

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการถ่ายเทความร้อนในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ปริญญาานิพนธ์  
ของ  
ชาญณรงค์ วันทา

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

กันยายน 2548

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการถ่ายเทความร้อนในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

บทคัดย่อ

ของ

ชาญณรงค์ วันทา

๒-๒ ก.พ. ๒๕๔๙

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

กันยายน ๒๕๔๘

๒ ๒๘ ๒๑๙๒

ชาญณรงค์ วันทา. (2548). การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการถ่ายเทความร้อนในแผงวงจร  
อิเล็กทรอนิกส์. ปรินซ์นิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.  
อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง, ดร.วรรณวิไล ไกรเพชร.

ปรินซ์นิพนธ์นี้มุ่งเน้นศึกษาถึงค่าพารามิเตอร์ที่ช่วยส่งเสริมให้อากาศการถ่ายเทความร้อนจากชิพได้ดีขึ้น ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่นำมาศึกษาได้แก่ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของแบบจำลองการไหล และค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิพต่อความยาวของชิพ โดยจัดวางชิพแบบแถวเรียงตรงกันในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์และนำวิธีการคำนวณทางด้านพลศาสตร์ของไหลบนพื้นฐานระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม มาเป็นเครื่องมือในการศึกษาหาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษาดังกล่าว พร้อมทั้งทำการตรวจสอบผลการคำนวณกับผลการทดลองของงานวิจัยที่ผ่านมา สำหรับการศึกษาได้แบ่งออกเป็นสองกรณี คือ กรณีการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ในสภาวะการไหลคงตัว และกรณีการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ในสภาวะการไหลไม่คงตัว

ผลการทดสอบเปรียบเทียบโปรแกรมที่ใช้คำนวณกับผลการทดลอง และงานวิจัยเชิงตัวเลขที่เป็นที่ยอมรับ พบว่าโปรแกรมมีความถูกต้องในระดับที่สามารถนำไปใช้ในงานวิจัยได้ สำหรับผลของการศึกษา ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของแบบจำลองการไหล และค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิพต่อความยาวของชิพในสภาวะการไหลคงตัว พบว่าการเพิ่มค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ในขอบเขตที่เหมาะสม ทั้งในการคำนวณสองมิติและสามมิติ สามารถทำให้ชิพมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นได้

สำหรับผลการศึกษาในสภาวะการไหลไม่คงตัว พบว่าการไหลแบบสภาวะไม่คงตัวมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลและสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยรวมของชิพได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการไหลในสภาวะคงตัว พบว่าการปรับเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของแบบจำลองการไหล และค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิพต่อความยาวของชิพที่สภาวะการไหลไม่คงตัวในขอบเขตที่เหมาะสมช่วยส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชิพดีขึ้นกว่าสภาวะการไหลคงตัว โดยผลการคำนวณในสองมิติและสามมิติให้ผลที่สอดคล้องกัน ผลจากการศึกษาที่ได้นี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในกระบวนการออกแบบและประยุกต์ใช้ในงานวิจัยระดับสูงต่อไปได้

# NUMERICAL ANALYSIS FOR HEAT TRANSFER IN A PRINTED CIRCUIT BOARD

ABSTRACT

BY

CHANNARONG WANTHA

Presented in partial fulfillment of the requirements for the

Master of Mechanical Engineering

at Srinakharinwirot University

September 2005

Channarong Wantha. (2005). *Numerical Analysis for Heat Transfer in a Printed Circuit*

*Board*. Master Thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee : Lt. Col. Assist. Prof. Dr. Anotai Suksangpanomrung, Dr. Wanwilai Kraipech.

The purpose of this research is to study the parameters affecting on the behavior of flow and heat transfer of chips, which are in-line on the printed circuit board. The parameters considered are the Reynolds number, the blockage ratio, which is defined as the ratio of the thickness of the chip to the height of the computational domain and the ratio of chip spacing to the chip length. Two and Three-dimensional domains were simulated by the CFD, which is the computational fluid dynamics code base on the finite volume method. The calculations are performed in steady laminar flow and unsteady flow in low and moderate Reynolds number. The prediction of the simulation is compared with the available experimental data.

The CFD program is tested and validated by comparing between the experimental data and the numerical solution. It is found that result from the CFD program is acceptable for the research work and can be used as a tool for investigation. The results show that, in steady laminar flow, increasing of the Reynolds number, the blockage ratio, and the ratio of chip spacing to the chip length in the appropriate limit can enhancing of the heat transfer coefficient of the chips. In both two and three-dimensional domain case.

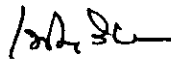
In the case of unsteady flow, the results show that the flow unsteadiness play an important role in the behavior of flow and the enhancement of the heat transfer coefficient of the chips. Increasing the Reynolds number, the blockage ratio, and the ratio of chip spacing to the chip length in appropriate limit give better heat transfer rate than the steady flow. From the results of this research, it can be concluded that the numerical results obtained from the CFD can be useful in the design procedure of the chip and for further advanced research in this field.

ปริญญานิพนธ์  
เรื่อง

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการถ่ายเทความร้อนในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ของ  
ชาญณรงค์ วันทา

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญศิริ จีระเดชากุล)

วันที่ 14...เดือน...กันยายน...พ.ศ. 2548

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

พ.ศ. ๒๕๔๘...ประธาน  
(พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ่ง)

.....กรรมการ

(ดร.วรรณวิไล ไกรเพ็ชร)

พ.ศ. ๒๕๔๘...กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม

(พันเอกสุภโชค สัมปัตตะวนิช)

.....กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม

(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์)

## ประกาศคุณูปการ

ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เป็นเพราะผู้วิจัยได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ่ง อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์นี้ ท่านได้เสียสละเวลาถ่ายทอดความรู้ประสบการณ์ และให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ตลอดการทำงานวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง รวมทั้งขอขอบพระคุณ ดร.วรรณวิไล ไกรเพชร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมของปริญญาานิพนธ์นี้ สำหรับคำแนะนำต่างๆ และขอขอบพระคุณ พันเอกสุภโชค สัมปัตตะวนิช และรองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ กรรมการสอบปริญญาานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำเพิ่มเติมทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่เอื้อเพื่อสถานที่ในการทำวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณ ผู้วิจัย ผู้เขียนตำราวิชาการทุกท่านในบทบรรณานุกรมที่เป็นแหล่งข้อมูลและให้ความรู้ทางด้านทฤษฎีสำหรับปริญญาานิพนธ์นี้

ท้ายสุดผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ พ่อ แม่ ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนด้านการศึกษาของผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา

ชาญณรงค์ วันทา

## สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ขอบเขตการวิจัย.....	2
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	3
2 ผลงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
สมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อน.....	7
ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม.....	16
ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน.....	28
ค่าพารามิเตอร์ไร้มิติสำหรับการวิเคราะห์การไหล และการถ่ายเทความร้อน.....	30
3 การกำหนดปัญหาและการตรวจสอบผลการคำนวณ.....	32
วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล.....	32
ขั้นก่อนการประมวลผล.....	32
ขั้นการประมวลผล.....	33
ขั้นการแสดงผล.....	33
การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการวิจัย.....	33
การสร้างแบบจำลองการไหล.....	36
การคำนวณขนาดและจำนวนกริดที่มีผลต่อคำตอบ.....	36
สมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับการคำนวณ.....	36
ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสองมิติ.....	37
ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ.....	37

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

### 3 (ต่อ)

การตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับงานวิจัยที่ผ่านมา .....	40
การตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลการทดลอง .....	40
การศึกษาผลกระทบของการเลือกแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข .....	43
การตรวจสอบโปรแกรมกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	45
สรุปผลท้ายบท .....	47

### 4 การศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ในสภาวะการไหลคงตัว .....

คุณลักษณะการไหลในสภาวะการไหลคงตัวและไม่คงตัว .....	48
คุณลักษณะการไหลในสภาวะคงตัว .....	49
คุณลักษณะการไหลเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลง .....	50
คุณลักษณะการไหลในสภาวะไม่คงตัว .....	52
ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในการไหลสองมิติ .....	55
ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ .....	55
ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความสูงของชิพ ต่อความสูงของแบบจำลองการไหล .....	60
ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิพ ต่อความยาวของชิพ .....	64
ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในการไหลสามมิติ .....	69
ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความสูงของชิพ ต่อความสูงของแบบจำลองการไหล .....	69
สรุปผลท้ายบท .....	72

### 5 การศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ในสภาวะการไหลไม่คงตัว .....

ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในการไหลสองมิติ .....	74
ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ .....	75

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 (ต่อ)	
ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความสูงของซีพ ต่อความสูงของแบบจำลองการไหล.....	81
ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระยะห่างของซีพ ต่อความยาวของซีพ.....	86
ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในการไหลสามมิติ.....	91
ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระยะห่างของซีพ ต่อความยาวของซีพ.....	91
สรุปผลท้ายบท.....	95
6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอเชิงทฤษฎีจากการวิจัย.....	96
สรุปผลงานวิจัย.....	96
สรุปผลการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ในสภาวะการไหลคงตัว.....	96
สรุปผลการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ในสภาวะการไหลไม่คงตัว.....	97
ข้อเสนอแนะในการวิจัยขั้นต่อไป.....	99
บรรณานุกรม.....	100
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	105

## บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 รูปสมการส่งถ่ายสำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อน.....	17
2 ข้อมูลสำหรับการคำนวณผลกระทบของกริด.....	38
3 กรณีสึกษาผลกระทบของกริด.....	38
4 ข้อมูลของการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง.....	40
5 กรณีสึกษาผลกระทบของการเลือกแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข.....	43
6 ข้อมูลในการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Wu, H.-W.; et al. <sup>(5)</sup> .....	45
7 ข้อมูลการคำนวณสำหรับการศึกษาคุณลักษณะการไหล.....	49
8 ข้อมูลการคำนวณค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในสภาวะการไหลคงตัว.....	55
9 ข้อมูลการคำนวณค่าอัตราส่วนความสูงของซีพ ต่อความสูงของแบบจำลองการไหลในสภาวะการไหลคงตัว.....	60
10 ข้อมูลการคำนวณค่าอัตราส่วนระยะห่างของซีพต่อความยาวของซีพ ในสภาวะการไหลคงตัว.....	65
11 ข้อมูลการคำนวณค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในสภาวะการไหลไม่คงตัว.....	75
12 ข้อมูลการคำนวณค่าอัตราส่วนความสูงของซีพ ต่อความสูงของแบบจำลองการไหลในสภาวะการไหลคงไม่ตัว.....	81
13 ข้อมูลการคำนวณค่าอัตราส่วนระยะห่างของซีพต่อความยาวของซีพ ในสภาวะการไหลคงไม่ตัว.....	87

## บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 ลักษณะการจัดวางชิพและสัญลักษณ์ประกอบ .....	2
2 ปริมาตรควบคุมสำหรับปัญหาสองมิติ.....	18
3 ฟลักซ์การพาและฟลักซ์การแพร่บนผิวของปริมาตรควบคุม.....	22
4 การจัดวางตัวแปรแบบ Staggered grid .....	25
5 การถ่ายเทความร้อนของชิพบนแผงวงจรถอเล็กทรอนิกส์ .....	29
6 การเปลี่ยนแปลงความเร็วและอุณหภูมิของของไหลบนแผ่นวัตถุ.....	30
7 แบบจำลองการไหลสามมิติ.....	34
8 แบบจำลองการไหลสองมิติ.....	34
9 การจัดวางกริดบนแบบจำลองการไหล .....	34
10 ภาพขยายการจัดวางกริดบนแบบจำลองการไหล .....	35
11 ค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์เฉพาะที่ ณ ตำแหน่งผนังด้านบนของชิพ.....	39
12 ภาพขยายค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์เฉพาะที่ของชิพตัวที่หนึ่ง .....	39
13 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองที่ค่า $Re_H = 518$ .....	41
14 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองที่ค่า $Re_H = 920$ .....	41
15 แสดงการหมุนวนของกระแสการไหลที่บริเวณด้านท้ายของชิพตัวที่ห้า ในการไหลสามมิติ .....	42
16 เปรียบเทียบแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข .....	43
17 เวกเตอร์ความเร็วบริเวณด้านท้ายของชิพตัวที่ห้าในการไหลสามมิติ.....	44
18 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับงานวิจัยของ Wu, H.-W.; et al. <sup>(5)</sup> ที่ $Re_H = 990$ .....	46
19 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับงานวิจัยของ Wu, H.-W.; et al. <sup>(5)</sup> ที่ $Re_H = 1320$ .....	46
20 คุณลักษณะการไหลแบบคงตัวที่ค่า $Re_B = 130, Br = 25\%, S/W = 42\%$ (A) เวลา $t' = 133$ , (B) เวลา $t' = 136.5$ .....	49
21 การไหลวนชั่วขณะที่ค่า $Re_B = 500, Br = 25\%, S/W = 42\%$ (A) เวลา $t' = 96.9$ , (B) เวลา $t' = 98.52$ .....	50

## บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
22 การไหลวนชั่วขณะที่ค่า $Re_B = 1000$ , $Br = 25\%$ , $S/W = 42\%$ (A) เวลา $t' = 417.747$ , (B) เวลา $t' = 418.823$ (C) เวลา $t' = 419.900$ , (D) เวลา $t' = 420.977$ .....	51
23 ตำแหน่งบันทึกผลการคำนวณตามเวลาที่ค่า $Br = 25\%$ , $S/W = 42\%$ .....	52
24 สัญญาณความเร็วที่ตำแหน่งบันทึกผลต่อเวลา .....	53
25 สเปกตรัมพลังงานของความเร็วที่ตำแหน่งบันทึกผล.....	53
26 เส้นทางการไหลของของไหลที่ผ่านชิพตัวที่หนึ่งและตัวที่ห้า ที่ค่า $Br = 25\%$ , $S/W = 42\%$ .....	55
27 ค่าสัมประสิทธิ์ความดันของการคำนวณผลกระทบค่า $Re_B$ .....	56
28 ค่าตัวเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ของการคำนวณผลกระทบค่า $Re_B$ .....	57
29 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบค่า $Re_B$ .....	57
30 การกระจายตัวของอุณหภูมิในการคำนวณผลกระทบค่า $Re_B$ ที่ค่า $Br = 25\%$ , $S/W = 42\%$ .....	58
31 การกระจายตัวของความเร็วในการคำนวณผลกระทบจากค่า $Br$ ที่ค่า $Re_B = 130$ , $S/W = 42\%$ .....	60
32 ค่าสัมประสิทธิ์ความดันของการคำนวณผลกระทบค่า $Br$ .....	61
33 ค่าตัวเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ของการคำนวณผลกระทบค่า $Br$ .....	62
34 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบค่า $Br$ .....	62
35 การกระจายตัวของอุณหภูมิในการคำนวณผลกระทบจากค่า $Br$ ที่ค่า $Re_B = 130$ , $S/W = 42\%$ .....	63
36 เวกเตอร์ความเร็วและการกระจายตัวของอุณหภูมิในพื้นที่ระหว่างชิพตัวที่สี่ และตัวที่ห้าที่ค่า $Re_B = 130$ , $Br = 25\%$ .....	65
37 ค่าสัมประสิทธิ์ความดันของการคำนวณผลกระทบค่า $S/W$ .....	66
38 ค่าตัวเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ของการคำนวณผลกระทบค่า $S/W$ .....	67
39 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบค่า $S/W$ .....	68
40 การกระจายตัวของอุณหภูมิในระนาบ $x - z$ ที่ค่า $Re_B = 130$ , $S/W = 42\%$ .....	70

## บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
41 เปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์เฉพาะที่ของการคำนวณผลกระทบค่า $Br$ ในการไหลสองมิติและสามมิติ .....	71
42 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบค่า $Br$ .....	71
43 เส้นทางการไหลของของไหลที่ผ่านชิพตัวที่หนึ่งในรูปแบบค่าเฉลี่ยของเวลา ที่ค่า $Br = 25\%$ , $S/W = 42\%$ .....	76
44 ค่าสัมประสิทธิ์ความดันชั่วขณะของการคำนวณผลกระทบค่า $Re_B$ .....	77
45 ค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์เฉพาะที่ของการคำนวณผลกระทบค่า $Re_B$ .....	78
46 การกระจายตัวของอุณหภูมิบนชิพตัวที่หนึ่งในรูปแบบค่าเฉลี่ยต่อเวลา ที่ค่า $Br = 25\%$ , $S/W = 42\%$ .....	79
47 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์ของชิพแต่ละตัวของการคำนวณผลกระทบค่า $Re_B$ .....	80
48 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบค่า $Re_B$ .....	80
49 ขนาดของการไหลบรรจุบนผนังของชิพตัวที่หนึ่ง .....	82
50 ค่าสัมประสิทธิ์ความดันชั่วขณะของการคำนวณผลกระทบค่า $Br$ .....	83
51 การไหลวนชั่วขณะที่ค่า $Re_B = 1000$ , $S/W = 42\%$ , $t' = 969.0$ .....	83
52 ค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์เฉพาะที่ของการคำนวณผลกระทบค่า $Br$ .....	84
53 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์ของชิพแต่ละตัวของการคำนวณผลกระทบค่า $Br$ .....	85
54 การกระจายตัวของอุณหภูมิชั่วขณะที่ $Br = 34\%$ , $S/W = 42\%$ , $t' = 969.0$ .....	85
55 เวกเตอร์ความเร็วและการกระจายตัวของอุณหภูมิในพื้นที่ระหว่างชิพตัวที่สี่ และตัวที่ห้าในรูปแบบค่าเฉลี่ยต่อเวลาที่ค่า $Re_B = 1000$ , $Br = 25\%$ .....	87
56 ค่าสัมประสิทธิ์ความดันชั่วขณะของการคำนวณผลกระทบค่า $S/W$ .....	88
57 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์เฉพาะที่ของการคำนวณผลกระทบค่า $S/W$ .....	89
58 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์ของชิพแต่ละตัวของการคำนวณผลกระทบค่า $S/W$ .....	90
59 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบค่า $S/W$ .....	90
60 เวกเตอร์ความเร็วในพื้นที่ระหว่างชิพตัวที่หนึ่งและตัวที่สอง ในรูปแบบค่าเฉลี่ยต่อเวลาที่ค่า $Re_B = 1000$ , $Br = 25\%$ .....	92

## บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
61 การไหลวนชั่วขณะที่ระนาบ $x - y$ ที่ $z/B = 12.5$ ( $\omega_z$ ) , $Re_B = 1000$ $S/W = 71%$ , $Br = 25%$ , เวลา $t' = 107.6$ .....	93
62 การกระจายตัวของอุณหภูมิในรูปค่าเฉลี่ยต่อเวลาบนระนาบ $x - z$ ที่ค่า $Re_B = 1000$ , $Br = 25%$ .....	93
63 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลโดยรวมของการคำนวณผลกระทบค่า $S/W$ .....	94

## คำอธิบายสัญลักษณ์

### สัญลักษณ์

### ความหมาย

$B$	ความสูงของชิพ
$Br$	ค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของแบบจำลองการไหล
$C_p$	ค่าสัมประสิทธิ์ความดัน
$f$	ความถี่
$f'$	เทอมไร้หน่วยของความถี่
$Gr_B$	ค่าตัวเลขกราชอฟ
$g$	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
$Pe$	ค่าตัวเลขเพกเลต
$Pr$	ค่าตัวเลขพรันด์เทิล
$\dot{q}$	ฟลักซ์ความร้อน
$Re_B$	ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ความยาวจำเพาะเป็นความสูงของชิพ
$Re_H$	ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ความยาวจำเพาะเป็นความสูงของแบบจำลองการไหล
$S$	ระยะห่างของชิพ

## คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
$S_\phi$	เทอมแหล่งกำเนิด
$t$	เวลา
$t'$	เทอมไร้หน่วยของเวลา
$T_0$	อุณหภูมิของของไหลด้านทางเข้า
$T_w$	อุณหภูมิต่อนผนัง
$U_0$	ความเร็วของของไหลด้านทางเข้า
$u$	ความเร็วในทิศทางแกน $x$
$v$	ความเร็วในทิศทางแกน $y$
$w$	ความเร็วในทิศทางแกน $z$
$W$	ความยาวของชิพ
$X_r$	ค่าความยาวของการไหลบรรจบ
$x$	ระยะในแนวแกน $x$
$y$	ระยะในแนวแกน $y$
$z$	ระยะในแนวแกน $z$
$\Gamma$	สัมประสิทธิ์การแพร่
$\phi$	ตัวแปรเกลาร์
$\rho$	ความหนาแน่น
$\mu$	ความหนืดสัมบูรณ์
$\nu$	ความหนืดจลศาสตร์
$\alpha$	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ทางความร้อน
$\Phi$	ฟังก์ชันการคายตัวเนื่องจากความหนืด
$\beta$	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

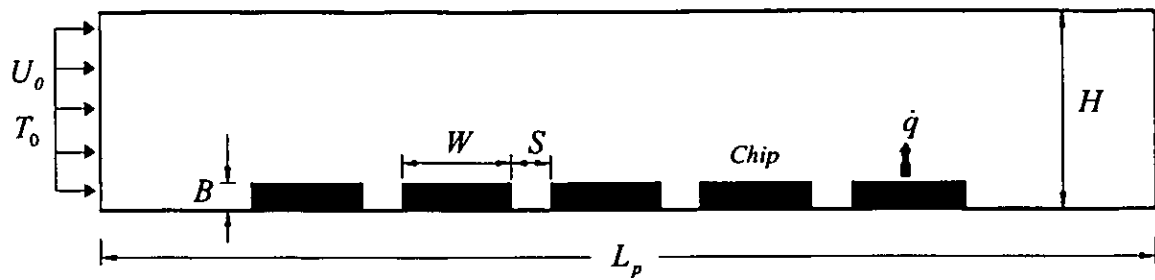
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

ความต้องการอย่างหนึ่งในด้านการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คือ ความพยายามในการลดขนาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้เล็กลงและเพิ่มความสามารถในการทำงานให้สูงขึ้น เพื่อให้เกิดความสอดคล้องกับการใช้งานทำให้เกิดการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกกันว่า ชิพ (Chip) ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่จัดอยู่ในกลุ่มที่มีการปลดปล่อยความร้อนสูง ความร้อนที่เกิดขึ้นกับชิพมีค่ามากหรือน้อยนั้นนอกจากขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าที่ชิพต้องการแล้วยังมีระยะเวลาการทำงาน การรับความร้อนจากชิพและแผงวงจรอื่นที่ติดตั้งใกล้กัน และความร้อนที่เกิดจากสภาพแวดล้อมรอบๆ ถ้าการจัดการในเรื่องของความร้อนที่เกิดขึ้นไม่มีประสิทธิภาพดีเพียงพอ อาจทำให้อายุการใช้งานของชิพลับลงหรือเกิดความเสียหายต่อชิพนั้นได้ เพื่อเป็นการป้องกันจึงต้องค้นหาวิธีการลดความร้อนที่เกิดขึ้นนี้

