

ผลกระทบของการไหลแบบเป็นจังหวะที่มีต่อการไหลหมุนวนและการถ่ายเทความร้อน The effect of pulsating flow on the recirculation flow and heat transfer

พ.ต. อโนทัย สุขแสงพนมรุ่ง^{1*} ศุภชาติ จงโพนบูลย์พัฒนะ²

¹ กองวิศวกรรมเครื่องกล ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

อ. เมือง นครนายก 26001 โทร/โทรสาร 037-393487, E-mail: asuksang@crma.ac.th

² ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน วิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121, E-mail: Supachar@siit.tu.ac.th

Maj. Anotai Suksangpanomrung^{1*} Supachart Chungpaibulpatana²

¹ Department of Mechanical Engineering, Academic Division, Chulachomklao Royal Military Academy

Maung, Nakorn-Nayok, 26001, Tel/Fax: 037-393487, E-mail: asuksang@crma.ac.th

² Department of Energy Technology, Industrial and Mechanical Engineering, SIIT, Thammasat University at Rangsit

Pathumthani 12121, Thailand, E-mail: Supachar@siit.tu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการคำนวณเชิงตัวเลขผ่านกริดแลเปลี่ยนความร้อนที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยศึกษาถึงผลกระทบของการไหลแบบเป็นจังหวะที่มีรูปแบบเป็นคลื่นไซน์ (sinusoidal wave) ที่มีต่อเขตการไหลหมุนวนและการถ่ายเทความร้อนของครีป การคำนวณได้กระทำที่ค่าคงที่ของเรย์โนลด์ (Re_d) เท่ากับ 250 และ 400 โดยจะมีการปรับเปลี่ยนค่าความถี่ ($f = 0.1-0.9$) และค่าขนาดความแรง ($A = 0.1-0.6$) ของกระแสการไหลแบบคลื่นไซน์ จากการคำนวณพบว่ากระแสการไหลเข้าแบบเป็นจังหวะจะเป็นตัวสร้างความไม่เสถียรให้เกิดขึ้นในการไหล และก่อให้เกิดการไหลแบบสภาวะไม่คงตัว โดยมีการแตกตัวและการเคลื่อนที่ของวอร์เท็กซ์ขึ้น ค่าความยาวของเขตการไหลหมุนวนถูกทำให้ลดลงสูงสุดถึง 76% และประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 66.3% ที่ $Re_d = 400$, $A = 0.1$ และ $f = 0.3$ โดยค่าความถี่ที่ 0.3 นี้คือค่าความถี่เหมาะสม

Abstract

The numerical simulations of the flow and convective heat transfer over a bluff rectangular plate are performed with the inlet sinusoidal pulsating flow. The objective of this research is to study the effect of the sinusoidal pulsating flow over the recirculation flow and the rate of heat transfer of the rectangular fin. The computational is performed at the Reynolds number of 250 and 400 by varying the frequency ($f = 0.1-0.9$) and the amplitude ($A = 0.1-0.6$) of the incoming flow. The results found that sinusoidal pulsating flow perturb the dynamic of the flow and

introduce the unsteadiness to the flow. The vortex brake down and vortex shedding is clearly seen at this low Reynolds number. The length of the separation bubble is reduced by 76% and the rate of the averaged total heat transfer is increased by 66.3% for the case $Re_d = 400$, $A = 0.1$ and $f = 0.3$. The optimal frequency is found to be 0.3.

1. บทนำ (Introduction)

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างตัวกลางสองตัวกลางที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ ปัจจุบันได้มีการนำเอาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นโรงงานอุตสาหกรรม อาคาร บ้านเรือนที่มีระบบทำความเย็น ตู้เย็นที่ใช้ในครัวเรือน หม้อน้ำรถยนต์ เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เป็นต้น ดังนั้นการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อให้เหมาะสมกับประเภทของงานจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งคือการศึกษาลักษณะของการไหลของของไหลทำงานผ่านครีปแลเปลี่ยนความร้อนเพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลกับครีปแลเปลี่ยนความร้อน

