# การไหลแบบราบเรียบและการถ่ายเทความร้อนในท่อจัตุรัสที่มีครีบรูปตัวยู

# Laminar Flow and Heat Transfer in Square Duct with U-shaped Ribs

มรุต อุกฤษฏ์มโนรถ, ดำริห์ จันทร์แสงสุข และ พงษ์เจต พรหมวงศ์*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
* ติดต่อ: โทรศัพท์: (662) 3298350-1, โทรสาร: (662) 3298352,
E-mail: kppongje@kmitl.ac.th

***บทคัดย่อ***

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนสำหรับการไหลแบบราบเรียบในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีอุณหภูมิผิวคงที่ โดยมีการติดตั้งครีบรูปตัวยูที่ผนังด้านในของท่อ ซึ่งมีการจัดวางครีบโดยมีอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของครีบต่อความสูงของท่อ (Pitch ratio, PR) เท่ากับ 1 โดยครีบรูปตัวยู ที่ติดตั้งนั้นมีลักษณะการจัดวางเอียงทำมุมปะทะที่ $\alpha$ = 60° และมีค่าอัตราส่วนการบล๊อคการไหล (Blockage ratio, BR) เท่ากับ 0.10, 0.20, 0.30 และ 0.40 ในการคำนวณใช้วิธีปริมาตรสืบเนื่องและเลือกลำดับวิธีหาผลเฉลยแบบ SIMPLE ซึ่งการจำลองนี้ได้นำเสนอคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของของไหลสำหรับเลขเรย์โนลด์บนพื้นฐานเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ช่วงจาก Re = 100 ถึง 1200 และได้ศึกษาผลของแผ่นครีบรูปตัวยูต่อการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ผลจากการศึกษาที่ได้จากท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดครีบรูปตัวยูถูกนำไปเปรียบเทียบกับท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ โดยได้ทำการพิจารณาค่าการถ่ายเทความร้อนโดยแสดงในเทอมของเลขนัสเซิลท์ (Nusselt number) และการสูญเสียความดันโดยแสดงในเทอมของตัวประกอบเสียดทาน (friction factor) จากการศึกษาพบว่าการเพิ่มครีบรูปตัวยูจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับท่อที่มีผนังเรียบ และพบว่าเมื่อเพิ่มความสูงของครีบจะทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นโดยท่อที่มีแผ่นติดครีบรูปตัวยูที่มีความสูง 40% ให้ค่าการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากครีบรูปตัวยูจะทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนและการกระแทกของการไหลที่บริเวณผิวของท่อในขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มความสูงของครีบก็จะทำให้เกิดความดันสูญเสียเพิ่มมากขึ้นด้วย

***คำหลัก:*** ท่อจัตุรัส, ครีบรูปตัวยู, การถ่ายเทความร้อน, ความเสียดทาน

***Abstract***

Laminar periodic flow and heat transfer in a three dimensional square duct with isothermal walls and with U-shaped rib is investigated numerically. The computations based on the finite volume method, and the SIMPLE algorithm has been implemented. The fluid flow and heat transfer characteristics are presented for Reynolds numbers based on the hydraulic diameter of the square duct ranging from 100 to 1200. Effects of U-shaped rib on heat transfer and pressure loss in the duct are studied and their results

of the U-shaped rib of 60° attack angle are also compared with smooth duct. It is found that the U-shaped rib performs better than smooth duct for all Reynolds number values. The increase of the blockage ratio, BR leads to an increase in the Nusselt number and friction factor. The computational results reveal that the BR=0.4 provide the highest on both Nusselt number and friction factor.