วิธีการลดความร้อนหรือการระบายความร้อนจากชิพนั้นสามารถทำหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้กันมาก คือ การระบายความร้อนด้วยอากาศเพราะมีราคาถูกและใช้งานง่าย แต่อากาศยังมีความสามารถในการระบายความร้อนไม่ค่อยดีนัก เนื่องจากคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์เฉพาะตัวของมันเอง งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลของอากาศและตัวชิพ ได้แก่ ความเร็วของอากาศ ค่าความสูงของช่องอากาศที่สัมพันธ์กับตัวชิพและระยะห่างในการจัดวางชิพแต่ละตัว เพื่อช่วยให้อากาศทำการถ่ายเทความร้อนจากชิพได้ดีขึ้น วิธีที่สามารถใช้ศึกษาค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ได้ เช่น วิธีวิเคราะห์เพื่อหาผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution) การสร้างแบบจำลองเพื่อทดลองการไหลและการถ่ายเทความร้อน และระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข สำหรับระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลขนี้ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นตัวช่วยในการหาผลเฉลยปัญหาของการไหลและการถ่ายเทความร้อนหรือที่เรียกว่า ระเบียบวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics; CFD) จะมีความสะดวกกว่า 2 วิธีแรก เนื่องจากระบบสมการเชิงอนุพันธ์ที่ครอบคลุมปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear) จึงทำให้มีความยุ่งยากสำหรับการวิเคราะห์เพื่อหาผลเฉลยแม่นยำตรง ส่วนการสร้างแบบจำลองเพื่อทดลองต้องใช้เวลา มีค่าใช้จ่ายสูง ทำให้การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขทำได้ในขอบเขตจำกัด



ภาพประกอบ 1 ลักษณะการจัดวางชิพและสัญลักษณ์ประกอบ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการคำนวณทางด้านพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อน เป็นเครื่องมือสำหรับศึกษาค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynold number;  $Re$ ) ค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของแบบจำลองการไหล (Blockage ratio;  $Br = B/H$ ) และค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิพต่อความยาวของชิพ ( $S/W$ ) เพื่อค้นหาผลของพารามิเตอร์เหล่านี้ที่สามารถช่วยส่งเสริมให้อากาศถ่ายเทความร้อนจากชิพที่ถูกจัดวางแบบแถวเรียงตรงกัน (in-line) ในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ดังแสดงในภาพประกอบ 1 ได้ดีขึ้น โดยผลเฉลยของการคำนวณได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของงานวิจัยที่ผ่านมา<sup>(1)</sup> เพื่อเป็นการยืนยันผลของการคำนวณที่ได้นั้น สำหรับผลการวิจัยที่ได้ สามารถใช้เป็นแนวทางหนึ่งในการออกแบบการจัดวางชิพให้มีความสามารถ ในการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาพฤติกรรมกรไหลของอากาศ และการถ่ายเทความร้อนของชิพจำลอง ในกรณีจัดวางชิพจำลองแบบแถวเรียงตรงกันและมีทิศทางกรไหลของอากาศที่ต้นทางของชิพตัวแรก

1.2.2 วิเคราะห์ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) ค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของแบบจำลองการไหล ( $Br$ ) ค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิพต่อความยาวของชิพ ( $S/W$ ) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชิพ

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume method)

1.3.2 ทำการคำนวณในแบบจำลองการไหลสองและสามมิติ

1.3.3 พิจารณาเฉพาะการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection)

1.3.4 ชิพจำลองปลดปล่อยค่าฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) อย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง

1.3.5 การคำนวณใช้ชิพจำลองจำนวนห้าตัว โดยมีขนาดเท่ากันทุกตัว

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยจะทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

##### 1.4.1 รวบรวมข้อมูล

ทำการศึกษาศาษฏิก และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

##### 1.4.2 กำหนดลักษณะของปัญหาและสร้างแบบจำลอง

กำหนดลักษณะรูปร่างของชิพและสร้างรูปจำลอง บนโปรแกรมออกแบบทางพลศาสตร์ของไหลพร้อมทั้งปรับเลือกขนาดและจำนวนกริดที่เหมาะสม (Grid independent)

##### 1.4.3 ตรวจสอบโปรแกรมกับผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สร้างสมการเชิงอนุพันธ์ของความต่อเนื่อง สมการเชิงอนุพันธ์ของโมเมนตัม สมการเชิงอนุพันธ์ของพลังงาน ตามข้อสมมติฐานของการคำนวณและทำการตรวจสอบโปรแกรมกับผลการทดลองและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่เป็นที่ยอมรับเพื่อเป็นการพิสูจน์ยืนยันผลการคำนวณ

##### 1.4.4 ทำการคำนวณเชิงตัวเลขในปัญหาที่ต้องการศึกษา

ทำการคำนวณเชิงตัวเลขจากแบบจำลองการไหลสองและสามมิติที่ต้องการศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่ระบุในวัตถุประสงค์ ได้แก่ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของแบบจำลองการไหล ค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิพต่อความยาวของชิพ

##### 1.4.5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณ

นำข้อมูลจากการคำนวณมาทำการวิเคราะห์ผลและแสดงค่าในรูปพารามิเตอร์ไร้หน่วย

##### 1.4.6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์และข้อเสนอแนะที่ควรทำการวิจัยต่อไป

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.5.1 ทำให้ทราบผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของชิพในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

1.5.2 เพื่อการพัฒนาและออกแบบการจัดวางตำแหน่งชิพบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ในกรณีจัดวางชิพแบบแถวเรียงตรงกันให้มีความเหมาะสม

1.5.3 เป็นองค์ความรู้เพื่อการวิจัยด้านการถ่ายเทความร้อนในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

## บทที่ 2

### ผลงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้เป็นการทบทวนผลงานวิจัย ในด้านที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านมาและนำเสนอทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 หัวข้อใหญ่ดังนี้

#### หัวข้อ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### หัวข้อ 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 สมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อน

2.2.2 ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม

2.2.3 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

2.2.4 ค่าพารามิเตอร์ไร้นหน่วยสำหรับการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อน

#### 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Davalath, J.; & Bayazitoglu, Y.<sup>(2)</sup> ศึกษาการพาความร้อนแบบบังคับโดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างชิพจำลองจำนวน 3 ตัว ซึ่งได้กำหนดให้ค่าความสูงของช่องอากาศและขนาดความสูงของชิพจำลองมีค่าที่ การศึกษาใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลขโดยระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม ภายในแบบจำลองการไหล 2 มิติ การไหลเป็นแบบราบเรียบและอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady flow) ค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 100 ถึง 1500 โดยใช้ความยาวจำเพาะของสมการเป็นความสูงของแบบจำลองการไหลหรือความสูงของช่องอากาศเหนือชิพ ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มค่าระยะห่างระหว่างชิพเป็นการเพิ่มขนาดของกระแสหมุนวน ซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อนบนชิพจำลองดีขึ้นและพบว่าค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉพาะที่ (Local Nusselt number) สูงสุดเกิดที่ตำแหน่งมุมด้านหน้าของผนังชิพแต่ละตัว

Leung, C. W.; Kang, H. J.; & Probert, S.D.<sup>(3)</sup> ศึกษาการพาความร้อนและค่าความดันตกคร่อมของชิพจำลอง ซึ่งทำมาจากทองแดงติดตั้งบนแผงวงจรจำนวน 12 ตัว และถูกจัดวางแบบแถวเรียงตรงกันโดยเปลี่ยนค่าความสูงของแบบจำลองการไหล ความยาวของตัวชิพจำลองและให้ระยะห่างระหว่างชิพจำลองมีค่าสม่ำเสมอตลอด ค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 510 ถึง 2050 โดยใช้ความยาวจำเพาะของสมการเป็นช่องว่างระหว่างผนังชิพด้านบนกับผนังของแบบจำลองการไหล การศึกษาได้ทำทั้งวิธีการทดลองในอุโมงค์ลมโดยติดตั้งพัดลมดูดอากาศไว้ที่ทางออกและใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลข

โดยระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมใน 2 มิติ การไหลอยู่ในสภาวะคงตัว อากาศที่ไหลเข้าพิจารณาเป็นการไหลแบบราบเรียบ ผลการศึกษาพบว่า ชิพจำลองตัวแรกมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงและลดลงต่อเนื่องจนถึงชิพจำลองตัวที่ 6 ถึงตัวที่ 9 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนใกล้เคียงกันและเริ่มมีแนวโน้มที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้นอีกที่ชิพ 2 ตัวสุดท้าย และผลของการคำนวณเชิงตัวเลขแสดงให้เห็นถึงการหมุนวนของกระแสการไหลในพื้นที่ว่างระหว่างชิพ ซึ่งมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของชิพจำลอง

Meinders, E.R.; Van Der Meer, T.H.; & Hanjalic, H.<sup>(4)</sup> ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของชิพจำลองจำนวน 6 ตัว ซึ่งมีรูปร่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและถูกจัดวางแบบแถวเรียงตรงกัน การศึกษาได้ใช้วิธีการทดลองภายในอุโมงค์ลม โดยมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 795 ถึง 5066 โดยใช้ความยาวจำเพาะของสมการเป็นความสูงของชิพ ผลการศึกษาพบว่า ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 795 ชิพตัวที่ 1 มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนผนังด้านบนสูงสุด แต่เมื่อเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์เป็น 2086 ถึง 5066 ชิพตัวที่ 1 กลับมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนลดลงต่ำกว่าชิพตัวที่ 2 ถึงตัวที่ 6 เนื่องจากเกิดการหมุนวนที่ผนังด้านบนของชิพตัวที่ 1

Wu, H.-W.; Wang, S.-W.; & Perng, S. W.<sup>(5)</sup> ศึกษาถึงผลของการติดตั้งแผ่นบังค้ำทิศทางการไหลของอากาศเพื่อการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของชิพจำลองจำนวน 5 ตัว ที่ถูกจัดวางแบบแถวเรียงตรงกัน โดยทดลองติดตั้งแผ่นบังค้ำทิศทาง ไว้ในตำแหน่งด้านหน้าและด้านหลังของชิพจำลองตัวแรกสูงจากผิวของชิพจำลอง 12 มิลลิเมตร มุมที่ศึกษาคือ 30, 60 และ 90 องศา การศึกษาใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลขโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายในแบบจำลองการไหล 2 มิติ การไหลเป็นแบบราบเรียบในสภาวะไม่คงตัว (Unsteady flow) ค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 660 ถึง 1320 โดยใช้ความยาวจำเพาะของสมการเป็นความสูงของแบบจำลองการไหล ผลการศึกษาพบว่า การติดตั้งแผ่นบังค้ำทิศทางการไหลไว้ในตำแหน่งด้านหน้าของชิพจำลองตัวแรกมีค่าตัวเลขนัสเซลท์สูงกว่าการติดตั้งในตำแหน่งด้านหลังของชิพจำลองตัวแรก และการใช้แผ่นบังค้ำทิศทางการไหลให้ค่าตัวเลขนัสเซลท์สูงกว่าแบบจำลองที่ไม่ได้ติดตั้งแผ่นบังค้ำทิศทางการไหล ส่วนมุมของแผ่นบังค้ำทิศทางการไหลที่ 60 องศา มีค่าตัวเลขนัสเซลท์สูงกว่า 2 มุมที่เหลือ

Timoyhy, Young J.; & Vafai, Kambiz.<sup>(6)</sup> ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลง ความสูง ความกว้าง ระยะห่าง ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และพื้นที่รับความร้อนของชิพจำลองโดยแบ่งออกเป็น 15 กรณี ชิพถูกจัดวางแบบแถวเรียงตรงกัน การศึกษาใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลข โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายในแบบจำลองการไหล 2 มิติ การไหลเป็นแบบราบเรียบในสภาวะคงตัว ค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 200 ถึง 2000 โดยใช้ความยาวจำเพาะของสมการเป็นความสูงของแบบจำลองการไหล ผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าเหล่านี้ มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน โดยชิพ

จำลองที่มีระยะห่างมากสามารถลดอุณหภูมิได้มากที่สุดและขนาดมิติของตัวชิพจำลอง ก็มีผลโดยตรงต่อลักษณะการไหลที่เกิดขึ้น ส่วนในด้านผิวรับความร้อนของชิพซึ่งแบ่งเป็นรับความร้อนจากผิวด้านล่างและรับความร้อนทั้งปริมาตร พบว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขนัสเซลท์น้อย

น้ามนต์ โชติวิศรุต.<sup>(1)</sup> ศึกษาการเปรียบเทียบการจัดวางชิพแบบแถวตรง 90 องศา และแบบเฉียงทำมุม 45 องศา กับทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศโดยทำการทดลองภายในอุโมงค์ลมความเร็วต่ำติดตั้งพัดลมดูดอากาศไว้ที่ทางออก ใช้ชิพจำลองจำนวน 5 ตัวทำจากวัสดุอลูมิเนียม ชิพถูกจัดวางแบบแถวเรียงตรงกันบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่หุ้มฉนวนไว้ที่ผิวด้านล่าง การทดลองใช้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 518 ถึง 1839 โดยใช้ความยาวจำเพาะของสมการเป็นความสูงของแบบจำลองการไหล ผลการศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากชิพจำลองตัวแรกมีค่าสูงที่สุดในทั้ง 2 กรณี และการวางตัวของชิพที่ทำมุม 45 องศา กับแนวทางการเคลื่อนที่ของอากาศให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงกว่าแบบแถวตรง 90 องศา

สุริยนต์ ชมดี; อติพงษ์ นันทพันธุ์; และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์.<sup>(7)</sup> ศึกษาถึงปัจจัยในการพาความร้อนของชิพจำลองที่จัดวางแบบแถวเรียงตรงกัน โดยการเปลี่ยนแปลงความสูงของช่องอากาศระยะห่างระหว่างตัวชิพ และค่าความเร็วของอากาศโดยใช้ชิพจำลองจำนวน 4 ตัว ทำจากวัสดุอลูมิเนียมและจัดวางชิพแบบแถวเรียงตรงกัน บนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่หุ้มฉนวนไว้ที่ผิวด้านล่าง โดยทำการทดลองภายในอุโมงค์ลมความเร็วต่ำติดตั้งพัดลมดูดอากาศไว้ที่ทางออก ช่วงความเร็วที่ใช้คือ 2-4 m/s ผลการศึกษาพบว่า ความเร็วของอากาศที่ความเร็ว 2-3 m/s มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในอัตราที่สูง แต่ถ้าเลยช่วงดังกล่าวแล้วมีผลของการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยชิพจำลองตัวที่ 2 และ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ำกว่าตัวแรก

จากการตรวจสอบงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการจัดการทางด้านการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่อง และผู้วิจัยหลายท่านได้มุ่งความสนใจในการจัดการกับความร้อนที่เกิดจากชิพหลายตัว ที่จัดวางแบบแถวเรียงตรงกันบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยทั้งวิธีการทดลองและวิธีคำนวณเชิงตัวเลข ถึงแม้ว่าได้มีการศึกษาถึงค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลและการถ่ายเทความร้อนของชิพมาบ้างแล้ว แต่ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ยังไม่สามารถถูกอธิบายในรายละเอียดได้เพียงพอ ทั้งนี้เพราะว่าการศึกษาโดยการทดลองไม่สามารถนำเสนอให้เห็นได้ชัดเจนถึงพฤติกรรมของการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรเมื่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เปลี่ยนไปเพราะวิธีการทดลองมีข้อจำกัดค่อนข้างมาก วิธีที่สามารถนำเสนอให้เห็นถึงพฤติกรรมของการไหลของอากาศและการถ่ายเทความร้อนของชิพ จึงต้องอาศัยระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลขช่วยในการศึกษา ซึ่งสามารถทำให้การวิเคราะห์ผลด้านการถ่ายเทความร้อนมีความถูกต้องเพิ่มขึ้น

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 สมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อน

สมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย สมการเชิงอนุพันธ์ของความต่อเนื่อง (Differential equation of continuity) สมการเชิงอนุพันธ์ของโมเมนตัม (Differential equation of momentum) และสมการเชิงอนุพันธ์ของพลังงาน (Differential equation of energy) สมการเหล่านี้ได้อธิบายความเป็นจริงที่มีความหมายทางกายภาพซึ่งได้จากหลักการ การอนุรักษ์มวล (Conservation of mass) การอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of momentum) และการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) สำหรับการหาความสัมพันธ์ของสมการเชิงอนุพันธ์ ได้ตั้งข้อสมมติฐานเกี่ยวกับของไหลดังนี้

1. ของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible flow)
2. คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของของไหลคงที่
3. พิจารณาของไหลเป็นชนิดนิวโทเนียน (Newtonian fluid)
4. การไหลอยู่ในสภาวะไม่คงตัว

#### 2.2.1.1 สมการเชิงอนุพันธ์ของความต่อเนื่อง (Differential equation of continuity)

การประดิษฐ์สมการเชิงอนุพันธ์ของความต่อเนื่อง ได้ใช้หลักการการอนุรักษ์มวลซึ่งกล่าวว่า มวลในปริมาตรควบคุมคงที่ไม่มีเปลี่ยนแปลงในปริมาตรควบคุมเขียนในรูปความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

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

หรือ

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

ใช้ทฤษฎีของ Reynolds Transport Theorem ซึ่งเป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ สำหรับแปลงการวิเคราะห์ทั้งระบบ (System analysis) มาเป็นการวิเคราะห์ในปริมาตรควบคุม (Control volume analysis)

สำหรับทฤษฎีของ Reynolds Transport Theorem มีรูปสมการเป็น

$$\frac{d}{dt} \int_V \Phi(\bar{x}, t) dV = \int_V \frac{\partial \Phi}{\partial t} dV + \int_S \Phi(\bar{u}\bar{n}) dA \quad (2-3)$$

สำหรับทฤษฎีของ Divergence Theorem (Gauss Theorem) มีรูปสมการเป็น

$$\int_V \frac{\partial u_i}{\partial x_i} dV = \int_S u_i n_i dA \quad (2-4)$$

พิจารณารวมสมการ (2-3) และสมการ (2-4) ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \int_V \Phi(\bar{x}, t) dV = \int_V \frac{\partial \Phi}{\partial t} dV + \int_V \frac{\partial \Phi u_i}{\partial x_i} dV \quad (2-5)$$

โดยที่  $\Phi$  คือ ปริมาณสเกลาร์

$\bar{n}$  คือ Unit vector

ดังนั้นสมการ (2-2) สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการดังนี้

$$\int_V \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} \right) dV = 0 \quad (2-6)$$

ผลจากสมการ (2-6) ทำให้ได้สมการดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2-7)$$

สมการ (2-7) เรียกว่าสมการเชิงอนุพันธ์ของความต่อเนื่อง สำหรับของไหลแบบอัดตัวได้ สภาวะไม่คงตัว สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้  $\partial \rho / \partial t = 0$  จากสมการ (2-7) ลดรูปสมการเป็น

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2-8)$$

สมการ (2-8) เรียกว่า สมการเชิงอนุพันธ์ของความต่อเนื่อง สำหรับของไหลที่อัดตัวได้ในสภาวะคงตัวและสภาวะไม่คงตัว

### 2.2.1.2 สมการเชิงอนุพันธ์ของโมเมนตัม (Differential equation of momentum)

สมการเชิงอนุพันธ์ของโมเมนตัม ได้มาจากการใช้กฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) ที่กล่าวว่า ผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมเท่ากับผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมภายในปริมาตรควบคุม

$$\frac{dm\bar{u}}{dt} = \sum \bar{F} \quad (2-9)$$

จากทฤษฎีกลศาสตร์ของสารต่อเนื่อง (Continuum mechanics) ซึ่งนำหลักการเรื่องความเค้นมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแต่ละส่วนของเนื้อสาร หรือระบบที่สนใจ โดยได้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ แรงที่กระทำเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง (Body forces) เช่น แรงที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก แรงเนื่องสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนแรงชนิดที่สอง คือ แรงกระทำที่ผิว (Surface force) เช่น แรงเนื่องจากการกระจายตัวของความดัน แรงเนื่องจากการกระจายตัวเนื่องจากความเค้นเป็นต้น

$$\sum \bar{F} = \int_S t_i dS + \int_V \rho b_i dV \quad (2-10)$$

พิจารณาสมการ (2-9), (2-10) และใช้ความสัมพันธ์ในสมการ (2-5) เมื่อ  $\Phi = u_i$  ได้สมการดังนี้

$$\int_S t_i dS + \int_V \rho b_i dV = \int_V \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} dV + \int_V \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} dV \quad (2-11)$$

เมื่อ  $t_i$  คือ เวกเตอร์ความเค้น (Stress vector) ซึ่งมีความเชื่อมโยงกับเทนเซอร์ความเค้น (Stress tensor ;  $\sigma_{ij}$ ) ดังนี้

$$t_i = \sigma_{ij} n_j \quad (2-12)$$

$$\int_S t_i dS = \int_S \sigma_{ij} n_j dS \quad (2-13)$$

ใช้ทฤษฎีของ Divergence Theorem กับสมการ (2-13) ได้สมการใหม่เป็น

$$\int_S t_i dS = \int_V \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} dV \quad (2-14)$$

แทนสมการ (2-14) ในสมการ (2-11) ได้สมการใหม่ดังนี้

$$\int_V \left( \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \right) dV = \int_V \left( \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} \right) dV \quad (2-15)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad (2-16)$$

ทำการกระจายเทอมด้านซ้ายของสมการ (2-16)

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + u_i \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad (2-17)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + u_i \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad (2-18)$$

จากสมการเชิงอนุพันธ์ของความต่อเนื่อง  $\left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} \right) = 0$  ดังนั้นสมการ (2-18) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad (2-19)$$

สมการ (2-19) เรียกว่า สมการทั่วไปของสมการเชิงอนุพันธ์ของโมเมนตัม หรือ สมการอนุพันธ์  
โมเมนตัม พิจารณาเทอม  $\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}$  ในสมการ (2-19) ใช้สมการ Constitutive equation ในกฎของความ

