

**CST-2038**

**การศึกษาเชิงตัวเลขแบบสามมิติสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อน  
ในท่อสี่เหลี่ยมที่ติดตั้งครีบบางเอียงมุม  $30^\circ$  ที่ค่า  $BR$  ต่าง ๆ**

**3D simulation on turbulent flow structure and heat transfer behavior in square duct  
with  $30^\circ$  incline rib to various  $BR$**

อำนาจ บุญลอย<sup>1</sup>, จเร วงษ์ผึ้ง<sup>2</sup>, วิฑาดา เจษฎารัตนชัย<sup>2</sup>, และ พงษ์เจต พรหมวงศ์<sup>2\*</sup>  
<sup>1</sup>ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800  
<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520  
\*ติดต่อ: E-mail, kpongje@kmitl.ac.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อสี่เหลี่ยมที่ติดตั้งครีบบางเอียง 2 แบบ ได้แก่ ครีบบางเต็มและครีบบางแยกตัวจัดวางตรงกันที่กึ่งกลางตามแนวเส้นทแยงมุมของท่อโดยทำการเปรียบเทียบที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ  $30^\circ$  ความสูงของครีบบางเท่ากับ 0.10 - 0.30 และระยะห่างระหว่างครีบบางมีค่าเท่ากับ 1 โดยให้ความร้อนที่ผิวท่อแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ในการคำนวณใช้วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมและเลือกลำดับวิธีหาผลเฉลยแบบ SIMPLE โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบซึ่งการจำลองนี้ได้นำเสนอคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของของไหลสำหรับเลขเรย์โนลด์บนพื้นฐานเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อเท่ากับ 4000 ถึง 20000 ผลลัพธ์ของการคำนวณเชิงตัวเลขใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG  $k-\epsilon$  ทำการศึกษาอิทธิพลของครีบบางต่อการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อ ผลจากการศึกษาที่ได้จากท่อที่มีการติดตั้งครีบบางเอียงถูกนำไปเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบ จากการศึกษพบว่า ทั้งสองกรณีให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อที่มีผนังเรียบโดยการเพิ่มครีบบางเอียงแบบเต็มจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าครีบบางเอียงแบบแยกตัว กรณีครีบบางเอียงเต็มตัวจะให้ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 1 ถึง 1.46 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกรณีครีบบางแบบแยกเต็มตัวซึ่งให้ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 1 ถึง 1.42

**คำหลัก :** ท่อสี่เหลี่ยม, การถ่ายเทความร้อน, ครีบบางเอียงแบบเต็ม, ครีบบางเอียงแบบแยกตัว

**Abstract**

The paper presents a numerical investigation on turbulent periodic flow and heat transfer characteristics in a three dimensional square-duct with  $30^\circ$  full rib and discrete rib inserted diagonal of square duct. The effects of different rib heights ( $b/H$ ,  $BR$ ) in range from 0.10 to 0.30 with single pitch ratio of 1.00. The uniform heat-flux condition is applied to the duct walls. The computations are based on the finite volume method, and the SIMPLE algorithm has been implemented. Air is used as the test fluid with the air flow rate in terms of Reynolds numbers ranging from 4000 to 20,000. The numerical results

## CST-2038

obtained from using the RNG  $k-\epsilon$  turbulence model. Effects of rib on heat transfer and pressure loss in the tube are studied and their results are also compared with smooth tube. It is found that the tube fitted with inclined ribs give heat transfer rate and pressure loss higher than that from the smooth tube. The full rib give higher heat transfer rate and pressure loss than that from discrete rib. In additional, the maximum  $TEF$  is found to be about 1 to 1.46 for full rib and  $TEF$  is found to be about 1 to 1.42 for discrete rib.

**Keywords:** square duct, heat transfer, full incline rib, discrete incline rib

### 1. บทนำ

ปัจจุบันโลกมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว รวมถึงจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้นทุกปี ส่งผลให้อัตราความต้องการพลังงานเพิ่มสูงขึ้น ทั้งพลังงานที่ใช้ในชีวิตประจำวัน การคมนาคม รวมไปถึงพลังงานที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งมีระบบแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นตัวกลางในถ่ายโอนพลังงานจากที่หนึ่งไปที่หนึ่ง ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับการถ่ายโอนพลังงาน ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนมีหลายประเภทสามารถพบได้ในงานเชิงวิศวกรรม เช่น หม้อไอน้ำรถยนต์ หม้อไอน้ำ เครื่องปรับอากาศด้วยแสงอาทิตย์ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ฯลฯ หน้าที่สำคัญของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ การนำเอาพลังงานความร้อนมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด ดังนั้นการพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยถ้าสามารถใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้อย่างเต็มประสิทธิภาพของอุปกรณ์นั้นๆ ก็จะเป็นการช่วยลดต้นทุนในส่วนของพลังงานได้

