

**การประชุมวิชาการ เรื่อง การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล ในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 16)** ระหว่างวันที่ 23-24 กุบภาพันธ์ 2560 ณ ศูนย์ฝึกอบรบธนาคารไทยผาณิชย์ จังหวัดเชียงใหม่

# การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยตัวสร้างการไหลหมุน ควงแบบแผ่นปีกพรุน

# ENHANCED HEAT TRANSFER IN A HEAT EXCHANGER TUBE WITH PERFORATED DELTA-WINGLET TAPE VORTEX GENERATORS

# สุภัทรชัย สุวรรณพันธุ์ '

# บทคัดย่อ

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโล่ยี ราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น 150 หมู่ 6 ถ.ศรีจันทร์ ด.ในเมือง อ.เมืองขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40000

# ธีรพัฒน์ ชมภูคำ <sup>2</sup>

ห้องวิจัยท่อความร้อนและออกแบบเครื่องมือ ทางความร้อน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม 41/20 ตำบลขาม เรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

#### ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์ <sup>3</sup>

สาขาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยี อุดสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี 321 ถนนนารายณ์มหาราช ดำบลทะเลชุบศร อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000

#### สมพล สกุลหลง 4.

กลุ่มวิจัยระบบพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา 199 หมู่ 6 ถนนสุขุมวิท ดำบลทุ่งสุขลา อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20230 Email: sfengsps@src.ku.ac.th, sompol@eng.src.ku.ac.th

#### พงษ์เจต พรหมวงศ์ 5

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ชอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 บทความนี้นำเสนออิทธิพลของแผ่นปีกพรุน (Perforated delta-winglet tape, PDWT) ที่ ดิดตั้งภายในท่อแบบสภาวะฟลักซ์ความร้อนที่ฝิวคงที่ต่อพฤดิกรรมการถ่ายเทความร้อนและ ความเสียดทาน ในการทดลองแผ่นปีกพรุนมุมปะทะ 45° ถูกใส่เข้าไปในท่อทดสอบโดยทำ การปรับเปลี่ยนขนาดของรูเจาะปีก 4 ค่า (d = 1 mm, 1.5 mm, 2 mm และ 2.5 mm) ที่มี สัดส่วนระยะพิดซ์ปีกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อคงที่ (*PID*=3) การถ่ายเทความร้อนและอากาศ ที่ไหลผ่านท่อทดสอบแสดงในรูปของเลขเรย์โนลด์ในช่วง 4120 ถึง 25,000 ค่าการถ่ายเท ความร้อนและการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานสำหรับการผลักดันอากาศผ่านท่อ ทดสอบจะแสดงในเทอมของเลขนัสเซิลท์ (Nu) และตัวประกอบเสียดทาน (f) ตามลำดับ จาก การทดลองพบว่า การใส่แผ่นปีกพรุนช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียด ทานสูงกว่าท่อผนังเรียบ การใช้แผ่นปีกพรุนที่มีขนาตรูเจาะปีก (d) เท่ากับ 1 mm ให้ค่า เลขนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียดทานสูงสุดโดยมีก่า 70% และ 94% เมื่อเทียบกับท่อผนัง เรียบ ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของการใส่แผ่นปีกพรุนภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่า อยู่ในช่วง 1.20–1.49 และให้ค่าสูงสุดที่ d = 2 mm และ Re = 4120

ดำสำคัญ: ปีก, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, การถ่ายเทความร้อน, สมรรถนะเชิงความร้อน, การไหลหมุนควง

Abstract This article presents the influence of perforated delta-winglet tape (PDWT) placed in a uniform heat-fluxed tube on heat transfer and friction loss behaviors. In the current experiment, the PDWT with attack angle ( $\partial$ ) of 45° are inserted into the tube with four different punched hole diameters of Winglet (d = 1 mm, 1.5 mm, 2 mm and 2.5 mm) at a single relative winglet pitch (*PID=3*). The fluid (air) flow and heat transfer characteristics are presented for Reynolds numbers (Re) ranging from 4120 to 25,000. The heat transfer and energy loss due to friction for propelling air through the tube are presented in terms of Nusselt number (Nu) and friction factor (f), respectively. The experimental result shows that the PDWT provides a considerable increase in Nu and f in comparison with the smooth tube. The highest Nu and f of 70% and 94% is achieved by utilizing the 45° PDWT with punched hole diameter (d) = 1 mm. The thermal enhancement factor (TEF) of the PDWT is in the range of 1.20–1.49 where its maximum regarded as the optimum point is at d = 2 mm and Re = 4120.