หนืดของนิวตัน (Newton's viscosity law) ที่บ่งบอกความสัมพันธ์ของความเค้นและอัตราการผิดรูปในของไหลชนิดนิวโทเนียน สำหรับของไหลที่มีคุณสมบัติไอโซทรอปิก (Isotropic) ได้ความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \lambda\delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2-20)$$

โดยที่ค่า  $\delta_{ij}$  คือ ฟังก์ชันไครเนกเกอร์เดลตา (Kronecker delta function) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\delta_{ij} \begin{cases} 1 & ; i = j \\ 0 & ; i \neq j \end{cases}$$

ค่า  $\lambda$  คือ ค่าความหนืดตามสมมติฐานของสโตกส์ (Stokes's hypothesis) มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu$$

แทนสมการ (2-20) ในสมการ (2-19) ได้สมการดังนี้

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho b_i \quad (2-21)$$

จากสมการเชิงอนุพันธ์ของความต่อเนื่อง ของไหลอัดตัวไม่ได้และเมื่อค่า  $\mu$  มีค่าคงที่ ลดรูปสมการเป็น

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + b_i \quad (2-22)$$

เมื่อไม่คิดผลเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก สมการ (2-22) ลดรูปสมการเป็น

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2-23)$$

สมการ (2-23) เรียกว่า สมการเชิงอนุพันธ์ของโมเมนตัม หรือสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation) สำหรับของไหลอัดตัวไม่ได้ในสถานะไม่คงตัวและไม่คิดผลเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

### 2.2.1.3 สมการเชิงอนุพันธ์ของพลังงาน (Differential equation of energy)

สมการเชิงอนุพันธ์ของพลังงาน พิจารณาจากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งกล่าวว่าพลังงานที่เพิ่มขึ้นภายในปริมาตรควบคุม มีค่าเท่ากับผลรวมของความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ปริมาตรควบคุมกับพลังงานที่สิ่งแวดล้อมกระทำบนผิวปริมาตรควบคุม เขียนในรูปความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\dot{E}_c = \dot{W} + \dot{Q} \quad (2-24)$$

โดยงานที่กระทำบนปริมาตรควบคุม แบ่งออกเป็น งานที่เกิดจากแรงที่ผิวและงานที่เกิดจากแรงวัตถุ ส่วนพลังงานที่เปลี่ยนแปลงในของไหลประกอบด้วย พลังงานภายใน (Internal energy;  $e$ ) และพลังงานจลน์ (Kinetic energy;  $\frac{u_i u_i}{2}$ ) ดังนั้นพลังงานรวมคือ  $e + \frac{1}{2} u_i u_i$  ประยุกต์สมการ(2-5) โดยให้  $\Phi = e + \frac{1}{2} u_i u_i$  ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\underbrace{\frac{d}{dt} \int_V \rho \left( e + \frac{1}{2} u_i u_i \right) dV}_{\text{พลังงานรวมในระบบ}} = \underbrace{\int_S t_i u_i dS}_{\substack{\text{ผลรวมของ} \\ \text{งานที่เกิดจากแรงที่ผิว}}} + \underbrace{\int_V \rho b_i u_i dV}_{\substack{\text{ผลรวมของ} \\ \text{งานที่เกิดจากวัตถุ}}} - \underbrace{\int_V \frac{\partial q_i}{\partial x_i} dV}_{\substack{\text{ผลรวมของ} \\ \text{พลังงานความร้อน}}} \quad (2-25)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \left( e + \frac{1}{2} u_i u_i \right) dV = \int_V \frac{\partial \sigma_{ij} u_i}{\partial x_j} + \int_V \rho b_i u_i dV - \int_V \frac{\partial q_i}{\partial x_i} dV \quad (2-26)$$

$$\int_V \left[ \frac{\partial}{\partial t} \left( \rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) u_j \right] dV = \int_V \left( \frac{\partial \sigma_{ij} u_i}{\partial x_j} + \rho b_i u_i - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} \right) dV \quad (2-27)$$

จากสมการ (2-27) ทำให้ได้สมการใหม่เป็น

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) u_j \right] = \frac{\partial (\sigma_{ij} u_i)}{\partial x_j} + \rho b_i u_i - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} \quad (2-28)$$

ทำการขยายเทอมด้านซ้ายของสมการ (2-28) ได้สมการ

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left( \rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) u_j \right] &= \rho \frac{\partial e}{\partial t} + e \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho}{2} \frac{\partial u_i u_i}{\partial t} + \frac{u_i u_i}{2} \frac{\partial \rho}{\partial t} \\ &+ \rho u_j \frac{\partial e}{\partial x_j} + e \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} + \frac{\rho u_j}{2} \frac{\partial u_i u_i}{\partial x_j} + \frac{u_i u_i}{2} \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (2-29)$$

จัดรูปสมการ (2-29) ใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left( \rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) u_j \right] &= \rho \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\rho}{2} \frac{\partial u_i u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial e}{\partial x_j} + \frac{\rho u_j}{2} \frac{\partial u_i u_i}{\partial x_j} \\ &+ e \left[ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} \right] + \frac{u_i u_i}{2} \left[ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (2-30)$$

จากสมการเชิงอนุพันธ์ของความต่อเนื่อง ทำให้สมการ (2-30) ลดรูปสมการเป็น

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\rho}{2} \frac{\partial u_i u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial e}{\partial x_j} + \frac{\rho u_j}{2} \frac{\partial u_i u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) u_j \right] \quad (2-31)$$

หรือ

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) u_j \right] = \rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial e}{\partial x_j} + \rho u_j u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2-32)$$

แทนสมการ (2-32) ลงในสมการ (2-28) ได้สมการใหม่เป็น

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial e}{\partial x_j} + \rho u_j u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial (\sigma_{ij} u_i)}{\partial x_j} + \rho b_i u_i - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} \quad (2-33)$$

หรือ

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial e}{\partial x_j} + \rho u_j u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = u_i \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho b_i u_i - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} \quad (2-34)$$

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + u_i \left( \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \rho u_j \frac{\partial e}{\partial x_j} = u_i \left( \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \right) - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2-35)$$

เทอมในวงเล็บด้านซ้ายของสมการ (2-35) ตรงกับความสัมพันธ์ของสมการ (2-19) ดังนั้นสมการ (2-35) สามารถลดรูปสมการลงเป็น

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial e}{\partial x_i} = \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} \quad (2-36)$$

เขียนเทอมด้านซ้ายของสมการ (2-36) ให้อยู่ในรูปค่าอนุพันธ์สมบูรณ์ (Substantial derivative)

$$\rho \frac{de}{dt} = \rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial e}{\partial x_i} \quad (2-37)$$

จากความสัมพันธ์ของพลังงานภายในและเอนทาลปี (Enthalpy ;  $h$ ) คือ  $e = h - \frac{p}{\rho}$  และประยุกต์สมการเชิงอนุพันธ์ของความต่อเนื่องเพื่อลดรูปสมการ (2-37) ได้สมการใหม่เป็น

$$\rho \frac{de}{dt} = \rho \frac{dh}{dt} - \frac{dp}{dt} \quad (2-38)$$

โดยเอนทาลปี มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ และความดันดังนี้

$$dh = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p dT + \left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T dp \quad (2-39)$$

จากสมการความจุความร้อนที่ความดันคงที่ (Specific heat at constant pressure ;  $c_p$ ) ในรูปความสัมพันธ์  $c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$  และความสัมพันธ์ของ  $\left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T = \frac{1}{\rho} + \frac{T}{\rho^2} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$  แทนสมการเหล่านี้ในสมการ (2-39) ได้สมการ

$$dh = c_p dT + \left[ \frac{1}{\rho} + \frac{T}{\rho^2} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \right] dp \quad (2-40)$$

แทนสมการ (2-40) ในสมการ (2-38) ได้สมการ

$$\rho \frac{de}{dt} = \rho \left[ c_p \frac{dT}{dt} + \frac{dp}{dt} \left( \frac{1}{\rho} + \frac{T}{\rho^2} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \right) \right] - \frac{dp}{dt} \quad (2-41)$$

$$= \rho c_p \frac{dT}{dt} + \frac{dp}{dt} + \left( \frac{T}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{dp}{dt} \right) - \frac{dp}{dt} \quad (2-42)$$

ดังนั้น ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของสมการเป็น

$$\rho \frac{de}{dt} = \rho c_p \frac{dT}{dt} + \left[ \frac{T}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{dp}{dt} \right] \quad (2-43)$$

จากสมการ (2-20) และจากกฎการนำความร้อนของฟูริเยร์ คือ  $q_i = -k \frac{\partial T}{\partial x_i}$  ดังนั้นสมการ

(2-36) เขียนอยู่ในรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \rho c_p \frac{dT}{dt} + \left( \frac{T}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{dp}{dt} \right) &= \left[ -p \delta_{ij} + \lambda \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \\ &= -p \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \lambda \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^2 + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \end{aligned} \quad (2-44)$$

ขยายเทอมด้านซ้ายของสมการ (2-44) และจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \beta T \frac{dp}{dt} - p \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \Phi + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (2-45)$$

เมื่อ

$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_p$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Thermo expansion coefficient)

$\Phi = \lambda \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^2 + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$  คือ ฟังก์ชันการคายตัวเนื่องจากความหนืด (Viscous-

dissipation function)

สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้และค่า  $k$  คงที่ทำให้ค่า  $\beta = 0$  ดังนั้นสมการ (2-45) ลดรูปสมการเป็น

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{k}{c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_i} + \Phi \quad (2-46)$$

สำหรับของไหลที่มีความเร็วระดับปานกลาง ทำให้สามารถละทิ้งเทอม  $\Phi$  ในสมการ (2-46) และทำให้ได้สมการในรูป

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial u_i T}{\partial x_i} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_i} \quad (2-47)$$

เมื่อ  $\alpha = k / \rho c_p$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ทางความร้อน (Diffusivity coefficient)

สมการ (2-47) เรียกว่า สมการเชิงอนุพันธ์ของพลังงาน สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ในสภาวะไม่คงตัว

## 2.2.2 ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม

การคำนวณเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume method) เป็นระเบียบวิธีที่เกิดจากการประยุกต์<sup>(8)</sup> วิธีการของระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite difference method) และระเบียบวิธีไฟต์เอลิเมนต์ (Finite element method) โดยแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันตรงวิธีประมาณตัวแปรและกระบวนการดิสครีไทซ์ (Discretize) ในงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่ใช้ในการคำนวณสำหรับงานวิจัยนี้

### 2.2.2.1 สมการส่งถ่ายสำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อน

สมการส่งถ่าย (Transport equation) เป็นการจัดรูปสมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อนให้เขียนอยู่ในรูปตัวแปรเดียวกัน ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)}_{\text{Unsteady term}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \bar{u} \phi)}_{\text{Convection term}} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi)}_{\text{Diffusion term}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{Source term}} \quad (2-47a)$$

หรือเขียนในรูปเทนเซอร์

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (2-47b)$$

โดยที่  $\Gamma$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่(Diffusion coefficient)

$\phi$  คือ ตัวแปรสเกลาร์ เช่น เวกเตอร์ความเร็ว และอุณหภูมิ

$S_\phi$  คือ เทอมแหล่งกำเนิด(Source term) ของตัวแปรที่สนใจ

ตาราง 1 รูปสมการส่งถ่ายสำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อน

Transport equation	$\phi$	$\Gamma$	$S_\phi$
Continuity	1	0	0
Momentum	$\bar{u}$	$\mu$	$-\nabla p + \rho \bar{b}$
Energy	$T$	$k/c_p$	$\Phi + \beta T(dp/dt)$

ในตาราง 1 แสดงรูปสมการส่งถ่ายของสมการควบคุมการไหล และการถ่ายเทความร้อน สำหรับการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม นั่น เริ่มต้นด้วยการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ในสมการ (2-47) ตลอดทั้งปริมาตรควบคุมแล้วทำการดิสครีไทซ์ลงบนจุดต่อต่างๆ บนปริมาตรควบคุม ซึ่งจะได้แสดงวิธีการคำนวณต่อไป

#### 2.2.2.2 การดิสครีไทซ์สมการ

ในการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม นั่น เริ่มต้นด้วยการดิสครีไทซ์สมการโดยการอินทิเกรตตลอดทั้งปริมาตรควบคุม ซึ่งในที่นี้ได้แสดงการดิสครีไทซ์ ปัญหาการพาและการแพร่

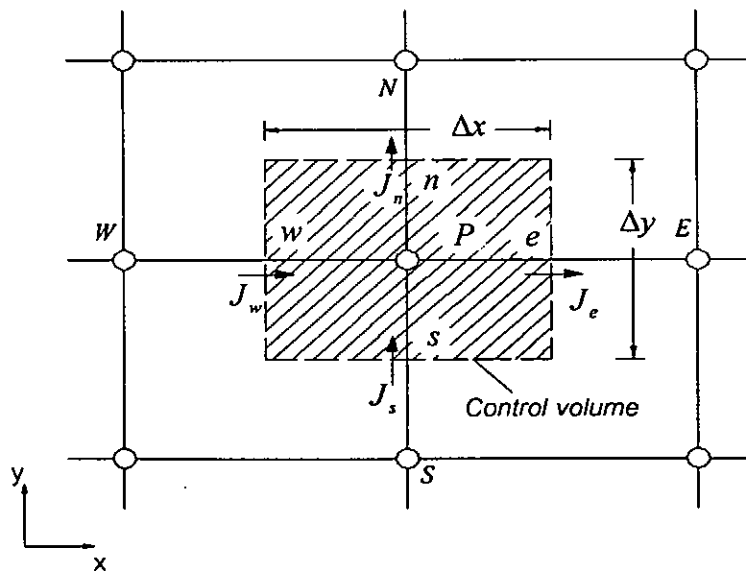
(Convection and diffusion) ในสภาวะไม่คงตัวใน 2 มิติและได้ขยายไปสู่ 3 มิติต่อไป พิจารณาจากสมการ (2-47) เขียนในรูปสมการ 2 มิติ ได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} = S \quad (2-48)$$

เมื่อ  $J_x$  และ  $J_y$  คือ ค่าฟลักซ์การพาพร้อมกับฟลักซ์การแพร่ (Convection plus diffusion) โดยกำหนดเป็น

$$J_x = \rho u \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2-49)$$

$$J_y = \rho v \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (2-50)$$



ภาพประกอบ 2 ปริมาตรควบคุมสำหรับปัญหาสองมิติ

เมื่อ  $u, v$  คือ ความเร็วในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ ทำการอินทิเกรตสมการ (2-48) บนปริมาตรควบคุมที่แสดงในภาพประกอบ 2 ได้สมการดังนี้

$$\frac{(\rho_P \phi_P - \rho_P^0 \phi_P^0) \Delta x \Delta y}{\Delta t} + J_e - J_w + J_n - J_s = (S_C + S_P \phi_P) \Delta x \Delta y \quad (2-51)$$

ซึ่งค่า "0" แทนค่าเริ่มต้นของช่วงเวลา(Time step) ส่วนค่า  $J_e, J_w, J_n, J_s$  จะถูกอินทิเกรตบนผิวของปริมาตรควบคุม เช่น  $J_e = \int J_x dy$  สำหรับบนผิวเซลล์  $e$  และที่ผิวอื่นก็มีความสัมพันธ์เดียวกัน ผลการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ของความต่อเนื่องบนปริมาตรควบคุมได้ผลดังนี้

$$\frac{(\rho_P - \rho_P^0)\Delta x \Delta y}{\Delta t} + F_e - F_w + F_n - F_s = 0 \quad (2-52)$$

เมื่อ  $F_e, F_w, F_n, F_s$  คือ อัตราการไหลของมวลที่ผ่านผิวของปริมาตรควบคุม ในรูปสมการ

$$F_e = (\rho u)_e \Delta y \quad (2-53a)$$

$$F_w = (\rho u)_w \Delta y \quad (2-53b)$$

$$F_n = (\rho v)_n \Delta x \quad (2-53c)$$

$$F_s = (\rho v)_s \Delta x \quad (2-53d)$$

คูณสมการ (2-52) ด้วยค่า  $\phi_P$  ได้สมการ

$$\frac{\phi_P(\rho_P - \rho_P^0)\Delta x \Delta y}{\Delta t} + F_e \phi_P - F_w \phi_P + F_n \phi_P - F_s \phi_P = 0 \quad (2-54)$$

นำสมการ (2-51) ลบด้วยสมการ (2-54) ได้สมการ

$$\begin{aligned} (\phi_P - \phi_P^0) \frac{\rho_P^0 \Delta x \Delta y}{\Delta t} + (J_e - F_e \phi_P) - (J_w - F_w \phi_P) + (J_n - F_n \phi_P) \\ - (J_s - F_s \phi_P) = (S_C + S_P \phi_P) \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (2-55)$$

สมมติว่าปริมาตรควบคุมในหนึ่งมิติมีค่าสม่ำเสมอตลอด ทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังนี้ (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้จาก Patankar, Suhas V. <sup>(9)</sup>)

$$J^* - P \phi_i = A(\phi_i - \phi_{i+1}) \quad (2-56)$$

$$J^* - P \phi_{i+1} = B(\phi_i - \phi_{i+1}) \quad (2-57)$$

เมื่อ

$$A(P) = A(P) + [[-P, 0]] \quad (2-58)$$

$$B(P) = A(P) + [[P, 0]] \quad (2-59)$$

พิจารณาสมการ (2-55) โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการ (2-56) ถึง (2-59) ได้รูปทั่วไปของสมการพีชคณิตของสมการการพาและการแพร่ ดังนี้

$$a_p \phi_p = a_e \phi_e + a_w \phi_w + a_n \phi_n + a_s \phi_s + b \quad (2-60)$$

เมื่อ

$$a_e = D_e A(P_e) + [[-F_e, 0]] \quad (2-61a)$$

$$a_w = D_w A(P_w) + [[F_w, 0]] \quad (2-61b)$$

$$a_n = D_n A(P_n) + [[-F_n, 0]] \quad (2-61c)$$

$$a_s = D_s A(P_s) + [[F_s, 0]] \quad (2-61d)$$

$$a_p^0 = \frac{\rho_p^0 \Delta x \Delta y}{\Delta t} \quad (2-61e)$$

$$b = S_C \Delta x \Delta y + a_p^0 \phi_p^0 \quad (2-61f)$$

$$a_p = a_e + a_w + a_n + a_s + a_p^0 - S_p \Delta x \Delta y \quad (2-61g)$$

และ

$$D_e = \frac{\Gamma_e \Delta y}{(\delta x)_e} \quad (2-62a)$$

$$D_w = \frac{\Gamma_w \Delta y}{(\delta x)_w} \quad (2-62b)$$

$$D_n = \frac{\Gamma_n \Delta x}{(\delta y)_n} \quad (2-62c)$$

$$D_s = \frac{\Gamma_s \Delta x}{(\delta y)_s} \quad (2-62d)$$

ส่วนค่า  $F_e, F_w, F_n, F_s$  กำหนดไว้ในสมการ (2-53) และค่าตัวเลขเพกเลต(Peclet number) เขียนในรูปสมการดังนี้

$$P_e = \frac{F_e}{D_e}, P_w = \frac{F_w}{D_w}, P_n = \frac{F_n}{D_n}, P_s = \frac{F_s}{D_s} \quad (2-63)$$

จากหลักการเดียวกันสามารถขยายไปสู่การดิครีโทซใน 3 มิติ เมื่อ T = Top , B = Bottom

ในทิศทางของแกน z

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_T \phi_T + a_B \phi_B + b \quad (2-64)$$

เมื่อ

$$a_E = D_e A(P_e) + [-F_e, 0] \quad (2-65a)$$

$$a_W = D_w A(P_w) + [F_w, 0] \quad (2-65b)$$

$$a_N = D_n A(P_n) + [-F_n, 0] \quad (2-65c)$$

$$a_S = D_s A(P_s) + [F_s, 0] \quad (2-65d)$$

$$a_T = D_t A(P_t) + [-F_t, 0] \quad (2-65e)$$

$$a_B = D_b A(P_b) + [F_b, 0] \quad (2-65 f)$$

$$a_p^0 = \frac{\rho_p^0 \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \quad (2-65g)$$

$$b = S_c \Delta x \Delta y \Delta z + a_p^0 \phi_p^0 \quad (2-65h)$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + a_T + a_B + a_p^0 - S_p \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2-65k)$$

และ

$$F_e = (\rho u)_e \Delta y \Delta z \quad , \quad D_e = \frac{\Gamma_e \Delta y \Delta z}{(\delta x)_e} \quad (2-66a)$$

$$F_w = (\rho u)_w \Delta y \Delta z \quad , \quad D_w = \frac{\Gamma_w \Delta y \Delta z}{(\delta x)_w} \quad (2-66b)$$

$$F_n = (\rho v)_n \Delta z \Delta x \quad , \quad D_n = \frac{\Gamma_n \Delta z \Delta x}{(\delta y)_n} \quad (2-66c)$$

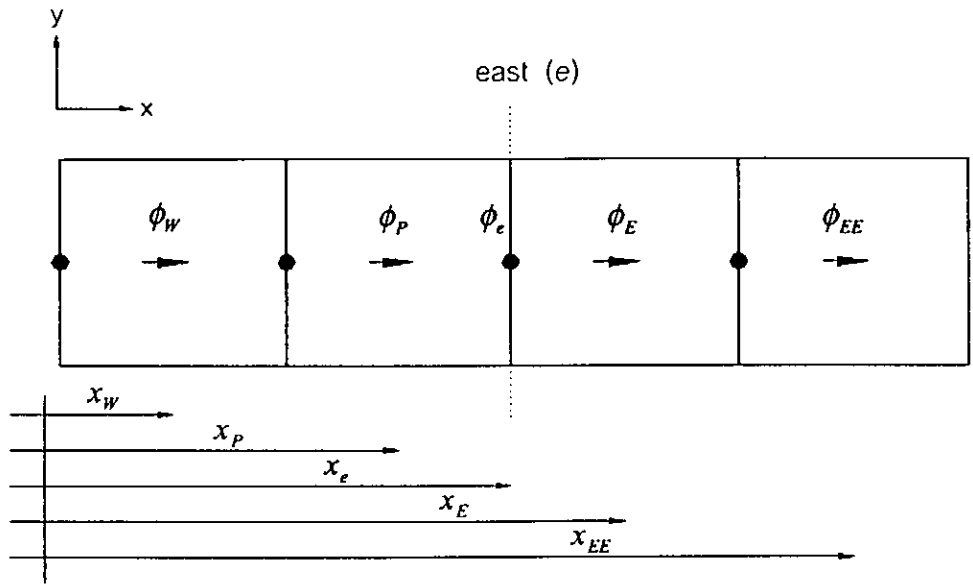
$$F_s = (\rho v)_s \Delta z \Delta x \quad , \quad D_s = \frac{\Gamma_s \Delta z \Delta x}{(\delta y)_s} \quad (2-66d)$$

$$F_t = (\rho w)_t \Delta x \Delta y \quad , \quad D_t = \frac{\Gamma_t \Delta x \Delta y}{(\delta z)_t} \quad (2-66e)$$

$$F_b = (\rho w)_b \Delta x \Delta y \quad , \quad D_b = \frac{\Gamma_b \Delta x \Delta y}{(\delta z)_b} \quad (2-66 f)$$