***Keywords:*** square channel, U-shaped rib, heat exchanger, friction factor

## 1. บทนำ

ในกระบวนการอุตสาหกรรมต่าง ๆ มีการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในท่อผิวเรียบด้วยเทคนิคและวิธีการต่าง ๆ มากมาย ซึ่งวิธีที่ได้ผลดีมากที่สุดอย่างหนึ่งคือการติดครีบหรือแผ่นกั้นบนผนังภายในท่อเพื่อเป็นการสร้างการไหลปั่นป่วน โดยวิธีนี้จะทำให้ส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนแต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มตัวสร้างการไหลแบบปั่นป่วนก็จะทำให้เกิดค่าตัวประกอบเสียดทานหรือค่าความดันตกคร่อมเพิ่มมากขึ้นด้วย วิธีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนนี้ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านวิศวกรรม เช่น ในระบบการปรับอากาศ ระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่าง ๆ ซึ่งจะมีขนาดเล็กลงเมื่อมีการเพิ่มตัวสร้างการไหลปั่นป่วน จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาถึงลักษณะการถ่ายเทความร้อน การไหลและความดันตกคร่อมโดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Patankar และคณะ [1] ศึกษารูปแบบการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบเป็นคาบของการไหลที่มีการพัฒนาเต็มที่ทำ Kellar and Patankar [2] ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในช่องขนานที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นวางเยื้อง จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าค่าการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความสูงของแผ่นกั้นและทำการลดระยะห่างระหว่างแผ่น Webb และ Ramadhyani [3] คำนวณเชิงตัวเลขของลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องขนานผิวเรียบที่ติดแผ่นกั้นแนวเยื้องกัน โดยใช้เงื่อนไขพื้นฐานลักษณะการไหลเป็นคาบในการไหลที่มีการพัฒนาเต็มที่ของ Patankar และคณะ [1] Sripattanapipat และ Promvonge [4] วิเคราะห์เชิงตัวเลขการถ่ายเทความร้อนแบบราบเรียบ 2 มิติในในช่องขนานที่ติดแผ่นกั้นรูปเพชรที่ผนังบนและล่างแนวเยื้อง โดยคิดลักษณะการไหลเป็นคาบ โดยใช้เงื่อนไขอุณหภูมิที่ผนังคงที่ เลขเรย์โนลด์ที่ใช้ช่วง 100-600 พบว่าเมื่อลดมุมที่ยอดรูปเพชรจะทำให้ค่าเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น และยังพบว่าทุกค่าเลขเรย์โนลด์ที่ใช้มุมยอดเพชรที่ 5° และ 10° ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่ามุมยอดเพชรที่ 0° (แผ่นกั้นแบน) Ko and Anand [5] ทำการศึกษาวิจัยการทดลองของการไหลแบบปั่นป่วนในช่องขนานที่มีการเพิ่มแผ่นกั้นแบบพรุนและพบว่าการเพิ่มแผ่นกั้นแบบพรุนจะทำให้พฤติกรรมการไหลเปลี่ยนไปซึ่งให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าการใช้แผ่นกั้นแบบธรรมดา Han และ Zhang [6] นำเสนอการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นในท่อจัตุรัสด้วยครีบทั้งหมด 7 รูปทรงของครีบที่วางเว้นช่วง พบว่าครีบรูปตัววีวางเว้นช่วงมุม 60° ให้การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าท่อผิวเรียบ 4.5 เท่าและดีกว่าครีบวางต่อเนื่อง การทดลองทั้งหมดได้ติดครีบที่ผนังสองด้านและค่าความสูงครีบต่อความสูงท่อมีค่า 0.0625 และระยะพิตซ์ต่อความสูงครีบที่ค่า10 Promvonge et al. [7] ศึกษาค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหลแบบราบเรียบในท่อเหลี่ยมที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นเอียงทำมุม 45 องศา ที่ผนังของท่อด้านเดียว โดยมีการจัดวางแผ่นกั้นที่อัตราส่วนระหว่างระยะห่างของครีบต่อความสูงของท่อเท่ากับ 1 จากการศึกษาพบว่าการเพิ่มแผ่นกั้นวางขวางทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนแบบคู่ซึ่งการหมุนวนที่เกิดขึ้นจะช่วยทำให้เกิดการกระแทกที่บริเวณด้านบนและล่างของท่อรวมถึงด้านข้างท่อในส่วนที่ติดกับปลายครีบ (BTE side wall) การเกิดการไหลกระแทกทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 2.2 ที่ค่า BR = 0.4 และ Re = 1200 Liou และ Hwang [8] ได้ทำการ

