

อิทธิพลของปีกต่อสมรรถนะเชิงความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส

Effect of winglet on thermal performance in a square duct

ปรัชญา สำรวายสินธุ์^{1*}, พัทธ์ชัย พร้อมไธสง¹, ชวัญชัย หนาแน่น² และ สมิทธิ์ เอี่ยมสะอาด¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี อำเภอเมือง เพชรบุรี 76000

*ติดต่อ: artmodify@hotmail.com, 02-988-3655 ต่อ 3106

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้กล่าวถึงผลกระทบของการติดตั้งปีกในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสต่อสมรรถนะเชิงความร้อนโดยใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลข โดยปีกทำมุม 45° กับแกนการไหล มีอัตราส่วนระยะพิทช์คงที่เท่ากับ 2.0 และมีอัตราส่วนการบล็อคเท่ากับ 0.05, 0.1, 0.15 และ 0.2 โดยการใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบที่ตัวเลขเรย์โนลด์ส (Re) ในการทดลองอยู่ในช่วง 5,000-20,000 ในการทดสอบของท่อผิวเรียบได้ทำการเปรียบเทียบผลค่าตัวเลขนัสเซล (Nu) กับสหพันธ์ของ Dittus-Boelter ขณะที่ตัวประกอบเสียดทาน (f) ถูกเปรียบเทียบสหพันธ์ของ Blasius จากผลการจำลองเชิงตัวเลขพบว่าการติดตั้งปีกในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสก่อให้เกิดกระแสการไหลหมุนวน ทำให้ของไหลผสมกันได้ดีขึ้น ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนที่ผนังท่อและสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นสูงกว่าท่อเปล่า และพบว่าเมื่ออัตราส่วนการบล็อคของปีกเพิ่มขึ้นส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น ในช่วงที่ทำการศึกษาค้นพบว่ามีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนอยู่ในช่วง 0.85-1.17 โดยกรณีอัตราส่วนการบล็อคเท่ากับ 0.10 ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดที่ 1.17 ที่ค่า $Re = 5,000$

คำหลัก: ปีก, ท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส, การถ่ายเทความร้อน, ตัวประกอบความเสียดทาน, สมรรถนะเชิงความร้อน

Abstract

This research investigated the effect of the winglet in a square duct on thermal performance by using numerical method. The winglet with constant attack angle at 45° , constant pitch ratio at 2.0 and various blockage ratios with 0.05, 0.1, 0.15 and 0.2 are investigated. The air is used as the working fluid in turbulent flow region at Reynolds numbers (Re) of 5,000 to 20,000. The heat transfer and friction factor result of the plain tubes are compared with those from the standard correlations of Dittus-Boelter and Blasius, respectively for verifying the accuracy of the heat exchanger tube. The numerical result revealed that the winglet in a square duct generated the vortex flow help to increase fluid mixing lead to increase the heat transfer and thermal performance higher than the smooth duct. The increasing on blockage ratio lead to increase both the heat transfer and friction factor. In the range investigated, the thermal enhancement factor is found around 0.85-1.17, the blockage ratio at 0.10 gave the maximum thermal enhancement factor at about 1.17 at $Re = 5,000$.

Keywords: winglet, square duct, heat transfer, thermal performance, friction factor

1. บทนำ

ปัจจุบันนักวิจัยได้หาวิธีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้อุปกรณ์สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหนึ่งเฟส (single-phase) เพื่อปรับปรุงพัฒนาด้วยเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนทำได้หลายวิธีด้วยกันและเทคโนโลยีทางการเพิ่มการ

ถ่ายเทความร้อนได้ถูกปรับปรุงพัฒนาและนำไปประยุกต์ใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ในอุตสาหกรรมระบบปรับอากาศ ในอุตสาหกรรมยานยนต์ แม้กระทั่งกระบวนการทางด้านการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมเองก็ตาม วัตถุประสงค์ของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนก็คือ

การทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (heat transfer coefficient) มีค่าสูงขึ้น ขณะนี้ผู้สนใจในด้านการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเป็นจำนวนมาก และได้พยายามลดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและลดต้นทุนการผลิตเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยพื้นฐานตัวแปรสำคัญที่สุดคือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าความดันตกคร่อมภายในท่อ การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยทั่วไปเป็นผลดีที่นำไปสู่การลดลงของอุณหภูมิที่เข้ามาแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น Promvong [1] การศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่สอดใส่แผ่นบิดสี่เหลี่ยมร่วมกับติดตั้งครีบริบตัววี 30° Schindler, A และคณะ [2] ศึกษาพฤติกรรมของการไหลผ่านท่อสี่เหลี่ยมตรงโดยใช้แบบจำลองการไหลวนภายในท่อ Promvong และคณะ [3] ศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่ให้ความร้อนคงที่ และติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนวนร่วมกับแผ่นบิดเกลียว Noothong และคณะ [4] ศึกษาเชิงทดลองและเชิงตัวเลขเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมให้ความร้อนคงที่ ที่สอดใส่ครีบริบในแนวทแยงมุมด้วย 45° Niemann และคณะ [5] ศึกษาการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบสามมิติและการวิเคราะห์ของการไหล Nanofluid ภายในท่อสี่เหลี่ยมที่มีการติดตั้งกับแผ่น

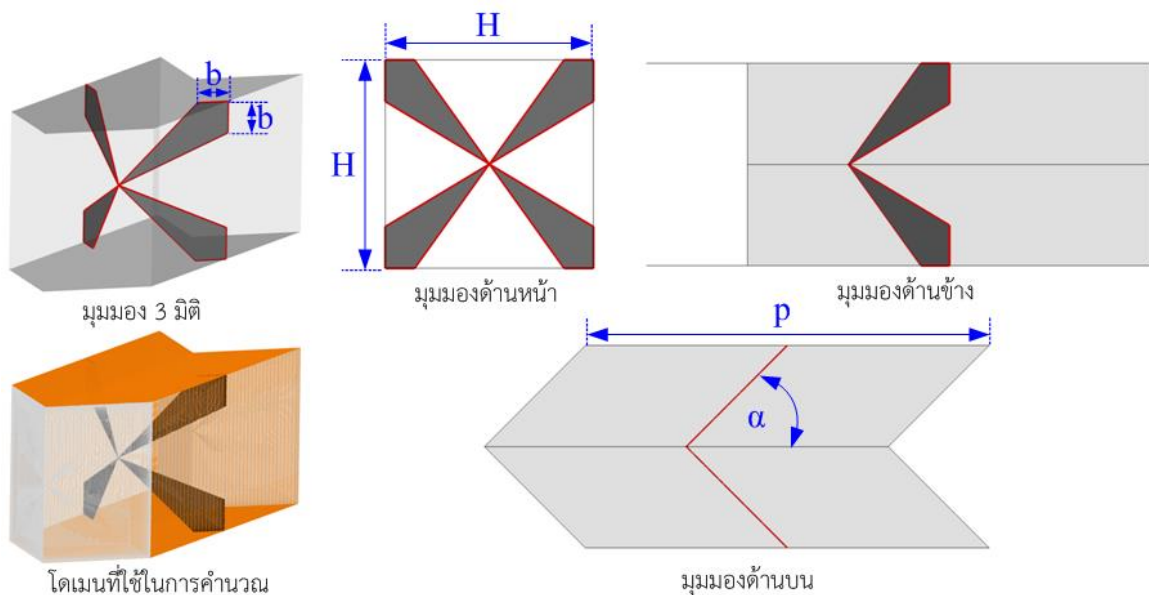
กั้นแบบบิดตามขวาง Eiamsa-ard และคณะ [6] ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีสอดใส่ขดลวด ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยม

บทความฉบับนี้ได้ศึกษาผลกระทบของการติดตั้งปีกในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสต่อสมรรถนะเชิงความร้อนโดยใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลข โดยปีกทำมุม 45° กับแกนการไหล มีอัตราส่วนระยะพิชชิ่งที่เท่ากับ 2.0 และมีอัตราส่วนการบล็อกเท่ากับ 0.05, 0.1, 0.15 และ 0.2 ติดตั้งปีกในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสก่อให้เกิดกระแสการไหลหมุนวน ทำให้ของไหลผสมกันได้ดีขึ้น จะส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนที่ผนังท่อและสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น

2. แบบจำลองและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แบบจำลองทางกายภาพ

ระบบที่ให้ความสนใจเป็นท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งปีก ความกว้างของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้ในการจำลองนี้มีค่า $H=0.05$ m และสมมติที่ยาวมาก ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งพิจารณาการไหลเป็นแบบ periodic โดยปีกมีระยะพิชชิ่ง (p/H , PR) คงที่เท่ากับ 2.0 มีอัตราส่วนการบล็อก (b/H , BR) เท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 และใช้อากาศเป็นของไหลทำงานในช่วง $Re = 5,000 - 20,000$



รูปที่ 1 รูปแบบของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งปีกและโนเมนที่ใช้ในการคำนวณ

2.2 สมมติฐานและสมการในการคำนวณ

สมมติฐานสำหรับแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีดังต่อไปนี้

การไหลเป็นแบบปั่นป่วนและเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ 3 มิติ ไม่คำนึงแรงโน้มถ่วง, การสูญเสียเนื่องจากความหนืดและการแผ่รังสีความร้อน โดยกำหนดให้คุณสมบัติของของไหลคงที่

จากสมมติฐานข้างต้น สำหรับการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส สมการควบคุมประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการนาเวียร์-สโตก และสมการพลังงานสามารถเขียนในรูปเทนเซอร์ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนดังนี้ สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

สมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \overline{\rho u_i u_j} \right) \right] \quad (2)$$

สมการพลังงาน

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\Gamma + \Gamma_t) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

แบบจำลอง Realizable $k - \varepsilon$ กำหนดโดย

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (5)$$

เมื่อ

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (6)$$

และ

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.2, C_{1\varepsilon} = 1.44, C_2 = 1.9$$

ในสมการเหล่านี้ G_k คือการสร้างพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากการกระเด็นความเร็วเฉลี่ย G_b คือพลังงาน

จลน์ปั่นป่วนเนื่องจากการลอยตัว C_2 และ $C_{1\varepsilon}$ คือค่าคงที่ σ_k และ σ_ε คือเลขพรานด์ปั่นป่วนสำหรับ k และ ε ตามลำดับ

ในงานวิจัยนี้มีตัวแปรที่ให้ความสนใจมีอยู่ 4 ตัวแปร คือ เลขเรย์โนลด์ ตัวประกอบเสียดทาน เลขนัสเซลและสมรรถนะเชิงความร้อน ซึ่งค่าเลขเรย์โนลด์นิยามโดย

$$Re = \frac{\rho u_0 D_h}{\mu} \quad (7)$$

ตัวประกอบเสียดทาน, f คำนวณได้จากความดันตกคร่อม, Δp ตลอดช่วงความยาว periodic ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส, L

$$f = \frac{(\Delta P / L) D_h}{\frac{1}{2} \rho u^2} \quad (8)$$

การถ่ายเทความร้อนในรูปของค่าการกระจายเลขนัสเซลซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$Nu_x = \frac{h_x D_h}{k} \quad (9)$$

ค่าเลขนัสเซลเฉลี่ยสามารถคำนวณได้จาก

$$Nu = \frac{1}{A} \int Nu_x dA \quad (10)$$

สมรรถนะเชิงความร้อน, TEF

$$TEF = \frac{h}{h_0} \Big|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_0} \Big|_{pp} = \frac{(Nu / Nu_0)}{(f / f_0)^{1/3}} \quad (11)$$

