การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อกลมที่ใส่แผ่นกั้น

รูปเกือกม้าวางเอียง 20°

Numerical Heat Transfer Study in a Circular Tube with 20° Inclined Horseshoe Baffles

สมบัติ ทำนา^{1,*} และ พงษ์เจต พรหมวงศ์²

¹ห้องปฏิบัติการวิจัยคณิตศาสตร์ประยุกต์และกลศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น 1771/1 ซอยพัฒนาการ 37 ถนนพัฒนาการ เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250 ²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาคกระบัง 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง เขตลาคกระบัง กรุงเทพฯ 10520 *E-mail: sombat_ae@tni.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาเชิงตัวเลขเกี่ยวกับคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหลเป็นคาบ แบบปั่นป่วนในท่อกลมที่มีฟลักซ์ความร้อนที่ผนังท่อคงที่มีการใส่แผ่นกั้นรูปเกือกม้าวางเอียงทำมุมปะทะคือ α=20° โดยแผ่นกั้นมีอัตราส่วนการปิคกั้นการไหล (BR=b/D) หนึ่งค่าเท่ากับ 0.2 และอัตราส่วนระยะพิตช์ได้เปลี่ยนแปลงหกค่า (PR=p/D=0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5 และ 2.0) ในการคำนวณใช้วิธีปริมาตรสืบเนื่องและอัลกอริธึมแบบ SIMPLE ค่าเลขเรย์โนลดส์ที่ใช้มีค่าตั้งแต่ 4000 ถึง 20,000 อิทธิพลของอัตราส่วนระยะพิตช์ต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและ การไหลที่ได้จากการคำนวณพบว่า ท่อกลมที่มีการใส่แผ่นกั้นรูปเกือกม้าวางเอียงจะถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าท่อกลมที่ไม่ใส่ แผ่นกั้น การลดลงของอัตราส่วนระยะพิตช์ทำให้ค่าเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น ในทุกแผ่นกั้นรูปเกือกม้า วางทำมุมเอียงที่ใช้ในการศึกษา พบว่ากรณี PR=0.5 ให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TEF) สูงสุดเท่ากับ 2.03 ที่เลขเรย์โนลดส์ต่ำสุด

ABSTRACT

The research presents a numerical investigation on turbulent periodic flow and heat transfer characteristics in an isothermal-flux tube fitted with inclined horseshoes baffles. The horseshoe baffle elements with a single inclination angle of α =20° were inserted periodically into the test tube at a single flow blockage ratio, BR=*b*/*D*=0.20 and six different baffle-pitch ratios (PR=*p*/*D*=0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5 and 2.0). The computations based on the finite volume method with the SIMPLE algorithm have been conducted for the fluid flow in terms of Reynolds numbers ranging from 4000 to 20,000. Effects of the baffle-pitch ratios on heat transfer and flow characteristics in the test tube are examined. It is found that the heat transfer in the tube with inclined horseshoes baffles is more effective than that with no baffle. The decrease in the baffle-pitch ratios, PR leads to a considerable increase in the Nusselt number and friction factor. The computational result reveals that the maximum value of the thermal enhancement factor, TEF is found to be 2.03 for using the baffles with PR=0.5 at the lowest Reynolds number.

