

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่สอดใส่ชุดแผ่นบิด

Heat Transfer Enhancement in a Circular Tube Inserted with Twisted Tape Bundle

ธนาชัย มีสกุล^{1*}, กฤษณ์ เรืองพยุงค์ศักดิ์² และ สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด³

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

³ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

*ติดต่อ: E-mail: thanachai009@yahoo.com โทรศัพท์: 0928733798

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของบทความฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่สอดใส่ชุดแผ่นบิด (Twisted tape bundle) โดยแผ่นบิดจำนวน 6 ชิ้น จะถูกประกอบรวมกันเป็น 1 ชุด และเว้นระยะให้เกิดช่องว่างตรงบริเวณพื้นที่ส่วนแกนกลาง จุดประสงค์ข้อแรกเพื่อสร้างกระแสการไหลแบบหมุนควงปั่นป่วนและทำให้ความหนาของชั้นขอบเขตความร้อน (Thermal boundary layer) ลดลงอันจะส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนให้เกิดขึ้น จุดประสงค์ข้อที่สองเพื่อทำให้เกิดการชักนำมวลกระแสความร้อนที่มีมากบริเวณขีดติดผนังท่อให้ไหลหมุนวนเข้ามาสู่บริเวณส่วนแกนกลางของท่อพร้อม ๆ กับทำให้เกิดการผสมผสานกันของกระแสการไหลอย่างเต็มที่และบริเวณพื้นที่ส่วนกลางของท่อที่เป็นช่องว่างนี้จะสามารถช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทานลงได้ใช้ การทดลองใช้แผ่นบิดที่มีอัตราส่วนการบิด (y/W) ที่แตกต่างกัน 3 ค่า คือ 4.0, 5.0 และ 6.0 โดยแผ่นบิดที่มีอัตราส่วนการบิดที่เท่า ๆ กัน จำนวน 6 ชิ้นจะถูกประกอบเข้าด้วยกันเป็น 1 ชุด ทำการทดลองโดยใช้อากาศเป็นของไหล และให้ความร้อนที่ผนังท่อแบบสม่ำเสมอคงที่ตลอด ที่ช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ในช่วงเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ระหว่าง 6000 ถึง 20,000 ผลจากการทดลองที่ได้พบว่า การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการบิด (y/W) ที่ลดลง และเมื่อเทียบกับท่อเปล่าแล้วจะมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 1.17 - 1.60 และ 2.44 - 4.92 เท่า ตามลำดับ โดยการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับท่อเปล่าแล้วได้ค่าสูงสุดถึง 160 % จากชุดของแผ่นบิดที่มีอัตราส่วนการบิด $y/W = 4$ ที่ $Re = 16,000$

คำหลัก: การถ่ายเทความร้อน, แรงเสียดทาน, แผ่นบิด, การไหลแบบปั่นป่วน, ท่อกลม

Abstract

The object of this paper is study heat transfer enhancement in a circular tube inserted with a twisted tape bundle. Six twisted tapes were bunched to form one bundle that leaving space at a core region. The first purpose of twisted tape bundle is generating swirl flow, reducing thickness of thermal boundary layer and thus enhancing heat transfer. The second purpose of the bunched twisted tapes

would simultaneously draw massive fluid from wall region to core region and cause excellent fluid mixing. In addition, space appeared at the core region would has lower pressure drop. The twisted tapes with three different twist ratios ($y/W = 4.0, 5.0$ and 6.0) were individually formed. Then, six twisted tapes ($N=6$) with the same twist ratio were bunched together. The tests were conducted by using the air as fluid flow under the uniform heat flux and turbulent flow condition ($6000 \leq Re \leq 20,000$). The experimental results show that Nusselt number (Nu) and friction factor (f) are increased with decreasing of twist ratios (y/W). Compared with those of the plain tube, the heat transfer rates and friction factors of the enhanced tube are found between $1.17 - 1.60$ and $2.44 - 4.92$ times, respectively. The maximum of heat transfer rate is 160 % higher than that of the plain tube is obtained by using the twisted tape bundle with $y/W = 4.0$ at Re 16,000.

Keywords: Heat transfer, friction factor, twisted tape, turbulent flow, circular tube.

