

## การศึกษาเชิงตัวเลขสำหรับการไหลปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีการเพิ่มครีบทรงกระบอกและครีบทัววีแยกส่วน

### Numerical study on turbulent flow and heat transfer in square duct with cylindrical pin fin and V-shaped discrete rib

วิฑาดา เจษฎารัตนชัย<sup>1</sup> และ นราพล แดนปากกลาง<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

1 ซอยฉลองกรุง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

\*ติดต่อ: E-mail: naraphon.dan@gmail.com, โทร: 097-079-1818

#### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาการไหลแบบปั่นป่วน และการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมโดยการศึกษาเชิงตัวเลข และใช้การคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method) และ SIMPLE algorithm ในการหาคำตอบ ซึ่งวิเคราะห์ผลกระทบของค่า Blockage Ratio (BR=0.05, 0.075, และ 0.125) ครีบทัววีทำมุม ( $\alpha=30, 45$ , และ  $60$  องศา) และ Pitch ration (PR) เท่ากับ 0.625 โดยใช้อากาศไหลผ่านที่ค่าเรย์โนลด์ ตั้งแต่ 5,000 ถึง 17,000 ผลการทดลองพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น และเมื่อค่า BR สูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อน และค่าตัวประกอบแรงเสียดทาน ( $f/f_0$ ) เพิ่มขึ้น จึงจำเป็นต้องพิจารณาสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) เป็นสำคัญ สำหรับงานวิจัยนี้ครีบทึ่มี BR=0.05 ทำมุม  $\alpha=45$  องศา ที่ค่าเรย์โนลด์ เท่ากับ 5,000 มีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมากที่สุด เท่ากับ 2.07 และมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนมากกว่าท่อเรียบ 3.32 เท่า

**คำหลัก:** ครีบทัววี, การไหลแบบต่อเนื่อง, ท่อสี่เหลี่ยม, การไหลแบบปั่นป่วน, การแลกเปลี่ยนความร้อน

#### Abstract

The turbulent flow and heat transfer in a square channel heat exchanger with cylindrical pin fin and V-shaped discrete rib were studied numerically. The finite volume method with SIMPLE algorithm was selected to solve the present problem. The effects of blockage ratio (BR=0.05, 0.075 and 0.125) and flow attack angle ( $\alpha=30^\circ, 45^\circ$  and  $60^\circ$ ) were investigated with single pitch ratio (PR) of 0.625 and Reynolds number range between 5,000 to 17,000. The results showed that the heat transfer rate has a down trend when Reynolds number is increased. The raise of BR values leads to increase the heat transfer rate and friction loss. Therefore the thermal performance should be mainly considered. This inserting duct at BR=0.05,  $\alpha=45$  degree, and Re=5,000 provides the highest thermal performance is around 2.07 and there is heat transfer rate higher than the smooth duct about 3.32 times.

**Keywords:** V-shaped discrete rib, Periodic flow, Square duct, Turbulent flow, Heat transfer

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ได้ถูกนำมาพัฒนากันอย่างแพร่หลาย ส่วนใหญ่จะพัฒนาในส่วนของลักษณะการไหลของสารเพื่อให้เกิดการไหลวนให้มากที่สุด และมีค่าการสูญเสียแรงเสียดทานน้อยอย่างเหมาะสม หลักการการทำให้สารไหลวนนั้นคือการติดตั้งด้วย Vortex Generators เช่น ครีบ (fins), แผ่นกั้น (baffles), ribs, ใบบิด (twisted tapes), ขดลวด (wire coils), และ ปีก (winglets) เข้าไปในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในบทความนี้เราจะกล่าวถึงเครื่องยนต์ของเครื่องบิน (Gas Turbine Engine) ก็จำเป็นต้องมีการระบายความร้อน จากความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างที่เครื่องยนต์กำลังทำงานให้กับใบพัดโดยใช้อากาศไหลผ่านช่องภายในใบพัดเพื่อหลีกเลี่ยงให้อุณหภูมิของใบพัดไม่ร้อนถึงจุดหลอมเหลวของวัสดุ ดังนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงสุดจึงมีการพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยทั่วไปเทคนิคการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนได้แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม [1-3] คือ กลุ่มที่ 1 แบบ active techniques แต่ในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน วิธีที่ได้รับความนิยมกันส่วนมากก็คือ วิธีการแบบ passive techniques เป็นการออกแบบลักษณะพื้นผิวของท่อแบบพิเศษต่างไปจากผิวเรียบและปรับปรุงของไหลหรือสารทำงานเพื่อให้มีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีมากขึ้นโดยไม่มีพลังงานภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง

สำหรับ Vortex generators ที่นำมาพัฒนานั้นมีหลากหลายรูปแบบ Promvong et al. [4] ได้ทำการทดลองคำนวณเชิงตัวเลข หรือ Computation Fluid Dynamics สำหรับการไหลในท่อสี่เหลี่ยมที่ติดครีบแบบ V-shaped discrete ribs โดยใช้ค่า  $Re=10,000$  ถึง  $25,000$  และเปลี่ยนแปลงค่า Blockage ratio ( $BR$ ) ผลการทดลองพบว่าที่  $BR=0.0725$  มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อเปล่าสูงถึง 4.0 เท่า เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงขึ้น จึงมีการนำครีบต่างๆ เข้ามาติดร่วมกัน เช่น ครีบแบบปีกร่วมกับใบบิด (Twisted-tape) Promvong et al. [5] ในท่อบูทรวงสี่เหลี่ยม ทดลองโดยกำหนดค่าเรย์โนลด์ในช่วง 4,000 ถึง 30,000 ค่า twist ratio  $Y=4$  และ 5 ค่าอัตราส่วนความสูงของท่อ  $BR=0.1, 0.15$  และ  $0.2$ , มีค่าอัตราส่วนของระยะห่างของครีบแบบปีก  $PR=2, 2.5, 4$  และ  $5$  พบว่าที่  $BR=0.1, PR=2$  และ  $Y=4$  ให้ค่าสมรรถนะเชิง

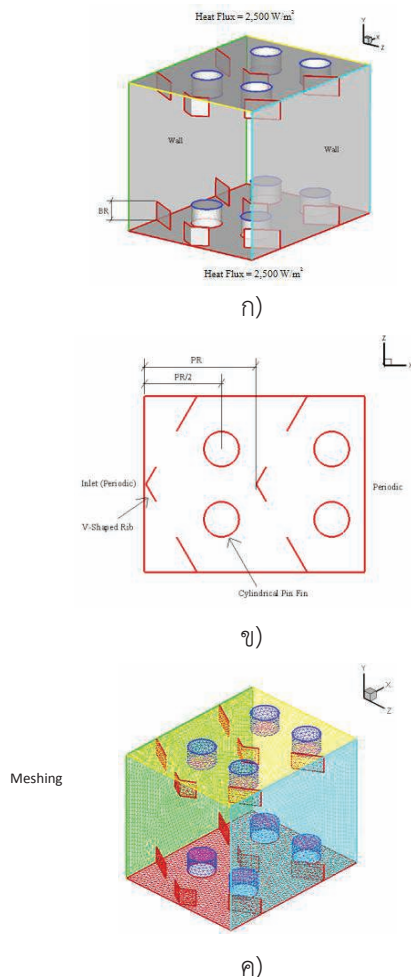
ความร้อนสูงสุด และการติดตั้งใบบิดร่วมกับครีบแบบปีกให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่า การติดตั้งใบบิดอย่างเดียวถึง 17% และยังมีนักวิจัยหลายๆท่านที่ได้คิดลักษณะของครีบแบบใหม่ๆขึ้นมาเช่น Caliskan [6] ทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายในท่อ (Channel) ด้วยครีบแบบปีก (Winglet-type) มี 2 แบบคือ Punched triangular vortex generators (PTVGs) และ Punched rectangular vortex generators (PRVGs) ผลการทดลองพบว่าได้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อเปล่าเท่ากับ 23-55% สำหรับการติดตั้งครีบแบบชนิดนั้นได้นักวิจัยได้ทำการทดลองไว้แล้ว แต่นำมาใช้ในท่อแบบกลม Eiamsa-ard et al. [7] ได้ทำการทดลองเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมด้วยแผ่นบิด โดยที่วិเคราะห์อยู่ในช่วง  $Re=2,300$  ถึง  $8,800$  ผลการทดลองได้ว่ามีค่าประสิทธิภาพมากกว่าท่อเรียบเท่ากับ 50% สำหรับครีบแบบหมุด (Pin fin) ก็ได้ถูกนำมาพิจารณาในการติดตั้งในท่อสี่เหลี่ยมด้วยเช่นกัน [8] Fengming et al. ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและความดันตกภายในระบบของครีบแบบหมุด ในรูปแบบต่างๆ เช่น แบบกลม วงรี และนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าหาด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขด้วย ซึ่งผลที่ได้คือ ครีบแบบหมุดทรงกระบอกมีการถ่ายเทความร้อนสูงสุด

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะนำครีบตัววีแยกส่วนมาติดตั้ง ร่วมกับครีบทรงกระบอก เนื่องจากลักษณะของครีบทรงกระบอกมีแนวโน้มที่จะช่วยให้มีค่าตัวประกอบแรงเสียดทานน้อยลงถ้าเทียบกับ การติดครีบตัววีแยกส่วนอย่างเดียว และมีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนใกล้เคียงกับครีบที่ไม่ได้นำมาพิจารณา ซึ่งรูปแบบที่นำมาติดตั้งร่วมกันตาม รูปที่ 1 และพิจารณาการไหลภายในท่อสี่เหลี่ยม เพื่อหาสมรรถนะเชิงความร้อน โดยใช้กระบวนการคำนวณเชิงตัวเลข (Computation Fluid Dynamics) หาผลเฉลี่ยของค่าประสิทธิภาพ และตัวประกอบแรงเสียดทาน มาเปรียบเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบระหว่างค่าเรย์โนลด์ตั้งแต่ 5,000 ถึง 17,000