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ด้วยการเพิ่มครีบในท่อที่ให้ความร้อนบริเวณผิวด้านบน เพียงด้านเดียว โดยคิดการถ่ายเทความร้อนแบบเป็นคาบ ใด้มีการศึกษาทั้งในส่วนของการใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลข และทำการทดลองจริง โดยงานวิจัยที่ผ่านมามีดังนี้ Hans et al. [8] และ Varun et al. [9] ศึกษาการใหลแบบเป็น คาบสำหรับการใหลที่มีการพัฒนาเต็มที่แล้ว โดยใช้วิธี คำนวณเชิงตัวเลขในส่วนของพฤติกรรมการใหลและการ ถ่ายเทความร้อนในท่อทั้งการไหลแบบราบเรียบและการ ใหลแบบปั่นป่วนของ Patankar et al. [10] Webb และ Ramadhyani [11] ได้นำเอาหลักของการไหลแบบเป็น คาบของการใหลที่พัฒนาเต็มที่แล้ว ซึ่งได้มีการศึกษาไว้ จากอ้างอิงที่ [10] ทำการศึกษาด้วยวิธีการคำนวณเชิง ตัวเลขของการใหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อผิวเรียบ และท่อที่ติดตั้งแผ่นกั้นแบบวางเยื้อง Kellar และ Patankar [12] ศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนใน ท่อขนานที่ติดตั้งแผ่นกั้นในลักษณะการจัดวางแบบเยื้อง พบว่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่ม ความสูงของแผ่นกั้น รวมถึงการลดระยะห่างระหว่างแผ่น กั้น Lopez et al. [13] คำนวณเชิงตัวเลขแบบสามมิติของ การใหลแบบเป็นคาบที่มีการพัฒนาการใหลเต็มที่สำหรับ การพาความร้อนแบบบังคับของการใหลแบบราบเรียบ โดยให้ความร้อนบริเวณผนังด้านบนและด้านล่างเป็น แบบฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ ต่อมา Promvonge และ คณะ [14-17] ศึกษาเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อน และการใหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสติคแผ่นกั้นยาวต่อเนื่อง ้วางทำมมต่างๆ ทั้งที่ผนังหนึ่งด้านและสองด้าน พบว่าแผ่น กั้นมุมปะทะ 30° ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูง ที่สุด งานวิจัยต่อมาของ Promvonge และคณะ [18] พบว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดกรีบบางรูปตัววีแยกส่วนทำ มมปะทะ 60° ที่ผนังทั้งสองด้านวางแนวตรงกัน ทราบว่า เกิดการไหลแบบคาบและมีโปรไฟล์ทางความร้อนเป็น คาบอย่างสมบูรณ์ ที่ระยะจากทางเข้าประมาณ x/D=7-10 นอกจากศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในท่อ สี่เหลี่ยมงตุรัสแล้ว Promvonge และคณะ [19] ก็ได้

1. บทนำ

้ปัจจบันการใช้พลังงานมีแนวโน้มที่สงขึ้น การเพิ่ม ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นสิ่งที่จำเป็น อย่างยิ่ง โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้ในในอุปกรณ์ด้าน อุตสาหกรรมต่าง ๆ ดังนั้นจึงได้มีการนำวิธีการต่าง ๆ เพื่อ เป็นการเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนและเพิ่มสมรรถนะ การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ตัวอย่างเทคนิคที่ใช้กันอย่าง แพร่หลาย คือ การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยอาศัยการ ติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนวนหรือตัวสร้างการไหลแบบ ปั่นป่วน เช่น ครีบ [1] แผ่นขรุงระหรือผิวท่อที่มีการเซาะ ร่อง [2] ปีก [3] และแผ่นกั้น [4] โดยตัวสร้างการใหล ้ ปั่นป่วนนี้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นการก่อกวนการไหลทำให้ เกิดการหมนวนของการไหลตามแนวยาวและเพิ่มการผสม ให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งวิธีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนนี้ได้มีการ นำมาประยุกต์ใช้ทางด้านวิศวกรรมในสายงานต่าง ๆ เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัครัด เครื่องอ่นอากาศ พลังงานแสงอาทิตย์ และแผงระบายความร้อนของอปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์

ระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นระบบที่สำคัญ สำหรับโรงงานอตสาหกรรมต่าง ๆ ดังนั้นจึงได้มีความ สนใจในการศึกษาในส่วนของการเพิ่มการแลกเปลี่ยน ความร้อนและพฤติกรรมการใหลรวมถึงความดันสูญเสียที่ เกิดขึ้น โดยมีการศึกษาทั้งในส่วนของการทดลองและใน ส่วนของวิธีเชิงตัวเลขหรือการใช้แบบจำลองทาง ู กณิตศาสตร์เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้น Han et al. [5, 6] ทำการศึกษาเชิงทดลองเพื่อหาค่าการถ่ายเท ความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตรัสที่มีการติดครีบทำมุมบน ผนังท่อทั้งสองด้าน โดยมีค่า L/b=10 และ b/D=0.0625 จากการทดลองพบว่า ครีบทำมุมและครีบรูปตัววีให้การ ถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น Murata และ Mochizuki [7] ทำการศึกษาเชิงตัวเลขโดยการจำลองแบบลาร์จเอดดี้ (LES) ของการถ่ายเทความร้อนในท่อเหลี่ยมติดครีบ ทำมุม 60° ซึ่งมีค่า b/D=0.1, L/b=10 จากผลการจำลอง พบว่า การเพิ่มครีบในลักษณะดังกล่าวสามารถเพิ่มการ ถ่ายเทความร้อนได้

์ศึกษาเชิงทคลองการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนใน

ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อกลมที่ใส่แผ่นวงแหวน

วอร์เทกซ์เอียงมุมปะทะ 30° พบว่า ที่ค่า BR=0.2 ให้ค่า การถ่ายเทความร้อนมากสุด แต่อย่างไรก็ตามความ

