

อิทธิพลของแผ่นกั้นต่อพฤติกรรมการไหลราบเรียบและการถ่ายเทความร้อนในท่อ

Effect of Baffle for Laminar Flow Behavior and Heat Transfer in Tube

จารุวัฒน์ เชี่ยวชาญวิทย์กุล, ศตวรรษ กระต่องเดช, วิหาคา เจษฎารัตนชัย, กิตติธัญ คำพันธ์
และ พงษ์เจต พรหมวงศ์*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
* ติดต่อ: โทรศัพท์: (662) 326-4197, โทรสาร: (662) 326-4198,
E-mail: kppongje@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนสำหรับการไหลแบบราบเรียบในท่อกลมที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นตัววีทำมุม ระบบเป็นท่อกลมแบบอนุกรมที่มีผิวคงที่ แผ่นกั้นทำมุมปะทะที่ $\alpha = 45^\circ$ จัดวางแบบแถวเดียวและสองแถวแบบตรงกัน มีค่าอัตราส่วนระหว่างช่องเปิดในการไหลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (flow area ratio (FA/D), FAR) เท่ากับ 0.6 ถึง 0.8 และอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (Pitch ratio, PR) เท่ากับ 2 ในการคำนวณใช้วิธีปริมาตรสืบเนื่องและเลือกลำดับวิธีหาผลเฉลยแบบ SIMPLE ศึกษาในช่วงการไหลราบเรียบ $Re = 100$ ถึง 1200 พบว่าท่อที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นตัววีจะเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าท่อผิวเรียบ เนื่องจากเกิดการหมุนวนของกระแสการไหลและการกระแทกที่บริเวณผิวความร้อน ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการลดลงของ FAR ทำให้ค่าเลขนัสเซลและตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น โดยค่า $FAR = 0.6$ จะให้การถ่ายเทความร้อนและค่าความดันสูญเสียมากที่สุด ทั้งกรณีแบบแถวเดียวและสองแถว โดยการติดตั้งแบบสองแถวจะให้การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมมากกว่า พบว่า $FAR = 0.7$ สำหรับการจัดวางแบบสองแถวให้ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 2.6 ที่ $Re = 1200$
คำสำคัญ: ท่อกลม, แผ่นกั้น, การถ่ายเทความร้อน, ความเสียดทาน

Abstract

This article presents a numerical analysis of laminar periodic flow and heat transfer in a constant temperature-surfaced tube fitted with inclined baffle generators. The computations are based on a finite volume method, and the SIMPLE algorithm has been implemented. The laminar fluid flow and heat transfer characteristics are presented for Reynolds numbers based on the diameter of the tube ranging from 100 to 1200. The baffle with the attack angle of 45° is mounted in tube with 1 side and 2 sides of the tube wall, flow area ratio, FAR in range from 0.6–0.8 at a single pitch ratio of 2 on heat transfer and pressure loss in the tube are studied. It is apparent that the vortex flows exist and help to induce impinging flows on the wall leading to drastic increase in heat transfer rate over the test channel. In addition, the decrease in the FAR results in the rise of Nusselt number and friction factor values. The

computational results reveal that the optimum thermal enhancement factor of the inclined baffle is about 2.6 at $Re = 1200$ for 2 sides arrangement.

Keywords: tube, baffle, heat exchanger, friction

1. บทนำ

การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ ดังนั้นจึงได้มีการนำเทคนิควิธีต่าง ๆ เพื่อเป็นการเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนและเพิ่มสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ตัวอย่างเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยการติดตั้งตัวสร้างการไหลแบบปั่นป่วนที่เรียกว่า turbulators เช่น ครีบ (ribs) [1], แผ่นขรุขระหรือผิวท่อนที่มีการเซาะร่อง (grooves/dimples) [2], ปีก (winglets) [3] และแผ่นกั้น (baffles) [4] โดยตัวสร้างการไหลปั่นป่วนนี้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นการก่อกวนการไหลทำให้เกิดการหมุนวนของการไหลแนวยาวและเพิ่มการผสมให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งวิธีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนนี้ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านวิศวกรรมในสายงานต่าง ๆ เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีขนาดกะทัดรัด เครื่องทำอากาศเย็นจากแผงรับแสงอาทิตย์ และแผงระบายความร้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

