

การวิเคราะห์การพาความร้อนเชิงตัวเลขของการไหลปั่นป่วนในช่องการไหลที่มีปีกสามเหลี่ยม

Numerical Convection Analysis of Turbulent Flow in a Channel with Delta-winglets

สมบัติ ทำนา^{1*} และ พงษ์เจต พรหมวงศ์²

¹ ห้องปฏิบัติการวิจัยคณิตศาสตร์ประยุกต์และกลศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น เลขที่ 1771/1 ถนนพัฒนาการ
แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

² สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1
ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

*ติดต่อ: sombat_ae@tni.ac.th, โทรศัพท์ 0-2763-2600, โทรสาร 0-2763-2600 ต่อ 2900

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขนี้ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหลแบบปั่นป่วนในช่องการไหลที่มีปีกสามเหลี่ยมที่ผนังด้านล่างคงที่ ส่วนผนังด้านบนหมุนวน มีการติดปีกสามเหลี่ยมที่ผนังด้านล่างเพียงด้านเดียว ซึ่งปีกสามเหลี่ยมวางเอียงทำมุมปะทะ, $\alpha=45^\circ$ มีค่าอัตราส่วนระยะพิชิตตามขวางและตามยาวคงที่ ($P_{R,t}=P_{R,l}=1$) และมีอัตราส่วนความสูงของปีกต่อความสูงช่องการไหลหรืออัตราส่วนการกั้นการไหลห้าค่า, $B_R=b/H=0.1, 0.15, 0.2, 0.25$ และ 0.3 ตามลำดับ ในการศึกษาเป็นการคำนวณโดยใช้วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมและอัลกอริทึมแบบ SIMPLE อัตราการไหลที่ใช้อยู่ในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ส์ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 3000 จนถึง 20,000 ผลจากการคำนวณพบว่าช่องการไหลที่มีการติดปีกสามเหลี่ยมเกิดกระแสการไหลหมุนวนคู่ช่วยเหนี่ยวนำให้ไหลกระแทกที่ผนังช่องการไหลช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเป็นอย่างมาก และพบว่า การเพิ่มขึ้นของความสูงปีกสามเหลี่ยม B_R ให้การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันค่าตัวประกอบเสียดทานก็สูงเพิ่มขึ้นตาม

คำหลัก: การถ่ายเทความร้อน; ช่องการไหล; ปีกสามเหลี่ยม; การไหลแบบปั่นป่วน; การวิเคราะห์เชิงตัวเลข

Abstract

A numerical study has been conducted to examine the turbulent flow and heat transfer behaviors in a channel with delta-winglets (DW) placed only on the lower wall. A uniform heat-flux condition is applied only to the lower wall while the upper wall is insulated. The DW parameters includes five winglet-to-channel height ratios or blockage ratios, $b/H=B_R=0.1, 0.15, 0.2, 0.25$ and 0.3 while its longitudinal and transverse pitch ratio ($P_{R,t}=P_{R,l}=1$) including a single attack angle ($\alpha=45^\circ$) are kept constant. The computations are based on the finite volume method with the SIMPLE algorithm for the airflow rate in terms of Reynolds numbers ranging from 3000 to 20,000. The numerical result reveals that several pairs of counter-rotating vortices caused by the DW can induce impingement/attachment flows on the wall leading to greater increase in heat transfer in the channel. In addition, the increment of B_R values leads to the increase in heat transfer and friction loss.

Keywords: heat transfer; channel flow; delta-winglet; turbulent flow; numerical analysis.

1. บทนำ

อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนได้ถูกนำมาใช้เพื่อก่อนการไหล ทำให้เกิดการหมุนวนของการไหลตามแนวยาวและเพิ่มการผสมของไหลที่ไหลให้ดียิ่งขึ้น

สามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยไม่ต้องพึ่งพาพลังงานภายนอกมาช่วยหรือที่เรียกว่าวิธีเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบ passive นิยมนำมาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมในสาขาต่าง ๆ เช่น อุปกรณ์

แลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด อุปกรณ์อุณหภูมิต่ำ อากาศพลังงานแสงอาทิตย์ และแผงระบายความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น จึงมีนักวิจัยสนใจศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนรวมทั้งศึกษาพฤติกรรมของการไหลและความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน การศึกษามีทั้งในส่วนของการศึกษาเชิงทดลองและวิธีเชิงตัวเลขหรือการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาช่วยอธิบายกลไกการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมของการไหลที่เกิดขึ้น