โดยทั่วไปวิธีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มซึ่งประกอบด้วย วิธีที่ไม่ต้องการพลังงานจากภายนอกในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (passive technique) และวิธีที่ต้องการพลังงานจากภายนอกเพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (active technique) สำหรับวิธีแรกนั้นเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในทางอุตสาหกรรม โดยอาศัยการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากปั่นป่วนของของไหลที่มีการเพิ่มขึ้นงานเข้าไปหรือมีการปรับปรุงพื้นผิวในรูปแบบต่างๆ เช่น ติดตั้งแผ่น

กัน (baffle) ใช้ครีบริบทรงต่างๆ (ribs) หรือเรียกแบบย่อว่า “ครีบริบ” และใช้ปีกเล็ก (winglet) เป็นต้น ซึ่งการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการสร้างความปั่นป่วนของการไหลส่งผลถึงการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลที่มีการติดตั้งครีบริบบนพื้นผิวให้ความร้อน โดยมีทั้งการตรวจสอบด้วยผลการทดลอง การคำนวณเชิงตัวเลขหรือใช้ทั้งสองวิธีมาวิเคราะห์ร่วมกันซึ่งต่างก็มีจุดมุ่งหมายคล้ายกัน คือ การทำความเข้าใจถึงกลไกการไหลจากสนามการไหลที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน และความดันตกคร่อม ซึ่งได้รับอิทธิพลจากตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ศึกษา Kellar and Patankar [1] ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในช่องขนานที่มีการติดตั้งแผ่นกันวางเอียงจากผลการศึกษาสรุปได้ว่าค่าการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความสูงของแผ่นกันและทำการลดระยะห่างระหว่างแผ่น Patankar *et al.* [3] ศึกษารูปแบบการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบเป็นคาบของการไหลที่มีการพัฒนาเต็มที่ Han and Zhang [2] นำเสนอการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นในท่อจัดรัศมีด้วยครีบริบทั้งหมด 7 รูปทรงของครีบริบที่วางเว้นช่วงพบว่าครีบริบตัววีวางเว้นช่วงมุม  $60^\circ$  ให้การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าท่อผิวเรียบ 4.5 เท่า และดีกว่าครีบริบวางต่อเนื่องการทดลองทั้งหมดได้ติดครีบริบที่ผนังสองด้านและค่าความสูงครีบริบต่อความสูงท่อมี่ค่า  $b/D = 0.0625$  และระยะพิตช์ต่อความสูงของครีบริบที่ค่า  $L/b = 10$  Promvong *et al.* [4] ทำการทดลองเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วน 3 มิติในท่อจัดรัศมีที่ติดแผ่นกันวางเอียงที่เสียบ

## CST-2038

ทแยงกึ่งกลางท่อ ทำมุม  $30^\circ$  ด้วยอัตราส่วนการบล็อก การไหล (Blockage ratio,  $BR$ ) เท่ากับ 0.1 - 0.3 ระยะห่างระหว่างแผ่นต่อความสูงของท่อหรือ ระยะพิตต์  $PR = 1$  และ 2 โดยการไหลแบบเป็นคาบ เงื่อนไขพลาซึคความร้อนคงที่ที่ผนัง ในช่วงเลขเรย์ โนลด์เท่ากับ 4000 - 20000 และเมื่อมีการปรับค่าที่ได้ จากการจำลองเชิงตัวเลขด้วยสมการสหสัมพันธ์ทำให้ ค่าเลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานเข้าใกล้ค่าที่ ได้จากการทดลอง พบว่า ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ที่ ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 - 6.2 เท่า และอัตราส่วนตัว ประกอบเสียดทานมีค่าอยู่ระหว่าง 2 - 55 เท่า เมื่อ เทียบกับท่อจตุรัสผิวเรียบ โดยมีค่าสมรรถนะการเพิ่ม การถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 1.2 - 1.95

