

การศึกษาการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของซีพบน
แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ปริญญานิพนธ์
ของ
เชิน คำอาจ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
เมษายน 2551

การศึกษาการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของซีพบน
แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ปริญญานิพนธ์
ของ
เชิน คำอาจ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
เมษายน 2551
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การศึกษาการไหลเข้าแบบสลายกลับขึ้นลงที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของซีพบน
แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

บทคัดย่อ
ของ
เชิน คำอาจ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
เมษายน 2551

เชิน คำอาจ. (2551). การศึกษาการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน

ของชิพบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์. ปรินซ์นิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล).

กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

คณะกรรมการควบคุม: พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง,

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรณวิไล ไกรเพ็ชร เอวานส์

ปรินซ์นิพนธ์นี้มุ่งศึกษาและวิจัยการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของชิพ 5 ตัวที่ถูกจัดวางแบบแถวเรียงตรงกันบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ประกอบด้วยค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของโดเมนการคำนวณ ค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิพต่อความยาวของชิพที่มีต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน และค่าความถี่ของการส่ายสลับ โดยงานวิจัยนี้ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อนในการคำนวณ โดยจะทำการคำนวณในสองและสามมิติ ทั้งสภาวะการไหลคงตัวและการไหลไม่คงตัว โดยจะทำการจัดวางชิพแบบแถวเรียงตรงกันจำนวน 5 ตัวบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการนำความร้อนเกิดขึ้นในรูปของฟลักความร้อน ผลที่คำนวณได้จะทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ใกล้เคียง และผลการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับกรณีที่มีการไหลเข้าแบบสม่ำเสมอ

จากผลการศึกษา พบว่าค่าตัวแปรทั้งหมดที่ทำการศึกษามีผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชิพทั้งการไหลเข้าแบบสม่ำเสมอและการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ซึ่งพบว่าการเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์เปรียบเสมือนการเพิ่มความไร้เสถียรภาพ ส่งผลให้ชิพมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นทั้งในสภาวะการไหลคงตัวและไม่คงตัว รวมถึงผลกระทบของแนวแกนในมิติที่สาม จากการคำนวณพบว่าการไหลในสามมิติที่ $Re_B = 920$, $Br = 25\%$, $SW = 42\%$ และ $f = 2$ มีค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้น 58.3% และ 155.1% เมื่อเทียบกับการไหลในสภาวะคงตัวใน 2 มิติ และการทดลองที่มีการไหลเข้าแบบสม่ำเสมอตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าความไร้เสถียรภาพนี้ขึ้นอยู่กับความถี่ของการส่ายอีกด้วย ค่าความถี่ที่เหมาะสมของการส่ายสลับที่ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ดีอยู่ที่ประมาณ $f = 2-2.5$ ขึ้นอยู่กับลักษณะการไหล

คำสำคัญ: การถ่ายเทความร้อนผ่านชิพ/ การไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลง

The Study of the Effect of Incoming Swing Flow in Heat Transfer of Chips
on the Printed Circuit Board

AN ABSTRACT
BY
CHERN COMARCH

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Engineering Degree in Mechanical Engineering
at Srinakharinwirot University

April 2008

Chern Comarch. (2008). *The Study of the Effect of Incoming Swing Flow in Heat Transfer of Chips on the Printed Circuit Board.* , Master Thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering).
Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee:
Dr. Anotai Suksangpanomrung, Asst. Prof. Dr. Wanwillai Kraipech Awans.

The objective of this research is to study the incoming swing flow parameters that enhance the heat transfer rate of 5 in-lined electronic chips in a printed electronic board. These parameters consist of the Reynolds number, blockage ratio, the ratio of chip spacing and chip length and the frequency of swing flow. The computational fluids dynamics technique is used to investigate the flow and heat transfer. The simulations were in two and three-dimensional steady and unsteady cases. The results obtained from the simulation were compared with related experiment and numerical results.

From the simulations, it found that all parameters effect the heat transfer rate of chips, especially the Reynolds number. Increasing the Reynolds number means increasing the instability of the flow and hence vorticity. These will enhance the heat transfer rate of both steady and unsteady flow cases. From the three-dimensional simulation at $Re_B = 920$, $Br = 25\%$, $S/W = 42\%$ and $f = 2$, the time-averaged overall Nusselt number is increased 58.3% and 155.1% compared to the two-dimensional and experimental with incoming uniform cases. Furthermore, the instability is also depended on the frequency of the swing flow. The appropriate frequency is found to be around $f = 2 - 3$ depending on the cases

Keywords: The heat transfer of chips / The incoming swing flow

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการไหลเข้าแบบสายสลับขึ้นลงที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของซีพ

บนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ของ

นาย เชน คำอาจ

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญศิริ จีระเดชากุล)

วันที่ เดือน พ.ศ. 2551

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ประธานประธาน

(พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง) (รองศาสตราจารย์ ดร. จารุวัตร เจริญสุข)

..... กรรมการ กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรณวิไล ไกรเพชร เอวานส์) (พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรณวิไล ไกรเพชร เอวานส์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชัย อัมมมงคล)

ประกาศคุณูปการ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. พ.ท. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผศ.ดร.วรรณวิไล ไกรเพชร เอวานส์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ช่วยกรุณาให้แนวคิดตลอดจนทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัยนี้ด้วยดีเสมอมา และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ. ดร. จารุวัตร เจริญสุข และ ผศ.ดร.พิชัย อภิรมงคล ซึ่งให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการศึกษาวิจัยเป็นอย่างดี และช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้นในการทำวิทยานิพนธ์จนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิจิต บัวแก้ว ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะขั้นตอนวิธีการทำวิทยานิพนธ์ และคณะท่านอาจารย์ จากกองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า รวมทั้งขอขอบคุณ ผู้วิจัย ผู้เขียนตำราวิชาการทุกท่านในบทบรรณานุกรมที่เป็นแหล่งข้อมูลให้ความรู้ทางด้านทฤษฎีและขอขอบคุณอย่างสูงกับเจ้าสำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้กรุณาเอื้อเฟื้อโปรแกรมการคำนวณ Fluent อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างดี

ท้ายสุดผู้วิจัยขอขอบพระคุณ พ่อ แม่ พี่ ที่ได้อบรมสั่งสอนรวมทั้งครอบครัวข้าพเจ้า ที่ให้กำลังใจที่ดี และขอขอบคุณ เพื่อนๆ ที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในการทำวิจัยนี้

เงิน คำอาจ

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่จะได้รับการจากการวิจัย.....	4
2 ผลงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	21
ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล.....	21
การคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล.....	22
การศึกษาความเป็นอิสระของกริด.....	37
การไหลแบบสลายสลับขึ้นลง.....	43
กรณีศึกษา.....	47
การวิเคราะห์สภาวะการไหล.....	47
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	49
การวิเคราะห์คุณลักษณะการไหลในสภาวะการไหลคงตัวและไม่คงตัว.....	49
การไหลสภาวะคงตัวใน 2 มิติ.....	52
ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขเรย์โนลด์.....	52
ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูง ของโดเมนการคำนวณ.....	55
ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระยะห่าง ของชิพต่อความยาวของชิพ.....	57

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
4 (ต่อ)	
ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ ของกระแสการไหลเข้าแบบ สายสลับน้าลง	60
การไหลสภาวะไม่คงตัวใน 2 มิติ	62
ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขเรย์โนลด์	63
ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความสูง ของชีพต่อความสูงโดเมนการคำนวณ	64
ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระยะห่าง ของชีพต่อความยาว ของชีพ	66
ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ ของกระแสการไหลเข้าแบบสายสลับน้าลง	67
การไหลสภาวะไม่คงตัวใน 3 มิติ	69
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	73
สรุปผลงานวิจัย	73
การไหลสภาวะคงตัวใน 2 มิติ	73
การไหลสภาวะไม่คงตัวใน 2 มิติ	74
การไหลสภาวะไม่คงตัวใน 3 มิติ	74
ข้อเสนอแนะ	74
ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยนี้	74
ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	75
บรรณานุกรม	76
ภาคผนวก	81
อภิธานศัพท์	82
ประวัติย่อผู้วิจัย	85

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 รูปสมการส่งถ่ายสำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อน.....	25
2 ข้อมูลสำหรับการคำนวณหาผลกระทบของกริดใน 2 มิติ.....	38
3 ผลการคำนวณของกริดใน 2 มิติ.....	39
4 ข้อมูลตัวแปรสำหรับการคำนวณผลกระทบของกริดใน 3 มิติ.....	41
5 ค่าตัวแปรที่เกิดจากผลกระทบของกริดในการคำนวณของแบบจำลอง การไหลใน 3 มิติ.....	41
6 ข้อมูลการคำนวณสำหรับการศึกษาคุณลักษณะการไหล.....	50

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 การจัดวางชิพจำลองบนแผงวงจรและสัญลักษณ์ต่างๆ.....	2
2 การถ่ายเทความร้อนจากชิพอุณหภูมิเนียมจำลองบนแผงวงจร.....	16
3 การเปลี่ยนแปลงความเร็วและอุณหภูมิของของไหลบนแผ่นวัตถุ.....	17
4 แสดงแนวคิดของความแน่นอนและความแม่นยำ.....	24
5 ปริมาตรควบคุมสำหรับปัญหาสองมิติ.....	26
6 พลังงานการพาและพลังงานการแพร่บนผิวของปริมาตรควบคุม.....	30
7 การจัดวางตัวแปรแบบ แบบกริดเดียวกัน $\rightarrow = u$, $\uparrow = v$, $\circ =$ ตัวแปรอื่นๆ...	33
8 โดเมนการคำนวณกริดชิพ 5 ตัว.....	38
9 การจัดวางกริดบนโดเมนการคำนวณ.....	38
10 ค่าตัวเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ ณ ตำแหน่งผนังด้านบนของชิพ.....	39
11 ภาพขยายค่าตัวเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ของชิพตัวที่หนึ่ง.....	40
12 การจัดวางกริดบนโดเมนการคำนวณในบริเวณด้านทางเข้า.....	40
13 ภาพการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลอง $Re_B=518$, $H/B=4$	42
14 แสดงการระบายความร้อนที่ผิวของชิพ 3 มิติ ขนาดกริด 7.02×10^5 , $Re_B=518$, $H/B=4$	42
15 กราฟแสดงการไหลแบบส่ายสลับขึ้นลงที่ค่า $Re_B=518$, $Br=25\%$, $SW=42\%$	44
16 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงที่ค่า $Re_B=518$, $Br=25\%$, $SW=42\%$ ที่ $245.22 \leq t' \leq 245.50$	46
17 คุณลักษณะการไหลแบบคงตัวที่ค่า $Re_B=130$, $Br=25\%$, $SW=42\%$ เวลา $t' = 154.2$	51
18 คุณลักษณะการไหลแบบคงตัวที่ค่า $Re_B=500$, $Br=25\%$, $SW=42\%$ เวลา $t' = 115.7$	51
19 คุณลักษณะการไหลแบบคงตัวที่ค่า $Re_B=1000$, $Br=25\%$, $SW=42\%$ เวลา $t' = 422.3$	51
20 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบค่า Re_B ที่ค่า $Br = 25\%$, $SW = 42\%$ และ $f = 2$	52
21 ค่าตัวเลขนัสเซลล์เฉพาะตำแหน่งของที่ค่า $Re_B=130$, $Br=25\%$, $SW=42\%$ และ $f=2$	53

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
22 การกระจายตัวของอุณหภูมิในการคำนวณผลกระทบค่า Br ต่างกันที่ค่า $Re_B=130$, $Br=25\%$, $SW=42\%$ และ $f=2$, (A),(C) การคำนวณในสภาวะการไหลสม่ำเสมอ (B),(D) แสดงการคำนวณในสภาวะการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลง.....	54
23 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัยสเกลต์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบค่า Br ที่ค่า $Re_B = 130$, $Br = 25\%$, $SW = 42\%$ และ $f = 2$	56
24 การกระจายตัวของอุณหภูมิในการคำนวณผลกระทบจากค่า Br ที่ค่า $Re_B=130$, $SW=42\%$ และ $f = 2$	56
25 เวกเตอร์ความเร็วและการกระจายตัวของอุณหภูมิในพื้นที่ระหว่างชิฟต์ตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ที่ค่า $Re_B=130$, $Br=25\%$ และ $f = 2$	58
26 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัยสเกลต์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบค่า SW ที่ค่า $Re_B=130$, $Br=25\%$ และ $f = 2$	59
27 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัยสเกลต์เฉพาะตำแหน่งของการคำนวณผลกระทบค่าความถี่ใน สภาวะการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงที่ค่า $Re_B=130$, $Br=25\%$ และ $SW=42\%$	60
28 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัยสเกลต์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบค่าความถี่ในสภาวะ การไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงที่ค่า $Re_B=130$, $Br=25\%$ และ $SW=42\%$	61
29 การกระจายตัวของอุณหภูมิในการคำนวณผลกระทบค่าความถี่ในสภาวะการไหล แบบส่ายสลับขึ้นลงที่ค่า $Re_B=130$, $Br=25\%$ และ $SW=42\%$	62
30 ค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ตัวเลขนัยสเกลต์ของการไหลสภาวะไม่คงตัวที่ค่า $Br=25\%$, $SW=42\%$ และ $f = 2$	63
31 ค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัยสเกลต์ของชิฟต์แต่ละตัวของการคำนวณผลกระทบ ค่า Br ที่ค่า $SW = 42\%$, $Re_B = 920$ และ $f = 2$	64
32 ค่าเฉลี่ยของตัวเลขนัยสเกลต์เฉพาะที่ ที่ค่า Br ต่างกัน สำหรับการไหลแบบส่ายสลับ ขึ้นลงที่ค่า $Re_B = 920$, $SW = 42\%$ และ $f = 2$	65
33 ค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัยสเกลต์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบของ ค่า SW ที่ค่า $Br = 25\%$, $Re_B = 920$ และ $f = 2$	66
34 ค่าเฉลี่ยต่อเวลาของค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนชิฟต์แต่ละตัวสำหรับการคำนวณที่ ค่า $Re_B = 920$, $Br = 25\%$, $SW = 42\%$ และ $f = 2$	67

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
35 ค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัยเซลล์ที่บนชิพแต่ละตัว สำหรับการคำนวณผลกระทบ	
ค่าความถี่ ที่ค่า $Re_B = 920$, $Br = 25\%$ และ $SW = 42\%$	68
36 ค่าเฉลี่ยต่อเวลาของค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนชิพแต่ละตัว สำหรับการคำนวณที่	
ค่า $Re_B = 920$, $Br = 25\%$ และ $SW = 42\%$	68
37 การกระจายของอุณหภูมิในระนาบ x-z บนผิวของชิพทั้งห้าตัวที่ค่า $Re_B = 920$,	
$Br = 25\%$ และ $SW = 42\%$	70
38 การกระจายของอุณหภูมิและกระแสการไหลวนในระนาบ x-z บนผิวของชิพทั้งห้าตัว	
ที่ค่า $Re_B = 920$, $Br = 25\%$, $SW = 42\%$ และ $f = 2$	70
39 การกระจายของอุณหภูมิและกระแสการไหลวนในระนาบ x-z บนผิวของชิพทั้งห้าตัว	
ที่ค่า $Re_B = 920$, $Br = 25\%$, $SW = 42\%$ และ $f = 2$	71
40 ผลกระทบของค่าความถี่ที่มีต่อค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัยเซลล์โดยรวมที่ค่า	
$Re_B = 920$, $Br = 25\%$, $SW = 42\%$ และ $f = 2$	72

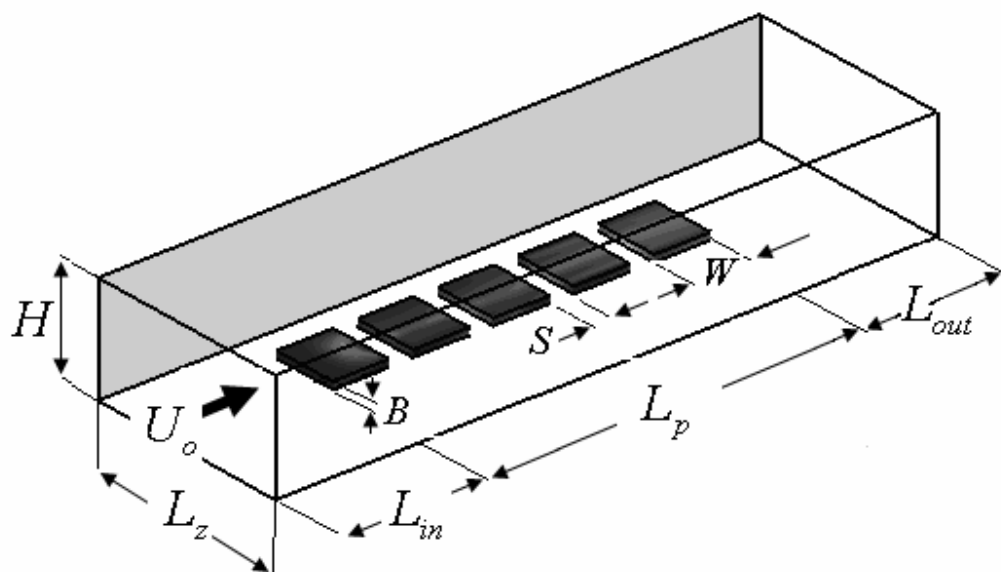
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

วิวัฒนาการในด้านการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้มีความพยายามในการลดขนาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้เล็กลง และเพิ่มความสามารถในการทำงานให้สูงขึ้น เพื่อให้เกิดความสอดคล้องกับการใช้งานทำให้เกิดการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกกันว่า ชิป (chip) ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่จัดอยู่ในกลุ่มที่มีการปลดปล่อยความร้อนสูง ความร้อนนี้จะมีค่ามากหรือน้อย นอกจากขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าที่ชิปต้องการแล้วยังมีระยะเวลาการทำงาน การรับความร้อนจากแผงวงจรอื่นที่ติดกัน และจากอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมรอบๆ ถ้าการจัดการในเรื่องของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการทำงานไม่มีประสิทธิภาพดีเพียงพอ อาจทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สั้นลง หรือเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นได้ การวิจัยเพื่อค้นหาวิธีการที่จะลดอุณหภูมิของอุปกรณ์จึงมีความสำคัญ เพื่อเป็นส่วนช่วยให้อุปกรณ์ทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ และยืดอายุการใช้งาน

วิธีการระบายความร้อนของอุปกรณ์บนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยอากาศ เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากมีราคาถูกและใช้งานง่าย แต่อากาศยังมีความสามารถในการระบายความร้อนไม่ค่อยดีนัก เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของมันเอง จากงานวิจัยที่ผ่านมา นักออกแบบมักมุ่งเน้นการออกแบบรูปทรงและรูปแบบของการจัดวางชิปในลักษณะต่างๆ เพื่อให้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ดีมีขนาดที่เหมาะสมกับการใช้งาน งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาการไหลของอากาศซึ่งเป็นปัจจัยเสริม เพื่อช่วยให้อากาศทำการระบายความร้อนบนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ดีขึ้น วิธีที่ใช้ศึกษาปัจจัยเสริมดังกล่าว เช่น วิธีวิเคราะห์เพื่อหาผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution) การสร้างแบบจำลองเพื่อทดลองการไหลและการถ่ายเทความร้อน และระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข สำหรับระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลขนั้น โดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวช่วยในการหาผลเฉลยในปัญหาของการไหล และการถ่ายเทความร้อนหรือที่เรียกว่าระเบียบวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics; CFD) จะมีความสะดวกกว่า 2 วิธีแรกเนื่องจากระบบสมการเชิงอนุพันธ์ที่ครอบคลุมปัญหาการไหล และการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear) จึงทำให้มีความยุ่งยากที่จะวิเคราะห์เพื่อหาผลเฉลยแม่นยำตรง และการสร้างต้นแบบเพื่อทดลองต้องใช้เวลา มีค่าใช้จ่ายสูง การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขจึงทำได้จำกัด



ภาพประกอบ 1 การจัดวางซีพจำลองบนแผงวงจรและสัญลักษณ์ต่างๆ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการศึกษา ปัจจัยที่ช่วยส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนของซีพ ดังภาพประกอบ 1 ได้แก่ลักษณะการไหลของอากาศแบ่งเป็น 2 กรณีคือ การไหลเข้าแบบสม่ำเสมอ (Uniform flow) และการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลง (Swing flow) โดยจัดวางซีพจำลองแบบแถวเรียงตรงกัน (In-line) บนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ใช้ระเบียบวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล บนพื้นฐานระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume method) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป FLUENT คำนวณผลลัพธ์ที่ได้จากค่าปัจจัยเหล่านี้ พร้อมทั้งทำการตรวจสอบผลการคำนวณ กับผลการทดลองของงานวิจัยที่ผ่านมา⁽²⁾ และนำเสนอผลการวิจัยในรูปความสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งทำให้การวิเคราะห์ผลทางด้านการถ่ายเทความร้อน มีความถูกต้องเพิ่มขึ้นอีกทั้งผลการวิจัยที่ได้ก็จะเป็นแบบอย่าง หรือแนวทางอย่างง่ายในการออกแบบการไหลของอากาศให้มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นภายใต้ข้อจำกัดในการจัดวางซีพ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศ และการถ่ายเทความร้อนของซีพจำลอง ในกรณีจัดวางซีพจำลองแบบแถวเรียงตรงกัน และมีความเร็วของการไหลเข้าแบบสม่ำเสมอและการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลง

1.2.2 วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของซีพจำลองได้แก่ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re_B) ค่าอัตราส่วนความสูงของซีพต่อความสูงของโดเมนการคำนวณ (Br) ค่าอัตราส่วนระยะห่างของซีพต่อความยาวของซีพ (SW) ผลของการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงและความถี่ของการส่าย (f)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล และการถ่ายเทความร้อน โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป FLUENT ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณ กับผลการทดลองและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หรือใกล้เคียง

1.3.2 การคำนวณทำการจำลองการไหลในแบบจำลอง 2 และ 3 มิติ

1.3.3 พิจารณาเฉพาะการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) เท่านั้น

1.3.4 ซีพจำลองปลดปล่อยค่าฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) อย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง

1.3.5 การคำนวณใช้ซีพจำลองจำนวน 5 ตัว โดยมีขนาดเท่ากันทุกตัว

1.3.6 จะพิจารณากรณี การไหลเข้าแบบสม่ำเสมอและการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัยจะทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.4.1 รวบรวมข้อมูล ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการระบายความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

1.4.2 กำหนดลักษณะของปัญหาและสร้างแบบจำลองกำหนดลักษณะของรูปร่างของซีพจำลองและสร้างรูปจำลองบนโปรแกรมออกแบบทางพลศาสตร์ของไหลพร้อมทั้งปรับเลือกขนาดและจำนวนกริดที่เหมาะสม (Grid independent)

1.4.3 ตรวจสอบเงื่อนไขการคำนวณเชิงตัวเลขกับผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สร้างสมการเชิงอนุพันธ์ของความต่อเนื่อง สมการเชิงอนุพันธ์ของโมเมนตัม สมการเชิงอนุพันธ์ของพลังงาน ตามข้อสมมติฐานของการคำนวณ และทำการตรวจสอบการคำนวณ กับผลการทดลองของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นการพิสูจน์ยืนยันผลการคำนวณ

1.4.4 ทำการคำนวณเชิงตัวเลขการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนแบบจำลองที่ต้องการวิจัย ทำการคำนวณเชิงตัวเลขจากแบบจำลองที่ต้องการวิจัยโดยการแปรผันค่าปัจจัยต่างๆ ตามที่ระบุในวัตถุประสงค์

1.4.5 วิเคราะห์ผลการคำนวณจากแบบจำลองนำข้อมูลจากการคำนวณมาทำการวิเคราะห์ผล และแสดงค่าในรูปพารามิเตอร์ไร้หน่วย

1.4.6 สรุปผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ และเสนอข้อควรปรับปรุงที่เกิดจากการวิจัยพร้อมทั้งชี้ประเด็นที่น่าสนใจที่ควรทำการวิจัยต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับการวิจัย

1.5.1 ทำให้ทราบความสัมพันธ์ของค่าปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของซีพบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

1.5.2 เพื่อการพัฒนาลักษณะการไหลที่มีประสิทธิภาพต่อการถ่ายเทความร้อน บนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ในกรณีจัดวางซีพแบบแถวเรียงตรงกันให้มีความเหมาะสม

1.5.3 เป็นองค์ความรู้ เพื่อการวิจัยด้านการถ่ายเทความร้อนบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

บทที่ 2

ผลงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะทำการทบทวนผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในด้านการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านมาและนำเสนอทฤษฎีต่างๆ โดยแบ่งเป็นหัวข้อดังนี้ ในหัวข้อ 2.1 ทบทวนผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หัวข้อ 2.2 นำเสนอทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วย สมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อน หลักการของการถ่ายเทความร้อน และพารามิเตอร์ไร้มิติสำหรับการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อน

2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ การถ่ายเทความร้อนของชิพบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านมา ได้แก่

Davalath, J.; & Bayazitoglu, Y.⁽³⁾ ศึกษาการพาความร้อนแบบบังคับ โดยทำการแปรผันค่าระยะห่างระหว่างชิพจำลองจำนวน 3 ตัว ซึ่งได้กำหนดให้ค่าความสูงของช่องอากาศและขนาดความสูงของชิพจำลองมีค่าคงที่ การศึกษาใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลขโดยระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมภายในแบบจำลอง 2 มิติ การไหลแบบราบเรียบ การไหลอยู่ในสภาวะสมำเสมอ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 100 ถึง 1500 โดยใช้ความยาวจำเพาะของสมการเป็นความสูงของช่องอากาศ ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มค่าระยะห่างระหว่างชิพจำลองจะเพิ่มขนาดของกระแสหมุนวน ซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อนบนชิพจำลองดีขึ้น และค่าความร้อนของชิพจำลอง จะลดลงเป็นฟังก์ชันของค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ซึ่งค่าตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt number) สูงสุดเกิดที่ตำแหน่งมุมด้านหน้าของชิพจำลองแต่ละตัว

Jubran, B. A.; Swiety S. A.; & Hamdan M.A.⁽³⁸⁾ ศึกษาการพาความร้อนพร้อมทั้งค่าความดันตกคร่อมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปทรงและขนาดของชิพจำลอง ซึ่งทำจากวัสดุอลูมิเนียมจำนวน 8 แถว แถวละ 5 วางบนแผ่นไม้ซึ่งไม่คิดค่าการสูญเสียความร้อน รูปทรงที่ใช้ศึกษา ได้แก่ รูปทรงสี่เหลี่ยมและรูปทรงกระบอก โดยแบ่งเป็นกลุ่มขนาดความสูงที่ 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ทำการทดลองภายในอุโมงค์ลม ค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 1690 ถึง 2625 โดยใช้ความยาวจำเพาะของสมการเป็นความยาวของชิพจำลอง โดยรูปทรงสี่เหลี่ยมมีค่าตัวเลข นัสเซลท์เพิ่มขึ้น 40% และรูปทรงกระบอกที่ 28% จากการเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ใช้ขนาดปกติ และสำหรับผลของค่าความดันตกคร่อมชิพจำลองทรงสี่เหลี่ยมมีค่ามากกว่ารูปทรงกระบอก

Leung, C.W.; Kang, H. J.; & Probert S.D.⁽⁴⁾ ศึกษาการพาความร้อนและค่าความดันตกคร่อมของชิพจำลอง ซึ่งทำมาจากทองแดงติดตั้งบนแผงวงจร จำนวน 12 ตัว วางแบบแถวเรียงตรงกัน โดยเปลี่ยนค่าความสูงของช่องอากาศ ความยาวของตัวชิพจำลอง และให้ระยะห่างชิพจำลองมีค่าสม่ำเสมอตลอด ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ อยู่ในช่วง 510 ถึง 2050 โดยใช้ความยาวจำเพาะของสมการเป็นช่องว่างระหว่างความสูงของชิพจำลองกับความสูงของช่องอากาศ การศึกษาได้ทำโดยวิธีปริมาตรสืบเนื่องใน 2 มิติการไหลอยู่ในสภาวะสม่ำเสมอ อากาศที่ไหลเข้าพิจารณาเป็นการไหลราบเรียบ ผลการศึกษาพบว่า ชิพจำลองตัวแรกมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูง และจะลดลงต่อเนื่องจนถึงชิพจำลองตัวที่ 6 ถึงตัวที่ 9 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนใกล้เคียงกัน และเริ่มมีแนวโน้มที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้นอีกที่ชิพ 2 ตัวสุดท้าย เนื่องจากผลการหมุนวนที่ทางออก และผลการคำนวณเชิงตัวเลขแสดงให้เห็นกระแสหมุนวน อันมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของชิพจำลอง

Wu, H.W.; Wang, S.W.; & Peng, S.W.⁽⁶⁾ ศึกษาถึงผลของการติดตั้งแผ่นบังคับทิศทางการไหลของอากาศ เพื่อการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของชิพจำลองจำนวน 5 ตัว ที่วางแบบแถวเรียงตรงกัน โดยทดลองติดตั้งแผ่นบังคับทิศทางไว้ในตำแหน่งด้านหน้า และด้านหลังของชิพจำลองตัวแรก สูงจากผิวของชิพจำลอง 12 มิลลิเมตร มุมที่ศึกษาคือ 30, 60 และ 90 องศา การศึกษาใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลขโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายในแบบจำลอง 2 มิติ การไหลแบบราบเรียบ ในสภาวะไม่สม่ำเสมอ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ อยู่ในช่วง 660 ถึง 1320 โดยใช้ความยาวจำเพาะของสมการเป็นความสูงของช่องอากาศ ผลการศึกษาพบว่า การติดตั้งแผ่นบังคับทิศทางการไหลไว้ตำแหน่งด้านหน้าของชิพจำลองตัวแรก และการใช้แผ่นบังคับทิศทางการไหล จะให้ค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์ สูงกว่าแบบจำลองที่ไม่ได้ติดตั้งแผ่นบังคับทิศทางการไหล ส่วนมุมของแผ่นบังคับทิศทางการไหลที่ 60 องศา จะมีค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์สูงกว่า 2 มุมที่เหลือ ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ชิพจำลองตัวที่หนึ่งและลดลงต่อเนื่องจนถึงชิพจำลองตัวสุดท้าย

Timothy, Yong J.; & Vafai, Kambiz.⁽⁷⁾ ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลง ความสูง ความกว้าง ระยะห่าง ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และพื้นที่รับความร้อนของชิพจำลองโดยแบ่งออกเป็น 15 กรณีวางแบบแถวเรียงตรงกัน การศึกษาใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลข โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ภายในแบบจำลอง 2 มิติ การไหลแบบราบเรียบในสภาวะสม่ำเสมอ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 200 ถึง 2000 โดยใช้ความยาวจำเพาะของสมการเป็นความสูงของช่องอากาศ ผลการศึกษาพบว่าการแปรผันค่าดังกล่าวนี้ มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน โดยชิพจำลองที่มีระยะห่างมากจะลดอุณหภูมิได้มากที่สุด และขนาดมิติของตัวชิพจำลอง ก็มีผลโดยตรงต่อลักษณะการไหลที่เกิดขึ้น ส่วนด้านผิวรับความร้อนของชิพ ซึ่งแบ่งเป็นรับความร้อนจากผิวด้านล่างและรับความร้อนทั้งปริมาตรพบว่าจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์น้อย