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยการใส่ตัวสร้างการไหลหมุนวนโดยเพิ่มครีปในท่อที่ให้ความร้อนบริเวณผิวด้านบนเพียงด้านเดียว โดยคิดการถ่ายเทความร้อนแบบซ้้าเป็นช่วง ได้มีการศึกษาทั้งในส่วนของการใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลขและทำการทดลองจริง โดยงานวิจัยที่ผ่านมาได้มี Hans และคณะ [1] และ Varun และคณะ [2] ได้ศึกษาการไหลแบบซ้้าเป็นช่วงสำหรับการไหลที่มีการพัฒนาเต็มที่แล้ว ใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลขศึกษาพฤติกรรมของการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อทั้งการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน ต่อมา Webb และ Ramadhani [4] ได้นำเอาหลักของการไหลแบบซ้้าเป็นช่วงของการไหลที่พัฒนาเต็มที่แล้ว ซึ่งได้มีการศึกษาไว้จากอ้างอิงที่ [3] ทำการศึกษาด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อผิวเรียบและท่อที่ติดแผ่นกั้นแบบวางเอียง จากนั้น Kellar และ Patankar [5] ทำการศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ติดแผ่นกั้นในลักษณะการจัดวางแบบเอียงกัน พบว่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความสูงของแผ่นกั้นหรือลดระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น ต่อมาการคำนวณเชิงตัวเลขสามมิติของการไหลแบบซ้้าเป็นช่วงที่มีการพัฒนาการไหลเต็มที่สำหรับการพาความร้อนแบบบังคับของการไหลแบบราบเรียบ ที่ให้ความร้อนบริเวณผิวด้านบนและด้านล่างแบบพลิกซ์ความร้อนที่ผิววงที่ได้ศึกษาโดย Lopez et al. [6] ต่อมา Promvong และคณะ [7] พบว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดครีปบางรูปตัววีแยกส่วนทำมุมปะทะ 60° ที่ผนังทั้งสองด้านวางแนวตรงกัน จะเกิดการไหลแบบซ้้าเป็นช่วงและมีโปรไฟล์ทางความร้อนซ้้าเป็นช่วงอย่างสมบูรณ์ที่ระยะห่างจากทางเข้าประมาณ $x/D=7-10$ นอกจากศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสแล้ว Promvong และคณะ [8] ก็ได้

ศึกษาเชิงทดลองการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อกลมที่ใส่แผ่นวงแหวนวอร์เท็กซ์เอียง พบว่า $\alpha=30^\circ$, $BR=0.2$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด แต่ความเสียดทานก็ยิ่งสูงมากสุดตามต่อมา Skullong และคณะ [9, 10] ศึกษาเชิงทดลองการถ่ายเทความร้อนที่ไหลแบบปั่นป่วนในช่องการไหลของอุปกรณ์อุณหภูมิต่ำพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตัวสร้างการไหลหมุนวนชนิดปีกสามเหลี่ยมเอียงมุมปะทะกับกระแสการไหลค่าต่าง ๆ เทียบกับแผ่นกั้นวางขวาง พบว่าตัวสร้างการไหลหมุนวนชนิดปีกสามเหลี่ยมสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมากกว่าท่อผิวเรียบและตัวสร้างการไหลหมุนวนชนิดแผ่นกั้นวางขวาง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาพฤติกรรมของการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อหรือช่องการไหลลักษณะต่าง ๆ โดยการเพิ่มครีปหรือแผ่นกั้นทั้งในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ท่อกลม และช่องการไหลสี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่การศึกษาเชิงตัวเลขที่ใส่แผ่นกั้นมีลักษณะเป็นแผ่นแบบบางโดยเฉพาะปีกสามเหลี่ยมที่มีการติดตั้งแบบทำมุมเป็นรูปตัววีโดยปลายวีชี้ทวนกระแสการไหลในช่องการไหลสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพียงด้านเดียวยังไม่ได้มีรายงาน ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการคำนวณเชิงตัวเลขซึ่งใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS FLUENT เวอร์ชัน 17.0 ในการจำลองพฤติกรรมของการไหลแบบปั่นป่วน 3 มิติ ที่มีการไหลแบบซ้้าเป็นช่วงอย่างสมบูรณ์ และศึกษาการถ่ายเทความร้อน ในช่องการไหลที่ติดตั้งปีกสามเหลี่ยมรูปตัววีวางเอียง $\alpha=45^\circ$, $P_{R,t}$ และ $P_{R,l}$ เท่ากับ 1 โดยมีค่า B_R แตกต่างกัน