เสียดทานก็ยังสูงมากสุดตาม และพบว่าก่าตัวประกอบการ เพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TEF) มากสุดประมาณ 1.4 ที่

BR=0.1, PR=0.5 เพื่อลดความเสียดทานที่เกิดขึ้นจาก การไหลผ่านแผ่นวงแหวนเอียงจึงได้ปรับปรงมาเป็นแผ่น

้กั้นรูปเกือกม้าเอียง [20] โดยทคลองหาอิทธิพลของ

ระยะห่าง และความสูงของแผ่นกั้นรูปเกือกม้าที่มุมปะทะ

20° และ 45° พบว่ามุมปะทะ 20° ให้ค่า TEF มากที่สุด

ใหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อลักษณะต่าง ๆ โดยการ

เพิ่มครีบหรือแผ่นกั้นทั้งในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส และท่อกลม

แต่การศึกษาเชิงตัวเลขที่ใส่แผ่นกั้นมีลักษณะเป็นแผ่นแบบ

บางโดยเฉพาะแผ่นกั้นรูปเกือกม้าที่มีการติดตั้งแบบทำมุม

ในท่อกลมยังไม่ได้มีรายงาน ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอ

การคำนวณเชิงตัวเลขซึ่งใช้ซอฟต์แวร์ ANSYSFLUENT

เวอร์ชัน 14.5 ในการจำลองพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน

และการใหลแบบปั่นป่วน 3 มิติ โคยพิจารณาลักษณะ

การใหลเป็นคาบในท่อกลมที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นรูปเกือก

ม้ำวางเอียง α=20°, BR=0.2 ที่มีค่า PR แตกต่างกัน เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาแผ่นกั้นเอียงที่มุม α=20° ให้ค่า

้จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาพฤติกรรมการ

ประมาณ 1.92 ที่ BR=0.1. PR=0.5 ตามลำดับ

ความเสียดทานน้อยสุด และ BR=0.2 ให้ค่าการถ่ายเท ความร้อนสูง แต่อย่างไรก็ตามความเสียดทานก็สูงมากตาม งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาอัตราส่วนระยะพิตช์, PR เพื่อลด ความเสียดทานที่เกิดขึ้น ซึ่งให้ได้สมรรถนะการเพิ่มการ ถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้น และเพื่อศึกษาดูพฤติกรรมการ ไหลที่เกิดขึ้น

แบบจำลองและสมการทางคณิตศาสตร์ เรขาคณิตท่อที่ติดตั้งแผ่นกั้นรูปเกือกม้าวางเอียง

การศึกษาได้ทำการสร้างแบบจำลองของท่อกลมที่ ดิดตั้งแผ่นกั้นรูปเกือกม้าวางเอียง ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่ง แผ่นกั้นมีก่าอัตราส่วนระยะห่างของแผ่นกั้นต่อเส้น ผ่านศูนย์กลางท่อ (*p/D*) หรืออัตราส่วนระยะพิตช์, PR=0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ วาง เอียงทำมุมปะทะ, α=20° และมีก่าอัตราส่วนกวามสูง แผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (*b/D*) หรือก่าอัตราส่วน การกั้นการไหลกงที่หนึ่งก่า, BR=0.2 เส้นผ่านศูนย์กลาง ของท่อกลมในแบบจำลองนี้มีก่าเท่ากับ *D*=0.05 m ระยะ ช่องว่างระหว่างแผ่นกั้นกับผนังท่อเท่ากับ 1 mm ส่วนตรง ฐานของแผ่นกั้นมีก่า *e*=0.05*D* ซึ่งการกำนวนได้พิจารณา การไหลเป็นกาบ (periodic) ที่ช่วงเลขเรย์โนลดส์ 4000 ถึง 20,000



รูปที่ 1 ท่อกลมที่ใส่แผ่นกั้นรูปเกือกม้าวางเอียง และ โดเมนที่ใช้ในการกำนวณ โดยคิดการไหลแบบคาบ

32

2.2 สมการทางคณิตศาสตร์

การพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลของ ของไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อกลม มีสมมติฐาน ต่าง ๆ ดังนี้

- ของใหลมีการถ่ายเทความร้อนและใหลแบบคงตัว 3 มิติ
- การไหลเป็นแบบปั่นป่วนและอัคตัวไม่ได้
- คุณสมบัติของของใหลคงที่
- ไม่คำนึงแรงวัตถุและการสูญสลายเนื่องจากความหนืด
- ไม่คำนึงการแผ่รังสีความร้อน