เมื่อ Nu_0 และ f_0 คือ เลขนัสเซลและตัวประกอบเสียดทานของท่อเปล่า

2.3 เงื่อนไขขอบ

- พิจารณาทางเข้าและทางออกเป็นแบบ periodic translation

- สมมติอากาศที่ 300 K และมีค่าเลขพรานด์ 0.7
- ของไหล ไหลเข้าด้วยอัตราการไหลเชิงมวลคงที่
- สมมติคุณสมบัติทางกายภาพของอากาศมีค่าคงที่

โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้า

- เงื่อนไขขอบเขตไม่มีการสิ้นไหลที่ผนัง
- กำหนดให้ที่ผนังทุกด้านของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสมี

พลั๊กความร้อนที่ผิวคงที่เท่ากับ 600 w/m^2

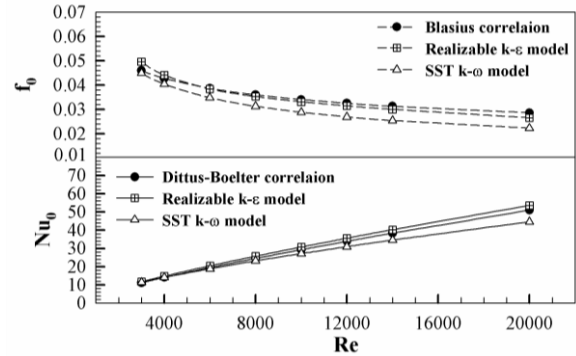
- ให้ปิกเป็นฉนวนซึ่งความร้อนไม่สามารถผ่านได้

3. ผลการจำลอง

3.1 การพิสูจน์ความถูกต้องของท่อกลมผิวเรียบและจำนวนกริดที่ใช้

แบบจำลองความปั่นป่วน 2 แบบจำลอง คือ Realizable $k-\varepsilon$ model และ SST $k-\omega$ model ถูกนำมาใช้กับแบบจำลองของท่อเปล่าเพื่อเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานกับสมการสหสัมพันธ์ [7] ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable $k-\varepsilon$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานต่างจากสมการสหสัมพันธ์ในช่วง $\pm 3.5\%$ และ $\pm 4.0\%$ ตามลำดับซึ่งผลลัพธ์ที่ได้โดยวิธีเชิงตัวเลขทั้งนี้มีความสอดคล้องกันกับสมการสหสัมพันธ์อย่างดีและมีความน่าเชื่อถือได้

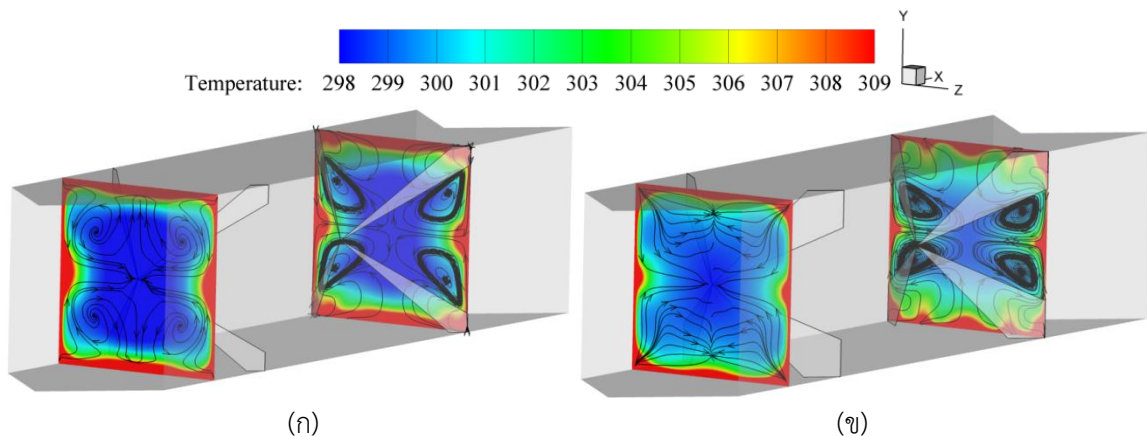
แบบจำลองนี้ได้เปรียบเทียบจำนวนของกริดโดยการใช้โดเมนในการคำนวณเป็น 1 ใน 4 ส่วนของหน้าตัดท่อทดสอบที่แตกต่างกันคือที่ 52000, 105460, 201420, 406800 และ 607690 โดยใช้กรณีปีกที่ค่า BR = 0.20 พบว่าเมื่อจำนวนเพิ่มขึ้นจาก 201420 เป็น 406800 ค่าเลขนัสเซลและตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยในช่วง $Re = 5,000 - 20,000$ เปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 1.6% ดังนั้นจึงเลือกจำนวนกริดเท่ากับ 201420 ไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อไป