เนื่องจากระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นระบบที่สำคัญสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ดังนั้นจึงได้มีความสนใจในการศึกษาในส่วนของการเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนและพฤติกรรมการไหลรวมถึงค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นโดยมีการศึกษาทั้งในส่วนของการใช้การทดลองและในส่วนของการศึกษาโดยใช้วิธีเชิงตัวเลขหรือการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเป็นการศึกษาถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้น Han และคณะ [5,6] ทำการศึกษาโดยใช้การทดลองเพื่อดูค่าการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการเพิ่มครีบทำมุมที่ผนังทั้งสองด้านของท่อ โดยมีค่า $L/b = 10$ และ $b/D = 0.0625$ จากการศึกษาสรุปได้ว่า ครีบทำมุมและครีบบรูปตัววีทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อน Murata และ

Mochizuki [7] ทำการศึกษาโดยใช้วิธีเชิงตัวเลขแบบ large eddy simulation (LES) ของค่าการถ่ายเทความร้อนในท่อเหลี่ยมที่มีการเพิ่มครีบ โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ $b/D = 0.1$, $L/b = 10$ และ 60° จากผลการศึกษาสรุปได้ว่า การเพิ่มครีบในลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าการถ่ายเทความร้อน

ได้มีการทำการศึกษาและรวบรวมเกี่ยวกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยผิวการถ่ายเทความร้อนแบบเป็นคาบที่มีการเพิ่มครีบในท่อที่มีการให้ความร้อนที่ผิวด้านบนเพียงด้านเดียว โดยมีการศึกษาทั้งในส่วนของการใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลขและการศึกษาโดยทำการทดลองจริง ซึ่งการรวบรวมข้อมูลดังกล่าวได้มีการนำเสนอโดย Hans และ คณะ [8] และ Varun และคณะ [9] ได้มีการศึกษาการไหลแบบเป็นคาบสำหรับการไหลที่มีการพัฒนาเต็มที่โดยใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลขในส่วนของการพฤติกรรมการไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อนในท่อทั้งการไหลแบบลามินาร์และการไหลแบบปั่นป่วนโดย Patankar และคณะ [10] Berner และคณะ [11] ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลแบบลามินาร์ในช่องขนานที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นทำมุม 90 องศาทั้งด้านบนและด้านล่างของท่อ โดยมีการจัดวางแบบเยื้อง พบว่าการไหลที่ค่า Re น้อยกว่า 600 จะไม่ทำให้เกิด vortex shedding Webb และ Ramadhyani [12] ได้นำเอาหลักของการไหลแบบเป็นคาบของการไหลที่พัฒนาเต็มที่ซึ่งได้มีการศึกษาไว้จากอ้างอิงที่ [10] ทำการศึกษาโดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลและค่าการถ่ายเทความร้อนในท่อผิวเรียบและท่อที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นที่มีการวางแบบเยื้อง Kellar and Patankar [13] ศึกษาวิจัยลักษณะค่าการถ่ายเทความร้อนในท่อขนานที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นในลักษณะการจัดวางแบบเยื้องและพบว่าค่าการถ่ายเทความร้อน

ที่ได้จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความสูงของแผ่นกัน รวมถึงการลดลงของระยะห่างระหว่างแผ่นกัน

การศึกษาโดยใช้แบบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขแบบสามมิติของการไหลแบบเป็นคาบที่มีการพัฒนาการไหลเต็มสำหรับการพาความร้อนแบบบังคับของการไหลแบบลามินาร์ มีการให้ความร้อนแบบพลั๊กความร้อนคงที่ที่ด้านบนและด้านล่างของผนังได้ถูกศึกษาโดย Lopez และคณะ [14] Guo และ Anand [15] ศึกษาและวิจัยค่าการถ่ายเทความร้อนแบบสามมิติในท่อขนานที่มีการติดตั้งครีบท่ทางเข้า