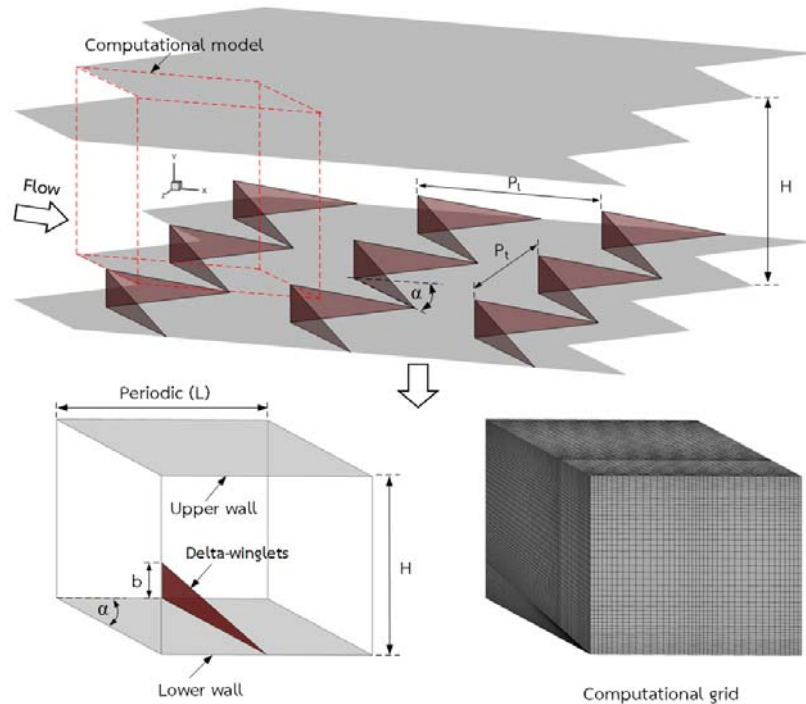
2. แบบจำลองและสมการทางคณิตศาสตร์

2.1 แบบจำลองช่องการไหลที่ติดตั้งปีกสามเหลี่ยม

แบบจำลองที่ศึกษาเป็นช่องการไหลที่ติดตั้งปีกสามเหลี่ยมรูปตัววี โดยมีปลายวีชี้ทวนกระแสการไหล ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งปีกสามเหลี่ยมมีค่าอัตราส่วนระยะห่างของปีกตามแนวขวางต่อความสูงช่องการไหล (p_c/H) หรืออัตราส่วนระยะพิตซ์ตามขวางคองที่, $P_{R,t}=1$ และค่าอัตราส่วนระยะห่างของปีกตามแนวยาวต่อความสูงช่องการไหล (p_l/H) หรืออัตราส่วนระยะพิตซ์ตามยาวคองที่, $P_{R,l}=1$ ส่วนค่าอัตราส่วนความสูงของปีกต่อความสูงช่องการไหล (b/H) หรืออัตราส่วนการกั้นการไหล, $B_R=0.1, 0.15, 0.2, 0.25$ และ 0.3 ตามลำดับ ปีกสามเหลี่ยมติดที่ผนังด้านเดียว ซึ่งวางเอียงทำมุมปะทะ, $\alpha=45^\circ$ โดยความ

สูงของช่องการไหลมีค่า $H=0.02$ m ซึ่งการคำนวณได้พิจารณาการไหลที่เข้าเป็นช่วงอย่างสมบูรณ์ (fully

periodic) ที่ช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ 3000 ถึง 20,000



รูปที่ 1 ช่องการไหล และแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง

2.2. สมการทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหล ประกอบด้วยสมมติฐานคือ การถ่ายเทความร้อนและการไหลแบบคงตัว 3 มิติ เป็นการไหลเป็นแบบปั่นป่วนและอัดตัวไม่ได้ คุณสมบัติของของไหลคงที่ ไม่คิดแรงวัตถุและการสูญเสียจากความหนืด ไม่คิดการแผ่รังสีความร้อน

จากสมมติฐานต่าง ๆ ข้างบน สมการหลักประกอบไปด้วยสมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน โดยเขียนในรูปเทนเซอร์ระบบพิกัดคาร์ทีเซียนได้ดังนี้

สมการอนุรักษ์มวล

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

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

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

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล และ u_i คือ องค์ประกอบความเร็วเฉลี่ยในทิศทาง x_i , P คือ ความดัน, μ คือ ความหนืดจลน์ และ u_i' คือ องค์ประกอบความเร็วที่ผันแปรหรือแกว่งไปมาในทิศทาง x_i

สมการอนุรักษ์พลังงาน

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

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

การไหลแบบปั่นป่วน เทอมความเค้นเรย์โนลด์ส์ $-\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j'$ ในสมการที่ (2) จากข้อสมมติฐานของ Boussinesq ความเค้นเรย์โนลด์ส์จะมีความสัมพันธ์กับเกรเดียนต์ของความเร็วเฉลี่ย ดังสมการที่ (4)

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

เมื่อ k คือ พลังงานจลน์ปั่นป่วน หาได้จาก $k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i}$, และ δ_{ij} คือ เดลต้าโครเนกเกอร์ μ_t คือ ความหนืดปั่นป่วน นิยามเป็น $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$

แบบจำลองการไหลปั่นป่วน RNG k- ε เป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากการใช้วิธีเชิงสถิติอย่างแม่นยำ (ซึ่งเรียกว่า ทฤษฎี Renormalization group, RNG) โดยสมการการเคลื่อนย้ายของแบบจำลอง RNG k- ε สามารถแสดงได้ดังนี้