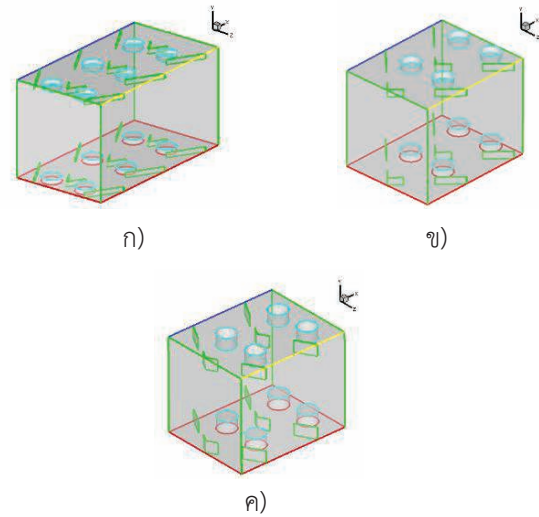
## 2. โครงสร้างการไหลและสมการที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 แบบจำลองท่อสี่เหลี่ยมที่มีการใส่ครีบทวิแยกส่วนร่วมกับครีบทรงกระบอก

แบบจำลองที่นำมาศึกษานี้เป็นการไหลในท่อสี่เหลี่ยม ที่มีความสูง (H) เท่ากับ 0.04 เมตร และความสูงของครีบทวิภายในท่อต่อความสูงท่อหรือ Blockage ratio (BR) เท่ากับ 0.05, 0.075 และ 0.125 โดยที่ครีบทวิแยกส่วนทำมุมกับแนวท่อ ( $\alpha$ ) เท่ากับ 30, 45 และ 60 องศา ระยะ Pitch ratio (PR) เท่ากับ 0.625 และ ครีบทรงกระบอกมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความสูงท่อ (d/H) เท่ากับ 0.2 โดยที่ระยะห่างระหว่าง ครีบทวิแยกส่วนและจุดศูนย์กลางของครีบทรงกระบอก เท่ากับ PR/2 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1



รูปที่ 1. ก) แบบจำลองท่อทรงสี่เหลี่ยมที่มีการใส่ด้วยครีบท  
ข) แบบจำลองมุมมองบน ค) ลักษณะเมชของแบบจำลอง



รูปที่ 2. ก) BR=0.05,  $\alpha=30$  องศา ข) BR=0.075,  $\alpha=45$  องศา ค) BR=0.125,  $\alpha=60$  องศา

### 2.2 สมการควบคุม

สมมติฐานของแบบจำลองสำหรับการไหล และการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยม โดยกำหนดให้เป็น การไหลและถ่ายเทความร้อนแบบสภาวะคงที่ ไม่ขึ้นกับเวลา ลักษณะการไหลของอากาศเป็นแบบ Periodic และ ไหลเต็มท่อ โดยสมมติให้อากาศไม่สามารถกดอัดได้

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

สมการโมเมนตัม:

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

สมการพลังงาน:

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

เมื่อ  $\Gamma$  และ  $\Gamma_t$  คือการแพร่ทางความร้อน และการแพร่ทางความร้อนแบบปั่นป่วน ตามลำดับ ซึ่งถูกกำหนดโดย

$$\Gamma = \mu/Pr \text{ และ } \Gamma_t = \mu_t/Pr_t \quad (4)$$

การไหลแบบปั่นป่วนจำเป็นต้องมีเทอมของความเค้นของเรย์โนลด์  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  ในสมการที่ (2) ข้อสมมติฐานของบู-สเอนส์ เกี่ยวข้องกับความเค้นของเรย์โนลด์ คือการเดียนของความเร็วจนเฉลี่ย

กำหนดโดย

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} (\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i}) \delta_{ij} \quad (5)$$

เมื่อ  $k$  คือ พลังงานจลน์ปั่นป่วน กำหนดโดย  $k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$  และ  $\delta_{ij}$  คือ เดลต้าไครเนกเกอร์,  $\mu_t$  คือ ความหนืดปั่นป่วน กำหนดโดย  $\mu_t = \rho c_\mu k^2 / \varepsilon$  ( $c_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}}$ ) ซึ่งแบบจำลองนี้จะใช้การคำนวณหา

คำตอบด้วยวิธีการของ Realizable  $k - \varepsilon$  [9] และ สมการ Transport กำหนดโดย

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (7)$$

สมการข้างต้น  $\sigma_k$  และ  $\sigma_\varepsilon$  คือ ประสิทธิภาพเลขพรานด์สำหรับ  $k$  และ  $\varepsilon$  ตามลำดับ  $G_k$  คือ ค่าพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนเนื่องจากค่าความเร็วเฉลี่ย  $G_b$  คือ ค่าพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนเนื่องจากการลอยตัว ซึ่งทั้งสองตัวแปรสามารถหาได้จากโมเดลแบบ Standard k-epsilon โดยที่  $c_1 = \max[0.43, \frac{\eta}{\eta+5}]$  และ  $C_2, C_{1\varepsilon}, \sigma_k$  และ  $\sigma_\varepsilon$  คือค่าคงที่

สำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาทั้งหมด 4 ตัวแปร นั่นคือ เลขเรย์โนลด์ เลขนัสเซิลท์ ตัวประกอบแรงเสียดทาน และสมรรถนะเชิงความร้อน ค่าเลขเรย์โนลด์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Re = \frac{\rho u_0 D_h}{\mu} \quad (8)$$

ค่าการถ่ายเทความร้อนในรูปของค่าการกระจายนัสเซิลท์ สามารถคำนวณได้จากสมการ

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

ค่าตัวประกอบแรงเสียดทาน  $f$  สามารถคำนวณได้จากความดันตกคร่อม  $\Delta P$  ของทางเข้าและออกจากตลอดความยาวของท่อ  $L$  ดังสมการ

$$f = \frac{2(\frac{\Delta P}{L}) D_h}{\rho u_0^2} \quad (10)$$

ค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยสามารถคำนวณได้จาก

$$Nu = \frac{1}{A} \int Nu_x dA \quad (11)$$

ค่าสมรรถนะเชิงความร้อน TEF

$$TEF = \left( \frac{Nu}{Nu_0} \right) / \left( \frac{f}{f_0} \right)^{1/3} \quad (12)$$

โดยที่  $Nu_0$  และ  $f_0$  คือ ค่าเลขนัสเซิลท์ และตัวประกอบแรงเสียดทานของท่อเปล่าผิวเรียบตามลำดับ

## 2.3 โดเมนและกริดที่ใช้ในการคำนวณ

ในงานวิจัยนี้จะใช้การสร้างอิลิเมนต์ด้วย Tet/Hybrid, TGrid type เมื่อทำการทดสอบการหาผลเฉลี่ยโดยเปรียบเทียบจำนวนกริด เท่ากับ 196,445 314,095 และ 402,385 ที่ค่าเรย์โนลด์ เท่ากับ 5,000 BR=0.05 และ  $\alpha=60$  องศา พบว่า ได้ค่าเลขนัสเซิลท์ และตัวประกอบแรงเสียดทานต่างกันเพียง 0.3% ดังนั้นจึงเลือกใช้จำนวนกริดเพียง 314,095 เพื่อลดเวลาในการหาผลเฉลี่ย

## 2.4 เงื่อนไขและขอบเขต

กำหนดให้อากาศทางเข้าและทางออกเป็นแบบ Periodic translation ที่อุณหภูมิ 300K และค่าเลขพรานด์ เท่ากับ 0.707 ด้วยอัตราการไหลเชิงมวลคงที่ที่กำหนดด้วยค่าของเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 5,000 ถึง 17,000 ผนังของท่อทั้งสองด้านถูกกำหนดให้ไม่มีการลื่นไหล (No-slip condition) หรือความเร็วที่ผนังมีค่าเป็นศูนย์ เป็นผนังที่อยู่กับที่ (Stationary wall) รวมไปถึงแผ่นครีบริบที่ใส่เข้าไปด้วย และให้ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวของท่อสองด้าน (บน และ ล่าง) คงที่ด้วย  $2,500 \text{ W/m}^2$  และไม่มีการถ่ายเทความร้อนสำหรับผิวท่อด้านซ้ายและขวา ในการคำนวณหาคำตอบจะใช้ SIMPLE algorithm และ QUICK scheme

### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

#### 3.1 การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าเรียบ

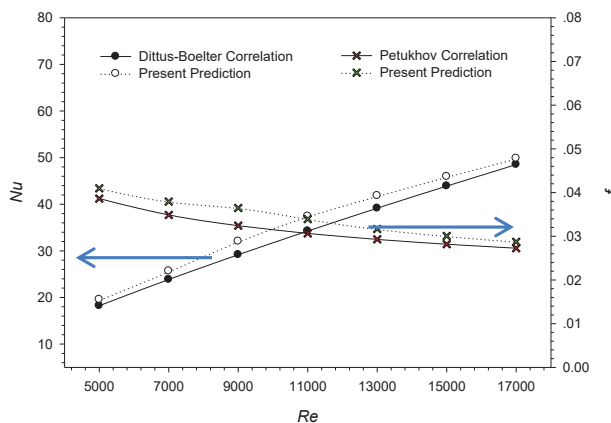
ในการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองนั้นสามารถทำได้โดยนำผลจากการหาคำตอบด้วยวิธีการกระบวนการคำนวณเชิงตัวเลขมาเปรียบเทียบกับค่าจากการคำนวณตามสมการความสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter และ Petukhov สำหรับค่าเลขนัสเซิลท์ และค่าตัวประกอบแรงเสียดทานตามลำดับ โดยวิธีการนี้ได้ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบกันอย่างแพร่หลาย Promvonge et al. [5] ได้ทำการเปรียบเทียบ ระหว่างความสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter, Gnielinski สำหรับค่าเลขนัสเซิลท์ และความสัมพันธ์ของ Blasius, Petukhov สำหรับค่าตัวประกอบแรงเสียดทาน เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ใช้วิธีการกระบวนการคำนวณเชิงตัวเลขซึ่งพบว่า ความสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter และ Petukhov ให้ผลเฉลยใกล้เคียงกับแบบจำลองมากที่สุด

สมการความสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter

$$Nu_0 = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} ; \text{Heating} \quad (13)$$

สมการความสัมพันธ์ของ Petukhov

$$f_0 = 0.316Re^{-0.25}; 3,000 \leq Re \leq 5 \times 10^6 \quad (14)$$



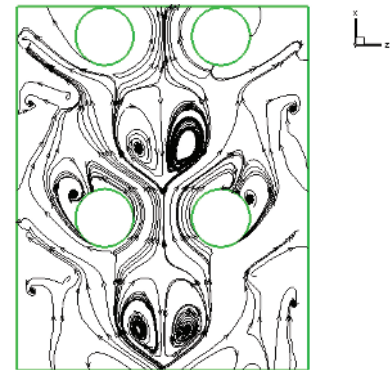
รูปที่ 3. กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง  $Nu_0$  และ  $f_0$  สำหรับท่อเรียบ

จากรูปที่ 3 จะได้ว่าค่าความแตกต่างจากผลเฉลยแม่นยำอยู่ในช่วง  $\pm 10.87\%$  และ  $\pm 11.2\%$  สำหรับ

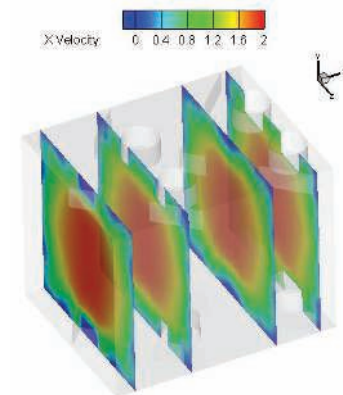
ผลเฉลยแม่นยำตรงของค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบแรงเสียดทานตามลำดับ ซึ่งสามารถยอมรับได้

#### 3.2 ผลกระทบจากการติดครีบ และพฤติกรรมกรไหล

รูปที่ 4ก แสดงให้เห็นว่าเมื่ออากาศไหลผ่านครีบลักษณะการไหลจะเป็นแบบหมุนวน หรือที่เรียกว่า Swirl โดยเฉพาะที่ตำแหน่งกลางครีบของครีบตัววิแยกส่วน ซึ่งการไหลวนนี้จะช่วยทำให้มีการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น สำหรับการไหลผ่านครีบทรงกระบอก มีการไหลวนเล็กน้อยในส่วนท้ายของครีบ และสามารถช่วยทำให้อากาศ เนื่องจากลักษณะรูปทรงเฉพาะของครีบที่เป็นทรงกระบอก



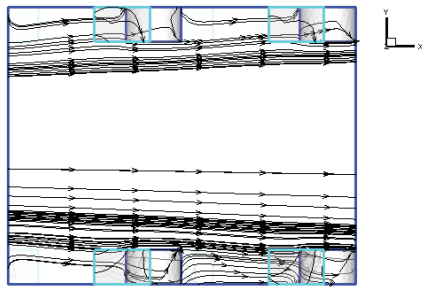
(ก)



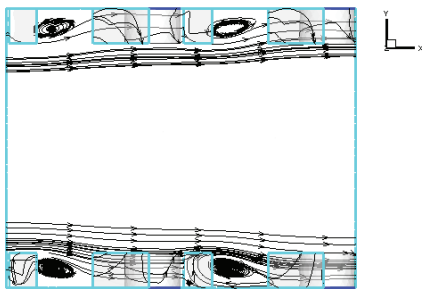
(ข)

รูปที่ 4. (ก) รูปแสดงลักษณะการไหลผ่านครีบ  
(ข) รูปแสดงการกระจายความเร็วของอากาศ





ก)



ข)

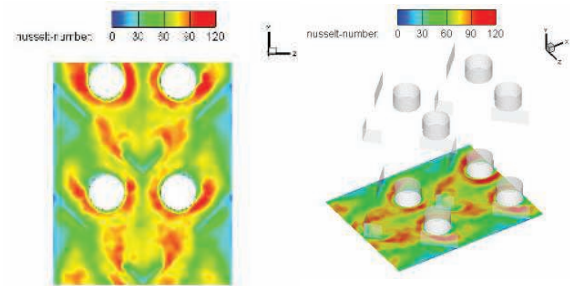
รูปที่ 5. (ก) ลักษณะการไหลผ่านครีบทรงกระบอกตามแนวแกน X (ข) ลักษณะการไหลผ่านครีบทัวแยกส่วนตามแนวแกน X