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาถึงพฤติกรรมของการไหลและค่าการถ่ายเทความร้อนในท่อลักษณะต่าง ๆ โดยการเพิ่มตัวสร้างการไหลปั่นป่วนในลักษณะต่าง ๆ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ออกแบบมาเพื่อรองรับระบบท่อกลมซึ่งใช้กันมากในทางอุตสาหกรรม จึงได้นำเสนอการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบลามินาร์ 3 มิติ โดยพิจารณาถึงลักษณะการไหลเป็นคาบเนื่องจากท่อในระบบอุตสาหกรรมมีความยาวมากดังนั้นพฤติกรรมการไหลในท่อจึงเป็นแบบ periodic คือมีพฤติกรรมซ้ำกันทุกโมดูล มีการติดตั้งแผ่นกันวางเอียงที่ผนังด้านในท่อทั้งแบบติดตั้งแถวเดียวและสองแถวในทิศทางตรงข้ามกัน โดยศึกษาถึงผลของสัดส่วนการ *FAR* ของแผ่นกันที่มุมปะทะ $\alpha = 45^\circ$ โดยได้ทำการวิเคราะห์ถึงค่าการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อน ค่าความดันสูญเสียและพิจารณาในเชิงของสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

2. ขั้นตอนการวิเคราะห์

2.1 พื้นฐานทางคณิตศาสตร์

การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขมีสมมติฐานดังต่อไปนี้

2.1.1 การไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบคงตัว 3 มิติ

2.1.2 การไหลเป็นแบบลามินาร์ (การไหลราบเรียบ) และเป็นแบบอัดตัวไม่ได้

2.1.3 คุณสมบัติของของไหลคงที่

2.1.4 ไม่คำนึงแรงวัตถุและการสูญเสียเนื่องจากความหนืด

2.1.5 ไม่คำนึงการแผ่รังสีความร้อน

จากสมมติฐานข้างต้น สำหรับการไหลในท่อสมการควบคุมประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการนาเวียร์-สโตก และสมการพลังงาน สามารถเขียนในรูปเทนเซอร์ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนดังนี้

สมการความต่อเนื่อง:

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

สมการโมเมนตัม:

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

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 Γ คือ การแพร่ทางความร้อน กำหนดโดย

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

สมการควบคุมทั้งหมดจะถูก discretize โดยใช้แบบแผนวิธีผลต่างครอตราคิด (Quadratic upstream interpolation for convective kinetics differencing scheme, QUICK) แล้วทำการคำนวณหาผลเฉลยตามระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง [16] โดยแผนผังวิธีแบบ SIMPLE (Semi-implicit method for pressure-linked equations) ในการหาคำตอบจะพิจารณาถึงความแตกต่างของค่าการแปรเปลี่ยนน้อยกว่า 10^{-5} ของทุกตัวแปร

ในงานวิจัยนี้มีตัวแปรที่ให้ความสนใจอยู่ 4 ตัวแปร คือ เลขเรย์โนลด์ ตัวประกอบเสียดทาน เลขนัสเซลและสมรรถนะเชิงความร้อน ซึ่งค่าเลขเรย์โนลด์นิยามโดย

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

ตัวประกอบเสียดทาน, f คำนวณได้จากความดันตกคร่อม, Δp ตลอดช่วงความยาว periodic ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส, L

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

การถ่ายเทความร้อนในรูปของค่าการกระจายเลขนัสเซล ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