1. บทนำ

ในช่วง 2-3 ทศวรรษที่ผ่านมาปริมาณการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร การขยายตัวของชุมชนเมืองและการเจริญเติบโตของโรงงานอุตสาหกรรม ทำให้มีการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ดังนั้นการศึกษางานวิจัยด้านการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพอย่างสูงสุดจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อเป็นการตระหนักถึงการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า ลดต้นทุนค่าใช้จ่ายและช่วยลดผลกระทบต่าง ๆ ทางสิ่งแวดล้อม

วิธีการปรับปรุงเพื่อเพิ่มสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีอยู่หลายวิธี การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย มีงานวิจัยค้นคว้าทางด้านนี้ออกมาเป็นจำนวนมาก การแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการสอดใส่อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนและปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้นในระบบท่อกลมนี้จะส่งผลกระทบต่ออัตราการไหลในท่อให้ยาวนานขึ้นแล้วทำให้มีเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มมากขึ้นการไหลแบบหมุนวนและปั่นป่วนนี้จะทำให้ความหนาของชั้นขอบเขตความร้อนบริเวณผิวท่อลดลงซึ่งส่งผลช่วยให้อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดเพิ่มขึ้น แต่ก็จะทำให้เกิดแรงเสียดทานสูงขึ้นด้วยอันจะส่งผล

ต่อค่าสมรรถนะทางความร้อน ผลงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาที่ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับงานของชุดแผ่นบิดมีดังนี้

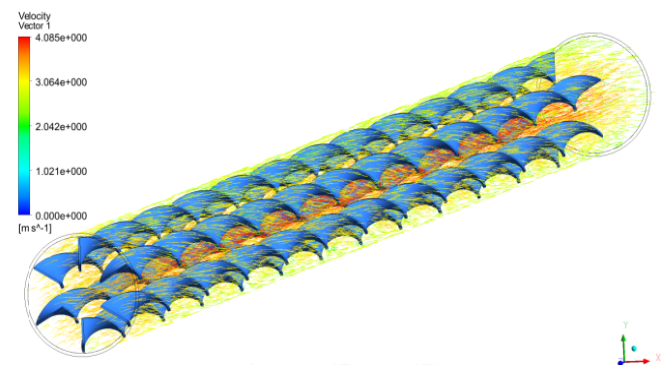
Eiamsa-ard et al. [1] ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะของการไหล ตัวประกอบเสียดทานและการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่สอดใส่แผ่นบิดคู่ โดยจัดวางแผ่นบิดให้เกิดกระแสการไหลแบบหมุนวนสวนทางกันและหมุนวนตามกัน การศึกษานี้ใช้แผ่นบิดเดี่ยวเพื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับแผ่นบิดคู่ อัตราส่วนการบิดใช้ที่ (y/W) = 2.5, 3.0, 3.5 และ 4.0 ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน Chokphoemphun et al. [2] ได้ทำการทดลองในท่อกลมที่สอดใส่แผ่นบิดหลายชั้นโดยมีทั้งแบบเดี่ยว แบบคู่ แบบสามชั้น และแบบสี่ชั้น จัดวางแผ่นบิดในรูปแบบที่มีทิศทางการหมุนบิดแตกต่างกันเพื่อให้เกิดกระแสการไหลแบบหมุนวนสวนทางกันและหมุนวนตามกัน การทดลองนี้ใช้จำนวนแผ่นบิด $N = 1, 2, 3$ และ 4 ชั้น โดยที่แผ่นบิดแบบเดี่ยวจะใช้อัตราส่วนการบิดที่ (y/W) = 4.0 และ 5.0 ส่วนแผ่นบิดแบบคู่ แบบสามชั้น และแบบสี่ชั้นจะใช้อัตราส่วนการบิดคงที่เท่ากับ 4.0 ต่อมา Bhuiya et al. [3] ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานของแผ่นบิดแบบคู่ที่เจาะรูพูนแบบหมุนวนสวนทางกัน ใช้ค่าความพูน (R_p) ที่แตกต่างกัน 4 ค่า คือ 1.2, 4.6, 10.4 และ 18.6%

