ชุดทดสอบมีลักษณะเป็นการไหลแบบ fully Develop และไหลเข้าเครื่องทดสอบ โดยเครื่องทดสอบได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ให้ความร้อน (Electrical Heater) ที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ (9) ตลอดความยาวท่อขนาด 1000 วัตต์

ชิ้นงานที่ทดสอบประกอบด้วยสปริงขนาดต่างๆ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวคงที่ขนาด 5 มิลลิเมตร และ 1500 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยมีการปรับระยะพิทขนาดต่างๆ ซึ่งได้ใส่ไว้ในเครื่องทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวคงที่ขนาด 47 มิลลิเมตร



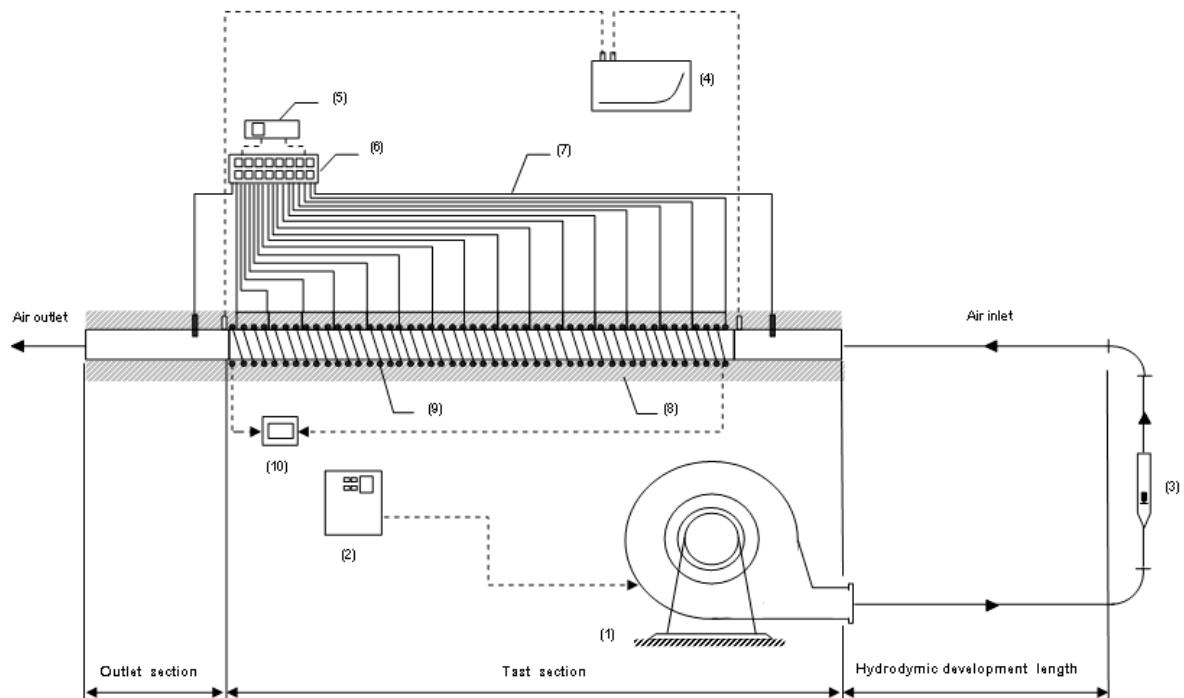
รูปที่ 1.1 PR = 6 ; P = 30

PR = 8 ; P = 40



รูปที่ 1.2 PR = 8:6:4 ; P1 = 20, P2 = 30, Pn = 40

PR = 10:8:6:4 ; P1 = 20, P2 = 30, Pn1 = 40, Pn2 = 50



รูปที่ 1. ชุดทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (1) Bower (2) Inverter (3) Rota meter (4) manometer (5) Digital thermometer (6) multi-channel selectors (7) Thermocouples (8) Insulation (9) Heating coil (10) Volt meter