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

ค่าเลขนัสเซลเฉลี่ยสามารถคำนวณได้จาก

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

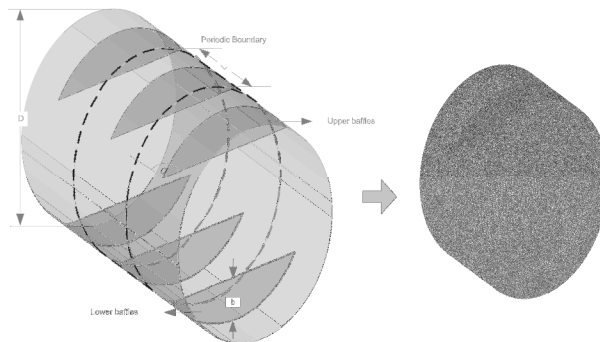
สมรรถนะเชิงความร้อน, η

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

เมื่อ Nu_0 และ f_0 คือ เลขนัสเซลและตัวประกอบเสียดทานของท่อผิวเรียบ ตามลำดับ

2.2 ท่อกลมที่มีการเพิ่มแผ่นกั้นวางเอียง

ระบบที่ให้ความสนใจเป็นท่อกลมติดตั้งแผ่นกั้นวางเอียงทำมุม มีอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างแผ่นต่อความสูงของท่อ (P/D) หรือระยะพิทช์ของมีค่าคงที่เท่ากับ 2D วางเอียงทำมุมปะทะ, $\alpha = 45^\circ$ และมีอัตราส่วนช่องเปิดต่อความสูงของท่อ (flow area ratio, FA/D , (FAR)) ในช่วง 0.6–0.8 ท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ $D = 0.05$ m



รูปที่ 1 รูปทรงของท่อที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นและโดเมนที่ใช้ในการคำนวณโดยคิดการไหลแบบ periodic ที่มีการสร้างตาข่ายสี่เหลี่ยมแบบไม่สม่ำเสมอ

2.3 เงื่อนไขขอบ

2.3.1 พิจารณาทางเข้าและทางออกเป็นแบบ periodic translation

2.3.2 สมมติอากาศที่ 300 K และมีค่าเลขพรานด์ 0.7

2.3.3 ไหลเข้าด้วยอัตราการไหลเชิงมวลคงที่

2.3.4 รูปร่างความเร็วทางเข้าและทางออกเหมือนกัน

2.3.5 สมมติคุณสมบัติทางกายภาพของอากาศมีค่าคงที่ โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้า

2.3.6 เงื่อนไขขอบเขตไม่มีการลื่นไถลที่ผนัง (no-slip conditions) หรือความเร็วที่ผนังมีค่าเท่ากับศูนย์ เป็นผนังที่อยู่กับที่ (stationary wall)

2.3.7 กำหนดให้ที่ผนังทุกด้านของท่อจตุรัสมีอุณหภูมิผิวคงที่ 310 K

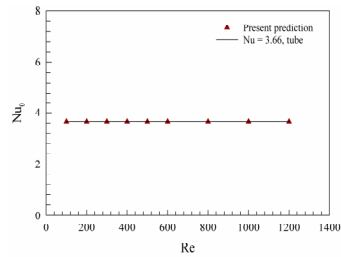
2.3.8 ให้แผ่นกั้นเป็นแบบความร้อนไม่สามารถผ่านได้

3. ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

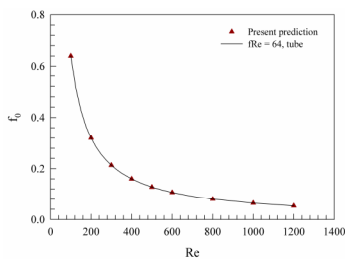
3.1 การพิสูจน์ความถูกต้องของท่อจตุรัสผิวเรียบและจำนวนกริดที่ใช้

ในการพิสูจน์ความถูกต้องของการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานในท่อผิวเรียบที่ไม่มีการเพิ่มการติดตั้งแผ่นกั้น โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากวิธีเชิงตัวเลขและผลเฉลยแม่นยำตรงภายใต้เงื่อนไขเดียวกันนี้ ซึ่งค่าผลเฉลยแม่นยำตรงนี้สามารถศึกษาได้จากอ้างอิง [17] โดยพบว่าค่าที่ได้จากวิธีเชิงตัวเลขจะมีความคลาดเคลื่อนจากผลเฉลยแม่นยำตรงประมาณ 0.5% ทั้งในส่วนของคุณค่าเลขนัสเซลและค่าตัวประกอบเสียดทาน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้โดยวิธีเชิงตัวเลขทั้งมีความสอดคล้องกันกับผลเฉลยแม่นยำตรงอย่างดีและมีความน่าเชื่อถือได้

สำหรับการไหลในท่อกลมนี้ โดเมนที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยเป็นเอลิเมนต์รูปทรงสี่เหลี่ยมและแบ่งกริดแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid) โดยความละเอียดที่บริเวณใกล้ผิวท่อมีมากกว่า



