

การจำลองเชิงตัวเลขของการไหลแบบราบเรียบและ  
ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่มีการติดตั้งแผ่นเกลียว

## Numerical Simulation of Laminar Flow and Heat Transfer Characteristics in a Tube with Helical Tape Inserts

พิทักษ์ พร้อมโรตง ปรัชญา สำรวสินธุ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

Email: k.pitak\_pts@hotmail.com

สุภัทรชัย สุวรรณพันธุ์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

150 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

สุรียา โชคเพิ่มพูน

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

199 หมู่ 3 ถนนพังโคน-วาริชภูมิ ตำบลพังโคน อำเภอพังโคน จังหวัดสกลนคร 47160

และ สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

Manuscript received September 18, 2015

Revised June 6, 2016

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนสำหรับการไหลแบบราบเรียบในท่อกลมที่มีการติดตั้งแผ่นเกลียวเพื่อสร้างการไหลหมุนควง การคำนวณใช้วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมและเลือกลำดับวิธีหาผลเฉลยแบบ SIMPLE โดยทำการศึกษาในช่วงการไหลที่ค่า  $Re = 100-2000$  กำหนดให้ผิวท่อมีความร้อนแบบอุณหภูมิผิวคงที่ ความกว้างของแผ่นเกลียวต่อ

เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (width ratio,  $w/D$ ,  $WR$ ) เท่ากับ 0.1 ระยะของการบิดของแผ่นเกลียวเมื่อบิดไป  $360^\circ$  ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (pitch ratio,  $p/D$ ,  $PR$ ) เท่ากับ 2.0 และมีจำนวนแผ่นเกลียว ( $n$ ) เท่ากับ 1, 2, 3 และ 4 แผ่น จากผลการวิจัยด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งแผ่นเกลียวจะทำให้ของไหลบริเวณกลางท่อเกิดการหมุนควงไปยังบริเวณใกล้กับผนังท่อ ส่งผลให้ชั้นอุณหภูมิร้อนของของ

ไหลที่อยู่ใกล้กับผนังท่อบางลง ทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ และพบว่า การเพิ่มขึ้นของจำนวนแผ่นเกลียวส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนลดลงในขณะที่ตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น และพบว่าจำนวนแผ่นเกลียว 1 แผ่น ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 1.71 ที่ค่า  $Re=2000$

**คำสำคัญ:** ตัวประกอบเสียดทาน, การถ่ายเทความร้อน, การไหลแบบราบเรียบ, แผ่นเกลียว, การจำลองเชิงตัวเลข

## ABSTRACT

*The laminar flow and heat transfer enhancement characteristics in a tube fitted with helical tape swirl generators, have been numerically studied in the present work. The computations were based on the finite volume method and the SIMPLE algorithm. The helical tape swirl generators with different numbers of helical tape ( $n = 1, 2, 3$  and  $4$ ) were examined. The width ratio ( $w/D$ ) and pitch ratio ( $p/D$ ) were kept constant at 1.0 and 2.0, respectively. The study was carried out for Reynolds numbers ranging between 100 and 2000, under a uniform wall temperature condition. The numerical result showed that a helical tape generated a swirl flow that conveyed fluid from core region to near tube wall zone and vice versa. The action helped to reduce a thickness of thermal boundary layer and facilitate heat transfer through the tube wall. As the helical tape number ( $n$ ) increased, it was found that heat transfer rate decreased while friction factor increased. Among the investigated conditions, the highest thermal enhancement factor of 1.71 was achieved by the use of the helical tape with  $n = 1$ , at  $Re = 2000$ .*

**Keywords:** Friction factor, heat transfer, helical tape, laminar flow, thermal enhancement

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันข้อจำกัดในส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยสำหรับการทดลองยังคงเป็นปัญหาสำหรับนักวิจัย เนื่องจากการทดลองต้องมีการลงทุนสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงระยะเวลาที่ใช้ในการวิจัยอีกด้วย รวมถึงข้อจำกัดของอุปกรณ์ในการทดลองที่ไม่สามารถบอกรายละเอียดได้ถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในกระบวนการที่ต้องการศึกษา ไม่ว่าจะเป็นจุดที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิไม่เพียงพอ ค่าความละเอียดของอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ใช้

ในการวัด ดังนั้น จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีผู้ทำการศึกษาวิจัยโดยใช้หลักการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์หรือการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลขเข้ามาช่วยในการอธิบายพฤติกรรมต่าง ๆ ของกระบวนการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการถ่ายเทความร้อนซึ่งมีความสำคัญเป็นอันดับต้นๆ ในทางอุตสาหกรรม ได้มีนักวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาถึงเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ เนื่องจากระบบท่อจริงในทางอุตสาหกรรมมีความยาวมากจึงมีผู้นำเสนอหลักการของการไหลที่มีการปรับตัวเต็มที่ในท่อ (fully developed flow) และมีการไหลแบบเป็นคาบ (periodic flow) ที่ทำการศึกษาโดย Patankar และคณะ [1] ได้ถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลและพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนในท่อโดยการเพิ่มตัวสร้างการไหลปั่นป่วนในลักษณะต่าง ๆ โดยการใช้วิธีการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์หรือการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข Jiang Guo และคณะ [2] ได้ศึกษาการจำลองเชิงตัวเลขในท่อกลมที่มีการติดตั้งสกรูโดยการเว้นช่วงแบบต่างๆ พบว่าการติดตั้งสกรูส่งผลให้การไหลเกิดการหมุนควงและให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากกว่าท่อเปล่า Sivashanmugan และ Suresh [3] – [5] ได้ศึกษาทดลองการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมที่มีการติดตั้งสกรู พบว่าการใส่สกรูเข้าไปในท่อส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อเปล่า Hakan และ Aydin [6] ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการติดตั้งสปริงเข้าไปในท่อกลม พบว่าการใส่สปริงเข้าไปในท่อส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อเปล่า Nanan และคณะ [7] – [8] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมโดยการติดตั้งแผ่นเกลียวบิด พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระยะพิทช์ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ตัวประกอบเสียดทานลดลง Eiamsa-ard และคณะ [9] ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนโดยการติดตั้งแผ่นเกลียวบิด ซึ่งพบว่าการติดตั้งแผ่นเกลียวบิดสามารถให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงถึง 1.29 เท่า จากผลงานวิจัยที่ได้กล่าวมาในข้างต้นจะเห็นได้ว่างานวิจัยส่วนใหญ่จะทำการศึกษาโดยการทดลอง [2] – [9] ซึ่งไม่สามารถเห็นถึงกลไกของลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนได้อย่างชัดเจน สำหรับงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการศึกษาพฤติกรรมของการไหลแบบราบเรียบและลักษณะการถ่ายเทความร้อนโดยการจำลองเชิงตัวเลขในท่อกลมที่มีการติดตั้งแผ่น