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

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (6)$$

เมื่อ $\mu_{eff} = \mu + \mu_t = \mu + \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ คือ ค่าของความหนืดประสิทธิผล ส่วนค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ใช้ในสมการข้างต้น ดังนี้ $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$, $C_\mu = 0.0845$, $C_{1\varepsilon} = 1.42$ และ $C_{2\varepsilon} = 1.68$

การดิสcretize ทั้งสมการหลักทั้งหมดจะทำได้ด้วยวิธีผลต่างควอดราติก (QUICK) แล้วทำการคำนวณหาผลเฉลยตามระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม [11] ด้วยอัลกอริทึม SIMPLE และใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วน RNG k- ε ในการคำนวณเชิงตัวเลข และทุกตัวแปรจะพิจารณาการลู่เข้าหาค่าตอบที่ความแตกต่างของค่าการแปรเปลี่ยนน้อยกว่า 10^{-5} ยกเว้นค่าสมการพลังงานซึ่งพิจารณาที่น้อยกว่า 10^{-9}

ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ เลขเรย์โนลด์ส์ ตัวประกอบเสียดทาน เลขนัสเซิลท์ และตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (η) ซึ่งค่าเลขเรย์โนลด์ส์นิยามโดย

$$Re = \rho u_0 D_h / \mu \quad (7)$$

ตัวประกอบเสียดทาน, f คำนวณได้จากความดันลด, ΔP ตลอดช่วงความยาวของการไหลซ้ำเป็นช่วง, L

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

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ตำแหน่งใด ๆ h_x หาได้จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน กำหนดโดย

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

เมื่อ q_s คือ พลักซ์ความร้อนที่ผิวท่อ ส่วน T_s คืออุณหภูมิที่ผิวท่อ และ T_b คือ อุณหภูมิบัลค์

เลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ หรือเลขนัสเซิลท์ที่ตำแหน่งใด ๆ คือ ตัวแทนการถ่ายเทความร้อนซึ่งอยู่ในรูปไร้หน่วยที่ตำแหน่งใด ๆ หาได้จาก

$$Nu_x = \frac{h_x D_h}{k_a} \quad (10)$$

เมื่อ k_a คือ ค่าการนำความร้อนของอากาศ

D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส์ ค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ย สามารถคำนวณได้จาก

$$Nu = \frac{1}{A} \int Nu_x dA \quad (11)$$

ค่าตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน, η สามารถหาได้จากสมการ

$$\eta = (Nu / Nu_0) / (f / f_0)^{1/3} \quad (12)$$

เมื่อ Nu_0 และ f_0 คือ เลขนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียดทานของช่องการไหลผิวเรียบ ตามลำดับ

แบบจำลองช่องการไหลที่ทำการศึกษาค้นคว้าได้กำหนดโดเมนที่ใช้ในการคำนวณเป็นเอลิเมนต์รูปทรงสี่เหลี่ยมและให้กริดหนาแน่นตรงบริเวณใกล้ผนังช่องการไหล ในการหาจำนวนกริดอิสระ ได้ทำการเปรียบเทียบคำตอบโดยใช้จำนวนของกริดที่แตกต่างกันหลายค่า ตั้งแต่จำนวนกริด 50,000-300,000 พบว่าจำนวนกริดตั้งแต่ 178,000 ขึ้นไปให้ค่าเลขนัสเซิลท์เปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 1.5% และใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าจำนวนกริดที่มากกว่า จึงเลือกใช้จำนวนกริดเท่า 178,000 ไปใช้ในการศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อไป

2.3. เงื่อนไขขอบเขต

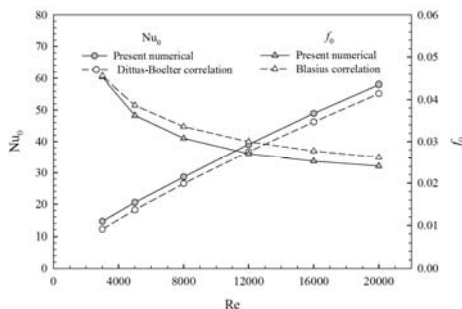
การคำนวณเชิงตัวเลขของงานวิจัยนี้ พิจารณาทางเข้าและทางออกของโดเมนเป็นแบบซ้ำเป็นช่วงสมมติอากาศที่ทางเข้า 300 K และเลขพรันด์เทิล 0.707 มวลของอากาศมีอัตราการใช้คงที่ รูปร่างความเร็วที่ทางเข้าและทางออกเหมือนกัน คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศคงที่ โดยอ้างอิงจากอุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้า ที่ผนังช่องการไหลไม่มีการสั่นไหล และเป็นผนังอยู่กับที่ ให้