(a)



(b)

รูปที่ 2 การตรวจสอบความถูกต้องของ (a) เลขนัสเซล (b) ตัวประกอบเสียดทานของท่อผิวเรียบ

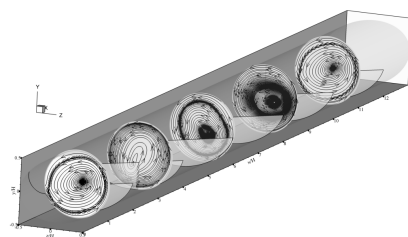
ทำการเปรียบเทียบผลเฉลยโดยใช้จำนวนกริดที่แตกต่างกัน 4 ค่า คือ 40000, 80000, 160000 และ 320000 การการเปรียบเทียบผล

พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนจาก 80000 จนถึง 320000 ค่าเลขนัสเซลและตัวประกอบเสียดทานมีค่าแตกต่าง

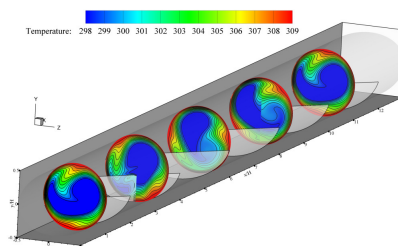
กันน้อยกว่า 0.7% ดังนั้นจึงเลือกใช้กริดจำนวน 80000 เพื่อศึกษาโครงสร้างการไหลในท่อกลม

3.2 พฤติกรรมการไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อน

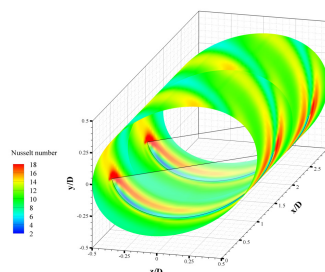
รูปที่ 3 แสดงโครงสร้างการไหลและพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนสำหรับแผ่นกั้นที่ติดตั้งด้านเดียว หรือแถวเดียวมีมุมปะทะ 45° ที่ค่าสัดส่วน $FAR = 0.6$ และ $Re = 600$ จากรูปที่ 3(a) พบว่าโครงสร้างการไหลสำหรับแผ่นกั้นที่ติดตั้งแถวเดียวจะเกิดแกนการหมุนหลักเพียง 1 แกนเท่านั้น โดยที่จุดศูนย์กลางสำหรับแกนการไหลหลักมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเพียงเล็กน้อยเมื่อพิจารณาแต่ละระนาบ และเมื่อพิจารณาค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในรูปของสนามอุณหภูมิที่ระนาบขวางการไหลดังรูปที่ 3(b) พบว่า ที่บริเวณกึ่งกลางของท่อ ยังแสดงให้เห็นถึงสนามอุณหภูมิที่เป็นสีฟ้า แสดงว่าเกิดการผสมผสานระหว่างอากาศบริเวณกึ่งกลางท่อและผิวท่อได้ไม่ดีนัก และเมื่อพิจารณาสนามเลขนัสเซลในรูปที่ 3(c) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกระจายเป็นไปอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งผิวท่อ แต่ในส่วนของหลังแผ่นกั้นจะมีแถบสีแดงปรากฏขึ้นเพียงเล็กน้อย



(a)