Keywords: winglet, heat exchanger, heat transfer, thermal performance, vortex generator

#### 1. บทนำ

ปัจจุบันการพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีมาอย่าง ต่อเนื่องเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในงานด้านวิศวกรรมรวมทั้ง ภาคอุดสาหกรรมและการเกษตร เช่น การเพิ่มค่าการถ่ายเทความ ร้อน การทำความเย็น การนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ โดย กระบวนการเหล่านี้สามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะให้แก่อปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อนได้เป็นอย่างมาก สามารถลดค่าใช้จ่ายในแง่ ของดันทุนการผลิด อีกทั้งยังลดขนาดของอุปกรณ์ได้อีกด้วย การ เพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ในหมู่นักวิจัยซึ่งส่วนใหญ่จะเทคนิคแบบ passive [1] กล่าวคือ การ ใช้พลังงานที่สร้างขึ้นเองโดยไม่ต้องนำพลังงานภายนอกเข้ามาช่วย ในการกระดุ้น เช่น การเพิ่มพื้นผิว การดิดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหล แบบปั่นป่วน/หมุนวน/หมุนควง เช่น ใส่ใบบิด ใส่ลวดขด ในท่อกลม เซาะร่อง ติดตั้งครีบ และปีก ในท่อสี่เหลี่ยมเป็นต้น เทคนิคแบบนี้ สามารถสร้างการไหลแบบปั่นป่วน/หมุนวน/หมุนควง (แล้วแต่ชนิด ของอุปกรณ์) เพื่อไปขัดขวางการพัฒนาชั้นขอบเขตความร้อน (Thermal boundary layer) บริเวณผนังท่อของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน ส่งผลให้ของไหลอุณหภูมิสูงบริเวณผนังท่อถ่ายเทมาผสม กับอุณหภูมิของไหลที่เย็นกว่าภายในท่อได้เป็นอย่างดี ทำให้ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มสูงขึ้น

กรณีท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบทรงกลมมักนิยมสอด ใส่ใบบิด [2] ลวดขด [3] เข้าไปในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน โดย Eiamsa-ard et al. [4] ทำการทดลองโดยสอดใส่ใบบิดแบบเว้นระยะ (regularly spaced twisted tape elements) ภายในท่อเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนและเปรียบเทียบกับใบบิดเด็มแบบปกติ (fulllength typical twisted tape) เพื่อหาค่าการถ่ายเทความร้อนและ ความเสียดทาน Bhuiya et al. [5] ศึกษาเชิงทดลองเพื่อเพิ่ม สมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อกลมโดยการสอดใส่ใบ บิดพรุนภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน จากการทดลองพบว่า การ สอดใส่ใบบิดพรุนให้ค่าการถ่ายเทความร้อนในเทอมของเลขนัสเซลท์ (Nusselt number) ตัวประกอบเสียดทาน(friction factor) และ สมรรถนะเซิงความร้อน (thermal performance factor) สูงกว่าท่อ เปล่า 340%, 360% และ 59% ตามลำดับ Bhuiya et al. [6] ทำการ ทดลองโดยสอดใส่ใบบิดคู่ภายในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่า ค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น 60– 240% และ 91–286% เมื่อเทียบกับท่อเปล่า ในขณะที่สมรรถนะเชิง ทำการเพิ่ม ความร้อนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.34 Promvonge [7] สมรรถนะเชิงความร้อนด้วยการสอดใส่ใบบิดผสมกับลวดขดภายใน ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน จากผลการทดลองพบว่า การใช้ใบบิด ร่วมกับลวดขดส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะเชิง ความร้อนเพิ่มสูงขึ้นกว่าการใช้ลวดขดหรือใบบิดเพียงอย่างเดียว