น้ำมันต์ โชติวิศรุต ; ณัฐ วรยศ ; และทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์⁽²⁾ ศึกษาการเปรียบเทียบการจัดวางชิพแบบแถวตรง 90 องศา และแบบเอียงทำมุม 45 องศา กับทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศ โดยทำการทดลองภายในอุโมงค์ลมความเร็วต่ำติดตั้งพัดลมดูดอากาศไว้ที่ทางออก ใช้ชิพจำลองจำนวน 5 ตัวทำจากวัสดุอลูมิเนียม จัดวางแบบแถวเรียงตรงกันบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่หุ้มฉนวนไว้ที่ผิวด้านล่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 518 ถึง 1839 โดยใช้ความยาวจำเพาะของสมการเป็นความสูงของช่องอากาศผลการศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากชิพจำลองตัวแรก จะมีค่าสูงที่สุดในทั้ง 2 กรณี และการวางตัวของชิพที่ทำมุม 45 องศา ปะทะแนวทางการเคลื่อนที่ของอากาศจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงกว่าแบบแถวตรง 90 องศา

สุริยนต์ ชมดี; อติพงศ์ นันทพันธุ์ ; และทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์⁽⁸⁾ ศึกษาถึงปัจจัยในการพาความร้อนของชิพจำลองที่จัดวางแบบแถวเรียงตรงกัน โดยการเปลี่ยนแปลงความสูงของช่องอากาศ ระยะห่างระหว่างตัวชิพจำลอง และค่าความเร็วของอากาศใช้ชิพจำลองจำนวน 4 ตัว ทำจากวัสดุอลูมิเนียม จัดวางแบบแถวเรียงตรงกัน บนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่หุ้มฉนวนไว้ที่ผิวด้านล่าง โดยทำการทดลองภายในอุโมงค์ลมความเร็วต่ำติดตั้งพัดลมดูดอากาศไว้ที่ทางออก ช่วงความเร็วที่ใช้ คือ 2-4 m/s ผลการศึกษาพบว่า ความเร็วของอากาศที่ความเร็ว 2-3 m/s จะมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในอัตราที่สูง แต่ถ้ายาวช่วงดังกล่าวแล้วจะมีผลของการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก และชิพจำลองตัวที่ 2 และ 3 จะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ำกว่าตัวแรก เนื่องจากเกิดการหมุนวนของอากาศ ส่วนการจัดวางชิพจำลองที่มีความร้อนสูงสุด ไว้ที่ตำแหน่งแรกที่อากาศไหลผ่าน จะช่วยทำให้อุณหภูมิโดยรวมของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่ำลงได้

ชาญณรงค์ วันทา ; อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง ; วรณวิไล ไกรเพชร⁽⁴⁰⁾ ศึกษาการนำวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขมาใช้ในการแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนของกลุ่มวัตถุร้อน ที่ถูกจัดวางเรียงตัวในช่องทางการไหล โดยกำหนดให้ที่ทางบริเวณทางเข้าของช่องทางการไหลมีกระบวนการไหลของกระแสน้ำ ซึ่งมีความสัมพันธ์ในรูป $U = U_0(1 + A \sin 2 \pi f t')$ ศึกษาอิทธิพลของค่าความถี่บังคับในช่วง $f_n < f_p < 33.72 f_n$ ค่าแอมพลิจูดในช่วง $0 < A < 0.2$ และค่าระยะห่างของวัตถุร้อนในช่วง $50\% < S/H < 100\%$ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า การไหลแบบเป็นจังหวะเป็นตัวสร้างความไม่เสถียรให้กับการไหล ซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อนของวัตถุร้อน ที่ถูกจัดวางเรียงตัวกันมีค่าเพิ่มขึ้นและมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าการไหลแบบสภาวะสม่ำเสมอ ที่ไม่มีการปรับแต่งกระแสการไหลเข้า โดยการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับค่าแอมพลิจูด ค่าความถี่บังคับและค่าระยะห่างแต่ละตัวของวัตถุร้อน

Seo Young Kim ; Byng Ha Kang ; Jae Min Hyun⁽¹⁰⁾ ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของ วัตถุร้อน โดยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขกำหนดให้การไหลของของไหลเป็นแบบจังหวะ ในรูปของสมการ $U = U_0(1 + A \sin \omega t)$ ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น ค่าเรย์โนลด์ (Re) Strouhal

number, (St) แอมพลิจูด (A) และค่าของระยะห่างระหว่าง วัตถุร้อน (W/H) จะผลต่อพฤติกรรมของการไหล และการถ่ายเทความร้อนของ วัตถุร้อน ผลที่ได้จากการคำนวณแสดงให้เห็นว่า การเกิดการหมุนวนตรงบริเวณด้านหลังของ วัตถุร้อน และช่องระหว่าง วัตถุร้อน ของ การไหลแบบเป็นจังหวะ จะมีค่าลดลงได้ดีกว่าการไหลที่ไม่เป็นจังหวะ กระบวนการการถ่ายเทความร้อนดีกว่าตามไปด้วย

Kwon Sang Hwang ; Hyung Jin Sung ; Jae Min Hyun ⁽¹¹⁾ ได้ทำการศึกษาการไหลของ อากาศแบบเป็นจังหวะที่ไหลผ่านแผ่น Blunt Flat Plate ในรูปสมการ $U_v = U_0(1 + A \cos 2\pi f_p t)$ กระทำที่ ค่า $770 \leq Re \leq 8000$ ค่าความถี่ที่ใช้ $f_p = 20.0-80.0 \text{ Hz}$ และค่าแอมพลิจูด $A_0 \leq 0.15$ โดยเริ่มทำการที่ แอมพลิจูด $A_0 = 0.0$ หับค่า ระยะทางสตรีมทำการวัดจากขอบของ Blunt Flat Plate ที่ทำให้เกิด การแยกของกระแสการไหล ผลที่ได้ค่า คือค่า Time-mean reattachment length ลดลงและผลของการไหลแบบเป็นจังหวะทำให้ค่า Sh มีค่ามากกว่าค่าแอมพลิจูดสูงซึ่งเป็นผลให้ค่าของ ระยะทางสตรีมสั้นลงและที่ค่า Re มีค่าสูงก็จะทำให้ค่าของ Sh มีค่าอ่อนลงไปด้วย

Jeong Woo Moon ; Seo Young Kim ; Hyung Hee Cho ⁽³⁴⁾ ได้ทำการทดลองการถ่ายเทความร้อนแบบเป็นจังหวะของ วัตถุร้อน ที่จัดวางเรียงแถวกันระยะห่างของ วัตถุร้อน แต่ละตัวคือ l โดยระยะ ของ $l/L = 0.3-0.6$ ซึ่ง L คือระยะของ วัตถุร้อน รวมกับระยะห่างของแต่ละตัว การทดลองใช้ ค่าความถี่ $10 \text{ Hz} < f < 100 \text{ Hz}$ ค่าแอมพลิจูดอยู่ระหว่าง $0.2 < A < 0.3$ ผลการทดลองพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของ วัตถุร้อน จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ (f) ค่าแอมพลิจูด (A) ค่าระยะห่างระหว่าง วัตถุร้อน (l) และค่าเรย์โนลด์ (Re) ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่ค่าความถี่ที่เกิด Resonance และค่าส่วนกลับของเวลาที่ของไหลไหลผ่านพื้นที่ทดลองซึ่งเราสามารถคำนวณได้จากช่วงจังหวะของการไหลและค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re)

อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง ; ศุภชาติ จงไพบุญญพัฒนะ ⁽³⁹⁾ ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของการไหลแบบเป็นจังหวะที่มีรูปแบบเป็นคลื่นไซน์ (sinusoidal wave) ผ่านครีบลแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข ที่มีต่อเขตการหมุนวนและการถ่ายเทความร้อนของครีบล การคำนวณได้กระทำที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) เท่ากับ 250 และ 400 โดยจะมีการปรับเปลี่ยนค่าความถี่ ($f = 0.1-0.9$) และค่าความแรง ($A = 0.1-0.6$) ของกระแสการไหลแบบคลื่นไซน์ พบว่า กระแสการไหลเข้าแบบเป็นจังหวะจะเป็นตัวสร้างความไม่เสถียรให้เกิดขึ้นในการไหล ทำให้เกิดสภาวะการไหลแบบไม่สม่ำเสมอ โดยมีการแตกตัวและการเคลื่อนที่ของวอร์เทกซ์ขึ้น เป็นผลให้เขตการหมุนวนลดน้อยลงสูงสุดถึง 76% ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 66.3% ที่ $Re = 400$, $A = 0.1$ และ $f = 0.3$ โดยค่าความถี่ที่ 0.3 คือค่าความถี่ที่เหมาะสม

จากการตรวจสอบงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าได้มีความพยายามที่จะเพิ่มประสิทธิภาพให้กับ การไหลและการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างต่อเนื่องโดยวิธีการต่างกัน วิธีการ

ทดลองและวิธีคำนวณเชิงตัวเลข เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมมากเนื่องจากมีความคล่องตัวในการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ แต่การทดลองก็มีข้อจำกัดค่อนข้างมากที่จะนำเสนอให้เห็นถึงพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขจึงเหมาะสำหรับการวิเคราะห์การจำลองการไหลในงานวิจัยนี้ ซึ่งทำให้การวิเคราะห์ผลด้านการถ่ายเทความร้อนมีความถูกต้องเพิ่มขึ้น

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 สมการควบคุมการไหล

2.2.1.1 สมการเชิงอนุพันธ์ของความต่อเนื่อง

สมการเชิงอนุพันธ์ของความต่อเนื่อง ถูกสร้างมาจากข้อสมมุติฐานของหลักการอนุรักษ์มวลซึ่งกล่าวว่า มวลในปริมาตรควบคุมคงที่ไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงในปริมาตรควบคุมเขียนในรูปความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (2-1)$$

ซึ่งเขียนรูปของปริมาตรควบคุมจะได้

$$\frac{d}{dt} \int \rho dV = 0 \quad (2-2)$$

2.2.1.2 สมการอนุรักษ์มวล

มวลในปริมาตรควบคุม V คือ $m = \int \rho dV$ จากสมการความต่อเนื่องกล่าวว่ามีมวลคงที่ไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงในปริมาตรควบคุม มีรูปแบบของสมการดังนี้ ให้ $\phi=1$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{dm}{dt} = 0 &= \int_V \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} \right) dV \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} &= 0 \end{aligned} \quad (2-3)$$

สมการ (2-3) เรียกว่า รูปแบบทั่วไปของสมการอนุรักษ์มวล กรณีของไหลแบบไม่อัดตัว ความหนาแน่นมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง และเวลา ดังนั้นสมการ (2-3) จึงลดรูปเป็น สมการอนุรักษ์มวลแบบการไหลไม่อัดตัว ได้ดังนี้

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2-4)$$

2.2.1.3 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

ด้วยความคล้ายคลึงกับสมการอนุรักษ์มวลคือ โมเมนตัมของไหลในปริมาตรควบคุมคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง พิจารณาปริมาตรควบคุมเล็กๆ dV โมเมนตัมเชิงเส้นคือ $\rho u_i dV$ ดังนั้นประยุกต์สมการ (2-4) โดยให้ $\phi = u_i$ และเปลี่ยนดัชนี k เป็น j เพื่อความคุ้นเคยจะได้ว่า

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho u_i dV = \int_V \left(\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} \right) dV \quad (2-5)$$

จากการวิเคราะห์ความเค้น แรงในระบบที่พิจารณาแบ่งเป็น 2 ประเภทคือแรงที่ผิว และแรงวัตถุ ซึ่งเรียกว่าเวกเตอร์ความเค้นบนผิว dS จากสมการ (2-5) จึงได้ว่า

$$\int_S t_i dS + \int_V \rho b_i dV = \int_V \left(\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} \right) dV \quad (2-6)$$

เมื่อพิจารณาในรูปสมการของเกาส์จะได้

$$\int_V \left(\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \right) dV = \int_V \left(\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} \right) dV$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad (2-7)$$

จากสมการ (2-7) เรียกว่า รูปแบบทั่วไปของสมการอนุรักษ์โมเมนตัม เมื่อกระจายเทอมด้านซ้ายมือโดยเทอมที่ 2 จับคู่ ρu_j จะได้ว่า

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + u_i \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + u_i \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} \right) \quad (2-8)$$

จากสมการอนุรักษ์มวลในสมการ (2-3) ทำให้เทอมที่ 3 ด้านขวามือของสมการ (2-8) มีค่าเป็นศูนย์ แทนสมการ (2-8) ในสมการ (2-7) จะได้รูปแบบทั่วไปของสมการอนุรักษ์โมเมนตัม สามารถใช้แทนสมการ (2-7) ได้ดังนี้

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad (2-9)$$

กฎความหนืดของนิวตัน ใช้เป็นสมการองค์ประกอบของสมการอนุรักษ์โมเมนตัม กรณีของไหลเป็นชนิดนิวโทเนียน และมีคุณสมบัติไอโซทรอปิกแทนในสมการ (2-9) เพื่อบรรยายการเคลื่อนที่รวมถึงพฤติกรรมทางกายภาพของของไหลที่พิจารณาจะได้ว่า

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + \rho b_i \quad (2-10)$$

สมการ (2-10) เรียกว่า รูปแบบทั่วไปของสมการเนวิเยร์-สโตกส์ สำหรับของไหลแบบไม่อัดตัว ประยุกต์สมการอนุรักษ์มวลแบบไม่อัดตัว จากสมการ (2-4) แทนในสมการ (2-10) สามารถเขียนเป็น สมการนาวิเยร์-สโตกส์แบบไม่อัดตัว (กรณี μ คงที่) ได้ดังนี้

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \rho b_i \quad (2-11)$$

2.2.1.4 สมการอนุรักษ์พลังงาน

พลังงานที่เปลี่ยนแปลงในของไหลที่พิจารณาประกอบด้วย 2 ส่วนคือพลังงานภายใน (Internal energy, e) และพลังงานจลน์ (Kinetic energy, $\frac{1}{2} \rho u_i u_i$) ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ตามกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ดังสมการ (2-12) และจากการประยุกต์สมการส่งถ่ายของเรย์โนลด์ โดยให้ $\phi = e + \frac{1}{2} u_i u_i$ และเปลี่ยนดัชนี k เป็น j เพื่อความคุ้นเคยจะได้สมการ

$$-\int_S q_i n_i dS + \left\{ \int_S t_i u_i dS + \int_V \rho b_i u_i dV \right\} = \frac{d}{dt} \left(\int_V (\rho e + \frac{1}{2} \rho u_i u_i) dV \right) \quad (2-12)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\int_V (\rho e + \frac{1}{2} \rho u_i u_i) dV \right) = \int_V \left(\frac{\partial}{\partial t} (\rho e + \frac{1}{2} \rho u_i u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} ((\rho e + \frac{1}{2} \rho u_i u_i) u_j) \right) dV \quad (2-13)$$

สมการ (2-12) เครื่องหมายลบของพลังงานความร้อนหมายถึงระบบสูญเสียความร้อน และเครื่องหมายบวกของงานที่กระทำหมายถึงงานกระทำเข้าสู่ระบบ จากการวิเคราะห์ความเค้น และ ทฤษฎีของเกาส์ รวมสมการ (2-12) และ (2-13) โดยเขียนใหม่ได้เป็น

$$\int_V \left\{ -\frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \frac{\partial (\sigma_{ij} u_i)}{\partial x_j} + \rho b_i u_i \right\} dV = \int_V \left(\frac{\partial}{\partial t} (\rho e + \frac{1}{2} \rho u_i u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} ((\rho e + \frac{1}{2} \rho u_i u_i) u_j) \right) dV$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho e + \frac{1}{2} \rho u_i u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} ((\rho e + \frac{1}{2} \rho u_i u_i) u_j) = -\frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \frac{\partial (\sigma_{ij} u_i)}{\partial x_j} + \rho b_i u_i \quad (2-14)$$

พิจารณาแต่ละเทอมด้านซ้ายมือของสมการ (2-14) สามารถขยายเทอมใหม่ได้ โดยเทอมแรกจับคู่ $(\rho)(e)$ และ $(\rho)(\frac{1}{2} u_i u_i)$ ตามลำดับ เทอมที่ 2 ซ้ายมือจับคู่ $(\rho u_j)(e)$ และ $(\rho u_j)(\frac{1}{2} u_i u_i)$ ตามลำดับ เขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho e + \frac{1}{2} \rho u_i u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} ((\rho e + \frac{1}{2} \rho u_i u_i) u_j) &= \left\{ \rho \frac{\partial e}{\partial t} + e \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\frac{1}{2} u_i u_i)}{\partial t} + (\frac{1}{2} u_i u_i) \frac{\partial \rho}{\partial t} \right\} \\ &\quad + \left\{ \rho u_j \frac{\partial e}{\partial x_j} + e \frac{\partial (\rho u_j)}{\partial x_j} + \rho u_j \frac{\partial (\frac{1}{2} u_i u_i)}{\partial x_j} + (\frac{1}{2} u_i u_i) \frac{\partial (\rho u_j)}{\partial x_j} \right\} \\ &= \rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\frac{1}{2} u_i u_i)}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial e}{\partial x_j} + \rho u_j \frac{\partial (\frac{1}{2} u_i u_i)}{\partial x_j} + \boxed{e \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j)}{\partial x_j} \right) + (\frac{1}{2} u_i u_i) \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j)}{\partial x_j} \right)} \end{aligned}$$

ในวงเล็บของเทอมตามกรอบสี่เหลี่ยมเส้นประตรงกับสมการอนุรักษ์มวล ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t}(\rho e + \frac{1}{2}\rho u_i u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}((\rho e + \frac{1}{2}\rho u_i u_i)u_j) &= \rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho \frac{\partial(\frac{1}{2}u_i u_i)}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial e}{\partial x_j} + \rho u_j \frac{\partial(\frac{1}{2}u_i u_i)}{\partial x_j} \\ &= \rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial e}{\partial x_j} + \rho u_j u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\end{aligned}$$

แทนลงในสมการ (2-14) จะได้

$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial e}{\partial x_j} + \rho u_j u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} &= -\frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \frac{\partial(\sigma_{ij} u_i)}{\partial x_j} + \rho b_i u_i \\ &= -\frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + u_i \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i u_i\end{aligned}$$

รวมเทอมในกรอบสี่เหลี่ยมเส้นประพบว่าตัวร่วมคือ u_i จัดรูปใหม่ในพจน์ที่เป็นสมการอนุพันธ์โมเมนตัม สมการ (2-9) และส่วนที่เหลือจัดรูปแบบอีกครั้งจะได้ดังนี้

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial e}{\partial x_i} = \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} \quad (2-15)$$

สมการ (2-15) เรียกว่า รูปแบบทั่วไปของสมการอนุพันธ์พลังงาน ซึ่งมีปริมาณที่ยากต่อความเข้าใจหลายประการเช่น e , σ_{ij} , q_i เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องใช้สมการองค์ประกอบ เพิ่มเติมเข้ามา เช่นกฎความหนืดของนิวตัน (ในกรณีของไหลเป็นชนิดนิวโทเนียน) กฎการนำความร้อนของฟูริเยร์ และสมการสถานะ (Equation of state) เพื่อเติมเต็มความหมายทางกายภาพของสมการอนุพันธ์พลังงาน ให้บรรยายปรากฏการณ์ที่เหมาะสมกับธรรมชาติของระบบได้จริง

โดยทั่วไปสมการอนุพันธ์พลังงานที่ใช้ในการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อน มักนิยมกล่าวถึงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอุณหภูมิเป็นตัวแทนของระดับพลังงานเชิงความร้อนเพียงอย่างเดียวที่สามารถวัดได้ชัดเจน ดังนั้นการเปลี่ยนตัวแปรจากพลังงานภายใน (e) เป็นอุณหภูมิ (T) ในสมการ (2-15) จึงเป็นสิ่งจำเป็น และทำได้ดังนี้
ให้ซ้ายมือของสมการ (2-15) เขียนแทนด้วยอนุพันธ์มวลสาร (Substantial derivative)

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial e}{\partial x_i} = \rho \frac{De}{Dt} \quad (2-16)$$

ความสัมพันธ์เชิงอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic relation) ระหว่างพลังงานภายใน และเอนทาลปี (Enthalpy, h) คือ $e = h - \frac{p}{\rho}$ โดยที่ $h = h(T, p)$ ผันแปรตามอุณหภูมิ และความดัน พิจารณาเฉพาะอัตราเปลี่ยนแปลงรวมของพลังงานภายใน ประกอบกับประยุกต์สมการอนุรักษ์มวลเพื่อลดรูปจะได้ว่า

$$\rho \frac{De}{Dt} = \rho \frac{Dh}{Dt} - \frac{Dp}{Dt} \quad (2-17)$$

โดยเอนทาลปี (h) มีความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ และความดันเป็นดังสมการ (2-18)

$$Dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p DT + \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T Dp \quad (2-18)$$

จากนิยามความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ (Specific heat at constant pressure, C_p) คือ $c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$ และความสัมพันธ์ของ $\left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T = \frac{1}{\rho} + \frac{T}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$ จากนั้นนำค่าทั้งหมดแทนในสมการ (2-18) และแทนต่อในสมการ (2-17) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \rho \frac{De}{Dt} &= \rho \left(c_p \frac{DT}{Dt} + \left(\frac{1}{\rho} + \frac{T}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \right) \frac{Dp}{Dt} \right) - \frac{Dp}{Dt} \\ \rho \frac{De}{Dt} &= \rho c_p \frac{DT}{Dt} + \frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{Dp}{Dt} \end{aligned} \quad (2-19)$$

สมการองค์ประกอบ สำหรับการไหลแบบนิวโทเนียนที่มีคุณสมบัติเป็นไอโซทรอปิก ประกอบกับสมการ (2-19) นำไปแทนใน รูปแบบทั่วไปของสมการอนุรักษ์พลังงาน สมการ (2-17) จะได้

$$\begin{aligned} \rho c_p \frac{DT}{Dt} + \frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{Dp}{Dt} &= \left(-p \delta_{ij} + \lambda \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \\ &= -p \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \lambda \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^2 + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \end{aligned}$$

ขยายเทอมที่ 1 ซ้ายมือจะได้ รูปแบบทั่วไปของสมการอนุรักษ์พลังงานสำหรับของไหลชนิดนิวโทเนียน ที่มีอุณหภูมิเป็นตัวแปรหลักดังสมการ (2-20)

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = T \xi \frac{Dp}{Dt} - p \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \Phi + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (2-20)$$

เมื่อ $\xi = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$ คือสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่ความดันคงที่ (Isobaric dilatation coefficient) และ $\Phi = \lambda \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^2 + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ คือเทอมการเหือดหาย (Dissipation function) สำหรับกรณีของไหลแบบไม่อัดตัว และ k คงที่ สามารถลดรูปได้ดังนี้

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = T \xi \frac{Dp}{Dt} + \Phi + k \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_i} \quad (2-21)$$

โดยที่ $\Phi = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ กรณีความหนาแน่นไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ นั่นคือ $\xi = 0$ ทำให้เทอมแรกด้านขวามือของสมการ (2-21) ไม่ต้องนำมาพิจารณาจึงลดรูปได้เป็น

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \Phi + k \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_i} \quad (2-22)$$

ข้อสังเกตสำหรับการไหลโดยปกติเทอมการเหือดหาย (Φ) จะมีผลกระทบน้อย เมื่อเทียบกับเทอมอื่นๆ อีกทั้งยังเป็นเทอมที่คำนวณได้ยากเนื่องจากมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง การคำนวณส่วนมากจึงละเว้นเทอมนี้ แต่เทอมการเหือดหายไม่ควรละเว้นเมื่อพิจารณาการไหลที่มีอิทธิพลของอัตราเฉือนสูง เช่นการไหลหล่อลื่น (Lubrication flow) เป็นต้น

2.2.2 หลักการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนบนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อัตราความร้อน (Q) เกิดขึ้นเนื่องจากการที่กระแสไฟฟ้า (I) ไหลผ่านตัวต้านทาน (R) หรือภาระอื่นๆ เป็นระยะเวลาหนึ่ง ($Q = W_e = I^2 R$) ดังนั้นถ้าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต้องการกำลังไฟฟ้ามากจะทำให้ค่าฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) หรือ ปริมาณ

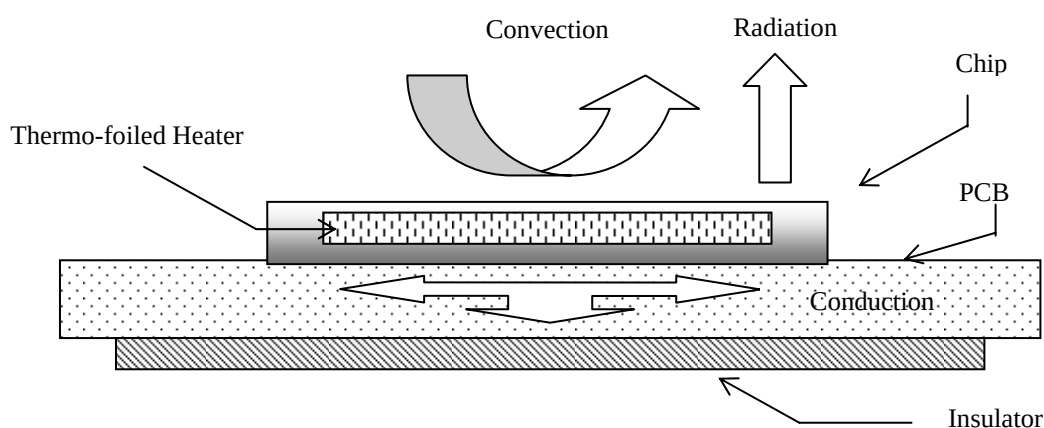
ความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่มีค่าสูงขึ้นตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิของอุปกรณ์หรือชิพจะเสถียรเมื่อความร้อนที่ปล่อยออกมาสมดุลกับความร้อนที่ถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อม

การถ่ายเทความร้อนจากชิพแบ่งออกได้เป็น 3 แบบดังภาพประกอบ 2.1 คือการนำความร้อน การแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อน สำหรับการพาความร้อนจะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือการพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) และการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) ในการวิเคราะห์ปัญหาการพาความร้อนว่าควรคำนวณแบบใดนั้น จะอาศัยค่าอัตราส่วนของตัวเลขกราชอฟต่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์กำลังสอง (Gr/Re^2_B) โดยมีเงื่อนไขดังนี้

$Gr/Re^2_B \gg 1.0$ การไหลในกรณีการพาความร้อนแบบอิสระ

$Gr/Re^2_B \ll 1.0$ การไหลในกรณีการพาความร้อนแบบบังคับ

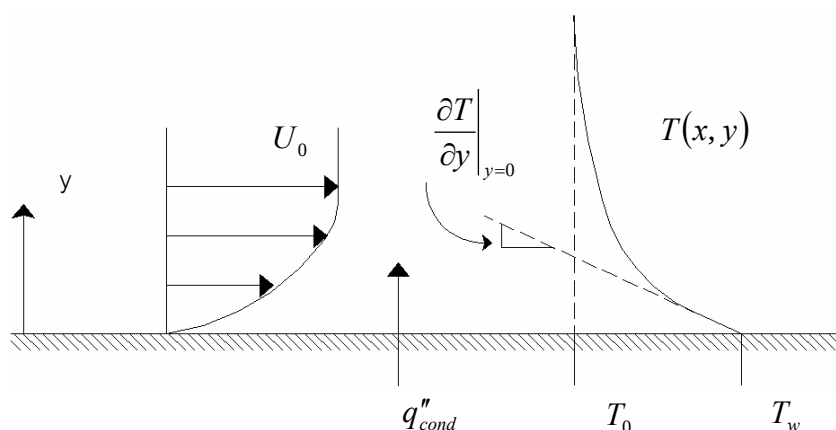
$Gr/Re^2_B \cong 1.0$ การไหลในกรณีการพาความร้อนแบบอิสระร่วมกับการพาความร้อนโดยบังคับ



ภาพประกอบ 2 การถ่ายเทความร้อนจากชิพอุณหภูมินิยมจำลองบนแผงวงจร

2.2.2.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน

การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนนั้น จึงจำเป็นต้องศึกษาถึงรายละเอียดปฏิสัมพันธ์ของการไหล และการถ่ายเทความร้อน ภาพประกอบ 2.2 แสดงภาพของแผ่นวัตถุร้อนที่กำลังเย็นตัวลงเมื่อมีกระแสลมไหลผ่าน ในภาพยังบ่งบอกถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเร็ว และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของกระแสลมในแนวตั้งฉากกับวัตถุ จะเห็นได้ว่ากระแสลมที่อยู่ใกล้กับผิววัตถุจะมีความเร็วต่ำกว่าชั้นที่อยู่ห่างออกไปจากผิว ทั้งนี้เนื่องจากผลกระทบของแรงที่เกิดจากความเสียดทาน และด้วยเหตุที่ของไหลในชั้นที่อยู่ติดกับผิวของวัตถุนั้นมีความเร็วเป็นศูนย์ หรือมีการเคลื่อนที่น้อย



ภาพประกอบ3 การเปลี่ยนแปลงความเร็วและอุณหภูมิของของไหลบนแผ่นวัตถุ

ดังนั้นการถ่ายเทความร้อน ระหว่างผิววัตถุกับชั้นของไหลที่อยู่ติดกับผิว จึงเป็นลักษณะการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ แต่ค่าความลาดชันของอุณหภูมิ ($\partial T / \partial y$) ที่ผิววัตถุยังคงต้องการหาจากอัตราการพาความร้อนที่จากผิวไปยังก้อนของไหลที่อยู่ห่างออกไป ทั้งนี้เพราะอัตราการนำความร้อนที่ถ่ายเทจากผิววัสดุไปยังชั้นของไหลที่อยู่ติดกับผิว ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราการพาความร้อนที่ถ่ายเทจากผิวไปยังก้อนของไหลหลัก นั่นคือ

$$q'_{convect} = q'_{conduct} = -k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = h(T_w - T_\infty) \quad (2-23)$$

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของสมการ (2-23) ค่าความลาดชันของอุณหภูมิ ($\partial T / \partial y$) ที่ผิวของวัตถุ โดยขึ้นอยู่กับสภาพของการไหล ของไหลที่มีความเร็วสูง มีค่าความลาดชันของอุณหภูมิที่ผิวสูงตามไปด้วย รวมทั้งค่าการนำความร้อนของไหลก็มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนด้วยเช่นกัน

2.2.3 ปริมาณไร้มิติที่เกี่ยวข้อง

2.2.3.1 ค่าตัวเลขนัสเซิลท์ (Nusselt number ; Nu)

ค่า Nu เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับ Characteristic length โดยค่า Nu เป็นตัวแทนแสดงถึงอัตราส่วนระหว่างการถ่ายเทความร้อนโดยการพาต่อการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ โดยค่าความยาวจำเพาะที่ใช้คือค่าความสูงของชิพ (B) ค่า Nu_B มีนิยามว่า

$$Nu_B = \frac{hB}{k} = \frac{Q'B}{Ak(T_s - T_{air})} \quad (2-24)$$

2.2.3.2 ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds average; Re)