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการใช้แบบจำลองทาง คณิตศาสตร์หรือการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับการไหล แบบปั่นป่วน 3 มิติ โดยพิจารณาลักษณะการไหลเป็น คาบในท่อจตุรัสที่ครีบบางเอียงสร้างการไหลหมุนวน ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่มีความนิยมในระบบท่อเหลี่ยม โดยศึกษาถึงผลของอัตราส่วนการบล็อกการไหล  $BR$  ของครีบบนมุมปะทะการไหล  $\alpha = 30^\circ$  ที่มีอิทธิพลต่อ สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ลักษณะการ ไหลและค่าความเสียดทานรวมทั้งลักษณะของการ ครีบบางสองลักษณะ คือ ครีบบางเอียงแบบเต็มและวาง เอียงแบบแยกตัว ซึ่งจะนำเสนอในส่วนโครงสร้างการ ไหลของแบบจำลองต่อไป

### 2.วัตถุประสงค์ของงานวิจัยขอบเขตของงานวิจัย

#### 2.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลที่มี ลักษณะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน 3 มิติ และการเพิ่ม การถ่ายเทความร้อนในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มี การติดตั้งครีบบางเอียง ซึ่งวางเรียงกันเป็นแถวโดย ติดตั้งที่กึ่งกลางท่อตามแนวเส้นทแยงมุม มีการให้ ความร้อนแบบพลาซึคความร้อนคงที่ โดยจำลองการ ไหลและการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิง ตัวเลขด้วยโปรแกรม FLUENT 6.3 ดังนั้น วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

เพื่อศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งได้มีการศึกษา มาแล้วในอดีตทั้งในส่วนของ การทดลองและการ วิเคราะห์เชิงตัวเลข ศึกษาด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ของพฤติกรรมการไหล การถ่ายเทความร้อน ค่าความ ดันตกรวมและสมรรถนะเชิงความร้อน ของการไหล ภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสในกรณีที่มีจตุรัสครีบบาง เอียง ที่เกิดจากอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ซึ่ง ประกอบด้วย อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) อิทธิพล ของความสูงของครีบบาง ซึ่งพิจารณาในเทอมอัตราส่วน ของความสูงครีบบางต่อความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก ( $b/H$ ,  $BR$ ) และเพื่อพัฒนา ปรับปรุงครีบบาง เอียงเพื่อนำไปสู่ค่าตัวประกอบของการเพิ่มสมรรถนะ ทางความร้อนที่สูงขึ้น

#### 2.2 ขอบเขตของการวิจัย

ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของ ไหล และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบ วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume method) ทำการ คำนวณในแบบจำลองการไหล 3 มิติ ที่มีการไหลแบบ ปั่นป่วน เป็นการไหลแบบคงตัวและไม่สามารถอัดตัว ได้ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 4000 ถึง 20000 อากาศเป็น ของไหลทดสอบ ไม่คำนึงแรงวัตถุและการสูญเสีย เนื่องจากความหนืด ใช้แบบจำลองความปั่นป่วนคือ แบบ RNG  $k-\epsilon$  พิจารณาเฉพาะการพาความร้อนแบบ บังคับ (forced convection) ไม่คำนึงการแผ่รังสีความร้อน ทำการวิจัยเฉพาะท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีกรให้ความ ร้อนแบบพลาซึคความร้อนคงที่ที่ผนังทุกด้าน ครีบบางที่ใช้ใน การวิเคราะห์มี 2 แบบ คือครีบบางเอียงแบบเต็มและ ครีบบางเอียงแบบแยกตัวถูกติดตั้งที่กึ่งกลางท่อตาม แนวเส้นทแยงมุม ทำมุมปะทะกับทิศทางการไหล  $\alpha = 30^\circ$  การจัดวางครีบบางตรงกัน (in-line)  $BR$  เท่ากับ 0.1 ถึง 0.3 และค่า  $PR$  มีค่าคงที่เท่ากับ 1 ลักษณะการ ติดตั้งเหมือนดังรูปที่ 1 โดยรูปที่ 1 (ก) คือครีบบางเอียง เต็ม และ (ข) คือครีบบางเอียงแยกตัว