จากรูปที่ 4 และ 5 แสดงให้เห็นว่า เมื่ออากาศไหลผ่านครีบทัวแยกส่วน จะทำให้เกิดการไหลวนของอากาศ ทั้งทางด้านข้าง และด้านบนของครีบจึงส่งผลให้ในบริเวณด้านหลังของครีบ ตัวแยกส่วน มีการถ่ายเทความร้อนได้มากที่สุด ซึ่งจะสามารถดูได้จากค่าสเกลลท์ในหัวข้อถัดไป แต่สำหรับครีบทรงกระบอก นั้นเมื่ออากาศไหลผ่านจะเกิดการไหลวนเพียงบริเวณด้านข้างของครีบเท่านั้น

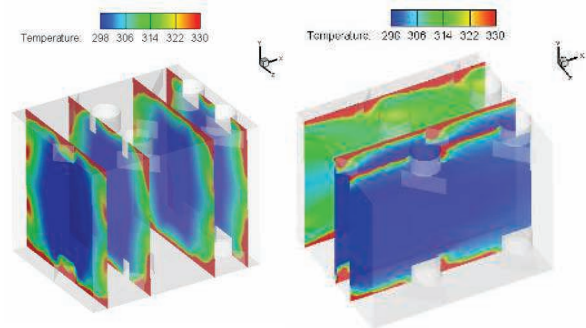
### 3.3 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อน หรือการแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถพิจารณาได้จากเลขนัสเซลล์เฉลี่ยของผนังทั้งสองด้าน (บน-ล่าง) หลังจากมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศแล้ว รูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าค่าสเกลลท์มีค่าสูงสุดอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของครีบ อันเนื่องมาจากการไหลของอากาศเมื่อผ่านครีบจะมีความเร็วสูงขึ้น จึงส่งผลให้มีค่าสเกลลท์สูงขึ้นด้วย และการลักษณะการไหลวนจะทำให้อากาศสามารถสัมผัสกับผิวท่อได้มากขึ้น

ซึ่งสังเกตได้จากค่าสเกลลท์บริเวณของครีบทรงกระบอกในแถวที่สองตามรูปที่ 6 ว่ามีค่าสูงที่สุด



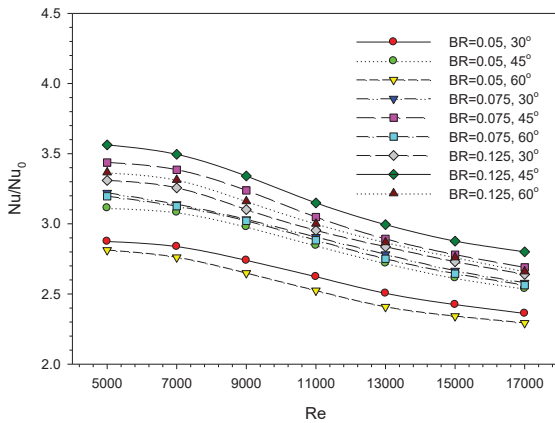
รูปที่ 6. รูปแสดงการกระจายตัวของค่าสเกลลท์ของผนังท่อด้านล่าง ที่ค่า  $Re=5,000$   $BR=0.125$  และ  $\alpha=45$  องศา



รูปที่ 7. รูปแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่หน้าตัดแกน X และ Z ที่ค่า  $Re=5,000$   $BR=0.125$  และ  $\alpha=45$  องศา

จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งหลังครีบทัวแยกส่วน มีชั้นการกระจายอุณหภูมิสูงทั้งทางหน้าตัดแกน X และ Z อันเนื่องมาจากผลของการเกิดการไหลวนด้านหลังของครีบ แต่ครีบทรงกระบอกจะมีชั้นการกระจายอุณหภูมิที่สูงเฉพาะหน้าตัดแกน Z ตามหัวข้อที่ 3.2

สำหรับค่าสเกลลท์สามารถนำมาเปรียบเทียบได้โดยนำ ค่าสเกลลท์เฉลี่ยของผนังทั้งสองด้านหารด้วยค่าสเกลลท์ท่อเปล่าที่ได้จากการคำนวณ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 8



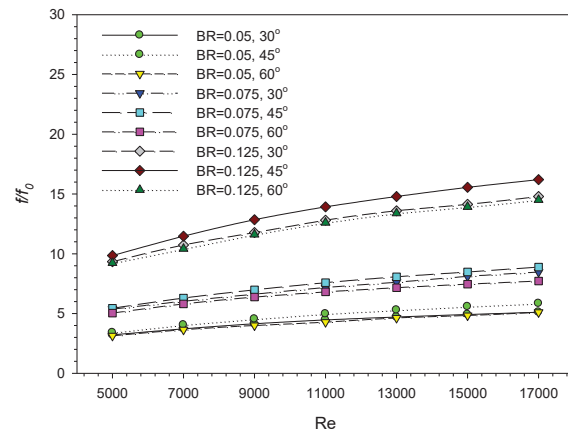
รูปที่ 8. กราฟแสดงสัดส่วนระหว่างค่าสเกลที่เฉลี่ยของท่อติดครีบ และท่อเรียบ ที่ค่าเรย์โนลด์ต่างๆ