ค่า Re เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความยาวจำเพาะ (Characteristic length) โดยเป็นตัวแทนแสดงถึงอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อย (Inertia force) ต่อแรงหนืด (Viscous force) สำหรับการศึกษการถ่ายเทความร้อนของแผง PCB นั้นค่าความยาวจำเพาะที่ใช้คือค่าความสูงของชิพ (B) ค่า Re_B มีนิยามคือ

$$Re = \frac{VB}{\nu} \quad (2-25)$$

2.2.3.3 ค่าตัวเลขพรานด์ลท์ (Prandlt number; Pr)

ค่า Pr เป็นค่าที่ขึ้นกับคุณสมบัติของสารนั้น โดยค่า Pr เป็นตัวแทนแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านโมเมนตัมและการส่งผ่านพลังงานโดยกระบวนการการแพร่ สำหรับแก๊สแล้วค่า Pr นั้นมีค่าประมาณ 1

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (2-26)$$

2.2.4 ค่าอัตราส่วนระหว่างความสูงของช่องอากาศกับความสูงของชิพ (H/B)

ตัวแปรไร้มิตินี้เป็นตัวแปรไร้มิติของความสูงของช่องอากาศ ซึ่งนิยามของตัวแปรคือความสูงของช่องอากาศ (H) และความสูงของชิพ (B) ตัวแปรไร้มิตินี้เป็นตัวแปรไร้มิติเฉพาะการทดลองซึ่งได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟของบักกิงแฮม

2.2.5 การหาค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและค่าเฉลี่ยของตัวเลขนัสเซลท์

จุดมุ่งหมายในการทดลองนี้คือการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) และแปลงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนนี้ให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติคือค่าตัวเลขนัสเซลท์ (Nu_B) โดยอยู่ภายใต้

สมมติฐานที่ว่าเกิดการพาความร้อนที่ผิวด้านบนของชิพจำลองเท่านั้น ดังสมการ (2-27) เมื่อทราบค่าความร้อนที่ชิพจำลองปลดปล่อย, พื้นที่ผิวด้านบนของชิพจำลองและค่าความแตกต่างของอุณหภูมิผิวของชิพ

$$Q' = hA(T_s - T_\infty) \quad (2-27)$$

จำลองกับอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศเหนือชิพ จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยของชิพจำลองแต่ละตัวได้ดังสมการ (2-28)

$$h = \frac{Q'}{A(T_s - T_\infty)} \quad (2-28)$$

ซึ่งสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยของการทดลองนั้นๆ จากการอินทิเกรตค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเทียบกับพื้นที่

$$\bar{h} = \frac{1}{A} \int h dA \quad (2-29)$$

จากสมมติฐานที่ว่าพื้นที่ระหว่างชิพจำลองไม่มีการพาความร้อนเกิดขึ้น ดังนั้นพื้นที่ที่ทำการอินทิเกรตจึงคิดเฉพาะพื้นที่ผิวด้านบนของชิพจำลองเท่านั้น จะได้ว่า

$$\bar{h} = \frac{h_1 A_1 + h_2 A_2 + \dots + h_5 A_5}{A_1 + A_2 + \dots + A_5} \quad (2-30)$$

เมื่อพื้นที่ผิวด้านบนชิพจำลองทุกตัวเท่ากัน $A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = A_5$ และให้เท่ากับ A จะได้

$$\bar{h} = \frac{h_1 A + h_2 A + \dots + h_5 A}{5A} \quad (2-31)$$

ทำการหารตลอดทั้งเศษและส่วนด้วย A จะลดรูปได้เป็น

$$\bar{h} = \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_5}{5} \quad (2-32)$$

เมื่อเริ่มต้นวิเคราะห์ด้วยสมการ

$$\dot{Q}_{Total} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dots + \dot{Q}_5 \quad (2-33)$$

ในการทำงานเดียวกับสมการ (2.28) จะได้

$$\bar{h} = \frac{\dot{Q}_{Total}}{A_{Total} (\bar{T}_s - \bar{T}_\infty)} \quad (2-34)$$

ซึ่งสมการ (2-28) และ (2-34) นั้นให้ผลลัพธ์คือค่า $\bar{h}$ ที่เท่ากัน การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับความสะดวกในการแทนค่าตัวแปร จากนิยามของค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์ในสมการ (2-24) เมื่อค่าคงที่ของการนำความร้อนของอากาศ (k) และค่าความสูงของชิพ (B) มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากเป็นรูปแบบการทดลองเดียวกัน ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์ของการทดลองนั้นๆ สามารถหาได้จาก

$$\overline{Nu}_B = \frac{\bar{h}B}{k} \quad (2-35)$$

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้เป็นการกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้สำหรับทำการวิจัย และพร้อมทั้งทำการตรวจสอบโปรแกรม FLUENT กับผลการทดลองที่ผ่านมา โดยได้ทำการตรวจสอบผลของโปรแกรมในกรณีชีพจำลองจำนวน 5 ตัว ที่จัดวางแบบแถวเรียงตรงกัน

3.1 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล

ในกระบวนการการแก้ปัญหาทางพลศาสตร์ของไหลนั้นผลลัพธ์ที่เกิดจากการวิเคราะห์ปัญหาจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหรือ องค์ประกอบใหญ่ๆ 3 องค์ประกอบ กล่าวคือ ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) ที่อธิบายความเป็นจริงของปัญหานั้น เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) สำหรับปัญหาที่ทำการศึกษานั้น และ ลักษณะรูปร่าง (Geometry) ของปัญหานั้น ทั้ง 3 องค์ประกอบนี้ หากองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นก็จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ขั้นตอนการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ สำหรับการคำนวณพลศาสตร์ของไหล โปรแกรมที่ถูกสร้างขึ้นมา เพื่อแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหล โดยมีเงื่อนไขขอบเขตและลักษณะรูปร่างของปัญหาที่สามารถกำหนดได้โดยสะดวก ไม่ว่าจะเป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นเองหรือโปรแกรมเชิงพาณิชย์โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่

3.1.1 ขั้นตอนการประมวลผล

ขั้นตอนการประมวลผล (Pre-processing) หมายถึงขั้นตอนเตรียมการโดยระบุรายละเอียดของการกำหนดปัญหาและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง คือ

3.1.1.1 การกำหนดลักษณะของปัญหา

3.1.1.2 การกำหนดขนาด จำนวนและรูปแบบการจัดวางกริด (Grid) โดยทำการสร้างและ การจัดวางกริดบนโดเมนการคำนวณ (Computational domain) ให้มีความเหมาะสมซึ่งส่งผลถึงการประหยัดทรัพยากรของคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ

3.1.1.3 การกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ให้เหมาะสมกับปัญหาที่พิจารณา

3.1.1.4 การกำหนดคุณสมบัติของของไหล

3.1.1.5 การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตและค่าเริ่มต้นให้กับปัญหาที่พิจารณา

3.1.2 ขั้นตอนการประมวลผล

ขั้นตอนการประมวลผล (Solving) หมายถึง ขั้นตอนการประยุกต์วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับการนำไปใช้แก้ปัญหา โดยการคำนวณในงานวิจัยนี้ทั้งหมดใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม โดย มีขั้นตอนดังนี้

3.1.2.1 ทำการดิสcretize สมการ โดยการประมาณค่าเทอมต่าง ๆ คือ เทอมการพา (Convection term) เทอมการแพร่ (Diffusion term) และเทอมแหล่งกำเนิด (Source term) ด้วยแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical scheme) ที่เหมาะสมผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในรูปสมการพีชคณิต

3.1.2.2 ทำการแก้สมการพีชคณิตที่ได้จากการดิสcretize ผลลัพธ์ที่ได้เรียกว่า ผลเฉลยโดยประมาณ

3.1.3 ขั้นตอนการแสดงผล

ขั้นตอนการแสดงผล (Post-processing) หมายถึง กระบวนการแสดงผลผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการประมวลผลโดยปกติประกอบด้วย ความเร็วย่อยในทิศทางแกนต่างๆ ความดัน และอุณหภูมิ ซึ่งอยู่ในรูปของตัวเลข เพื่อก่อให้เกิดความเข้าใจในพฤติกรรมการไหลและสภาวะการไหล จำเป็นต้องสร้างผลลัพธ์เหล่านี้ให้อยู่ในรูปของกราฟิก

3.2 การคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเพื่อจำลองพฤติกรรมตามธรรมชาติ สิ่งที่เราหวังเป็นอย่างยิ่งคือ ความถูกต้องของผลเฉลย ผลการคำนวณที่ดีเลิศ เป็นเพียงค่าประมาณที่ดีที่สุดเท่าที่สามารถหาคำตอบได้เท่านั้น ไม่ใช่ผลเฉลยแม่นยำ

3.2.1 คุณสมบัติของผลเฉลยประมาณค่า

คุณสมบัติของวิธีการคำนวณ คือปัจจัยบ่งบอกความเที่ยงตรงของผลเฉลยประมาณค่าเมื่อเทียบกับพฤติกรรมจริงที่ควรเกิดขึ้น แบ่งได้หลายประการดังนี้

3.2.1.1 ความเข้ากันได้

ความเข้ากันได้ (Consistency) หมายถึงความเหมือน (Equivalent) ระหว่างสมการบังคับ (สมการอนุพันธ์ย่อย) และสมการพีชคณิตที่ผ่านกระบวนการดิสcretize เมื่อระยะกริด (Grid spacing) หรือค่าขนาดเวลา (Time step) ลดลงใกล้ศูนย์ โดยปกติเรียกความแตกต่างหลังจากกระบวนการดิสcretize ว่า ความผิดพลาดแบบทรานเคชัน (Truncation error) ซึ่งลดลงเมื่อมีความเข้ากันได้มากขึ้น

3.2.1.2 เสถียรภาพการคำนวณ

เสถียรภาพการคำนวณ (Stability) เป็นลักษณะการคำนวณที่มีค่าผิดพลาดน้อยลงเมื่อคำนวณซ้ำ (Damping of error) เรียกความผิดพลาดที่เกิดจากการคำนวณซ้ำว่าความผิดพลาดแบบแบบเร้าออฟ (Round-off error) เช่นความผิดพลาดในการคำนวณทศนิยมตำแหน่งที่ 12 ของคอมพิวเตอร์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามหากวิธีการคำนวณไม่มีเสถียรภาพ ผลการคำนวณอาจมีลักษณะลู่ออก (Divergence) โดยมักเกิดจากการเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่ถูกต้อง หรือแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลขไม่เหมาะสมกับปัญหาที่พิจารณา ซึ่งการตรวจสอบเสถียรภาพการคำนวณต้องใช้ความรู้ของทฤษฎีการรบกวน (Perturbation theory) เป็นแนวทาง

3.2.1.3 การลู่เข้าของผลเฉลย

ผลการคำนวณที่มีการลู่เข้าของผลเฉลย (Convergence) หมายถึงผลเฉลยประมาณค่ามีแนวโน้มเข้าใกล้ผลเฉลยแน่นอนตรง สำหรับปัญหาไม่เชิงเส้น (Nonlinear problem) ยากที่จะตรวจสอบการลู่เข้าของผลเฉลย เนื่องจากไม่สามารถหาผลเฉลยแน่นอนตรงได้ อย่างไรก็ตามการตรวจสอบทำได้ด้วยวิธีเปรียบเทียบผลการคำนวณที่มีระยะกริดลดลง กระทั่งผลเฉลยไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะกริด (Grid independent) เรียกได้ว่ามีคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลยที่ดี

3.2.1.4 การอนุรักษ์

คุณสมบัติการอนุรักษ์ (Conservation) เป็นคุณสมบัติที่มีอยู่ในกฎการอนุรักษ์ดังบทที่ 2 เนื่องจากผลการคำนวณมีที่มาจากสมการควบคุม ดังนั้นวิธีการคำนวณจึงควรมีคุณสมบัตินี้ด้วย โดยคุณสมบัติการอนุรักษ์เป็นจุดเด่นที่สำคัญของระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง กล่าวคือคำนึงถึงความสมดุลของการส่งถ่ายปริมาณข้ามขอบเขตที่พิจารณา เช่นรอบผิวปิดของปริมาตรเล็กๆที่แบ่งตามระยะกริด เป็นต้น

3.2.1.5 เงื่อนไขขอบเขต

เงื่อนไขขอบเขต (Boundedness) หมายถึงผลเฉลยควรมีค่าอยู่ในขอบเขตจำกัด เช่น ความหนาแน่น ความเข้มข้น ต้องมีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ หรือระบบการถ่ายโอนความร้อนที่ทราบอุณหภูมิต่ำสุด-สูงสุด ผลเฉลยที่ได้ควรต้องมีค่าอยู่ในช่วงนั้นด้วยเช่นกัน โดยวิธีการคำนวณที่มีอันดับสูง (Higher order) มีแนวโน้มความจำกัดขอบต่ำลง ดังนั้นจึงไม่ควรเลือกใช้วิธีการคำนวณที่มีอันดับสูงมากเกินไปจนความจำเป็น

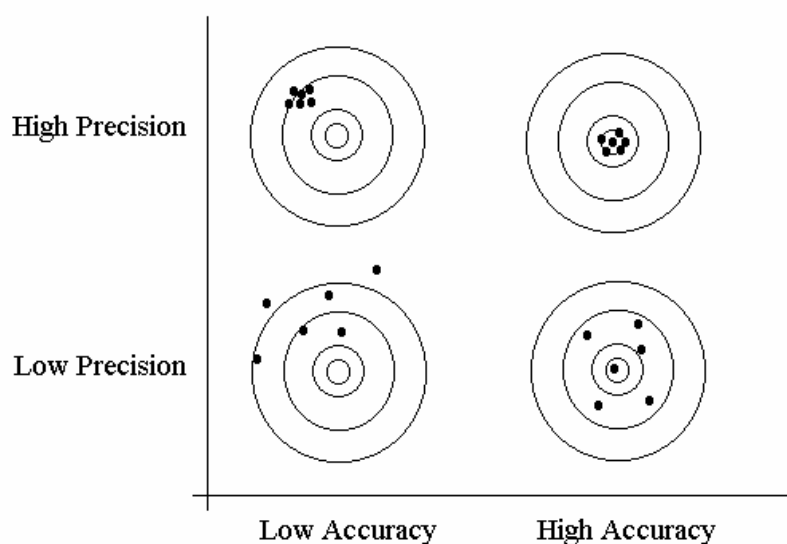
3.2.1.6 ความเสมือนจริง

ความเสมือนจริง (Realizability) หมายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่จำลองพฤติกรรมธรรมชาติที่ซับซ้อน เช่นแบบจำลองการไหลปั่นป่วน แบบจำลองการเผาไหม้ เป็นต้น ควร

เลือกแบบจำลองที่มีความเหมือนจริงเมื่อเทียบกับความหมายทางกายภาพ หากเลือกใช้ หรือนำมาใช้ ไม่สอดคล้องกับปัญหา ผลเฉลยที่ได้อาจไม่สื่อความหมายทางกายภาพที่ถูกต้อง

3.2.1.7 ความแน่นอน

โดยมากในงานทางวิศวกรรมกล่าวถึงความแน่นอน (Accuracy) ซึ่งมักใช้สับสนกับความแม่นยำ (Precision) พิจารณาภาพที่ 4 แสดงความแตกต่างระหว่างแนวคิดทั้งสองอย่างชัดเจน ตรงกลางเป้าเป็นเสมือนค่าแม่นยำ โดยเห็นได้ว่าความแน่นอนสูง หมายถึงค่าโดยเฉลี่ยไม่ต่างจากค่าแม่นยำ และความแม่นยำสูง หมายถึงค่าส่วนใหญ่กระจายตัวน้อย ดังนั้นงานวิเคราะห์ทางวิศวกรรม จึงควรให้ความสำคัญของความแน่นอน มากกว่าความแม่นยำ ซึ่งช่วยในการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง มีแนวโน้มเดียวกับสภาพความจริงมากขึ้น แต่ในงานออกแบบต้องการความผิดพลาดลดน้อยที่สุด จึงควรใช้ทั้ง 2 แนวคิดประกอบรวมกัน



ภาพประกอบ 4 แสดงแนวคิดของความแน่นอนและความแม่นยำ

วิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล แบ่งปัจจัยของความแน่นอนได้เป็น 3 ปัจจัยดังนี้

1. ความแน่นอนจากแบบจำลอง (Modeling accuracy) เกิดจากความเหมือนจริงของแบบจำลอง เทียบกับพฤติกรรมจริงธรรมชาติ
2. ความแน่นอนจากการดิสครีไทซ์ (Discretization accuracy) เกิดจากความเข้ากันได้ของสมการพีชคณิต เทียบกับสมการบังคับ (สมการอนุพันธ์ย่อย) ความแน่นอนจากการแก้สมการพีชคณิต (Iteration accuracy) เกิดจากการลู่ออกของผลเฉลยประมาณค่า เทียบกับผลเฉลยแม่นยำของสมการพีชคณิต

3.2.2 วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขปัจจุบันประกอบไปด้วยหลายวิธีการ แต่สำหรับการแก้ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนนั้นนิยมใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสลับเนื่อง (Finite volume method) เป็นระเบียบวิธีที่เกิดจากการประยุกต์วิธีการของระเบียบวิธีผลต่างสลับเนื่อง (Finite difference method) และระเบียบวิธีไฟต์เอลิเมนต์ (Finite element method) โดยแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันตรงวิธีประมาณตัวแปรและกระบวนการดิสครีไทซ์ สำหรับงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะระเบียบวิธีปริมาตรสลับเนื่องเป็นระเบียบวิธีที่ใช้ในการคำนวณ

3.2.2.1 สมการการส่งถ่ายสำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อน

สมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อน สามารถเขียนในรูปสมการการส่งถ่าย (Transport equation) ได้ ซึ่งสมการนี้เป็นการจัดรูปสมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อนให้เขียนอยู่ในรูปตัวแปรเดียวกัน ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)}_{\text{Unsteady term}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \bar{u} \phi)}_{\text{Convection term}} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi)}_{\text{Diffusion term}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{Source term}} \quad (3-1)$$

หรือเขียนในรูปเทนเซอร์

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (3-2)$$

โดยที่ Γ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่(Diffusion coefficient)

ϕ คือ ตัวแปร เช่นเวกเตอร์ความเร็ว และอุณหภูมิ

S_ϕ คือ เทอมแหล่งกำเนิด(Source term) ของตัวแปรที่สนใจ

ตาราง 1 รูปสมการส่งถ่ายสำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อน

Transport equation	ϕ	Γ	S_ϕ
Continuity	1	0	0
Momentum	$\bar{u}$	μ	$-\nabla p + \rho \bar{b}$
Energy	T	k / c_p	$\Phi + \beta T(dp / dt)$

สำหรับการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม เริ่มต้นด้วยการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ในสมการ (3-2) ตลอดทั้งปริมาตรควบคุมแล้วทำการดิสครีไทซ์ลงบนจุดต่อต่างๆ บนปริมาตรควบคุมซึ่งจะได้แสดงวิธีการคำนวณต่อไป

3.2.2.2 การดิสครีไทซ์สมการ

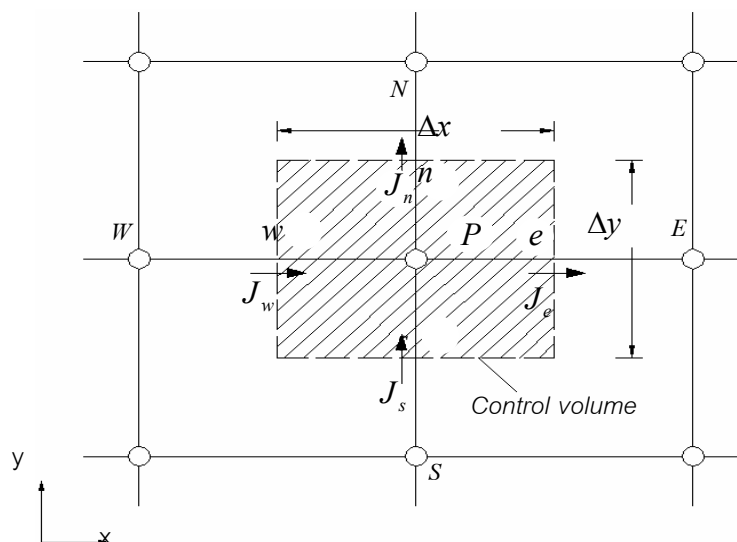
ในการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมนั้น เริ่มต้นด้วยการดิสครีไทซ์สมการ โดยการอินทิเกรตตลอดทั้งปริมาตรควบคุม ซึ่งในที่นี้จะได้แสดงการดิสครีไทซ์ ปัญหาการพาและการแพร่ (Convection and diffusion) ในสถานะไม่คงตัวใน 2 มิติเป็นแบบอย่าง ซึ่งสามารถขยายไปสู่ 3 มิติได้ต่อไป พิจารณาจากสมการ (3-2) โดยกำหนดการเขียนในรูปสมการ 2 มิติ ได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} = S \quad (3-3)$$

โดยที่ J_x และ J_y คือค่าฟลักซ์การพารวมกับฟลักซ์การแพร่ (Convection and diffusion flux) และกำหนดให้

$$J_x = \rho u\phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (3-4)$$

$$J_y = \rho v\phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (3-5)$$



ภาพประกอบ 5 ปริมาตรควบคุมสำหรับปัญหาสองมิติ

กำหนดให้ u, v คือ ความเร็วในทิศทาง x และ y ตามลำดับ ทำการอินทิเกรตสมการ (3-3) บนปริมาตรควบคุมที่แสดงในภาพประกอบ 5 ได้สมการดังนี้

$$\frac{(\rho_P \phi_P - \rho_P^0 \phi_P^0) \Delta x \Delta y}{\Delta t} + J_e - J_w + J_n - J_s = (S_C + S_P \phi_P) \Delta x \Delta y \quad (3-6)$$

ซึ่งค่า “0” แทนค่าเริ่มต้นของช่วงเวลา (Time step) ส่วนค่า J_e, J_w, J_n, J_s เป็นค่าฟลักซ์ในผิวเซลล์ด้านตะวันออก ตะวันตก เหนือ และใต้ จะถูกอินทิเกรตบนผิวของปริมาตรควบคุม เช่น ด้านตะวันออก สำหรับบนผิวเซลล์ “e”, $J_e = \int J_x dy$, และที่ผิวอื่นก็มีความสัมพันธ์เดียวกัน ผลการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ของความต่อเนื่องบนปริมาตรควบคุมได้ผลดังนี้

$$\frac{(\rho_P - \rho_P^0) \Delta x \Delta y}{\Delta t} + F_e - F_w + F_n - F_s = 0 \quad (3-7)$$

เมื่อ F_e, F_w, F_n, F_s คือ อัตราการไหลของมวลที่ผ่านผิวของปริมาตรควบคุม ในรูปสมการ

$$F_e = (\rho u)_e \Delta y \quad (3-8a)$$

$$F_w = (\rho u)_w \Delta y \quad (3-8b)$$

$$F_n = (\rho v)_n \Delta x \quad (3-8c)$$

$$F_s = (\rho v)_s \Delta x \quad (3-8d)$$

คูณสมการ (3-7) ด้วยค่า ϕ_P ได้สมการ

$$\frac{\phi_P (\rho_P - \rho_P^0) \Delta x \Delta y}{\Delta t} + F_e \phi_P - F_w \phi_P + F_n \phi_P - F_s \phi_P = 0 \quad (3-9)$$

นำสมการ (3-6) ลบด้วยสมการ (3-9) ได้สมการ

$$\begin{aligned} & (\phi_P - \phi_P^0) \frac{\rho_P^0 \Delta x \Delta y}{\Delta t} + (J_e - F_e \phi_P) - (J_w - F_w \phi_P) + (J_n - F_n \phi_P) \\ & - (J_s - F_s \phi_P) = (S_C + S_P \phi_P) \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (3-10)$$

สมมติว่าปริมาตรควบคุมในหนึ่งมิติมีค่าสม่ำเสมอตลอด ทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$J^* - P \phi_i = A(\phi_i - \phi_{i+1}) \quad (3-11)$$

$$J^* - P \phi_{i+1} = B(\phi_i - \phi_{i+1}) \quad (3-12)$$

เมื่อ

$$A(P) = A(|P|) + [[-P, 0]] \quad (3-13)$$

$$B(P) = A(|P|) + [[P, 0]] \quad (3-14)$$

พิจารณาสมการ (3-10) โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการ (3-11) ถึง (3-14) ได้รูปทั่วไปของสมการพีชคณิตของสมการการพาและการแพร่ ดังนี้

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b \quad (3-15)$$

โดยที่

$$a_E = D_e A(P_e) + [[-F_e, 0]] \quad (3-16a)$$

$$a_W = D_w A(P_w) + [[F_w, 0]] \quad (3-16b)$$

$$a_N = D_n A(P_n) + [[-F_n, 0]] \quad (3-16c)$$

$$a_S = D_s A(P_s) + [[F_s, 0]] \quad (3-16d)$$

$$a_P^0 = \frac{\rho_P^0 \Delta x \Delta y}{\Delta t} \quad (3-16e)$$

$$b = S_C \Delta x \Delta y + a_P^0 \phi_P^0 \quad (3-16f)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_P^0 - S_P \Delta x \Delta y \quad (3-16g)$$

และ

$$D_e = \frac{\Gamma_e \Delta y}{(\delta x)_e} \quad (3-17a)$$

$$D_w = \frac{\Gamma_w \Delta y}{(\delta x)_w} \quad (3-17b)$$

$$D_n = \frac{\Gamma_n \Delta x}{(\delta y)_n} \quad (3-17c)$$

$$D_s = \frac{\Gamma_s \Delta x}{(\delta y)_s} \quad (3-17d)$$

ส่วนค่า F_e, F_w, F_n, F_s กำหนดไว้ในสมการ (3-8) และค่าตัวเลขเพกเลต (Peclet number; Pe) เขียนในรูปสมการดังนี้

$$Pe_e = \frac{F_e}{D_e}, Pe_w = \frac{F_w}{D_w}, Pe_n = \frac{F_n}{D_n}, Pe_s = \frac{F_s}{D_s} \quad (3-18)$$

จากหลักการเดียวกันสามารถขยายไปสู่การดิสครีไทซ์ จาก 2 มิติ สู่ 3 มิติได้โดยกำหนดให้ $t = \text{top}$, เป็นผิวด้านบน และ $b = \text{bottom}$ เป็นผิวด้านล่าง ซึ่งแสดงพื้นผิวในทิศทางของแกน z

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_T \phi_T + a_B \phi_B + b \quad (3-19)$$

โดยที่

$$a_E = D_e A(|Pe_e|) + [[-F_e, 0]] \quad (3-20a)$$

$$a_W = D_w A(|Pe_w|) + [[F_w, 0]] \quad (3-20b)$$

$$a_N = D_n A(|Pe_n|) + [[-F_n, 0]] \quad (3-20c)$$

$$a_S = D_s A(|Pe_s|) + [[F_s, 0]] \quad (3-20d)$$

$$a_T = D_t A(|Pe_t|) + [[-F_t, 0]] \quad (3-20e)$$

$$a_B = D_b A(|Pe_b|) + [[F_b, 0]] \quad (3-20f)$$

$$a_P^0 = \frac{\rho_P^0 \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \quad (3-20g)$$

$$b = S_C \Delta x \Delta y \Delta z + a_P^0 \phi_P^0 \quad (3-20h)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_T + a_B + a_P^0 - S_P \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3-20i)$$

และ

$$F_e = (\rho u)_e \Delta y \Delta z, \quad D_e = \frac{\Gamma_e \Delta y \Delta z}{(\delta x)_e} \quad (3-21a)$$

$$F_w = (\rho u)_w \Delta y \Delta z, \quad D_w = \frac{\Gamma_w \Delta y \Delta z}{(\delta x)_w} \quad (3-21b)$$

$$F_n = (\rho v)_n \Delta z \Delta x, \quad D_n = \frac{\Gamma_n \Delta z \Delta x}{(\delta y)_n} \quad (3-21c)$$

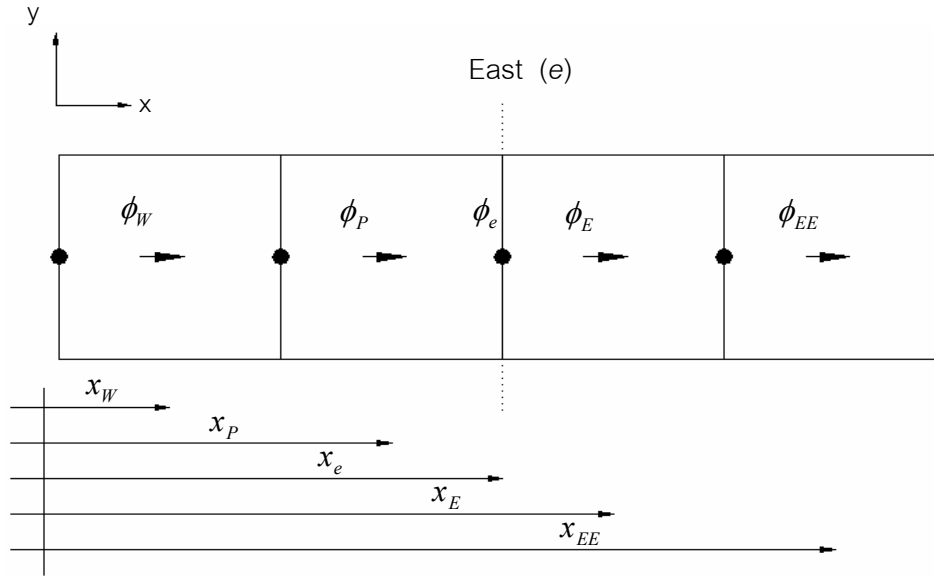
$$F_s = (\rho v)_s \Delta z \Delta x, \quad D_s = \frac{\Gamma_s \Delta z \Delta x}{(\delta y)_s} \quad (3-21d)$$

$$F_t = (\rho w)_t \Delta x \Delta y, \quad D_t = \frac{\Gamma_t \Delta x \Delta y}{(\delta z)_t} \quad (3-21e)$$

$$F_b = (\rho w)_b \Delta x \Delta y, \quad D_b = \frac{\Gamma_b \Delta x \Delta y}{(\delta z)_b} \quad (3-21f)$$

3.2.2.3 แบบแผนการคำนวณสำหรับระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม

แบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical scheme) ใช้สำหรับการคำนวณค่า ϕ บนผิวปริมาตรควบคุม เพื่อความสะดวกได้จัดการแบ่งผลคูณของค่าฟลักซ์ (ϕ) กับค่าความเร็วการส่งถ่าย (Transport velocity; u_i) ตัวอย่าง เช่น ฟลักซ์ที่ผ่านผิวด้านตะวันออกของ ϕ_P ดังแสดงในภาพประกอบ 3.3



ภาพประกอบ 6 ฟลักซ์การพาและฟลักซ์การแพร่บนผิวของปริมาตรควบคุม

กำหนดเป็น

$$[\phi u_i] \approx [\phi]_{conv} [u_i]_{tran} \quad \text{นั่นคือ} \quad [\phi u]^{east} \approx [\phi]_{conv}^{east} [u]_{tran}^{east} \quad (3-22)$$