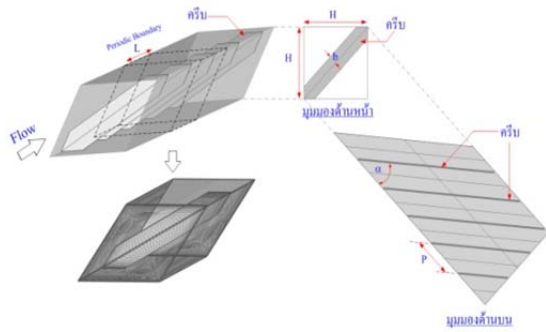
### 3. พื้นฐานทางคณิตศาสตร์

จากขอบเขตงานวิจัยข้างต้น สำหรับการไหลใน ท่อ สมการควบคุมประกอบไปด้วยสมการความ

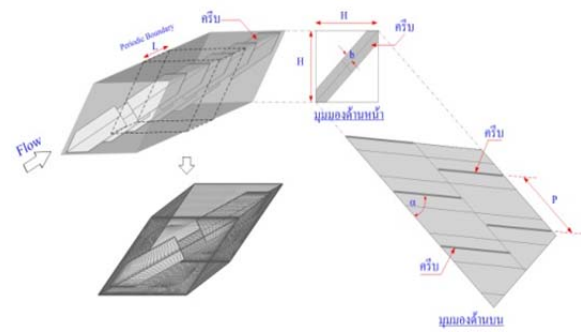
## CST-2038

ต่อเนื่อง สมการนาเวียร์-สโตก และ สมการพลังงาน

เขียนในรูปเทนเซอร์ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนดังนี้



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 รูปทรงของท่อที่มีการติดตั้งครีบบางเอียงกึ่งกลางท่อและโดเมนที่ใช้ในการคำนวณโดยคิดการไหลแบบ periodic ที่มีการสร้างตาข่ายสี่เหลี่ยมแบบไม่สม่ำเสมอ (ก) ครีบบางเอียงเต็ม และ (ข) ครีบบางเอียงแยกตัว

### 3.1 สมการควบคุม

สมการความต่อเนื่อง:

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

สมการโมเมนตัม:

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

สมการพลังงาน:

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

เมื่อ  $\Gamma$  และ  $\Gamma_t$  คือ การแพร่ทางความร้อน และการแพร่ทางความร้อนแบบปั่นป่วน ตามลำดับ กำหนดโดย

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

การไหลแบบปั่นป่วนจำเป็นต้องมีเทอมของความเค้นของเรย์โนลด์  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  ในสมการที่ (2) ข้อสมมติฐานของบูซิเนสส์เกี่ยวข้องกับความเค้นของเรย์โนลด์คือการได้ของความเร็วเฉลี่ย กำหนดโดย

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

เมื่อ  $k$  คือ พลังงานจลน์ปั่นป่วน กำหนดโดย  $k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$  และ  $\delta_{ij}$  คือ เดลต้าโครเนกเกอร์,  $\mu_t$  คือ ความหนืดปั่นป่วน กำหนดโดย  $\mu_t = \rho c_\mu k^2 / \varepsilon$  แบบจำลอง RNG  $k-\varepsilon$  เป็นตัวอย่างของรูปแบบสมการที่ใช้สมมติฐานของบูซิเนสส์ และมาจากสมการนาเวียร์-สโตก กำหนดโดย

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (7)$$

สมการข้างต้น  $\alpha_k$  และ  $\alpha_\varepsilon$  คือ ประสิทธิภาพผกผันของเลขพรานด์สำหรับ  $k$  และ  $\varepsilon$  ตามลำดับ  $C_{1\varepsilon}$  และ  $C_{2\varepsilon}$  คือค่าคงที่, ประสิทธิภาพของความหนืด  $\mu_{eff}$  กำหนดโดย

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_f = \mu + \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

เมื่อ  $c_\mu$  คือค่าคงที่กำหนดเป็น 0.0845 ตามทฤษฎี RNG

ในงานวิจัยนี้มีตัวแปรที่ให้ความสนใจมีอยู่ 4 ตัวแปร คือ เลขเรย์โนลด์ ตัวประกอบเสียดทาน เลขนัสเซลและสมรรถนะเชิงความร้อน ซึ่งค่าเลขเรย์โนลด์นิยามโดย

$$Re = \rho u_0 D / \mu \quad (9)$$

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

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

การถ่ายเทความร้อนในรูปของค่าการกระจายเลขนัสเซล ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$Nu_x = \frac{h_x D}{k} \quad (11)$$

ค่าเลขนัสเซลเฉลี่ยสามารถคำนวณได้จาก

$$Nu = \frac{1}{A} \int Nu_x dA \quad (12)$$

## CST-2038

สมรรถนะเชิงความร้อน,  $TEF$

$$TEF = \left(\frac{Nu}{Nu_0}\right) / \left(\frac{f}{f_0}\right)^{1/3} \quad (13)$$

เมื่อ  $Nu_0$  และ  $f_0$  คือ เลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานของท่อเปล่าผิวเรียบที่ไม่ได้มีการติดตั้งครีบริบตัววางเอียงตามลำดับ