โดยเจาะรูขนาด 2, 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร ตามลำดับเพื่อสร้างกระแสการไหลแบบหมุนวนสวนทางกัน ใช้อัตราส่วนการบิดคดที่ $(y/W) = 1.92$ จำนวนแผ่นบิด 2 ชั้น ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน Vashistha et al. [4] ได้ทำการทดลองในท่อกลมที่สอดใส่แผ่นบิดแบบหลายชั้นซึ่งติดตั้งแผ่นบิดให้เกิดกระแสการไหลแบบหมุนวนตามกันและหมุนวนสวนทางกัน ใช้จำนวนแผ่นบิด $(N) = 1, 2$ และ 4 ชั้น อัตราส่วนการบิดที่ $(y/W) = 2.5, 3.0$ และ 3.5 ถัดมา Singh et al. [5] ได้ทำการทดลองในท่อกลมที่สอดใส่แผ่นบิดแบบหลายชั้น ติดตั้งร่วมกับแหวนวงกลม (Multiple twisted tapes with solid rings) ใช้อัตราส่วนระยะห่างของแหวนวงกลมที่วางเรียงกันในท่อต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (SRT, VD) เท่ากัน 1 และ 2 อัตราส่วนการบิดที่ $(y/W) = 2.0, 3.0$ และ 4.0 จำนวนแผ่นบิด $(N) = 1, 2, 3$ และ 4 ชั้น ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ที่เลขเรย์โนลด์ส์ 6300 – 22,500 ล่าสุด Suri et al. [6] ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สอดใส่แผ่นบิดแบบหลายชั้น (4 ชั้น) พร้อมเจาะรูรูปสี่เหลี่ยมและติดปีกสี่เหลี่ยมเพิ่ม (Square wings in multiple square perforated twisted tapes) ใช้อัตราส่วนความลึกของปีก (W_d/W_T) ในช่วง 0.042–0.167 เลือกใช้อัตราส่วนรูพรุนต่อความกว้างแผ่นบิด (a/W_T) ที่ 0.25 และอัตราส่วนการบิดที่ $(T_L/W_T) = 2.5$ เท่า ใช้จำนวนแผ่นบิด 4 ชั้น ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ที่เลขเรย์โนลด์ส์ 5000–27,000

จากการศึกษาในงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาพบว่าแผ่นบิดคู่หรือแบบหลายชั้นจะมีการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าการสอดใส่แผ่นบิดเพียงชั้นเดียว แผ่นบิดที่มีการเจาะรูเพิ่มความพรุน หรือแบบที่ติดปีกเพิ่มเติมจากแผ่นบิดแบบธรรมดาจะได้ค่าสมรรถนะทางความร้อนที่เพิ่มขึ้นมากกว่า แผ่นบิดแบบหมุนวนสวนทางกันจะมีค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงกว่าหมุนวนทางเดียวกัน และแผ่นบิดสี่ชั้นแบบเจาะรูสี่เหลี่ยมเพิ่มความพรุนพร้อมติด

ปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม [6] ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนได้สูงสุดถึง 6.96 เท่าของท่อเปล่า และมีค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงสุดถึง 4.1 ในช่วงของการไหลแบบปั่นป่วน

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเอาแนวคิดจากงานวิจัยในอดีตหลายฉบับมาปรับปรุงต่อ โดยนำจุดเด่นของแต่ละงานวิจัยมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน เช่นแผ่นบิดชุดสี่ชั้นของ Chokphoemphun et al. [2] แผ่นบิดหลายชั้นเจาะรูและติดปีกเพิ่มของ Suri et al. [6] แผ่นบิดแบบแคบสั้นและมีช่องว่างตรงกลางของ Li et al. [7] สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้เป็นการตั้งสมมติฐานของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการสอดใส่ชุดแผ่นบิด 6 ชั้น ที่ถูกประกอบรวมกันเป็น 1 ชุด ที่ได้เว้นระยะให้เกิดช่องว่างตรงบริเวณพื้นที่ส่วนแกนกลาง ซึ่งจากการใช้โปรแกรม CFD เข้ามาช่วยทำการวิเคราะห์และออกแบบชุดการทดลองเบื้องต้นนั้นจะช่วยให้เราสามารถเห็นถึงพฤติกรรมของการไหลในท่อของชิ้นงานการทดลองนี้ได้ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงพฤติกรรมการไหล Velocity Vector ของการทดลองชุดแผ่นบิดประกอบ 6 ชั้น

2. ทฤษฎีที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษาผลกระทบและพฤติกรรมในการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่มีการสอดใส่อุปกรณ์ช่วยสร้างการไหลแบบหมุนวนปั่นป่วนนี้มีตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ ดังนี้ คือ เลขเรย์โนลด์ส์ (Re) ตัวประกอบเสียดทาน (f)

เลขนัสเซิลท์ (Nu) และสมรรถนะทางความร้อน (η) ซึ่ง
เลขเรย์โนลด์ส์มีสมการในการคำนวณหา ดังนี้

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (1)$$

การคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนแบบการพา
สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\dot{m} C_{p,air} (T_o - T_i) = h A (\tilde{T}_w - T_b) \quad (2)$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนจะได้
จากสมการดังนี้

$$h = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{A_s (\tilde{T}_w - T_b)} \quad (3)$$