เกลียว โดยศึกษาถึงผลของการเพิ่มจำนวนแผ่นเกลียวที่ค่าความสูงและระยะพิทช์เดียวกัน

## 2. การสร้างแบบจำลองและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 รูปทรงของท่อที่มีการติดตั้งแผ่นเกลียว

ระบบที่ให้ความสนใจเป็นท่อกลมติดตั้งแผ่นเกลียว มีความกว้างของแผ่นเกลียวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (width ratio,  $w/D$ , WR) เท่ากับ 0.1 โดยไม่คิดความหนาของแผ่นเกลียว ระยะการบิดของแผ่นเกลียวเมื่อบิดไป  $360^\circ$  ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (pitch ratio,  $p/D$ , PR) เท่ากับ 2.0 และมีจำนวนแผ่นเกลียว ( $n$ ) เท่ากับ 1, 2, 3 และ 4 ใบ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกลมที่ใช้ในการจำลองนี้มีค่า  $D=0.05$  m และสมมติท่อยาวมาก ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งพิจารณาการไหลเป็นแบบเป็นคาบ (periodic flow)

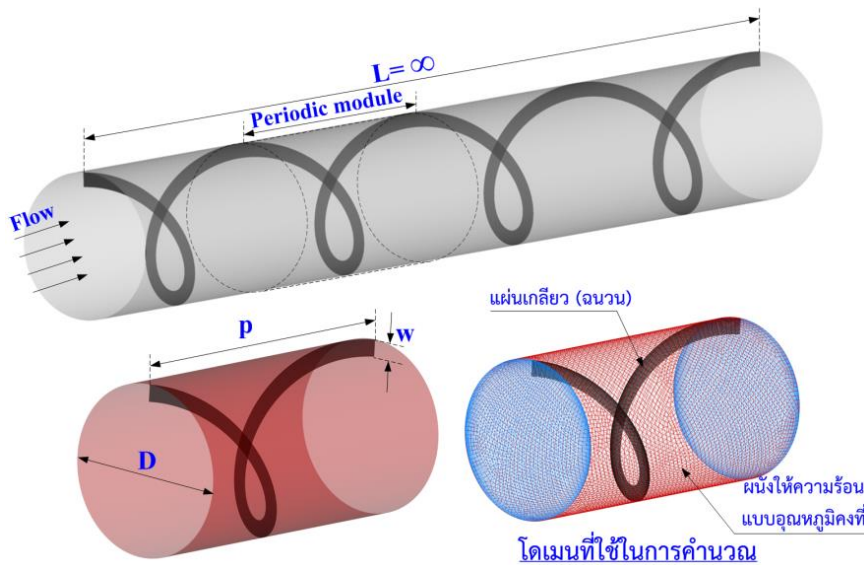
### 2.2 สมมติฐาน

การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อกลม มีสมมติฐานดังต่อไปนี้

การไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบคงตัว 3 มิติ โดยมีการไหลแบบราบเรียบและเป็นอัดตัวไม่ได้ กำหนดให้คุณสมบัติของของไหลคงที่ไม่คำนึงแรงวัตถุ, การสูญเสียเนื่องจากความหนืดและการแผ่รังสีความร้อน

### 2.3 สมการที่เกี่ยวข้อง

จากสมมติฐานข้างต้น สำหรับการไหลในท่อสมการควบคุมประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการนาเวียร์-สโตก และสมการพลังงาน สามารถเขียนในรูปเทนเซอร์ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนดังนี้



รูปที่ 1 รูปทรงของท่อกลมที่มีการติดตั้งแผ่นเกลียว และโดเมนที่ใช้ในการคำนวณโดยคิดการไหลแบบเป็นคาบ (periodic flow)

สมการความต่อเนื่อง:

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

สมการโมเมนตัม:

$$(1) \quad \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

สมการพลังงาน:

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

เมื่อ  $\Gamma$  คือ การแพร่ทางความร้อน กำหนดโดย

$$\Gamma = \frac{\mu}{Pr} \quad (4)$$

สมการควบคุมทั้งหมดจะถูก discretize โดยแบบแผนวิธีผลต่างครอตราคิค (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics differencing scheme, QUICK) แล้วทำการคำนวณหาผลเฉลยตามระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง [10] โดยแผนผังวิธีแบบ SIMPLE (Semi-implicit method for pressure-linked equations) ในการหาคำตอบจะพิจารณาที่ความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า  $10^{-5}$  ของทุกตัวแปร ยกเว้นสมการพลังงานจะพิจารณาที่ความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า  $10^{-9}$