### 3.2 ระบบกริด

สำหรับการไหลในท่อนี้ โดเมนที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยเป็นเอลิเมนต์รูปทรงสี่เหลี่ยมเนื่องจากเหมาะสมกับการวิเคราะห์ค่าการถ่ายเทความร้อนและแบ่งกริดแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid) การหาผลกระทบของกริดที่มีผลต่อคำตอบ ได้ทำการเปรียบเทียบผลเฉลยโดยใช้จำนวนของกริดที่แตกต่างกันคือที่ 81,600 และ 418,500 พบว่าเมื่อขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 187,200 ค่าเลขนัสเซลท์และค่าตัวประกอบเสียดทานเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 2.5% ดังนั้นจึงเลือกจำนวนกริดเท่ากับ 187,200 ไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น

### 3.3 เงื่อนไขขอบ

พิจารณาทางเข้าและทางออกเป็นแบบ periodic translation สมมติอากาศที่ 300 K และมีค่าเลขพรานด์ 0.7 ไหลเข้าด้วยอัตราการไหลเชิงมวลคงที่ รูปร่างความเร็วทางเข้าและทางออกเหมือนกันสมมติคุณสมบัติทางกายภาพของอากาศมีค่าคงที่ โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้าเงื่อนไขขอบเขตไม่มีการลื่นไถลที่ผนัง (no-slip conditions) หรือความเร็วที่ผนังมีค่าเท่ากับศูนย์ เป็นผนังที่อยู่กับที่ (stationary wall) กำหนดให้ที่ผนังทุกด้านของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่  $600 \text{ W/m}^2$  ให้ครีบริบตัววางแบบแยกตัวและแผ่นบางเป็นแบบความร้อนไม่สามารถผ่านได้

## 4. ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

### 4.1 การพิสูจน์ความถูกต้องของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสและจำนวนกริดที่ใช้

Promvong and Changcharoen [5] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของการถ่ายเทความร้อนและค่าตัว

ประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงดั่งรูปที่ 2 พบว่า ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานมีความแตกต่างจากผลเฉลยแม่นยำตรงอยู่ในช่วง  $\pm 5.3\%$  และ  $\pm 4.8\%$  ตามลำดับ ผลเฉลยแม่นยำตรงของค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยมีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ กำหนดโดย

ผลเฉลยแม่นยำตรงของ Dittus-Boelter

$$Nu_0 = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad \text{สำหรับ } Re \geq 10,000 \quad (14)$$

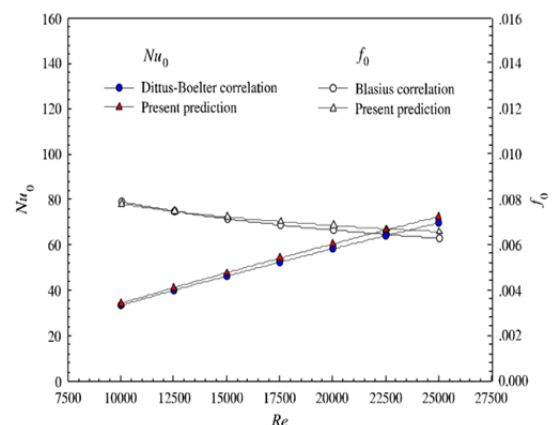
ผลเฉลยแม่นยำตรงของ Blasius

$$f_0 = 0.079Re^{-0.25} \quad \text{สำหรับ } Re \leq 20,000 \quad (15)$$

$$f_0 = 0.046Re^{-0.2} \quad \text{สำหรับ } Re \leq 20,000 \quad (16)$$

### 4.2 พฤติกรรมการไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 3 (ก) และ (ข) แสดงการไหลสำหรับครีบริบวางเอียงแบบเต็มและแยกตัวที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ  $30^\circ$  ที่ค่า  $BR = 0.30$ ,  $Re = 8,000$  จากรูปพบว่า การเพิ่มครีบริบวางเอียงทำให้เกิดการหมุนวนและการกระแทกที่ผนังท่อของกระแสการไหล เมื่ออากาศไหลผ่านครีบริบจะเกิดการหมุนวนที่ด้านหลังของครีบริบและเกิดการกระแทกของกระแสการไหลที่บริเวณผนังทั้งสี่ด้านของท่อทำให้อากาศมีเวลาสัมผัสและแลกเปลี่ยนความร้อนกับผิวท่อมากขึ้น