กรณีท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสี่เหลี่ยมหรือเครื่องอุ่น อากาศพลังแสงอาทิตย์นิยมเซาะร่อง [8] ติดตั้งครีบ [9] แผ่นกั้น [10] และปีก [11] Skullong et al. [12] ศึกษาเชิงทดลองเพื่อเพิ่ม สมรรถนะให้แก่เครื่องอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์โดยใช้แผ่นดูดซับ ความร้อนแบบใหม่ (แผ่นปีกพรุนร่วมกับร่องหยัก) จากการทดลอง พบว่า การใช้แผ่นดูดซับความร้อนแบบปีกพรุนร่วมกับร่องหยักให้ค่า การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแผ่นดูดซับความร้อนแบบธรรมดา (ผิว เรียบ) 6.18 เท่า และมีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 2.24 ต่อมา สกุลหลง และ พรหมวงศ์ [13] ศึกษาอิทธิพลของการดิดตั้งตัวสร้าง การไหลหมุนควงชนิดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีผลต่อสมรรถนะเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขนาน การทดลองทำการติดตั้งปีกที่มี สัดส่วนความสูงปีกต่อความสูงท่อขนานค่าเดียว (e/H=0.4) มุมปะทะ ปีก 3 ค่า ( $\alpha$  = 30°, 45°, 60°) ติดตั้งที่ผิวด้านล่างก่อนทางเข้าส่วน ทดสอบ การทดลองพบว่า การติดดั้งปีกให้ค่าการถ่ายเทความร้อน และความเสียดทานเพิ่มสูงมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับท่อผนังเรียบ โดยปีกมุม 30° ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด สกุลหลง และ คณะ [14] ทำการทดลองเพื่อเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนในท่อ แลกเปลี่ยนความร้อนแบบช่องขนานที่มีการติดตั้งปีกร่วมกับครีบ รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า การทดลองพบว่า การติดตั้งปีกร่วมกับครีบให้ ค่าการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่าการติดตั้ง ครีบหรือปีกเพียงอย่างเดียว

จากการศึกษาที่ผ่านมาในอดีตเห็นได้ชัดเจนว่าการใช้อุปกรณ์ สร้างการไหลปั่นป่วน/หมุนวน/หมุนควง สามารถช่วยเพิ่มค่าการ ถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะให้แก่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ เป็นอย่างดีโดยเฉพาะการติดดั้งปีก (Winglet) ภายในท่อแลกเลี่ยน ความร้อน การติดตั้งปีกจะเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลหมุนควง (Vortex flow) ซึ่งมีระดับการไหลที่แข็งแรงกว่าการไหลในลักษณะ อื่น ส่งผลให้สามารถลดหรือทำลายชั้นขอบเขตความร้อนได้เป็น อย่างดี แต่อุปกรณ์ชนิดนี้มักนิยมดิดตั้งบนพื้นผิวของท่อแผ่นขนาน และท่ออุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ นำปีกมาประยุกต์ใช้ในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อ กลม โดยสอดใส่ปีกรูปทรงสามเหลี่ยมที่มีมุมปะทะปีก (45°) และ สัดส่วนระยะพิตช์ปีกตามแนวการไหล (*PID*=3) คงที่โดยทำการ ปรับเปลี่ยนขนาดของรูเจาะปีก 4 ค่า (*d* = 1 mm, 1.5 mm, 2 mm และ 2.5 mm) ในช่วงค่าเลขเรย์โนลดส์ 4120 ถึง 25,000 เพื่อเพิ่ม สมรรถนะเชิงความร้อนให้แก่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

# 2. ทฤษฎีและการคำนวณ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความ ร้อน การสูญเสียความดัน และสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ซึ่งแสดงในเทอมของเลขเรย์โนลด์และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ สมการได้ดังนี้

$$Re = UD_h / \nu \tag{1}$$

โดยที่ U และ v เป็นความเร็วเฉลี่ยและความหนึดเชิงจลน์ของ อากาศตามลำดับ

สมดุลความร้อนระหว่างความร้อนที่อากาศได้รับ (*Q*<sub>air</sub>) และ การพาความร้อน (*Q*<sub>conv</sub>)

$$Q_{\rm air} = Q_{\rm conv} \tag{2}$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย ( h ) หาค่าได้จาก

$$h = \frac{\dot{m}C_{\rm p}(T_{\rm o} - T_{\rm i})}{A(\tilde{T}_{\rm s} - T_{\rm b})} \tag{3}$$

เมื่อ  $T_{\rm b} = (T_{\rm o} + T_{\rm i})/2$  และ  $\widetilde{T}_{\rm s} = \sum T_{\rm s}/16$ 

## โดยที่

A คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อนโดยการพาของแผ่นดูดชับความ ร้อน

- $C_{
  m p}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ
- T คือ อุณหภูมิทางออก
- T<sub>i</sub> คือ อุณหภูมิทางเข้า
- ที่อ อุณหภูมิผิวเฉลี่ยของแผ่นดูดชับความร้อน
- m คือ อัดราการใหลเซิงมวลของอากาศ

เลขนัสเซิลท์เฉลี่ย (Nu) หาได้ดังนี้ Nu = hD/k (4) ตัวประกอบเสียดทาน (f) หาค่าได้จาก  $f = \frac{2}{(L/D)} \frac{\Delta P}{\rho U^2}$  (5)

เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท้อทดสอบ ΔP คือ ค่า ความดันตกคร่อมซุดทดสอบ L คือ ความยาวท่อทดสอบ และ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล

การประเมินศักยภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงใน เทอมของสมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal enhancement factor, TEF) จากเอกสารอ้างอิง [5–14] โดยสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\text{TEF} = \left(\frac{\text{Nu}}{\text{Nu}_0}\right) \left(\frac{f}{f_0}\right)^{-1/3} \tag{6}$$

# 3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 3.1 ชุดทดลอง

อุปกรณ์ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงดังรูปที่ 1 โดยมีส่วนประกอบด่างๆ ดังนี้ 1. High-pressure blower หรือพัดลม แรงดันสูงใช้เป็นแหล่งจ่ายอากาศซึ่งเป็นของไหลทดสอบ 2. Inverter เป็นด้วควบคุมความเร็วรอบของพัดลมแรงดันสูง 3. Orifice plate ใช้ สำหรับวัดอัตราการไหลของอากาศ 4. Inclined manometer ใช้วัด ค่าความดันความดันแตกต่าง 5. Settling tank ทำหน้าที่จัดระเบียบ การไหลของอากาศ 6. Test section หรือส่วนทดสอบในส่วนนี้มีการ ให้ความร้อนแก่ท่อด้วยขดลวดความร้อนและสอดใส่ชิ้นงานทดสอบ โดยจะมีเทอร์โมคัปเปิลซนิด T จำนวน 16 ตัว ถูกติดตั้งที่ผิวด้าน นอกของท่อทดสอบเพื่อวัดอุณหภูมิผิว ขณะที่เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ ชนิด RTD จำนวน 2 ตัว ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิทางเข้าและทางออก ส่วนทดสอบ 7. Digital manometer ใช้วัดค่าความดันตกคร่อม ระหว่างตำแหน่งทางเข้าและทางออกของส่วนทดสอบ 8. Data acquisition system (FLUKE 2680A) เป็นตัวอ่านค่าอุณหภูมิผิวและ อุณหภูมิทางเข้า-ออกส่วนทดสอบ คอมพิวเตอร์ทำหน้าที่ 9. ประมวลผลและบัณทึกค่าอุณหภูมิ 10. AC power supply เป็น แหล่งจ่ายความร้อนให้กับระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

# 3.2 วิธีการทดลอง

พัดลมแรงดันสูงเป็นแหล่งกำเนิดการไหลของอากาศซึ่งใช้เป็น ของไหลทดสอบ โดยมี inverter เป็นด้วควบคุมความเร็วรอบจากนั้น อากาศไหลผ่านแผ่น orifice meter ที่ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลของ อากาศที่ทางเข้าชุดทดสอบโดยมี inclined manometer ดิดตั้งไว้เพื่อ อ่านค่าความแตกต่างของความดัน settling tank ทำหน้าที่ปรับ สภาพการใหลของอากาศให้มีความเสถียรก่อนเข้าชุดทดสอบ calm section จะทำหน้าที่ปรับสภาพการไหลของอากาศให้มีลักษณะการ ใหลแบบพัฒนาเต็มที่ (fully developed flow) ก่อนเข้าสู่ส่วนทดสอบ ท่อทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 50 mm หนา 3 mm ถูก ทำให้ร้อนด้วยขดลวดความร้อน (electrical wire) แบบฟลักซ์ความ และทำการหุ้มฉนวนอย่างมิดชิดเพื่อป้องกันการสูญเสีย ร้อนคงที่ ความร้อน data acquisition รุ่น Fluke 2680A เป็นอุปกรณ์เก็บค่า อุณหภูมิที่เชื่อมต่อกับเทอร์โมคัปเปิลชนิด T ทั้งหมด 16 ดัว ซึ่งวัด ค่าอุณหภูมิที่ผิว 16 ตำแหน่ง ขณะที่เทอร์โมคัปเปิลชนิด RTD ถูก นำมาใช้เพื่อวัดค่าอุณหภูมิทางเข้าและทางออกส่วนทดสอบ ในส่วน ของการวัดค่าความดันตกคร่อม digital manometer (Dwyer 475 mark III) ถูกนำมาใช้ในการวัดค่า