2.2.2.3 แบบแผนการคำนวณสำหรับระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง

แบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical scheme) ใช้สำหรับการคำนวณค่า  $\phi$  บนผิวปริมาตรควบคุม เพื่อความสะดวกได้จัดการแบ่งผลคูณของค่า Convective ( $\phi$ ) และค่า Transport velocity ( $u_i$ ) ตัวอย่าง เช่น ฟลักซ์ที่ผ่านผิว east ของ  $\phi_p$  ดังแสดงในภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 ฟลักซ์การพาและฟลักซ์การแพร่บนผิวของปริมาตรควบคุม

กำหนดเป็น

$$[\phi u_i] \approx [\phi]_{conv} [u_i]_{tran} \quad \text{นั่นคือ} \quad [\phi u]^{east} \approx [\phi]_{conv}^{east} [u]_{tran}^{east} \tag{2-67}$$

เมื่อตัวยก east อ้างถึงค่าที่ผิว east สำหรับค่า  $\phi_e$  ขึ้นอยู่กับแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลขที่เลือกใช้ซึ่งมีหลายวิธีในที่นี้ได้แสดงรายละเอียดของแบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลาง (Central Differencing Scheme ;CDS) แบบแผนวิธีอัปวินด์ (Upwind Differencing Scheme ;UDS) และแบบแผนวิธีควิก (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics ;QUICK)

1. แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลาง

แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลาง คือ ประมาณค่าเชิงเส้นของค่า  $\phi$  โดยการหาค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่ผิวของปริมาตรควบคุม เช่นที่ผิว east

$$[\phi]_{conv}^{east} \approx \phi_e \equiv \lambda_{e,p} \phi_E + (1 - \lambda_{e,p}) \phi_P \tag{2-68}$$

เมื่อ  $\lambda_{e,p}$  คือ Interpolation factor  $\left[ \lambda_{e,p} = \frac{x_e - x_p}{x_E - x_p} \right]$  แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลางมีค่าอันดับความถูกต้อง (Truncation error) เป็นอันดับสอง  $\left[ T.E. = \frac{(x_e - x_p)(x_E - x_e)}{2} \left( \frac{\partial^2 \phi_p}{\partial x^2} \right) \right]$  แต่แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลางจะมีความเสถียรเมื่อค่าตัวเลขเพกเลต ( $Pe$ ) น้อยกว่าสอง  $[Pe = F/D < 2]$

## 2. แบบแผนวิธีอัปวินด์

แบบแผนวิธีนี้ประมาณค่าของ  $\phi$  โดยค่าที่ต้นกระแสน (Upstream) หรือท้ายกระแสน (Downstream) บนผิวปริมาตรควบคุมโดยขึ้นอยู่กับทิศทางการไหล วิธีคล้ายกับวิธีผลต่างแบบไปข้างหน้า (Forward difference) หรือวิธีผลต่างแบบย้อนหลัง (Backward difference) โดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series) ขยายค่าระหว่าง  $\phi_e$  และ  $\phi_E$  และ  $\phi_e$  และ  $\phi_p$  ได้สมการดังนี้

$$\phi_e = \phi_p + \underbrace{(x_e - x_p) \left( \frac{\partial \phi_p}{\partial x} \right)}_{T.E.} + h.o.t. \quad (2-69)$$

และ

$$\phi_e = \phi_E + \underbrace{(x_E - x_e) \left( \frac{\partial \phi_E}{\partial x} \right)}_{T.E.} + h.o.t. \quad (2-70)$$

การประมาณค่า  $\phi_e$  กำหนดเป็น

$$[\phi]_{conv}^{east} = \phi_e = \begin{cases} \phi_E & \text{if } [u]_{Iran}^{east} > 0 \\ \phi_p & \text{if } [u]_{Iran}^{east} < 0 \end{cases} \quad (2-71)$$

ซึ่งแบบแผนวิธีอัปวินด์ปกติมีค่าอันดับความถูกต้องเป็นอันดับหนึ่ง แต่สามารถขยายเทอม  $h.o.t.$  ซึ่งคือ higher order truncation เพื่อพัฒนาให้สมการมีความถูกต้องเพิ่มขึ้นได้

## 3. แบบแผนวิธีควิก

แบบแผนวิธีควิกเป็นแบบแผนวิธีที่ใช้โนด 3 ตำแหน่งในการประมาณค่าของแต่ละผิวเซล (ใช้ 2 โหนดที่ ต้นกระแสนและ 1 โหนดที่ท้ายกระแสน) โดยทั่วไปสามารถเขียนความสัมพันธ์ของสมการสำหรับผิว east ได้ดังนี้

$$[\phi]_{conv}^{east} = \phi_e = \begin{cases} q_1 \phi_E - q_2 \phi_W + (1 - q_1 + q_2) \phi_P & \text{if } [u]_{tran}^{east} > 0 \\ q_3 \phi_P - q_4 \phi_{EE} + (1 - q_3 + q_4) \phi_E & \text{if } [u]_{tran}^{east} < 0 \end{cases} \quad (2-72)$$

เมื่อค่าสัมประสิทธิ์  $q_i$  กำหนดเป็น

$$q_1 = \frac{(2 - \lambda_{e,W}) \lambda_{e,P}^2}{1 + \lambda_{e,P}^2 - \lambda_{e,W}} \quad (2-73a)$$

$$q_2 = \frac{(1 - \lambda_{e,P})(1 - \lambda_{e,W})^2}{1 + \lambda_{e,P}^2 - \lambda_{e,W}} \quad (2-73b)$$

$$q_3 = \frac{(1 + \lambda_{e,W})(1 - \lambda_{e,P})^2}{1 + \lambda_{e,E}^2 - \lambda_{e,P}} \quad (2-73c)$$

$$q_4 = \frac{\lambda_{e,P} \lambda_{e,E}^2}{1 + \lambda_{e,E}^2 - \lambda_{e,P}} \quad (2-73d)$$

ค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้สามารถใช้ได้ทั้งกริดสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ (Uniform and non-uniform grid) ในกรณีพิจารณากริดสม่ำเสมอ โดยใช้หลักการของอนุกรมเทย์เลอร์ ขยายค่า  $\phi_e$  ซึ่งกำหนดได้เป็นดังนี้ เมื่อ  $[u]_{tran}^{east} > 0$

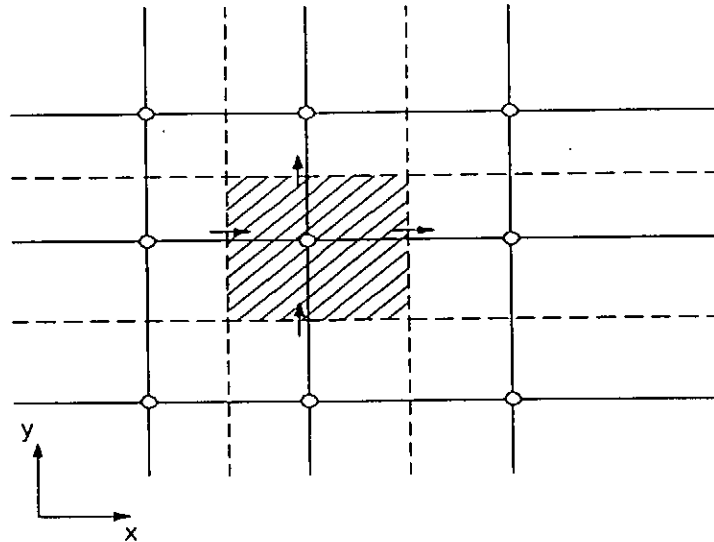
$$\phi_e = \frac{\phi_e + \phi_E}{2} - \frac{1}{8}(\phi_E - 2\phi_P + \phi_W) - \underbrace{\frac{3(\Delta x)^3}{48} \left( \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \right)_P}_{T.E.} + h.o.t \quad (2-74)$$

ซึ่งมีความสอดคล้องกับสมการ (2-72) เมื่อ  $q_1 = 3/8$  และ  $q_2 = -1/8$  แบบแผนวิธีคิวิกมีค่าอันดับความถูกต้องเป็นอันดับสาม

#### 2.2.2.4 การแก้ปัญหาสนามการไหล

การดิสครีไทซ์สมการโดยการกำหนดให้เก็บค่าตัวแปรทุกตัวไว้ที่โหนดปกตินั้น อาจทำให้เกิดการไม่ควบคู่ (Decouple) ของความเร็วและความดันหรือที่เรียกว่า Checkerboard problem<sup>(9)</sup> การแก้ปัญหานี้ทำได้โดยการเก็บค่าสเกลาร์ เช่น ความดัน อุณหภูมิ เป็นตัน ไว้ที่โหนดปกติและคำนวณความเร็วที่ผิวของปริมาตรควบคุม ดังแสดงในภาพประกอบ 4 ซึ่งเป็นลักษณะการจัดวางตัว

แปรรูป Staggered grid ใน 2 มิติ โดยทำการคำนวณค่าความเร็ว ( $u, v$ ) ที่ผิวของปริมาตรควบคุม และคำนวณตัวแปรอื่นๆ บนโหนดปกติ



ภาพประกอบ 4 การจัดวางตัวแปรแบบ Staggered grid  $\rightarrow = u$ ,  $\uparrow = v$ ,  $\circ =$  ตัวแปรอื่นๆ

ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ของโมเมนตัม และสมการเชิงอนุพันธ์ของความต่อเนื่องนั้นต้องมีผลเฉลยที่สอดคล้องกัน ทำให้ในระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข ได้พัฒนากระบวนการคำนวณเพื่อให้สมการทั้งสองมีผลเฉลยที่สอดคล้องกัน กระบวนการคำนวณที่นิยมใช้กัน ได้แก่ วิธีซิมเปิล (SIMPLE), วิธีซิมเปิลอา (SIMPLER), วิธีซิมเปิลซี (SIMPLEC) และวิธีโพโซ (PISO) ในที่นี้ได้แสดงรายละเอียดเฉพาะกระบวนการหาคำตอบของวิธีซิมเปิล (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation; SIMPLE) ซึ่งพัฒนาโดย Patankar, Suhas V.<sup>(9)</sup> สำหรับกระบวนการหาคำตอบของวิธีอื่นๆ สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก Patankar, Suhas V.<sup>(9)</sup> และ Versteeg, H. K.; & Malalasekera, W.<sup>(10)</sup>

วิธีซิมเปิลเริ่มจากการสมมติค่าความดันและความเร็ว แล้วคำนวณหาค่าความเร็ว จากค่าความเร็วและความดันที่สมมติ เพื่อนำค่าความเร็วที่คำนวณได้ไปหาค่าความดันอีกครั้ง โดยใช้วิธีค่าความดันแก้ไข (Pressure-correction method) เพื่อช่วยคำนวณความดันให้ถูกต้องซึ่งค่าความดันแก้ไข (Pressure-correction) ที่ได้นี้ ถูกนำกลับไปหาค่าความเร็ว และทำซ้ำตามขั้นตอนดังกล่าวจนกระทั่งผลเฉลยเข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง ซึ่งทำให้ค่าความเร็วและค่าความดันมีความสัมพันธ์ไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมและการอนุรักษ์มวล

#### 1. กระบวนการหาคำตอบของวิธีซิมเปิล

จากสมการเชิงอนุพันธ์ของโมเมนตัมทำการดิสครีไทซ์ ได้สมการเป็น

$$\text{ในแกน } x \quad a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b + (p_P - p_E) A_e \quad (2-75)$$

$$\text{ในแกน } y \quad a_n v_n = \sum a_{nb} v_{nb} + b + (p_P - p_N) A_n \quad (2-76)$$

$$\text{ในแกน } z \quad a_i w_i = \sum a_{nb} w_{nb} + b + (p_P - p_T) A_i \quad (2-77)$$

กำหนดให้ค่า

$$p = p^* + p' \quad (2-78)$$

$$u = u^* + u' \quad (2-79)$$

$$v = v^* + v' \quad (2-80)$$

$$w = w^* + w' \quad (2-81)$$

เมื่อ

$p, u, v, w$  คือ ความดันและความเร็วที่ถูกต้อง

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

$$p^*$$

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

โดยที่ค่าความเร็ว  $u^*, v^*, w^*$  สามารถคำนวณได้จากสมการโมเมนต์ที่มีลักษณะเช่นเดียวกับสมการ (2-75) ถึง (2-77) ซึ่งได้สมการดิครีทส์สำหรับความเร็วเป็น

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b + (p_P^* - p_E^*) A_e \quad (2-82)$$

$$a_n v_n^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + b + (p_P^* - p_N^*) A_n \quad (2-83)$$

$$a_i w_i^* = \sum a_{nb} w_{nb}^* + b + (p_P^* - p_T^*) A_i \quad (2-84)$$

นำสมการ (2-78) ถึง (2-81) แทนในสมการ (2-75) ถึง (2-77) แล้วลบออกจากสมการ (2-82) ถึง (2-84) ตามลำดับได้สมการใหม่เป็น

$$a_e u_e' = \sum a_{nb} u_{nb}' + (p_P' - p_E') A_e \quad (2-85)$$

$$a_n v_n' = \sum a_{nb} v_{nb}' + (p_P' - p_N') A_n \quad (2-86)$$

$$a_i w'_i = \sum a_{nb} w'_{nb} + (p'_P - p'_T) A_n \quad (2-87)$$

ในกระบวนการหาคำตอบของวิธีซิมเปิลได้ละทิ้งพจน์  $\sum a_{nb} u'_{nb}$ ,  $\sum a_{nb} v'_{nb}$ ,  $\sum a_{nb} w'_{nb}$  ในสมการ (2-83) ถึง (2-85) ซึ่งได้สมการค่าแก้ไขความเร็วดังนี้<sup>(9)</sup>

$$a_e u'_e = (p'_P - p'_E) A_e \quad (2-88)$$

หรือ

$$u'_e = d_e (p'_P - p'_E) \quad \text{เมื่อ} \quad d_e = \frac{A_e}{a_e} \quad (2-89)$$

สมการ (2-89) เรียกว่าสมการค่าแก้ไขความเร็ว ดังนั้นค่า  $u'_e$  จึงมีความสัมพันธ์เป็น

$$u_e = u_e^* + d_e (p'_P - p'_E) \quad (2-90)$$

และพิจารณาในลักษณะเดียวกันได้สมการเป็น

$$v_n = v_n^* + d_n (p'_P - p'_N) \quad (2-91)$$

$$w_i = w_i^* + d_i (p'_P - p'_T) \quad (2-92)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{(\rho_P - \rho_P^0) \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + [(\rho u)_e - (\rho u)_w] \Delta y \Delta z + [(\rho v)_n - (\rho v)_s] \Delta z \Delta x \\ + [(\rho w)_i - (\rho w)_b] \Delta x \Delta y = 0 \end{aligned} \quad (2-93)$$

แทนค่าความเร็วจากสมการ (2-90) ถึง (2-92) ได้สมการดิครีไทซ์สำหรับค่า  $p'$  ดังนี้

$$a_P p'_P = a_E p'_E + a_W p'_W + a_N p'_N + a_S p'_S + a_T p'_T + a_B p'_B + b \quad (2-94)$$

เมื่อ

$$a_E = \rho_e d_e \Delta y \Delta z \quad (2-95a)$$

$$a_W = \rho_w d_w \Delta y \Delta z \quad (2-95b)$$

$$a_N = \rho_n d_n \Delta z \Delta x \quad (2-95c)$$

$$a_S = \rho_s d_s \Delta z \Delta x \quad (2-95d)$$

$$a_T = \rho_t d_t \Delta x \Delta y \quad (2-95e)$$

$$a_B = \rho_b d_b \Delta x \Delta y \quad (2-95 f)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_T + a_B \quad (2-95g)$$

$$b = \frac{(\rho_P^0 - \rho_P) \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + [(\rho u^*)_w - (\rho u^*)_e] \Delta y \Delta z + [(\rho v^*)_s - (\rho v^*)_n] \Delta z \Delta x + [(\rho w^*)_b - (\rho w^*)_t] \Delta x \Delta y = 0 \quad (2-95h)$$

ดังนั้นขั้นตอนของกระบวนการซิมเปิลสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สมมติค่าของ  $u^*, v^*, w^*, \phi^*, p^*$
2. คำนวณค่า  $u^*, v^*, w^*$  จากสมการ (2-82) ถึง (2-84)
3. นำค่า  $u^*, v^*, w^*$  ที่คำนวณได้มาแทนค่าในสมการ (2-94)
4. คำนวณหาค่า  $p'$  จากสมการ (2-94) จากนั้นนำมาแทนค่าในสมการ (2-78) จากนั้นจึงนำค่า  $p$  ที่ได้มากำหนดให้เป็นค่า  $p^*$  ค่าใหม่
5. คำนวณค่า  $u, v, w$  จากสมการ (2-90) ถึง (2-92) โดยใช้ค่า  $p'$  จากขั้นตอนที่ 4 จากนั้นจึงกำหนดให้ค่า  $u, v, w$  ที่ได้เป็น  $u^*, v^*, w^*$  ค่าใหม่
6. นำค่า  $u, v, w$  ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 5 มาหาค่าตัวแปร  $\phi$  เช่น ค่าอุณหภูมิ เป็นต้น จากนั้นจึงกำหนดค่า  $\phi$  ที่ได้เป็นค่า  $\phi^*$  ค่าใหม่
7. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 ถึง 6 จนกระทั่ง  $u^*, v^*, w^*, \phi^*, p^*$  มีค่าลู่เข้าสู่ค่าที่ถูกต้องโดยตรวจสอบจากการเข้าใกล้ศูนย์ของเทอม  $b$  ในสมการ (2-94) ซึ่งแสดงว่าค่า  $u^*, v^*, w^*, \phi^*, p^*$  ที่คำนวณได้มีค่าสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของความต่อเนื่อง

### 2.2.3 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนบนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้น<sup>(11)</sup> อัตราความร้อน ( $\dot{Q}$ ) เกิดขึ้นเนื่องจากการที่กระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ไหลผ่านตัวต้านทาน ( $R$ ) หรือภาระอื่น ๆ เป็นระยะเวลาหนึ่ง ( $\dot{Q} = \dot{W}_e = I^2 R$ ) ดังนั้นถ้าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต้องการกำลังไฟฟ้ามาก ทำให้ค่าฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) หรือปริมาณความร้อนต่อหน่วยพื้นที่มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ โดย

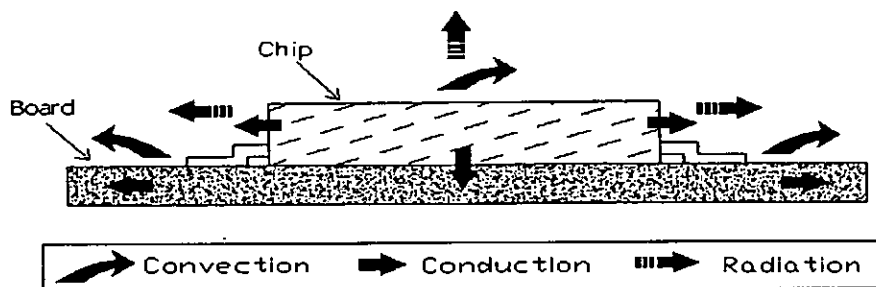
อุณหภูมิของอุปกรณ์หรือชิพมีความเสถียรเมื่อความร้อนที่ปลดปล่อยออกมา สมดุลกับความร้อนที่ถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อม

การถ่ายเทความร้อนจากชิพแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ดังภาพประกอบ 5 คือ การนำความร้อน การแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อน สำหรับการพาความร้อนได้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การพาความร้อนแบบอิสระ(Free convection)และการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) ในการวิเคราะห์ปัญหาการพาความร้อนว่าควรคำนวณแบบใดนั้นได้อาศัยค่าอัตราส่วนของตัวเลขกราชอฟต่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์กำลังสอง ( $Gr_B / Re_B^2$ ) โดยมีเงื่อนไขดังนี้<sup>(12)</sup>

$Gr_B / Re_B^2 \gg 1.0$  การไหลในกรณีการพาความร้อนแบบอิสระ

$Gr_B / Re_B^2 \ll 1.0$  การไหลในกรณีการพาความร้อนแบบบังคับ

$Gr_B / Re_B^2 \cong 1.0$  การไหลในกรณีการพาความร้อนแบบอิสระร่วมกับการพาความร้อนโดยบังคับ



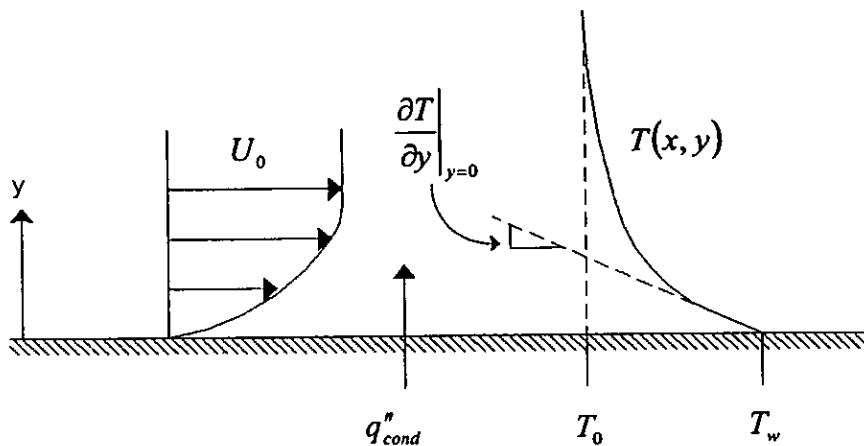
ภาพประกอบ 5 การถ่ายเทความร้อนของชิพบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