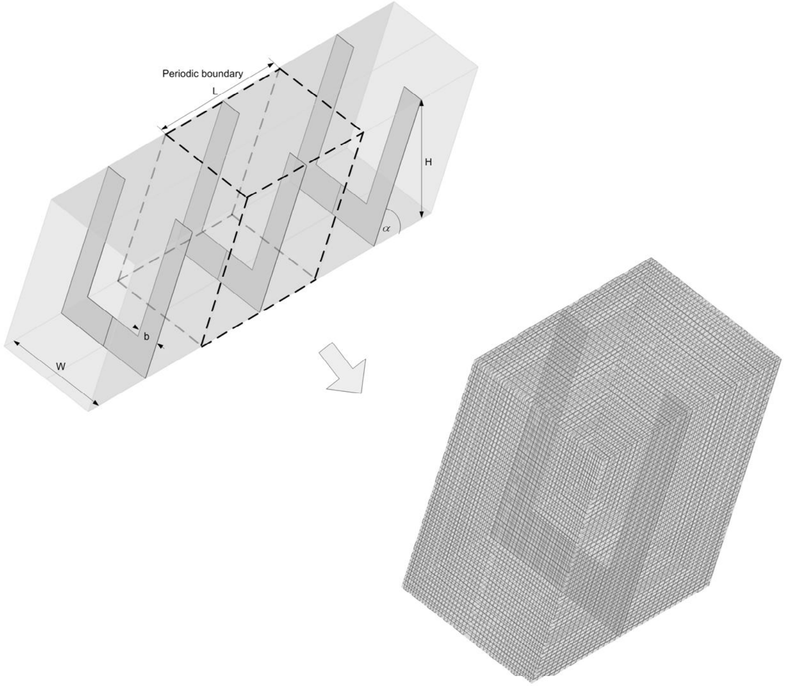
ทดลองครีบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ครีบสามเหลี่ยม และครีบครึ่งวงกลม พบว่าครีบสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีที่สุดในครีบทั้งหมดที่ทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิธีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบราบเรียบ 3 มิติ โดยพิจารณาลักษณะการไหลเป็นคาบ ในท่อจัตุรัสที่ติดครีบรูปตัวยูที่ผนังด้านในท่อ โดยศึกษาถึงผลของสัดส่วนการ BR ของครีบรูปตัวยูที่มุมปะทะ $\alpha = 60^{\circ}$ ที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ลักษณะการไหลและค่าความเสียดทาน

## 2. โครงร่างการไหลและพื้นฐานทางคณิตศาสตร์

### 2.1 รูปทรงของท่อที่มีการติดตั้งครีบรูปตัวยู

ระบบที่ให้ความสนใจเป็นท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสติดตั้งครีบรูปตัวยูทำมุม ซึ่งครีบที่ติดนั้น มีอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างแผ่นต่อความสูงของท่อ (P/H) หรือระยะพิตซ์ของท่อมีค่าคงที่เท่ากับ H วางเอียงทำมุมปะทะ, $\alpha = 60^{\circ}$ และมีอัตราส่วนความสูงของครีบต่อความสูงของท่อ (b/H) อยู่ในช่วง 0.1-0.4 ความสูงของท่อหน้าตัดจัตุรัสที่ใช้ในการจำลองนี้มีค่า H = 0.05 m และสมมติท่อยาวมาก ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งพิจารณาการไหลเป็นแบบ periodic




รูปที่ 1 รูปทรงของท่อที่มีการติดตั้งครีบรูปตัวยูและโดเมนที่ใช้ในการคำนวณโดยคิดการไหลแบบ periodic ที่มีการสร้างตาข่ายสี่เหลี่ยมแบบไม่สม่ำเสมอ

### 2.2 พื้นฐานทางคณิตศาสตร์

การพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีสมมติฐานดังต่อไปนี้

- การไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบคงตัว 3 มิติ
- การไหลเป็นแบบราบเรียบและอัดตัวไม่ได้
- คุณสมบัติของของไหลคงที่
- ไม่คำนึงแรงวัตถุและการสูญสลายเนื่องจากความหนืด
- ไม่คำนึงการแผ่รังสีความร้อน

จากสมมติฐานข้างต้น สำหรับการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสสมการควบคุมประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการนาวิเยร์-สโตก และสม

การพลังงาน สามารถเขียนในรูปเทนเซอร์ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนดังนี้

สมการความต่อเนื่อง:

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

สมการโมเมนตัม:

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

สมการพลังงาน:

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

เมื่อ $\Gamma$ คือการแพร่ทางความร้อน กำหนดโดย

$$\Gamma = \frac{\mu}{\mathrm{Pr}} \tag{4}$$

สมการควบคุมทั้งหมดจะถูกดิสเครทไทซ์โดยแบบแผนวิธีผลต่างครอดราติค(Quadratic upstream interpolation for convective kinetics differencing scheme, QUICK) แล้วทำการคำนวณหาผลเฉลยตามระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง [9] โดยแผนผังวิธีแบบ SIMPLE (Semi-implicit method for pressure-linked equations) ในการลู่เข้าหาคำตอบจะพิจารณาที่ความแตกต่างของค่าการแปรเปลี่ยนน้อยกว่า $10^{-5}$ ของทุกตัวแปร

ในงานวิจัยนี้มีตัวแปรที่ให้ความสนใจอยู่ 4 ตัวแปร คือ เลขเรย์โนลด์ ตัวประกอบเสียดทาน เลขนัสเซิลท์ และ สมรรถนะเชิงความร้อน ซึ่งค่าเลขเรย์โนลด์นิยามโดย

$$\mathrm{Re} = \rho \bar{u} D_h / \mu \tag{5}$$

ตัวประกอบเสียดทาน, f คำนวณได้จากความดันตกคร่อม, $\Delta$p ตลอดช่วงความยาว periodic ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส, L

$$f = \frac{(\Delta p / L) D_h}{(1/2)\rho \bar{u}^2} \tag{6}$$

การถ่ายเทความร้อนคำนวณหาจากค่าเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$Nu_x = \frac{h_x D_h}{k} \tag{7}$$

ค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยสามารถคำนวณได้จาก

$$Nu = \frac{1}{A}\int Nu_x \partial A \tag{8}$$

สมรรถนะเชิงความร้อน,$\eta$

$$\eta = (Nu / Nu_0)/(f / f_0)^{1/3} \tag{9}$$

เมื่อ $Nu_0$ และ $f_0$ คือ เลขนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียดทานของท่อผิวเรียบตามลำดับ

สำหรับการไหลในท่อจัตุรัสนี้ โดเมนที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยเป็นเอลิเมนต์รูปทรงสี่เหลี่ยมและแบ่งกริดแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid) การหาผลกระทบของกริดที่มีผลต่อคำตอบ ได้ทำการเปรียบเทียบผลเฉลยโดยใช้จำนวนของกริดที่แตกต่างกันคือที่ 80,000 และ 160,000 พบว่าเมื่อขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 160,000 ค่าเลขนัสเซิลท์เปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 1.5% ดังนั้นจึงเลือกจำนวนกริดเท่ากับ 80,000 ไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อไป

### 2.3 เงื่อนไขขอบ

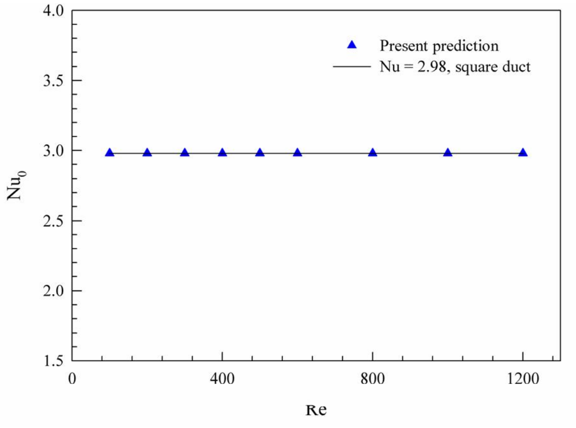
พิจารณาทางเข้าและทางออกเป็นแบบ periodic translation สมมติอากาศที่ 300 K และมีค่าเลขพรานด์ 0.7 ไหลเข้าด้วยอัตราการไหลเชิงมวลคงที่ รูปร่างความเร็วทางเข้าและทางออกเหมือนกัน สมมติคุณสมบัติทางกายภาพของอากาศมีค่าคงที่ โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้า เงื่อนไขขอบเขตไม่มีการลื่นไถลที่ผนัง (no-slip conditions) หรือความเร็วที่ผนังมีค่าเท่ากับศูนย์ เป็นผนังที่อยู่กับที่ (stationary wall) กำหนดให้ที่ผนังทุกด้านของท่อจัตุรัสมีอุณหภูมิผิวคงที่ 310 K และสมมติให้ครีบเป็นแผ่นกั้นความร้อนไม่สามารถผ่านได้