และยาว 1500 มิลลิเมตรตามลำดับ ได้มีการให้ความร้อนด้วย Electrical Heater ขนาด 1,000 วัตต์ ซึ่งลักษณะของสปริงที่ใส่ภายในท่อมมี 4 แบบ ประกอบด้วย สปริงที่มีระยะ PR = 6, PR = 8, CPR = 8:6:4 และ CPR = 10:8:6:4 โดยอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าออกเครื่องทดสอบ และอุณหภูมิที่ผิวของท่อได้ถูกวัดโดยเทอร์โมคัปเปิล Type K จำนวนรวมทั้งสิ้น 16 จุด โดยวัดค่าจากอุปกรณ์ Digital thermometer ส่วนค่าความดันตกคร่อม ตรวจวัดโดยอุปกรณ์วัดความดันตกคร่อม (manometer)

เครื่องทดสอบจะต้องมีการหุ้มฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนจาก Electrical Heater ให้ออกสู่บรรยากาศภายนอก

4.วิธีการทดลอง

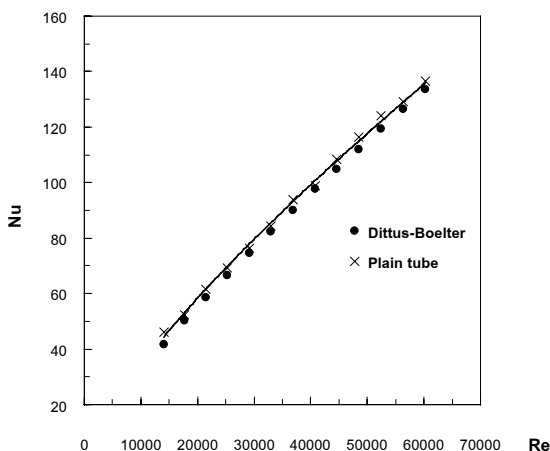
การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนผ่านท่อกลม โดยศึกษาจากการใส่สปริงแบบต่างๆ ที่มีการกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวคงที่ โดยการปรับเปลี่ยนระยะ PR แบบต่างๆ

เริ่มต้นการทดลองโดยการเปิดเครื่องกำเนิดลม (Blower) จากนั้นทำการปรับปริมาณการไหลของอากาศให้ได้ตามที่ต้องการ โดยควบคุมอัตราการไหล (Q) ให้อยู่ในช่วง 20 – 80 SCFM ($10000 \leq Re \leq 60000$) ในแต่ช่วงความเร็วของอากาศที่ทดสอบ จะต้องรอให้อุณหภูมิผิวท่อและอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของท่อคงที่ก่อนทำการบันทึกค่า โดยทำการวัดค่าอุณหภูมิผิวท่อทั้งหมด 14 จุดและอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของท่ออีก 2 จุด ในขณะเดียวกันก็ทำการบันทึกค่าความดันตกคร่อมด้วย

5.ผลการทดลอง

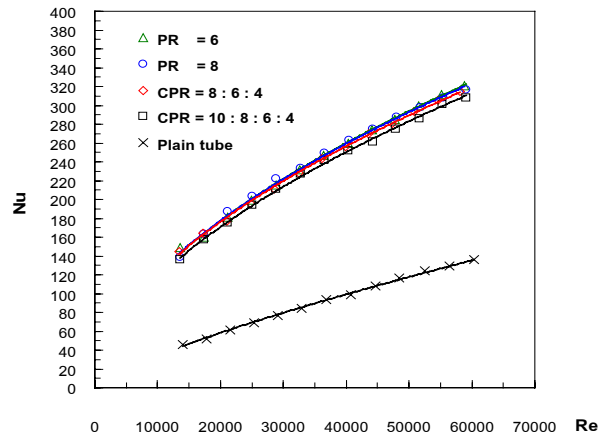
ผลของการทดลองแสดงในรูปความสัมพันธ์ต่างๆได้ดังนี้

จากรูปที่ 2 ค่าสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ในช่วง $10,000 < Re < 60,000$ และค่าตัวเลขนัสเซลล์ (Nusselt numbers; Nu) เป็นการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซลล์ที่ได้จากการทดสอบท่อเปล่ากับสหพันธ์ของ Dittus – Boelter ซึ่งจากการเปรียบเทียบจะเห็นว่าค่าตัวเลขนัสเซลล์มีความสัมพันธ์กัน