รูปที่ 2 การตรวจสอบความถูกต้องของเลขนัสเซลและตัวประกอบเสียดทานของท่อเปล่า

3.2 โครงสร้างการไหลและการกระจายอุณหภูมิตามแนวขวางการไหล

รูปที่ 3 แสดงถึงโครงสร้างการไหลและการกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลสำหรับ (ก) BR = 0.10 และ (ข) BR = 0.20 ที่ค่า $Re = 5,000$ จากรูปพบว่าปีกก่อให้เกิดกระแสการไหลหมุนวน 4 วง ในระนาบขวางการไหล โดยเฉพาะบริเวณด้านหลังของปีกจะปรากฏกระแสการไหลหมุนวน 4 วง อย่างชัดเจน การหมุนวนนี้ส่งผลให้ของไหลเกิดการผสมกันได้ดีขึ้นนำไปสู่การถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นเนื่องจากชั้นขีดผิวถูกรบกวนมากขึ้นซึ่งสามารถสังเกตได้จากชั้นของไหลร้อนที่บริเวณใกล้ผนังบางลง ชั้นของไหลร้อนบริเวณใกล้ผนังจะขวางกั้นการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างผนังและของไหล ดังนั้นเมื่อชั้นของไหลร้อนลดลงจะทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนสูงขึ้น และพบว่าเมื่อค่า BR เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การผสมกันของของไหลดีขึ้น

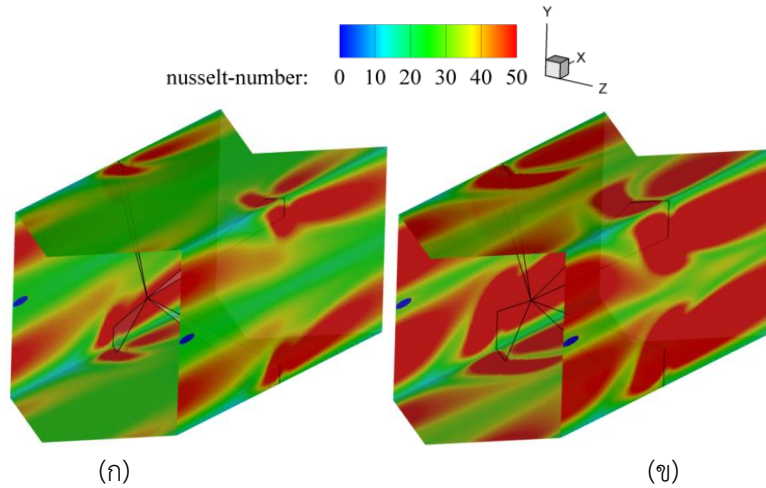


รูปที่ 3 โครงสร้างการไหลและการกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลสำหรับ (ก) BR = 0.10 และ (ข) BR = 0.20 ที่ค่า $Re = 5,000$

3.3 การถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 4 แสดงการกระจายเลขนัสเซลที่ผนังท่อสำหรับ (ก) $BR = 0.10$ และ (ข) $BR = 0.20$ ที่ค่า $Re = 5,000$ พบว่าเมื่อค่า BR เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนที่

ผนังเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้จากคอนทัวร์สีแดงที่เพิ่มขึ้น พื้นที่การถ่ายเทความร้อนสูงส่วนใหญ่จะปรากฏที่บริเวณใกล้ด้านหน้าและด้านหลังของปีกเนื่องจากการกระแทกของของไหลนั่นเอง