## 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

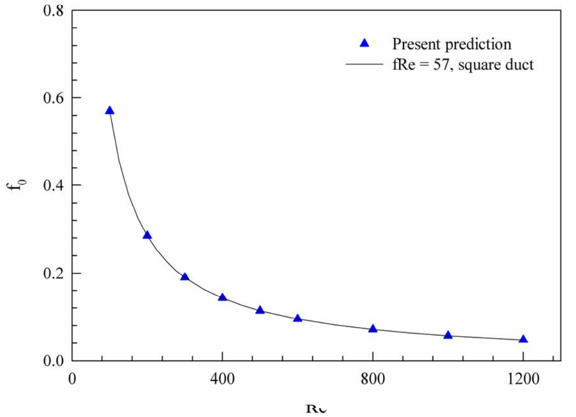
### 3.1 การพิสูจน์ความถูกต้องของท่อจัตุรัสผิวเรียบ

ในการทดสอบความถูกต้องของการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานในท่อจัตุรัสผิวเรียบที่ไม่มีติดตั้งครีบ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากวิธีเชิงตัวเลขและผลเฉลยแม่นตรงภายใต้เงื่อนไขเดียวกันนี้ ซึ่งค่าผลเฉลยแม่นตรงนี้สามารถศึกษาได้จากอ้างอิง [10] โดยพบว่าค่าที่ได้จากวิธีเชิงตัวเลขจะมีความคลาดเคลื่อนจากผลเฉลยแม่นตรงประมาณ

0.5% ทั้งในส่วนของค่าเลขนัสเซิลท์และค่าตัวประกอบเสียดทาน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้โดยวิธีเชิงตัวเลขทั้งมีความสอดคล้องกันกับผลเฉลยแม่นตรงอย่างดีและมีความน่าเชื่อถือได้




(a)

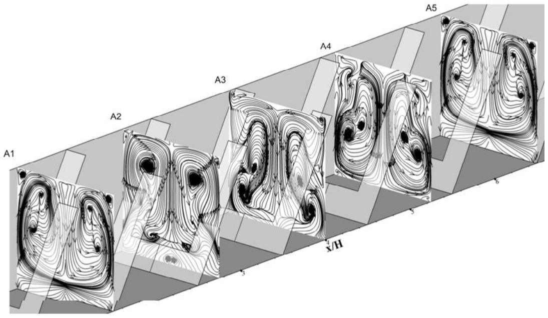



(b)

รูปที่ 2 การทดสอบความถูกต้องของ (a) ค่าเลขนัสเซิลท์ (b) ค่าตัวประกอบเสียดทานของท่อจัตุรัสผิวเรียบ

### 3.2 โครงสร้างการไหล

โครงสร้างของการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งครีบรูปตัวยูทำมุมปะทะ 60° ที่ค่าสัดส่วน b/H, BR = 0.2 และ Re = 800 จากรูปที่ 3 แสดงเส้นสายธารของการไหลผ่านครีบรูปตัวยู พบว่าการเพิ่มครีบรูปตัวยูมีผลต่อการไหลของอากาศในท่อเมื่อเทียบกับการไหลของอากาศในท่อเปล่า โดยการเพิ่มครีบรูปตัวยูจะทำให้เกิดการหมุนวนของกระแสการไหล เมื่ออากาศไหลผ่านครีบรูปตัวยูจะเกิดการหมุนวนที่ด้านหลังของครีบและเกิดการกระแทกของกระแสการไหลที่บริเวณผนังทั้งสี่ด้านของท่อโดยเฉพาะบริเวณด้านหลังของครีบที่จะมีการเหนี่ยวนำทำให้เกิดการกระแทกของกระแสการไหลส่งผลให้เกิดการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลภายในท่อกับความร้อนที่ผิวท่อ จากรูปจะเห็นได้ว่าแกนการไหลจะมีการเปลี่ยนตำแหน่งแตกต่างกันออกไปดังรูป โดยตำแหน่งของแกนการไหลจะมีการเปลี่ยนแปลงตามหน้าตัด A1 ถึง A5 จากหน้าตัดดังกล่าวจะสังเกตเห็นทั้งในส่วนของแกนการไหลของกระแสหลัก และการหมุนวนของกระแสย่อยในส่วนของมุมท่อ