ในงานวิจัยนี้มีตัวแปรที่ให้ความสนใจอยู่ 4 ตัวแปร คือ เลขเรย์โนลด์ ตัวประกอบเสียดทาน เลขนัสเซิลต์และสมรรถนะเชิงความร้อน ซึ่งค่าเลขเรย์โนลด์นิยามโดย

$$Re = \rho \bar{u} D / \mu \quad (5)$$

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

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

การถ่ายเทความร้อนในรูปของค่าการกระจายเลขนัสเซิลต์ ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$Nu_x = \frac{h_x D}{k} \quad (7)$$

ค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยสามารถคำนวณได้จาก

$$Nu = \frac{1}{A} \int Nu_x dA \quad (8)$$

สมรรถนะเชิงความร้อน,  $TEF$

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

เมื่อ  $Nu_0$  และ  $f_0$  คือ เลขนัสเซิลต์และตัวประกอบเสียดทานของท่อเปล่าผิวเรียบ

## 2.4 เงื่อนไขขอบ

พิจารณาทางเข้าและทางออกเป็นแบบ periodic translation สมมติอากาศที่ 300 K และมีค่าเลขพรานด์ 0.7 โดยไหลเข้าด้วยอัตราการไหลเชิงมวลคงที่ รูปร่างความเร็วทางเข้าและทางออกเหมือนกัน สมมติคุณสมบัติทางกายภาพของอากาศมีค่าคงที่ โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้า เงื่อนไขขอบเขตไม่มีการสั่นไถลที่ผนัง (no-slip conditions) หรือความเร็วที่ผนังมีค่าเท่ากับศูนย์ เป็นผนังที่อยู่กับที่ (stationary wall) กำหนดให้ที่ผนังของท่อมีอุณหภูมิผิวคงที่ 310 K และสมมติให้แผ่นเกลียวเป็นฉนวน

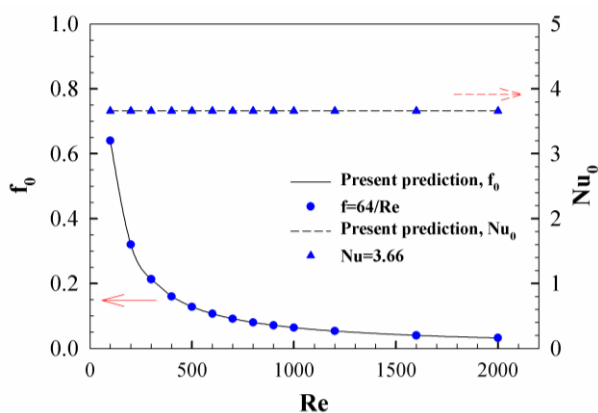
## 3. ผลการจำลองเชิงตัวเลข

### 3.1 การพิสูจน์ความถูกต้องของท่อกลมผิวเรียบ

การพิสูจน์ความถูกต้องของการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานในท่อกลมผิวเรียบที่ไม่มีการติดตั้งแผ่นเกลียว โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากวิธีเชิงตัวเลขและผลเฉลยแม่นยำตรงภายใต้เงื่อนไขเดียวกันนี้แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งค่าผลเฉลยแม่นยำตรงนี้สามารถศึกษาได้จากอ้างอิง [11] โดยพบว่าค่าที่ได้จากวิธีเชิงตัวเลขมีความคลาดเคลื่อนจากผลเฉลยแม่นยำตรงประมาณ 0.2% ทั้งในส่วน of ค่าเลขนัสเซิลต์และค่าตัวประกอบเสียดทาน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้โดยวิธีเชิงตัวเลขทั้งมีความสอดคล้องกันกับผลเฉลยแม่นยำตรงอย่างดีและมีความน่าเชื่อถือได้

### 3.2 โดเมนและกริดที่ใช้ในการคำนวณ

สำหรับการไหลในท่อนี้ โดเมนที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยเป็นเอลิเมนต์รูปทรงสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมแบ่งกริดแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid) ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบผลเฉลยโดยใช้จำนวนของกริดที่แตกต่างกันคือที่ 80,000 150,000 300,000 และ 400,000 พบว่าเมื่อจำนวนเพิ่มขึ้นจาก 300,000 เป็น 400,000 ค่าเลขนัสเซลต์และตัวประกอบเสียตทานเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 0.75% ดังนั้นจึงเลือกจำนวนกริดเท่ากับ 300,000 สำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวเลข



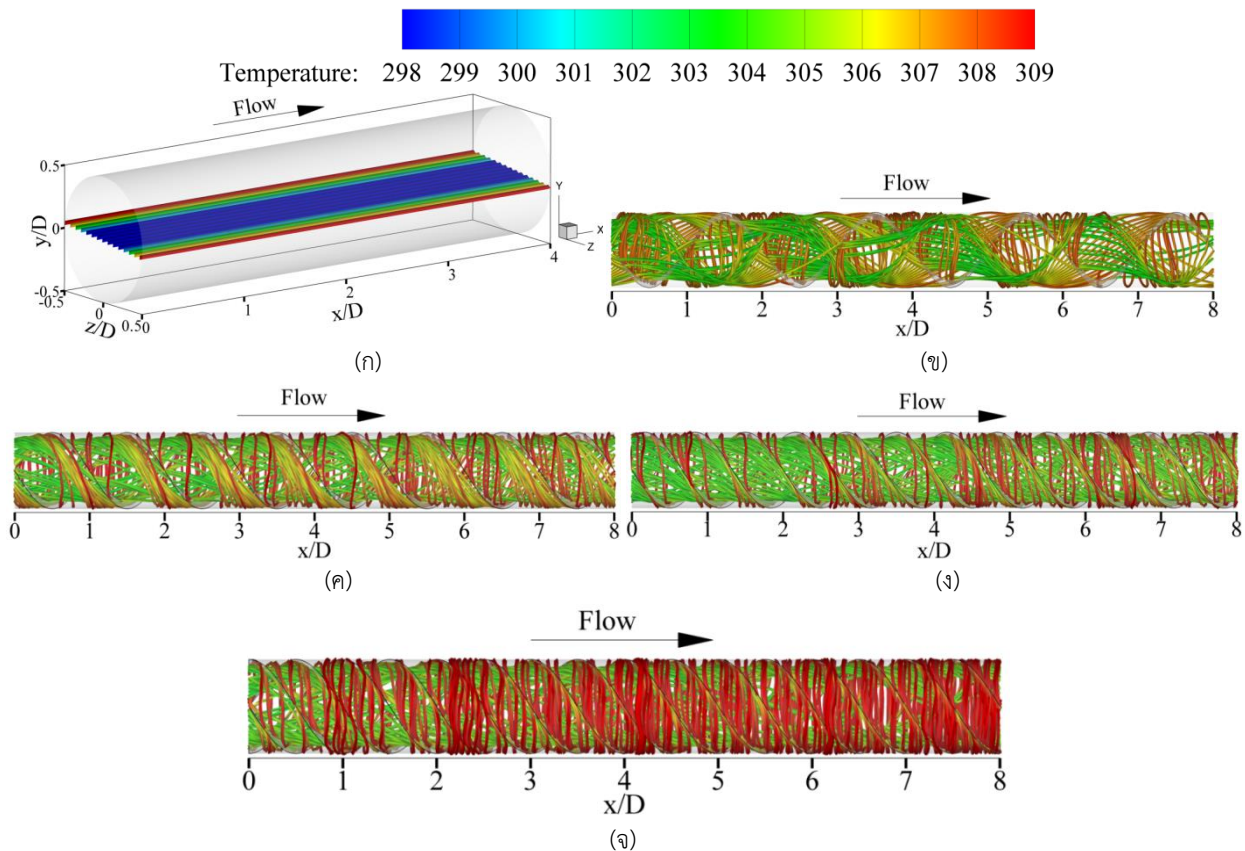
รูปที่ 2 การตรวจสอบความถูกต้องของเลขนัสเซลต์และตัวประกอบเสียตทานของท่อกลมผิวเรียบ

### 3.3 พฤติกรรมการไหล

รูปที่ 3 แสดงถึงเส้นกระแสการไหลตามแนวแกนการไหลสำหรับท่อเปล่าและท่อที่มีการติดตั้งแผ่นเกลียวที่ค่า  $Re=1000$  โดยกรณีของกระแสการไหลตามแนวแกนการไหลได้แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิของของไหลในช่วง 298-309 K พบว่าเมื่อของไหลไหลในท่อเปล่า เส้นกระแสการไหลจะมีลักษณะเป็นการไหลแบบไหลตรง และสังเกตได้ว่าอุณหภูมิของของไหลบริเวณใกล้กับผนังมีอุณหภูมิสูง (คอนทัวร์

สีแดง) ส่วนบริเวณกลางท่อของไหลจะมีอุณหภูมิต่ำ (คอนทัวร์สีน้ำเงิน) แต่เมื่อของไหลไหลผ่านแผ่นเกลียวจะทำให้ของไหลเกิดการไหลแบบหมุนควง เมื่อพิจารณากรณี  $n=1$  พบว่ากระแสของของไหลสามารถไหลมากระแทกกับผนังท่อ และอุณหภูมิของของไหลบริเวณใกล้กับผนังท่อจะมีอุณหภูมิต่ำ (คอนทัวร์สีเขียว) เมื่อเทียบกับท่อเปล่า สำหรับกรณี  $n=2$  พบว่ากระแสการหมุนควงของของไหลส่วนใหญ่จะกระแทกผนังบริเวณด้านหน้าของแผ่นเกลียว โดยอุณหภูมิของของไหลบริเวณใกล้กับผนังมีค่าสูงกว่ากรณี  $n=1$  (สังเกตได้จากคอนทัวร์สีแดง) ส่วนด้านหลังของแผ่นเกลียวไม่ปรากฏกลุ่มของการไหลหมุนควงมากระแทกที่ผนังท่อ แต่จะมีกระแสของไหลเพียงบางส่วนเท่านั้น และยังเป็นของไหลที่มีอุณหภูมิสูง (คอนทัวร์สีแดง) ส่วนกรณีที่  $n=3$  และ 4 พบว่าของไหลแทบจะไม่หมุนควงมากระแทกเข้ากับผนังท่อเนื่องจากแผ่นเกลียวมีระยะใกล้กัน จึงทำให้พื้นที่ของผนังท่อที่ทำให้กระแสของของไหลจะมากระแทกลดลง และของไหลบริเวณใกล้ผนังท่อยังมีอุณหภูมิสูง