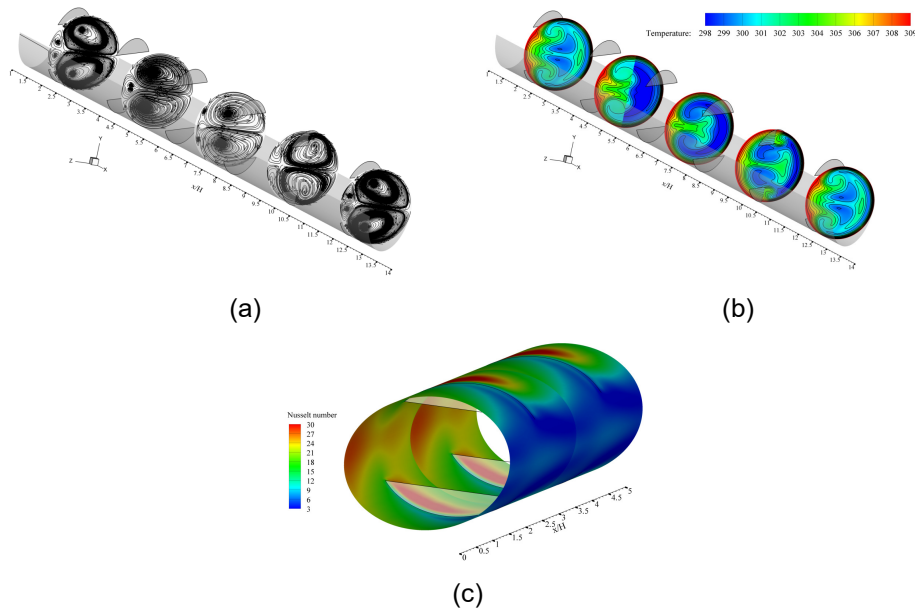


(b)



(c)

รูปที่ 3 พฤติกรรมการไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อนสำหรับแผ่นกั้นติดตั้งแถวเดียว (a) โครงสร้างการไหลในระนาบขวางการไหล (b) สนามอุณหภูมิ (c) สนามเลขนัสเซล สำหรับ $FAR = 0.6$, $Re = 600$

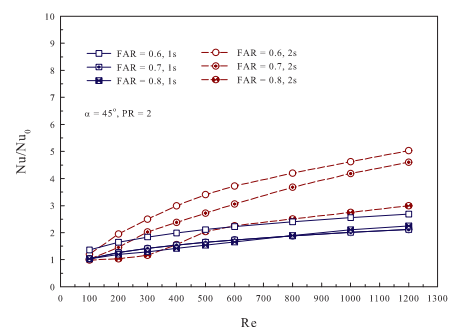


รูปที่ 4 พฤติกรรมการไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อนสำหรับแผ่นกันติดตั้งสองแถวในทิศทางตรงข้าม (a) โครงสร้างการไหลในระนาบขวางการไหล (b) สนามอุณหภูมิ (c) สนามเลขนัสเซล สำหรับ $FAR = 0.6$, $Re = 600$

สำหรับพฤติกรรมการไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อนของแผ่นกันที่มีการติดตั้งสองแถวแสดงดังรูปที่ 4 เมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างการไหลสำหรับกรณีการจัดวางสองแถวซึ่งแสดงดังรูปที่ 4(a) จะเห็นได้ว่าการเกิดการหมุนวนหลักสองแกนโดยมีลักษณะสมมาตรกันและเกิดการหมุนวนย่อย ๆ อีก 2 วง ซึ่งแกนการหมุนวนหลักจะเปลี่ยนตำแหน่งไปตามแต่ละระนาบ เมื่อพิจารณาถึงค่าการถ่ายเทความร้อนสำหรับการติดตั้งแผ่นกันแบบสองแถวในรูปของสนามอุณหภูมิดังรูปที่ 4(b) จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ผิวท่อกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางของท่อเกิดการผสมผสานกันได้ดีกว่าการติดตั้งแบบแถวเดียว และเมื่อพิจารณาในรูปของสนามเลขนัสเซลแสดงดังรูป 4 (c) พบว่าการกระจายตัวของเลขนัสเซลไม่สม่ำเสมอ โดยจะมีความแตกต่างของค่าเลขนัสเซลมากกว่าการติดตั้งเพียงแถวเดียว จะเห็นได้ชัดเจนว่าแถบด้านหนึ่งของท่อแสดงเป็นแถบสีฟ้าซึ่งให้ค่าเลขนัสเซลที่มีค่าน้อย

รูปที่ 5 แสดงค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลกับเลขเรย์โนลด์สำหรับแผ่นกันวางเอียงแบบแถวเดียวและสองแถว ที่ค่า FAR ต่าง ๆ จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลก็จะเพิ่มขึ้น