รูปที่ 3 เส้นสายธารสำหรับการไหลในท่อจัตุรัสที่ Re = 800 และ DR = 0.7

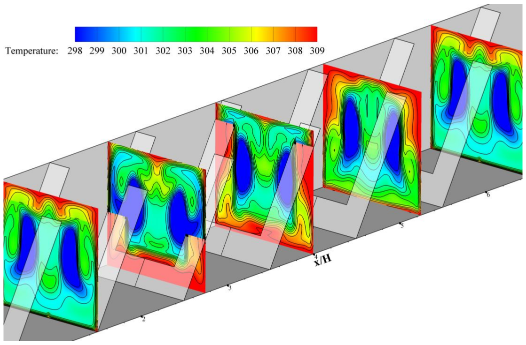
### 3.3 การถ่ายเทความร้อน

จากรูปที่ 4 (a) และ (b) แสดงการกระจายของสนามอุณหภูมิสำหรับครีบรูปตัวยูวางเอียงที่ค่า Re = 800 และ BR = 0.2 ซึ่งพบว่าเกิดชั้นชิดผิวความร้อนที่บางกว่ากรณีท่อเปล่าที่ไม่มีการติดตั้งครีบ บริเวณผนังด้านข้างทั้งสองด้านจะมีชั้นชิดผิวความร้อนที่บางมากกว่าผนังด้านบนและล่าง ซึ่งกรณีการเพิ่มครีบ BR = 0.4 ให้การถ่ายเทความร้อนที่บริเวณผนังสูงกว่ากรณีอื่น ๆ ในทุกกรณีที่ทดสอบ เพราะกรณีนี้จะทำให้เกิดกระแสการไหลที่มีการกระแทกสูงที่สุด

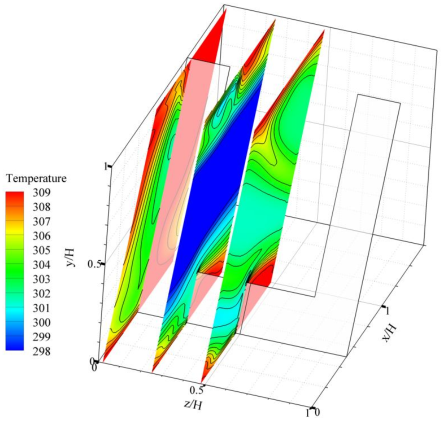
รูปที่ 5 แสดงการกระจายตัวของเลขนัสเซิลท์สำหรับครีบรูปตัวยูวางเอียงที่ค่า Re = 800 และ BR = 0.2 พบว่าเกิดการกระแทกที่ผนังทั้งสี่ด้านของท่อทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นโดยส่วนที่มี

การแสดงคอนทัวร์สีแดงจะเป็นส่วนที่มีการเกิดการกระแทกของกระแสการไหล

รูปที่ 6 แสดงการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ ของครีบรูปตัวยูวางเอียงทำมุมปะทะ 60$^{\circ}$ ที่ค่า BR ต่าง ๆ จากกราฟ พบว่าเมื่อค่า BR เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าเลขนัสเซิลท์เพิ่มมากขึ้น โดย BR = 0.4 จะให้ค่าเลขนัสเซิลท์มากที่สุด โดยมีค่าเลขนัสเซิลท์เท่ากับ 26 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า โดยในการใช้ครีบที่มีค่า BR = 0.1-0.4 จะให้ค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 1-26 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า

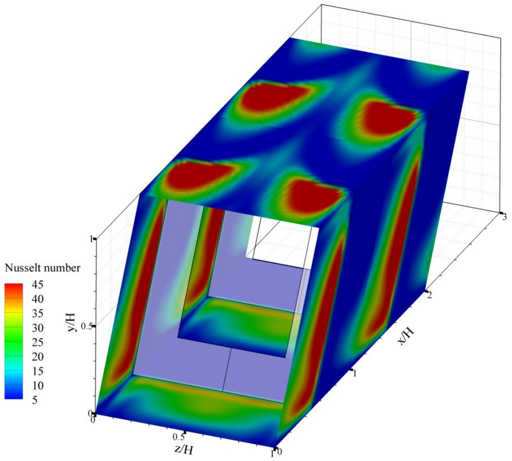



(a)