ความร้อนแบบพลักซ์ความร้อนคงที่บนผนังช่องการไหลเพียงด้านเดียวมีค่าเท่ากับ 600 W/m^2 ส่วนผนังด้านตรงข้ามกำหนดเป็นฉนวน และสมมติให้ปีกสามเหลี่ยมไม่มีการถ่ายเทความร้อน ส่วนด้านข้างทั้งสองของโดเมนกำหนดเป็นเงื่อนไขแบบสมมาตร

3. ผลการคำนวณ

3.1. ความถูกต้องของผลการคำนวณ

ผลการคำนวณเชิงตัวเลขได้ทำการเปรียบเทียบกับผลจากสหสัมพันธ์ที่ได้การทดลองของ Dittus-Boelter สำหรับเลขนัสเซลท์ และ Blasius สำหรับตัวประกอบเสียดทานภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน [12] พบว่าค่าเลขนัสเซลท์และค่าตัวประกอบเสียดทานที่ได้จากวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขมีความสอดคล้องกันดีกับสหสัมพันธ์โดยผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขมีความคลาดเคลื่อนจากสหสัมพันธ์ประมาณ 4 และ 10% ตามลำดับ จึงมั่นใจได้ว่าผลการคำนวณเชิงตัวเลขนี้มีความน่าเชื่อถือ

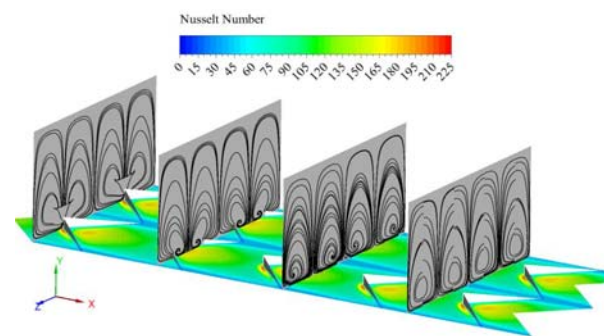


รูปที่ 2 เลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานในช่องการไหลผิวเรียบ

3.2. รูปร่างการไหล

การไหลในช่องการไหลที่ติดปีกสามเหลี่ยมรูปตัววีวางเอียงทำมุมปะทะ 45° , $B_R=0.1$, $Re=12,000$ โดยมีปลายวีชี้ทวนกระแสการไหลดังรูปที่ 3 ซึ่งการไหลของอากาศเข้าช่องการไหลไปตามทิศทางแกน $+x$ จากรูปแสดงเส้นกระแสการไหลที่ระนาบตัดขวางต่าง ๆ ระหว่างช่วงติดปีกสามเหลี่ยม(แสดงเพียงปีกสามเหลี่ยมตามขวาง 2 คู่) พร้อมแสดงการกระจายเลขนัสเซลท์ที่ผนังด้านล่าง พบว่าเมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นปีกสามเหลี่ยมจะทำให้เกิดการไหลหมุนวนบริเวณด้านหลังของปีก ซึ่งการไหลหมุนวนนี้จะเป็นลักษณะวอร์เทกซ์คู่เข้าสู่ผนังด้านที่ติดปีกสามเหลี่ยม(ผนังด้านล่าง) ซึ่งเรียกว่า common-flow-

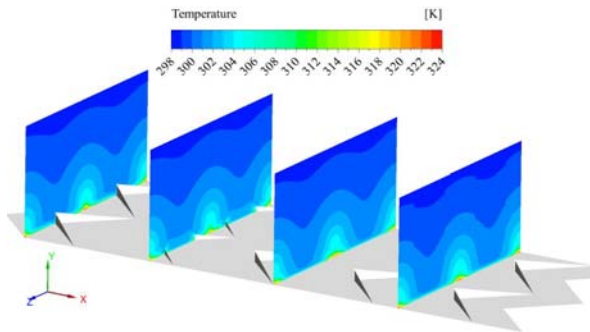
down vortices ส่วนถ้าพิจารณาที่ผนังด้านตรงข้าม (ด้านบน) จะเรียกวอร์เทกซ์คู่นี้ว่า common-flow-up vortices ซึ่งเป็นการไหลวอร์เทกซ์คู่ยกตัวออกจากผนังและการไหลของวอร์เทกซ์คู่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการไหลกระแทกของกระแสการไหลที่บริเวณผนังด้านล่าง โดยเฉพาะบริเวณใกล้ด้านหน้าของปีกสามเหลี่ยมมีการไหลกระแทกของกระแสที่รุนแรงช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูง ส่วนบริเวณที่มีการไหลกระแทกบริเวณกว้างคือด้านหลังปีกสามเหลี่ยมรูปตัววี โดยแกนการไหลจะมีการเปลี่ยนตำแหน่งแตกต่างกันออกไปดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตัดขวาง และเลขนัสเซลท์บนผนังด้านล่างที่ $B_R=0.1$, $Re=12,000$