### 2.2.3.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน

การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนนั้น จำเป็นต้องพิจารณาถึงรายละเอียด ปฏิสัมพันธ์ของการไหลและการถ่ายเทความร้อน ในภาพประกอบ 6 แสดงภาพของแผ่นวัตถุร้อนที่กำลังเย็นตัวลงเมื่อมีกระแสลมไหลผ่าน ในภาพยังบ่งบอกถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเร็ว และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของกระแสการไหลในแนวตั้งฉากกับวัตถุ ซึ่งเห็นได้ว่ากระแสการไหลที่อยู่ใกล้กับผิววัตถุมีความเร็วต่ำกว่าชั้นที่อยู่ห่างออกไปจากผิว ทั้งนี้เนื่องจากผลกระทบของแรงที่เกิดจากความเสียดทาน และด้วยเหตุที่ของไหลในชั้นที่อยู่ติดกับผิวของวัตถุนั้นมีความเร็วเป็นศูนย์หรือมีการเคลื่อนที่น้อย ดังนั้นการถ่ายเทความร้อน ระหว่างผิววัตถุกับชั้นของไหลที่อยู่ติดกับผิว จึงเป็นลักษณะการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ แต่ค่าความลาดชันของอุณหภูมิ ( $\partial T / \partial y$ ) ที่ผิววัตถุก็ยังคงต้องหาจากอัตราการพาความร้อนที่ถ่ายเทจากผิวไปยังก้อนของไหลที่อยู่ห่างออกไป ทั้งนี้เพราะอัตราการนำความร้อนที่ถ่ายเทจากผิวของวัตถุไปยังชั้นของไหลที่อยู่ติดกับผิว ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราการพาความร้อนที่ถ่ายเทจากผิวไปยังก้อนของไหลหลัก นั่นคือ

$$\dot{q}_{conv} = \dot{q}_{cond} = -k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = h(T_w - T_0) \quad (2-96)$$

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของสมการ (2-96) ค่าความลาดชันของอุณหภูมิ ( $\partial T / \partial y$ ) ที่ผิวของวัตถุขึ้นอยู่กับสภาพของการไหล ของไหลที่มีความเร็วสูง มีค่าความลาดชันของอุณหภูมิที่ผิวสูงตามไปด้วย รวมทั้งค่าการนำความร้อนของของไหลก็มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนด้วยเช่นกัน



ภาพประกอบ 6 การเปลี่ยนแปลงความเร็วและอุณหภูมิของของไหลบนแผ่นวัตถุ

## 2.2.4 ค่าพารามิเตอร์ไร้มิติสำหรับการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อน

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ด้านพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อน มักมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก เช่น ขนาดรูปทรง ความเร็ว ความดันและอุณหภูมิ เป็นต้น ดังนั้นการวิเคราะห์มิติจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อจัดกลุ่มตัวแปรเหล่านี้ ให้เป็นกลุ่มพารามิเตอร์ไร้มิติ (Dimensionless parameter) และมีความเป็นสากลในการนำไปใช้งานตลอดจนสามารถเปรียบเทียบหาปริมาณที่สนใจได้โดยง่าย ซึ่งในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงกลุ่มพารามิเตอร์ไร้มิติเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ผลในงานวิจัยนี้

### 2.2.4.1 ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number; $Re_B$ )

ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ เป็นอัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อแรงหนืดเนื่องจากความหนืด โดยในงานวิจัยนี้กำหนดความยาวจำเพาะเป็นความสูงของชิพ

$$Re_B = \frac{U_0 B}{\nu} \quad (2-97)$$

#### 2.2.4.2 ค่าตัวเลขกราชอฟ (Grashof number; $Gr_B$ )

ค่าตัวเลขกราชอฟ เป็นพารามิเตอร์ไร้หน่วยที่แสดงถึงสถานะของการไหลในช่วงของการพาความร้อน โดยเป็นอัตราส่วนของแรงลอยตัวต่อแรงเนื่องจากความหนืด

$$Gr_B = \frac{g\beta B^3(T_w - T_0)}{\nu^2} \quad (2-98)$$

#### 2.2.4.3 ค่าตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt number; $Nu_B$ )

ค่าตัวเลขนัสเซลท์ เป็นอัตราส่วนของการพาความร้อนต่อการนำความร้อนในของไหล ค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉพาะที่ (Local Nusselt number;  $Nu_x$ ) และค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉลี่ย (Average Nusselt number;  $\overline{Nu}_B$ ) สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดความยาวจำเพาะเป็นความสูงของชิพ

$$Nu_x = \frac{h(x)B}{k} \quad (2-99)$$

$$\overline{Nu}_B = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dx \quad (2-100)$$

#### 2.2.4.4 ค่าตัวเลขพรันด์เทิล (Prandtl number; $Pr$ )

ค่าตัวเลขพรันด์เทิลเป็นอัตราส่วนของสภาพแพร่ทางโมเมนตัมต่อสภาพแพร่ทางความร้อน

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (2-101)$$

#### 2.2.4.5 ค่าสัมประสิทธิ์ความดัน (Pressure coefficient; $C_p$ )

ค่าสัมประสิทธิ์ความดัน เป็นค่าสัดส่วนของแรงจากความดันต่อแรงเฉื่อย

$$C_p = \frac{(p - p_0)}{1/2 \rho U_0^2} \quad (2-102)$$

## บทที่ 3

### การกำหนดปัญหาและการตรวจสอบผลการคำนวณ

ในบทนี้เป็นการกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้สำหรับทำการวิจัย และพร้อมทั้งทำการตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลการทดลองและผลงานวิจัยที่มีปัญหาใกล้เคียง ซึ่งได้แบ่งออกเป็น 5 หัวข้อ ดังนี้

- หัวข้อ 3.1 วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล
- หัวข้อ 3.2 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการวิจัย
- หัวข้อ 3.3 การคำนวณขนาดและจำนวนกริดที่มีผลต่อคำตอบ
- หัวข้อ 3.4 การตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับงานวิจัยที่ผ่านมา
- หัวข้อ 3.5 สรุปผลท้ายบท

#### 3.1 วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล

การคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อน ไม่ว่าจะเป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นเอง หรือโปรแกรมเชิงพาณิชย์โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่<sup>(10)</sup>

##### 3.1.1 ขั้นตอนการประมวลผล

ขั้นตอนการประมวลผล (Pre-processing) หมายถึงขั้นตอนเตรียมการโดยระบุรายละเอียดของการกำหนดปัญหาและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

##### 3.1.1.1 การกำหนดลักษณะของปัญหา

3.1.1.2 การกำหนดขนาด จำนวนและรูปแบบการจัดวางกริด (Grid) คือ การสร้างและการจัดวางกริดบนแบบจำลองการไหล (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 ขั้นตอนการประยุกต์วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข สำหรับการนำไปใช้แก้ปัญหา โดยการคำนวณในงานวิจัยนี้ทั้งหมดใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม โดย มีขั้นตอนดังนี้

3.1.2.1 ทำการดิสครีไทซ์สมการ โดยการประมาณเทอมต่างๆ คือ เทอมการพา (Convection term) เทอมการแพร่ (Diffusion term) และเทอมแหล่งกำเนิด (Source term) ด้วยแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical scheme) ที่เหมาะสมผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในรูปสมการพีชคณิต

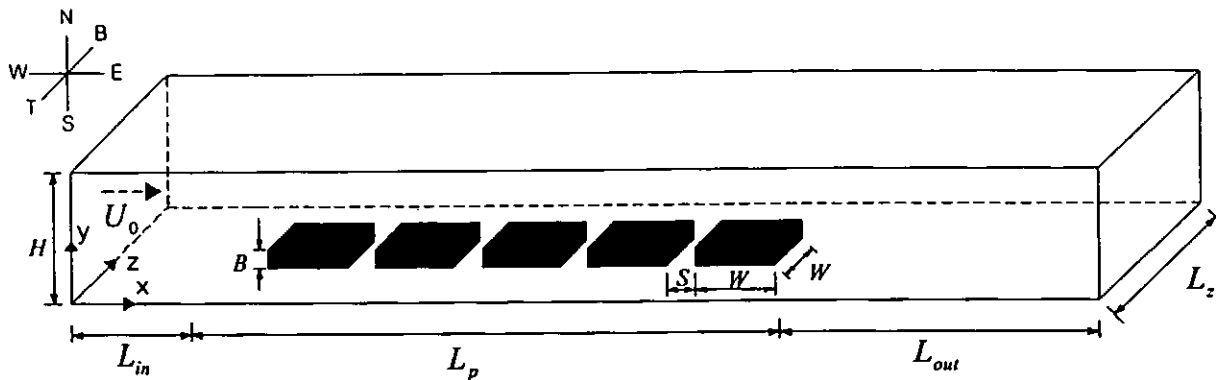
3.1.2.2 ทำการแก้สมการพีชคณิตที่ได้จากการดิสครีไทซ์ผลลัพธ์ที่ได้เรียกว่า ผลเฉลยโดยประมาณ

### 3.1.3 ขั้นตอนการแสดงผล

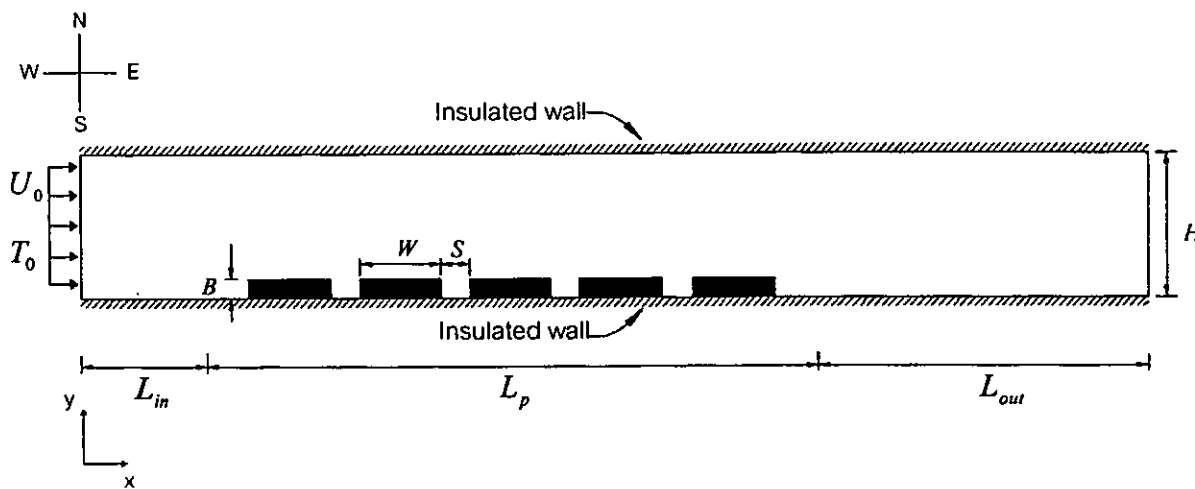
ขั้นตอนการแสดงผล (Post-processing) หมายถึง กระบวนการแสดงผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการประมวลผลโดยปกติประกอบด้วย ความเร็วย่อยในทิศทางแกนต่างๆ ความดัน และอุณหภูมิ ซึ่งอยู่ในรูปของตัวเลข เพื่อก่อให้เกิดความเข้าใจในพฤติกรรมการไหลและสภาวะการไหล จำเป็นต้องสร้างผลลัพธ์เหล่านี้ให้อยู่ในรูปของกราฟิก

## 3.2 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการวิจัย

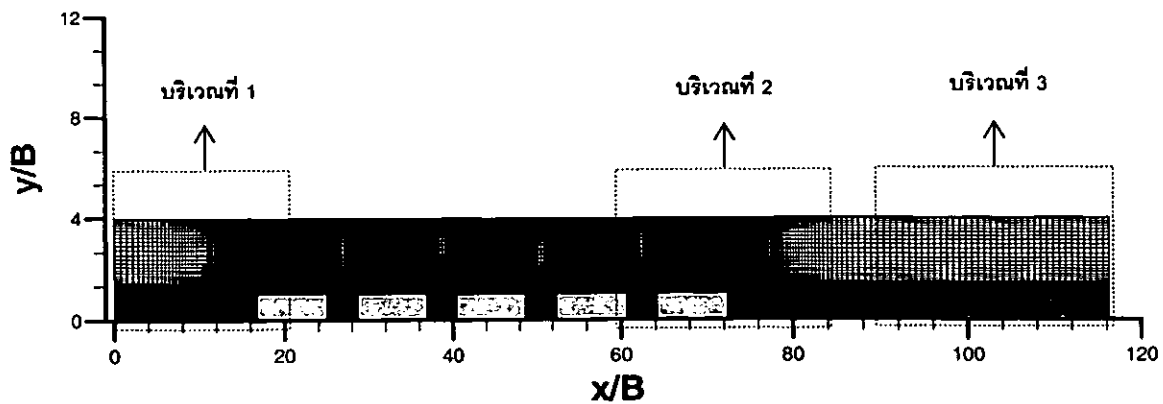
งานวิจัยนี้กำหนดให้ชิพจำนวน 5 ตัว ที่ใช้ในการศึกษา มีขนาดเช่นเดียวกับผลการทดลองที่ผ่านมา<sup>(1)</sup> โดยให้ขนาดของชิพทั้ง 5 ตัว มีขนาดคงที่ตลอดการศึกษาในกรณีต่างๆ สำหรับการจัดวางชิพถูกจัดวางแบบแถวเรียงตรงกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 7 ซึ่งเป็นภาพแบบจำลองการไหล (Computational domain) ในการคำนวณ 3 มิติ และภาพประกอบ 8 เป็นภาพแบบจำลองการไหลในการคำนวณ 2 มิติ จากผลการจำลองการไหลเบื้องต้นทำให้สามารถกำหนดขนาดของแบบจำลองการไหลได้ดังนี้ ระยะจากทางเข้าของแบบจำลองการไหลมีค่า  $L_{in} = 3B$  และสำหรับระยะที่ด้านทางออกของแบบจำลองการไหลมีค่า  $L_{out} = 30B$  ซึ่งระยะทางออกนี้มีขนาดเพียงพอที่ทำให้การไหลเกิดการพัฒนาย่างสมบูรณ์ด้านทางออก (Fully developed flow) เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบมายังชิพตัวที่ 5 ความยาวของแผงวงจรมีค่า  $L_p = 83.3B$  และสำหรับการคำนวณใน 3 มิติ ระยะในทิศทางแกน  $z$  มีค่าเป็น  $L_z = 25B$  โดยค่า  $L_p$  และ  $L_z$  เป็นขนาดที่ได้จากการทดลอง<sup>(1)</sup> ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ถูกกำหนดให้มีค่าคงที่และใช้เป็นค่าพื้นฐานที่ใช้ในการศึกษาในกรณีต่างๆ สำหรับงานวิจัยนี้



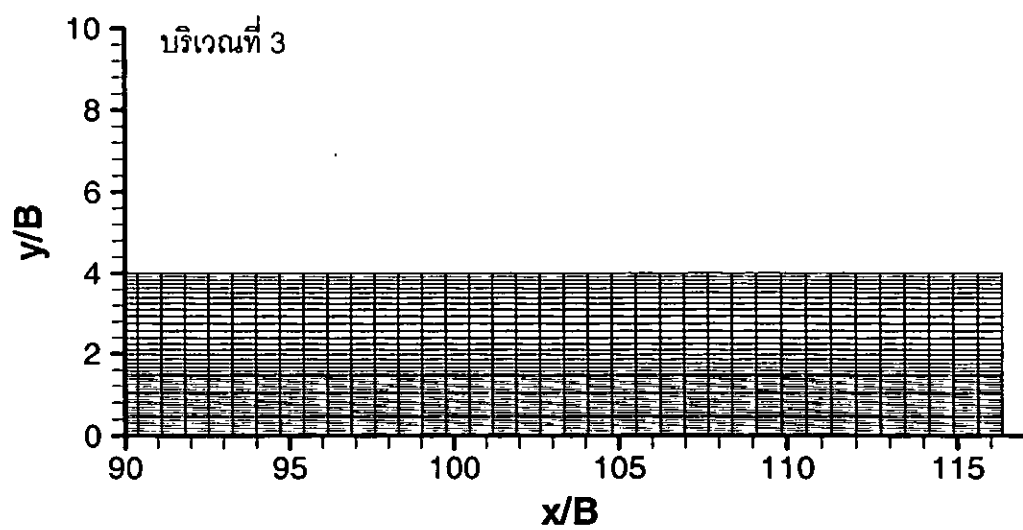
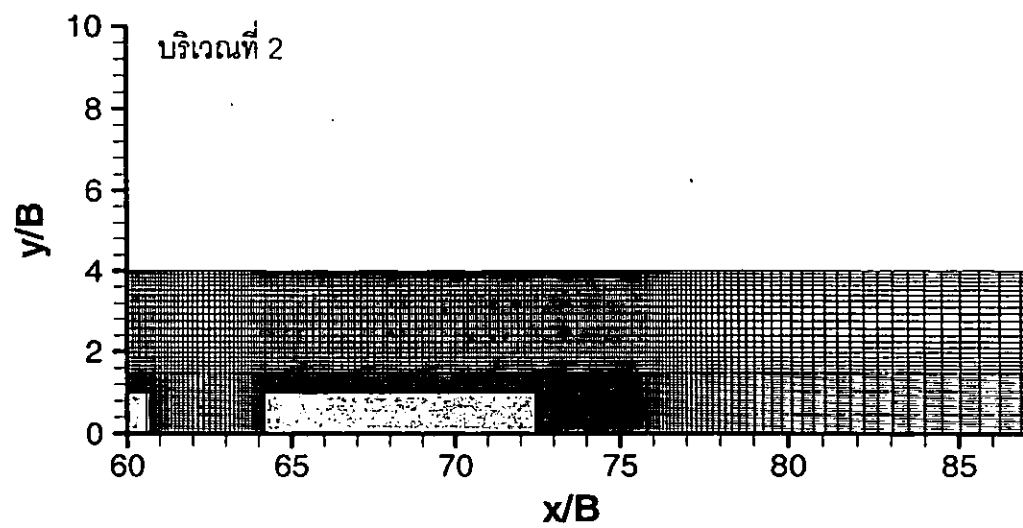
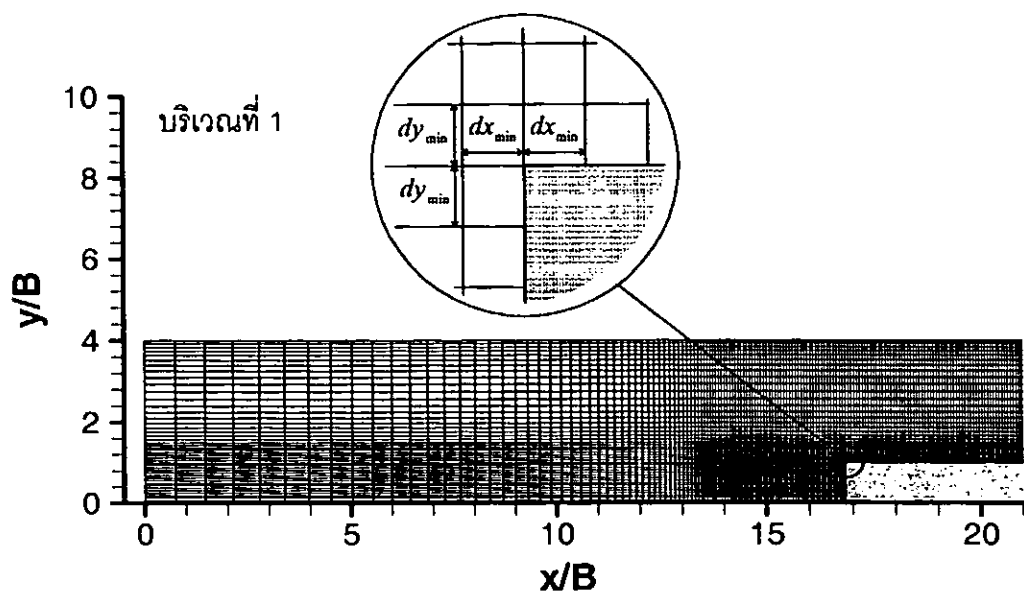
ภาพประกอบ 7 แบบจำลองการไหลสามมิติ



ภาพประกอบ 8 แบบจำลองการไหลสองมิติ



ภาพประกอบ 9 การจัดวางกริดบนแบบจำลองการไหล



ภาพประกอบ 10 ภาพขยายการจัดวางกริดบนแบบจำลองการไหล

### 3.2.1 การสร้างแบบจำลองการไหล

แบบจำลองการไหลในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยชิพจำนวน 5 ตัว ซึ่งถูกจัดวางแบบแถวเรียงตรงกันและอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางภายในแบบจำลองการไหล สำหรับประเด็นสำคัญอย่างหนึ่งในการสร้างแบบจำลองการไหล คือ การกำหนดขนาดของกริดและจำนวนของกริด เพื่อให้ผลการคำนวณที่ได้สามารถแสดงถึงพฤติกรรมของการไหลในบริเวณชั้นขีดผิว บริเวณการไหลแตกแยก บริเวณการเกิดการหมุนที่มีขนาดเล็กรอบวัตถุได้ชัดเจน โดยทั่วไปการสร้างกริดหรือการแบ่งกริดนั้น อาจแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ คือ การแบ่งกริดแบบสม่ำเสมอ(Uniform grid) และการแบ่งกริดแบบไม่สม่ำเสมอ (Non uniform grid) การแบ่งกริดแบบสม่ำเสมอ หมายถึง กริดในแบบจำลองการไหลถูกกำหนดให้มีขนาดเท่ากันทั้งหมด ซึ่งอาจแสดงพฤติกรรมของการไหลได้ชัดเจนและง่ายต่อการคำนวณ แต่การแบ่งกริดแบบสม่ำเสมอจำเป็นต้องใช้ทรัพยากรของคอมพิวเตอร์ในการคำนวณมากตามไปด้วย ส่วนการแบ่งกริดแบบไม่สม่ำเสมอ หมายถึง การจัดวางกริดให้มีขนาดเล็กในบริเวณที่คำตอบมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างง่าย และปรับขนาดกริดให้มีขนาดใหญ่ขึ้นในบริเวณที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของคำตอบน้อย ซึ่งกริดแบบนี้สามารถแสดงพฤติกรรมของการไหลเหมือนกับกริดแบบสม่ำเสมอ แต่สามารถลดการใช้ทรัพยากรของคอมพิวเตอร์ในการคำนวณลงได้ สำหรับรูปแบบการจัดวางกริดในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการจัดแบ่งกริดแบบไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในภาพประกอบ 9 เนื่องจากรูปทรงพื้นฐานของชิพจึงใช้กริดรูปสี่เหลี่ยมบริเวณผนังของชิพ ในการจัดวางกริดลงบนแบบจำลองการไหลได้ทำการกำหนดขนาดของ  $dx_{\min}$  และ  $dy_{\min}$  ซึ่งเป็นขนาดของกริดที่เล็กที่สุดให้มีค่าเท่ากันเฉพาะที่บริเวณมุมและบนผนังของชิพ ดังแสดงในภาพประกอบ 10 บริเวณที่ 1 เพื่อให้สามารถแสดงพฤติกรรมของการไหลและค่าเกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่ชั้นขีดผิวได้ดี โดยที่ค่า  $dx_{\min}$  และ  $dy_{\min}$  ได้มาจากการคำนวณในหัวข้อ 3.3 จากนั้นจะทำการทยอยเพิ่มขนาดของกริดในอัตราส่วนที่เหมาะสม ดังแสดงในภาพประกอบ 10 ในบริเวณที่ 1, 2 และ 3