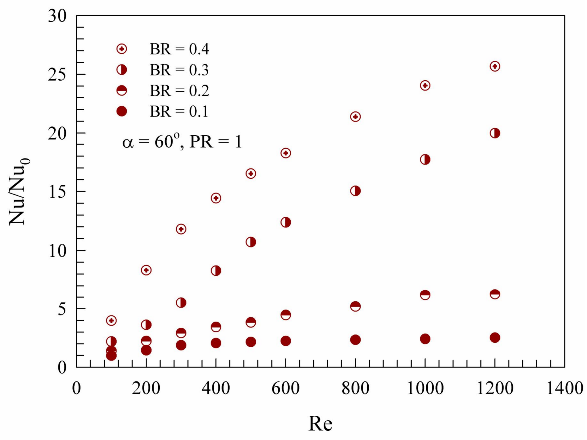



(b)

รูปที่ 4 ภาพตัดการกระจายตัวของอุณหภูมิ (a) บนระนาบขวางการไหล (b) บนระนาบเดียวกับการไหล ในตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อจัตุรัสที่ติดตั้งครีบรูปตัวยู สำหรับ Re = 800 และ BR = 0.2




รูปที่ 5 ภาพตัดการกระจายตัวของเลขนัสเซิลท์ของท่อจัตุรัสที่ติดตั้งครีบรูปตัวยูสำหรับ Re = 800 และ BR = 0.2

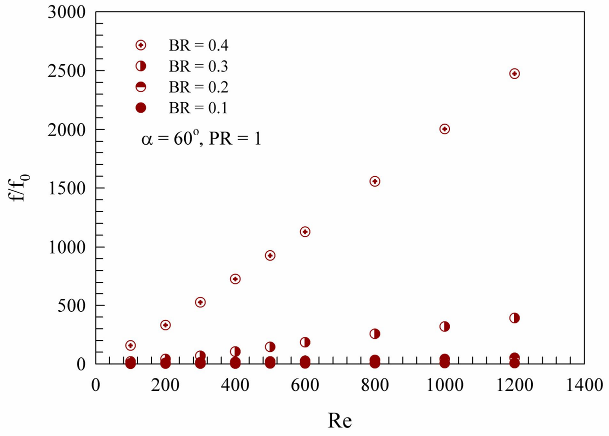



รูปที่ 6 การแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ ของท่อจัตุรัสที่ติดตั้งครีบรูปตัวยูที่ค่า BR ต่าง ๆ

**3.4 การสูญเสียความดัน**

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานระหว่างท่อจัตุรัสติดตั้งครีบรูปตัวยูต่อท่อจัตุรัสผิวเรียบ, ($f/f_0$) ที่ค่า BR ต่าง ๆ ซึ่งเมื่อพิจารณาช่วงเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 100 ถึง 1200 พบว่าค่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นตาม และเมื่อทำการเพิ่มค่า BR ทำให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น กรณีครีบรูปตัวยูทำมุมปะทะ 60$^{\circ}$ ที่ BR = 0.4 มีอัตราการเพิ่มค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงที่สุด และมีอัตราการเพิ่มที่มากขึ้นอย่าง

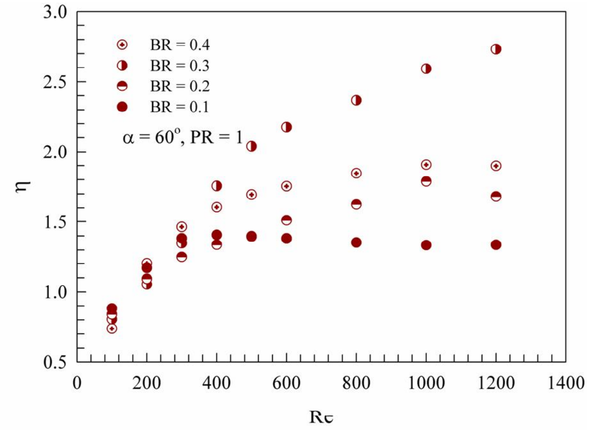
รวดเร็วเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับกรณีของการใช้ค่า BR อื่น ๆ




รูปที่ 7 การแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานของครีบรูปตัวยูวางเอียงทำมุมปะทะ 60° ที่ค่า BR ต่าง ๆ

### 3.5 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 8 แสดงความแปรเปลี่ยนค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ค่าเลขเรย์โนลด์ต่างๆ ของท่อจัตุรัสติดตั้งครีบรูปตัวยู โดยมีค่า BR = 0.1-0.4 พบว่าเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยค่า BR = 0.3 จะให้ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่สูงที่สุดเท่ากับ 2.7 ที่ค่าเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1200 ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการติดตั้งครีบรูปตัวยูที่มี BR = 0.1-0.4 จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.6-2.7