ด้วย และเมื่อค่า FAR เพิ่มขึ้นค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลจะมีค่าลดลง ค่า $FAR = 0.6$ จะให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลมากที่สุดโดยมีทั้งกรณีวางแบบแถวเดียวและสองแถว โดยการติดตั้งแบบสองแถวจะให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลมากกว่าแบบแถวเดียวทุกค่า FAR โดยมีความมากกว่าอยู่ในช่วง 50–150% ที่ $FAR = 0.6$ ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลเท่ากับ 5 และ 2 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า สำหรับ การติดตั้งแบบสองแถวและแถวเดียวตามลำดับ

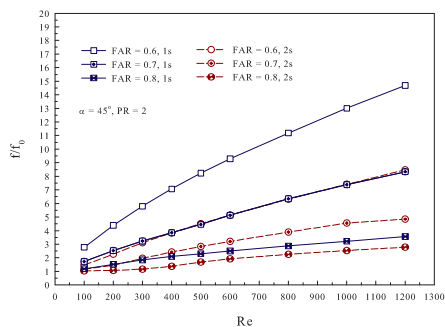


รูปที่ 5 การแปรเปลี่ยนของค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกันวางเอียงทำมุมปะทะ 45° ที่ค่า FAR ต่าง ๆ

3.3 การสูญเสียความดัน

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่ค่า FAR ต่าง ๆ

ซึ่งเมื่อพิจารณาช่วงเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 100 ถึง 1200 พบว่าค่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นตาม และเมื่อทำการเพิ่มค่า FAR ทำให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าลดลง กรณีแผ่นกั้นวางเอียงทำมุมปะทะ 45° ที่ $FAR = 0.6$ มีอัตราการเพิ่มค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงที่สุด และพบว่าการติดตั้งแบบสองแถวในทิศทางตรงข้ามกันให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากกว่าแบบแถวเดียว โดยให้ค่าเป็น 15 และ 7.5 เท่าของท่อผิวเรียบ สำหรับการติดตั้งแบบสองแถวและแบบแถวเดียวตามลำดับ จากการสรุปได้ว่าการติดตั้งแผ่นกั้นทำมุม โดยมีค่า $FAR = 0.6-0.8$ จะให้ค่าตัวประกอบเสียดทานอยู่ในช่วง 1-15 เท่าเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ

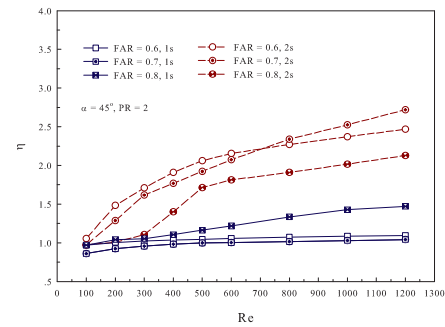


รูปที่ 6 การแปรเปลี่ยนของค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นวางเอียงทำมุมปะทะ 45° ที่ค่า FAR ต่าง ๆ

3.4 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 7 แสดงความแปรเปลี่ยนค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ค่าเลขเรย์โนลด์ต่าง ๆ ของท่อติดตั้งแผ่นกั้นทำมุม โดยมีค่า $FAR = 0.6-0.8$ พบว่าค่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของสมรรถนะเชิงความร้อนในช่วงเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณา

โดยค่า $FAR = 0.7$ กรณีการติดตั้งแบบสองแถวในทิศทางตรงกันข้ามจะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงที่สุดที่ทำการพิจารณา โดยมีค่าเท่ากับ 2.6 ที่ค่าเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1200 ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จากการติดตั้งแผ่นกั้นที่มี $FAR = 0.6-0.8$ จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.6-2.6



รูปที่ 7 การแปรเปลี่ยนของค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นวางเอียงทำมุมปะทะ 45° ที่ค่า FAR ต่าง ๆ

4. สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นวางเอียงแบบทำมุมปะทะ 45° ที่อัตราส่วนระยะพิทท์เท่ากับ 2 และค่า $FAR = 0.6-0.8$ มีการติดตั้งแบบแถวเดียวและสองแถวในทิศทางตรงข้ามกัน พบว่าการติดตั้งแบบสองแถวจะให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมที่มากกว่าการจัดวางเพียงแถวเดียวในทุกค่า FAR และพบว่าที่ค่า $FAR = 0.6$ จะให้ค่าอัตราการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมมากที่สุด