เมื่อตัวก East อ้างอิงถึงค่าที่ผิวด้านตะวันออก สำหรับค่า ϕ_e ขึ้นอยู่กับแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลขที่เลือกใช้ สำหรับการประมาณค่ามีด้วยกันหลายวิธี ในที่นี้ขอแสดงรายละเอียดของแบบแผนในวิธีผลต่างกึ่งกลาง (Central Differencing Scheme; CDS) แบบแผนวิธีอัปวินด์ (Upwind Differencing Scheme; UDS) และแบบแผนวิธีคิวิกส์ (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics; QUICK) ซึ่งเป็นแบบแผนพื้นฐาน

1. แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลาง

แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลาง คือ ประมาณค่าเชิงเส้นของค่า ϕ โดยการหาค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่ผิวของปริมาตรควบคุม เช่นที่ผิวด้านตะวันออก(East)

$$[\phi]_{conv}^{east} \approx \phi_e \cong \lambda_{e,P} \phi_E + (1 - \lambda_{e,P}) \phi_P \quad (3-23)$$

โดยที่ $\lambda_{e,P}$ คือค่าเพกเตอร์การประมาณ, $\left[\lambda_{e,P} = \frac{x_e - x_P}{x_E - x_P} \right]$, แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลางนี้มีค่า

อันดับความถูกต้อง (Order of accuracy) เป็นอันดับสอง จากการประมาณพบว่ามีค่าความผิดพลาด

(Truncation Error; TE) เป็น $T.E. = \frac{(x_e - x_P)(x_E - x_e)}{2} \left(\frac{\partial^2 \phi_P}{\partial x^2} \right)$ อย่างไรก็ตามแบบแผนวิธี

ผลต่างกึ่งกลางจะมีความเสถียร(Stability) เมื่อค่าตัวเลขเพกเลต(Pe) น้อยกว่าสอง $[Pe < 2]$

2. แบบแผนวิธีอัปวินด์

แบบแผนวิธีอัปวินด์ เป็นการประมาณค่าของ ϕ โดยใช้ค่าที่ต้นกระแส (Upstream) หรือท้ายกระแส (Downstream) บนผิวปริมาตรควบคุมโดยขึ้นอยู่กับทิศทางการไหล วิธีนี้คล้ายกับวิธีผลต่างแบบไปข้างหน้า (Forward difference) หรือวิธีผลต่างแบบย้อนหลัง (Backward difference) โดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor's series) เมื่อทำการขยายค่าระหว่าง ϕ_e และ ϕ_E และ ϕ_e และ ϕ_P ได้สมการดังนี้

$$\phi_e = \phi_P + \underbrace{(x_e - x_P) \left(\frac{\partial \phi_P}{\partial x} \right)}_{T.E.} + HOT. \quad (3-24)$$

และ

$$\phi_e = \phi_E + \underbrace{(x_E - x_e) \left(\frac{\partial \phi_E}{\partial x} \right)}_{T.E.} + HOT. \quad (3-25)$$

การประมาณค่า ϕ_e กำหนดเป็น

$$[\phi]_{conv}^{east} = \phi_e = \begin{cases} \phi_E & \text{if } [u]_{tran}^{east} > 0 \\ \phi_P & \text{if } [u]_{tran}^{east} < 0 \end{cases} \quad (3-26)$$

ซึ่งแบบแผนวิธีอัปวินด์ปกติมีค่าอันดับความถูกต้องเป็นอันดับหนึ่ง แต่สามารถขยายเทอมค่าความผิดพลาดอันดับสูง (Higher Order Truncated error; HOT) ให้มีค่าสูงขึ้นได้ทั้งนี้เพื่อพัฒนาให้สมการมีความถูกต้องเพิ่มขึ้นได้ เพื่อเป็นการเพิ่มค่าอันดับความถูกต้อง (Order of accuracy) ได้

3. แบบแผนวิธีควิกส์

แบบแผนวิธีควิกส์เป็นแบบแผนวิธีที่ใช้ตำแหน่ง 3 ตำแหน่งสำหรับการประมาณค่าของแต่ละผิวเซลล์ (โดยใช้ 2 ตำแหน่งที่ต้นกระแสและ 1 ตำแหน่งที่ท้ายกระแส) โดยทั่วไปสามารถเขียนความสัมพันธ์ของสมการสำหรับผิว เช่นกรณีผิวด้านตะวันออก (East) ได้ดังนี้

$$[\phi]_{conv}^{east} = \phi_e = \begin{cases} q_1 \phi_E - q_2 \phi_W + (1 - q_1 + q_2) \phi_P & \text{if } [u]_{tran}^{east} > 0 \\ q_3 \phi_P - q_4 \phi_{EE} + (1 - q_3 + q_4) \phi_E & \text{if } [u]_{tran}^{east} < 0 \end{cases} \quad (3-27)$$

เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ q_i กำหนดเป็น

$$q_1 = \frac{(2 - \lambda_{e,W}) \lambda_{e,P}^2}{1 + \lambda_{e,P}^2 - \lambda_{e,W}} \quad (3-28a)$$

$$q_2 = \frac{(1 - \lambda_{e,P})(1 - \lambda_{e,W})^2}{1 + \lambda_{e,P}^2 - \lambda_{e,W}} \quad (3-28b)$$

$$q_3 = \frac{(1 + \lambda_{e,W})(1 - \lambda_{e,P})^2}{1 + \lambda_{e,E}^2 - \lambda_{e,P}} \quad (3-28c)$$

$$q_4 = \frac{\lambda_{e,P}\lambda_{e,E}^2}{1 + \lambda_{e,E}^2 - \lambda_{e,P}} \quad (3-28d)$$

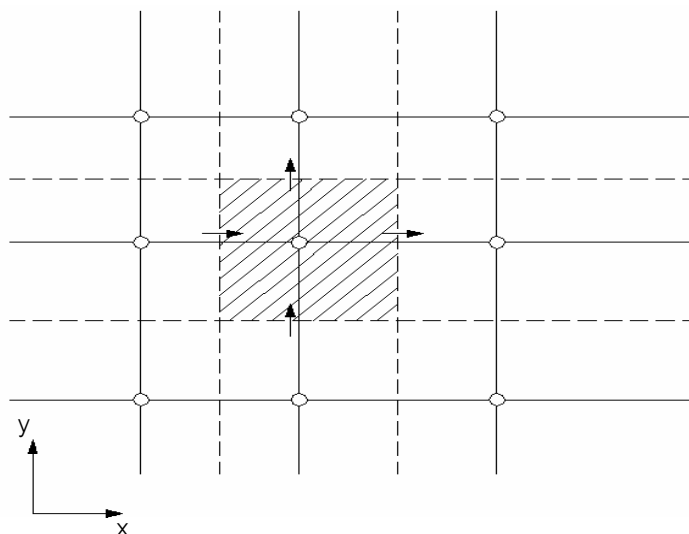
ค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้สามารถใช้ได้ทั้งกริดขนาดสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ (Uniform and non-uniform grid) ในกรณีพิจารณากริดสม่ำเสมอ โดยใช้หลักการของอนุกรมเทย์เลอร์ในการขยายค่า ϕ_e ซึ่งกำหนดได้เป็นดังนี้ เมื่อ $[u]_{tran}^{east} > 0$

$$\phi_e = \frac{\phi_e + \phi_E}{2} - \frac{1}{8}(\phi_E - 2\phi_P + \phi_W) - \underbrace{\frac{3(\Delta x)^3}{48} \left(\frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \right)_P}_{T.E.} + HOT. \quad (3-29)$$

ซึ่งมีความสอดคล้องกับสมการ (3-27) เมื่อ $q_1 = 3/8$ และ $q_2 = -1/8$ แบบแผนวิธีคิกส์มีค่าอันดับความถูกต้องเป็นอันดับสาม ซึ่งสูงกว่าทั้งสองแบบแผนที่กล่าวมาข้างต้น

3.2.3 การแก้ปัญหาสนามการไหล

การดิสครีไทซ์สมการโดยการกำหนดให้เก็บค่าตัวแปรทุกตัวไว้ที่หัวของกริดปกตินั้น อาจทำให้เกิดการไม่ควบคู่ (Uncouple) ของความเร็วและความดันหรือที่เรียกว่า Checkerboard problem ขึ้นได้ การแก้ปัญหานี้ทำได้โดยการเก็บค่าปริมาณสเกลาร์ เช่น ความดัน อุณหภูมิ ไว้ที่ตำแหน่งหัวของ กริดปกติ(วงกลมเล็ก) และคำนวณความเร็วทุกมิติที่ผิวของปริมาตรควบคุม (ลูกศร) ดังแสดงในภาพประกอบ 7 ซึ่งเป็นลักษณะการจัดวางตัวแปรแบบกริดเยื้องกัน (Staggered grid) ใน 2 มิติ โดยทำการคำนวณค่าความเร็ว (u, v) ที่ผิวของปริมาตรควบคุมและคำนวณตัวแปรที่เป็นปริมาณสเกลาร์บนหัวของกริดปกติ



ภาพประกอบ 7 การจัดวางตัวแปรแบบ แบบกริดเยื้องกัน $\rightarrow = u$, $\uparrow = v$, $O =$ ตัวแปรอื่นๆ

ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ของโมเมนตัม และสมการเชิงอนุพันธ์ของความต่อเนื่องนั้น ต้องมีผลเฉลยที่สอดคล้องกัน เนื่องจากค่าตัวแปรความเร็วทั้งสามมิติและความดันต้องเป็นไปตามทุกกฎของสมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อน ทำให้ในระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข ได้พัฒนากระบวนการคำนวณเพื่อให้สมการทั้งสองมีผลเฉลยที่สอดคล้องกัน กระบวนการคำนวณที่นิยมใช้กัน ได้แก่วิธีซิมเปิล(SIMPLE), วิธีซิมเปิลอา (SIMPLER), วิธีซิมเปิลซี (SIMPLEC) และวิธีการไพโซ (PISO) หรือ Fractional step method ในที่นี้ได้แสดงรายละเอียดเฉพาะกระบวนการหาคำตอบของวิธีซิมเปิล (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation; SIMPLE) ซึ่งถูกพัฒนาโดย Patankar, V ⁽²¹⁾ และ Tractional step method สำหรับกระบวนการหาคำตอบของวิธีอื่นๆ สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก Patankar, V ⁽²¹⁾ และ Versteeg, H. K. และ Malalasekera, W ⁽¹²⁾

3.2.3.1 วิธีการซิมเปิล

วิธีซิมเปิลเริ่มจากการสมมติค่าความดันและความเร็ว แล้วคำนวณหาค่าความเร็วจากค่าความเร็วและความดันที่สมมติ เพื่อนำค่าความเร็วที่คำนวณได้ไปหาค่าความดันอีกครั้ง โดยใช้วิธีค่าความดันแก้ไข (Pressure-correction method) เพื่อช่วยคำนวณความดันให้ถูกต้องซึ่งค่าความดันแก้ไข (Pressure-correction) ที่ได้นี้ ถูกนำกลับไปหาค่าความเร็ว และทำซ้ำตามขั้นตอนดังกล่าวจนกระทั่งผลเฉลยเข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง ซึ่งทำให้ค่าความเร็วและค่าความดันมีความสัมพันธ์ไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมและการอนุรักษ์มวล จากสมการเชิงอนุพันธ์ของโมเมนตัมทำการดิสครีไทซ์ ได้สมการเป็น

$$\text{ในแกน } x \quad a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b + (p_P - p_E) A_e \quad (3-30)$$

$$\text{ในแกน } y \quad a_n v_n = \sum a_{nb} v_{nb} + b + (p_P - p_N) A_n \quad (3-31)$$

$$\text{ในแกน } z \quad a_t w_t = \sum a_{nb} w_{nb} + b + (p_P - p_T) A_t \quad (3-32)$$

โดยกำหนดให้ค่า

$$p = p^* + p' \quad (3-33)$$

$$u = u^* + u' \quad (3-34)$$

$$v = v^* + v' \quad (3-35)$$

$$w = w^* + w' \quad (3-36)$$

โดยที่ p, u, v, w คือ ความดันและความเร็วที่ถูกต้อง

p^*, u^*, v^*, w^* คือ ความดันที่คาดเดา (Guessed pressure) และความเร็วที่คำนวณจาก p^*

p', u', v', w' คือ ค่าความดันแก้ไข (Pressure correction) และค่าแก้ไขความเร็ว (Velocity correction)

โดยที่ค่าความเร็ว u^*, v^*, w^* สามารถคำนวณได้จากสมการโมเมนตัมที่มีลักษณะเช่นเดียวกับสมการ (3-30) ถึง (3-32) ซึ่งได้สมการดิครีไทซ์สำหรับความเร็วเป็น

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b + (p_P^* - p_E^*) A_e \quad (3-37)$$

$$a_n v_n^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + b + (p_P^* - p_N^*) A_n \quad (3-38)$$

$$a_t w_t^* = \sum a_{nb} w_{nb}^* + b + (p_P^* - p_T^*) A_t \quad (3-39)$$

นำสมการ (3-33) ถึง (3-36) แทนในสมการ (3-30) ถึง (3-32) แล้วลบออกจากสมการ (3-37) ถึง (3-39) ตามลำดับได้สมการใหม่เป็น

$$a_e u_e' = \sum a_{nb} u_{nb}' + (p_P' - p_E') A_e \quad (3-40)$$

$$a_n v_n' = \sum a_{nb} v_{nb}' + (p_P' - p_N') A_n \quad (3-41)$$

$$a_t w_t' = \sum a_{nb} w_{nb}' + (p_P' - p_T') A_t \quad (3-42)$$

ในกระบวนการหาคำตอบของวิธีซิมเพลได้ละทิ้งพจน์ $\sum a_{nb} u_{nb}'$, $\sum a_{nb} v_{nb}'$, $\sum a_{nb} w_{nb}'$ ในสมการ (3-40) ถึง (3-42) ซึ่งได้สมการค่าแก้ไขความเร็วดังนี้

$$a_e u'_e = (p'_P - p'_E) A_e \quad (3-43)$$

หรือ

$$u'_e = d_e (p'_P - p'_E) \quad \text{เมื่อ} \quad d_e = \frac{A_e}{a_e} \quad (3-44)$$

สมการ (3-44) เรียกว่าสมการค่าแก้ไขความเร็ว (Velocity correction equation) ดังนั้นค่า u_e จึงมีความสัมพันธ์เป็น

$$u_e = u_e^* + d_e (p'_P - p'_E) \quad (3-45)$$

และพิจารณาในลักษณะเดียวกันได้สมการเป็น

$$v_n = v_n^* + d_n (p'_P - p'_N) \quad (3-46)$$

$$w_t = w_t^* + d_t (p'_P - p'_T) \quad (3-47)$$

จากสมการเชิงอนุพันธ์ของความต่อเนื่อง $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$ ทำการอินทิเกรตตลอดปริมาตรควบคุมจะได้สมการใหม่เป็น

$$\begin{aligned} \frac{(\rho_P - \rho_P^0) \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + [(\rho u)_e - (\rho u)_w] \Delta y \Delta z + [(\rho v)_n - (\rho v)_s] \Delta z \Delta x \\ + [(\rho w)_t - (\rho w)_b] \Delta x \Delta y = 0 \end{aligned} \quad (3-48)$$

แทนค่าความเร็วจากสมการ (3-45) ถึง (3-47) ลงใน (3-48) จะได้สมการดิสครีไทซ์สำหรับค่า p' ดังนี้

$$a_P p'_P = a_E p'_E + a_W p'_W + a_N p'_N + a_S p'_S + a_T p'_T + a_B p'_B + b \quad (3-49)$$

โดยที่

$$a_E = \rho_e d_e \Delta y \Delta z \quad (3-50a)$$

$$a_W = \rho_w d_w \Delta y \Delta z \quad (3-50b)$$

$$a_N = \rho_n d_n \Delta z \Delta x \quad (3-50c)$$

$$a_S = \rho_s d_s \Delta z \Delta x \quad (3-50d)$$

$$a_T = \rho_t d_t \Delta x \Delta y \quad (3-50e)$$

$$a_B = \rho_b d_b \Delta x \Delta y \quad (3-50f)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_T + a_B \quad (3-50g)$$

และ

$$b = \frac{(\rho_p^0 - \rho_p) \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + [(\rho u^*)_w - (\rho u^*)_e] \Delta y \Delta z + [(\rho v^*)_s - (\rho v^*)_n] \Delta z \Delta x + [(\rho w^*)_b - (\rho w^*)_t] \Delta x \Delta y = 0 \quad (3-50h)$$

ดังนั้นขั้นตอนของกระบวนการซิมเปิลสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สมมติค่าของ $u^*, v^*, w^*, \phi^*, p^*$
2. คำนวณค่า u^*, v^*, w^* จากสมการ (3-37) ถึง (3-39)
3. นำค่า u^*, v^*, w^* ที่คำนวณได้มาแทนค่าในสมการ (3-49)
4. คำนวณหาค่า p' จากสมการ (3-49) จากนั้นนำมาแทนค่าในสมการ (3-33) จากนั้นจึงนำค่า p ที่ได้มากำหนดให้เป็นค่า p^* ค่าใหม่
5. คำนวณค่า u, v, w จากสมการ (3-45) ถึง (3-47) โดยใช้ค่า p' จากขั้นตอนที่ 4 จากนั้นจึงกำหนดให้ค่า u, v, w ที่ได้เป็น u^*, v^*, w^* ค่าใหม่
6. นำค่า u, v, w ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 5 มาหาค่าตัวแปร ϕ เช่น ค่าอุณหภูมิ เป็นต้น จากนั้นจึงกำหนดค่า ϕ ที่ได้เป็นค่า ϕ^* ค่าใหม่
7. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 ถึง 6 จนกระทั่ง $u^*, v^*, w^*, \phi^*, p^*$ มีค่าลู่เข้าสู่ค่าที่ถูกต้องโดยตรวจสอบจากการเข้าใกล้ศูนย์ของเทอม b ในสมการ (3-49) ซึ่งแสดงว่าค่า $u^*, v^*, w^*, \phi^*, p^*$ ที่คำนวณได้มีค่าสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของความต่อเนื่อง

3.2.3.2 วิธีการไฟโซ

วิธีการนี้เป็นวิธีการใหม่ที่มีความเรียบง่ายและไม่ซับซ้อนเหมือนวิธีการในตระกูลซิมเปิล โดยหลักการสำหรับวิธีการนี้จะไม่มีการใช้ค่าความดันในขั้นตอนการคาดเดาในครั้งแรกเพื่อนำไปหาค่าความเร็ว แต่จะใช้เทคนิคของ Alternating Direction Implicit (ADI) ในการหาคำตอบ พิจารณาสมการการควบคุมการไหลในรูปแบบของ

$$u_i^{n+1} = u_i^n + \Delta t (C_i + D_i + P_i) \quad (3-51)$$

โดยที่

C_i = เทอมการพา

D_i = เทอมการแพร่

P_i = เทอมความดัน

สำหรับวิธีการไฟโซหรือวิธีการ Fractional step สมการ (3-51) จะถูกแยกออกเป็นสามขั้นตอนย่อย

ขั้นตอนที่ 1

$$u_i^* = u_i^n + (C_i) \Delta t \quad (3-52)$$

ขั้นตอนที่ 2

$$u_i^{**} = u_i^* + (D_i) \Delta t \quad (3-53)$$

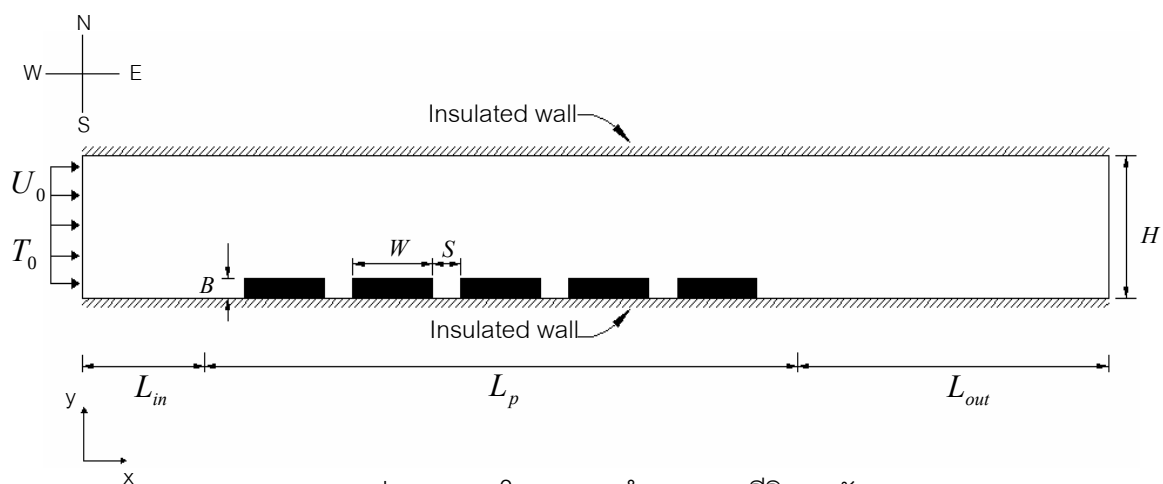
ขั้นตอนที่ 3

$$u_i^{n+1} = u_i^{**} + (P_i) \Delta t \quad (3-54)$$

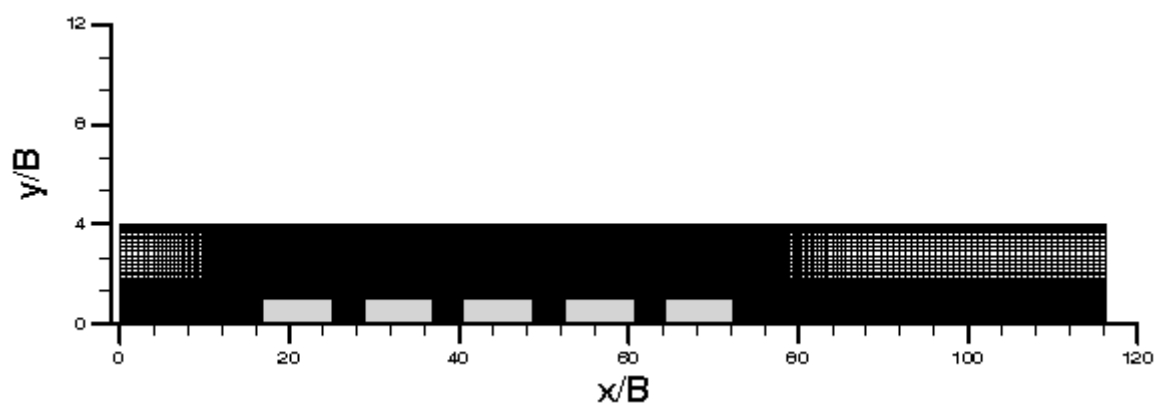
ในขั้นตอนที่ 3 ค่าความดันที่ได้จะถูกแทนค่าลงในสมการ โดยรูปแบบของสมการที่ได้จะอยู่ในรูปของสมการพัวซองส์ (Poisson equation) เมื่อทำการแก้สมการนี้แล้ว ค่าความเร็วที่ได้ถือว่าเป็นค่าความเร็วถูกต้องที่สามารถนำไปใช้งานในการคำนวณต่อไปได้

3.3 การศึกษาความเป็นอิสระของกริด

การคำนวณได้กระทำบนโดเมนการคำนวณ ดังแสดงในภาพประกอบ 8 โดยที่ $L_{in} = 3B$, $L_p = 83.3B$, $L_{out} = 30B$, $L_z = 25B$ สำหรับการคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อนได้ใช้วิธีการจัดวางกริดในโดเมนการคำนวณแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid) ดังแสดงในภาพประกอบ 3.6 รวมทั้งใช้ขนาดของกริดที่ได้รับการทดสอบผลกระทบโดยใช้ข้อมูลในตาราง 2 คำนวณจากผลการคำนวณซึ่งแสดงในตาราง 3 และในภาพประกอบ 10 และ 11 พบว่าขนาดของกริดที่ $dx_{min}/B = 3.3\%$ เป็นขนาดของกริดที่เหมาะสมที่นำไปใช้ในการคำนวณ ซึ่ง dx_{min} เป็นขนาดกริดเล็กที่สุดภายในโดเมนการคำนวณและมีขนาดเท่ากับ dy_{min} เฉพาะที่บริเวณมุมและบนผนังโดยรอบของชิพ ดังแสดงในภาพประกอบ 12 ซึ่งกริดในบริเวณที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของคำตอบน้อยได้ถูกปรับให้มีขนาดใหญ่ขึ้นในอัตราที่เหมาะสมจากขนาดจาก $dx_{min}/B = 3.3\%$



ภาพประกอบ 8 โดเมนการคำนวณกริด 5 ตัว



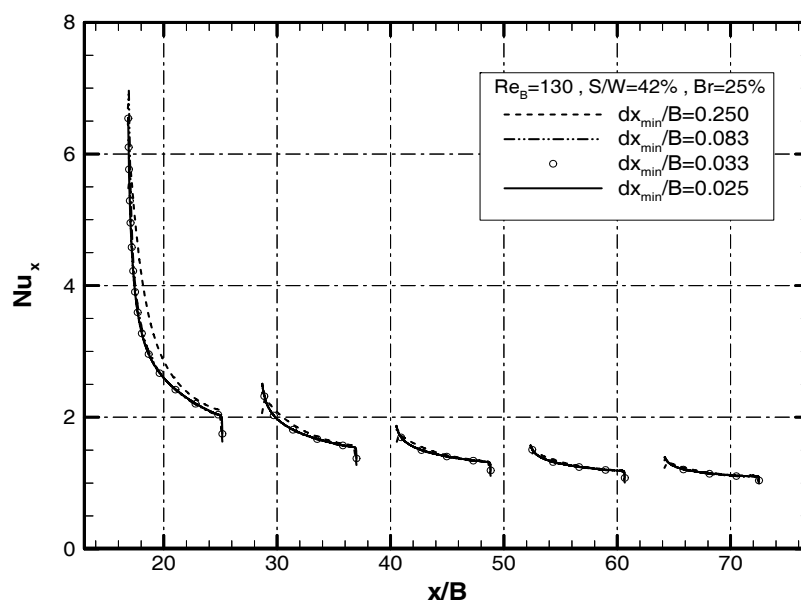
ภาพประกอบ 9 การจัดวางกริดบนโดเมนการคำนวณ

ตาราง 2 ข้อมูลสำหรับการคำนวณหาผลกระทบของกริดใน 2 มิติ

Re_B	$Br(\%)$	$S/W(\%)$	L_{in}	L_p	L_{out}	Pr	$\dot{q} (W / m^2)$
130	25	42	$3B$	$83.3B$	$30B$	0.712	64

ตาราง 3 ผลการคำนวณของกริดใน 2 มิติ

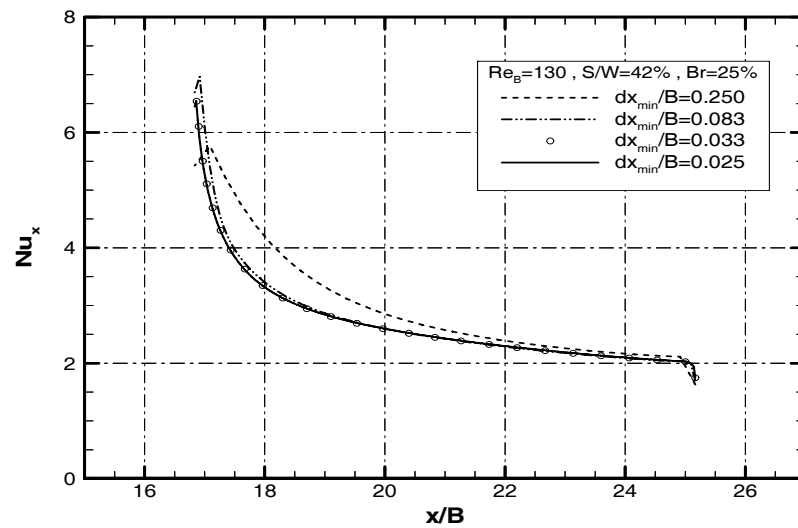
Grid size	$dx_{\min}/B$	$\overline{Nu}_B$					$\overline{Nu}_B$ Maximum relative error (%)
		Chip1	Chip2	Chip3	Chip4	Chip5	
339 × 14	0.250	2.99370	1.81770	1.47416	1.29038	1.17614	-
813 × 35	0.083	2.73130	1.76560	1.44635	1.27105	1.15831	8.76
1716 × 75	0.033	2.68322	1.76758	1.44726	1.27152	1.15838	1.76
2182 × 95	0.025	2.68361	1.76944	1.44973	1.27523	1.16441	0.52



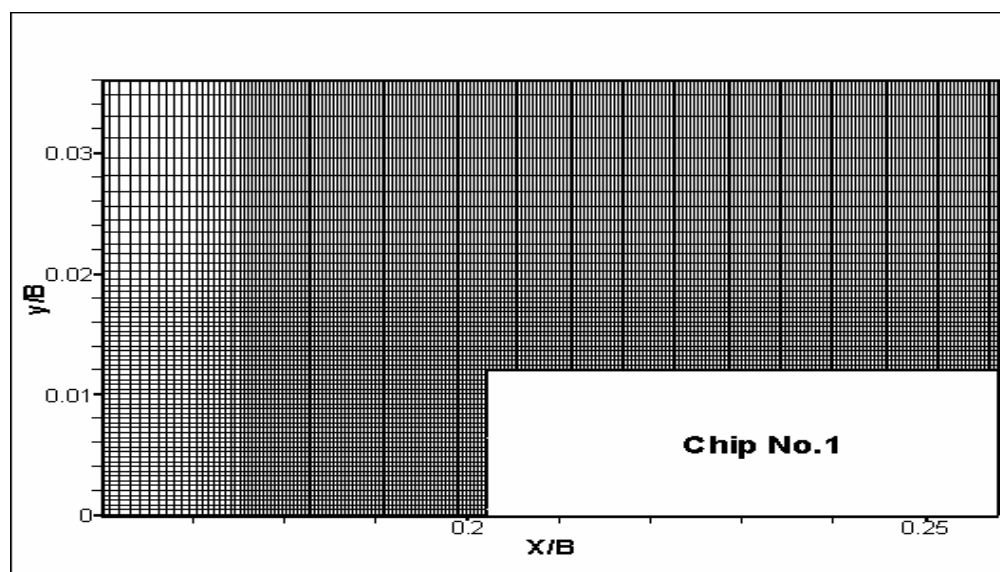
ภาพประกอบ 10 ค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ ณ ตำแหน่งผนังด้านบนของชิพ

จากภาพประกอบ 10 แสดงค่า Nu_x ที่บริเวณผิวของชิพทั้ง 5 ตัว พบว่าที่ชิพ ตัวที่ 2,3,4 และ 5 นั้นมีความแตกต่างกันน้อยมาก แต่ที่ชิพตัวที่ 1 มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ในแต่ละขนาดของ กริด ดังแสดงในภาพประกอบ 11 ส่วนที่ขนาดของกริด $dx_{\min}/B=3.3\%$ กับ $dx_{\min}/B=0.025\%$ นั้นแทบจะไม่มี ความแตกต่างกันเลย ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็น ที่จะต้องสร้างขนาดของกริด ให้มีขนาดเล็กไปกว่านี้ เพราะทำให้เสียเวลาและสิ้นเปลืองพลังงานของคอมพิวเตอร์ใน