# 3.3 ชิ้นงานทดสอบ

แผ่นปีกที่ใช้เป็นตัวสร้างการไหลหมุนตามแนวยาวภายในท่อ แลกเปลี่ยนความร้อนแสดงดังรูปที่ 2 แผ่นปีกที่ใช้สำหรับสอดใส่ใน ท่อทดสอบทำจากแผ่นอะลูมิเนียมที่มีความหนา (t) 0.5 mm มีขนาด ความกว้างเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D) 50 mm ยาว (L) 1200 mm จากนั้นถูกตัดขอบแล้วงัดขึ้นเพื่อใช้ทำปีกสามเหลี่ยมดังแสดง ในรูปที่ 2 ปีกมีรูปทรงสามเหลี่ยม มุมปะทะ (θ) 45° สัดส่วน ระยะพิดช์ดามแนวกระแสการไหลมีค่าเป็นสามเท่าของเส้นผ่าน ศูนย์กลางท่อ (PID=PR=3) การทดสอบได้ทำการปรับเปลี่ยนขนาด ของรูเจาะ (d) 4 ค่าคือ 1 mm, 1.5 mm, 2 mm และ 2.5 mm เพื่อ ศึกษาพฤติกรรมการถ่าเทความร้อน ความเสียดทาน และสมรรถนะ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการ ทดสอบได้ถูกกำหนดไว้ในดารางที่ 1

d		9	Edg U	and the second sec
ดารางท	1	พารามเด	อรทเช	ในการทดสอบ
	-			

Working fluid	Air		
Reynolds number	4120 to 25,000		
θ	45 <sup>°</sup>		
D	50 mm		
PID	3		
d	1, 1.5, 2 and 2.5 mm		
Tape thickness (t)	0.5 mm		
Tape length (L)	1200 mm		
Wing thickness (=t)	0.5 mm		



รูปที่ 1 ซุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 2 ลักษณะของแผ่นปีกที่ใช้ในการทดสอบ

#### 4. ผลการทดลอง

# 4.1 การทดสอบท่อเปล่าผนังเรียบ

เพื่อความถูกต้องและแม่นยำ ผลการทดลองการถ่ายเทความร้อน และความเสียดท่านที่แสดงในเทอมของเลขนัสเซิลท์ (Nu) และตัว ประกอบเสียดทาน (f) กรณีท่อเปล่าผนังเรียบได้ถูกนำมาเปรียบเทียบ กับสหสัมพันธ์ในอดีต [15] โดยผลของ Nu จากการทดลองได้ทำการ เปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Gnielinski ขณะที่ผลของ f ได้ทำการ เปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Petukhov

สหสัมพันธ์ของ Gnielinski

Nu = 
$$\frac{(f/8)(\text{Re}-1000)\text{Pr}}{1+12.7(f/8)^{1/2}(\text{Pr}^{2/3}-1)}$$
 (7)

สหสัมพันธ์ของ Petukhov  $f = (0.79 \ln \text{Re} - 1.64)^{-2}$ 

(8)

การเปรียบเทียบค่า Nu และ f แสดงดังรูปที่ 3(ก) และ (ข) ตามลำดับ รูปที่ 3(ก) แสดงค่า Nu ที่ได้จากการทดลองเทียบกับ สหสัมพันธ์ของ Gnielinski พบว่ามีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย 6% และรูป ที่ 3(ข) แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่า f ที่ได้จากการทดลองกับ สหสัมพันธ์ของ Petukhov พบว่าค่า f ที่ได้จากทดลองมีค่ามากกว่า f ที่ได้จากสหสัมพันธ์ โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย 8% ซึ่งสามารถ ยืนยันถึงความน่าเชื่อถือของผลการทดลองได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) Nu และ (ฃ) f กับ Re กรณีท่อเปล่า ผนังเรียบ

#### 4.2 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการสอด ใส่แผ่นปีกพรุ่นเพื่อสร้างการไหลหมุนควงให้แก่อากาศภายในท่อ ทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4, 5 และ 6 ตามลำดับ

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความ ร้อน (h) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ผลการทดลองพบว่า การใส่แผ่นปีก พรุน (Perforated delta-winglet tape, PDWT) ภายในท่อเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ เป็นอย่างดี โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามการเพิ่มขึ้นของค่าเลขเรย์โนลด์