จากรูปที่ 8 จะเห็นว่าเมื่อเราเพิ่มค่าเรย์โนลด์จะส่งผลให้ค่าสัดส่วนของค่าสเกลที่มีแนวโน้มที่ลดน้อยลงสำหรับผลกระทบของค่า BR นั้น เมื่อค่า BR มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ค่าสัดส่วนของค่าสเกลที่สูงขึ้นสำหรับที่  $\alpha$  มีค่าคงที่ สำหรับผลกระทบของมุมของครีบ ( $\alpha$ ) พบว่าเมื่อมีค่าสูงขึ้น ส่งผลทำให้มีค่า  $Nu/Nu_0$  สูงขึ้นด้วย สำหรับ  $\alpha = 45$  องศา และมีค่าน้อยลงสำหรับ  $\alpha = 60$  องศา เมื่อเทียบกับ  $\alpha = 30$  องศา จากการวิเคราะห์ลักษณะของการไหลพบว่า ครีบที่มี  $\alpha = 60$  องศา มีการต้านการไหลมากที่สุดหากพิจารณาเฉพาะครีบตัววิแยกส่วน แต่เมื่อพิจารณาครีบทรงกระบอกรวมด้วยจะเห็นว่าระยะห่างของ ครีบตัววิแยกส่วน และครีบทรงกระบอกมีระยะที่ห่างที่สุด รองลงมาคือ 45 และ 30 องศา ตามลำดับ จะส่งผลให้มีค่า  $Nu/Nu_0$  น้อยที่สุด แต่เหตุที่  $\alpha = 45$  องศา มีค่าสูงที่สุดนั้นเพราะว่าระยะห่างและความสูงของครีบมีความเหมาะสมมากที่สุดจึงมีค่า  $Nu/Nu_0$  มากที่สุด เมื่อเทียบค่าสัดส่วนเลขนัสเซลล์ของครีบมีค่า BR,  $\alpha$ , และ Re ต่างๆพบว่า ครีบที่มีค่า BR=0.125,  $\alpha = 45$  องศา ที่ Re=5,000 มีค่ามากที่สุด

### 3.4 การสูญเสียความดัน

จากการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน หรือ คำนัสเซลล์ข้างต้น ถึงแม้ว่าเมื่อเพิ่มค่า BR และ  $\alpha$  แล้วจะได้ค่าสเกลที่ดีขึ้นมากก็ตาม แต่เราต้องสูญเสียค่าความดันในระบบไปอันเนื่องมาจากครีบที่ขวางการไหล

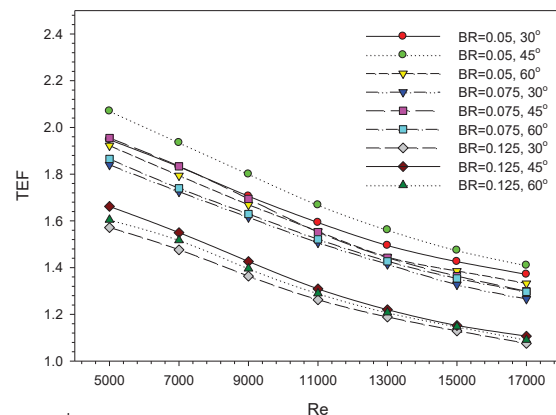
ของอากาศ จึงส่งผลให้ค่าตัวประกอบแรงเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นตามขนาดของครีบ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 9 ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่าค่า  $f/f_0$  ของท่อที่มีครีบ BR=0.125 และ  $\alpha = 45$  องศา มีค่า  $f/f_0$  สูงสุด ที่ Re=17,000



รูปที่ 9. กราฟแสดงสัดส่วนระหว่างตัวประกอบแรงเสียดทานของท่อติดครีบและท่อเรียบ ที่ค่าเรย์โนลด์ต่างๆ

สำหรับผลกระทบของค่า  $\alpha$  แสดงแนวโน้มเช่นเดียวกับค่า  $Nu/Nu_0$  นั่นคือ เมื่อ  $\alpha = 45$  องศา มีค่าสัดส่วนตัวประกอบแรงเสียดทานมากที่สุด รองลงมาคือ 30 และ 60 องศา จากการวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของครีบภายในท่อจะเห็นว่า ครีบทรงกระบอกจะอยู่ที่ตำแหน่งเดิมเสมอแต่เมื่อครีบตัววิลดมุมของครีบลดลงจะส่งผลให้ครีบตัววิและครีบทรงกระบอกมีระยะที่ใกล้ที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2

### 3.5 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 10. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน ที่ค่าเรย์โนลด์ต่างๆ

จากรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อน ของท่อติดครีบบีค่าสูงสุดที่  $Re=5,000$   $BR=0.05$  และ  $\alpha=45$  องศา มีค่าเท่ากับ 2.0697 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่า  $TEF$  กับท่อเรียบนั้นพบว่าท่อติดครีบบีค่า  $TEF$  สูงกว่าท่อเรียบถึง 1.97 เท่า และครีบบีที่มีค่า  $BR=0.125$  และ  $\alpha=30$  องศา ที่  $Re=17,000$  มีค่า  $TEF$  น้อยที่สุดเท่ากับ 1.075 จะเห็นว่าผลกระทบอันเนื่องมาจากค่า Blockage ratio มีแนวโน้มที่เหมือนกับ [4] นั่นคือเมื่อเพิ่มค่า  $BR$  จะทำให้มีค่า  $Nu$  และ  $f$  สูงขึ้น แต่จะส่งผลให้ค่า  $TEF$  ลดน้อยลง

#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศในท่อสี่เหลี่ยมที่ติดครีบบีพบว่า เมื่ออากาศไหลผ่านครีบบีตัววีแยกส่วนทำให้เกิดความต่างของความดันด้านหน้า และหลังครีบบีส่งผลให้เกิดการไหลวนกลับของอากาศ ทั้งที่บริเวณด้านบนและด้านข้างของครีบบีตัววีแยกส่วน แต่สำหรับครีบบีทรงกระบอกนั้นจะเกิดการไหลวนเพียงบริเวณด้านข้างของครีบบีเท่านั้น สำหรับการเกิดการไหลวนของอากาศจะส่งผลให้อากาศสัมผัสกับท่อได้มากขึ้นซึ่งจะส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นด้วย

ผลกระทบของค่า Blockage ratio เมื่อเพิ่มค่า  $BR$  จะส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นแต่อย่างไรก็ตามเมื่อค่า  $BR$  ที่เพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลให้มีค่าแรงเสียดทานในระบบสูงขึ้นด้วย นั่นหมายความว่าเราจะต้องใช้พลังเพิ่มขึ้นเพื่อเอาชนะความเสียดทานนี้ สำหรับท่อติดครีบบี  $BR=0.125$  และ  $\alpha=45$  องศา ที่ค่าเรย์โนลด์เท่ากับ 5,000 มีค่า  $Nu/Nu_0=3.5624$  ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนกับท่อเรียบนั้น พบว่าท่อที่ติดครีบบีค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าถึง 3.32 เท่า และมีค่าตัวประกอบแรงเสียดทาน  $f/f_0 = 16.2$  ที่  $Re=17,000$  ซึ่งมากกว่าท่อเรียบถึง 15.37 เท่า แต่เมื่อพิจารณาค่าสมรรถนะเชิงความร้อน  $TEF$  สำหรับท่อติดครีบบีที่มีค่า  $TEF$  สูงสุดที่  $Re=5,000$   $BR=0.05$  และ  $\alpha=45$  องศา มีค่าเท่ากับ 2.0697

ผลกระทบของการติดครีบบีตัววีแยกส่วนร่วมกับครีบบีทรงกระบอกส่งผลให้ค่าความดันตกคร่อมของระบบมีค่าน้อยกว่า การติดครีบบีตัววีแยกส่วนอย่างเดียวถึง 2 เท่า เมื่อเทียบกันที่  $Re=15,000$  และ  $BR=0.125$ ,  $\alpha=60$  องศา [4] แต่ครีบบีแบบรวมจะมีค่านัสเซลท์ที่น้อยกว่า

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] F. Incropera and P.D. Dewitt, 2007. "Introduction to heat transfer", 6th edition, John Wiley & Sons.
- [2] R. L. Webb, 1992. "Principles of Enhanced Heat Transfer", New York: John-Wiley & Sons.
- [3] A. Bejan and A.D. Kraus, 2003. "Heat Transfer handbook", New Jersey: John-Wiley & Sons.
- [4] P. Promvong, W. Changcharoen, S. Kwankaomang and C. Thianpong, "Numerical heat transfer study of turbulent square-duct flow through inline V-shaped discrete ribs", International Communications in Heat and Mass Transfer 38 (2011) 1392-1399.
- [5] P. Promvong, S. Suwannapan, M. Pimsarn and C. Thianpong, "Experimental study on heat transfer in square duct with combined twisted-tape and winglet vortex generators", International Communications in Heat and Mass Transfer 59 (2014) 158-165.
- [6] S. Caliskan, "Experimental investigation of heat transfer in a channel with new winglet-type vortex generators", International Communications in Heat and Mass Transfer 78 (2014) 604-614.





#### เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [7] S. Eiamsa-ard and P. Promvonge, "Enhancement of heat transfer in a tube with regularly-spaced helical tape swirl generators", *Solar Energy* 78 (2005) 483-494.
- [8] Fengming Wang, Jingzhou Zhang, and Suofang Wang, "Investigation on flow and heat transfer characteristics in rectangular channel with drop-shaped pin fin", *Propulsion and Power Research* (2012) 64-70.
- [9] ANSYS. Inc., "ANSYS Fluent Theory Guide", Release 18.0, (2017).