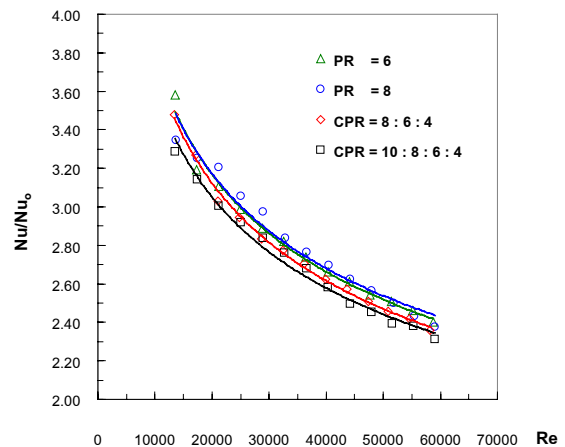
รูปที่ 2. ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์ และ ตัวเลขนัสเซลล์

จากรูปที่ 3 ค่าสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ในช่วง $10,000 < Re < 60,000$ และค่าตัวเลขนัสเซลล์ (Nusselt numbers; Nu) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งสปริงภายในและมีการจัดวางระยะ PR ต่างๆ จากเปรียบเทียบกับสปริงที่ระยะ PR จากกราฟจะพบว่าที่ระยะ PR = 8, 6 และ CPR = 8:6:4 ค่า Nu จะมีค่าใกล้เคียงกันที่ตัวเลขเรย์โนลด์เดียวกัน แต่ที่ระยะ CPR = 10:8:6:4 ค่า Nu จะมีค่าต่ำสุด



รูปที่ 3. ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์ และตัวเลขนัสเซลล์

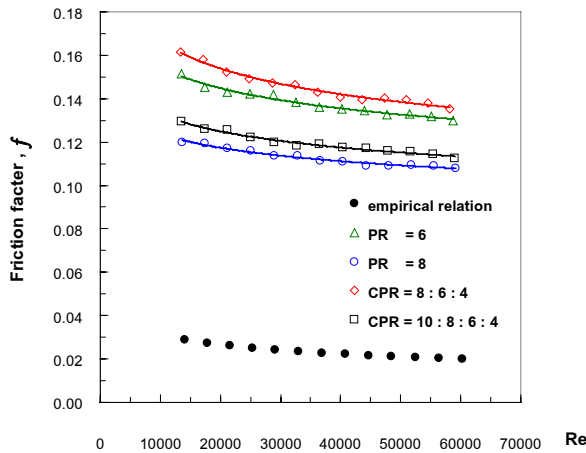
จากรูปที่ 4 หากเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่มีการติดตั้งสปริงภายในเครื่องแลกเปลี่ยนต่อท่อเปล่าในช่วง $10,000 < Re < 60,000$ จะพบว่าค่าการติดตั้งสปริงจะให้ค่า Nu สูงกว่าท่อเปล่าประมาณ 3.5 เท่า



รูปที่ 4. ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์ และอัตราส่วนตัวเลขนัสเซลล์

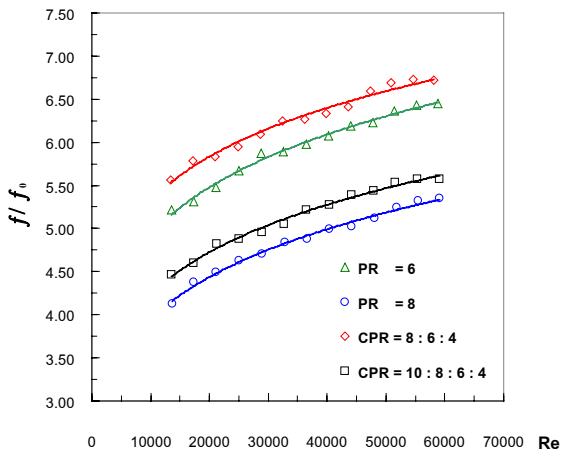
จากรูปที่ 5 ค่าสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ในช่วง $10,000 < Re < 60,000$ และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction factor; f) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งสปริงโดยการจัดวางระยะ PR แบบต่างๆ เปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่มีการติดตั้งสปริงภายใน (ท่อเปล่า) พบว่าที่ระยะ CPR = 8:6:4 มีค่า

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงซึ่งมีผลเนื่องมาจากชิ้นงานทดสอบแบบดังกล่าวมีระยะพิทไม่คงที่และระยะความห่างระหว่างท่อพิตน้อยโดยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระยะ CPR = 10:8:6:4 จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลง และที่ระยะ PR = 8 จะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำสุดที่ตัวเลขเรย์โนลด์เดียวกัน