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนใน เทอมของเลขนัสเซิลท์ (Nu) ซึ่งเป็นดัวแปรไร้มิติ กับ Re จากการ ทดลองพบว่า การสอดใส่ PDWT ให้ค่า Nu สูงกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ อยู่ในช่วง 66–70% โดยเฉพาะอย่างยิ่งแผ่นปีกที่มีขนาดรูเจาะ 1 mm เนื่องจากสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลหมุนควงและมีระดับการ ใหลที่แข็งแรงกว่ากรณีรูเจาะขนาดอื่นๆ ส่งผลให้สามารถลดขั้น ขอบเขตความร้อนได้เป็นอย่างดีและเกิดการผสมผสานกันระหว่างของ ไหลได้อย่างรวดเร็ว (ของไหลอุณหภูมิต่ำบริเวณกลางท่อและของไหล อุณหภูมิสูงบริเวณผิวท่อ) โดย PDWT ที่มีขนาดรูเจาะ d = 1 mm มี ค่า Nu มากกว่า d = 1.5 mm, 2 mm และ 2.5 mm ตามลำดับ อย่างไร ก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบกับแผ่นปีกแบบธรรมดาที่ไม่ได้มีการ เจาะรู (Typical delta-winglet tape, TDWT) พบว่า TDWT มีค่า Nu เฉลี่ยสูงกว่า PDWT เท่ากับ 7% และสูงกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 73%

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กรณี สอดใส่แผ่นปีกพรุนต่อเลขนัสเซิลท์ของท่อเปล่าผนังเรียบ (Nu/Nu<sub>0</sub>) กับ Re จากการทดลองพบว่าเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า Nu/Nu<sub>0</sub> มี แนวโน้มลดลงเล็กน้อย โดยการสอดใส่ PDWT มีค่า Nu/Nu<sub>0</sub> เฉลี่ย เท่ากับ 3.34, 3.23, 3.12 และ 2.96 สำหรับ *d* = 1 mm, 1.5 mm, 2 mm และ 2.5 mm ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับกรณี TDWT พบว่า TDWT มีค่า Nu/Nu<sub>0</sub> สูงกว่ากรณี PDWT ทุกขนาดรูเจาะ โดยมี ค่าสูงกว่าเฉลี่ยถึง 1.1 เท่า





# 4.3 ความดันตกคร่อมและความเสียดทาน

การสูญเสียพลังงานเนื่องจากการผลักดันของไหลผ่านท่อเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการสอดใส่ PDWT แสดงในเทอมของความ ดันตกคร่อม (Pressure drop, ΔP) ดัวประกอบเสียดทาน (f) และ อัดราส่วนตัวประกอบเสียดทานกรณีสอดใส่แผ่นปีกพรุนต่อตัวประกอบ ความเสียดทานของท่อเปล่าผนังเรียบ (ff<sub>0</sub>) ตามลำดับ

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ∆P กับ Re จากผลการ ทดลองพบว่าเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า ∆P เพิ่มขึ้น การสอดใส่ PDWT ที่ d = 1 mm มีค่าความดันตกคร่อมท่อทดสอบสูงกว่ากรณี d = 1.5 mm, 2 mm และ 2.5 mm ตามลำดับ เนื่องจากการสอดใส่แผ่น ปีกที่มีขนาดรูเจาะเล็ก ๆ จะมีพื้นที่มากกว่าปีกที่มีขนาดรูเจาะใหญ่ซึ่ง ส่งผลให้อากาศที่ไหลมาปะทะปีกที่มีขนาดรูเจาะเล็กมีระดับการไหล

หมุนควงที่แข็งแรงกว่ากรณีปีกที่มีขนาดรูเจาะใหญ่ อย่างไรก็ตามเมื่อ เปรียบเทียบกับ TDWT พบว่า TDWT มีค่า ∆P สูงกว่า PDWT ทุก ขนาดรูเจาะ

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re จากรูปแสดงให้เห็น ว่าการสอดใส่ PDWT ภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนส่งผลให้ค่า f เพิ่มสูงขึ้นประมาณ 9–20 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผนังเรียบ และการ สอดใส่ TDWT มีค่า f สูงกว่าการสอดใส่ PDWT เฉลี่ยอยู่ที่ 40% เนื่องจากเกิดการกีดขวางการใหลของสารทำงานมากกว่า