จากสมมติฐานข้างต้น สำหรับการใหลในท่อกลม สมการหลักประกอบไปด้วยสมการอนุรักษ์มวล สมการ อนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน สามารถ เขียนในรูปเทนเซอร์และระบบพิกัดการ์ทีเซียนได้ดังนี้ สมการอนุรักษ์มวล

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

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial x_{j}} \left(\rho u_{i} u_{j} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x_{i}} + \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[\mu \left(\frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} - \rho \overline{u_{i} u_{j}} \right) \right]$$
(2)

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล และ *u_i* คือ องก์ประกอบความเร็วเฉลี่ยในทิศทาง *x*_i, *P* คือ ความดัน, μ คือ ความหนืดจลน์ และ *u_i* คือ องก์ประกอบความเร็วที่ ผันแปรหรือแกว่งไปมาในทิศทาง *x*_i

สมการอนุรักษ์พลังงาน

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

เมื่อ Γ และ Γ_t คือ การแพร่ทางความร้อนและการแพร่ทาง ความร้อนแบบปั่นป่วนตามลำดับ โดย $\Gamma = \mu/Pr$ และ $\Gamma_t = \mu_t/Pr_t$

การใหลแบบปั่นป่วน เทอมความเก้นเรย์โนลดส์ –ρu_iu_j ในสมการที่ (2) จากข้อสมมติฐานของ Boussinesq ความเค้นเรย์โนลคส์จะมีความสัมพันธ์กับเกรเคียนต์ของ ความเร็วเฉลี่ย ดังสมการที่ (4)

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (4)$$

เมื่อ k คือ พลังงานจลน์ปั่นป่วน หาใด้จาก $k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i}$, และ δ_{ij} คือ เดลต้าโครเนกเกอร์ μ_i คือ ความหนืดปั่นป่วน นิยามเป็น $\mu_i = \rho C_{\mu} k^2 / \epsilon$

แบบจำลองการไหลปั่นป่วน RNG k-ะ เป็นแบบจำลองที่ พัฒนามาจากการใช้วิธีเชิงสถิติอย่างแม่นยำ (ซึ่งเรียกว่า ทฤษฎี Renormalization group, RNG) โดยสมการ การเคลื่อนย้ายของแบบจำลอง RNG k-ะ สามารถแสดง ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon$$
 (5)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_{\varepsilon} \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k$$

$$- C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_{\varepsilon}$$
(6)

เมื่อ $\mu_{eff} = \mu + \mu_t = \mu + \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\epsilon}$ คือ ค่าของความหนืด ประสิทธิผล ส่วนค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ใช้ในสมการข้างต้นดังนี้ $\alpha_k = \alpha_{\epsilon} = 1.39, C_{\mu} = 0.0845, C_{1\epsilon} = 1.42$ และ $C_{2\epsilon} = 1.68$

การดิสเครทไทซ์สมการหลักทั้งหมดจะทำด้วยวิธี ผลต่างควอดราติค (QUICK) แล้วทำการกำนวณหาผล เฉลยตามระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง [21] ด้วยอัลกอริธึม แบบ SIMPLE และใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วน RNG k - E ในการกำนวณเชิงตัวเลข และทุกตัวแปรจะ พิจารณาการลู่เข้าหากำตอบที่ความแตกต่างของค่าการ แปรเปลี่ยนน้อยกว่า 10⁻⁵ ยกเว้นค่าสมการพลังงานซึ่ง พิจารณาที่น้อยกว่า 10⁻⁹

การศึกษานี้มีตัวแปรที่ให้ความสนใจอยู่ 4 ตัวแปร คือ เลขเรย์โนลคส์ ตัวประกอบเสียคทาน เลขนัสเซิลท์ และตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TEF) ซึ่งค่า เลขเรย์โนลดส์นิยามโดย

$$\operatorname{Re} = \rho u_0 D / \mu \tag{7}$$

ตัวประกอบเสียดทาน, f คำนวณได้จากความคันตกคร่อม, ΔP ตลอดช่วงความยาวคาบของท่อกลม, L

$$f = \frac{(\Delta P/L)D}{2\rho u_0^2} \tag{8}$$

้ ก่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ตำแหน่งใด ๆ h_x หาได้ จากกฏการเย็นตัวของนิวตัน กำหนดโดย

$$h_x = \frac{q_s}{(T_s - T_b)} \tag{9}$$

เมื่อ $q_{
m s}$ คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวท่อ ส่วน $T_{
m s}$ คืออุณหภูมิที่ ผิวท่อ และ $T_{
m b}$ คือ อุณหภูมิบัลค์

เลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ หรือเลขนัสเซิลท์ที่ตำแหน่งใดๆ คือ ตัวแทนการถ่ายเทความร้อนซึ่งอยู่ในรูปไร้หน่วยที่ ตำแหน่งใดๆ แสดงดังสมการ

$$Nu_x = \frac{h_x D}{k_a} \tag{10}$$

เมื่อ k_a คือ ค่าการนำความร้อนของอากาศ ค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ย สามารถคำนวนได้จาก

$$Nu = \frac{1}{A} \int Nu_x dA \tag{11}$$

ค่าตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน, TEF สามารถ หาได้จากสมการ

$$TEF = (Nu / Nu_0) / (f / f_0)^{1/3}$$
(12)

เมื่อ Nu₀ และ *f*₀ คือ เลงนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียด ทานของท่อผิวเรียบ ตามลำดับ

แบบจำลองสำหรับการใหลในท่อกลมนี้ โคเมนที่ทำ การคำนวณใช้เอลิเมนต์รูปทรงสี่เหลี่ขมและแบ่งกริดแบบ ใม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid) การหาจำนวนกริดที่ ไม่มีผลกระทบต่อคำตอบหรือกริดอิสระ ได้ทำการ เปรียบเทียบคำตอบโดยใช้จำนวนของกริดที่แตกต่างกัน หลายก่า ตั้งแต่จำนวนกริด 100,000-300,000 พบว่า จำนวนกริดตั้งแต่ 240,000 ขึ้นไปให้ก่าเลขนัสเซิลท์ เปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 1.5% และใช้เวลาในการกำนวณ น้อยกว่าจำนวนกริดที่มากกว่า จึงเลือกจำนวนกริดเท่า 240,000 ไปใช้ในการศึกษาก่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อไป **2.3 เงื่อนไขขอบเขต**

พิจารณาทางเข้าและทางออกของโคเมนที่ใช้คำนวณ เป็นแบบคาบ (periodic translation) สมมติอากาศที่ 300 K และเลขพรานค์ 0.707 ใหลเข้าด้วยอัตราการใหล เชิงมวลคงที่ รูปร่างความเร็วทางเข้าและทางออก เหมือนกัน คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศลงที่ โดย อ้างอิงจากอุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้า ผนังท่ออยู่กับที่ (stationary wall) ที่ผนังท่อไม่มีการลื่นใถล (no-slip conditions) หรือความเร็วของของใหลที่ผนังท่อมีค่า เท่ากับสูนย์ กำหนดให้ที่ผนังของท่อกลมมีค่าฟลักซ์ ความร้อนคงที่เท่ากับ 600 W/m² และสมมติให้แผ่นกั้น ใม่มีการถ่ายเทความร้อนโดยกำหนดให้แผ่นกั้นเป็นฉนวน

3. ผลการคำนวณและวิจารณ์

3.1 การพิสูจน์ความถูกต้องของผลการคำนวณ

ในการพิสูจน์ความถูกต้องของการถ่ายเทความร้อน และตัวประกอบเสียดทานในท่อกลมที่มีการติดตั้งแผ่นกั้น รูปเกือกม้าวางเอียงดังรูปที่ 2 โดยทำการเปรียบเทียบ ระหว่างก่าที่ได้จากวิธีคำนวณเชิงตัวเลขกับผลจากการ ทดลองท่อกลมที่ติดแผ่นกั้นรูปเกือกม้าวางเอียงทำมุม ปะทะ 20°, BR=0.2, PR=0.5 ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน โดยรายละเอียดการทดลองสามารถดูได้จาก [20] พบว่า ก่าเลขนัสเซิลท์และก่าตัวประกอบเสียดทานที่ได้จาก วิธีการกำนวณเชิงตัวเลขมีความสอดกล้องกันดีกับผลที่ได้ จากการทดลอง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีกำนวณเชิงตัวเลขจะ มีความกลาดเคลื่อนจากผลการทดลองประมาน 4.7 และ 11.8% ตามลำดับ จึงมั่นใจได้ว่าผลการกำนวณเชิงตัวเลข



ร**ูปที่ 2** การพิสูงน์ความถูกต้องของเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียดทานในท่อกลมที่ติดแผ่นกั้นรูปเกือกม้าวางเอียง