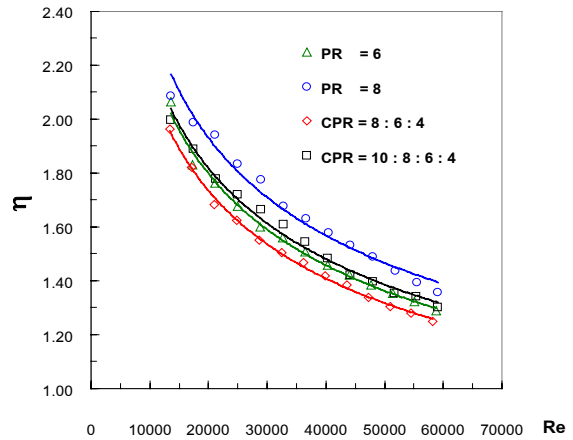
รูปที่ 5. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

จากรูปที่ 6 หากเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเสียดทานที่มีการติดตั้งสปริงภายในเครื่องแลกเปลี่ยนต่อท่อเปล่าในช่วง $10,000 < Re < 60,000$ จะพบว่าการติดตั้งสปริงจะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงกว่าท่อเปล่าโดยที่ระยะ CPR = 8:6:4 จะสูงประมาณ 5 - 6 เท่า ซึ่งมีค่าสูงสุด



รูปที่ 6. ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์ และสัดส่วนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

จากรูปที่ 7 พบว่าเมื่อทดลองการเพื่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ระยะ PR แบบต่างๆในช่วง $10,000 < Re < 60,000$ โดยการติดตั้งสปริงที่ระยะ PR = 8 จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับระยะต่างๆ และที่ระยะ CPR = 8:6:4 ประสิทธิภาพในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนค่อนข้างต่ำที่ตัวเลขที่ตัวเลขเรย์โนลด์เดียวกัน



รูปที่ 7. ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์ และค่าประสิทธิภาพ

6. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า การติดตั้งสปริงภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้เพิ่มสูงขึ้นได้ โดยการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับ รูปแบบการไหลของอากาศภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการติดตั้งสปริงภายในท่อจะช่วยให้การไหลแบบปั่นป่วนและการไหลแบบหมุนวนซึ่งส่งผลให้ค่า Nu มีค่าสูงขึ้น รวมถึงการจัดวางระยะพิทของสปริงแบบต่างๆ โดยรูปแบบของสปริงที่มีระยะ PR = 8 จะให้ค่า Nu สูงใกล้เคียงกับระยะ PR = 6 และ CPR = 8:6:4 (รูปที่ 3) แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (รูปที่ 5) ที่เกิดเนื่องจากการติดตั้งสปริงภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายในท่อจะเห็นได้ว่าที่สปริงที่ระยะ PR = 8 จะให้ประสิทธิภาพสูงสุด (รูปที่ 7) การติดตั้งสปริงภายในท่อโดยการจัดวางระยะพิทแบบต่างๆ จะสามารถเพิ่มค่า Nu ใกล้เคียงกัน แต่การเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าต่างกัน (รูปที่ 5)

จากการทดลองจะทราบว่า การติดตั้งสปริงภายในท่อจะส่งผลให้ชั้นความหนาของความร้อนบางลงและลดค่าความหนืดบริเวณผิวท่อส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น โดยการติดตั้งสปริงที่มีระยะ PR = 8 สามารถเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้สูงและเกิดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระยะดังกล่าวจะให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดในบทความฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Novozhilov JF, Migai VK. Intensifying convective heat transfer within tubes by means of induced roughness. *Teploenergetika* 1964; 11(9):60-3.
- [2] Oliver DR, Shoji Y. Heat transfer enhancement in a round tubes using different tube inserts; non-newtonian fluids. *Journal Chemical Engineering Resource and Design* 1992;70:558-64.
- [3] Prasad RC, Shen J. Performance evaluation using exergy analysis—application to wire-coil inserts in forced convection heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 1994;37(15):2297-2303
- [4] Arici ME, Asan H. Enhancement of turbulent flow heat transfer in tubes by means of wire coil inserts. *ASME, PD Advance in Heat Transfer* 1994;64:113-7.
- [5] พงษ์เจต พรหมวงศ์ “การถ่ายเทความร้อน” ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2542 หน้า 225-252.