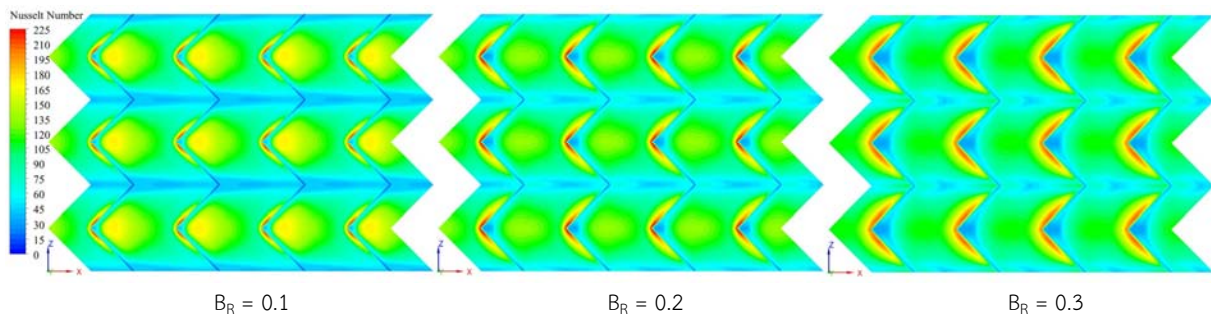
3.3. การถ่ายเทความร้อน

การกระจายของอุณหภูมิที่ระนาบตัดขวางสำหรับการไหลในช่องการไหลที่ติดปีกสามเหลี่ยมวางเอียงมุมปะทะ 45° , $B_R=0.1$, $Re=12,000$ ดังรูปที่ 4 ซึ่งพบว่าบริเวณชั้นขีดผิวความร้อนจะบางกว่ากรณีท่อผิวเรียบที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งปีกสามเหลี่ยมวางเอียงจะทำให้เกิดการก่อวนบริเวณชั้นขีดผิว ซึ่งส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศและผนังท่อมีอัตราที่สูงขึ้น โดยการถ่ายเทความร้อนจะดีตรงบริเวณผนังด้านล่างระหว่างปีกสามเหลี่ยม เพราะเป็นบริเวณที่กระแสการไหลถูกเหนี่ยวนำให้ไหลกระแทกที่ผนัง ทำให้ชั้นขีดผิวความร้อนบางลง ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่สูง โดยกรณี B_R ที่สูงขึ้นจะมีชั้นขีดผิวความร้อนที่บางบริเวณผนังด้านล่างขนาดใหญ่กว่าที่ B_R น้อยกว่า จึงทำให้กรณีติดตั้งปีกสามเหลี่ยมวางเอียงที่ค่า B_R มากกว่าให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่ากรณีค่า B_R ที่น้อยกว่า ในขณะที่ผนังบริเวณปลายปีกสามเหลี่ยมไม่เกิดการก่อวนชั้นขีดผิวความร้อน จึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนไม่ดี



รูปที่ 4 อุณหภูมิบนระนาบตัดขวาง ในช่องการไหลที่ $B_R=0.1, Re=12,000$

เลขนัสเซลท์ที่ตำแหน่งใดๆ บนผนังด้านล่างช่องการไหล สำหรับปีกสามเหลี่ยมรูปตัววีวางเอียงมุมปะทะ 45° , $Re=12,000$ ที่ $B_R=0.1$ ถึง 0.3 แสดงในรูปที่ 5 พบว่า วอร์เทกซ์คู่เหนี่ยวนำให้เกิดการไหลกระแทกที่ผนังด้านล่างของช่องการไหล โดยเฉพาะบริเวณด้านหน้าปีกสามเหลี่ยมจะมีขนาด Nu ที่สูงกว่าด้านหลังปีกสามเหลี่ยม แต่บริเวณด้านหลังปีกจะมีบริเวณที่เกิดการไหลกระแทกขนาดใหญ่กว่าด้านหน้าปีก บริเวณที่ไหลกระแทกนี้จะมีค่า Nu ที่สูงจึงมีอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนซึ่งอยู่ในรูปของเลขนัสเซลท์มีค่ามากกว่าบริเวณอื่น ๆ และพบว่าค่า B_R มากขึ้นความแรงของการไหลกระแทกที่



รูปที่ 5 เลขนัสเซลท์บนผนังด้านล่างของช่องการไหลที่ $Re=12,000$

3.4 ความดันสูญเสีย

ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานระหว่างช่องการไหลติดปีกสามเหลี่ยมต่อช่องการไหลผิวเรียบ, (f/f_0) กับค่า Re ที่ค่าอัตราส่วนการกั้นการไหล, B_R ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าค่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น โดยที่ค่า Re มากกว่า $12,000$ จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง f/f_0 และเมื่อค่า B_R เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า f/f_0 มีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปีกสามเหลี่ยมที่มีความสูงมาก