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง *flf*<sub>0</sub> กับ Re จากการทดลอง พบว่า *flf*<sub>0</sub> มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของคำ Re การสอดใส่ PDWT ที่ *d* = 1 mm มีค่า *flf*<sub>0</sub> สูงสุด ตามด้วย *d* = 1.5 mm, 2 mm และ 2.5 mm ตามลำดับ โดยค่า *flf*<sub>0</sub> เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 17.42, 15.35, 13.42 และ 11.58 สำหรับ PDWT ที่ *d* = 1 mm, 1.5 mm, 2 mm และ 2.5 mm ตามลำดับ ขณะที่การสอดใส่ TDWT มีค่า *flf*<sub>0</sub> เฉลี่ยเท่ากับ 24.18 ซึ่งเป็นที่น่าสนใจว่าการสอดใส่ TDWT แม้จะให้ค่าการถ่ายเท ความร้อนสูงกว่า PDWT ก็ตาม แต่สิ่งที่ตามมาคือมีค่าความเสียตทาน สูงกว่าเช่นกัน ดังนั้นเพื่อประเมินสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความ ร้อนแล้ว จึงจำเป็นต้องนำค่าการถ่ายเทความร้อนและความเสียตทาน มาประเมินโดยใช้สมการที่ (6) และจะแสดงในหัวข้อที่ 4.4 ต่อไป



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง *flf*₀ กับ Re

# 4.4 สมรรถนะเชิงความร้อน

จากผลการทดลองที่นำเสนอในหัวข้อ 4.2 และ 4.3 แสดงให้เห็น อย่างชัดเจนว่าการสอดใส่ PDWT และ TDWT ภายในท่อแลกเปลี่ยน ความร้อนสามารถช่วยให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้น แต่สิ่งที่ ดามมาคือค่าความเสียดทานที่เพิ่มสูงขึ้นตาม ดังนั้นจึงได้กำหนดตัว แปรที่ใช้ในการประเมินถึงสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ มีการสอดใส่ตัวสร้างการไหลหมุนควงแบบปีกชนิดต่าง ๆ คือ (Thermal enhancement factor, TEF) โดยมีนิยามคือ สัตส่วนการเพิ่มขึ้นของค่า การถ่ายเทความร้อนเทียบกับสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าความเสียด ทาน ซึ่งพิจารณาภายใต้กำลังขับของไหลเดียวกัน ดังแสดงในสมการที่ 6

รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง TEF กับ Re จากการ ทดลองพบว่า ค่า TEF มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่า Re การ สอดใส่ PDWT ที่ d = 2 mm มีค่า TEF สูงสุดในกรณีทดสอบ โดยมีค่า เท่ากับ 1.49 ที่ Re = 4120 ตามด้วย d = 2.5 mm, 1.5 mm และ 1 mm ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่สอดใส่ TDWT พบว่าการสอดใส่ PDWT มีค่า TEF สูงกว่า TDWT ทุกกรณี (ทุกขนาดรูเจาะ) โดยมีค่าสูงกว่า 1.6–3.6% เหตุผลคือ ถึงแม้ว่า TDWT จะให้ค่าสัดส่วนการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่า PDWT ก็ตามแต่ สิ่งที่ตามมาคือค่าสัดส่วนความเสียดทานที่เพิ่มสูงมาก เมื่อนำวิเคราะห์ ในรูปของสมรรถนะเชิงความร้อนแล้วจึงส่งผลให้กรณี TDWT มีค่าต่ำ กว่า



#### 5. สรุปผลการทดลอง

การศึกษวเชิงทดลองเพื่อเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนในท่อเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยตัวสร้างการไหลหมุนควงแบบแผ่นปีกพรุน ที่มีอากาศเป็นของไหลทดสอบในช่วง Re = 4120-25,000 สามารถ สรุปได้ดังนี้

 การสอดใส่ PDWT สามารถช่วยให้ค่าการถ่ายเทความร้อน เพิ่มสูงขึ้นจากท่อเปล่าผนังเรียบถึง 70%, 69%, 68% และ 66.2% สำหรับปีกที่มีขนาดรูเจาะ d = 1 mm, 1.5 mm, 2 mm และ 2.5 mm ตามลำดับ ในขณะที่แผ่นปีกแบบธรรมดา (TDWT) ให้ค่าการถ่ายเท ความร้อนสูงกว่าท่อเปล่าผนังเรียบถึง 73% และสูงกว่า PDWT เฉลี่ย 7%

 การสอดใส่ PDWT มีค่าความเสียดทานน้อยกว่าการสอดใส่ TDWT ทุกขนาดรูเจาะ เนื่อจากการเจาะรูบริเวณปีกลามารถช่วยให้ ของไหลทำงานไหลได้สะดวกขึ้น โดยกรณี PDWT สามารถลดความ เสียดทานลงได้ถึง 28–52% เมื่อเทียบกับ TDWT

 การประเมินสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในรูป ของ TEF ชี้ให้เห็นว่า PDWT ให้ค่า TEF สูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 1.46, 1.47, 1.49 และ 1.48 สำหรับ PDWT ที่ d = 1 mm, 1.5 mm, 2 mm และ 2.5 mm ตามลำดับ ค่า TEF สูงสุดพบในกรณีสอดใส่ PDWT ที่ d = 2 mm และมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าการสอดใส่ TDWT ถึง 2.6%