การถ่ายเทความร้อนในทางทฤษฎีสามารถหาได้จาก
สมการดังนี้

$$Nu = \frac{h D}{k} \quad (4)$$

ตัวประกอบเสียดทานหาได้จากสมการดังนี้

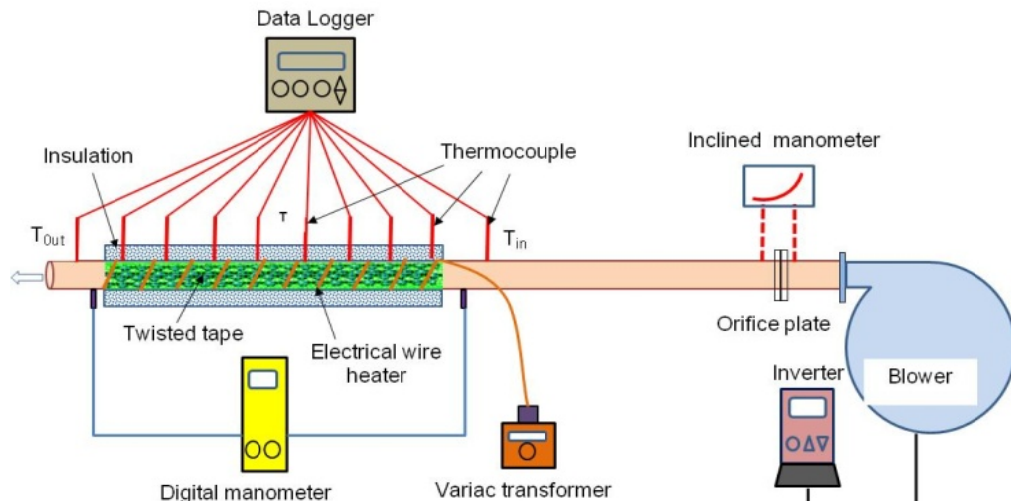
$$f = \frac{\Delta P}{\left(\frac{L}{D}\right) \left(\rho \frac{V^2}{2}\right)} \quad (5)$$

ค่าสมรรถนะทางความร้อน (Thermal
enhancement factor, η) เมื่อนำสัดส่วนของการถ่ายเท
ความร้อนเทียบกับสัดส่วนของตัวประกอบเสียดทานจะ
สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

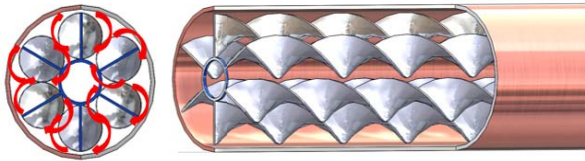
$$\eta = \frac{(Nu / Nu_p)}{(f / f_p)^{1/3}} \quad (6)$$

3. อุปกรณ์และการทดลอง

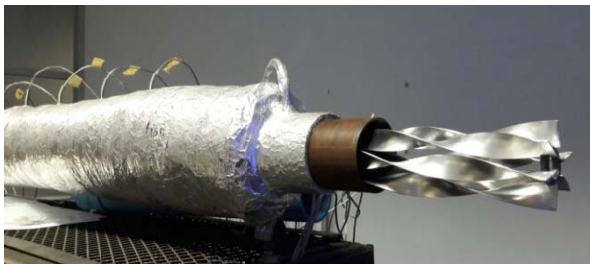
ในการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะ
ทางความร้อนในท่อกลมที่สอดใส่ชุดแผ่นปิดเพื่อช่วยเพิ่ม
การถ่ายเทความร้อนและลดตัวประกอบเสียดทานนี้มีการ
จัดเตรียมเครื่องมือชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองดังแสดง
ในรูปที่ 2 โดยท่อทดสอบใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าน
ศูนย์กลางภายใน 65 มิลลิเมตร ความยาวท่อช่วงทดสอบ
1.5 เมตร ความยาวของท่อรวมทั้งหมด 4.20 เมตร แผ่น
ปิดทำจากแผ่นอลูมิเนียม ความหนา 1.0 มิลลิเมตร
กว้าง 18 มิลลิเมตร ยาว 1,500 มิลลิเมตร มีอัตราส่วน
การปิด (y/W) = 4.0, 5.0 และ 6.0 ซึ่งในแต่ละชุดจะใช้
แผ่นปิดที่มีอัตราส่วนการปิดเท่ากันจำนวน (N) = 6 ชั้น
ทำการจัดวางแผ่นปิดให้เกิดกระแสการไหลแบบหมุน
วนไปทางเดียวกัน และใช้แหวนพลาสติกยูพีวีซี ขนาดเส้น
ผ่านศูนย์กลาง 26 มิลลิเมตร กว้าง 3 มิลลิเมตร มา
รองรับแผ่นปิดไว้ทุก ๆ ระยะ 750 มิลลิเมตร เพื่อให้เกิด
ช่องกลางตรงส่วนกลางของท่อ เมื่อประกอบรวมกันเป็น
ชุด 6 ชั้น แล้วจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรวม 62
มิลลิเมตรและมีรูกลวงตรงกลาง 24 มิลลิเมตร ดังแสดงใน
รูปที่ 3 และรูปที่ 4 สำหรับชุดท่อทดสอบได้ทำการติดตั้ง
หัววัดอุณหภูมิ Thermocouple type K รวมทั้งหมด 16
จุด การทำงานของชุดทดลองนี้จะเริ่มโดยการเปิดเครื่อง
เป่าอากาศ (Blower) ที่มีชุดควบคุมการทำงานด้วย
อินเวอร์เตอร์ ทำการเป่าอากาศให้ไหลเข้าไปในระบบท่อ
ของชุดทดลอง ซึ่งมีชุดออริฟิสและมานอมิเตอร์เพื่อวัด
อัตราการไหลของอากาศตรงทางเข้า แล้ววัดความดันตก
คร่อมในช่วงของท่อทดสอบโดยใช้มานอมิเตอร์ ให้ความ
ร้อนแบบคงที่ที่บริเวณผนังท่อด้านนอกโดยการพัน
ขดลวดให้ความร้อนแล้วทำการหุ้มฉนวนป้องกันการ
สูญเสียความร้อนอีกชั้นหนึ่ง ทำการวัดอุณหภูมิที่จุด
ทางเข้า-ทางออก และที่ผนังท่อรวมทั้งหมด 16 จุด ตาม
ตำแหน่งที่ได้ติดตั้งไว้ ค่าของอุณหภูมิที่วัดได้ทุกจุดจะถูก
ส่งไปยังเครื่องเก็บบันทึกข้อมูล (Data logger) เพื่อ
นำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป



รูปที่ 2 ชุดเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3 แสดงชุดแผ่นบิดที่ประกอบจำนวน (N) = 6 ชั้น



รูปที่ 4 แสดงการติดตั้งชุดแผ่นบิด 6 ชั้นลงในท่อทดสอบ

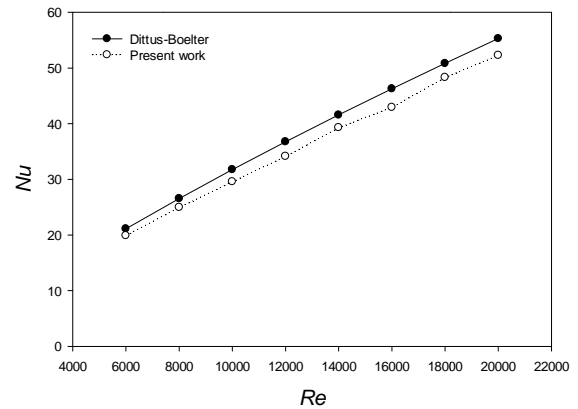
4. ผลการทดลอง

การทดลองเพื่อศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานของท่อเปล่าจะถูกเทียบกับสหสัมพันธ์ท่อเปล่าของ Dittus-Boelter [8] ซึ่งผลการทดลองค่า Nu ที่ได้มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ประมาณ 6% ดังแสดงในรูปที่ 5

สหสัมพันธ์ Dittus-Boelter แสดงในสมการดังนี้

$$Nu_d = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (7)$$

เมื่อ $5000 \leq Re \leq 20,000$



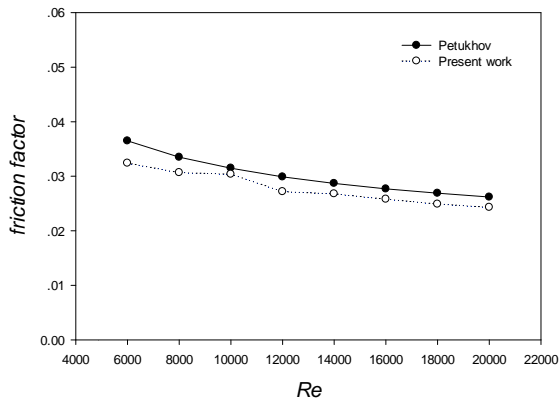
รูปที่ 5 แสดงการถ่ายเทความร้อน (Nu) ของท่อเปล่าเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter

ส่วนค่าของตัวประกอบเสียดทานถูกนำมาเทียบกับสหสัมพันธ์ท่อเปล่าของ Petukhov [8] ซึ่งค่า f ที่ได้มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยและมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ประมาณ 8% ดังแสดงในรูปที่ 6