ซึ่งหากพิจารณาเส้นกระแสการไหลในระนาบขวางการไหล ซึ่งแสดงไว้ที่ระยะ  $x/D=1$  ในรูปที่ 4 จะเห็นว่าโดยทั่วไปการไหลแบบหมุนควงจะปรากฏที่บริเวณผิวท่อ ในขณะที่บริเวณกลางท่อยังไม่ปรากฏกระแสการไหลแบบหมุนควง เมื่อพิจารณากรณี  $n=1$  กระแสการไหลหลักของของไหลจะมีจุดศูนย์กลางการหมุนอยู่ใกล้ผนัง ทำให้ของไหลส่วนที่อยู่บริเวณกลางท่อไหลมาใกล้ผนังท่อได้มากขึ้น ส่วนกรณี  $n=2, 3$  และ 4 พบว่าจุดศูนย์กลางการหมุนของของไหลอยู่บริเวณกลางท่อ แต่ในกรณีที่  $n=2$  กระแสของไหลหลักมีลักษณะเป็นรูปวงรี ซึ่งทำให้ของไหลบริเวณกลางท่อเคลื่อนที่ไปใกล้กับผนังท่อได้ดีขึ้นเช่นเดียวกับกรณี  $n=1$  แต่กรณี  $n=3$  และ 4 ส่งผลให้กระแสของไหลหลักยังมีลักษณะเป็นวงกลม ซึ่งของไหลส่วนใหญ่จะหมุนวนเฉพาะบริเวณกลางท่อ กระแสการไหลแบบหมุนควงที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งแผ่นเกลียวนี้ จะส่งผลอย่างมากต่อการถ่ายเทความร้อนของผิวท่อ เนื่องจากทำให้อุณหภูมิของของไหลเกิดการผสมกัน และเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีขึ้น



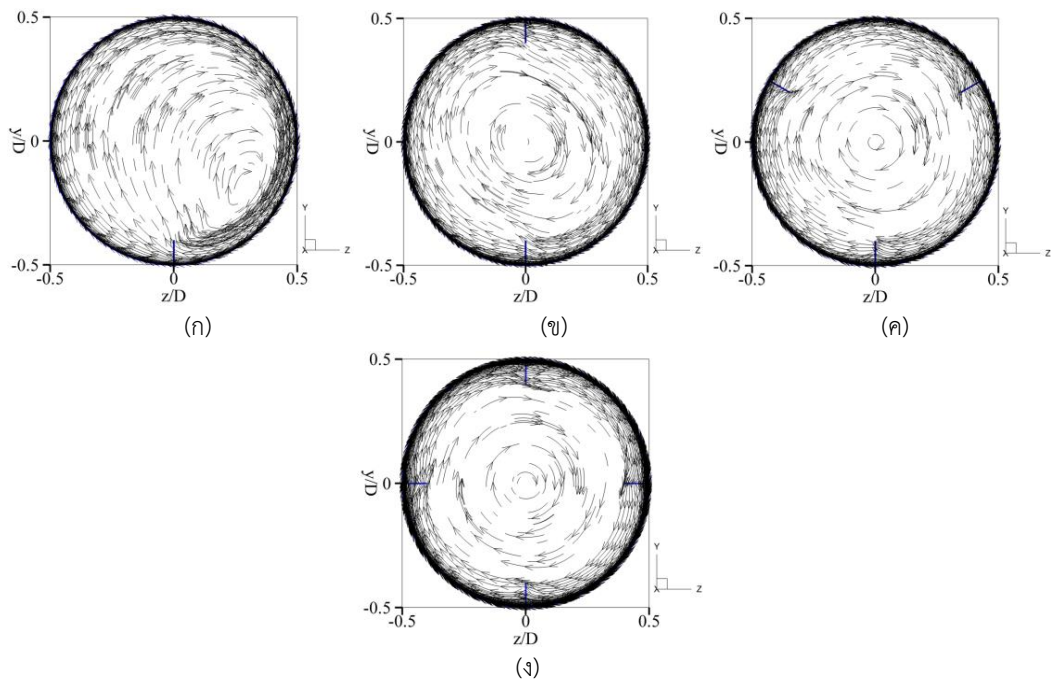
รูปที่ 3 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ สำหรับ (ก) ท่อเปล่า (ข)  $n=1$  (ค)  $n=2$  (ง)  $n=3$  (จ)  $n=4$  ที่ค่า  $Re=1000$

### 3.4 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน

พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนสำหรับท่อเปล่าและท่อที่มีการติดตั้งแผ่นเกลียวโดยแสดงในรูปของการกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลในช่วงอุณหภูมิที่ 298-309 K และการกระจายเลขนัสเซิลต์ที่ผิวท่อในช่วง 0-10 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลพบว่าในกรณีท่อเปล่าอุณหภูมิของของไหลบริเวณกลางท่อยังมีอุณหภูมิต่ำ (คอนทัวร์สีน้ำเงิน) ส่วนบริเวณใกล้ผนังท่อของไหลยังมีอุณหภูมิสูง (คอนทัวร์สีแดง) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5(ก) ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนหรือค่าเลขนัสเซิลต์ที่ผนังมีค่าต่ำ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6(ก) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าคอนทัวร์อุณหภูมิของของไหลสีแดงบริเวณใกล้ผนังท่อในระนาบขวางการไหลจะเป็นตัวกั้นการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวท่อกับของไหล ทำให้การถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อมีค่าต่ำ สำหรับกรณี  $n=1$  แสดงให้เห็นว่าการหมุนควงของของไหลที่

เกิดขึ้นส่งผลให้ชั้นอุณหภูมิร้อนของของไหลบริเวณใกล้กับผนังท่อมีความหนาลดลงเมื่อเทียบกับท่อเปล่า ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5(ข) ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อเพิ่มขึ้น สังเกตได้จากคอนทัวร์สีแดงที่ผิวท่อ ซึ่งหมายถึงพื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อนสูง แต่ในบริเวณด้านหลังของแผ่นเกลียวยังปรากฏคอนทัวร์สีแดงมีความหนา มากกว่าบริเวณอื่น เนื่องมาจากกระแสของของไหลไม่สามารถเข้าไปกระแทกได้ จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนบริเวณด้านหลังแผ่นเกลียวมีค่าต่ำกว่าบริเวณอื่น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6(ข) และเมื่อเพิ่มจำนวนของแผ่นเกลียวเป็น 2, 3 และ 4 แผ่น พบว่าชั้นคอนทัวร์สีแดงที่มีความหนามากที่สุดของของไหลบริเวณด้านหลังของแผ่นเกลียวมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามจำนวนของแผ่นเกลียว ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5(ค-จ) จึงทำให้พื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงที่ผิวท่อลดลงตามไปด้วย และพื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อนต่ำเพิ่มขึ้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6(ค-จ)