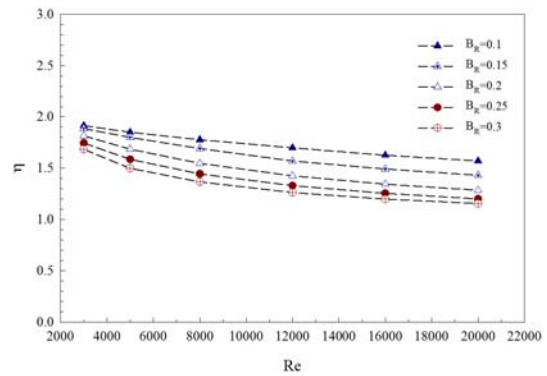
ด้านหน้าปีกจะมากขึ้น ส่งผลให้ค่าเลขนัสเซลท์มากขึ้น เพราะปีกสามเหลี่ยมที่ติดตั้งหากความสูงมากขึ้นจะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลหมุนวนกระแทกได้รุนแรงขึ้น

รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซลท์, Nu/Nu_0 กับค่าเลขเรย์โนลด์ส์, Re สำหรับช่องการไหลที่ติดปีกสามเหลี่ยมรูปตัววีโดยปลายวีชี้ทวนกระแสการไหลวางเอียงทำมุมปะทะ 45° ที่ค่าอัตราส่วนการกั้นการไหล, B_R ต่าง ๆ จากกราฟพบว่าค่า Nu/Nu_0 มีค่าลดลง เมื่อค่า Re มีค่าเพิ่มมากขึ้น ยกเว้นกรณี $B_R=0.1$ และ $B_R=0.15$ ที่ค่า Re น้อยกว่า 8000 มีค่า Nu/Nu_0 ลดลง เนื่องจากการไหลผ่านปีกสามเหลี่ยมที่ B_R น้อย ๆ หากมีความเร็วน้อย ๆ การไหลผ่านปีกสามเหลี่ยมจะไม่เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดไหลหมุนวน เมื่อค่า B_R เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่า Nu/Nu_0 เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปีกสามเหลี่ยมมีความสูงที่มาก สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลหมุนวนกระแทกที่ผนังด้านที่ติดปีกสามเหลี่ยมได้มากกว่ากรณีนี้ที่ B_R มีค่าน้อยกว่า โดยที่ $B_R=0.3$ ให้ค่า Nu/Nu_0 มากที่สุด สำหรับทุกค่า B_R ที่ได้ ทำการศึกษาในช่วง $Re=3000-20,000$ พบว่าค่า Nu/Nu_0 จะมีค่าอยู่ในช่วง $2.4-3.2$ เท่าเมื่อเทียบกับช่องการไหลผิวเรียบ

ขึ้นจะขวางกั้นการไหลได้มากกว่ากรณีค่า B_R ที่น้อยกว่า และกรณีปีกสามเหลี่ยมวางเอียงทำมุมปะทะ 45° ที่ $B_R=0.3, Re=20,000$ ให้ค่าการเพิ่มตัวประกอบเสียดทานสูงที่สุด โดยให้ค่าสูงสุดประมาณ 9 เท่าของช่องการไหลผิวเรียบ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ที่ทำการศึกษากการไหลในช่องการไหลที่ติดตั้งปีกสามเหลี่ยมวางเอียงมุมปะทะ 45° อัตราส่วนระยะพิตซีในช่วง $B_R=0.1-0.3$ จะให้ค่า f/f_0 อยู่ในช่วง $2.4-9$

3.5 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

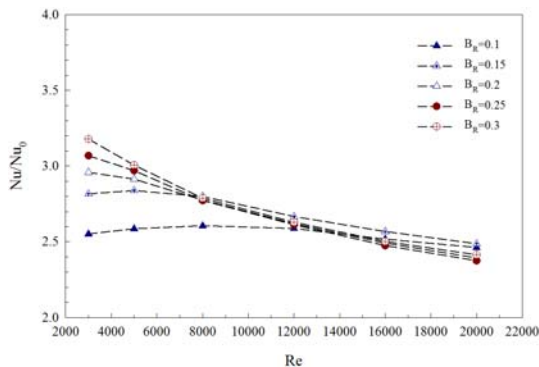
การประเมินสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสามารถพิจารณาจากความสัมพันธ์ของค่าตัวประกอบสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน, η กับค่า Re กรณีของการไหลติดปีกสามเหลี่ยมวางเอียงทำมุมปะทะ 45° ที่ค่า B_R ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าการติดปีกสามเหลี่ยมวางเอียงในช่องการไหลให้ค่า η มากกว่า 1 นั้นหมายความว่าให้ค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าช่องการไหลผิวเรียบ เมื่อค่า B_R ลดลงจะให้ค่า η เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากที่ B_R น้อย ๆ จะให้ค่าความเสียดทานน้อย เมื่ออัตราการไหลเพิ่มมากขึ้นหรือค่า Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า η ลดลง ในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ที่พิจารณา ค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จากการติดตั้งปีกสามเหลี่ยมที่ค่า $B_R=0.1, 0.15, 0.2, 0.25$ และ 0.3 ตามลำดับ จะมีค่าอยู่ในช่วง 1.15-1.9 โดยกรณีที่มีค่า $B_R=0.1$ จะให้ค่า η สูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 1.9 ที่ค่าเลขเรย์โนลด์ส์เท่ากับ 3000