สมการตัวประกอบเสียดทาน สหสัมพันธ์ของ
Petukhov แสดงในสมการได้ดังนี้

$$f = (0.79 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (8)$$

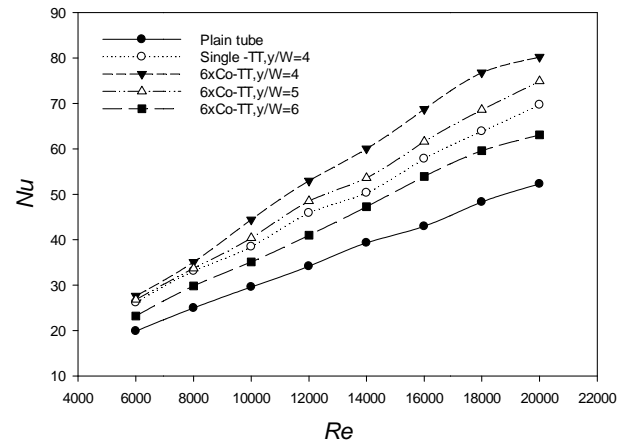
สำหรับใช้ในช่วง $Re > 5000$



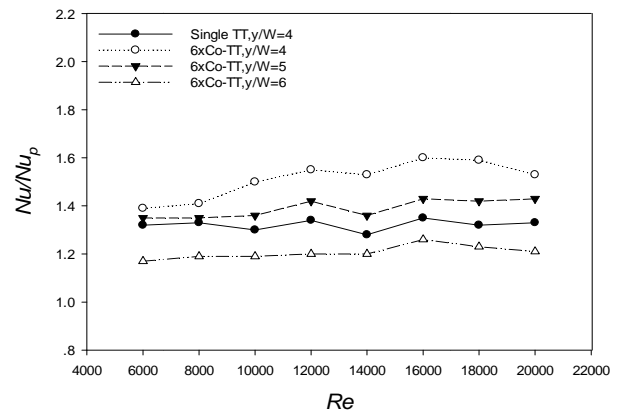
รูปที่ 6 แสดงตัวประกอบเสียดทาน (f) ของท่อเปล่าเทียบกับ
กับสหสัมพันธ์ของ Petukhov

4.1 ผลการถ่ายเทความร้อน

การสอดใส่แผ่นบิดแบบกลวงชุด 6 ชั้นนี้ทำให้เกิด
กระแสการไหลแบบหมุนวนและปั่นป่วนที่มากขึ้น มีการ
ผสมผสานกันของกระแสการไหลอย่างเต็มที่ซึ่งพฤติกรรม
ของการไหลทั้งสองอย่างนี้จะช่วยส่งเสริมเพิ่มพูนกันให้
การถ่ายเทความร้อนเกิดเพิ่มมากขึ้น จากรูปที่ 7 แสดงให้
เห็นว่าการถ่ายเทความร้อน (Nu) เพิ่มขึ้นตามค่าเลขเรย์
โนลด์ส์ (Re) ที่สูงขึ้น เนื่องจากเกิดกระแสการไหลที่
ปั่นป่วนมากขึ้นตามค่า Re ที่สูงขึ้น และชุดแผ่นบิดที่มี
อัตราส่วนการบิด (y/W) ที่ต่ำกว่า จะเกิดกระแสการไหล
แบบปั่นป่วนที่สูงมากกว่าจึงส่งผลให้ค่า Nu สูงขึ้นด้วย
โดย Nu ของชุดแผ่นบิด $6xCo-TT, y/W = 4$ มีค่าสูงกว่า
ชุดอื่น ๆ และมีค่าสูงสุดถึง 80.23 ที่ $Re = 20,000$ ใน
ส่วนรูปที่ 8 แสดงสัดส่วนเลขนัสเซลท์ของชุดแผ่นบิด
เทียบกับท่อเปล่า (Nu/Nu_p) ที่เลขเรย์โนลด์ส์ (Re) ต่าง ๆ
โดยชุดแผ่นบิด $6xCo-TT, y/W = 4$ มีค่าสูงกว่าชุดอื่น ๆ
อยู่ในช่วง 1.39 – 1.60 เท่า และชุดแผ่นบิด $6xCo-$
 $TT, y/W = 6$ มีค่าต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 1.17 – 1.20 เท่า



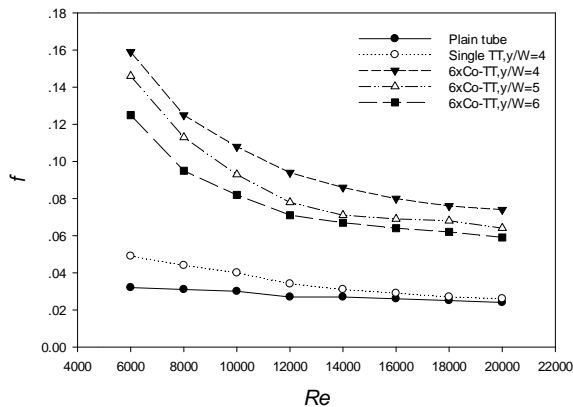
รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลท์ (Nu) กับเลข
เรย์โนลด์ส์ (Re) เมื่อสอดใส่ชุดแผ่นบิดต่างๆ