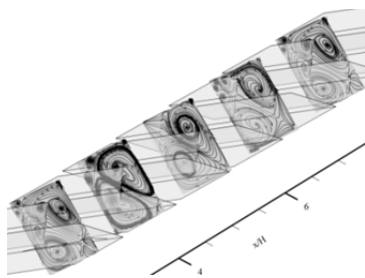


รูปที่ 2 การตรวจสอบความถูกต้องของ การถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ

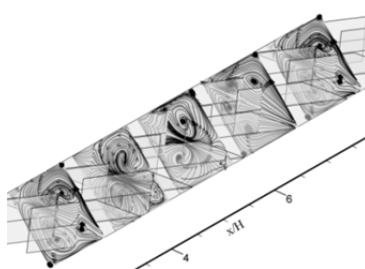
โดยแกนการไหลจะมีการเปลี่ยนตำแหน่งแตกต่างกันออกไปดังรูปที่ 3 หน้าตัดดังกล่าวจะ

## CST-2038

สังเกตเห็นทั้งในส่วนของการไหลของกระแสหลัก และกระแสน้อยที่หมุนวนในส่วนของมุมของท่อ สำหรับแกนการไหลแบบหมุนวนที่อยู่ตำแหน่งบริเวณ ใกล้กับผิวท่อทั้งสองด้านแสดงว่าเกิดการกระแทกที่ บริเวณผนังซึ่งจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ บริเวณนั้นเพิ่มสูงขึ้นโดยสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าครีบ วางเฉียงแบบเต็มมีกระแสหลักสองกระแสที่ชัดเจนกว่า ในครีบวางเฉียงแบบแยกตัว ส่งผลให้การกระจายของ อุณหภูมิในท่อที่ติดตั้งครีบเต็มกระจายได้ดีกว่าในท่อที่ ติดตั้งครีบวางเฉียงแบบแยกตัวซึ่งได้แสดงในรูปที่ 4 (ก) และ (ข) แสดงคอนทัวร์หรือการกระจายของสนาม อุณหภูมิสำหรับครีบวางเฉียงทั้งสองกรณีที่มีค่า  $Re = 8000$  และ  $BR = 0.30$  ซึ่ง พบว่า เกิดการกระจายตัว ของอุณหภูมิได้ดีกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากการหมุนวน ของอากาศ ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนระหว่าง อากาศและผนังมีอัตราที่สูงขึ้น



(ก) ครีบวางเฉียงแบบเต็ม

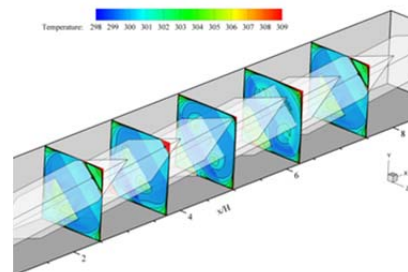


(ข) ครีบวางเฉียงแบบแยกตัว

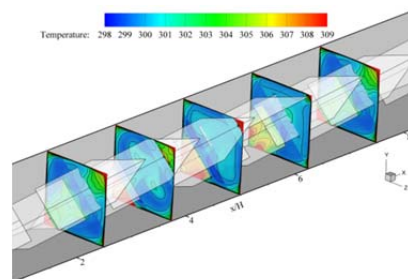
รูปที่ 3 โครงสร้างการไหลในระนาบขวางการไหล สำหรับครีบบาง (ก) ครีบวางเฉียงแบบเต็ม (ข) ครีบวางเฉียงแบบแยกตัว  $BR = 0.30$ ,  $Re = 8000$

ซึ่งกรณีการเพิ่มครีบวางเฉียงแบบเต็มจะสามารถ กระจายอุณหภูมิได้ดีกว่าครีบวางเฉียงแบบแยกตัว สำหรับค่าการถ่ายเทความร้อนเมื่อพิจารณาในรูปของ อัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับท่อเปล่า

( $Nu/Nu_0$ ) ดังรูปที่ 5 ซึ่งแสดงค่าอัตราส่วนเลขนัสเซล กับเลขเรย์โนลด์สำหรับครีบตัววางเอียงทั้งสองกรณีที่ทำมุมปะทะการไหล  $30^\circ$  ที่ค่า  $BR$  ต่าง ๆ จากกราฟ จะเห็นว่าเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นค่าอัตราส่วน เลขนัสเซลก็จะลดลง และเมื่อทำการเพิ่มค่า  $BR$  ทำให้ค่าอัตราส่วนอัตราส่วนเลขนัสเซลที่มีค่าเพิ่มขึ้น พบว่า ครีบทั้งสองชนิดมีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลที่ ใกล้เคียงกันที่  $BR = 0.10 - 0.20$  และพบว่ากรณีครีบ วางเอียงเต็มทำมุมปะทะการไหล  $30^\circ$  ที่  $BR = 0.30$  มี อัตราส่วนเลขนัสเซลสูงกว่ากรณีครีบวางเอียงแบบ แยกตัว 10 ถึง 12 %