3.2 โครงสร้างการใหล

การไหลในท่อกลมที่ติดตั้งแผ่นกั้นรูปเกือกม้าวาง เอียงทำมุมปะทะ 20°, Re=8000, BR=0.2 โดยมีค่า PR=0.5 และ 1.0 ดังรูปที่ 3 ซึ่งแสดงเส้นกระแสการไหล ผ่านแผ่นกั้นรูปเกือกม้าวางเอียง พบว่าแผ่นกั้นจะทำให้เกิด การไหลหมุนวน เมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นกั้นจะเกิดการ หมุนวนที่ด้านหลังของแผ่นกั้นและเกิดการกระแทกของ กระแสการไหลที่บริเวณผนังของท่อ โดยเฉพาะบริเวณ ใกล้ด้านหน้าของแผ่นกั้นที่จะมีการเหนี่ยวนำทำให้เกิดการ กระแทกของกระแสซึ่งส่วนนี้เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิด การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยแกนการ ใหลจะมีการ เปลี่ยนตำแหน่งแตกต่างกันออก ไปดังรูปที่ 3 กรณี PR=0.5 เกิดการ ใหลหมุนวน โดยมีบริเวณเกิดการ กระแทกที่ผนังท่อถื่กว่าที่ PR=1.0 จึงทำให้กรณีติดตั้ง แผ่นกั้นรูปเกือกม้าวางเอียงที่ก่า PR น้อยกว่าให้ก่าการ ถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่ากรณีก่า PR ที่มากกว่า



รูปที่ 3 เส้นกระแสการ ใหลบนระนาบขวาง ในท่อกลมที่ Re=8000, BR=0.2

BR=0.2 ที่ค่า PR=0.5 และ 1.0 แสดงในรูปที่ 4 ซึ่ง พบว่าบริเวณชั้นชิดผิวกวามร้อนจะบางกว่ากรณีท่อ ผิวเรียบที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวน ซึ่ง

3.3 การถ่ายเทความร้อน

คอนทัวร์หรือการกระจายของสนามอุณหภูมิสำหรับ แผ่นกั้นรูปเกือกม้าวางเอียงมุมปะทะ 20°, Re=8000,

มากขึ้น โดยบริเวณกอนทัวร์สีแดงจะเป็นส่วนที่มีการเกิด การกระแทกของกระแสการไหลมากที่สุด ซึ่งส่งผลให้ค่า อัตราการถ่ายเทความร้อนซึ่งอยู่ในรูปของเลขนัสเซิลท์มีค่า มากกว่าบริเวณอื่น ๆ และพบว่า ค่า PR มากขึ้นความแรง ของการไหลกระแทกก็จะน้อยลงส่งผลให้ค่าเลขนัสเซิลท์ น้อยลง เพราะแผ่นกั้นดิดตั้งที่ระยะห่างมากขึ้นจะเกิดการ เหนี่ยวนำให้เกิดการไหลหมุนวนกระแทกได้น้อยกว่า

การแปรเปลี่ยนของอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์, Nu/Nu₀ กับค่าอัตราส่วนระยะพิตช์, PR ของแผ่นกั้นรูป เกือกม้าวางเอียงทำมุมปะทะ 20°, BR=0.2 ที่ก่า Re ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6a จากกราฟพบว่าก่า Nu/Nu₀ มีก่า ลดลง เมื่อก่า Re มีก่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อลดก่า PR ลง จะส่งผลให้ก่า Nu/Nu₀ เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแผ่นกั้นมี ระยะห่างที่น้อยจึงสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลหมุน วนกระแทกที่ผนังท่อได้มากกว่ากรณีที่ PR มีก่ามากกว่า โดยที่ PR=0.5 ให้ก่า Nu/Nu₀ มากที่สุด สำหรับทุกก่า PR ที่ได้ทำการศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลดส์ 4000-20,000 พบว่าก่า Nu/Nu₀ จะมีก่าอยู่ในช่วง 1.8-4.4 เท่า เมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ

แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งแผ่นกั้นรูปเกือกม้าวางเอียงจะทำ ให้เกิดการก่อกวนบริเวณชั้นชิดผิว ซึ่งส่งผลให้การถ่ายเท กวามร้อนระหว่างอากาศและผนังท่อมีอัตราที่สูงขึ้น โดย การถ่ายเทความร้อนจะดีตรงบริเวณผนังด้านข้างระหว่าง แผ่นกั้น เพราะเป็นบริเวณที่กระแสการไหลถูกเหนี่ยวนำ ให้ไหลกระแทกที่ผนังท่อ ทำให้ชั้นชิดผิวความร้อนบางลง ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่สูง โดยกรณี PR=0.5 มีชั้นชิดผิวความร้อนที่บางบริเวณผนังด้านข้างท่อจำนวน มากกว่าที่ PR=1.0 จึงทำให้กรณีติดตั้งแผ่นกั้นรูปเกือกม้า วางเอียงที่ค่า PR น้อยกว่าให้ก่าการถ่ายเทความร้อนที่สูง กว่ากรณีค่า PR ที่มากกว่า ในขณะที่บริเวณด้านบนของ ผนังท่อไม่ได้รับอิทธิพลจากการติดตั้งแผ่นกั้นรูปเกือกม้า จึงไม่เกิดการก่อกวนชั้นชิดผิวความร้อน ส่งผลให้การ ถ่ายเทความร้อนไม่ดีบริเวณผนังท่อด้านบน

คอนทัวร์หรือการกระจายตัวของเลขนัสเซิลท์ สำหรับแผ่นกั้นรูปเกือกม้าวางเอียงมุมปะทะ 20°, Re=8000, BR=0.2 ที่ PR=0.5 ถึง 2.0 แสดงดังรูปที่ 5 พบว่าเกิดการไหลกระแทกที่ผนังด้านซ้ายและขวา บริเวณ ด้านหน้าแผ่นกั้น ทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่ม



รูปที่ 4 คอนทัวร์อุณหภูมิบนระนาบขวางการใหล ในท่อกลมที่ Re=8000, BR=0.2



รูปที่ 5 คอนทัวร์เลขนัสเซิลท์ บนผิวท่อที่ Re=8000, BR=0.2

3.4 ความเสียดทาน

การแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ระหว่างท่อกลมติดแผ่นกั้นรูปเกือกม้าต่อท่อกลมผิวเรียบ, (f/f_0) กับอัตราส่วนระยะพิตซ์, PR ที่ค่า Re ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6b พบว่าก่าเลขเรย์โนลดส์ที่เพิ่มขึ้นมีผล ทำให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานลดลง ยกเว้นกรณีก่า PR=0.5 ซึ่งก่า Re ไม่มีผลต่อ f/f_0 และเมื่อทำการเพิ่มก่า PR จะทำให้ก่า f/f_0 มีก่าลดลงขึ้น กรณีแผ่นกั้นรูปเกือกม้า วางเอียงทำมุมปะทะ 20° ที่ BR=0.2, PR=0.5 ให้ก่าการ เพิ่มดัวประกอบเสียดทานสูงที่สุด เนื่องจากมีจำนวนแผ่น กั้นที่กั้นการ ใหลมากกว่ากรณีก่า PR ที่มากกว่า โดยให้ ก่าสูงสุดประมาณ 10 เท่าของท่อกลมผิวเรียบ ในช่วงเลข เรย์โนลดส์ที่ทำการศึกษาก่าตัวประกอบเสียดทานในท่อ กลมที่ติดตั้งแผ่นกั้นรูปเกือกม้าวางเอียงมุมปะทะ 20°, BR=0.2 และอัตราส่วนระยะพิตช์ในช่วง PR=0.5-2.0 จะให้ก่า f/f_0 อยู่ในช่วง 4.7-10

3.5 ตัวประกอบสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

การแปรเปลี่ยนค่าตัวประกอบสมรรถนะการเพิ่มการ ถ่ายเทความร้อน, TEF กับค่าอัตราส่วนระยะพิตช์, PR ของแผ่นกั้นรูปเกือกม้าวางเอียงทำมุมปะทะ 20°, BR=0.2 ที่ค่า Re ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่ากรณีที่ ก่า PR ลดลงจะให้ค่า TEF เพิ่มสูงขึ้น ค่าเลขเรย์โนลดส์ที่ เพิ่มสูงขึ้นหรืออัตราการใหลมีค่ามากขึ้นส่งผลให้ค่า TEF ลดลง ในช่วงเลขเรย์โนลดส์ที่พิจารณา (Re=4000-20,000) ค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จาก การติดตั้งแผ่นกั้นรูปเกือกม้าที่ค่า PR=0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ จะมีค่าอยู่ในช่วง 1.1-2.03 โดยกรณีที่ค่า PR=0.5 จะให้ค่า TEF สูงที่สุด โดยมีค่า เท่ากับ 2.03 ที่ค่าเลขเรย์โนลดส์เท่ากับ 4000 และยังพบ อีกว่าการติดแผ่นกั้นรูปเกือกม้าวางเอียงในท่อกลมให้ค่า TEF มากกว่า 1 นั่นหมายความว่าให้ค่าสมรรถนะของการ ถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าท่อเปล่าผิวเรียบ