จากการศึกษาเราพบว่ากริดแลของของไหลทำงานผ่านครีปแลเปลี่ยนความร้อนเป็นการไหลแบบแตกแยก (separated flow) เมื่อของไหลทำงานไหลมากระทบกับครีปที่ด้านบนและด้านล่างของครีป จะเกิดการไหลย้อนกลับ (backflow) ขึ้น โดยปกติแล้วการไหลย้อนกลับนี้เมื่อรวมกับการไหลในทิศทางหลักแล้ว ก็จะทำให้เกิดเขตการไหลหมุนวน (recirculation flow) ขึ้น ซึ่งเขตการไหลหมุนวนนี้เองจะเป็นตัวลดประ

*Corresponding author

สิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลทำงานกับพื้นผิวของครีบลแลกเปลี่ยนความร้อน[1] จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาถึงแนวทางในการลดขนาดของเขตการไหลหมุนวนที่เกิดขึ้นที่ด้านบนและด้านล่างของพื้นผิวของครีบลให้มีขนาดสั้น โดยการเพิ่มค่าระดับความเข้มปั่นป่วน (turbulent intensity) ของกระแสการไหลที่ไหลมาสู่ครีบล จากการทดลองของ Hiller และ Cheery [2] พบว่าค่าระดับความเข้มปั่นป่วนมีผลต่อขนาดความยาวของการไหลหมุนวนบนครีบลแลกเปลี่ยนความร้อน Houligan, Welch, Thompson, Cooper และ Welsh [3] ได้ทดลองใส่คลื่นเสียงในการเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนของครีบล ซึ่งจากการทดลองพบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีบลได้เป็นอย่างดี

ในงานวิจัยครั้งนี้จะศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนของครีบลแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมที่กำหนดให้มีความยาวอนันต์ โดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อน โดยจุดประสงค์หลักที่สำคัญก็คือการหาแนวทางในการลดขนาดของเขตการไหลหมุนวนที่เกิดขึ้นที่ด้านบนและด้านล่างของพื้นผิวของครีบลให้มีขนาดสั้นที่สุด โดยวิธีหนึ่งก็คือการปรับแต่งกระแสการไหลเข้าของของไหลให้มีรูปแบบการไหลเป็นแบบคลื่นไซน์ (sinusoidal wave) ที่มีขนาดความแรง (amplitude) และความถี่ (frequency) ต่างกัน ก่อนที่ของไหลนั้นจะมากระทบครีบลแลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับในบทความฉบับนี้ได้มีการจัดเรียงหัวข้อสำคัญดังนี้ สมการควบคุมการไหล วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ผลการคำนวณและการวิจารณ์ สรุปผลและข้อเสนอแนะ กิตติกรรมประกาศ และเอกสารอ้างอิง

2. สมการควบคุมการไหล (Governing Equations)

แบบจำลองการไหลสำหรับการไหลผ่านครีบลแลกเปลี่ยนความร้อนถูกควบคุมด้วยสมการการไหลในสภาวะไม่คงตัวและที่อัดตัวไม่ได้ดังต่อไปนี้

สมการความต่อเนื่อง:

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

สมการอนุรักษ์ของโมเมนตัม:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (2)$$

สมการอนุรักษ์ของพลังงาน:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial u_j T}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} \quad (3)$$

3. วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Methods)

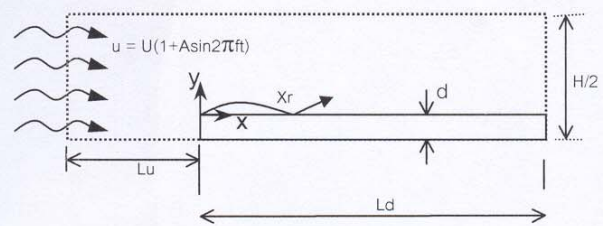
การคำนวณการไหลผ่านครีบลระบายความร้อนจะถูกคำนวณบนกริดซ้อนทับ (staggered grid) ด้วยวิธีการปริมาตรสืบเนื่อง (finite volume method) ทุกเทอมของสมการควบคุมการไหล จะถูก discretize ด้วย central differencing scheme สำหรับเทอมของเวลาใช้วิธีการ low storage 3rd order Runge-Kutta สมการความต่อเนื่อง และเทอมของความชันของความดัน (pressure gradient) ในสมการอนุรักษ์ของโมเมนตัมจะใช้แนวทางหาค่าตอบแบบอิมพลิติต แต่เทอมการพา (convective terms) และเทอมการแพร่ (diffusive terms) และสมการอนุรักษ์พลังงานใช้แนวทางหาค่าตอบแบบเอ็กซพลิติต