## 3.3 การคำนวณขนาดและจำนวนกริดที่มีผลต่อคำตอบ

### 3.3.1 สมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับการคำนวณ

การกำหนดสมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อน ได้ตั้งสมมติฐานให้อากาศเป็นของไหลอัดตัวไม่ได้ คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศมีค่าคงที่ การไหลอยู่ในสภาวะไม่คงตัว(สำหรับปัญหาคงตัวได้ละทิ้งเทอมที่ขึ้นอยู่กับเวลา)ไม่พิจารณาฟังก์ชันการคายพลังงานเนื่องจากความหนืดพิจารณาการคำนวณโดยการพาความร้อนแบบบังคับ ( $Gr_b / Re_b^2 \leq 1.0$ ) ไม่พิจารณาผลกระทบของการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งได้สมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อนดังนี้

สมการเชิงอนุพันธ์ของความต่อเนื่อง 
$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3-1)$$

สมการเชิงอนุพันธ์ของโมเมนตัม 
$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3-2)$$

สมการเชิงอนุพันธ์ของพลังงาน 
$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial u_i T}{\partial x_i} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_i} \quad (3-3)$$

### 3.3.2 ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสองมิติ

1. สภาวะทางเข้า (Inlet boundary) อากาศไหลเข้าอย่างสม่ำเสมอ (Uniform flow) และมีค่าตัวเลขพรันด์เทิล (Prandtl number;  $Pr$ ) คงที่เท่ากับ 0.712

$$u = U_0, v = 0, T = T_0 \quad (3-4)$$

2. สภาวะทางออก (Outlet boundary)

$$p = 0, T = T_0 \quad (3-5)$$

3. กำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตที่ผนังให้ความเร็วมีค่าเท่ากับศูนย์ (No-slip condition)

$$u = v = 0 \quad (3-6)$$

4. กำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตด้านพลังงาน บนผนังแบบจำลองเป็นเงื่อนไขแบบแอดิเยกแบติก (Adiabatic boundary condition)

$$y = 0; \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0, \quad y = H; \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \quad (3-7)$$

5. กำหนดให้ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ผิวขามีค่าคงที่

$$\left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -\frac{\dot{q}}{k} \quad (3-8)$$

### 3.3.3 ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ

สำหรับการคำนวณใน 3 มิติ ได้ใช้ค่าเงื่อนไขขอบเขตเช่นเดียวกับการคำนวณการไหล 2 มิติ โดยค่าเงื่อนไขขอบเขตในทิศทางแกน  $z$  ให้ความเร็วมีค่าเท่ากับศูนย์ (No-slip condition) สำหรับการคำนวณด้านความเร็ว และค่าเงื่อนไขขอบเขตบนผนังแบบจำลองสำหรับการคำนวณด้านพลังงานเป็นค่าเงื่อนไขแบบแอดิเยกแบติก

ตาราง 2 ข้อมูลสำหรับการคำนวณหาผลกระทบบของกริด

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

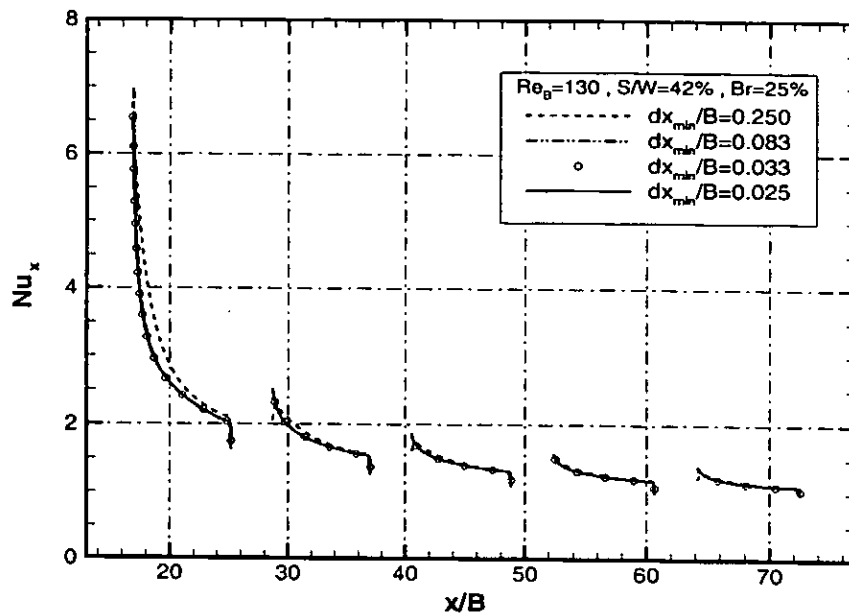
ตาราง 3 กรณีศึกษาผลกระทบบของกริด

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

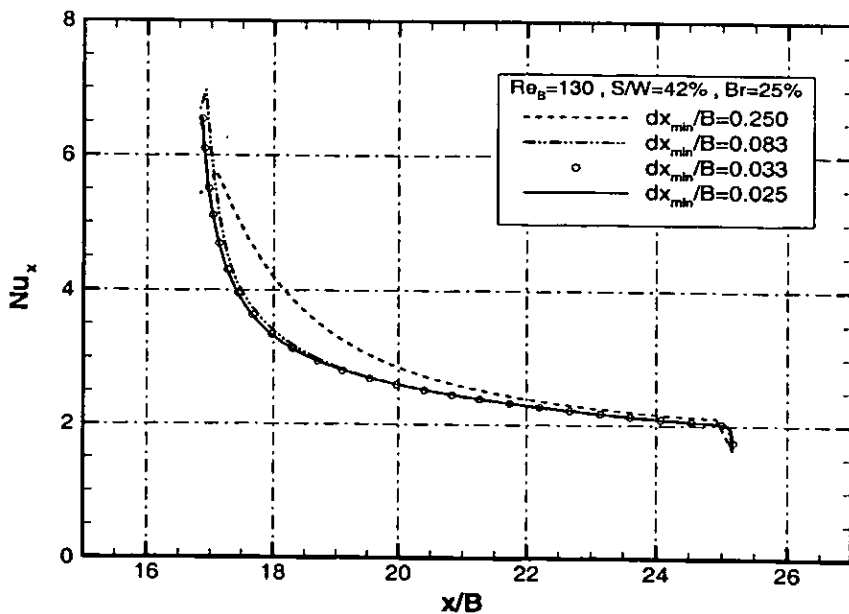
การคำนวณหาผลกระทบบของกริดที่มีผลต่อคำตอบ (Grid independent) ได้กำหนดข้อมูลและค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณ ดังแสดงในตาราง 2 สำหรับการกำหนดขนาดของค่า  $dx_{min}$  และ  $dy_{min}$  ถูกกำหนดให้มีขนาดเท่ากันเฉพาะที่บริเวณมุมและบนผนังโดยรอบของชิพ ดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.2.1 สำหรับในกรณีที่ 1 ได้กำหนดขนาดให้  $dx_{min}/B = 0.250$  กรณีที่ 2 กำหนดขนาดให้  $dx_{min}/B = 0.083$  กรณีที่ 3 กำหนดขนาดให้  $dx_{min}/B = 0.033$  และกรณีที่ 4 กำหนดขนาดให้  $dx_{min}/B = 0.025$  ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ถูกแสดงไว้ในตาราง 3 การคำนวณได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากกรณีต่างๆ ในรูปการกระจายตัวของค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉพาะที่ ( $Nu_x = h_x B/k$ ) และใช้เกณฑ์พิจารณาความเป็นอิสระของกริด จากค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นสูงสุด (Maximum relative error) จากค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์ของชิพแต่ละตัว ( $\overline{Nu}_B$ )

ผลจากการคำนวณพบว่ากรณีที่ 1 มีค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นสูงสุดของค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์ เมื่อเทียบกับกรณีที่ 2 อยู่ 8.76% และเมื่อนำผลการคำนวณของกรณีที่ 2 เทียบกับกรณีที่ 3 มีค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นสูงสุดของค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์อยู่ 1.76% และเมื่อนำผลการคำนวณของกรณีที่ 3 เทียบกับกรณีที่ 4 มีค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นสูงสุดของค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์อยู่ 0.52% ดังแสดงในตาราง 3 ซึ่งค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ที่ 0.52% นี้ อยู่ใน

วิจัยที่ยอมรับได้และเมื่อพิจารณาจากภาพประกอบ 11 และภาพประกอบ 12 พบว่าการลดขนาดของกริดจากกรณีที่ 3 เป็นกรณีที่ 4 มีการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉพาะที่ของชิพแต่ละตัวใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาดกริดที่  $dx_{min}/B = 0.033$  ซึ่งมีจำนวนกริดที่น้อยกว่ากรณีที่ 4 ทำให้สามารถประหยัดเวลาในการคำนวณลงได้มากกว่า ซึ่งขนาดของกริดนี้จะถูกนำไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อไป



ภาพประกอบ 11 ค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉพาะที่ ณ ตำแหน่งผนังด้านบนของชิพ



ภาพประกอบ 12 ภาพขยายค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉพาะที่ของชิพตัวที่หนึ่ง

### 3.4 การตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับงานวิจัยที่ผ่านมา

เนื่องจากผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขเป็นค่าที่ได้จากการประมาณ การคำนวณย่อมมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ ดังนั้นในการนำโปรแกรมมาใช้งาน ต้องมีการตรวจสอบโปรแกรมว่าให้ผลเฉลยถูกต้องหรือไม่ การตรวจสอบโปรแกรมในหัวข้อนี้ได้แบ่งออกเป็น หัวข้อ 3.4.1 การตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลการทดลองของ น้ามนต์ โชติวิศรุต.<sup>(1)</sup> ซึ่งทำการศึกษาพาความร้อนของชิพที่ทำมุม 45 องศาและทำมุม 90 องศากับทิศทางการไหล โดยการตรวจสอบโปรแกรมได้เลือกทำเฉพาะข้อมูลการคำนวณการถ่ายเทความร้อนของชิพที่ทำมุม 90 องศา ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ การศึกษาได้ทำทั้งการคำนวณในแบบจำลองการไหล 2 มิติ และ 3 มิติ หัวข้อ 3.4.2 ศึกษาผลกระทบของการเลือกแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical scheme) หัวข้อ 3.4.3 การตรวจสอบโปรแกรมกับผลงานวิจัยของ Wu, H.-W.; et al.<sup>(5)</sup>

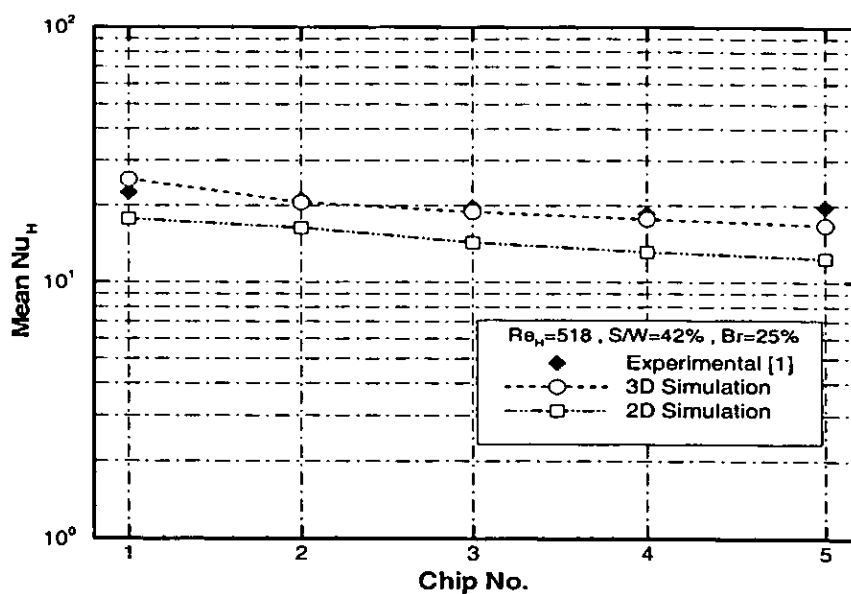
#### 3.4.1 การตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลการทดลอง

การตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับการทดลองนั้น ได้กระทำการคำนวณในสภาวะการไหลคงตัว สำหรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองได้ใช้ค่าข้อมูลเช่นเดียวกับการทดลองเป็นฐานในการพิจารณา ดังแสดงในตาราง 4

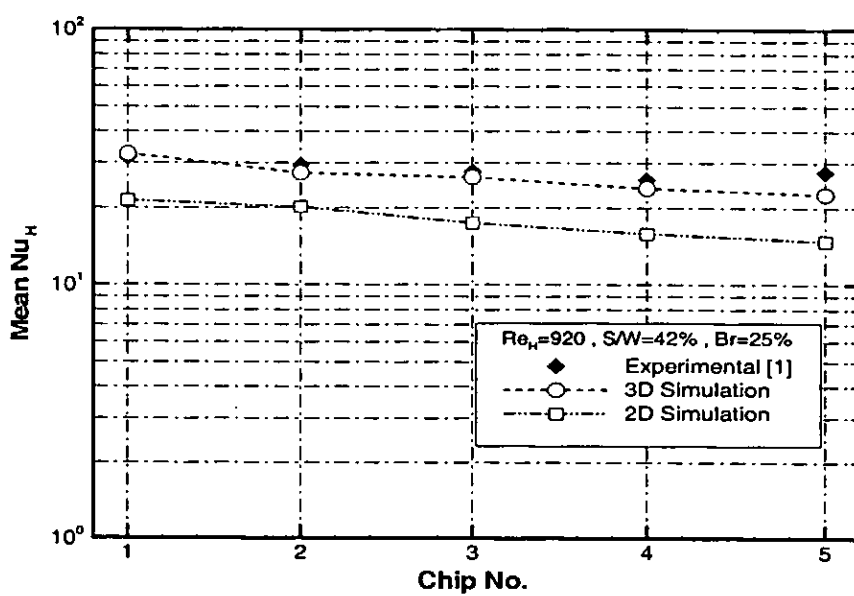
ตาราง 4 ข้อมูลของการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

$Re_H$	$Br(\%)$	$S/W(\%)$	$Pr$
518, 920	25	42	0.712

จากผลของการคำนวณเชิงตัวเลขในการไหล 3 มิติ ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 518 และ 920 ดังแสดงในภาพประกอบ 13 และภาพประกอบ 14 พบว่าค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์ของชิพแต่ละตัว ( $\overline{Nu}_H = \overline{h}H/k$ ) (ใช้ความยาวจำเพาะเป็นความสูงของแบบจำลองการไหล) มีค่าสูงสุดในชิพตัวที่ 1 และลดลงตามตำแหน่งของชิพโดยชิพตัวที่ 5 มีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์ต่ำที่สุด แต่ในผลการทดลอง<sup>(1)</sup> นั้นมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์ของชิพแต่ละตัวสูงสุดในชิพตัวที่ 1 และลดลงตามตำแหน่งของชิพจนถึงชิพตัวที่ 4 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์ต่ำที่สุดโดยที่ชิพตัวที่ 5 กลับมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์เพิ่มสูงขึ้นกว่าชิพตัวที่ 4 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผลการทดลองไม่พบการหมุนวนของกระแสการไหลท้ายของชิพ

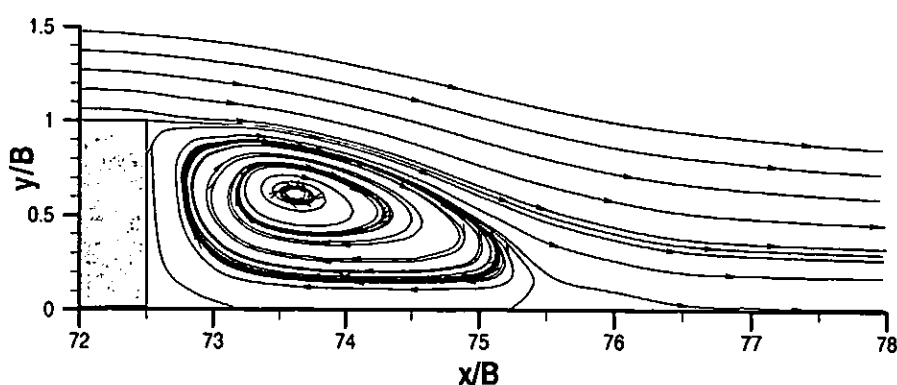


ภาพประกอบ 13 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองที่ค่า  $Re_H = 518$



ภาพประกอบ 14 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองที่ค่า  $Re_H = 920$

ตัวที่ 5 แต่ผลจากวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข พบว่าได้เกิดการหมุนวนของกระแสการไหลด้านท้ายของชิพตัวที่ 5 ดังแสดงในภาพประกอบ 15 และพบว่ากระแสหมุนวนนี้มีอิทธิพลน้อยต่อการลดอุณหภูมิของชิพตัวที่ 5 ทั้งนี้เนื่องจากชิพที่ใช้คำนวณมีความสูงน้อยทำให้ขนาดการหมุนวนมีขนาดเล็ก จึงไม่สามารถดึงความร้อนออกจากชิพตัวที่ 5 ซึ่งมีการสะสมอุณหภูมิมาจากชิพในตำแหน่งต้นทางของกระแสการไหลให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าชิพตัวที่ 4 ได้ สำหรับสาเหตุหนึ่งที่มีการทดลองไม่พบการหมุนวนของกระแสการไหลและการที่ชิพตัวที่ 5 มีอุณหภูมิต่ำกว่าชิพตัวที่ 4 อาจเกิดจากการใช้พัดลมดูดอากาศที่ติดตั้งอยู่ด้านท้ายของชิพตัวที่ 5 และอาจติดตั้งใกล้จึงส่งผลกระทบทำให้ชิพตัวที่ 5 มีอุณหภูมิต่ำกว่าชิพตัวที่ 4 ในส่วนของผลการคำนวณใน 3 มิติ ที่มีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์ของชิพตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 5 แตกต่างจากการทดลองประมาณ 12.5%, 2.1%, 3.7%, 4.5% และ 15.1% ตามลำดับที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 518 และที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 920 มีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์ของชิพตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 5 แตกต่างจากการทดลองประมาณ 3.4%, 6.8%, 5%, 7.6% และ 18% ตามลำดับนั้น อาจเกิดมาจากการทดลองวัดอุณหภูมิผนังของชิพเฉพาะที่ผนังด้านบน ซึ่งเป็นการวัดเพียงตำแหน่งเดียวแต่วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขสามารถคำนวณอุณหภูมิบนผนังชิพได้ทั่วทุกตำแหน่งทำให้เกิดความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์ขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลการเปรียบเทียบยังอยู่ในวิสัยที่ยอมรับได้ ส่วนผลการคำนวณใน 2 มิติ ซึ่งพบว่าชิพมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์น้อยกว่าการคำนวณใน 3 มิติ ซึ่งถ้าพิจารณาที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 518 มีความแตกต่างกันจากชิพตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 5 อยู่ที่ประมาณ 30%, 20% 24%, 25% และ 26% ตามลำดับนั้น เป็นเพราะธรรมชาติของปัญหาการไหล 2 มิติ ที่ขาดผลกระทบของการถ่ายเทความร้อนจากพื้นที่ด้านแกน  $z$  แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณใน 2 มิติ ยังมีแนวโน้มของค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์ที่สอดคล้องกับผลการคำนวณใน 3 มิติและผลการทดลอง<sup>(1)</sup>



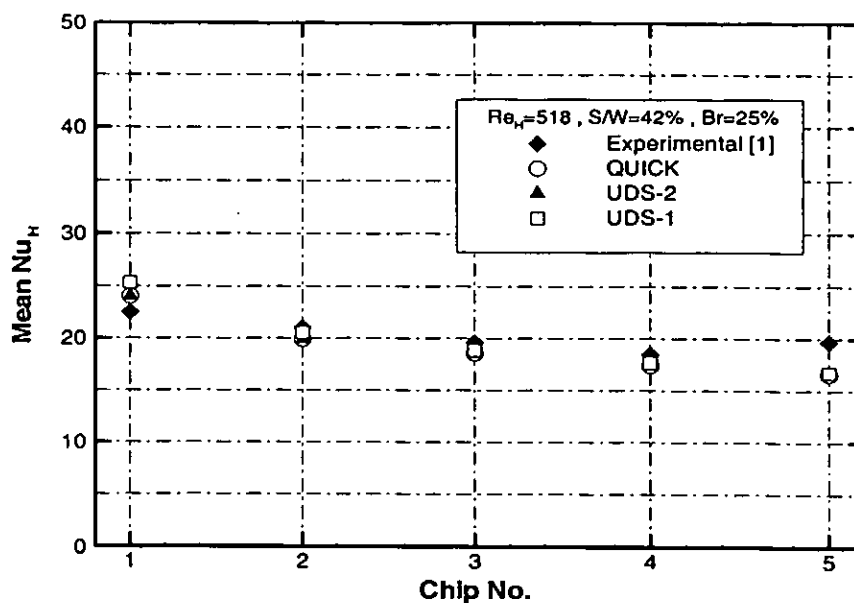
ภาพประกอบ 15 แสดงการหมุนวนของกระแสการไหลที่บริเวณด้านท้ายของชิพตัวที่ห้าในการไหลสามมิติ