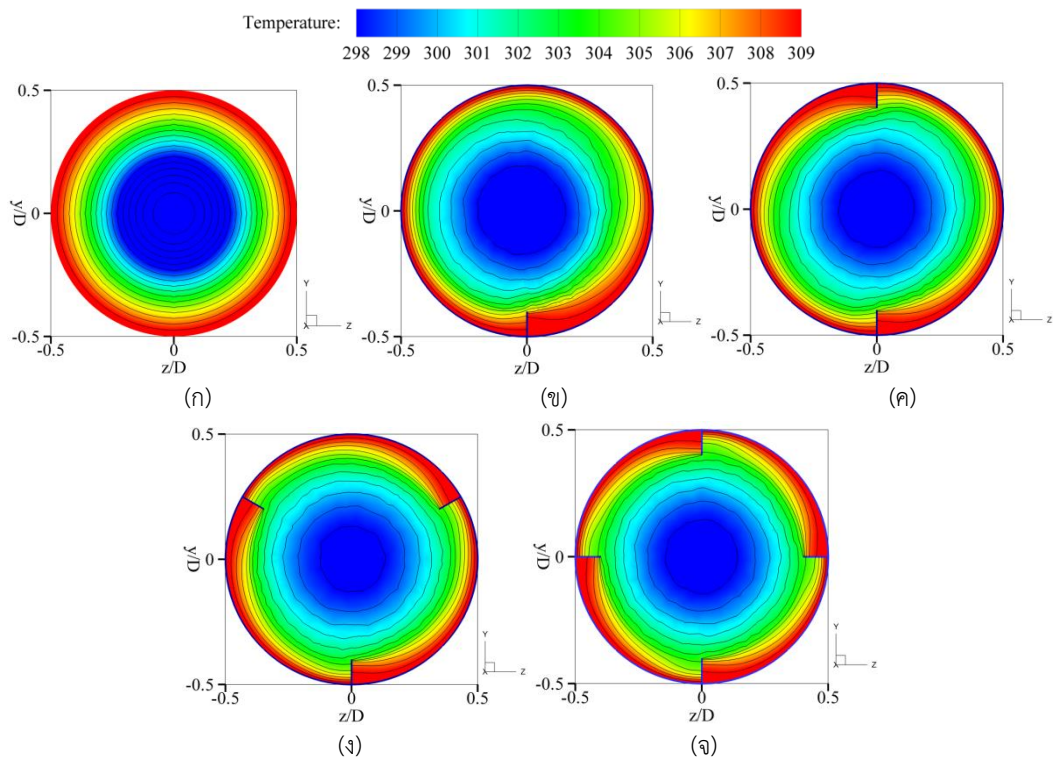
รูปที่ 4 เส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางการไหล สำหรับ (ก)  $n=1$  (ข)  $n=2$  (ค)  $n=3$  (ง)  $n=4$  ที่ค่า  $Re=1000$

รูปที่ 7 แสดงถึงการกระจายของค่าการถ่ายเทความร้อนเฉพาะจุดที่ผนังท่อที่ตำแหน่ง  $y/D=0$ ,  $z/D=0.5$ ,  $x/D=0-2$  ที่ค่า  $Re=1000$  พบว่าจุดที่มีค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนแผ่นเกลียว เมื่อพิจารณาที่  $n=4$  พบว่า ค่าการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่บริเวณด้านหน้าของแผ่นเกลียว และลดลงอย่างรวดเร็วที่บริเวณด้านหลังของแผ่นเกลียว และเนื่องจากพื้นที่ของการถ่ายเทความร้อนต่ำเกิดขึ้นที่บริเวณผิวด้านหลังของแผ่นเกลียว จึงทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำที่สุดของกรณี  $n=4$  มีจำนวน 4 จุด ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของการถ่ายเทความร้อน

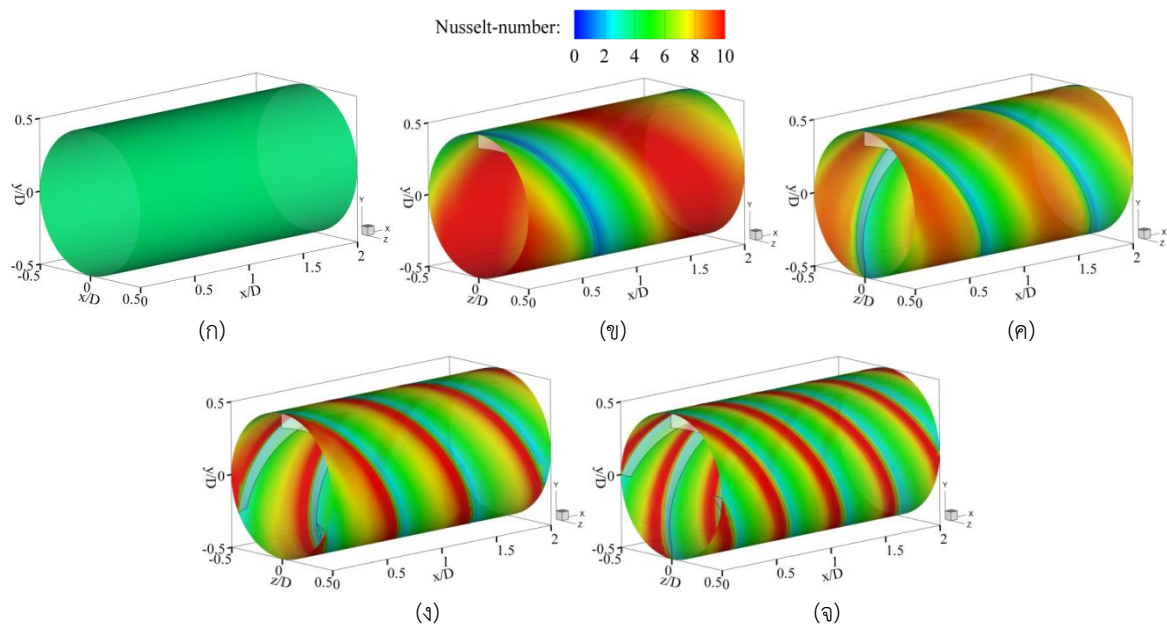
ร้อนมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ๆ ในขณะที่กรณี  $n=1$  พบว่าการถ่ายเทความร้อนค่อยๆ เพิ่มขึ้นโดยมีจุดต่ำสุดเพียงจุดเดียวเท่านั้น จึงทำให้ค่าเฉลี่ยของการถ่ายเทความร้อนสูงมากกว่ากรณีอื่น ๆ