การคำนวณ ขนาดกริดที่ $dx_{\min}/B = 3.3\%$ จึงมีความเหมาะสมสำหรับการคำนวณใน 2 มิติสำหรับงานวิจัยนี้



ภาพประกอบ 11 ภาพขยายค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์เฉพาะที่ของชิปตัวที่หนึ่ง



ภาพประกอบ 12 การจัดวางกริดบนโดเมนการคำนวณในบริเวณด้านทางเข้า

ตาราง 4 ข้อมูลตัวแปรสำหรับการคำนวณผลกระทบของกริดใน 3 มิติ

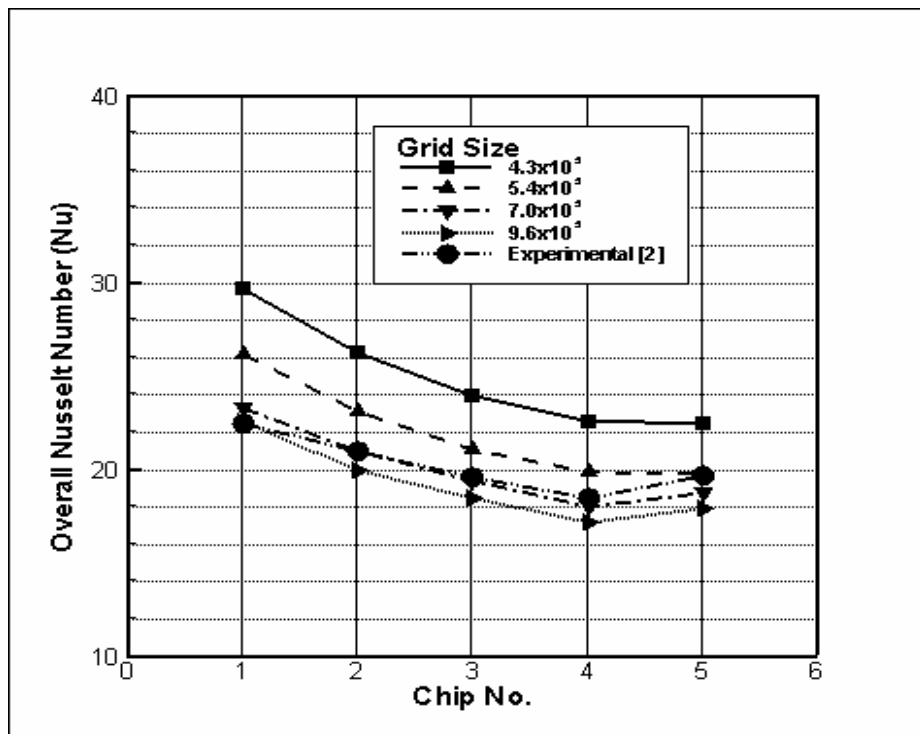
Re_B	S_c	B	H	H/B	S_c/H	$\dot{q} (W/m^2)$
518	144	12	48	4	3	64

การคำนวณผลกระทบของกริดที่มีผลต่อคำตอบในแบบจำลองการไหลใน 3 มิติ ได้ทำการสร้าง กริดขึ้นมา 4 ขนาดดังในตาราง 5

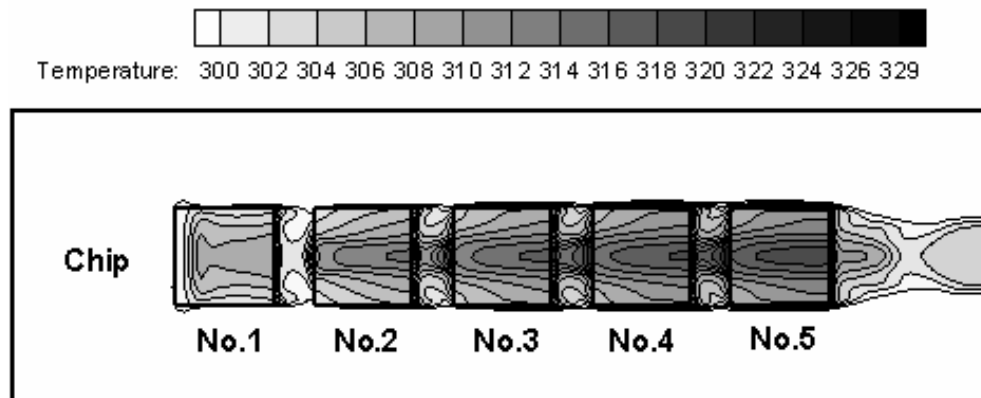
ตาราง 5 ค่าตัวแปรที่เกิดจากผลกระทบของกริดในการคำนวณของแบบจำลองการไหลใน 3 มิติ

ชุดที่	Grid size	$\overline{Nu}_B$						$\overline{Nu}_B$ Maximum relative error (%)
		chip 1	chip 2	chip 3	chip 4	chip 5	Sum	
1	435,280	29.7	26.22	23.98	22.58	22.47	124.95	-
2	540,000	26.13	23.07	21.11	19.87	19.79	109.97	11.99
3	702,125	23.3	20.98	19.45	18.06	18.8	100.59	8.53
4	966,375	22.57	19.97	18.51	17.15	17.95	96.15	4.62
	Experimental	22.5	21	19.6	18.5	19.7	101.3	-

ผลการคำนวณค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์สูงสุดของค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์ ในแบบจำลองการไหล 3 มิติขนาดของกริดชุดที่ 1 เทียบกับขนาดของกริดชุดที่ 2 มีความผิดพลาดสัมพัทธ์อยู่ 11.99 % ขนาดของกริดชุดที่ 2 เทียบกับขนาดของกริดชุดที่ 3 มีความผิดพลาดสัมพัทธ์อยู่ 8.53 % และเมื่อขนาดของกริดชุดที่ 3 เทียบกับขนาดของกริดชุดที่ 4 มีความผิดพลาดสัมพัทธ์อยู่ 4.62 % แสดงให้เห็นว่าการสร้างขนาดของกริดให้มีขนาดเล็กลงมากกว่านี้ ก็จะทำให้ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์มีค่าน้อยลงไปอีก แต่สำหรับค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ที่ 4.62 % ทำให้ผลของการคำนวณขนาดของกริดชุดที่ 3 และ ขนาดของกริดชุดที่ 4 มีความแตกต่างกันน้อยมากซึ่งอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ทางการคำนวณ และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ผ่านมา ของน้ำมันดีเซล (2) ดังแสดงในภาพประกอบ 13 พบว่าขนาดของกริดชุดที่ 3 มีผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมาก



ภาพประกอบ 13 ภาพการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลอง $Re_B=518$, $H/B=4$



ภาพประกอบ 14 แสดงการระบายความร้อนที่ผิวของชิพ 3 มิติ ขนาดกริด 7.02×10^{-5} , $Re_B=518$, $H/B=4$

เมื่อพิจารณาภาพประกอบ 14 การระบายความร้อนที่บริเวณผิวของชิพ ซึ่งสีขาวหมายถึงบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ส่วนสีดำหมายถึงบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง พบว่าที่ขนาดของ กริด $702,125$ แสดงรายละเอียดผลการจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อน ได้ดี ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิ โดยชิพตัวที่ 1 จะถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุดและชิพตัวที่ 5 จะถ่ายเทความร้อนได้น้อยที่สุด สอดคล้องกับการทดลอง⁽²⁾ และจะใช้ขนาดกริดนี้ในการคำนวณบทที่ 4 ต่อไป

3.4 การไหลแบบสายสลับขึ้นลง

ในการไหลแบบสายสลับขึ้นลงนั้นเป็นการปรับแต่งทิศทางและความเร็วของกระแสการไหลเข้าของของไหล ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้สร้างสมการในการคำนวณเพื่อให้สามารถจำลองการไหลแบบสายสลับขึ้นลงในโปรแกรมได้ ดังแสดงในสมการ

$$u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2} \quad (3-55)$$

$$u_x = U_0 |\cos 2\pi ft| \quad (3-56)$$

$$u_y = U_0 \sin 2\pi ft \quad (3-57)$$

โดยที่

B = ความสูงของชีพ

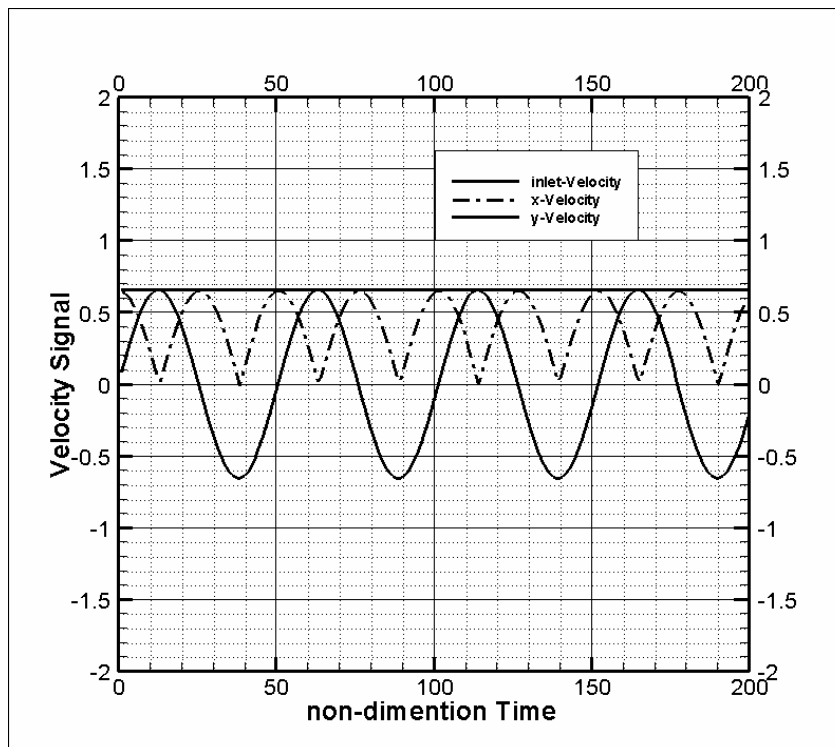
f = ความถี่

t = เวลา

U_0 = ความเร็วของของไหลด้านทางเข้า

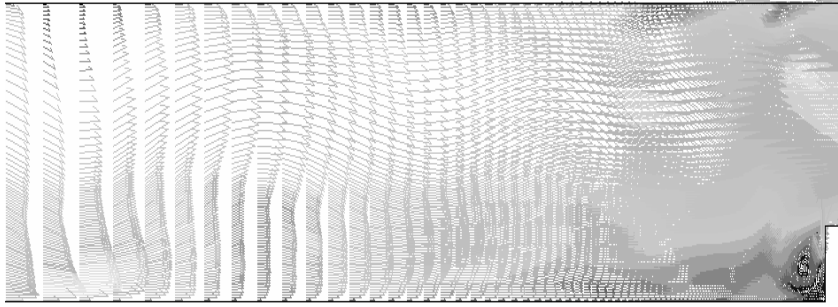
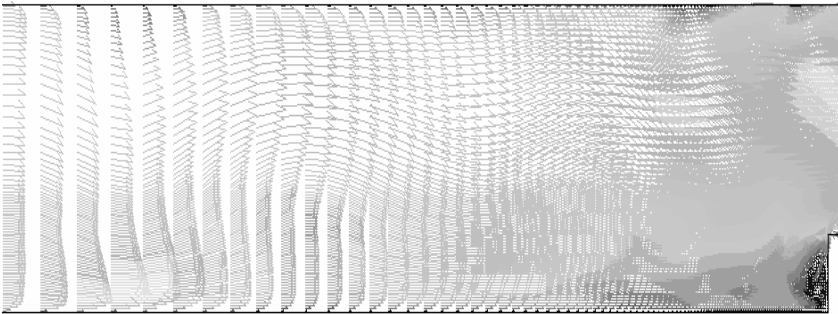
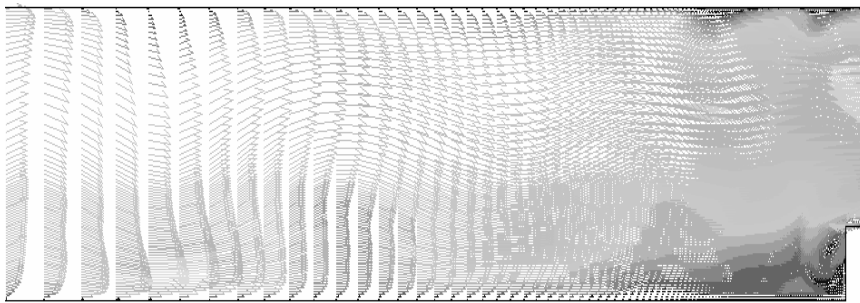
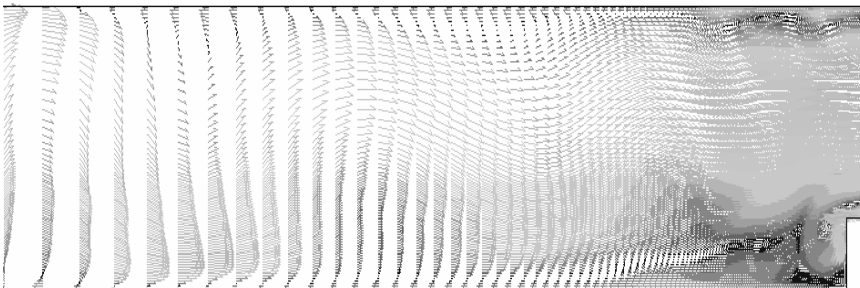
u_x = ความเร็วในทิศทางแกน x

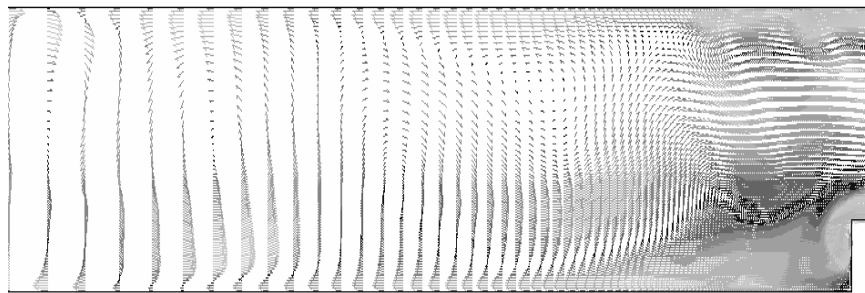
u_y = ความเร็วในทิศทางแกน y



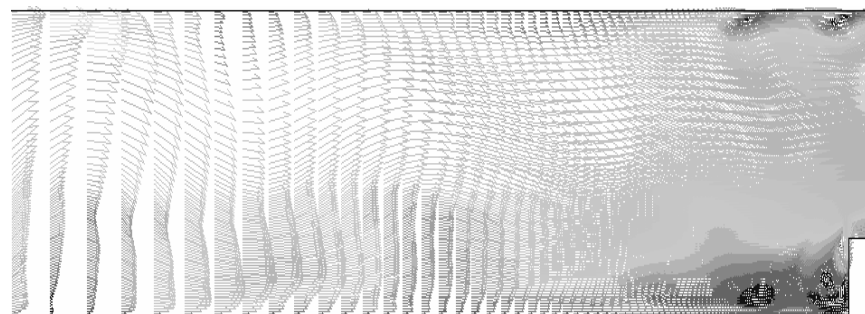
ภาพประกอบ 15 กราฟแสดงการไหลแบบส่ายสลับขึ้นลงที่ค่า $Re_B=518$, $Br=25\%$, $SW=42\%$

พิจารณาภาพประกอบ 15 กราฟความเร็วที่ทางเข้าจะมีค่าคงที่เนื่องจากเป็นความเร็วของของไหลด้านทางเข้า คือ U_0 ในสมการ (3-55) ถึง (3-58) กราฟความเร็วเป็นความเร็วในทิศทางแกน x ซึ่งค่าของ u_x จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 เท่านั้น ในสมการ (3-56) จึงจำเป็นต้องมีค่าสมบูรณเพื่อ บังคับไม่ให้ค่าของ u_x มีค่าเป็นลบ ($u_x = U_0 |\cos 2\pi ft|$) และเป็นการบังคับให้เวกเตอร์ของ กระแสการไหล มีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางของแกน x ทางด้านบวกเท่านั้น กราฟความเร็วในทิศทาง แกน y ($u_y = U_0 \sin 2\pi ft$) ซึ่งค่าของ u_y จะอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 ในสมการ (3-57) การที่ค่า ความเร็วในทิศทางแกน y มีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 จะเป็นตัวสร้างการไหลของกระแสการไหลให้ เกิดการส่ายสลับขึ้นลง โดยมีความสัมพันธ์กับความเร็วของ u_x ดังนั้นค่าความเร็วของการไหลแบบ ส่ายสลับขึ้นลง u จึงมีค่าเท่ากับ $u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}$ ในสมการ (3-55) ซึ่งก็เท่ากับความเร็วของ U_0 นั่นเอง ผลจากการจำลองในสมการดังกล่าวจะแสดงในภาพประกอบ 15

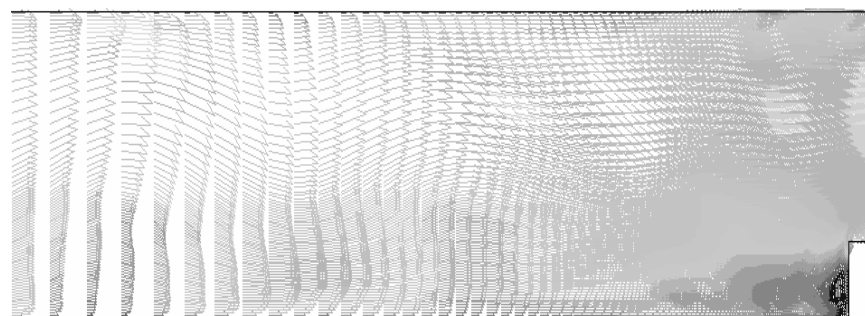
 $t' = 245.22$  $t' = 245.26$  $t' = 245.30$  $t' = 245.34$



$$t' = 245.43$$



$$t' = 245.48$$



$$t' = 245.50$$

ภาพประกอบ 16 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงที่ค่า $Re_B=518$, $Br=25\%$, $S/W=42\%$ ที่ $245.22 \leq t' \leq 245.50$

จากภาพประกอบ 16 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงตามสมการ (3-55) ถึง (3-58) จากการจำลองพบว่า การไหล มีการส่ายสลับขึ้นลงที่ทางเข้าของโดเมนความเร็วมีรูปแบบเป็นรูปคลื่น ก่อนจะกระทบกับชิพตัวที่ 1

3.5 กรณีศึกษา

เงื่อนไขเขตในการคำนวณการไหล

1. สภาวะทางเข้า (Inlet boundary)

$$u = U_0 = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}, T = T_\alpha$$

2. สภาวะทางออก (Outlet boundary)

$$P = P_{atm}, T = T_\alpha$$

3. กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ผนังเป็น No-slip condition

$$u_x = 0, u_y = 0$$

4. กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ผนังจำลองเป็น Adiabatic boundary condition

$$y = 0; \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0, y = H; \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0$$

5. กำหนดให้ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวขีมีค่าคงที่

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) = - \frac{\dot{q}}{k}$$

6. กำหนดเงื่อนไขขอบเขตทางแกน z สำหรับ 3 มิติ

เป็น No-slip condition และ กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ผนังจำลองเป็น Adiabatic boundary condition

3.6 การวิเคราะห์สภาวะการไหล

3.6.1 การไหลในสภาวะคงตัว (Steady flow) ใน 2 มิติ

การวิเคราะห์ที่ค่า $100 \leq Re_B \leq 400$ โดยทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ ดังนี้ การเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re_B) การเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของชิฟต่อความสูงของโดเมนการคำนวณ (Br) การเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างของชิฟต่อความยาวของชิฟ (SW) และการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของการส่าย (f) ของกระแสการไหลแบบส่ายสลับขึ้นลง

3.6.2 การไหลในสภาวะไม่คงตัว (Unsteady flow) ใน 2 มิติ

ทำการวิเคราะห์ที่ค่า $500 \geq Re_B \leq 1000$ โดยทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ ดังนี้ การเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re_B) การเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของชิพต่อความสูงของโดเมนการคำนวณ (Br) การเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างของชิพต่อความยาวของชิพ (S/W) และการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของการส่าย (f) ของกระแสน้ำไหลแบบส่ายสลับขึ้นลง

3.6.3 การไหลในสภาวะไม่คงตัว (Unsteady flow) ใน 3 มิติ

ทำการวิเคราะห์ที่ค่า $500 \geq Re_B \leq 1000$ โดยทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ ดังนี้ การเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re_B) การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของการส่าย $0.5 \leq f \leq 3$

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

สำหรับในบทนี้เป็นการวิเคราะห์การไหลกับผลของค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re_b) ค่าอัตราส่วนความสูงของชิฟต่อความสูงของโดเมนการคำนวณ ($Br = B/H$) และค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิฟต่อความยาวของชิฟ (SW) เพื่อหาผลกระทบที่มีต่อพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนในสภาวะการไหลเข้าแบบคงตัวและแบบไม่คงตัว โดยกระแสการไหลเข้าเป็นแบบส่ายสลับขึ้นลงในแบบจำลองการไหลของชิฟจำนวน 5 ตัว ทั้งการไหลใน 2 และ 3 มิติ

4.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะการไหลในสภาวะการไหลคงตัวและไม่คงตัว

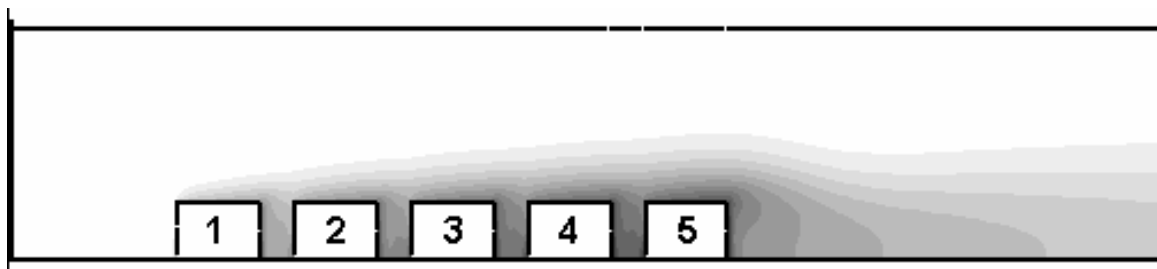
การศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ ในกรณีการไหลสภาวะคงตัวและไม่คงตัวได้กระทำการคำนวณบนโดเมน 2 มิติ และ 3 มิติ ซึ่งขนาดของโดเมนการคำนวณได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 3.5 ในบทที่ 3 สำหรับแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical scheme) เพื่อประมาณหาค่าการพาและหาค่าการแพร่ได้เลือกใช้วิธีคิวิก (QUICK) กระบวนการหาค่าตอบใช้วิธีซิมเปิล (SIMPLE) พิจารณาการคำนวณเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ ($Gr_b / Re_b^2 \leq 1.0$) และใช้ขนาดของกริดที่ได้รับการทดสอบในหัวข้อ 3.2

ในการวิเคราะห์ปัญหาการพาความร้อนโดยบังคับ คุณลักษณะการไหลทั่วไปมักเกิดทั้งการไหลแบบสภาวะคงตัว คือ พฤติกรรมการไหลไม่ขึ้นอยู่กับเวลา และการไหลแบบสภาวะไม่คงตัว คือ พฤติกรรมการไหลเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะการไหลนี้เกิดได้ค่อนข้างง่ายเมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งเริ่มต้นจากการไหลที่มีเสถียรภาพและพัฒนาไปสู่การไหลที่ไร้เสถียรภาพ หรือการไหลในสภาวะไม่คงตัวเมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเพิ่มขึ้น การวิเคราะห์การไหลผ่านชิฟในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องทราบกลไกการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นนี้ เพื่อให้การกำหนดสมการต่างๆ และเงื่อนไขการคำนวณมีความสอดคล้องกับปัญหาที่แท้จริง การคำนวณหาช่วงการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะการไหลตามการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ภายใต้ข้อมูลและเงื่อนไขต่างๆ ได้แสดงข้อมูลในตาราง 6

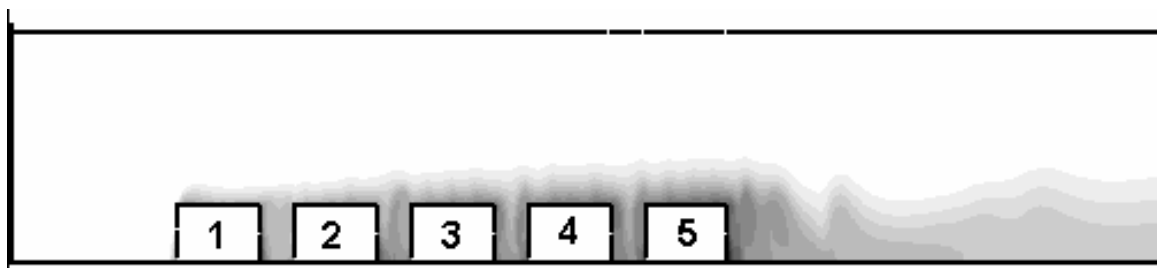
ตาราง 6 ข้อมูลการคำนวณสำหรับการศึกษาคูณลักษณะการไหล

Re_B	$S/W(\%)$	$Br(\%)$	Pr	Δt (Time step)
100-1000	42	25	0.712	0.005

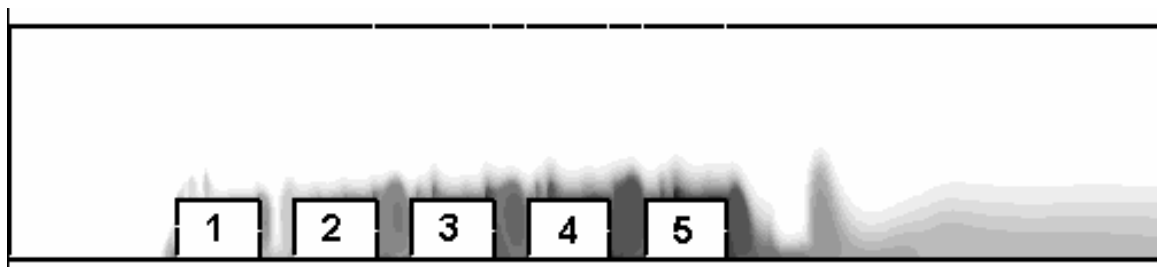
ผลจากการคำนวณคุณลักษณะการไหลบนชิพจำนวน 5 ตัว พบว่าคุณลักษณะการไหลจากค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่น้อยกว่า 500 การไหลไม่เกิดการไหลวน (Vorticity) ขึ้น และมีลักษณะที่ราบเรียบและคงตัวไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (t') เมื่อ $t' = tU_0/B$ คือเทอมไร้หน่วยของเวลา ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่ไหลผ่านชิพมีแรงเฉื่อยน้อย ดังแสดงในภาพประกอบ 17 แต่เมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเข้าใกล้ประมาณ 500 ($Br = 25\%, S/W = 42\%$) ได้พบการไหลวนที่ทอดตัวยาวออกไปด้านท้ายของชิพตัวที่ 5 ตามทิศทางของกระแสการไหลหลัก ในรูปแบบคาร์มันนอร์เทค (Karman vortex street) และเมื่อเวลาผ่านไปที่ชั้นขีดผิวของชิพตัวที่ 5 กระแสการไหลได้แสดงความไม่ราบเรียบและการไร้เสถียรภาพ และเกิดการก่อตัวของของไหลวน (Vortex) เมื่อของไหลวนมีขนาดและพลังงานมากเพียงพอที่จะถูกสลัดหลุด (Vortex shedding) ออกไป ดังแสดงภาพประกอบ 18 ซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะในการไหลแบบไม่คงตัว เสถียรภาพของการไหลจะถูกรบกวนมากขึ้นเมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าสูงขึ้น และส่งผลกระทบมายังชิพที่ถูกจัดวางในตำแหน่งด้านหน้าของโดเมนการคำนวณดังแสดงในภาพประกอบ 19 ซึ่งแสดงการเคลื่อนตัวของของไหลวนที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ 1000 โดยอยู่ในช่วงสภาวะการไหลไม่คงตัวแบบสมบูร์ก พบว่าที่ชั้นขีดผิวของชิพตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 5 ได้เกิดเป็นชั้นขีดผิวไม่ราบเรียบและสังเกตพบว่าที่ผนังของชิพตัวที่ 1 เกิดการไหลแตกแยก (Separated flow) และการไหลบรรจบ (Reattaching flow) ขึ้น ซึ่งพฤติกรรมการไหลเช่นนี้เป็นการลดประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของชิพตัวที่ 1 กระบวนการเกิดและการสลัดของของไหลวนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกดำเนินเป็นรอบวัฏจักรแบบซ้ำซ้อน (Periodic vortex shedding) ตลอดการไหล



ภาพประกอบ 17 คุณลักษณะการไหลแบบคงตัวที่ค่า $Re_B = 130$, $Br = 25\%$, $S/W = 42\%$
เวลา $t' = 154.2$



ภาพประกอบ 18 การไหลวนชั่วขณะที่ค่า $Re_B = 500$, $Br = 25\%$, $S/W = 42\%$ เวลา $t' = 115.7$

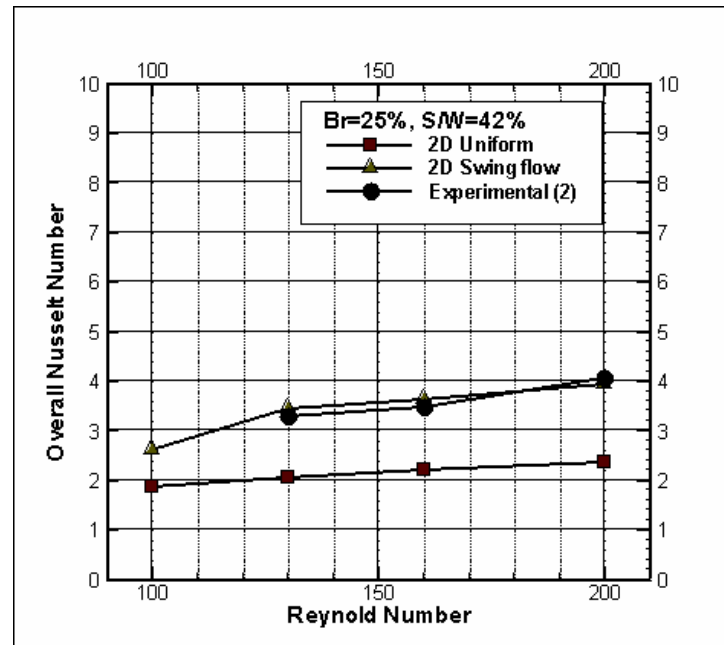


ภาพประกอบ 19 การไหลวนชั่วขณะที่ค่า $Re_B = 1000$, $Br = 25\%$, $S/W = 42\%$ เวลา $t' = 422.3$

ผลจากการศึกษาคุณลักษณะการไหลของซีพทั้ง 5 ตัว ใกล้เคียงกับผลการคำนวณของ ชาญณรงค์ วันทา⁽¹⁾ ทำให้ทราบว่าคุณลักษณะการไหลที่ค่า $Br = 25\%$, $S/W = 42\%$ สามารถพิจารณาการคำนวณเป็นการไหลในสภาวะคงตัวและไม่คงตัวได้ กล่าวคือ ถ้าค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่น้อยกว่า 500 ถูกเลือกใช้ในการศึกษาการไหลในสภาวะคงตัวและค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในช่วง 500 ถึง 1000 ถูกเลือกใช้ในการศึกษาการไหลในสภาวะไม่คงตัว