สมการที่ (1) (2) และ (3) จะถูกคำนวณในขอบเขตแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 1 และรายละเอียดของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณแสดงในตารางที่ 1 จำนวนกริดที่ใช้ในการคำนวณคือ 118 x 68 ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นพบว่า จำนวนกริดที่ใช้นี้มีความละเอียดพอสำหรับการคำนวณในสภาวะคงตัว โดยค่าสภาวะขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณถูกกำหนดเป็นดังนี้

- ทางเข้า: การไหลของกระแสสรีระแบบคลื่นไซน์ ดังสมการ $u = U(1 + A \sin 2\pi f t)$ โดยที่ U คือค่าความเร็วกระแสสรีระซึ่งมีค่าคงที่ f คือค่าความถี่ และ A คือค่าขนาดความแรงของคลื่น สำหรับอุณหภูมิที่ทางเข้าถูกกำหนดให้มีค่าเป็น 297 K
- ทางออก: สภาวะการไหลแบบพาออก (advective boundary condition)
- บนและล่าง: สภาวะสมมาตร (symmetry condition)
- ครีบลระบายความร้อน: สภาวะไม่มีการลื่นไถล (no slip condition) และค่าฟลักความร้อนคงที่สำหรับสมการอนุรักษ์พลังงาน

ตารางที่ 1 แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ

Re _d	d	H/2	Pr	Br = d/H	Lu	Ld	f	A
250							0.1-1.2	0.1
	1	8.75	0.7	5.7%	5.5	18	0.1-0.9	0.2-0.6
400							0.1-1.2	0.1



รูปที่ 1 ขอบเขตแบบจำลองการไหล

ในการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับปัญหาการถ่ายเทความร้อนนี้ จะทำการตรวจสอบที่ค่าคงที่ของเรย์โนลด์ (Reynolds number; Re_d = ud/V) ต่ำ ที่ Re_d = 250 และ 400 ซึ่งจากการทดลองโดย Ota และ Kon

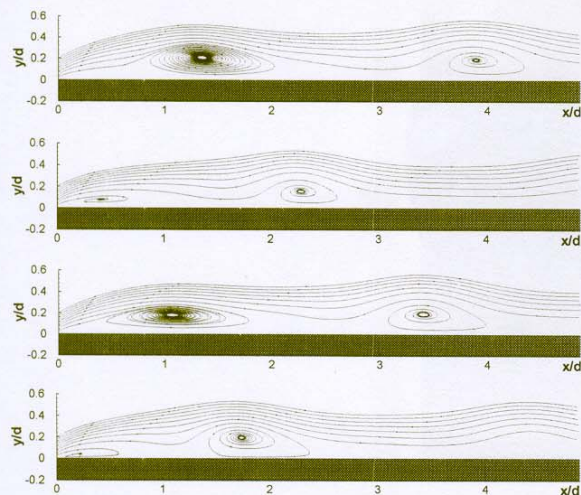
[4] พบว่าการไหลที่เกิดขึ้นเป็นการไหลในสภาวะคงตัว ความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งของการไหลถูกสมมุติว่ามีค่าน้อยมาก ดังนั้นค่าคุณสมบัติต่างๆ ของของไหลจึงถูกพิจารณาว่ามีค่าคงที่ อีกทั้งการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นที่ครีบอกกำหนดว่าเป็นการพาความร้อนแบบบังคับเพียงอย่างเดียว

3. ผลการคำนวณและการวิจารณ์ (Results and Discussions)

3.1 สนามการไหล (Flow Fields)