รูปที่ 4 การกระจายเลขนัสเซลที่ผนังท่อสำหรับ (ก) $BR = 0.10$ และ (ข) $BR = 0.20$ ที่ค่า $Re = 5,000$

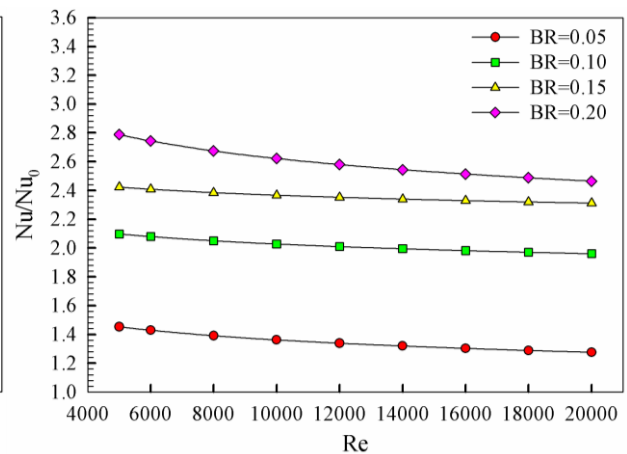
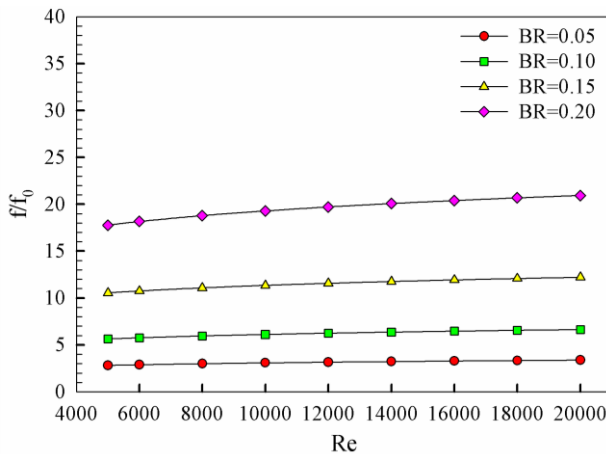
3.5 วิเคราะห์ผลการจำลองเชิงตัวเลข

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า f/f_0 กับ Re แสดงดังรูปที่ 5(ก) จากกราฟแสดงให้เห็นว่ากรณีศึกษาทั้งหมดให้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวประกอบเสียดทานมากกว่าท่อเปล่าโดยให้ค่าสูงกว่า 1.0 และพบว่าทุกกรณีศึกษามีค่า f/f_0 เพิ่มขึ้นเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น และเมื่อค่า BR เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า f/f_0 เพิ่มขึ้นทุกค่า Re เช่นเดียวกัน จากกรณีศึกษาทั้งหมดให้ค่า f/f_0 อยู่ในช่วง 2.81-20.94 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า โดยกรณีปีกที่ค่า $BR = 0.05$ ให้ค่า f/f_0 น้อยที่สุดที่ 2.81 เท่า ที่ $Re = 5,000$ ส่วนกรณีปีกที่ค่า $BR = 0.20$ ให้ค่า f/f_0 มากที่สุดที่ 20.94 ที่ $Re = 20,000$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu/Nu_0 กับ Re แสดงดังรูปที่ 5(ข) จากกราฟพบว่าค่า Nu/Nu_0 มีค่าลดลงเมื่อค่า