### 3.4.2 การศึกษาผลกระทบของการเลือกแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข

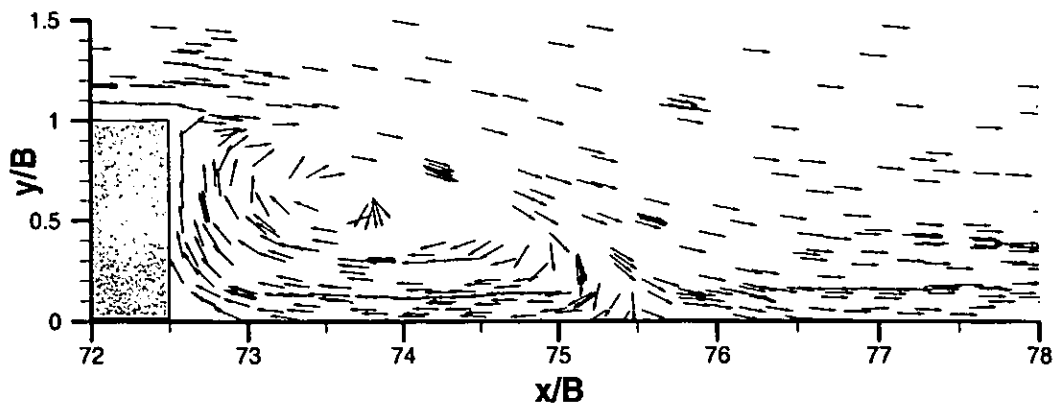
การคำนวณหาผลกระทบที่เกิดจากการเลือกแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical scheme) สำหรับการประมาณเทอมการพาและเทอมการแพร่ ได้ทำการคำนวณที่  $Re_H = 518$   $Br = 25\%$ ,  $S/W = 42\%$  ในแบบจำลองการไหล 3 มิติ โดยทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กรณี ดังแสดงในตาราง 5

ตาราง 5 กรณีศึกษาผลกระทบของการเลือกแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข

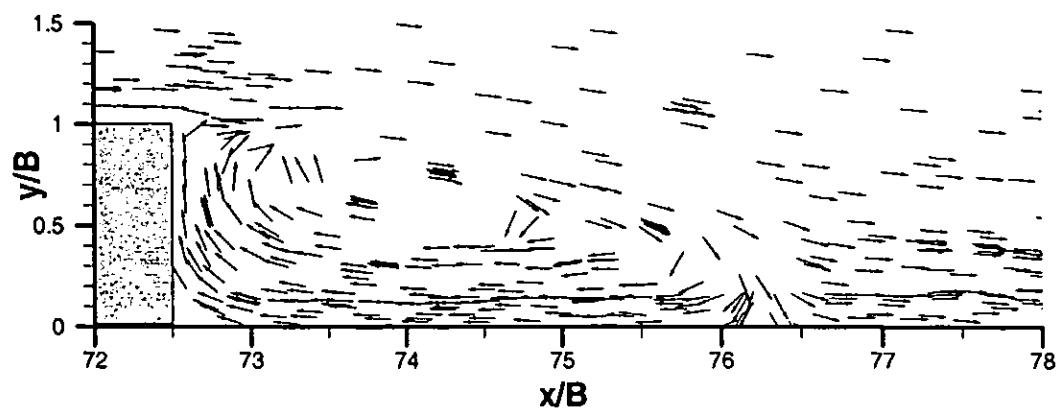
กรณี	การประมาณเทอมการพา	การประมาณเทอมการแพร่
1	First Upwind Differencing Scheme (UDS-1)	Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics (QUICK)
2	Second Upwind Differencing Scheme (UDS-2)	Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics (QUICK)
3	Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics (QUICK)	Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics (QUICK)



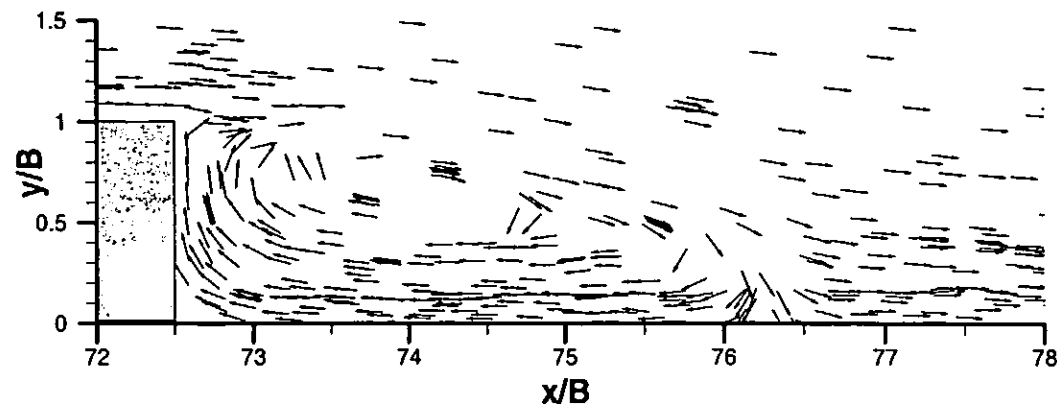
ภาพประกอบ 16 เปรียบเทียบแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข



(A) กรณีที่ 1 วิธี UDS-1



(B) กรณีที่ 2 วิธี UDS-2



(C) กรณีที่ 3 วิธี QUICK

ภาพประกอบ 17 เวกเตอร์ความเร็วบริเวณด้านท้ายของซีพตัวที่ห้าในการไหลสามมิติ

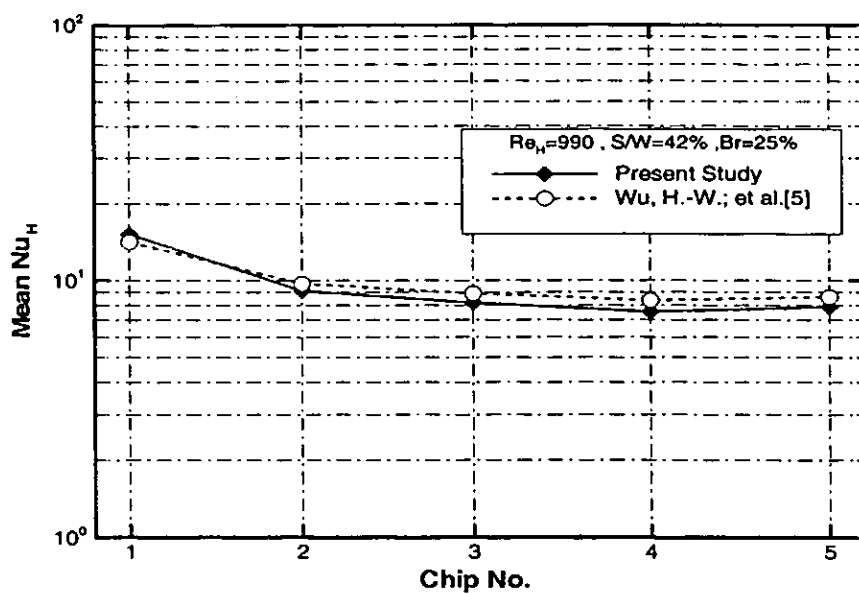
จากภาพประกอบ 16 พบว่าแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลขของทั้ง 3 กรณีมีแนวโน้มของค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์ของชิพแต่ละตัวเหมือนกัน นั่นคือ มีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์ของชิพตัวที่ 1 สูงสุดและลดลงไปตามตำแหน่งของชิพ โดยชิพตัวที่ 5 มีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์ต่ำที่สุด และทั้ง 3 กรณียังมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์ของชิพตัวที่ 2 ถึงตัวที่ 5 ค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่ในชิพตัวที่ 1 นั้น กรณีของ UDS-1 มีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์แตกต่างค่อนข้างมากจากกรณีของ UDS-2 และ QUICK ซึ่ง 2 กรณีหลังนี้มีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์ของชิพตัวที่ 1 เท่ากันและแตกต่างจากการทดลองประมาณ 6.7% ส่วนในกรณีของ UDS-1 มีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์ของชิพตัวที่ 1 แตกต่างจากการทดลองประมาณ 12.5% สำหรับในภาพประกอบ 17 ได้แสดงลักษณะการหมุนของกระแสการไหลที่ตำแหน่งด้านท้ายของชิพตัวที่ 5 ซึ่งผลการคำนวณได้พบว่ากรณีของ UDS-1 การหมุนวนด้านท้ายของชิพตัวที่ 5 มีขนาดเล็กกว่ากรณีของ UDS-2 และกรณีของ QUICK มีซึ่ง 2 กรณีหลังนี้มีขนาดการหมุนวนที่ใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามทั้ง 3 กรณียังคงมีคุณลักษณะการไหลที่เหมือนกัน กล่าวคือ มีการหมุนวนขนาดใหญ่หนึ่งจุดและหมุนวนไปในทิศทางเดียวกัน สำหรับสาเหตุหนึ่งที่กรณีของ UDS-1 มีขนาดการหมุนวนแตกต่างไปจากกรณีอื่นนั้นเกิดจากกรณีของ UDS-1 เป็นสมการความถูกต้องอันดับหนึ่ง (First order accuracy) ซึ่งมีแนวโน้มที่เกิดค่า Numerical diffusion error<sup>(10)</sup> การใช้วิธีที่มีค่าความถูกต้องอันดับสูง เช่น กรณีของ UDS-2 และกรณีของ QUICK สามารถลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้ได้

### 3.4.3 การตรวจสอบโปรแกรมกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

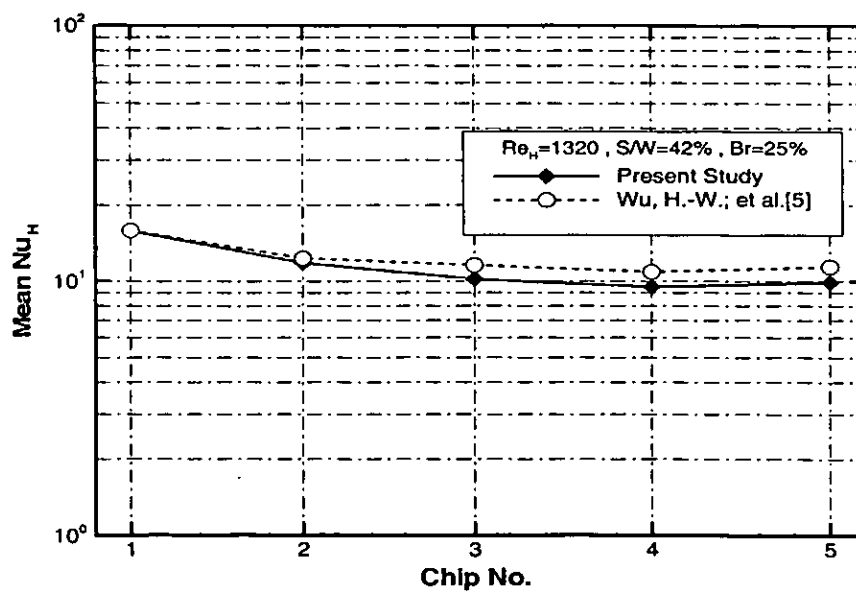
หัวข้อนี้เป็นการตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลงานวิจัยของ Wu, H.-W.; et al.<sup>(5)</sup> ซึ่งทำการศึกษาเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชิพในกรณีติดตั้งแผ่นบังค้ำทิศทางการไหลภายในแบบจำลองการไหล กับกรณีไม่ได้ติดตั้งแผ่นบังค้ำทิศทางการไหล สำหรับการเปรียบเทียบโปรแกรม ได้เลือกกรณีที่ไม่ติดตั้งแผ่นบังค้ำทิศทางการไหล โดยกำหนดข้อมูลและค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณดังแสดงในตาราง 6

ตาราง 6 ข้อมูลในการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Wu, H.-W.; et al.<sup>(5)</sup>

$Re_H$	$S/W(\%)$	$Br(\%)$	$Pr$
990 , 1320	50	20	0.70



ภาพประกอบ 18 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับงานวิจัยของ Wu, H.-W.; et al.<sup>(5)</sup> ที่  $Re_H = 990$



ภาพประกอบ 19 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับงานวิจัยของ Wu, H.-W.; et al.<sup>(5)</sup> ที่  $Re_H = 1320$

จากภาพประกอบ 18 และ 19 พบว่าผลการคำนวณที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 990 และ 1320 มีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Wu, H.-W.; et al.<sup>(5)</sup> นั่นคือ มีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์ของชิพแต่ละตัวสูงสุดในชิพตัวที่ 1 และลดลงตามตำแหน่งของชิพจนถึงชิพตัวที่ 4 ซึ่งเป็นชิพที่มีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์ต่ำที่สุด โดยชิพตัวที่ 5 กลับมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์เพิ่มสูงขึ้นกว่าชิพตัวที่ 4 ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของค่าอัตราส่วนความยาวของชิพต่อความสูงของชิพ ( $W/B$ ) ทำให้เกิดการหมุนวนของกระแสการไหลด้านท้ายของชิพตัวที่ 5 ที่มีขนาดใหญ่<sup>(5)</sup> (ความสูงชิพของ Wu, H.-W.; et al.<sup>(5)</sup> มีขนาดมากกว่าขนาดความสูงชิพของน้ำมันต์ โซติวีครูด.<sup>(1)</sup>) ทำให้การหมุนวนที่เกิดขึ้นสามารถช่วยพาความร้อนบนผนังของชิพตัวที่ 5 ออกไปได้ ทำให้อุณหภูมิของชิพตัวที่ 5 มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของชิพตัวที่ 4

### 3.5 สรุปผลท้ายบท

จากการศึกษาในหัวข้อต่างๆ ที่ผ่านมานั้นสามารถนำมาสรุปได้ดังนี้

1 ในการคำนวณหาผลกระทบของกริด ทำให้ทราบขนาดของกริดบนผนังของชิพที่เหมาะสมในการคำนวณ คือ  $dx_{\min} / B = 3.3\%$

2 การตรวจสอบโปรแกรมโดยเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่าการคำนวณมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์ของชิพตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 4 ใกล้เคียงกับผลการทดลอง แต่ที่ชิพตัวที่ 5 มีแนวโน้มที่แตกต่างกัน เมื่อทำการตรวจสอบโปรแกรมกับผลงานวิจัยอื่นๆ ที่มีลักษณะปัญหาใกล้เคียงเพิ่มเติม ซึ่งผลการคำนวณก็ให้ผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยนั้น ทำให้ยืนยันได้ว่าแบบจำลองการไหล 2 มิติและ 3 มิติ รวมทั้งโปรแกรมที่ใช้พื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม สามารถนำมาเป็นเครื่องมือในการคำนวณ เพื่อวิเคราะห์ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับงานวิจัยนี้ได้

3 การศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเลือกแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข พบว่าวิธี UDS-1 วิธี UDS-2 และวิธี QUICK มีแนวโน้มของค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์จากชิพตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 5 ไปในทิศทางเดียวกัน ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีของ QUICK ซึ่งเป็นวิธีที่มีอันดับความถูกต้องสูงเพื่อลดปัญหาที่อาจจะเกิดค่า Numerical diffusion error ในการคำนวณ

## บทที่ 4

### การศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ในสภาวะการไหลคงตัว

สำหรับในบทนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ( $Re_B$ ) ค่าอัตราส่วนความสูงของชิฟต่อความสูงของแบบจำลองการไหล ( $Br = B/H$ ) และค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิฟต่อความยาวของชิฟ ( $S/W$ ) ที่มีผลต่อพฤติกรรมกรการไหลและการถ่ายเทความร้อนของชิฟในสภาวะการไหลคงตัว โดยแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ ดังนี้

- หัวข้อ 4.1 คุณลักษณะการไหลในสภาวะการไหลคงตัวและไม่คงตัว
- หัวข้อ 4.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในการไหลสองมิติ
- หัวข้อ 4.3 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในการไหลสามมิติ
- หัวข้อ 4.4 สรุปผลท้ายบท

การศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้กระทำการคำนวณบนแบบจำลองการไหล 3 มิติ และแบบจำลองการ 2 มิติ ซึ่งขนาดของแบบจำลองการไหลได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 7 และ 8 ในบทที่ 3 ตามลำดับ สำหรับแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข ในการประมาณเทอมการพาและเทอมการแพร่ได้เลือกใช้วิธีคิวิก (QUICK) กระบวนการหาคำตอบใช้วิธีซิมเปิล (SIMPLE) พิจารณาการคำนวณเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ ( $Gr_B / Re_B^2 \leq 1.0$ )

#### 4.1 คุณลักษณะการไหลในสภาวะการไหลคงตัวและไม่คงตัว

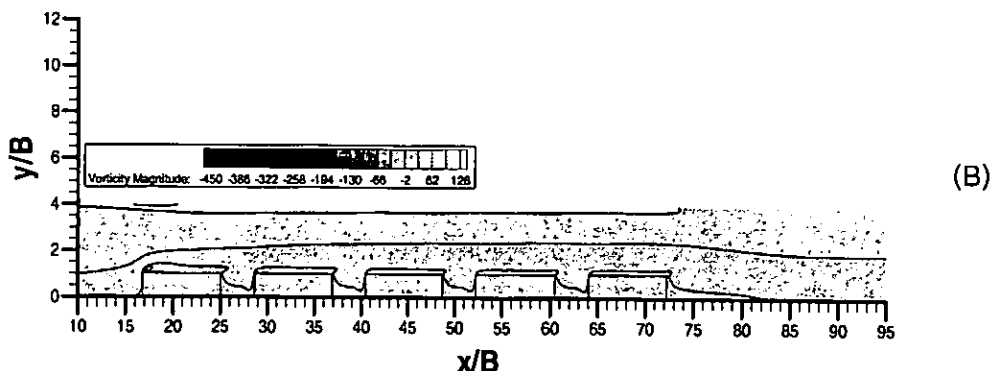
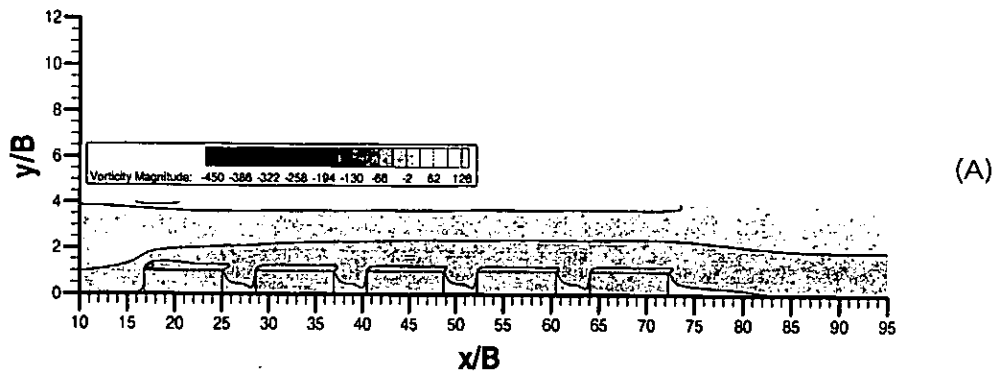
ในปัญหาการพาความร้อนโดยบังคับ คุณลักษณะการไหลทั่วไปมักเกิดทั้งการไหลแบบสภาวะคงตัว คือ พฤติกรรมกรการไหลไม่ขึ้นอยู่กับเวลา และการไหลแบบสภาวะไม่คงตัว คือ พฤติกรรมกรการไหลเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะการไหลนี้เกิดได้ค่อนข้างง่ายเมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีการเปลี่ยนแปลง<sup>(13,14)</sup> ซึ่งเริ่มต้นจากการไหลที่มีเสถียรภาพและพัฒนาไปสู่การไหลที่ไร้เสถียรภาพหรือการไหลในสภาวะไม่คงตัวเมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเพิ่มขึ้น การวิเคราะห์การไหลผ่านชิฟในแผนวงจรรอเล็กรอนิกส์จำเป็นต้องทราบกลไกการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นนี้ เพื่อให้การกำหนดสมการต่างๆ และเงื่อนไขการคำนวณมีความสอดคล้องกับปัญหาที่แท้จริง สำหรับการศึกษาในหัวข้อนี้ ได้ทำการคำนวณหาช่วงการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะการไหลตามการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ภายใต้ข้อมูลและเงื่อนไขต่างๆ ดังแสดงในตาราง 7

ตาราง 7 ข้อมูลการคำนวณสำหรับการศึกษาคูณลักษณะการไหล

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

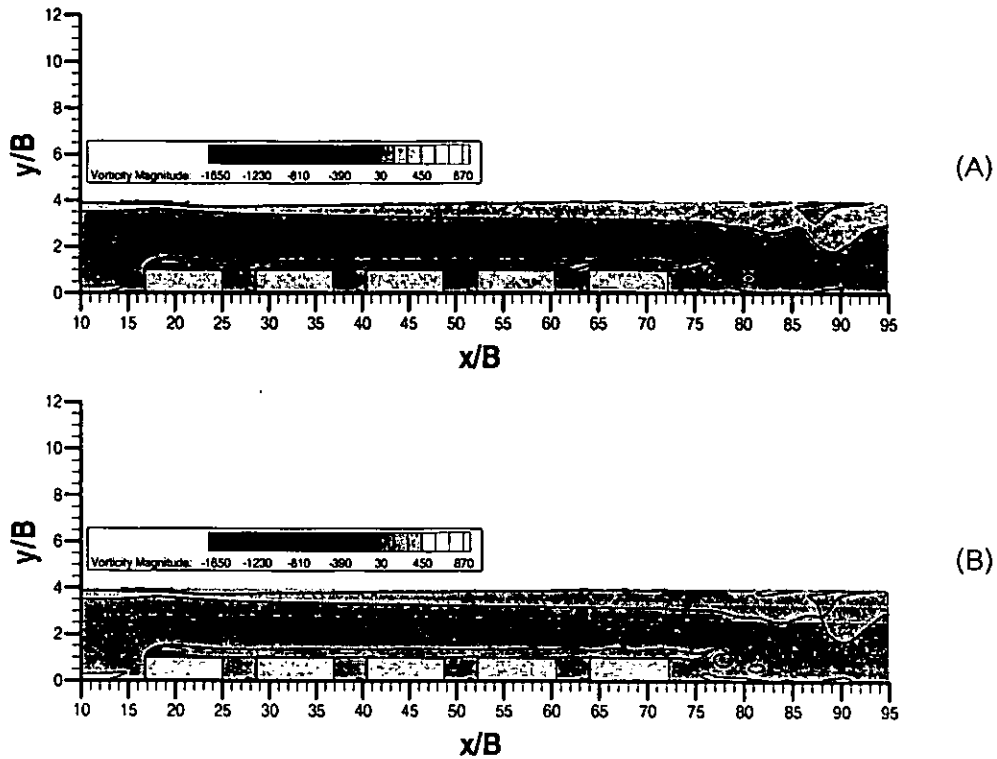
#### 4.1.1 คุณลักษณะการไหลในสภาวะคงตัว

พิจารณาในภาพประกอบ 20 ซึ่งเป็นภาพแสดงคุณลักษณะการไหลจากค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 130 พบว่าความหนืดที่ผนังของชิฟได้หน่วงให้ของไหลที่ติดกับผนังอยู่หนึ่งกับที่ทำให้ไม่เกิดการแยกหลุดจากผนังหรือไม่เกิดการไหลวน (Vorticity) ขึ้น การไหลที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะที่ราบเรียบและคงตัว ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่ไหลผ่านชิฟมีแรงเฉื่อยน้อย และเมื่อสังเกตในภาพประกอบ 20 (A) และ (B) ซึ่งมีช่วงเวลาที่แตกต่างกัน (เมื่อ  $t' = tU_0/B$  คือเทอมไร้หน่วยของเวลา (Non-dimensional time)) แต่คุณลักษณะการไหลมีความคล้ายคลึงกัน เนื่องมาจากกลไกการไหลเป็นแบบสภาวะการไหลคงตัว นั่นคือ ไม่มีพลังงานของการไหลมากเพียงพอที่ทำให้เกิดความไม่เสถียรในการไหลขึ้น