4.2 การไหลสภาวะคงตัวใน 2 มิติ

4.2.1 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขเรย์โนลด์

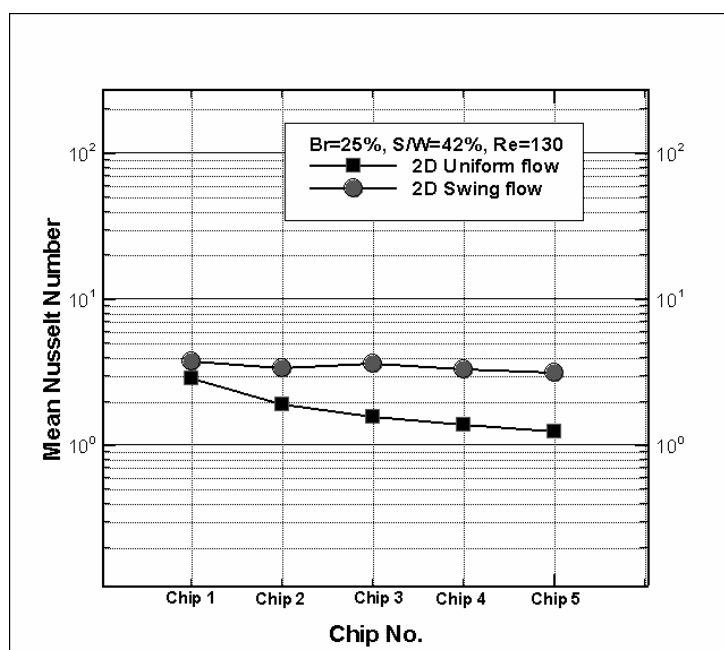


ภาพประกอบ 20 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบค่า Re_B

ที่ค่า $Br = 25\%$, $SW = 42\%$ และ $f = 2$

การคำนวณผลกระทบของค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่มีต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนได้ทำการคำนวณในสภาวะการไหลแบบคงตัว ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง $100 \leq Re_B \leq 400$ (กำหนดให้ความยาวจำเพาะเป็นความสูงของชิพ, B) โดยที่ช่วงค่าตัวเลขเรย์โนลด์นี้ พบว่าสำหรับการไหลเข้าแบบสม่ำเสมอ การไหลที่เกิดขึ้นอยู่ในสภาวะคงตัว สำหรับผลการคำนวณด้วยเงื่อนไขกระแสการไหลเข้าแบบสม่ำเสมอและแบบส่ายสลับขึ้นลงนั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ผ่าน มา พบว่าการเพิ่มขึ้นของค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ทำให้ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้น ดังในภาพประกอบ 4.4 ซึ่งผลการคำนวณมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลอง⁽²⁾ เมื่อพิจารณาที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เดียวกันพบว่าค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมของการคำนวณการไหลเข้าแบบสม่ำเสมอ มีค่าต่ำกว่าผลการทดลอง ทั้งนี้เป็นเพราะการคำนวณใช้แบบจำลองการไหลใน 2 มิติ อย่างไรก็ตามการคำนวณด้วยเงื่อนไขการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงนั้น ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองถึงแม้ว่าการคำนวณนั้นจะใช้แบบจำลองการไหลใน 2 มิติก็ตาม

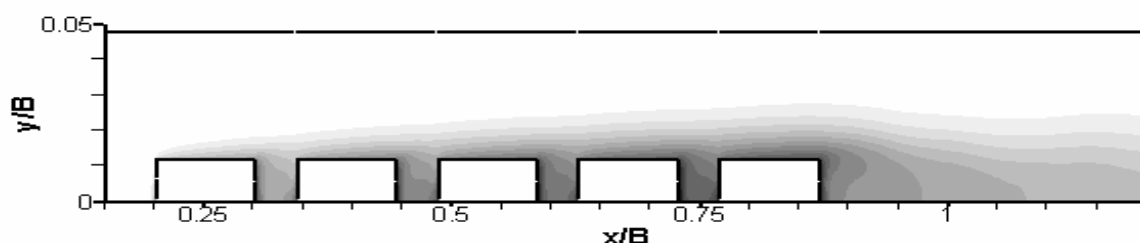
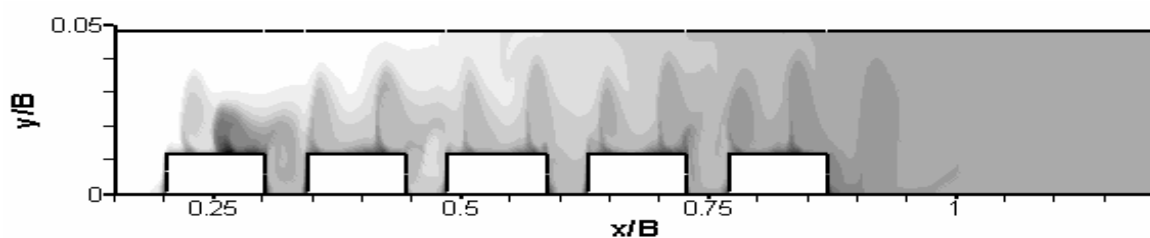
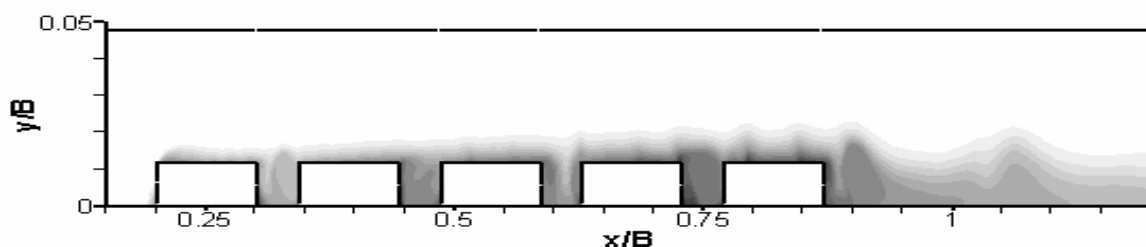
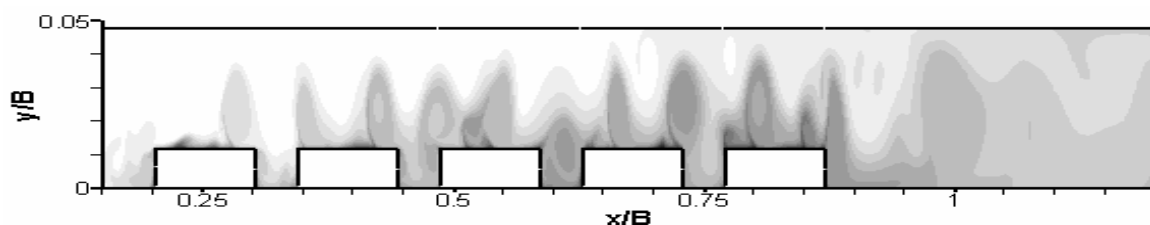
ภาพประกอบ 21 แสดงค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์ของชิพทั้งห้าตัว โดยพิจารณาที่ค่า $Re_B = 130$ พบว่าแนวโน้มของกราฟสำหรับการไหลเข้าแบบสม่ำเสมอกับการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงมีความชันลดลงคล้ายกัน โดยชิพตัวที่ 1 พบว่าค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์นั้นมีค่าสูงและจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงตามลำดับ ทั้งนี้ก็เนื่องจากอากาศเย็นที่ไหลผ่านชิพตัวแรก ได้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกันระหว่างของไหลร้อนที่ผนังของชิพและอากาศเย็นที่ไหลผ่าน ทำให้เกิดการสะสมของกระแสอากาศร้อนไปยังชิพตัวต่อๆ มาทางด้านหลัง ส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นและเป็นผลให้ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์ของชิพตัวที่ 2, 3, 4 และ 5 มีค่าลดลงซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง⁽²⁾ จากการคำนวณยังพบว่าลักษณะกราฟของการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลง มีค่าความชันของการลดลงน้อยกว่า ทั้งนี้เพราะอิทธิพลของกระแสการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลง



ภาพประกอบ 21 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์บนชิพที่ค่า $Re_B = 130$, $Br = 25\%$, $S/W = 42\%$ และ $f = 2$

พิจารณาที่ชิพตัวที่ 1 พบว่าค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์สำหรับการไหลเข้าแบบสม่ำเสมอกับการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงนั้นมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกันค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับชิพตัวที่ 5 ที่มีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก ซึ่งความแตกต่างนี้เองอธิบายการเพิ่มของค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์เฉลี่ยของชิพในภาพประกอบ 21 การกระจายตัวอุณหภูมิของการไหลแสดงในภาพประกอบ 22 ที่ค่า $Re_B = 100$ และ 400 สังเกตได้ว่าสำหรับการไหลเข้าแบบสม่ำเสมอการไหลยังคงอยู่ในสภาวะคงตัว อย่างไรก็ตามที่ค่า $Re_B = 400$ นั้นเริ่มมีความไร้เสถียรภาพเกิดขึ้นที่บริเวณด้านท้ายของชิพตัวที่ 5 ดังภาพประกอบ 4.6 (C) เมื่อมีการปรับเปลี่ยนกระแสการไหลเข้าเป็นแบบส่ายสลับขึ้นลง พบว่าที่ค่า Re_B

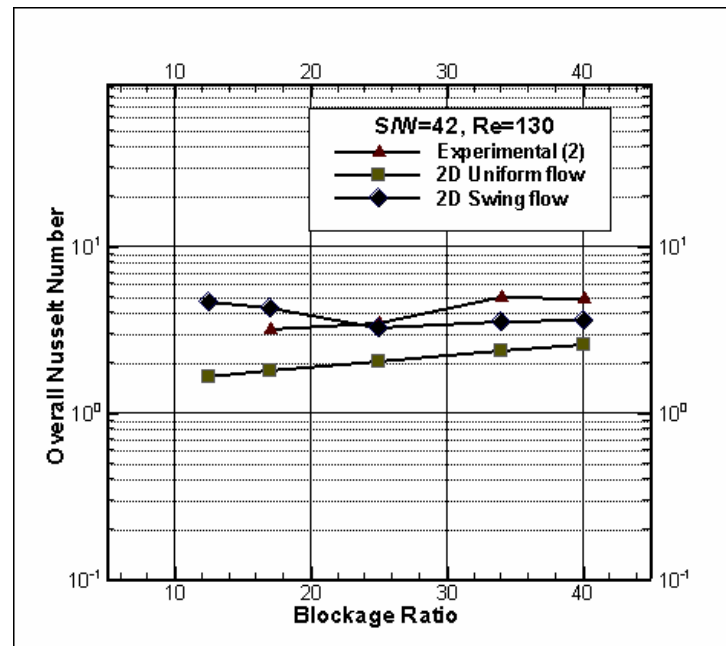
เท่ากันการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลง เป็นตัวสร้างความไม่เสถียรให้เกิดในกระแสน้ำหลักและ บังคับให้การไหลปรับเปลี่ยนเข้าสู่สภาวะไม่คงตัวแม้ว่าที่ $Re_B = 100$ ก็ตามทำให้ของไหลเย็นสามารถ แลกเปลี่ยนความร้อนกับของไหลร้อนที่อยู่ติดกับผนังได้ดีขึ้นส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้น

(A) $Re_B = 100$ (B) $Re_B = 100$ (C) $Re_B = 400$ (D) $Re_B = 400$

ภาพประกอบ 22 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ค่า $Br = 25\%$, $SW = 42\%$

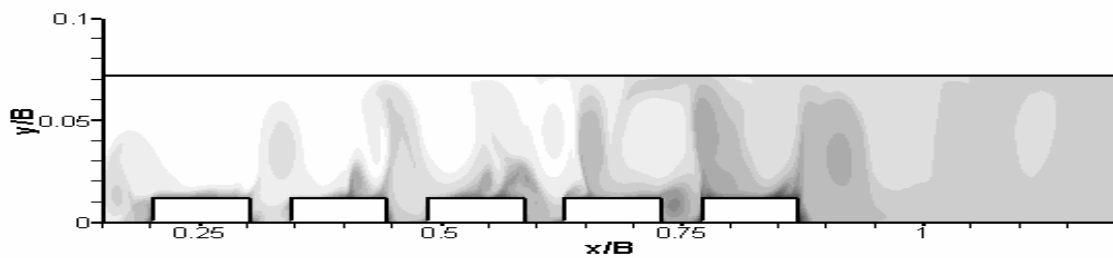
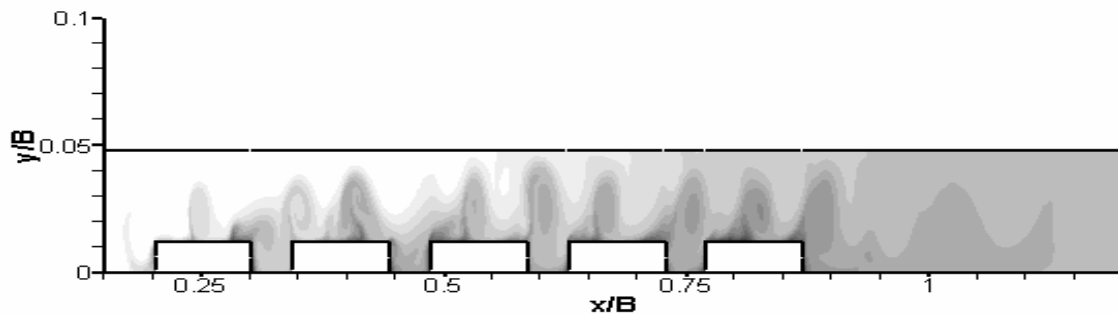
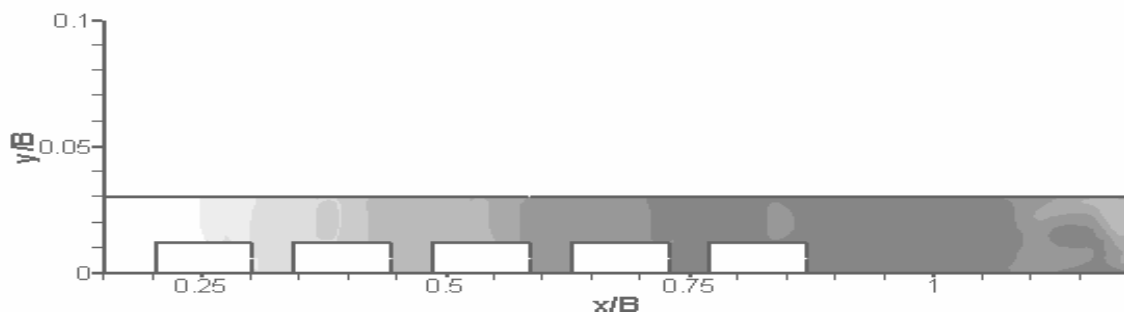
และ $f = 2$: (A),(C) การไหลเข้าสม่ำเสมอ; (B),(D) การไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลง

4.2.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความสูงของซีฟต่อความสูงของโดเมนการคำนวณ (Br)



ภาพประกอบ 23 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบค่า Br +
ที่ค่า $Re_B = 130$, $Br = 25\%$, $S/W = 42\%$ และ $f = 2$

ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความสูงของซีฟต่อความสูงของโดเมนการคำนวณถูกคำนวณที่ $Re_B = 130$ พบว่าลักษณะกราฟการไหลเข้าแบบสม่ำเสมอสอดคล้องกับการทดลองคือมีการเพิ่มของค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมในทิศทางการเพิ่มของ Br สำหรับการไหลเข้าแบบสายสลับขึ้นลงนั้นพบว่าที่ค่า Br ต่ำ ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมมีค่าสูงและลดลงตามการเพิ่มของ Br ซึ่งตรงข้ามกับการไหลเข้าแบบสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามที่ค่า $Br > 25\%$ ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมก็จะมีแนวโน้มสอดคล้องกับการทดลองทั้งนี้อธิบายได้ว่าที่ค่า Br ต่ำ การไหลที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากการไหลเข้าแบบสม่ำเสมอ โดยผลกระทบของการสายสลับขึ้นลงจะมีอิทธิพลสูงกว่าความเร็วของการไหล ทำให้กระแสน้ำไหลหลักเกิดความไม่เสถียรในการไหล ในทางกลับกันเมื่อทำการเพิ่มค่า Br ให้มากขึ้น กระแสน้ำไหลหลักก็จะถูกบีบให้ไหลในช่องทางที่แคบลง ทำให้ความเร็วมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ความไม่เสถียรภาพจากการสายสลับขึ้นลงมีค่าลดลง การไหลจะกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวเป็นผลให้ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมมีค่าลดลงจนถึง $Br = 25\%$ สำหรับที่ค่า $Br > 25\%$ ของการไหลเข้าแบบสายสลับขึ้นลงนั้นพบว่าลักษณะของกราฟจะมีแนวโน้มที่เหมือนกับการไหลเข้าแบบสม่ำเสมอ ดังแสดงในภาพประกอบ 23

(A) $Br = 17\%$ (B) $Br = 25\%$ (C) $Br = 40\%$

ภาพประกอบ 24 การกระจายตัวของอุณหภูมิในการคำนวณผลกระทบจากค่า Br

ที่ค่า $Re_B = 130$, $SW = 42$ และ $f = 2$

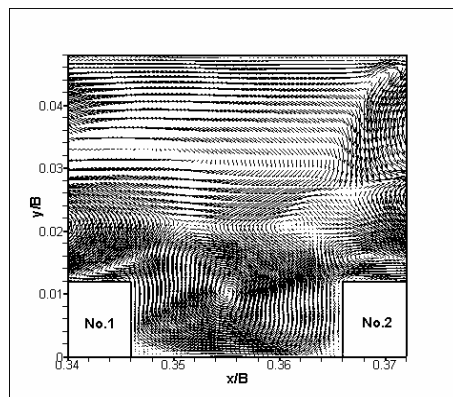
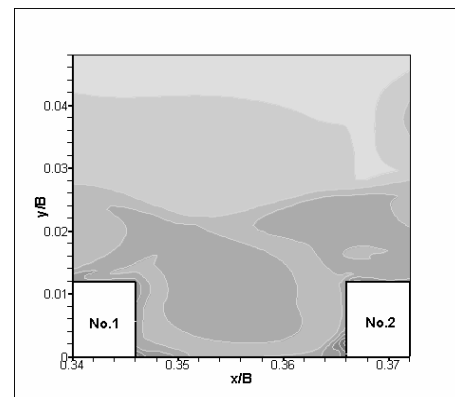
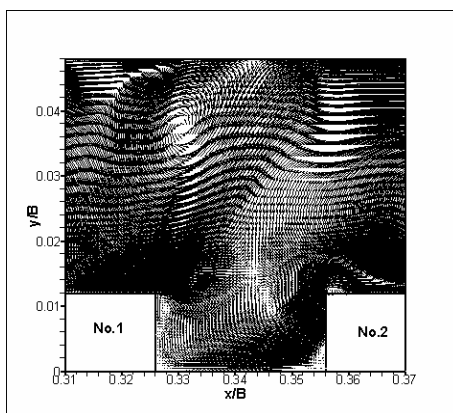
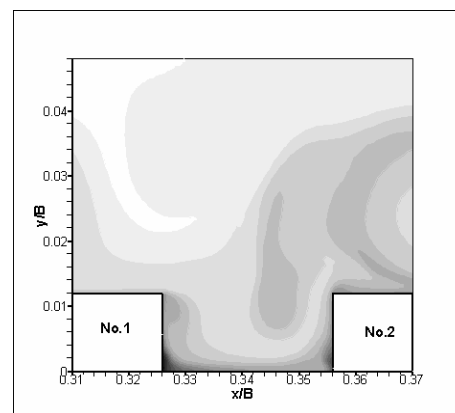
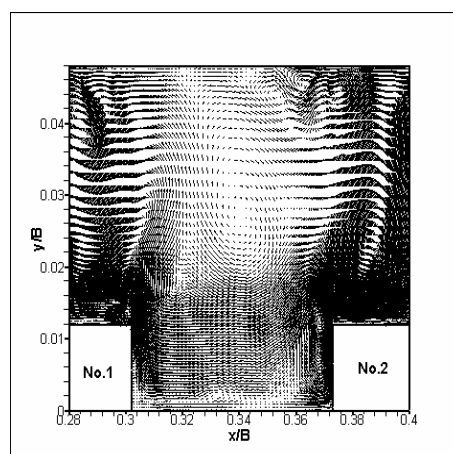
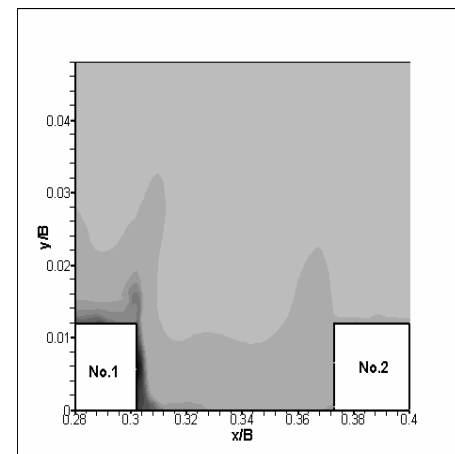
ภาพประกอบ 24 (A), (B) และ (C) แสดงถึงการไหลสำหรับกรณีการไหลเข้าแบบส่ายสลับ ขึ้นลงที่ได้รับผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนค่า Br ในภาพประกอบ 24 (A) เป็นการไหลที่ค่า $Br = 17\%$ ซึ่งเป็นกรณีที่ช่องทางการไหลมีพื้นที่หน้าตัดกว้างมาก พบว่าชั้นของของไหลร้อนเกิดการหมุนวนตามลักษณะการส่ายของกระแสน้ำที่ไหลเข้า เป็นผลให้ของไหลร้อนและเย็นเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกันได้ดีส่งผลให้ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์โดยรวมมีค่าสูงดังภาพประกอบ 21 เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่า Br เป็น 25 % พบว่าพื้นที่หน้าตัดของช่องทางไหลลดลง ความเร็วของการไหลมีค่าสูงขึ้นตามกฎการอนุรักษ์ของมวล ซึ่งค่าความเร็วที่สูงนี้จะเริ่มทำลายกระแสน้ำที่ไหลหมุนวนอันเนื่องมาจากการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลง ผลนี้จะชัดเจนที่กรณี $Br = 40\%$ ซึ่งพบว่ากระแสน้ำไหลภายในปรับเปลี่ยนกลับจากสภาวะไม่คงตัวเข้าสู่สภาวะคงตัวอีกครั้งหนึ่งดังภาพประกอบ 24 (C)

4.2.3 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิฟต่อความยาวของชิฟ (S/W)

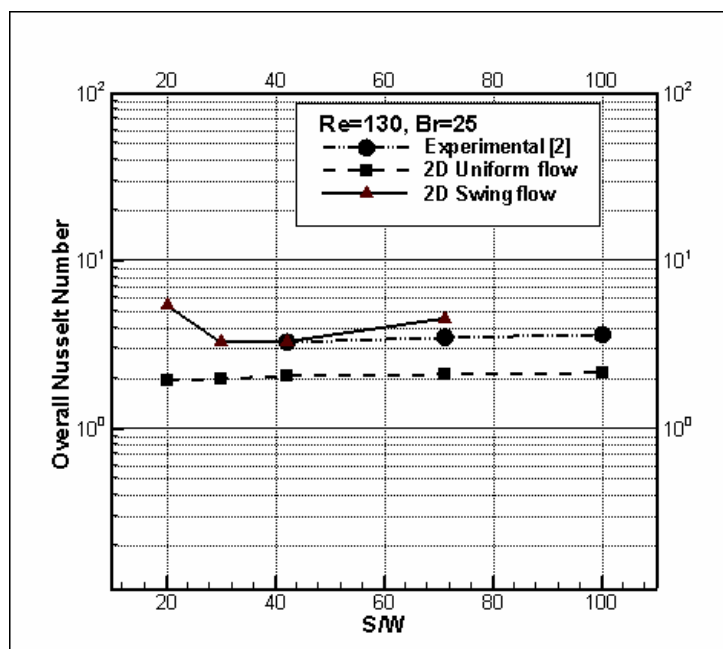
พิจารณาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิฟต่อความยาวของชิฟ ในภาพประกอบ 25 (A), (C) และ (E) ซึ่งเป็นภาพแสดงเวกเตอร์ความเร็วในพื้นที่ระหว่างชิฟตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ที่ค่า SW เท่ากับ 20%, 30% และ 71% ตามลำดับ ซึ่งพบว่าในทุกกรณีนั้นได้เกิดการหมุนวนของกระแสการไหลขึ้น โดยจุดศูนย์กลางของกระแสหมุนวนเกิดขึ้นบริเวณใกล้หรืออยู่สูงกว่าผนังของชิฟ ขนาดของกระแสหมุนวนขึ้นกับค่าอัตราส่วน SW โดยไม่พบกระแสการไหลที่หมุนวนในบริเวณมุมล่างผนังของช่องระหว่างชิฟตัวที่ 1 กับตัวที่ 2 และในช่องระหว่างชิฟตัวอื่นๆ ซึ่งการหมุนวนของกระแสการไหลมีขนาดเพิ่มขึ้นตามค่า SW ที่เพิ่มขึ้น

ภาพประกอบ 25 (B), (D) และ (F) แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในช่องว่างระหว่างชิฟตัวที่ 1 กับตัวที่ 2 พบว่าการหมุนวนของกระแสการไหลในตำแหน่งใกล้กับผนังเอียงไปทางมุมขวาบนของชิฟตัวที่ 2 และมีทิศทางของกระแสการไหลตามเข็มนาฬิกานั้น ทำให้อุณหภูมิของผนังด้านหน้าของชิฟตัวที่ 2 ลดลงแต่ผนังด้านหลังของชิฟตัวที่ 1 ยังพบการสะสมของอุณหภูมิซึ่งแสดงว่าการเกิดกระแสหมุนวนภายในช่องระหว่างชิฟสามารถช่วยลดอุณหภูมิบนผนังชิฟได้บางส่วน แต่ไม่สามารถลดอุณหภูมิบนผนังของชิฟได้ทั้งหมด

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของการเพิ่มค่า SW ดังแสดงในภาพประกอบ 26 พบว่าการเพิ่มค่า SW ที่ค่า $SW = 20\%$ มีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์โดยรวมสูงที่สุด และมีแนวโน้มลดลงจาก $SW = 20\%$ ไปเป็น $SW = 30\%$ แต่หลังจากนั้นการเพิ่มค่า SW สามารถช่วยเพิ่มค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์โดยรวมให้มีแนวโน้มสูงขึ้นได้ ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับการทดลอง⁽²⁾ นั่นคือ ถ้าค่า SW เพิ่มขึ้น 30%, 42% และ 71% ชิฟมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์โดยรวมเพิ่มขึ้น 7.7%, 9.8%, และ 18.9% ตามลำดับ ในขณะที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ไม่ได้เปลี่ยนแปลง เพราะการเพิ่มค่า SW เป็นการเพิ่มพื้นที่ว่างระหว่างชิฟซึ่งทำให้อากาศที่หมุนอยู่ระหว่างพื้นที่นี้มีปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้สามารถพาความร้อนได้ดีกว่าอากาศหมุนวนในช่องแคบๆ เป็นผลให้ชิฟสามารถถ่ายเทความร้อนให้แก่อากาศได้มากขึ้น

(A) $SW=20\%$ (B) $SW=20\%$ (C) $SW=30\%$ (D) $SW=30\%$ (E) $SW=71\%$ (F) $SW=71\%$

ภาพประกอบ 25 เวกเตอร์ความเร็วและการกระจายตัวของอุณหภูมิในพื้นที่ระหว่างชิปตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ที่ค่า $Re_B=130$, $Br = 25\%$ และ $f = 2$



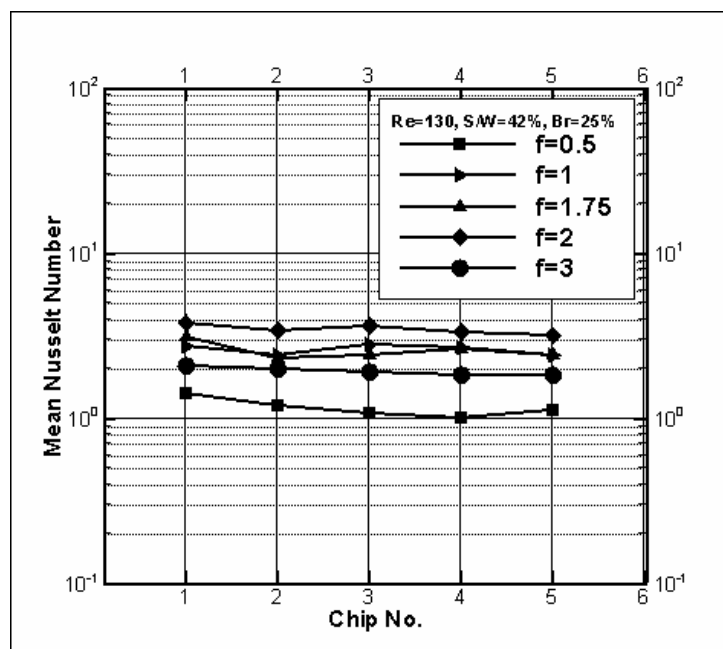
ภาพประกอบ 26 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลต์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบค่า SW

ที่ $Re_B = 130$, $Br = 25\%$ และ $f = 2$

จากผลการคำนวณผลกระทบค่า SW ที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนั้น ทำให้สรุปได้ว่าการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ SW เพียงอย่างเดียวนั้นส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชิพแต่ยังไม่สูงมากนัก เมื่อเทียบกับการเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์ อีกทั้งการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ SW จำเป็นต้องใช้พื้นที่ของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มากขึ้นด้วย ซึ่งไม่เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้กับการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน ที่มุ่งเน้นไปทางการลดขนาดให้มีขนาดของอุปกรณ์ที่เล็กลงแต่มีประสิทธิภาพของการทำงานสูง แต่อย่างไรก็ตามดังที่แสดงในภาพประกอบ 26 นั้น พบว่าในกรณี ที่ $SW = 20\%$ ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลต์โดยรวมของการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงมีค่ามากที่สุดซึ่งแสดงถึงผลกระทบของค่า SW นั้นหากอยู่ภายใต้ข้อจำกัดที่เหมาะสมแล้วก็สามารถทำให้ประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนสูงได้เช่นกัน ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับผลกระทบจาก ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ อีกด้วย เช่น ค่าความถี่ของการส่ายสลับขึ้นลง (f) ค่าความเร็วของกระแสไหลเข้าโดยทำการคำนวณในรูปของค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re_B) และค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของโดเมนการคำนวณ (Br)

4.2.4 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ (f) ของกระแสการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลง

สำหรับการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงนั้นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการส่ายสลับก็คือ ค่าความถี่ของการส่ายสลับ การปรับเปลี่ยนค่าความถี่ในสภาวะการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงนั้นมีส่วนสำคัญมากต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของของไหล ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คงที่ สำหรับการคำนวณในครั้งนี้ได้มีการปรับค่าความถี่การส่ายสลับโดยค่าที่ใช้ในการคำนวณได้แก่ $f = 0.5, 1, 1.75, 2$ และ 3 จากภาพประกอบ 27 ลักษณะของเส้นกราฟของค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลบนชิพทั้ง 5 ตัว มีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่าความถี่ให้มีความมากขึ้นจะช่วยให้เกิดการถ่ายเทความร้อนของชิพได้ดีขึ้น เป็นที่น่าสังเกตว่าทุกกรณีของการปรับค่าความถี่ ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลบนชิพตัวที่ 1 มีค่าสูงสุดจากนั้นจะมีแนวโน้มที่ลดลง



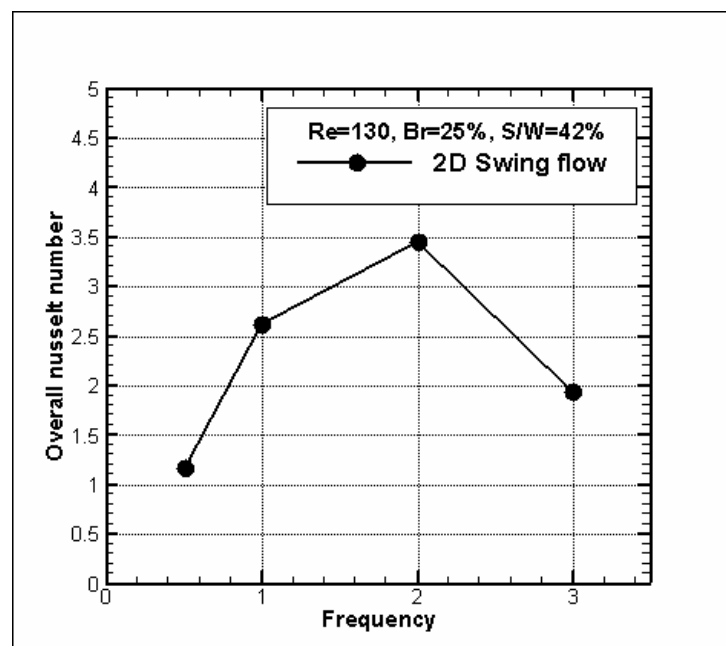
ภาพประกอบ 27 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลบนชิพทั้งห้าตัวสำหรับการคำนวณ

ผลกระทบค่าความถี่ ที่ค่า $Re_B = 130$, $Br = 25\%$ และ $SW = 42\%$

ภาพประกอบ 27 เป็นการแสดงค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลโดยรวมของชิพทั้ง 5 ตัว ที่คำนวณที่ค่า $Re_B=130$ พบว่าการเพิ่มค่าความถี่จาก $f = 0.5$ ไปเป็น $f = 1$ นั้น ค่าความชันของการเพิ่มขึ้นของค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลโดยรวมมีค่าสูง ซึ่งแสดงถึงการพัฒนาการในด้านการถ่ายเทความร้อนได้ดี ที่ค่า $f = 1$ ไปเป็น $f = 2$ พบว่าค่าความชันของการเพิ่มขึ้นของค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลโดยรวมมีค่าน้อยลง และ $f = 2$ ไปเป็น $f = 3$ ค่าความชันจะมีค่าติดลบหรือค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลโดยรวมมีค่า

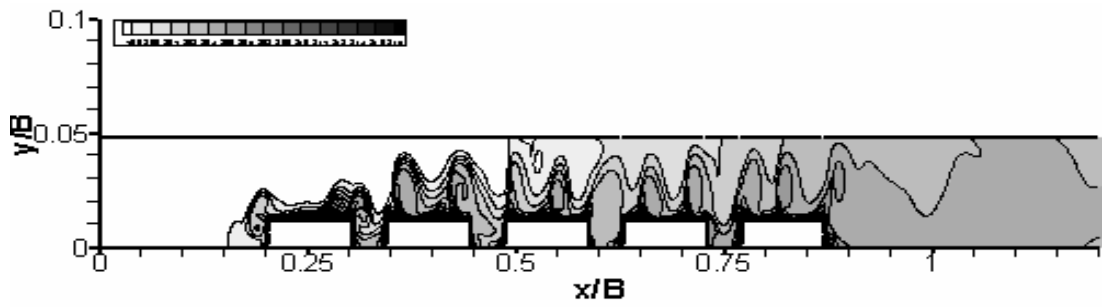
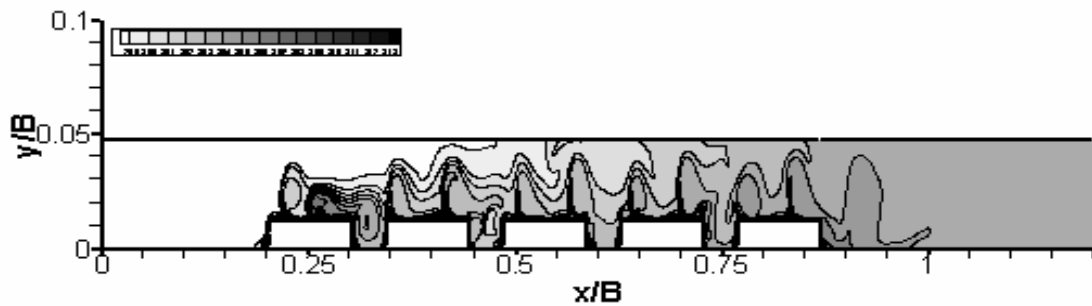
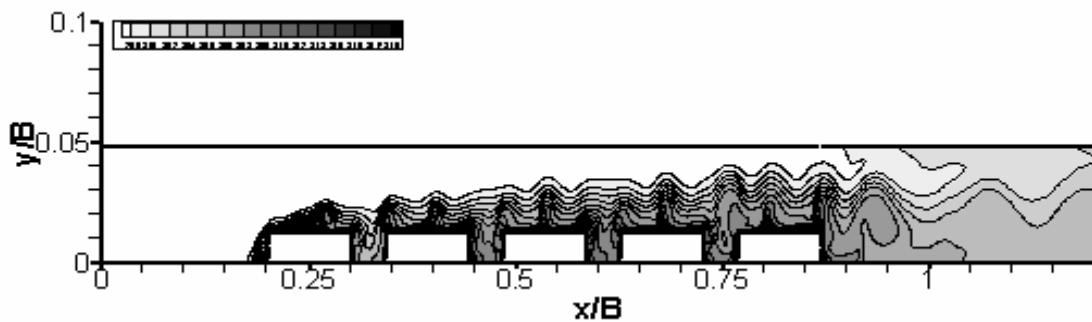
ลดลง แสดงถึงการที่เพิ่มค่าความถี่ให้มากเกินไปอาจจะไม่เป็นผลดีต่อการถ่ายเทความร้อนของชิพ ดังนั้นการเพิ่มค่าความถี่สำหรับการไหลในแต่ละช่วงของค่า Re_B น่าจะมีค่าความถี่ที่เหมาะสมแตกต่างกัน จากข้อมูลที่ได้พบว่าที่ค่า $f = 2$ มีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลท์โดยรวมสูงที่สุด

พิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิ ในการคำนวณผลกระทบค่าความถี่ในสภาวะการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลง ภาพประกอบ 29 (A) และ (B) ของไหลเกิดการเสียเสถียรภาพจากผลของการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลง ทำให้เกิดการหมุนวนและยกตัวขึ้นสูงทำให้ของไหลร้อนและของไหลเย็นมีพื้นที่สัมผัสกันมาก ส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกันได้ดี ในทางกลับกัน ภาพประกอบ 29 (C) ที่ค่า $f = 3$ ของไหลร้อนจะรวมตัวกันหนาแน่นที่บริเวณผิวของชิพลักษณะของกระแสไหลวนจะมีขนาดเล็กและถี่ ส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันของกระแสไหลวนขนาดเล็กกลายเป็นชั้นความเฉือน (Shear layer) ซึ่งเป็นผลจากเพิ่มค่าความถี่มากเกินไป ทำให้พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนมีน้อย เป็นผลให้ของไหลเย็นไม่มีบริเวณที่จะเข้าไปสัมผัสกับผิวชิพ เนื่องจากชั้นความเฉือนจะเป็นตัวขวาง ดังนั้นการแลกเปลี่ยนความร้อนจึงเกิดขึ้นไม่ดีเท่าที่ควร



ภาพประกอบ 28 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลท์โดยรวมสำหรับการคำนวณผลกระทบค่าความถี่

ที่ค่า $Re_B = 130$, $Br = 25\%$ และ $SW = 42\%$

(A) $f = 1$ (B) $f = 2$ (C) $f = 3$

ภาพประกอบ 29 การกระจายตัวของอุณหภูมิในการคำนวณผลกระทบค่าความถี่ในสภาวะการไหลแบบสลายสลับขึ้นลงที่ค่า $Re_B = 130$, $Br = 25\%$ และ $SW = 42\%$

4.2 การไหลสภาวะไม่คงตัวใน 2 มิติ

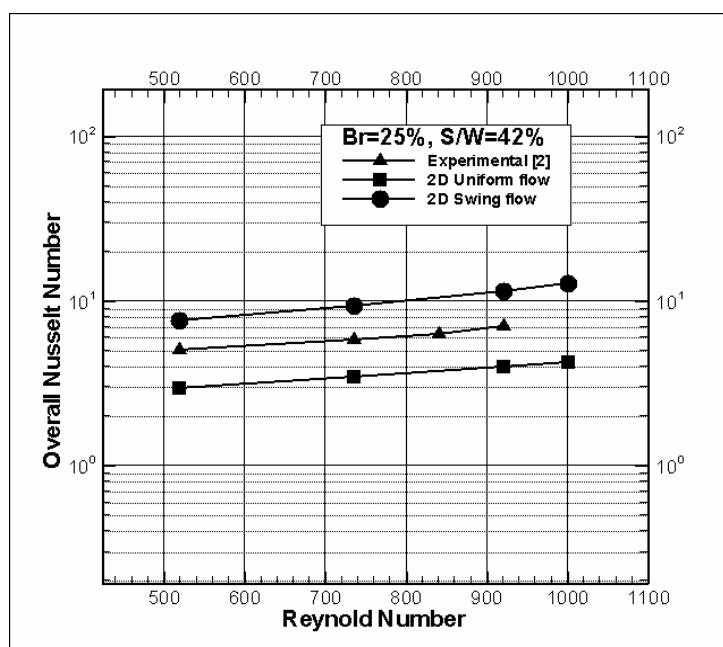
การคำนวณในกรณีสภาวะการไหลไม่คงตัวนี้จะถูกคำนวณที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่มีค่ามากกว่า 500 ขึ้นไป สำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาที่ค่า Re_B ระหว่าง 500 – 1000 เนื่องจากการไหลในสภาวะไม่คงตัวค่าที่ได้จากการคำนวณจึงเป็นค่าที่อยู่ในรูปของเวลาชั่วขณะ (Instantaneous values) ซึ่งค่านี้จะถูกทำให้อยู่ในรูปค่าเฉลี่ยต่อเวลาของการไหล (Time-averaged flow) กำหนดให้ ϕ เป็นค่าปริมาณใดๆ ค่าเฉลี่ยต่อเวลาสามารถคำนวณได้จาก

$$\overline{\Phi} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} \phi(t) dt \quad (4-1)$$

4.2.1 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขเรย์โนลด์

จากการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในสภาวะการไหลไม่คงตัว ที่ช่วง Re_B ตั้งแต่ 500 ถึง 1000 พบว่าการเพิ่มค่า Re_B ให้มีค่ามากขึ้นทำให้ค่าเฉลี่ยต่อเวลาของ ตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมมีค่าสูงขึ้นตามค่า Re_B ซึ่งสอดคล้องกับการทดลอง⁽²⁾ ดังภาพประกอบ 37 การเพิ่มค่า $Re_B = 518$ เป็น 734, 920 และ 1000 ทำให้ค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมของการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงมากกว่าการทดลองและมากกว่าการไหลเข้าแบบสม่ำเสมอ

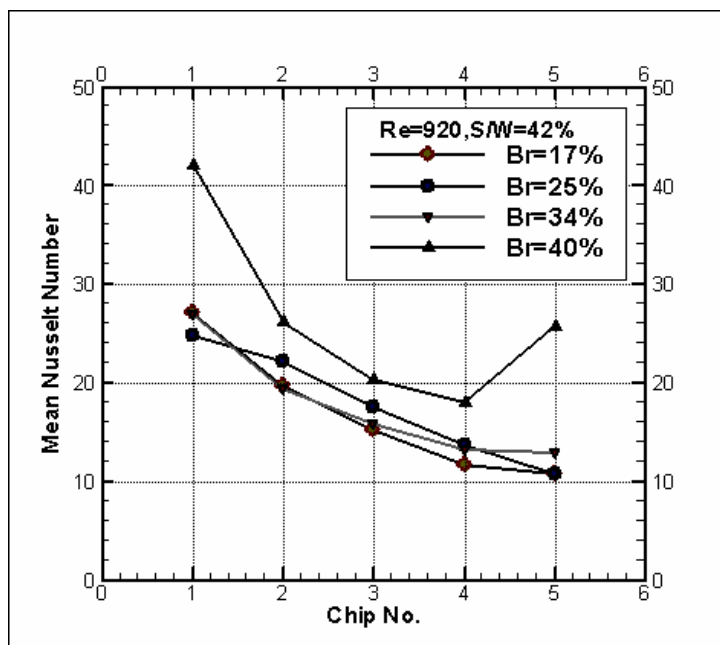
แต่อย่างไรก็ตามแนวโน้มของกราฟได้แสดงให้เห็นว่า การไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลง การไหลเข้าแบบสม่ำเสมอและผลการทดลอง ได้ผลที่สอดคล้องกัน คือ มีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่า Re_B ดังนั้นน่าจะสรุปได้ว่าการเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์ให้กับแบบจำลองการไหลใน สภาวะการไหลแบบไม่คงตัว จะมีผลกระทบอย่างมากต่อการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในแบบจำลองการไหล ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์เปรียบเสมือนการเพิ่มแรงเฉื่อย (Inertia force) ให้กับ การไหล ส่งผลให้การไหลมีความไม่เสถียรมากขึ้นซึ่งจะส่งผลให้การไหลอยู่ใน สภาวะไม่คงตัวมากขึ้น ซึ่งผลที่ตามมาคือการเพิ่มขึ้นของค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลท์โดยรวม ดังกราฟเส้นล่างสุดในภาพประกอบ 30 ส่วนกรณีการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงนั้นจะเป็นการเสริม ค่าความไร้เสถียรภาพของการไหลในการไหลให้มากยิ่งขึ้น จะเห็นได้จากเส้นกราฟที่มีค่าสูงขึ้น



ภาพประกอบ 30 ค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลท์โดยรวม สำหรับการคำนวณ

ผลกระทบค่า Re_B ที่ค่า $Br = 25\%$, $SW = 42\%$ และ $f = 2$

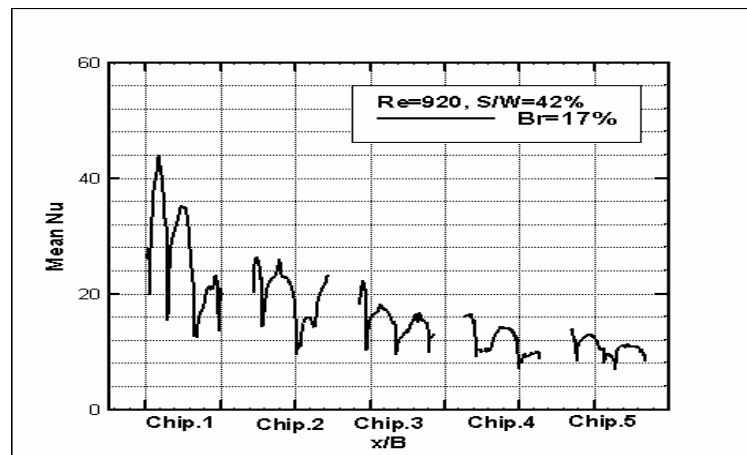
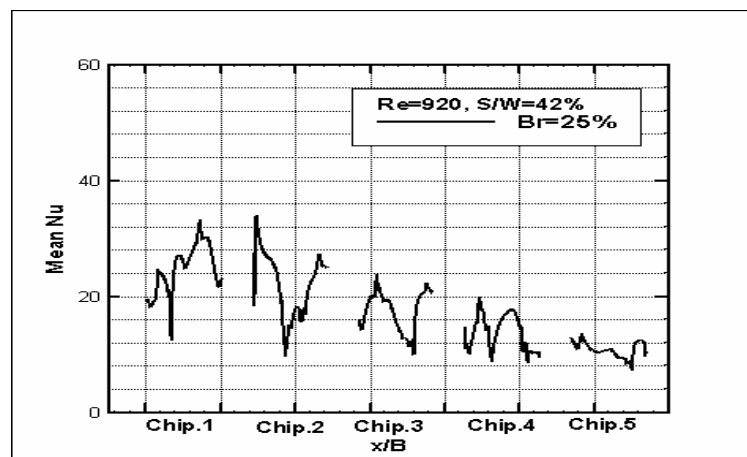
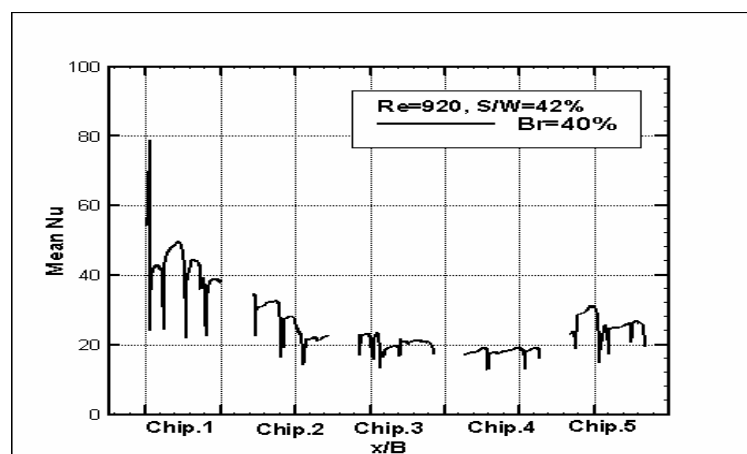
4.2.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงโดเมนการคำนวณ



ภาพประกอบ 31 ค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลท์ของชิพแต่ละตัวของการคำนวณ

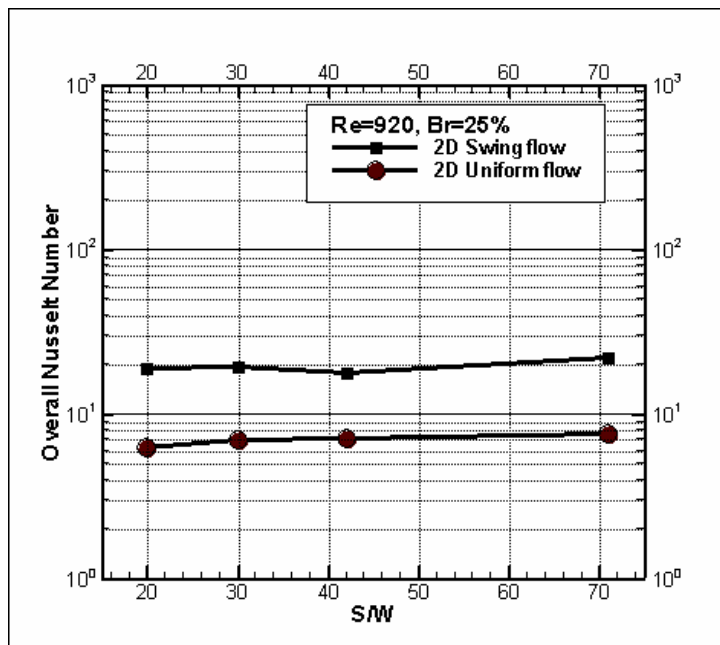
ผลกระทบค่า Br ที่ค่า $SW = 42\%$, $Re_B = 920$ และ $f = 2$

จากภาพประกอบ 31 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่า Br สำหรับการไหลในสภาวะไม่คงตัวนั้นนั้น ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชิพแต่ละตัวมีแนวโน้มลดลง โดยชิพตัวที่ 1 มีค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลท์สูงที่สุด จากนั้นจะมีค่าลดลงจนถึงชิพตัวที่ 5 ยกเว้นในกรณีที่ $Br = 40\%$ พบว่า ชิพตัวสุดท้ายมีค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลท์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้จะมาจากการที่ช่องทางการไหลที่แคบลงส่งผลให้ความเร็วของการไหลมากขึ้น และก่อให้เกิดการสับของกระแสไหลวนที่ชิพตัวสุดท้าย การสับของกระแสการไหลวนนี้ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนของชิพ การกระจายตัวของตัวเลขนัสเซลท์เฉพาะตำแหน่งบนชิพต่อเวลาแสดงในภาพประกอบที่ 32 ที่ค่า $Br = 17\%$, 25% และ 40% พบว่าที่ $Br = 40\%$ ค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลท์เฉพาะตำแหน่งของชิพทั้ง 5 ตัวมีค่าสูงกว่าที่ค่า Br ใดๆ อีกทั้งยังเป็นการยืนยันว่าค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลท์ของชิพตัวสุดท้ายมีค่าสูงขึ้น

(A) $Br = 17\%$ (B) $Br = 25\%$ (C) $Br = 40\%$

ภาพประกอบ 32 ค่าเฉลี่ยของตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ ที่ค่า Br ต่างกัน สำหรับการไหลแบบส่ายสลับขึ้นลงที่ค่า $Re_B = 920$, $S/W = 42\%$ และ $f = 2$

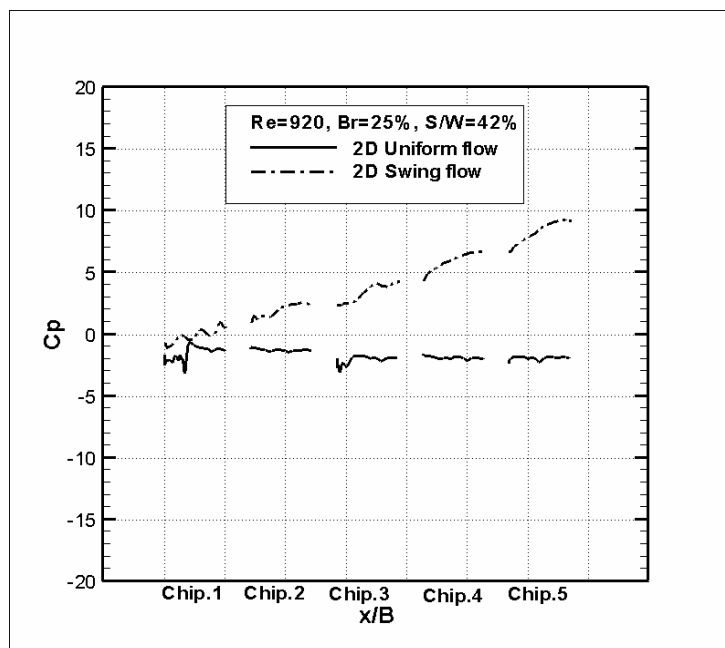
4.2.3 ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระยะห่างของซีฟต่อความยาวของซีฟ



ภาพประกอบ 33 ค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลที่โดยรวมของการคำนวณ

ผลกระทบของค่า SW ที่ค่า $Br = 25\%$, $Re_B = 920$ และ $f = 2$

ผลของการเพิ่มค่า $SW = 20\%$, 30% , 42% และ 71% ที่มีต่อค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลที่โดยรวมของการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงแสดงในภาพประกอบ 33 พบว่าค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลที่โดยรวมของกรณีการไหลเข้าแบบส่ายสลับมีค่ามากกว่าการไหลเข้าแบบสม่ำเสมออยู่ประมาณ 3.07, 2.77, 2.52 และ 2.91 เท่าที่ค่า $SW = 20\%$, 30% , 42% และ 71% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ SW ไม่ค่อยมีส่วนช่วยมากในการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ดังเช่นการไหลในสภาวะคงตัวที่หัวข้อ 4.2.3 ค่าเฉลี่ยต่อเวลาของสัมประสิทธิ์ของความดันที่เปรียบเทียบสำหรับการไหลเข้าแบบสม่ำเสมอและการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลง แสดงในภาพประกอบ 34 พบว่าสำหรับการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของความดันมีค่าสูงกว่าการไหลเข้าแบบสม่ำเสมอ โดยพบว่าตั้งแต่ซีฟตัวที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ค่า C_p มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งนี้เป็นผลมาจากการไหลแบบส่ายสลับสร้างความไร้เสถียรภาพภายในช่องทางไหลสูง ส่งผลให้ความดันภายในมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะแตกต่างจากการไหลเข้าแบบสม่ำเสมอที่ความไร้เสถียรภาพมีค่าน้อยกว่า เมื่อระยะห่างออกไป (x/B มากขึ้น) ความไร้เสถียรภาพจากการกระแสการไหลวนก็จะลดลง การไหลจะวนกลับเข้าสู่สภาพการไหลผ่านชั้นขีดผิว จึงทำให้ค่า C_p มีแนวโน้มลดลง

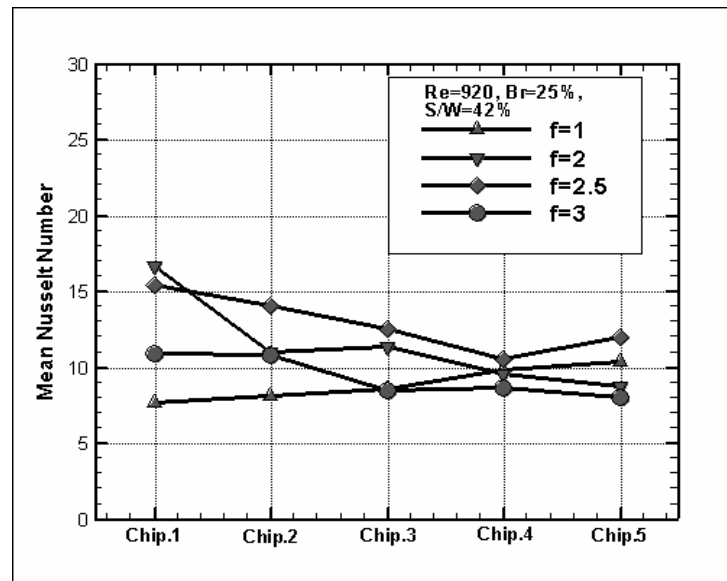


ภาพประกอบ 34 ค่าเฉลี่ยต่อเวลาของค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนชิพแต่ละตัว

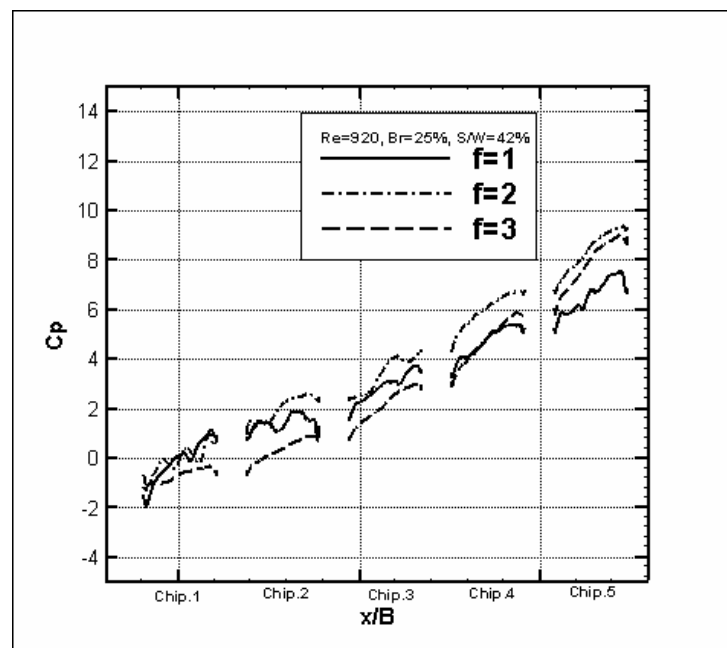
สำหรับการคำนวณที่ค่า $Re_B = 920$, $Br = 25\%$, $S/W = 42\%$ และ $f = 2$

4.2.4 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของการไหลเข้าแบบส่าย สลับขึ้นลง

การคำนวณผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ที่มีต่อการไหลกระทำที่ค่า $Re_B = 920$, $Br = 25\%$ และ $S/W = 42\%$ โดยการปรับเปลี่ยนค่าความถี่ทั้งหมดด้วยกัน 5 ค่า ภาพประกอบ 35 แสดงผลที่ได้จากการปรับเปลี่ยนค่าความถี่ในการไหลของการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลง พบว่า ลักษณะกราฟจะมีแนวโน้มที่แตกต่างกัน จากการคำนวณที่ทุกค่าของความถี่พบว่าที่ชิพตัวที่ 1 จะมีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลล์ท์มากที่สุด ชิพตัวที่ 2 และ 3 จะมีความแตกต่างน้อยลง และที่ชิพตัวที่ 4 จะมีค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลล์ท์ใกล้เคียงกันมากที่สุด ส่วนชิพตัวที่ 5 นั้นแนวโน้มของกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลล์ท์จะเริ่มมีความแตกต่างกันมากขึ้นอีกครั้งหนึ่ง สำหรับค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลล์ท์โดยรวมพบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่าความถี่ ค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลล์ท์โดยรวมจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง $f = 2.5$ ซึ่งจะได้ค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลล์ท์โดยรวมสูงสุดที่ประมาณ 12.5 จากนั้นเมื่อเพิ่มค่า f เป็น 3 ค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลล์ท์โดยรวมก็จะเริ่มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการคำนวณการไหลในสภาวะคงตัว จากภาพประกอบ 35 แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลล์ท์โดยรวมที่สูงตามความถี่ ก็ส่งผลให้ค่า Cp มีค่าสูงตามด้วย นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าเมื่อค่าความถี่มีค่าลดลงความชันของ Cp ก็ลดลง คาดว่าเมื่อ f มีค่าน้อยลงจนถึงศูนย์ความชันของความดันก็จะลดลง ลักษณะกราฟก็จะคล้ายกับกราฟสำหรับการไหลเข้าแบบสม่ำเสมอ ดังภาพประกอบ 36



ภาพประกอบ 35 ค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซิลท์บนชิพแต่ละตัว สำหรับการคำนวณผลกระทบ
ค่าความถี่ ที่ค่า $Re_B = 920$, $Br = 25\%$ และ $S/W = 42\%$