รูปที่ 8 การแปรเปลี่ยน η ของครีบรูปตัวยูวางเอียงทำมุมปะทะ 60° ที่ค่า BR ต่าง ๆ

### 4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ท่อจัตุรัสมีการติดตั้งครีบรูปตัวยูวางเอียงทำมุมปะทะ 60° โดยมีค่า BR = 0.1-0.4 จะช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน 1 เท่า ถึง 26 เท่า, มีความเสียดทานเพิ่มขึ้น 1 ถึง 2500 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับท่อจัตุรัสผิวเรียบ และให้ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 0.6-2.7

สำหรับท่อจัตุรัสที่ติดตั้งครีบรูปตัวยูทำมุมปะทะ 60° พบว่าค่า BR = 0.4 จะให้ค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานสูงที่สุด ส่วนค่า BR = 0.3 จะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมากที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 2.7 ที่ค่าเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1200

### 5. เอกสารอ้างอิง

[1] Patankar. S.V., Liu. C.H. and Sparrow. E.M. (1977). Fully developed flow and heat transfer in ducts having streamwise-periodic variations of cross-sectional area, *ASME J. Heat Transfer*, vol.99 (1977), pp.180–186.

[2] Kelkar. K.M. and Patankar. S.V. (1987). Numerical prediction of flow and heat transfer in a parallel plate channel with staggered fins, *ASME J. Heat Transfer*, vol.109 (1987), pp.25-30.

[3] Webb. B.W. and Ramadhyani. S. (1985. Conjugate heat transfer in a channel with staggered ribs, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol.28 (1985), pp.1679–1687.

[4] Sripattanapipat. S. and Promvonge. P. (2009). Numerical analysis of laminar heat transfer in a channel with diamond-shaped baffles, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, vol.36 (2009), pp.32–38.

[5] Ko. K.H. and Anand. N.K. (2003). Use of porous baffles to enhance heat transfer in a rectangular channel, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, vol.46 (2003), pp.4191-4199.

[6] Han. J.C. and Zhang. Y.M. (1992). High performance heat transfer ducts with parallel broken and V-shaped broken ribs, *Int .J. Heat Mass Transfer*, vol.35 (1992), pp.513–523.
[7] Promvonge. P., Sripattanapipat. S., Tamna. S., Kwankaomeng. S., Thianpong. C. (2010). Numerical investigation of laminar heat transfer in a square channel with 45 deg inclined baffles, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, vol.37(2) (2010), pp.170-177.
[8] Liou. T.M. and Hwang. J.J. (1993). Effect of ridge shapes on turbulent heat transferand friction in a rectangular channel, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol.36 (1993), pp.931–940.
[9] Patankar. S.V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York.
[10] Incropera. F. and Dewitt. P.D. (1996), *Introduction to heat transfer*, 3rd edition John Wiley & Sons Inc.

**รายการสัญลักษณ์**

A พื้นที่ผิว, $m^2$

BR สัดส่วนความสูงของครีบต่อความสูงของท่อเหลี่ยม, b/H

b ความสูงของครีบ, m

$D_h$ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส (=H)

f ตัวประกอบเสียดทาน

H ความสูงของท่อ, m

$h_x$ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่, $W/m^2$-K

k ค่าการนำความร้อน, W/m-K

L ความยาวคาบของส่วนทดสอบ (หรือระยะพิตซ์, H), m

Nu เลขนัสเซิลท์

p ความดันสถิตย์, Pa

Pr เลขพรานด์

Re เลขเรย์โนลด์ $(\rho \bar{u} D_h / \mu)$

T อุณหภูมิ, K

$u_i$ ความเร็วในทิศทาง $x_i$, m/s

$\bar{u}$ ความเร็วเฉลี่ยในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส, m/s

ตัวอักษรกรีก

$\mu$ ความหนืดสมบูรณ์, kg/s-m

$\Gamma$ สภาพการแพร่ทางความร้อน

$\alpha$ มุมประทะ, องศา

$\eta$ สมรรถนะเชิงความร้อน

$\rho$ ความหนาแน่น, $kg/m^3$

ตัวห้อย

in ทางเข้า

0 ท่อเรียบ

w ผนัง