การศึกษาผลกระทบของกระแสการไหลเข้าที่เป็นจังหวะที่มีต่อขนาดของเขตการไหลหมุนวน ได้ถูกคำนวณที่ค่าคงที่ของเรย์โนลด์เท่ากับ 250 และ 400 ซึ่งเขตการไหลหมุนวนนี้ถูกวัดจากตำแหน่งการแตกแยกของการไหล (separation point) หรือจุดกำเนิดของแกน x-y ไปยังตำแหน่งที่กระแสการไหลตกกระทบพื้นผิวของครีบอก หรือตำแหน่งที่ค่าความเค้นเฉือน (shear stress) มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งระยะนี้ถูกเรียกว่า reattachment length ซึ่งใช้สัญลักษณ์เป็น X_r ดังรูปที่ 1

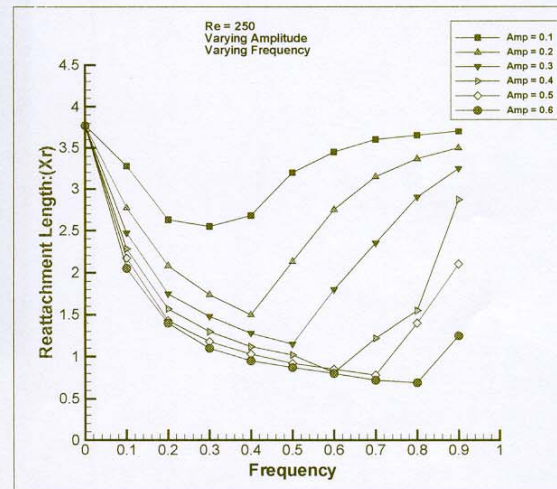
จากการคำนวณเชิงตัวเลขพบว่า การไหลที่เกิดขึ้นเป็นการไหลที่อยู่ในสภาวะไม่คงตัว เนื่องมาจากมีการแตกตัวของค่าออร์เทกซ์ขึ้น ซึ่งผลการคำนวณนี้คล้ายกับผลการคำนวณของ Djilali และ คณะ [5] ที่ค่า $Br = 20\%$ ซึ่งกล่าวได้ว่ากระแสการไหลเข้าเป็นจังหวะจะเป็นตัวสร้างความไม่เสถียรให้เกิดแก่กระแสการไหลหลักและจะเป็นตัวบังคับให้การไหลเข้าสู่สภาวะไม่คงตัว รูปที่ 2 เป็นการแสดงเส้นสายธารการไหล (streamline) ของของไหลเมื่อมีกระแสการไหลเข้าเป็นจังหวะ จากการสังเกตพบว่าออร์เทกซ์ที่ก่อตัวจะเคลื่อนที่ด้วยความถี่ค่อนข้างคงที่และจะแตกตัวแบบซ้ำ (periodic) เนื่องจากการไหลที่เกิดขึ้นเป็นแบบสภาวะไม่คงตัว ดังนั้นในการคำนวณครั้งนี้ค่า X_r จึงต้องทำการเฉลี่ยเทียบกับเวลา หรือ time-averaged reattachment length ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ $\bar{X}_r$



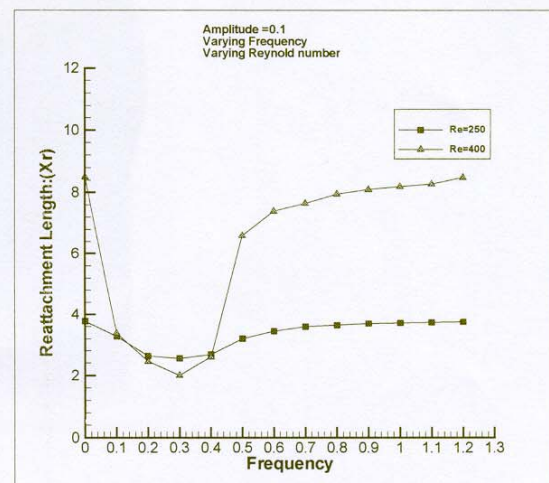
รูปที่ 2 เส้นสายธารการไหล (streamline) ในทุกห้วง 2 หน่วยเวลา:

$Re_d = 250$, $f = 0.2$ และ $A = 0.1$

จากการคำนวณพบว่าค่าความถี่และค่าขนาดความแรงของกระแสไหลเข้ามีผลอย่างมากต่อค่า $\bar{X}_r$ จากรูปที่ 3 ค่า $\bar{X}_r$ สำหรับกรณีที่ไม่มีผลกระทบของการไหลเข้าแบบเป็นจังหวะมีค่าเป็น 3.78d ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ผ่านมา [6] และจากผลการคำนวณเชิงตัวเลข [7] ในกรณีที่เรากำหนดให้กระแสการไหลที่ไหลเข้าเป็นจังหวะ พบว่าที่ค่าขนาดความแรงของกระแสเดียวกัน ค่า $\bar{X}_r$ มีค่าลดลงเมื่อค่าความถี่เพิ่มขึ้น ขนาดของ $\bar{X}_r$ จะลดลงจนมีขนาดเล็กที่สุดที่ค่าความถี่หนึ่ง เมื่อความถี่ถูกเพิ่มขึ้นจากค่านี้ เราพบว่าค่า $\bar{X}_r$ จะมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความถี่ที่ทำให้ขนาดของ $\bar{X}_r$ มีค่าน้อยสุดถูกกำหนดว่าเป็นค่าความถี่ที่เหมาะสม (optimal frequency) ในทำนองเดียวกันเราพบว่าค่าความถี่ที่เหมาะสมนี้ยังแปรผันกับค่าขนาดความแรงอีกด้วย เมื่อค่า Re_d ถูกเพิ่มเป็น 400 จากการเปรียบเทียบที่ค่าขนาดความแรงเท่ากับ 0.1 พบว่าลักษณะการลดลงและเพิ่มขึ้นของค่า $\bar{X}_r$ คล้ายกับกรณีที่ค่า $Re_d = 250$ สำหรับค่าขนาดความแรงที่ 0.1 นี้ ค่าความถี่ที่เหมาะสมของทั้งสองค่าของ Re_d อยู่ที่ประมาณ 0.3 ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 ผลกระทบของความถี่และความแรงที่มีผลต่อค่า X_r : $Re = 250$



รูปที่ 4 ผลกระทบของความถี่ที่มีผลต่อค่า X_r : $A = 0.1$

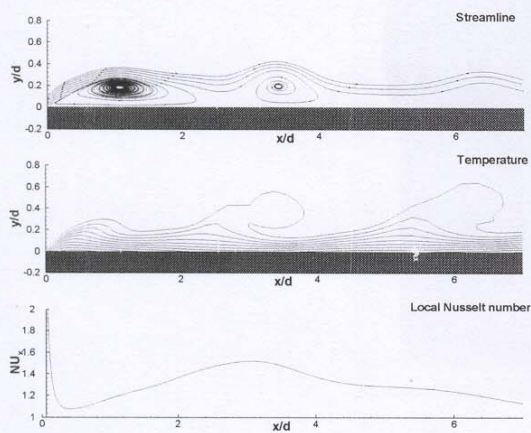
จากการวิเคราะห์ขนาดหรือความยาวของเขตการไหลหมุนวนกรณี $Re_d = 250$ พบว่าความยาวของเขตการไหลหมุนวนถูกทำให้ลดลงประมาณ 33% สำหรับค่าขนาดความแรง 0.1 และถูกทำให้ลดลงมากที่สุดถึง 82% สำหรับค่าขนาดความแรงเท่ากับ 0.6 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่มีค่า $Re_d = 400$ สำหรับค่าขนาดความแรงเท่ากับ 0.1 ความยาวของเขตการไหลหมุนวนถูกทำให้ลดลงถึง 76% อย่างไรก็ตามจากผลการคำนวณของทั้งสองกรณีของ Re_d เราพบว่าอัตราการหดตัวของเขตการไหลหมุนวนมีค่าสูงในห้วงความถี่ต่ำจนกระทั่งค่า $\bar{X}r$ อยู่ในตำแหน่งต่ำสุด จากนั้นแล้วค่า $\bar{X}r$ ก็จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นด้วยอัตราใหม่ที่ต่ำกว่าจนในที่สุด ค่า $\bar{X}r$ นั้นมีแนวโน้มที่จะกลับไปสู่ค่า $\bar{X}r$ เดิมที่ $f = 0$ และ $A = 0$

3.2 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfers)