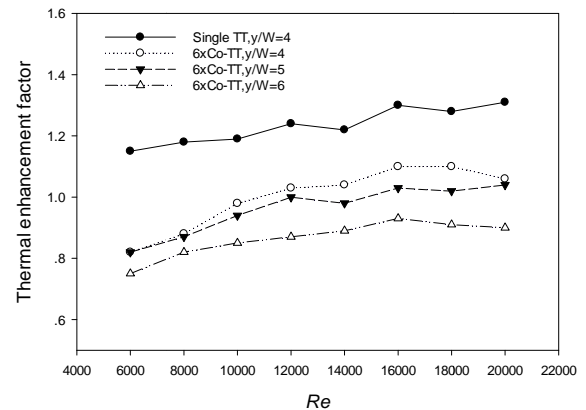
รูปที่ 8 แสดงสัดส่วนเลขนัสเซลท์ของชุดแผ่นบิดกับของ
ท่อเปล่า (Nu/Nu_p) ที่เลขเรย์โนลด์ส์ (Re) ต่าง ๆ

4.2 ผลตัวประกอบเสียดทาน

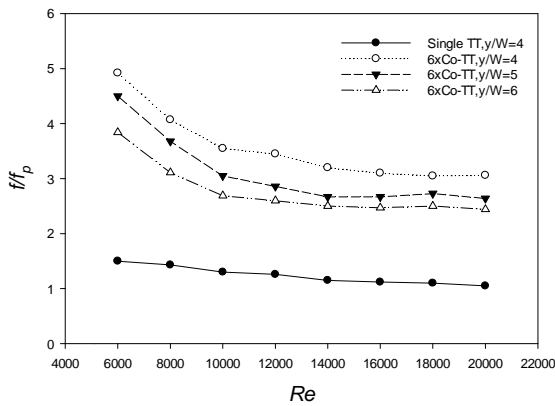
จากรูปที่ 9 พบว่าตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้ม
ลดลงเมื่อค่า Re สูงขึ้น การสอดใส่ชุดแผ่นบิดแบบ 6 ชั้น
ทำให้กระแสการไหลของอากาศที่ไหลหมุนวนในท่อ
กระทบกับแผ่นบิดหลายชั้นทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทาน
เพิ่มสูงขึ้น โดยชุดแผ่นบิด $6xCo-TT, y/W=4$ มีค่าสูงที่สุด
ส่วนชุด $6xCo-TT, y/W=5$ และ $6xCo-TT, y/W=6$ จะมี
ค่าลดลงตามลำดับ ส่วนรูปที่ 10 แสดงสัดส่วนตัว
ประกอบเสียดทานของชุดแผ่นบิดกับท่อเปล่า (fff_p)
พบว่าชุดของแผ่นบิด $6xCo-TT, y/W=4$ มีค่าสูงที่สุดโดย
สูงกว่าท่อเปล่าอยู่ในช่วง 3.05 – 4.92 เท่า



รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทาน (f) กับเลขเรย์โนลด์ส์ (Re) เมื่อสอดใส่ชุดแผ่นบิดต่างๆ



รูปที่ 11 แสดงค่าสมรรถนะทางความร้อนของชุดแผ่นบิดแบบต่าง ๆ กับเลขเรย์โนลด์ส์ (Re)



รูปที่ 10 แสดงสัดส่วนตัวประกอบเสียดทานของชุดแผ่นบิดกับท่อเปล่า (f/f_p) ที่เลขเรย์โนลด์ส์ (Re) ต่าง ๆ

4.3 ผลสมรรถนะทางความร้อน

จากรูปที่ 11 แสดงค่าสมรรถนะทางความร้อน (Thermal enhancement factor, η) ของชุดแผ่นบิด 6 ชั้น ค่าที่ได้อยู่ในช่วง 0.74 - 1.10 โดยชุดแผ่นบิด 6xCo-TT, $y/W=4$ มีค่าสูงที่สุด ส่วนชุด 6xCo-TT, $y/W=5$ และ 6xCo-TT, $y/W=6$ จะมีค่าลดลงมาตามลำดับ ซึ่งสมรรถนะทางความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.10 ได้จากชุดแผ่นบิดที่มีอัตราส่วนการบิด $y/W = 4.0$ ที่ Re 16,000 แต่ชุดแผ่นบิดทั้ง 3 ชุดนี้มีค่าสมรรถนะทางความร้อนต่ำกว่าแผ่นบิดแบบเดี่ยวธรรมดาทั่วไป (Single TT, $y/W=4$) เนื่องจากมีค่าของตัวประกอบเสียดทานที่สูงมากกว่า