 4. การเลือกใช้ PDWT ที่เหมาะสมแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณี ที่ (1) หากต้องการค่าการถ่ายเทความร้อนสูงควรเลือกใช้ TDWT เนื่องจากกรณีดังกล่าวให้ค่า Nu สูงกว่าท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ ธรรมดา (conventional) ถึง 73% กรณีที่ (2) หากต้องการในแง่ สมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนควรเลือกใช้ PDWT ที่ d = 2 mm เนื่องจากกรณีดังกล่าวให้ค่า TEF สูงสุด

# เอกสารอ้างอิง

- Liu, S. Sakr, M. A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers, Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 19, 2013, pp. 64–81.
- [2] Chang, S.W. Jan, Y.J. Liou, J.S. Turbulent heat transfer and pressure drop in tube fitted with serrated twisted-tape, International Journal of Thermal Sciences Vol. 46, 2007, pp. 506–18.
- [3] Gunes, S. Ozceyhan, V. Buyukalaca, O. Heat transfer enhancement in a tube with equilateral triangle cross sectioned coiled wire inserts, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 34, 2010, pp. 684–691.
- [4] Eiamsa-ard, S. Thianpong, C. Promvonge, P. Experimental investigation of heat transfer and flow friction in a circular tube fitted with regularly spaced twisted tape elements, International Communications in Heat and Mass Transfer Vol. 33, 2006, pp. 1225–1233.
- [5] M.M.K. Bhuiya, M.S.U. Chowdhury, M. Saha, M.T. Islam, Heat transfer and friction factor characteristics in turbulent flow through a tube fitted with perforated twisted tape inserts, International Communications in Heat and Mass Transfer Vol. 46, 2013, pp. 49–57.
- [6] M.M.K. Bhuiya, A.S.M. Sayem, M. Islam, M.S.U. Chowdhury, M. Shahabuddin, Performance assessment in a heat exchanger tube fitted with double counter twisted tape inserts, International Communications in Heat and Mass Transfer Vol. 50, 2014, pp. 25–33.

- [7] Promvonge, P. Thermal augmentation in circular tube with twisted tape and wire coil turbulators, Energy Conversion and Management Vol. 49, 2008, pp. 2949–2955.
- [8] Skullong, S. Kwankaomeng, S. Thianpong, C. Promvonge, P. Thermal performance of turbulent flow in a solar air heater channel with rib-groove turbulators, International Communications in Heat and Mass Transfer Vol. 50, 2014, pp. 34–43.
- [9] Kumar, A. Saini, R.P. Saini, J.S. Development of correlations for Nusselt number and friction factor for solar air heater with roughened duct having multi v-shaped with gap rib as artificial roughness, Renewable Energy Vol. 58, 2013, pp. 151–163.
- [10] Tamna, S. Skullong, S. Thianpong, C. Promvonge, P. Heat transfer behaviors in a solar air heater channel with multiple V-baffle vortex generators, Solar Energy Vol. 110, 2014, pp. 720–735.
- [11] Skullong, S. Promvonge, P. Experimental investigation on turbulent convection in solar air heater channel fitted with

delta winglet vortex generator, Chinese Journal of Chemical Engineering, Vol. 22, 2014, pp. 1–10.

- [12] Skullong, S. Promvonge, P. Thianpong, C. Pimsarn, M. Thermal performance in solar air heater channel with combined wavy-groove and perforated-delta wing vortex generators, Applied Thermal Engineering Vol. 100, 2016, pp. 611–620.
- [13] สมพล สกุลหลง และ พงษ์เจด พรหมวงศ์, อิทธิพลของตัวสร้าง การไหลหมุนควงแบบปีกต่อการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลก เปลี่ยนความร้อน, การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงาน ความ ร้อน และมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 12, 14-15 มีนาคม 2556.
- [14] สมพล สกุลหลง, ภาคภูมิ ศรีรมรื่น และ พงษ์เจต พรหมวงศ์, อิทธิพลของการใช้ครีบร่วมกับปีกต่อการถ่ายเทความร้อนในช่อง ขนานสี่เหลี่ยมผืนผ้า, การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงาน ความร้อน และมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 13, 13-14 มีนาคม 2557.
- [15] Incropera, F.P. DeWitt, P.D. Bergman, T.L. Lavine, A.S. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John-Wiley & Sons, 2006.