สำหรับการถ่ายเทความร้อนของครีป อัตราการถ่ายเทความร้อนของครีปจะถูกวัดจากค่าคงที่ของนัทเซลเฉพาะตำแหน่ง (local Nusselt number; NU_x) ซึ่งค่า NU_x นี้จะแปรผันตามตำแหน่งในทิศทางของการไหล การวัดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยรวมของครีปจะวัดได้จากค่าคงที่เฉลี่ยของนัทเซล (mean Nusselt number: NU_{mean}) ดังสมการ

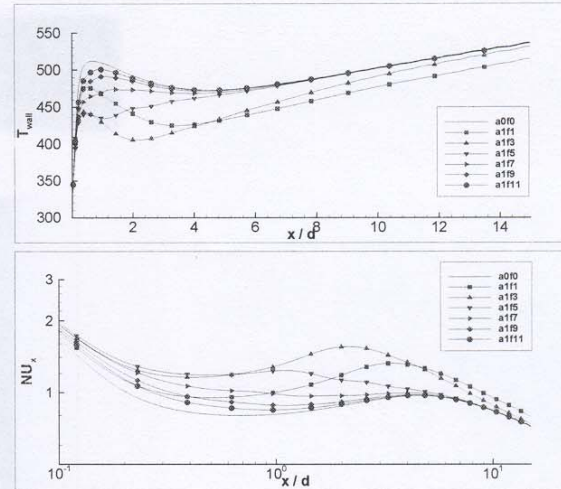
$$NU_{mean} = \int_{x_1}^{x_2} NU(x) dx \quad (4)$$

ขนาดของเขตการไหลหมุนวนตัวมีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีป รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเขตการไหลหมุนวนในรูปเส้นสายธารการไหล เส้นลวดลายของอุณหภูมิและการกระจายของค่าคงที่ของนัทเซลในขณะเวลานั้น ๆ พบว่าในบริเวณเขตการไหลหมุนวน ($x/d = 0-2$) ค่า NU_x มีค่าต่ำ ต่อจากนั้นเมื่อมีการแตกตัวและการเคลื่อนที่ของวอร์เทกซ์ขึ้น ($x/d \sim 3.5$) ค่า NU_x ก็จะมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากการผสมผสานเป็นอย่างดีระหว่างของไหลด้านบนกับของไหลด้านล่างอันเนื่องมาจากการหมุนของตัวมันเองทำให้ความร้อนที่ผิวถูกถ่ายเทออกมาได้มาก



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเขตการไหลหมุนวน เส้นลวดลายอุณหภูมิ และการกระจายของค่าคงที่ของนัทเซล: $Re_d = 250$, $A = 0.1$, $f = 0.2$

รูปที่ 6 แสดงการกระจายของอุณหภูมิที่ผิวของครีปและค่าคงที่ของนัทเซลเฉพาะตำแหน่งกรณี $Re_d = 250$ ที่ค่าขนาดความแรงเท่ากับ 0.1 โดยการแปรผันค่าความถี่จาก 0.0, 0.1, 0.3, ..., 1.1 พบว่าทุกค่าความถี่ ค่าคงที่ของนัทเซลเฉพาะตำแหน่ง (NU_x) มีค่าสูงสุดที่ประมาณตำแหน่ง $x/d = \bar{X}r$ ซึ่งคล้ายกับการคำนวณของ Djilali [7]



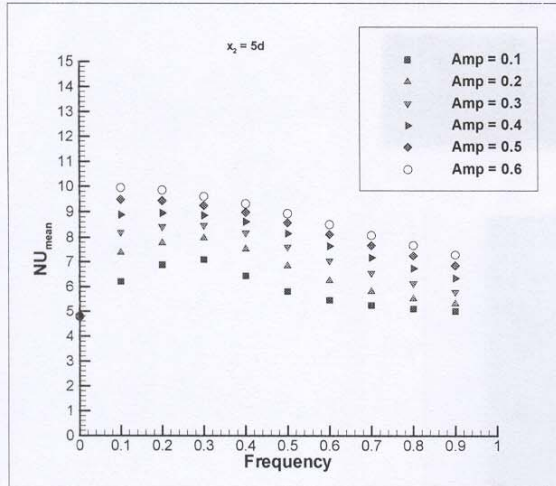
รูปที่ 6 การกระจายของค่าอุณหภูมิที่ผิวและค่าคงที่ของนัทเซลเฉพาะ ตำแหน่งที่ความถี่ต่าง ๆ กัน $Re_d = 250$, $A = 0.1$