ค่าอัตราการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสำหรับกรณีที่ทำการศึกษาอยู่ในช่วง 100-500% และให้ค่าความดันตกคร่อมเพิ่มมากกว่าท่อเปล่าเท่ากับ 1-15 เท่า พบว่าค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 2.6 สำหรับการจัดวางแบบสองแถวที่ค่า $FAR = 0.7$ และ $Re = 1200$

ถึงแม้ว่าการจัดวางแบบสองแถวจะให้ค่าอัตราการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าการจัดวางเพียงด้านเดียว แต่สำหรับงานที่ต้องการความดันตกคร่อมที่มีการค่าน้อยควรเลือกชิ้นงานที่มีการติดตั้งเพียงด้านเดียวซึ่งให้ค่าความดันตกคร่อมที่น้อยกว่า นอกจากนี้ยังให้ค่าการกระจายเลขนัสเซลที่สม่ำเสมอที่ผิวท่อมากกว่าการติดตั้งเพียงด้านเดียวอีกด้วย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Promvonge, P. and Thianpong, C., Thermal performance assessment of turbulent channel flow over different shape ribs, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, vol. 35(10) (2008), pp.1327–1334.
- [2] Ridouane, E.H. and Campo, A., Heat transfer enhancement of air flowing across grooved channels: joint effects of channel height and groove depth, *ASME J. Heat Transfer*, vol.130(2) (2008), 021901.
- [3] Chompookham, T., Thianpong, C., Kwankaomeng, S. and Promvonge, P., Heat transfer augmentation in a wedge-ribbed channel using winglet vortex generators, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, vol. 37(2) (2010), pp.163-169.
- [4] Sripattanapipat, S. and Promvonge, P., Numerical analysis of laminar heat transfer in a channel with diamond-shaped baffles, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, vol.36(1) (2009), pp.32-38.
- [5] Han, J.C., Zhang, Y.M. and Lee, C.P., Augmented heat transfer in square channels with parallel, crossed and V-shaped angled ribs, *ASME J. Heat Transfer*, vol.113 (1991), pp.590–596.
- [6] Han, J.C., Zhang, Y.M. and Lee, C.P., Influence of surface heat flux ratio on heat transfer augmentation in square channels with parallel, crossed, and V-shaped angled ribs, *ASME J. Turbomachinery*, vol.114 (1992), pp.872–880.
- [7] Murata, A. and Mochizuki, S., Comparison between laminar and turbulent heat transfer in a stationary square duct with transverse or angled rib turbulators, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol.44 (2001), pp.1127–1141.
- [8] Hans, V.S., Saini, R.P. and Saini, J.S., Performance of artificially roughened solar air heaters—A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.13 (2009), pp.1854–1869.
- [9] Varun, Saini, R.P. and Singal, S.K., A review on roughness geometry used in solar air heaters, *Solar Energy*, vol.81 (2007), pp.1340–1350.
- [10] Patankar, S.V., Liu, C.H., and Sparrow, E.M., 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.
- [11] Berner, C., Durst, F. and McEligot, D.M., Flow around baffles, *Trans. ASME J. Heat Transfer*, vol.106 (1984), pp.743–749.
- [12] Webb, B.W. and Ramadhyani, S., Conjugate heat transfer in a channel with staggered ribs, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol.28 (1985), pp.1679–1687.
- [13] Kelkar, K.M. and Patankar, S.V., 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.
- [14] Lopez, J.R., Anand, N.K., and Fletcher, L.S., Heat transfer in a three-dimensional channel with baffles, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol.30 (1996), pp.189–205.
- [15] Guo, Z. and Anand, N.K., Three-dimensional heat transfer in a channel with a baffle in the entrance region, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 31(1) (1997), pp.21–35.
- [16] Patankar, S.V. (1980). Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, *McGraw-Hill*, New York.
- [17] Incropera, F. and Dewitt, P.D. (1996), Introduction to heat transfer, 3rd edition John Wiley & Sons Inc.