(ก) ครีบวางเอียงแบบตัว



(ข) ครีบวางเอียงแบบแยกตัว

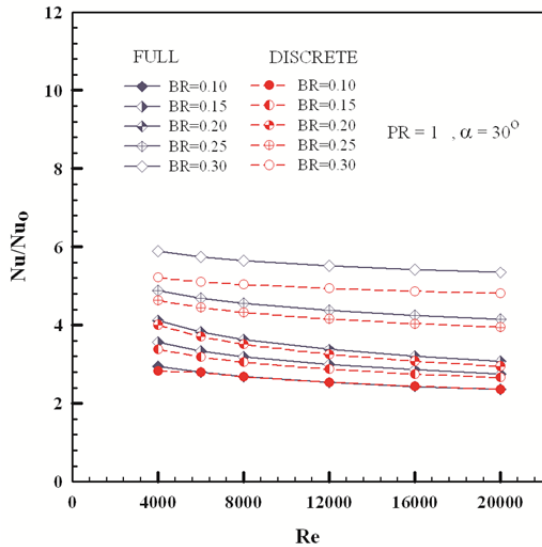
รูปที่ 4 การกระจายของอุณหภูมิในระนาบขวางการ ไหล (ก) ครีบวางเอียงแบบเต็ม (ข) ครีบวางเอียงแบบ แยกตัว  $BR = 0.3$ ,  $Re = 8000$

### 4.3 การสูญเสียความดัน

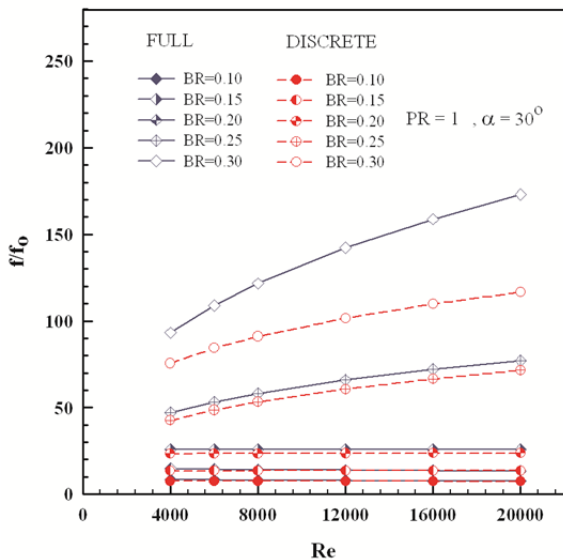
รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ กับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่มุมปะทะ  $30^\circ$  ที่ ค่า  $BR$  ต่าง ๆ ซึ่งเมื่อพิจารณาช่วงเลขเรย์โนลด์ ระหว่าง 4,000 ถึง 20,000 พบว่าค่าเลขเรย์โนลด์ที่ เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน เพิ่มขึ้นตามและเมื่อทำการเพิ่มค่า  $BR$  ทำให้ค่าอัตรา ส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นพบว่าครีบทั้ง

## CST-2038

สองชนิดมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานใกล้เคียงกันที่  $BR = 0.10$  ถึง  $0.20$  กรณีครีบบางเอียงเต็มตัวทำมุมปะทะ  $30^\circ$  ที่  $BR = 0.30$  มีอัตราส่วนประกอบเสียดทานสูงกว่ากรณีครีบบางเอียงแยกตัวอยู่ในช่วง 28.5 ถึง 35 %