จากการคำนวณพบว่าที่ $Re_d = 250$ ที่ค่าความถี่เดียวกันค่า NU_{mean} แปรผันโดยตรงตามค่าความแรง แต่ในการกลับกันเราพบว่าที่ค่าความแรงเดียวกันค่า NU_{mean} ไม่ได้แปรผันโดยตรงตามค่าความถี่ ค่า NU_{mean} จะเพิ่มตามค่าความถี่จนถึงจุดจุดหนึ่งจากนั้นก็ค่อย ๆ ลดลงเมื่อค่าความถี่ถูกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 7 นอกจากนี้แล้วเรายังพบว่าที่ค่าขนาดความแรงต่ำประมาณ 0.1-0.3 ค่าความถี่ที่ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยรวมสูงสุด (NU_{mean} มีค่าสูงสุด) นี้ก็คือค่าความถี่ที่เหมาะสมที่ทำให้ขนาดของ $\bar{X}r$ มีขนาดเล็กสุดนั่นเอง จากการคำนวณที่ $Re_d = 250$, $A = 0.1$ และ $f = 0.1-0.3$ พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 23% 30% 32.5% ตามลำดับ

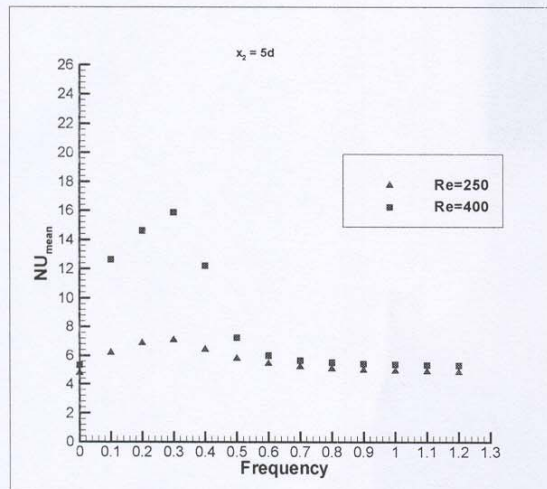
เมื่อค่าคงที่ของเรย์โนลส์มีค่าสูงขึ้น แรงเนื่องจากความเฉื่อย (inertia force) มีค่าสูง การไหลที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มที่จะเกิดความไม่เสถียรง่ายขึ้นถ้าเกิดการกระตุ้นหรือการรบกวนที่กระแสการไหลหลัก จากการคำนวณที่ $Re_d = 400$, $A = 0.1$ และ $f = 0.1-0.3$ พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 57.4% 63.2% 66.3% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับกรณีที่มี $Re_d = 250$ แล้วพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเท่าตัวที่ค่าความถี่และค่าขนาดความแรงเท่ากัน ลักษณะการกระจายของค่าคงที่เฉลี่ยของนัทเซล ค่าความถี่เหมาะสมของกรณี $Re_d = 400$ มีความคล้ายคลึงกับกรณี $Re_d = 250$ ดังแสดงในรูปที่ 8

จากผลนี้เองสามารถวิเคราะห์ได้ว่าในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีปค่าขนาดของความถี่มีผลเป็นอย่างมาก

ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าความเร็วที่ไหลเข้ามีค่าสูงกว่าค่าความเร็วกระแสอิสระปกติซึ่งเปรียบเสมือนกับการเพิ่มค่า Re_d ให้กับกระไหลนั้นเอง ในทางตรงกันข้ามค่าความถี่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในแค่ช่วงความถี่ต่ำเท่านั้น



รูปที่ 7 ค่าคงที่เฉลี่ยของนัทเซลจากตำแหน่ง $x_1 = 0$ ถึง $x_2 = 5d$ ที่ความถี่และค่าความเข้มต่างกัน: $Re_d = 250$



รูปที่ 8 ค่าคงที่เฉลี่ยของนัทเซลจากตำแหน่ง $x_1 = 0$ ถึง $x_2 = 5d$ ที่ค่าความถี่ต่างกัน, $A = 0.1$