### 3.5 วิเคราะห์ผลการจำลองเชิงตัวเลข

รูปที่ 8(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $f/f_0$  ที่ค่า  $n$  ต่างๆ จากกราฟพบว่าเมื่อค่า  $Re$  และ  $n$  เพิ่มขึ้นทำให้ค่า  $f/f_0$  เพิ่มขึ้น และพบว่าที่  $n=4$  จะให้ค่า  $f/f_0$  มากที่สุดเมื่อเทียบกับท่อเปล่า สำหรับ

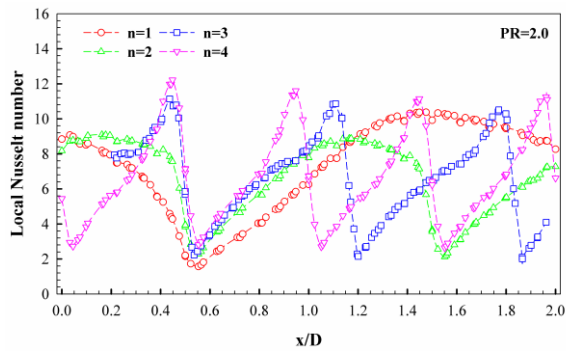


รูปที่ 5 การกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหล สำหรับ (ก) ท่อเปล่า (ข)  $n=1$  (ค)  $n=2$  (ง)  $n=3$  (จ)  $n=4$  ที่ค่า  $Re$  1000



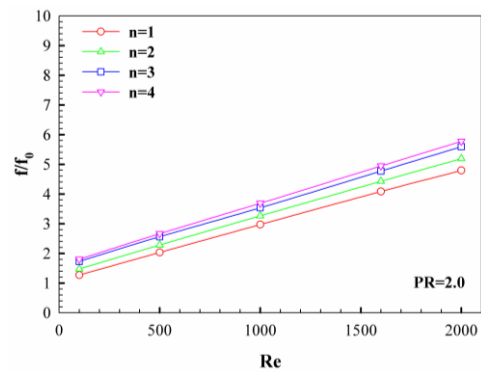
รูปที่ 6 การกระจายเลขนัสเซลล์ต์ที่บริเวณผนังท่อ สำหรับ (ก) ท่อเปล่า (ข)  $n=1$  (ค)  $n=2$  (ง)  $n=3$  (จ)  $n=4$  ที่ค่า  $Re$  1000



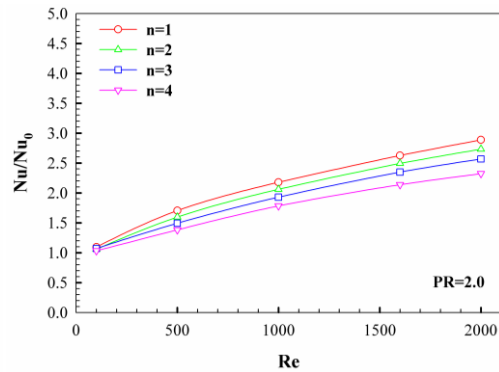


รูปที่ 7 การกระจายของค่าการถ่ายเทความร้อนเฉพาะจุดที่ผนังท่อที่ตำแหน่ง  $y/D=0$ ,  $z/D=0.5$ ,  $x/D=0-2$  ที่ค่า  $Re=1000$

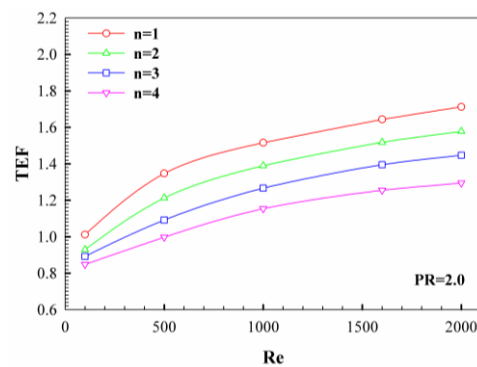
ค่า  $n=1$  ให้ค่า  $f/f_0$  น้อยที่สุด สำหรับค่า  $f/f_0$  ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 5.77 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าที่  $n=4$  และ  $Re=2000$  ส่วนค่า  $f/f_0$  ที่น้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.27 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าที่  $n=1$  และ  $Re=100$



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก)  $f/f_0$  (ข)  $Nu/Nu_0$  และ (ค) TEF กับเลขเรย์โนลด์ที่ค่า  $n$  ต่าง ๆ