5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การถ่ายเทความร้อนเมื่อสอดใส่ชุดแผ่นบิด 6 ชั้น มีแนวโน้มสูงขึ้นตามอัตราส่วนการบิดที่ลดลงและสูงควบคู่ไปกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่เพิ่มขึ้น การถ่ายเทความร้อนที่ได้เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบมีค่าสูงถึง 117%-160% โดยค่าสูงสุดได้จากชุดที่มีอัตราส่วนการบิด $y/W=4.0$ และชุดนี้จะมีการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าแผ่นบิดแบบเดี่ยวธรรมดาทั่วไปโดยเฉลี่ยถึง 115%

2. ในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ต่ำจะมีตัวประกอบเสียดทานสูงแต่กลับมีแนวโน้มที่ลดต่ำลงเมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้น ชุดแผ่นบิดที่มีอัตราส่วนการบิดน้อยจะมีตัวประกอบเสียดทานที่สูงกว่า โดยชุดแผ่นบิด 6xCo-TT, $y/W=4$ มีค่าสูงที่สุด ซึ่งมีค่าสูงกว่าท่อเปล่าถึง 3.05 - 4.92 เท่า และสูงกว่าแผ่นบิดเดี่ยวธรรมดาทั่วไปโดยเฉลี่ย 286 %

3. ค่าสมรรถนะทางความร้อนที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง 0.74 - 1.10 โดยค่าสูงสุดที่ได้เท่ากับ 1.10 ได้จากแผ่นบิดชุด 6xCo-TT, $y/W=4$ ที่ Re 16,000 แต่ชุดแผ่นบิดทั้ง 3 แบบนี้ยังมีค่าสมรรถนะทางความร้อนต่ำกว่าแผ่นบิดแบบเดี่ยวธรรมดาทั่วไป (Single TT, $y/W=4$)

6. สัญลักษณ์และอักษรย่อ

y	ระยะห่างของช่วงการบิดใน 1 รอบ (mm.)
W	ความกว้างของแผ่นบิด (mm.)
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อน (watt)
A	พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อน (m^2)
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
C_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg. K)
T_i	อุณหภูมิที่ทางเข้า (C°)
T_o	อุณหภูมิที่ทางออก (C°)
T_w	อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผนัง (C°)
T_b	อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้าและทางออก (C°)
Re	เลขเรย์โนลด์ส์
ρ	ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)
V	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล (m/s)
D	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (m)
μ	ความหนืดของอากาศ (kg/m^3)
Nu	เลขนัสเซิล
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m^2K)
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/mK)
f	ปัจจัยแรงเสียดทาน
η	สมรรถนะทางความร้อน
ΔP	ความดันตกคร่อมในท่อ
L	ความยาวท่อในช่วงทดสอบ (m.)

7. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Eiamsa-ard, C.Thianpong and P. Eiamsa-ard,(2010).Turbulent heat transfer enhancement by counter/co-swirling flow in a tube fitted with twin twisted tapes, Experimental Thermal and Fluid Science 34, pp. 53-62.

[2] S.Chokphoemphun, M. Pimsarn, C.Thianpong and P. Promvongse, (2015). Thermal performance of tubular heat exchanger with multiple twisted

tapes inserts, Chinese Journal of Chemical Engineering 23, pp. 755-762.

[3] M.M.K. Bhuiya, A.K. Azad, M.S.U. Chowdhury and M. Saha, (2016). Heat transfer augmentation in a circular tube with perforated double counter twisted tape inserts, International Communications in Heat and Mass Transfer 74, pp. 18-26.

[4] C. Vashistha, A. K. Patil and A. Kumar, (2016). Experimental investigation of heat transfer and pressure drop in a circular tube with multiple inserts, Applied Thermal Engineering 96, pp. 117-129.

[5] V. Singh, S. Chamoli, M. Kumar and A. Kumar, (2016). Heat transfer and fluid flow characteristics of heat exchanger tube with multiple twisted tapes and solid rings inserts, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 102, pp. 156-168.

[6] A. R. S. Suri, A. Kumar and R. Maithani, (2017). Effect of square wings in multiple square perforated twisted tapes on fluid flow and heat transfer of heat exchanger tube, Case Studies in Thermal Engineering 10, pp. 28-43.

[7] P. Li, Z. Liu, W. Lui and G. Chen, (2015). Numerical study on heat transfer enhancement characteristics of tube inserted with centrally hollow narrow twisted tapes, International Journal of Heat and Mass Transfer 88, pp. 481-491.

[8] Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P., Dewitt, P.D. (2011). Fundamentals of Heat and Mass Transfer 7th edition, John Wiley & Sons Inc.