4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ(Conclusion and Future Suggestion)

การคำนวณเชิงตัวเลขในสองมิติในสภาวะไม่คงตัวผ่านครีบลูกเปลี่ยนความร้อนที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมถูกคำนวณที่ค่าคงที่ของเรย์โนลด์เท่ากับ 250 และ 400 ที่มีกระแสการไหลเข้าเป็นจังหวะที่มีรูปแบบเป็นคลื่นไซน์ (sinusoidal wave) โดยมีตัวแปรสำคัญของการกระแสการไหลเข้าที่เป็นจังหวะคือค่าความถี่และค่าขนาดความแรง จากการคำนวณพบว่ากระแสการไหลเข้าแบบเป็นจังหวะจะเป็นตัวก่อให้เกิดความไม่เสถียรขึ้น ส่งผลให้การไหลที่เกิดเปลี่ยนจากสภาวะคงตัวเป็นสภาวะไม่

คงตัว จากการคำนวณพบว่าค่าความถี่และค่าขนาดความแรงมีผลอย่างมากต่อขนาดของเขตการไหลหมุนวน ที่ค่าขนาดความแรงเท่ากับ 0.1 และค่าความถี่เหมาะสม ($f = 0.3$) ค่าความยาวของเขตการไหลหมุนวนถูกทำให้ลดลงสูงสุดถึง 33% สำหรับ $Re_d = 250$ และ 76% สำหรับ $Re_d = 400$

นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความถี่และค่าขนาดความแรงมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยรวม สำหรับค่าขนาดความแรงต่ำ ($A = 0.1-0.3$) อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยรวมมีค่าสูงสุดที่ค่าความถี่เหมาะสม ที่ $Re_d = 250$, $A = 0.1$ และ $f = 0.1-0.3$ พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 23% 30% 32.5% ตามลำดับ และที่ $Re_d = 400$, $A = 0.1$ และ $f = 0.1-0.3$ พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 57.4% 63.2% 66.3% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเท่าตัวเมื่อเทียบกับกรณีที่ $Re_d = 250$ ที่ความถี่และขนาดความแรงเท่ากัน งานวิจัยต่อไปที่น่าสนใจคือศึกษาต่อเนื่องจากงานวิจัยในครั้งนี้ในกรณีที่ค่า Re_d ของการไหลมีค่าสูงขึ้น ซึ่งการไหลจะเป็นแบบสภาวะไม่คงตัวก่อนที่จะถูกกระตุ้นด้วยกระแสการไหลเข้าเป็นจังหวะ

7. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgment)

ขอขอบคุณกองวิศวกรรมเครื่องกล ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าในการเอื้อเฟื้อสถานที่ งานวิจัยในครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยประจำปี 2545

เอกสารอ้างอิง (Reference)

1. Suksangpanomrung A., "Unsteady convective heat transfer over a bluff plat", Proceeding of the ME-NETT 14th Conference, Chiang Mai, Thailand, p. 1-7, 2000.
2. Hiller R. and Cheery N.J., "The effect of free stream turbulence on separation bubbles", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 8:49-58,1981.
3. Houligan K., Welch L.W., Thompson M.C., Cooper P.I. and Welsh M.C., "Augmented forced convection heat transfer in separated flow around a blunt flat plate", *Experimental Thermal and Fluid Sciences*, 4:182-191,1991.
4. Ota T. and Kon N., "Heat transfer in the separated and reattached flow on a blunt flat plate", *Journal of Heat Transfer*, 94:459-462, 1974.
5. Djilali N., Neumann J., Bouhadji A., Boisson H. and Peneau F., "Effect of periodic upstream oscillations on separated flow", *Proc. 8th Conference of the CFD Society of Canada*, p.421-428, Montreal, 2000.
6. Lane J.C. and Loehrke R.I., "Leading edge separation from a blunt plate at low Reynolds number", *Transaction of ASME, Journal of Fluid Engineering*, 102:494-496, 1980.
7. Djilali N., "Force laminar convection in an array of stacked plates", *Numerical Heat Transfer Part A*, 25:393-408,1994.