ร**ูปที่ 6** การแปรเปลี่ยนของ (a) ค่า Nu/Nu₀ กับ PR (b) ค่า *flf*₀ กับ PR ของแผ่นกั้นรูปเกือกม้าวางเอียงทำมุมปะทะ 20° ที่ค่า Re ต่าง ๆ



รูปที่ 7 การแปรเปลี่ยน TEF กับ PR ของแผ่นกั้นรูปเกือกม้าวางเอียงทำมุมปะทะ 20° ที่ค่า Re ต่าง ๆ

4. สรุปผลการคำนวณ

การจำลองการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่ติดตั้ง แผ่นกั้นรูปเกือกม้าวางเอียงทำมุมปะทะ 20° โดยมีค่า อัตราส่วนการกั้นการไหลคงที่หนึ่งก่า BR=0.2 และ อัตราส่วนระยะพิตช์หกค่าคือ PR=0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับท่อกลม ผิวเรียบพบว่า สามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนขึ้น 1.8-4.4 เท่า ขณะเดียวกันความเสียดทานก็เพิ่มขึ้นประมาณ 4.7-10 เท่า และค่าตัวประกอบสมรรถนะการเพิ่มการ ถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 1.1-2.03 สำหรับท่อกลมที่ ดิดตั้งแผ่นกั้นรูปเกือกม้าวางเอียงที่ได้ทำการศึกษา พบว่า ค่า PR=0.5 จะให้ค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ค่า ตัวประกอบเสียดทานและค่าตัวประกอบสมรรถนะการ เพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด ซึ่งค่าตัวประกอบ สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 2.03 ที่ค่าเลขเรย์โนลดส์เท่ากับ 4000 ซึ่งเป็นเลข เรย์โนลดส์ต่ำสุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] Promvonge. P. and Thianpong. C. Thermal performance assessment of turbulent channel flow over different shape ribs, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 2008; 35 (10): 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. J. Heat Transfer, 2008; 130(2):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*, 2010; 37 (2): 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*, 2009; 36 (1): 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*, 1991; 113: 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, 1992; 114: 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*, 2001; 44: 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*, 2009; 13: 1854-1869.
- [9] Varun, Saini. R.P. and Singal. S.K. A review on roughness geometry used in solar air heaters. *Solar Energy*, 2007; 81: 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, 1977; 99: 180-186.
- [11] Webb. B.W. and Ramadhyani. S. Conjugate heat transfer in a channel with staggered rib. *Int. J. Heat Mass Transfer.* 1985; 28: 1679-1687.
- [12] 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*, 1987; 109: 25-30.
- [13] 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. 1996; 30: 189-205.
- [14] Promvonge. P., Sripattanapipat. S., Tamna. S., Kwankaomeng. S. and Thianpong. C. Numerical investigation of laminar heat transfer in a square channel with 45° inclined baffles. *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 2010; 37: 170-177.
- [15] Promvonge. P. and Kwankaomeng. S. Periodic laminar flow and heat transfer in a channel with 45° staggered V-baffles. *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 2010; 37: 841-849.
- [16] Promvonge. P., Sripattanapipat. S. and Kwankaomeng. S. Laminar periodic flow and heat transfer in square channel with 45° inline baffles on two opposite walls. *Int. J. Thermal Sciences*, 2010; 49: pp.963-975.
- [17] Promvonge. P., Jedsadaratanachai. W. and Kwankaomeng. S. Numerical study of laminar flow and heat transfer in square channel with 30° inline angled baffle turbulators. *Appl. Therm. Eng.*, 2010; 30: 1292-1303.
- [18] Promvonge. P., Changcharoen. W., Kwankaomeng. S. and Thianpong. C. Numerical heat transfer study of turbulent square-duct flow through inline V-shaped discrete ribs. *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 2011; 38: 1392-1399.
- [19] Promvonge. P., Koolnapadol. N., Pimsarn. M. and Thianpong. C. Thermal performance enhancement in a heat exchanger tube fitted with inclined vortex rings. *Appl. Therm. Eng.*, 2014; 62 (1): 285-292.
- [20] Promvonge. P., Tamna. S., Pimsarn. M. and Thianpong. C. Thermal characterization in a circular tube fitted with inclined horseshoe baffles. *Appl. Therm. Eng.*, 2015; 75: 1147-1155.
- [21] Patankar. S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. McGraw-Hill, New York, 1980.