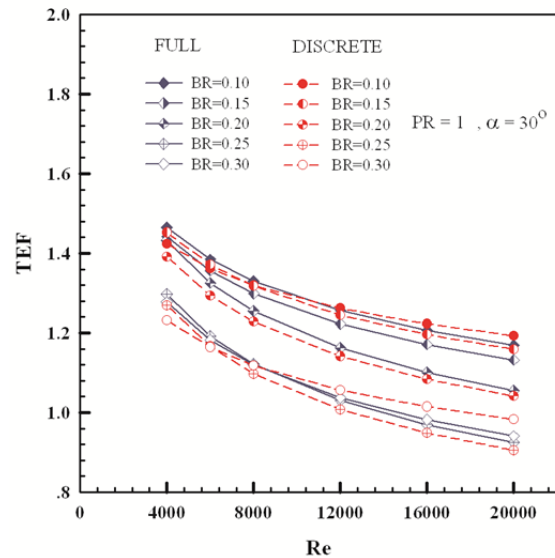
รูปที่ 5 การแปรเปลี่ยนของค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ของครีบบางเอียงทั้งสองกรณีทำมุมปะทะ  $30^\circ$  ที่ค่า  $BR$  ต่าง ๆ



รูปที่ 6 การแปรเปลี่ยนของค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานของครีบบางเอียงทั้งสองกรณีทำมุมปะทะ  $30^\circ$  ที่ค่า  $BR$  ต่าง ๆ

### 4.4 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 7 แสดงความแปรเปลี่ยนค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ค่าเลขเรย์โนลด์ต่าง ๆ ของท่อติดตั้งครีบบางเอียงทั้งสองกรณี โดยมีมุมปะทะการไหล  $30^\circ$  ที่ค่า  $BR$  ต่าง ๆ พบว่าค่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลต่อการลดลงของสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในช่วงเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณา โดยที่ครีบบางเอียงแบบเต็มตัวจะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าเท่ากับ 1 ถึง 1.46 ที่ค่าเลขเรย์โนลด์และที่ครีบบางเอียงแบบแยกตัวจะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าเท่ากับ 1 ถึง 1.42 ซึ่งทั้งสองกรณีมีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จากการติดตั้งครีบบางเอียงใกล้เคียงกัน



รูปที่ 7 การแปรเปลี่ยน  $TEF$  ของครีบบางเอียงทั้งสองกรณีทำมุมปะทะ  $30^\circ$  ที่ค่า  $BR$  ต่าง ๆ

## 5. สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อนในท่อจัดรัศมีที่มีการติดตั้งครีบบางเอียงแบบเต็มตัวและแบบแยกตัวตัวทำมุมปะทะ  $30^\circ$   $PR = 1.00$  ที่ค่า  $BR = 0.10$  ถึง  $0.30$  มีการติดตั้งกึ่งกลางท่อวางเรียงกัน พบว่า การติดครีบบางเอียงแบบเต็มและแบบแยกตัวทำให้อากาศที่ไหลผ่านครีบบางเกิดการปั่นป่วนส่งผลให้อุณหภูมิเย็นของอากาศกระจายไปยังบริเวณผิวท่อที่ร้อนทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งครีบบางเอียงแบบเต็มจะให้ค่า

## CST-2038

อัตราการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าครีบบางเอียงแบบแยกตัว การเพิ่มขึ้นของค่า  $BR$  ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น

อัตราการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสำหรับกรณีครีบบางเอียงแบบเต็มในช่วง 2 - 5.8 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ โดยให้ค่าความดันตกคร่อมเพิ่มมากกว่าท่อเปล่าเท่ากับ 8 - 173 เท่า ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 1 - 1.46

อัตราการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสำหรับกรณีครีบบางเอียงแบบแยกตัวเท่ากับ 2 - 5.2 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบและให้ค่าความดันตกคร่อมเพิ่มมากกว่าท่อเปล่าเท่ากับ 7 - 116 เท่า พบว่า ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมีค่าเท่ากับ 1 - 1.42 จะเห็นครีบบางเอียงแบบแยกตัวสามารถลดอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าลดลงถึง 28.5 - 35.0% ในขณะที่ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลที่มีค่าลดลง 10 -12% ที่  $BR = 0.30$  ดังนั้นความเหมาะสมของการใช้ครีบบาง 2 ลักษณะจึงขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของงานหรืออุปกรณ์ที่จะนำไปใช้

### 6. บทความจากวารสาร (Journal)

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

[2] 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.

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

[4] Promvong. P., Skullong. S., Kwankaomeng. S., Thianpong. C.(2012). Heat transfer in square duct fitted diagonally with angle-finned tape - Part 2 : Numerical study, *International Communication in Heat and Mass Transfer*, vol.39, May 2012, pp.625-633.

[5] Promvong. P., Changcharoen W. , Kwankaomeng. S., Thianpong. C.(2011). Numerical heat transfer study of turbulent square-duct flow through inline V-shaped discrete ribs, *International Communication in Heat and Mass Transfer*, vol.38, December 2011, pp.1392-1399.