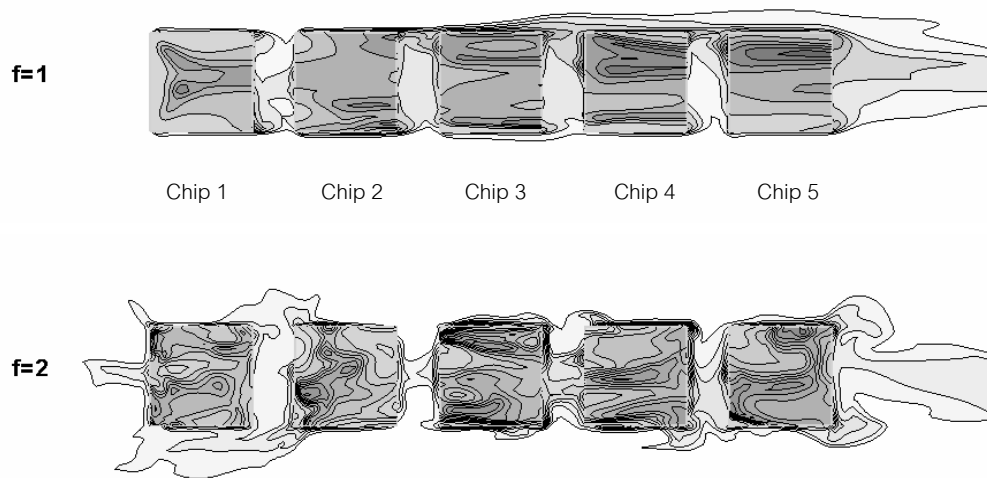
ภาพประกอบ 36 ค่าเฉลี่ยต่อเวลาของค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนชิพแต่ละตัว
สำหรับการคำนวณที่ค่า $Re_B = 920$, $Br = 25\%$ และ $S/W = 42\%$

4.3 การไหลสภาวะไม่คงตัวใน 3 มิติ

จากการคำนวณการไหลใน 2 มิติ ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของการไหลของของไหลได้เป็นอย่างดี แต่ยังมีข้อจำกัดบางอย่างที่ขาดหายไปจากการจำลองการไหลใน 2 มิติ ดังนั้นเพื่อให้การวิเคราะห์มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นการจำลองการไหลใน 3 มิติจึงถือว่ามีความสำคัญ สำหรับการคำนวณหาผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ใน 3 มิติ ได้เลือกทำเฉพาะกรณี $Re_b = 920$, $Br = 25\%$ และ $SW = 42\%$ เท่านั้น เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการคำนวณสำหรับการไหลใน 3 มิติใช้เวลานาน โดยจะทำการจำลองการไหลโดยการแปรผันค่าความถี่ของการส่ายสลับขึ้นลง ค่าที่ได้จากการคำนวณจะถูกเฉลี่ยในแนวแกนและเฉลี่ยเทียบกับเวลาก่อนที่จะแสดงผลออกมา

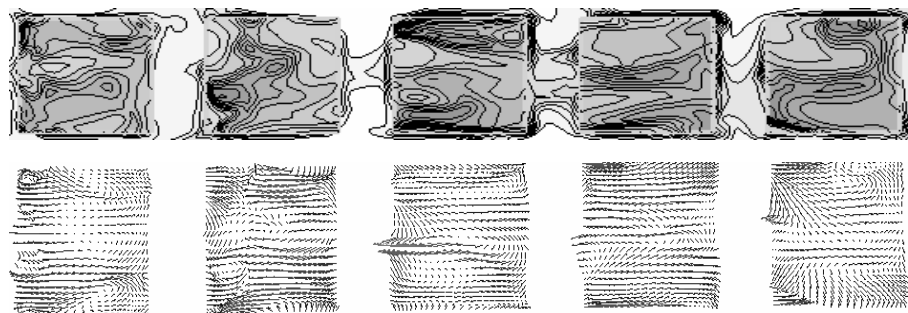
สำหรับการไหลในสภาวะคงตัวใน 3 มิติที่ $Re_b = 920$, $Br = 25\%$, $SW = 42\%$ และ $f = 2$ นั้นพบว่า ค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลล์โดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้น 58.3% เมื่อเทียบกับการไหลในสภาวะคงตัวใน 2 มิติที่เงื่อนไขเดียวกัน ซึ่งค่อนข้างชัดเจนว่าผลของแนวแกนในมิติที่สาม (Three-dimensionality effect) มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ผ่านมาพบว่าด้วยกระแสการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยรวมได้ถึง 155.1% ภาพประกอบ 37 แสดงการกระจายของอุณหภูมิ ณ เวลาใดๆ บนผนังของชิพทั้งห้าตัวในระนาบ x-z โดยสีดำเข้มหมายถึงย่านอุณหภูมิสูงและสีขาวหมายถึงย่านอุณหภูมิต่ำ พบว่าการกระจายของอุณหภูมิมีผลกระทบจากความไร้เสถียรภาพและผลกระทบของแนวแกนในมิติที่สาม ซึ่งค่าการกระจายของอุณหภูมิจึงมีความเป็น 3 มิติ อุณหภูมิบนผิวชิพแตกต่างกันทั้งตามแนวทางการไหลหลัก (แกน x) และแนวขวางการไหล (แกน z)

นอกจากนี้ยังเห็นได้ชัดว่าที่ค่าความถี่การส่ายสลับที่สูงขึ้นส่งผลให้กระแสการไหลมีการแตกตัวหรือมีความไร้เสถียรภาพมากยิ่งขึ้น การกระจายตัวของอุณหภูมิที่มีความเป็น สามมิติมากขึ้น ความสัมพันธ์ของกระแสการไหลวนกับค่าการกระจายของอุณหภูมิ ณ เวลาใด ๆ บนผนังชิพแสดงในภาพประกอบ 38 จากภาพประกอบนี้พบว่าบริเวณที่เกิดการไหลวนค่าอุณหภูมิจะมีค่าต่ำ (ย่านสีขาว) ซึ่งค่อนข้างชัดเจนว่ากระแสการไหลวนมีส่วนช่วยในการระบายความร้อนออกจากผนังชิพ ซึ่งการไหลวน (Vorticity) ที่เกิดขึ้นในกรณีการไหลในสภาวะไม่คงตัวใน 3 มิตินั้นสามารถเกิดขึ้นได้ทั้ง 3 ทิศทาง



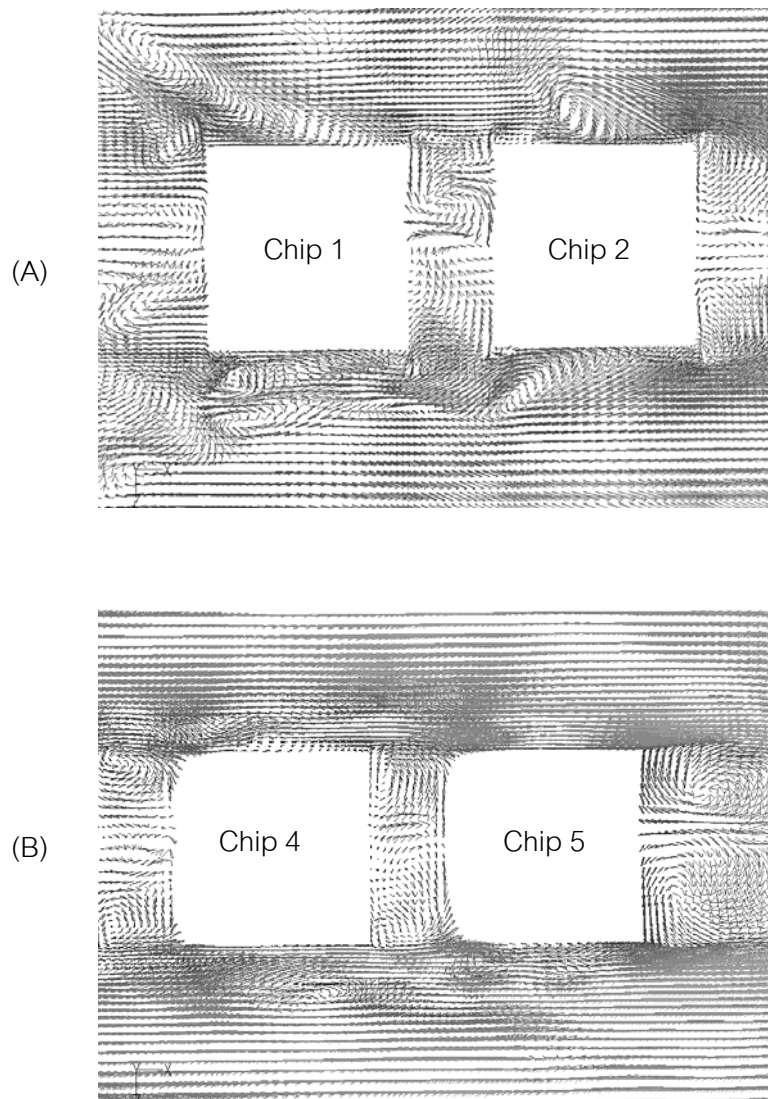
ภาพประกอบ 37 การกระจายของอุณหภูมิในระนาบ x-z บนผิวของชิพทั้งห้าตัวที่ค่า

$Re_B = 920$, $Br = 25\%$ และ $SW = 42\%$



ภาพประกอบ 38 การกระจายของอุณหภูมิและการไหลวนในระนาบ x-z

บนผิวของชิพทั้งห้าตัวที่ค่า $Re_B = 920$, $Br = 25\%$, $SW = 42\%$ และ $f = 2$



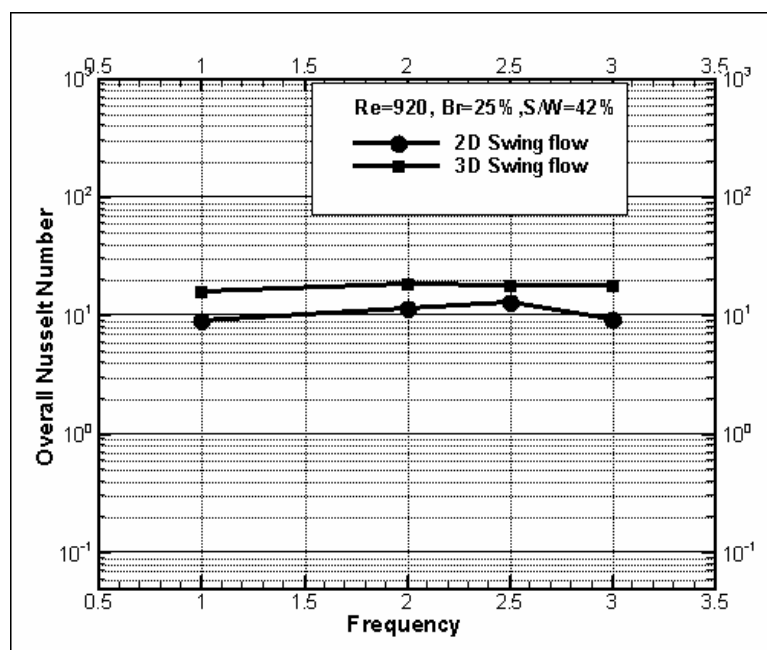
ภาพประกอบ 39 การกระจายของอุณหภูมิและกระแสการไหลวนในระนาบ x-z

บนผิวของชิพทั้งห้าตัวที่ค่า $Re_B = 920$, $Br = 25\%$, $SW = 42\%$ และ $f = 2$

ภาพประกอบ 39 แสดงตัวอย่างของเวกเตอร์ความเร็วของบนระนาบ x-z ในระหว่างชิพตัวที่ 1 และ 2 และระหว่างชิพตัวที่ 4 และ 5 ที่ตำแหน่งความสูงกึ่งกลางของชิพ พบว่าที่ด้านหน้าของชิพตัวที่ 1 จะเกิดการพุ่งชนของกระแสเกิดเป็น Stagnation point ที่บริเวณกึ่งกลางของชิพ กระแสการไหลจะม้วนตัวทางด้านข้างของชิพและส่วนหนึ่งจะเคลื่อนที่เข้าไปในช่องว่างระหว่างชิพ ซึ่งจะเกิดในทุกช่องว่างระหว่างชิพ กระแสการไหลวนบริเวณด้านข้างของชิพจะมีค่าลดลงเมื่อเคลื่อนที่ไปสู่ชิพตัว

ท้ายๆ สังเกตได้จากภาพประกอบ 29 (B) พบว่าที่บริเวณด้านข้างซีพตัวที่ 4 และ 5 นั้นค่ากระแสการไหลวนมีค่าน้อยมาก ทั้งนี้คาดว่าช่องว่างระหว่างซีพจะเป็นที่สะสมความไร้เสถียรภาพหรือกระแสการไหลวนภายในและมีการปลดปล่อยหรือสับตออกมาน้อยมาก นอกจากนี้พบว่าการไหลวนหลังซีพตัวที่ 5 มีลักษณะคล้ายดอกเห็ด โดยมี Stagnation point ที่บริเวณกึ่งกลางของซีพและการไหลวนทั้งตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาออกจากแนวกลางของซีพ

การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงส่งผลเช่นเดียวกับการไหลในสภาวะไม่คงตัวใน 2 มิติ กล่าวคือค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความถี่ โดยค่าความถี่ที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ $f = 2$ ดังแสดงในภาพประกอบ 40 นอกจากนี้ยังพบว่าที่ค่าความถี่เท่ากับ 3 นั้นค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมไม่มีแนวโน้มในการลดลงซึ่งแตกต่างจากการไหลใน 2 มิติ คาดว่าเนื่องจากผลของแนวแกนในมิติที่สามที่สามารถแตกกระจายค่ากระแสไหลวนที่ถี่และขนาดเล็กออกในมิติที่สาม ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมีค่าไม่ลดลง นอกจากนี้พบว่าผลที่ได้จากการคำนวณในสามมิติมีค่าสูงกว่าผลจากการคำนวณในสองมิติเนื่องมาจากผลของแนวแกนในมิติที่สาม ซึ่งการคำนวณในแบบจำลองสามมิตินี้มีความเสมือนจริงมากกว่าดังนั้นผลที่ได้จึงน่าเชื่อถือกว่า



ภาพประกอบ 40 ผลกระทบของค่าความถี่ที่มีต่อค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขนัสเซลท์โดยรวม
ที่ค่า $Re_B = 920$, $Br = 25\%$, $SW = 42\%$ และ $f = 2$

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนของชิพจำนวน 5 ตัวที่ถูกจัดวางแบบแถวเรียงตรงกัน ที่มีกระแสการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลง โดยใช้ระเบียบวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อน ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป FLUENT เป็นเครื่องมือเพื่อศึกษาผลกระทบของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ ซึ่งได้แก่ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ซึ่งอยู่ในรูปความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของโดเมนการคำนวณ ค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิพต่อความยาวของชิพและค่าระยะห่างของชิพต่อความสูงของโดเมนการคำนวณ สำหรับการศึกษาได้แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ ทำการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ในสภาวะการไหลคงตัวใน 2 มิติ สภาวะการไหลไม่คงตัวใน 2 มิติ และ สภาวะการไหลไม่คงตัวใน 3 มิติ ซึ่งสามารถสรุปผลงานวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 การไหลสภาวะคงตัวใน 2 มิติ

สำหรับกรณีการไหลในสภาวะคงตัวที่ค่า $Re_B < 500$ การเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ Re_B เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่าค่าเฉลี่ยตัวเลขเนสเซลท์โดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้น และค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยกระแสการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงมีค่าสอดคล้องกับผลการทดลอง แต่ค่าที่ได้จากการกระแสการไหลเข้าแบบการส่ายสลับขึ้นลงมีค่ามากกว่าแบบการไหลเข้าแบบสม่ำเสมอ การเพิ่มค่าความถี่ของการส่ายสลับจาก $f = 0.5$ ไปเป็น $f = 3$ ทำให้ค่าเฉลี่ยตัวเลขเนสเซลท์โดยรวมเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 190% โดยค่าความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการไหลสภาวะคงตัวอยู่ที่ $f = 2$ อย่างไรก็ตามการเพิ่มค่าความถี่ให้สูงขึ้นอาจไม่ส่งผลดีต่อการถ่ายเทความร้อนเสมอไป

5.1.2 การไหลสภาวะไม่คงตัวใน 2 มิติ

ในการไหลในสภาวะไม่คงตัวที่ $500 < Re_B < 1000$ พบว่าการเพิ่มค่า Re_B ทำให้ค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขเนสเซลท์โดยรวมของทุกกรณีสูงขึ้นเนื่องจากความไร้เสถียรภาพที่สูงขึ้น การเพิ่มค่า Br ของชิพนั้นส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มสูงขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าการเพิ่มขึ้นของค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเมื่อค่า Br มีค่าสูงขึ้นนั้นน่าจะมาจากช่องทางไหลเข้ามีขนาดลดลงส่งผลให้ค่าความเร็วโดยเฉลี่ยด้านบนมีค่าสูงขึ้น ถึงแม้ว่าค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงจะมากกว่าการไหลเข้าแบบสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์ความดันของการไหลเข้าแบบส่ายสลับขึ้นลงก็มีค่าสูงตามด้วย ซึ่งจะส่งผลให้ความดันตกคร่อมในช่องการไหลมีค่าสูงขึ้น เมื่อมีการปรับค่าความถี่พบว่าค่าเฉลี่ยต่อเวลาของตัวเลขเนสเซลท์โดยรวมมีค่าสูงสุดถึง 12.5 ที่ค่า $f = 2.5$

5.1.3 การไหลสภาวะไม่คงตัวใน 3 มิติ

ผลการศึกษาของการไหลเข้าแบบสายสลับขึ้นลงใน 3 มิติ ที่ $500 < Re_B < 1000$ จากการคำนวณพบว่าการไหลเข้าแบบสายสลับขึ้นลง เป็นตัวสร้างความไม่เสถียรให้เกิดกับการไหล ส่งผลให้การไหลถูกปรับเปลี่ยนจากการไหลแบบสภาวะคงตัวเป็นการไหลในสภาวะไม่คงตัวได้ง่าย นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มค่า Re_B สามารถทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้น $f=0.5$ ถึง $f=3$ และยังพบอีกว่าในกรณีที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์คงที่ การเพิ่มค่าความถี่ทำให้การถ่ายเทความร้อนของชิพเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มค่าความถี่ด้วย โดยให้ผลที่สอดคล้องกับผลการคำนวณใน 2 มิติ แต่การเพิ่มค่าความถี่ของการสายสลับขึ้นลงในแบบจำลอง 3 มิติ จาก $f = 2$ ถึง $f = 3$ กลับไม่พบแนวโน้มของการลดลงเหมือนในกรณี 2 มิติ

ผลจากการศึกษา จะเห็นได้ว่าการไหลเข้าแบบสายสลับขึ้นลงใน 3 มิติ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชิพได้มากกว่าการทดลองถึง 155.1% โดยที่ไม่ต้องทำการเพิ่มความเร็วของกระแสไหลให้มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่สูงขึ้น อีกทั้งการไหลเข้าแบบสายสลับขึ้นลงมีประโยชน์คือ สามารถการควบคุมคุณลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นให้เป็นไปตามที่ต้องการได้ โดยการควบคุมค่าความถี่ของการสาย ซึ่งทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อน แต่อย่างไรก็ตามการไหลสายสลับขึ้นลงยังคงต้องได้รับการศึกษาในอีกหลายประเด็น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ผลจากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาและออกแบบการจัดวางชิพบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในกรณีจัดวางชิพแบบแถวเรียงตรงกันให้มีความเหมาะสมได้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อน ทั้งยังสามารถนำไปเป็นแนวทางการวิจัยในระดับสูงต่อไปได้สำหรับข้อเสนอแนะในงานวิจัยดังนี้

5.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยนี้

จากการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ ในการคำนวณทำให้ทราบถึงข้อดีและข้อจำกัดในบางกรณีที่เราสามารถนำไปเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ การถ่ายเทความร้อนของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์หรืองานที่มีลักษณะเดียวกันได้ แต่มีบางกรณีของผลการคำนวณในงานวิจัยนี้ยังไม่มีผลการทดลองมาเปรียบเทียบเนื่องจากเป็นการคำนวณตามข้อสมมุติฐานจึงน่าจะต้องทำการทดลองเพื่อทำการเปรียบเทียบเพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

5.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ในการศึกษาลักษณะการไหลเข้าที่มีการปรับกระแสการไหลเข้าในลักษณะต่าง ที่ได้ทำการศึกษา รวมทั้งในงานวิจัยนี้ ทำให้มีความหลากหลายสำหรับข้อมูลที่จะนำไปพิจารณาในการออกแบบและวิจัยเพิ่มเติมต่อจากงานวิจัยนี้ในหลายกรณี เช่น การไหลที่มีการส่ายตามแนวระนาบ (ซ้าย-ขวา) การไหลที่มีการส่ายรูปคลื่นเป็นรูปสามเหลี่ยม การไหลที่มีการส่ายรูปคลื่นเป็นรูปสี่เหลี่ยม รวมทั้งการจัดเรียงรูปแบบของชิพ เป็นต้น

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

1. ชาญณรงค์ วันทา. การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการถ่ายเทความร้อนในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล].มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่;2548
2. น้ามนต์ โชติวิศรุต. การพาความร้อนของชุดแท่งจัดรั้วร้อนที่ทำมุม 45 องศาับทิศทางการไหลและเรียงตัวในแนวเดียวกัน [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล]. เชียงใหม่: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2546.
3. Davalath, J.; & Bayazitoglu, Y. *Forced convection cooling across rectangular blocks*. Journal of Heat Transfer. 1987; 109: 321-328.
4. Leung, C.W.; Kang, H.J.; & Probert, S.D. *Horizontal simulated printed circuit board assembly in fully developed laminar flow convection*. Applied Energy.1997; 56(1): 71-91.
5. Meinders, E.R.; Van Der Meer, T.H.; & Hanjalic, H. *Local convective heat transfer from an array of wall mounted cubes*. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1998; 41(16) : 335-346.
6. Wu, H.-W.; Wang, S.-W.; & Perng, S.W. *The effective installation of an inclined plate for the enhancement of forced convection over rectangular sources*. Heat and Mass Transfer. 1998; 33: 431-438.
7. Timoyhy, Young J.; & Vafai, Kambiz. *Convective flow and at transfer in a channel containing multiple heated obstacles*. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1998; 41: 3519-3529.
8. สุริยนต์ ฆมดี,อดิพงษ์ นันทพันธุ์; และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. ปัจจัยในการพาความร้อนของชิพบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์. ใน: การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, 15-17 ตุลาคม 2546; ปราจีนบุรี, ประเทศไทย: 2546; หน้า 214.
9. Moon, J. W., Kim, S.Y., & Cho, H. H. *Frequency dependent heat transfer enhancement from rectangular heated block array in a pulsating channel flow*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005; 48: 4904-4913.

10. Seo, Young Kim.; Byung, Ha Kang.; & Jae, Min Hyun. *Forced convection heat transfer from two heated blocks in pulsating channel flow*. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1998; 41, 2827-2836.
11. Pantankar ,Suhav V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. New York: Hemisphere; 1980.
11. Hwang, K. S., Sung H. J.,and Hyun, J. M. Flow and mass transfer measurements for a flat plate of finite thickness in pulsating flow. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 1998, 41, 2827-2836.
12. Versteeg, H. K.; & Malalasekera, W. *An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method*. Malaysia: Longman Scientific & Technical; 1995.
13. Cengel, Yunus A. *Heat transfer a practical approach*. International edition. New York: McGraw-Hill; 1998.
14. Ozisik, M. Necati. *Heat transfer a basis approach*. International edition. Singapore: McGraw-Hill; 1985.
15. Hiramatsu, Michio.; Ishimatsu Tsuneo.; & Ohkouchi Takaki. *Numerical analysis of innerfins for Intercooler*. JSME International Journal. 1992; 35(3): 406-411.
16. วีรชาติ นวรุ่งเรือง; อโณทัย สุขแสงพรหมรุ่ง และ อุดมเกียรติ นนทแก้ว. การวิเคราะห์ผลการไหลแบบสภาวะไม่คงตัวผ่านครีบบระบายความร้อนแบบเกร็ด. ใน: การประชุมวิชาการการถ่ายเทความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 1, 24-25 มีนาคม 2546; ศูนย์ฝึกอบรมแม่เมาะการไฟฟ้าฝ่ายผลิต อำเภอแม่เมาะ ลำปาง;ประเทศไทย:2546.หน้า31-35.
17. Djilali, N. *Forced laminar convection in an array of stacked plates*. Numerical Heat Transfer. 1994; 25: 393-408.
18. Tafti, D.K.; & Zhang, X. *Geometry effects on flow transition in multilouvered fins onset propagation and characteristic frequencies*. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2001; 44: 4195-4210.
19. วีรชาติ นวรุ่งเรือง; อุดมเกียรติ นนทแก้ว และ อโณทัย สุขแสงพรหมรุ่ง. การวิเคราะห์คุณลักษณะความถี่ของการไหลผ่านครีบบระบายความร้อนแบบเกร็ด. ใน: การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, 15-17 ตุลาคม 2546; ปราจีนบุรี, ประเทศไทย: 2546; หน้า 1001-1006.
20. Wilson, Howard B.; & Turcotte, Louis H. *Advanced Mathematics and mechanics applications using MATLAB*. Florida : CRC; 1994

21. Pantankar ,Suhas V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. New York:Hemisphere; 1980.
22. Suksangpanomrung, A.; Djilali, N; & Moinat, P. Large-eddy simulation of separated flow over a bluff rectangular plate. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2000; 21:655-633.
23. Bouhadji, A; & Djilali, N. Forcing of unsteady flow and convective heat transfer via bulk upstream oscillations. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2003; 24: 77-90.
24. Hacoheh, J.; Chiu, T.W.; & Wragg, A.A. *Forced and free convection heat transfer coefficients for a model printed circuit board channel geometry*. *Experimental Thermal and fluid science*. 1995; 10: 327-334.
25. Suksangpanomrung, A. *Unsteady convective heat transfer over a bluff rectangular plate*. Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand 14th, 2-3 November 2000; Chiang Mai, Thailand: 2000. p.1-7.
26. Velayati, E.; & Yaghoubi, M. *Numerical study of convective heat transfer from an array of parallel plates*. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2005; 26: 80-91.
27. มนต์วี พิรุณเกษตร. *กลศาสตร์ของไหล*. กรุงเทพฯ: บริษัททุนพับลิชชิ่ง; 2545.
28. Kim, S. Y., Kang, B. H. and Hyun, J, M., Forced convection heat transfer from two Heated blocks in pulsating channel flow. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 1998, 41, 625-634.
29. Hwang, K. S., Sung H. J.,and Hyun, J. M. Flow and mass transfer measurements for a flat plate of finite thickness in pulsating flow. *Int. J. Heatand Mass Transfer*, 1998, 41, 2827-2836.
30. Bouhadji, A., and Djilali, N., Forcing of unsteady Separated flow and convective heat transfer via bulk upstream oscillations. *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, 2003, 24, 77-90.
31. Nishimura, T., Oka, N., Yoshinaka, Y., and Kunitsugu, K., Influence of imposed oscillatory frequency on mass transfer enhancement of grooved channels for pulsatile flow. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 2000, 43, 2365-2374.
32. Anderson, John D., Jr. *Computational fluid dynamics The basic with applications*. New York : McGraw-Hill; 1995.

33. Chapra, Steven C. & Canale, Raymond P. *Numerical method for engineers with software and programming applications*. 4th ed. New York: McGraw-Hill; 2002.
34. Seo, Young Kim.; Byung, Ha Kang.; & Jae, Min Hyun. *Forced convection heat transfer from two heated blocks in pulsating channel flow*. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1998; 41(3): 625-634.
35. Incropera, F.P. *Convective heat transfer in electronic equipment cooling*. Journal of Heat Transfer. 1988; 110: 1097-1111.
36. Fung, C. T. *A first course in continuum mechanics*. 3rd ed. New Jersey: Prentice-Hall; 1994.
37. ปราโมทย์ เดชะอำไพ. *ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการคำนวณพลศาสตร์ของไหล*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2545.
38. Jubran, B.A.; Swiety, S.A.; & Hamdan, M.A. *Convective heat transfer and pressure drop characteristics of various array configuration to simulation the cooling of electronic modules*. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1996; 39(16) : 3519-3529.
39. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง, ศุภชาติ จงไพบูลย์พัฒนะ. *การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีบบแลกเปลี่ยนความร้อนในกระแสน้ำไหลที่มีลักษณะการไหลเป็นจังหวะโดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข*. กรุงเทพฯ : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2549
40. ชาญณรงค์ วันทา , อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง และ วรณวิไล ไกรเพชร. *อิทธิพลของการไหลแบบเป็นจังหวะเพื่อเพิ่มความสามารถในถ่ายเทความร้อนจากกลุ่มวัตถุร้อนที่จัดเรียงตัวในช่องทางไหล*.ทุนอุดหนุนการวิจัยจาก ทุนงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2549 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ภาคผนวก

อภิธานศัพท์

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

ความหมาย

B	ความสูงของชิพ
Br	ค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของแบบจำลองการไหล
f	ความถี่
f'	เทอมไร้หน่วยของความถี่บังคับของการไหล
f_n	ค่าความถี่ธรรมชาติของการไหลในเทอมไร้หน่วย
Gr_B	ค่าตัวเลขกราซอฟ
g	แรงโน้มถ่วงของโลก
H	ความสูงของแบบจำลองการไหล
h	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน
$\bar{h}_{overall}$	ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยรวม
k	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล
L_p	ความยาวของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์
L_{in}	ระยะจากทางเข้าของแบบจำลองการไหล
L_{out}	ระยะจากทางออกของแบบจำลองการไหล
L_z	ระยะในทิศทางแกน z
$\overline{Nu}_{overall}$	ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลท์โดยรวม
$\overline{Nu}_B$	ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลท์ ความยาวจำเพาะเป็นความสูงของชิพ
$\overline{Nu}_H$	ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลท์ ความยาวจำเพาะเป็นความสูงของแบบจำลองการไหล
p	ความดัน
Pr	ค่าตัวเลขพรันด์เทิล
$\dot{q}$	ฟลักซ์ความร้อน
Re_B	ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ความยาวจำเพาะเป็นความสูงของชิพ
Re_H	ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ความยาวจำเพาะเป็นความสูงของแบบจำลองการไหล
S	ระยะห่างของชิพ

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์

ความหมาย

t	เวลา
t'	เทอมไร้หน่วยของเวลา
T_0	อุณหภูมิของของไหลด้านทางเข้า
T_w	อุณหภูมิตามผนังซีพ
U_0	ความเร็วของของไหลด้านทางเข้า
u	ความเร็วในทิศทางแกน x
v	ความเร็วในทิศทางแกน y
w	ความเร็วในทิศทางแกน z
W	ความยาวของซีพ
X_r	ค่าความยาวของการไหลบรรจบ
x	ระยะในแนวแกน x
y	ระยะในแนวแกน y
z	ระยะในแนวแกน z
ϕ	ตัวแปรสเกลาร์
ρ	ความหนาแน่น
μ	ความหนืดสัมบูรณ์
ν	ความหนืดจลศาสตร์
α	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ทางความร้อน
Φ	ฟังก์ชันการคายตัวเนื่องจากความหนืด
β	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายชิน คำอาจ
วันเดือนปีเกิด	10 มิถุนายน 2514
สถานที่เกิด	อำเภอตรอน จังหวัดอุดรธานี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	25 หมู่ 19 ตำบลนาบ่อคำ อำเภอเมือง จังหวัดกำแพงเพชร
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นายช่างเครื่องกล 5
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ เลขที่ 75/7 ถนนพระราม 6 แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2527	มัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนนาบ่อคำวิทยาคม (จังหวัดกำแพงเพชร)
พ.ศ. 2530	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ จากวิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร (จังหวัดกำแพงเพชร)
พ.ศ. 2537	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง จากวิทยาลัยช่างกลปทุมวัน (จังหวัดกรุงเทพฯ)
พ.ศ. 2541	อุดมศึกษา อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีขนถ่ายวัสดุ) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (จังหวัดกรุงเทพฯ)
พ.ศ. 2551	บัณฑิตศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (กรุงเทพฯ)