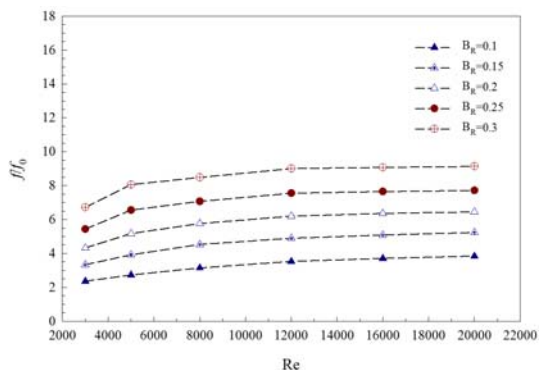
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของ η กับ Re ที่ค่า B_R ต่าง ๆ

4. สรุปผลการคำนวณ

การจำลองการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลที่ติดตั้งปีกสามเหลี่ยมวางเอียงทำมุมปะทะ 45° โดยมีค่าอัตราส่วนระยะพิทช์ตามแนวขวางและแนวยาวช่องการไหลคงที่หนึ่งค่าคือ $P_{R,t}=P_{R,l}=1$ และแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วนการกั้นการไหลให้ค่าคือ $B_R=0.1, 0.15, 0.2, 0.25$ และ 0.3 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับช่องการไหลผิวเรียบพบว่า สามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนขึ้น 2.4-3.2 เท่า ขณะเดียวกันความเสียดทานก็เพิ่มขึ้นประมาณ 2.4-9 เท่า และค่าตัวประกอบสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน, η อยู่ในช่วง 1.15-1.9 สำหรับช่องการไหลที่ติดตั้งปีกสามเหลี่ยมวางเอียงที่ได้ทำการศึกษา พบว่าปีกสามเหลี่ยมที่ค่า $B_R=0.3$ ให้ทั้งค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานสูงที่สุด แต่ค่าตัวประกอบสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดพบที่ค่า $B_R=0.1$ โดยให้ค่า η เท่ากับ 1.9 ที่ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ 3000



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของ Nu/Nu_0 กับ Re ที่ค่า B_R ต่างๆ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของ f/f_0 กับ Re ที่ค่า B_R ต่างๆ

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hans, V.S., Saini, R.P. and Saini, J.S. (2009). Performance of artificially roughened solar air heaters - A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13(8), October 2009, pp. 1854-1869.
- [2] Varun, Saini, R.P. and Singal, S.K. (2007). A review on roughness geometry used in solar air heaters, *Solar Energy*, vol. 81(11), November 2007, pp. 1340-1350.
- [3] Patankar, S.V., Liu, C.H. and Sparrow, E.M. (1977). Fully developed flow and heat transfer

in ducts having streamwise-periodic variations of cross-sectional area, *ASME J. Heat Transfer*, vol. 99(2), May 1977, pp. 180-186.

[4] Webb, B.W. and Ramadhyani, S. (1985). Conjugate heat transfer in a channel with staggered ribs, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 28(9), September 1985, pp. 1679-1687.

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

[6] Lopez, J.R., Anand, N.K. and Fletcher, L.S. (1996). Heat transfer in a three-dimensional channel with baffles, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 30(2), February 1996, pp. 189-205.

[7] Promvong, P., Changcharoen, W., Kwankaomeng, S. and Thianpong, C. (2011). Numerical heat transfer study of turbulent square-duct flow through inline V-shaped discrete ribs, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, vol. 38(10), December 2011, pp. 1392-1399.

[8] Promvong, P., Koolnapadol, N., Pimsarn, M. and Thianpong, C. (2014). Thermal performance enhancement in a heat exchanger tube fitted with inclined vortex rings, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 62(1), January 2014, pp. 285-292.

[9] Skullong, S. and Promvong, P. (2014). Experimental Investigation on Turbulent Convection in Solar Air Heater Channel Fitted with Delta Winglet Vortex Generator, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 22(1), January 2014, pp. 1 – 10.

[10] Skullong, S., Tamna, S. and Promvong, P. (2014). Turbulent Convection in a Solar Air Heater, paper presented in *International Conference and Utility Exhibition 2014 on Green Energy for Sustainable Development (ICUE 2014)*, Chonburi, Thailand.

[11] Incropera, F. and Dewitt, P.D. (2006). *Introduction to Heat Transfer, fifth ed.*, John Wiley & Sons, New York.

[12] Patankar, S.V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York.