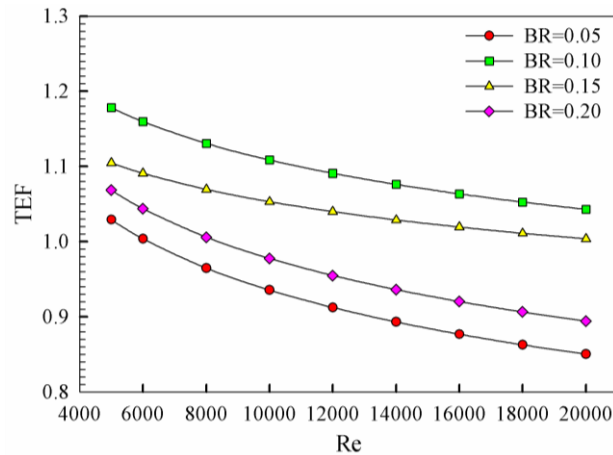
Re เพิ่มขึ้น และเมื่อค่า BR เพิ่มขึ้น ทำให้ค่า Nu/Nu_0 เพิ่มขึ้น จากกรณีศึกษาทั้งหมดให้ค่า Nu/Nu_0 อยู่ในช่วง 1.27-2.78 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า โดยกรณีปีกที่ค่า $BR = 0.10$ ให้ค่า Nu/Nu_0 น้อยที่สุดที่ 1.27 ที่ $Re = 20,000$ ส่วนกรณีปีกที่ค่า $BR = 0.20$ ให้ค่า Nu/Nu_0 มากที่สุดที่ 2.78 เท่า ที่ $Re = 5,000$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า TEF กับ Re แสดงดังรูปที่ 5(ค) จากรูปพบว่าเมื่อ Re เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า TEF ลดลงทุกกรณี สำหรับกรณีศึกษาทั้งหมดพบว่าให้ค่า TEF อยู่ในช่วง 0.85-1.17 โดยกรณี $BR = 0.10$ ให้ค่า TEF มากที่สุดที่ 1.17 ที่ $Re = 5,000$ ส่วนกรณี $BR = 0.25$ ให้ค่า TEF ต่ำที่สุดที่ 0.85 เท่า ที่ $Re = 20,000$



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) f/f_0 , (ข) Nu/Nu_0 และ (ค) TEF กับ Re

4. สรุปผลการจำลอง

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อนในสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งปีกสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในช่วง $Re = 5,000 - 20,000$ พบว่าการติดตั้งปีกทำให้กระแสการไหลหมุนวน 4 วง ซึ่งช่วยในการผสมผสานกันของของไหล ทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น การติดตั้งปีกในช่วงการศึกษาพบว่าให้ค่าการถ่ายเทความร้อน ค่าสัมประสิทธิ์ตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนอยู่ในช่วง 1.27-2.78, 2.81-20.94 และ 0.85-1.17 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า ตามลำดับ โดยกรณี $AR = 0.10$ ให้ค่า TEF มากที่สุดที่ 1.17 ที่ $Re = 5,000$

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Promvong, P., Thermal performance in square-duct heat exchanger with quadruple V-finned twisted tapes, Applied Thermal Engineering, Vol. 91, pp. 298-307
- [2] Schindlera, A., Younisb, B.A., and Weigand, B., Large-Eddy Simulations of turbulent flow through a heated square duct, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 135, pp. 302-318.
- [3] Promvong, P., Suwannapan, S., Pimsarn, M., Thianpong, C., Experimental study on heat transfer in square duct with combined twisted-tape and winglet vortex generators, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol 59, pp.158-165.



- [4] Noothong, W., Suwannapan, S., Thianpong, C., and Promvong, P., Enhanced heat transfer in a heat exchanger square-duct with discrete V-finned tape inserts, Chinese Journal of Chemical Engineering, Vol 23, pp. 490-498.
- [5] Niemann, M., Antonio, R., Navarro, B., Sainib, L., and Frohlich, J., Buoyancy impact on secondary flow and heat transfer in a turbulent liquid metal flow through a vertical square duct, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol 125, pp. 722-748.
- [6] Eiamsa-ard, S., Koolnapadolb, N., and Promvong, P., Heat Transfer Behavior in a Square Duct with Tandem Wire Coil Element Insert, Chinese Journal of Chemical Engineering, Vol 20, pp 863-869.
- [7] Incropera, F. and Dewitt, P.D. (1996), Introduction to heat transfer, 3rd edition John Wiley & Sons Inc.