รูปที่ 8(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับค่า  $Nu/Nu_0$  ที่ค่า  $n$  ต่าง ๆ ซึ่งเมื่อพิจารณาช่วง  $Re$  ระหว่าง 100 ถึง 2000 พบว่าเมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า  $Nu/Nu_0$  เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเพิ่มค่า  $n$  ทำให้ค่า  $Nu/Nu_0$  มีค่าลดลง กรณี  $n=1$  มีค่า  $Nu/Nu_0$  สูงที่สุด โดยมีค่าเป็น 2.88 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า จากกราฟสรุปได้ว่าการติดตั้งแผ่นเกลียวในช่วงที่ทำการศึกษา จะให้ค่า  $Nu/Nu_0$  อยู่ในช่วง 1.00-2.88 เท่า เมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ

รูปที่ 8(ค) แสดงถึงความสัมพันธ์ของค่า TEF กับ  $Re$  พบว่าเมื่อ  $Re$  เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า TEF เพิ่มขึ้น โดยค่า  $n=1$  ให้ค่า TEF สูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 1.71 ที่ค่าเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 2000 และพบว่าการติดตั้งแผ่นเกลียวในท่อกลมในช่วงที่ทำการศึกษา ให้ค่า TEF อยู่ในช่วง 1.00-1.71

#### 4. สรุปผลการจำลอง

การศึกษาด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับพฤติกรรมการไหล การถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อมและสมรรถนะเชิงความร้อนสำหรับท่อกลมที่มีการติดตั้งแผ่นเกลียวที่  $PR=2.0$  โดยทำการศึกษาในช่วง  $n=1-4$  และค่า  $Re=100-2000$  พบว่าเมื่อเพิ่มแผ่นเกลียวในท่อจะเกิดการไหลแบบหมุนควง ทำให้ชั้นอุณหภูมิร้อนของของไหลบางลง ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อเพิ่มขึ้น โดยสำหรับกรณีการศึกษาให้ค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 1.00-2.88 เท่า เมื่อเทียบกับท่อกลมผิวเรียบ การติดตั้งแผ่นเกลียวในท่อส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.27-5.77 เท่า เมื่อเทียบกับท่อกลมผิวเรียบ และให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.00-1.71

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] S.V. Patankar, C.H. Liu and E.M. Sparrow, "Fully developed flow and heat transfer in ducts having streamwise-periodic variations of cross-sectional area", *Journal of Heat Transfer*, vol. 99, pp. 180-186, 1977.
- [2] J. Guo, M. Xu and L. Cheng, "Numerical investigations of circular tube fitted with helical screw-tape inserts from the viewpoint of field synergy principle", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 49, pp. 410-417, 2010.
- [3] P. Sivashanmugan and S. Surech, "Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of laminar flow through a circular tube fitted with helical screw-tape inserts", *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, pp. 1990-1997, 2006.
- [4] P. Sivashanmugan and S. Surech, "Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of turbulent flow through a circular tube fitted with helical screw-tape inserts", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 46, pp. 1292-1298, 2007.
- [5] P. Sivashanmugan and S. Surech, "Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of laminar flow through a circular tube fitted with regularly spaced helical screw-tape inserts", *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 31, pp. 301-308, 2007.
- [6] H. Karakaya and A. Durmus, "Heat transfer and exergy loss in conical spring turbulators", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 60, pp. 756-762, 2013.
- [7] K. Nanan, C. Thianpong, P. Promvong and S. Eiamsa-ard, "Investigation of heat transfer enhancement by perforated helical twisted-tapes", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 52, pp. 106-112, 2014.
- [8] K. Nanan, K. Yongsiri, K. Wongcharee, C. Thianpong and S. Eiamsa-ard, "Heat transfer enhancement by helically twisted tapes inducing co- and counter-swirl flows", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 46, pp. 67-73, 2013.
- [9] S. Eiamsa-ard, K. Yongsiri, K. Nanan, and C. Thianpong, "Heat transfer augmentation by helically twisted tapes as swirl and turbulence promoters", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 60, pp. 42-48, 2012.
- [10] S.V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York.

- [11] F. Incropera and P.D. Dewitt, *Introduction to Heat Transfer*, 3<sup>rd</sup> edition John Wiley & Sons Inc.



**พิทักษ์ พร้อมโรสง** สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล พ.ศ. 2554 และระดับปริญญาโท สาขา วิศวกรรมเครื่องกล พ.ศ. 2557 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



**ปรัชญา สารวณสินธุ์** สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล พ.ศ. 2548 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ระดับปริญญาโท สาขา วิศวกรรมเครื่องกล พ.ศ. 2554 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



**สุกฤษฎ์ สุวรรณพันธุ์** สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล พ.ศ. 2546 จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล พ.ศ. 2552 และระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมเครื่องกล พ.ศ. 2557 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น



**สุริยา โชคเพิ่มพูน** สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล พ.ศ. 2549 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล พ.ศ. 2552 และระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมเครื่องกล พ.ศ. 2557 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันเป็นอาจารย์

ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร



สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด สำเร็จการศึกษาระดับ  
ปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกลจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครในปี พ.ศ.  
2539 ระดับปริญญาโทและเอก สาขา  
วิศวกรรมเครื่องกลจากสถาบันเทคโนโลยีพระ  
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปี พ.ศ.  
2543 และ 2549 ตามลำดับ เริ่มทำงานที่  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีมหานครในปี พ.ศ. 2539 ถึงปัจจุบัน มีความสนใจงานวิจัยในเรื่อง  
เทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวน งาน  
ทางด้านของไหลและความร้อน และงานด้านเทคนิค visualization ต่างๆ  
สำหรับศึกษาพฤติกรรมการไหลและความร้อน