ภาพประกอบ 20 คุณลักษณะการไหลแบบคงตัวที่ค่า  $Re_B = 130$ ,  $Br = 25\%$ ,  $S/W = 42\%$

(A) เวลา  $t' = 133$ , (B) เวลา  $t' = 136.5$

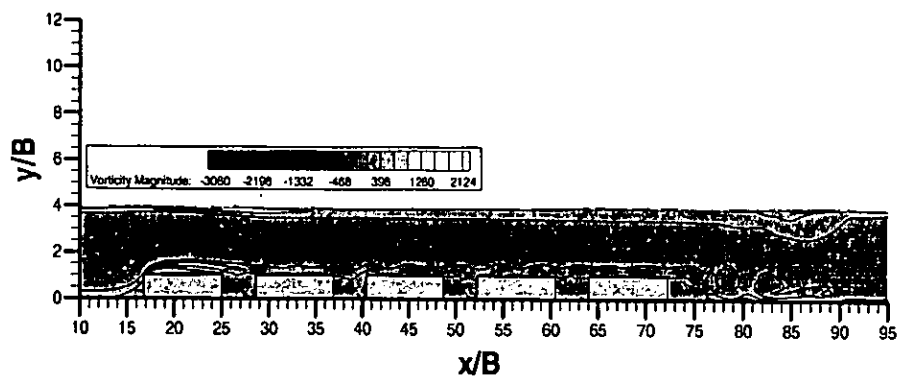
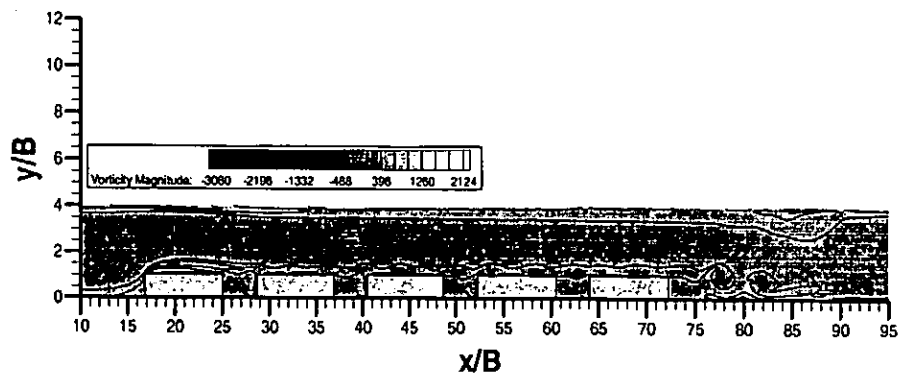
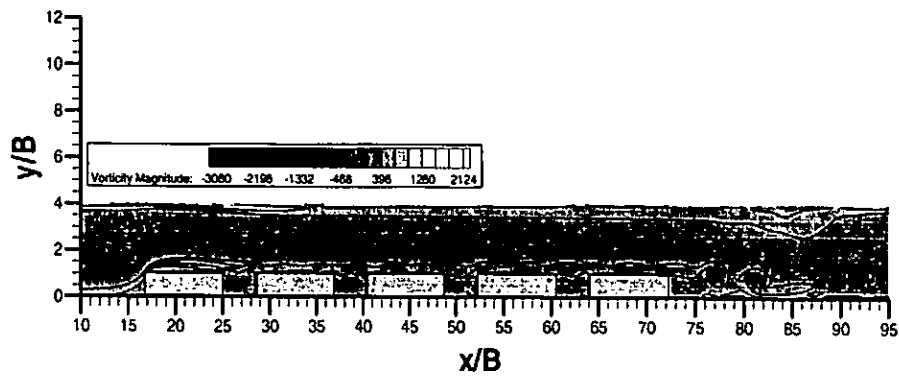
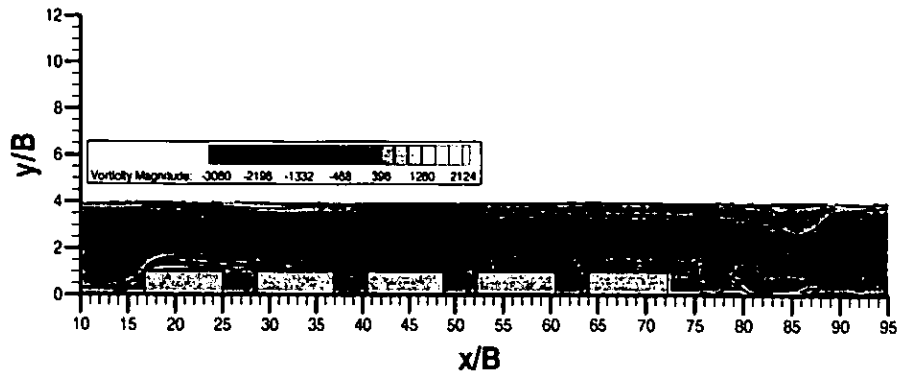


ภาพประกอบ 21 การไหลวนชั่วขณะที่ค่า  $Re_b = 500$ ,  $Br = 25\%$ ,  $S/W = 42\%$

(A) เวลา  $t' = 96.9$ , (B) เวลา  $t' = 98.52$

#### 4.1.2 คุณลักษณะการไหลเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลง

เมื่อทำการทยอยปรับเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์ให้มีค่ามากกว่า 130 จนกระทั่งค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเข้าใกล้ประมาณ 500 คุณลักษณะการไหลได้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลง จากการไหลแบบราบเรียบมีเสถียรภาพไปสู่การไหลที่ไร้เสถียรภาพ ดังแสดงในภาพประกอบ 21 จากการสังเกตที่ด้านท้ายของซีพตัวที่ 5 ในภาพประกอบ 21 (A) การไหลวนที่เกิดขึ้นได้ม้วนตัวทอดยาวออกไปตามกระแสการไหลหลัก และอยู่ในรูปแบบคาร์มันนอร์เทค (Karman vortex street) เมื่อเวลาผ่านไปชั้นขีดผิวของซีพตัวที่ 5 กระแสการไหลเริ่มแสดงความไม่ราบเรียบและการไร้เสถียรภาพ และเกิดการก่อตัวของของไหลวน (Vortex) เมื่อของไหลวนมีขนาดและพลังงานมากเพียงพอที่จะถูกสลัดหลุด (Vortex shedding) ออกไป ดังแสดงในภาพประกอบ 21 (B) ซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะในการไหลแบบไม่คงตัว และเมื่อทำการปรับเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์จนกระทั่งมีค่าประมาณ 700 พบว่าเสถียรภาพของการไหลจะถูกรบกวนมากขึ้น โดยส่งผลกระทบต่อมายังซีพที่ถูกจัดวางในตำแหน่งด้านหน้าของแบบจำลองการไหล



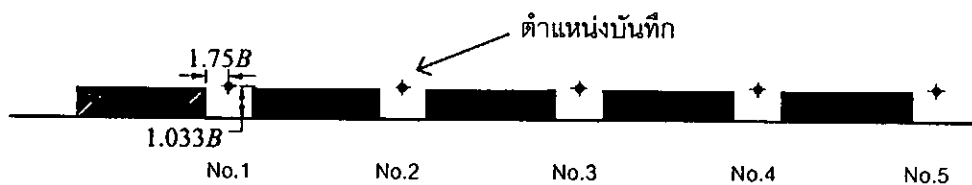
ภาพประกอบ 22 การไหลวนชั่วขณะที่ค่า  $Re_B = 1000$ ,  $Br = 25\%$ ,  $S/W = 42\%$

(A) เวลา  $t' = 417.747$ , (B) เวลา  $t' = 418.823$ , (C) เวลา  $t' = 419.900$

(D) เวลา  $t' = 420.977$

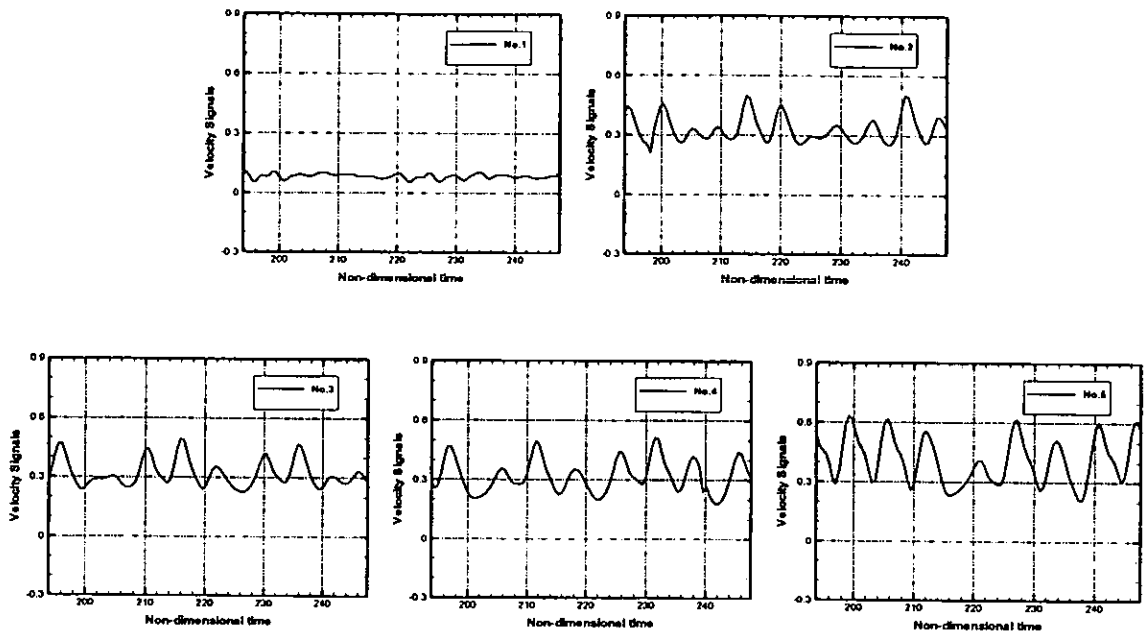
#### 4.1.3 คุณลักษณะการไหลในสภาวะไม่คงตัว

สำหรับในภาพประกอบ 22 (A) ถึง (D) แสดงการเคลื่อนตัวของของไหลวนที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ 1000 ซึ่งอยู่ในช่วงสภาวะการไหลไม่คงตัว พบว่าที่ชั้นขีดผิวของซีพตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 5 ได้เกิดเป็นชั้นขีดผิวไม่ราบเรียบ และสังเกตพบว่าที่ผนังของซีพตัวที่ 1 เกิดการไหลแตกแยก (Separated flow) และการไหลบรรจบ (Reattaching flow) ขึ้น ซึ่งพฤติกรรมของการไหลเช่นนี้เป็นการลดประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของซีพ<sup>(4,15)</sup> เมื่อมาพิจารณาถึงการก่อตัวของการไหลวนที่ด้านท้ายของซีพตัวที่ 5 ณ เวลา  $t' = 417.747$  การไหลวนที่เกิดขึ้นด้านท้ายของซีพตัวที่ 5 ได้มีวนตัวทอดยาวออกไปตามพลังงานของการไหล ซึ่งเคลื่อนตัวมาอยู่ในตำแหน่ง  $x/B = 78$  ดังแสดงในภาพประกอบ 22 (A) จนเมื่อเวลา  $t' = 418.823$  ถึง ณ เวลา  $t' = 419.900$  ได้เคลื่อนตัวมาอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกันที่  $x/B = 79$  ดังแสดงในภาพประกอบ 22 (B) และ (C) ซึ่งเป็นความยาวมากที่สุดของการไหลวนที่ทอดยาวออกไปด้านท้าย เมื่อถึง ณ เวลา  $t' = 420.977$  การไหลวนที่มีวนตัวอยู่มีขนาดและพลังงานมากเพียงพอได้เกิดการสลัดหลุดออกไปตามทิศทางของกระแสการไหล และของไหลวนที่สลัดหลุดออกมาได้เคลื่อนตัวต่อไป ดังแสดงในภาพประกอบ 22 (D) จนเมื่อถึงเวลา  $t' = 426.898$  ได้เกิดการสลัดตัวของของไหลวนลูกใหม่อีกครั้ง โดยมีระยะเวลาห่างจากการสลัดตัวลูกแรกเป็นเวลา  $t' = 5.921$  กระบวนการเกิดและการสลัดของของไหลวนจะถูกดำเนินเป็นรอบวัฏจักรแบบซ้ำซ้อน (Periodic vortex shedding) เช่นนี้ตลอดไป

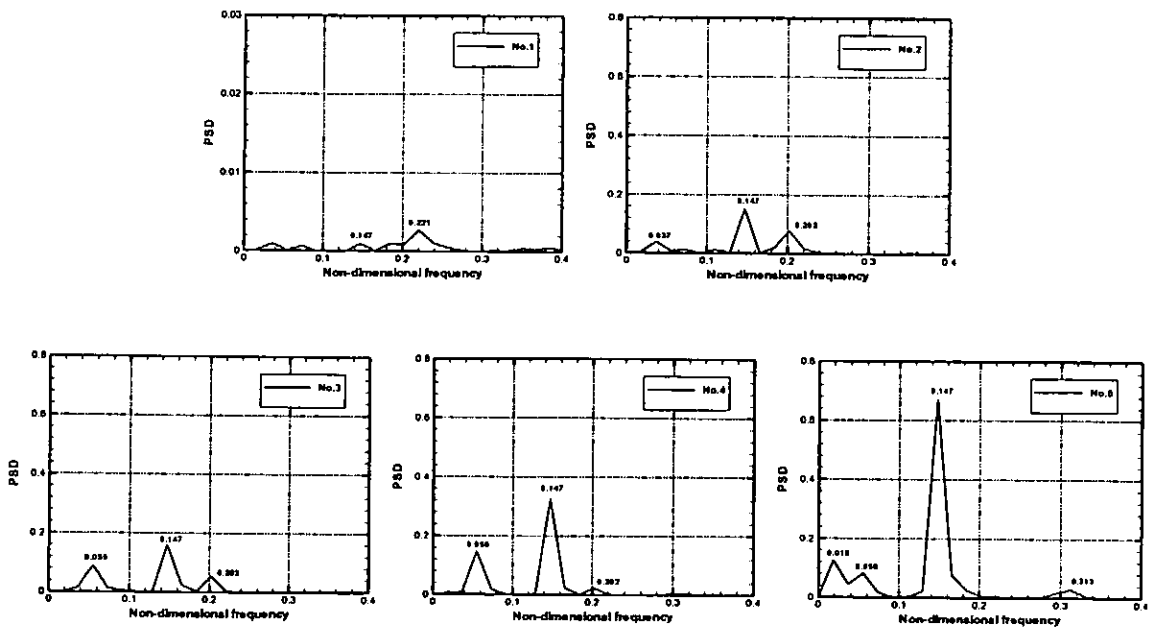


ภาพประกอบ 23 ตำแหน่งบันทึกผลการคำนวณตามเวลาที่ค่า  $Br = 25\%$ ,  $S/W = 42\%$

สำหรับการอธิบายความสัมพันธ์ของกลไกความไร้เสถียรภาพที่เกิดขึ้น ณ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ 1000 นี้ ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์ความถี่ (Analysis of characteristics frequency)<sup>(16,17)</sup> โดยเฝ้าติดตามความเร็ว ณ บริเวณด้านท้ายของซีพแต่ละตัว โดยเลือกการบันทึกผลจุดเดียว (Single point) ซึ่งมีระยะห่างจากด้านท้ายของซีพแต่ละตัวเป็น  $1.75B$  และสูงจากแผงวงจรเป็น  $1.033B$  ที่ค่า  $Br = 25\%$ ,  $S/W = 42\%$  จำนวน 5 จุด ดังแสดงในภาพประกอบ 23 สำหรับในภาพประกอบ 24 เป็นภาพแสดงสัญญาณความเร็ว (Velocity signal) ในรูปไร้หน่วยที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ( $t'$ ) ที่ได้จากการบันทึกผลทั้ง 5 จุด ซึ่งพบว่าสัญญาณความเร็วมีลักษณะไม่ซ้ำกันตลอดช่วงเวลา



ภาพประกอบ 24 สัญญาณความเร็วที่ตำแหน่งบันทึกผลต่อเวลา



ภาพประกอบ 25 สเปกตรัมพลังงานของความเร็วที่ตำแหน่งบันทึกผล

ที่กำหนดคือ  $193.8 \leq f' \leq 247.6$  โดยการวิเคราะห์ได้นำสัญญาณความเร็วนี้ไปแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform; FFT)<sup>(18,19)</sup> ผลการแปลงฟูเรียร์ที่ได้อยู่ในรูปของค่าสเปกตรัมพลังงาน (Power Spectrum Density ; PSD) และความถี่ไร้หน่วย (Non-dimensional frequency;  $f' = fB/U_0$ ) โดยแสดงความถี่ในช่วง  $0 \leq f' \leq 0.4$  ดังแสดงในภาพประกอบ 25

ในภาพประกอบ 25 ที่ตำแหน่งบันทึกผลการคำนวณที่ 5 ซึ่งอยู่ในบริเวณด้านท้ายของชีพวัตที่ 5 นั้น พบว่าความถี่ไร้หน่วยที่ 0.147 มีสเปกตรัมพลังงานสูงสุด ซึ่งเรียกความถี่นี้ว่า ความถี่แสดงลักษณะ (Characteristic frequency)<sup>(16,17,20,21)</sup> ซึ่งเป็นความถี่ของการสลับของไหลวนที่ด้านท้ายของชีพวัตที่ 5 โดยบริเวณบันทึกผลการคำนวณที่ 2, 3 และ 4 มีความถี่แสดงลักษณะเป็น 0.147 ด้วยเช่นกันแต่มีสเปกตรัมพลังงานน้อยกว่าชีพวัตที่ 5 เนื่องจากผลของค่า  $S/W$  ในการคำนวณนี้มีค่าน้อยทำให้การไหลในรูปแบบคาร์มันน์วอร์เทคชัดเจนเฉพาะบริเวณด้านท้ายของชีพวัตที่ 5 สำหรับตำแหน่งบันทึกผลการคำนวณที่ 1 ซึ่งพบว่าความถี่ไร้หน่วยที่ 0.147 ไม่ได้เป็นความถี่ที่มีสเปกตรัมพลังงานสูงเหมือนกับตำแหน่งอื่นๆ เนื่องจากการไหลที่ชีพวัตที่ 1 มักพบลักษณะการไหลแตกแยกและการไหลบรจซึ่งเป็นเหตุแห่งการก่อตัวของของไหลวนบนผนังชีพ<sup>(20,21)</sup> ได้ง่ายมากกว่าชีพวัตอื่นๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 22 โดยความถี่ไร้หน่วยที่ 0.147 ยังคงเป็นความถี่แสดงลักษณะ ส่วนความถี่ไร้หน่วยที่ 0.221 เป็นความถี่ไร้หน่วยที่เกิดจากการสลับของไหลวนอันเนื่องมาจากการไหลแตกแยกบนผนังชีพวัตที่ 1 โดยค่าความถี่ทั้งสองที่พบนี้มีความใกล้เคียงกับการคำนวณของ Bouhadji, A.; et al.<sup>(21)</sup>

ผลจากการศึกษาคุณลักษณะการไหลทำให้ทราบว่าคุณลักษณะการไหลที่ค่า  $Br = 25\%$   $S/W = 42\%$  สามารถพิจารณาการคำนวณเป็นการไหลในสภาวะคงตัวและไม่คงตัวได้ กล่าวคือ ถ้าค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าน้อยกว่าประมาณ 500 กระแสการไหลค่อนข้างราบเรียบ ซึ่งเป็นคุณลักษณะการไหลในสภาวะการไหลคงตัวไม่ขึ้นอยู่กัเวลา แต่ถ้าเมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนเข้าใกล้ประมาณ 500 คุณลักษณะการไหลได้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงไปสู่การไหลที่ไร้เสถียรภาพและเมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าประมาณ 700 เสถียรภาพของการไหลได้ถูกรบกวนมากขึ้น โดยส่งผลมายังชีพในตำแหน่งด้านหน้า โดยมีค่าความถี่แสดงลักษณะเป็น 0.147 ที่ค่า  $Br = 25\%$ ,  $S/W = 42\%$  ดังนั้นในการคำนวณค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่น้อยกว่า 500 ถูกเลือกใช้ในการศึกษาการไหลในสภาวะคงตัวและค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในช่วง 500 ถึง 1000 ถูกเลือกใช้ในการศึกษาการไหลในสภาวะไม่คงตัว ซึ่งจะได้ทำการศึกษาต่อไปในบทที่ 5

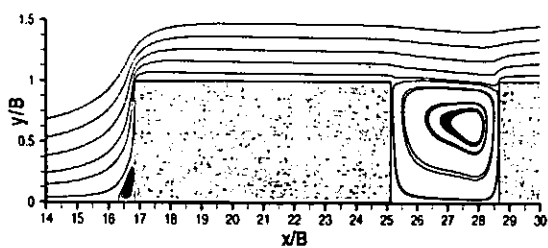
## 4.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในการไหลสองมิติ

### 4.2.1 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขเรย์โนลด์

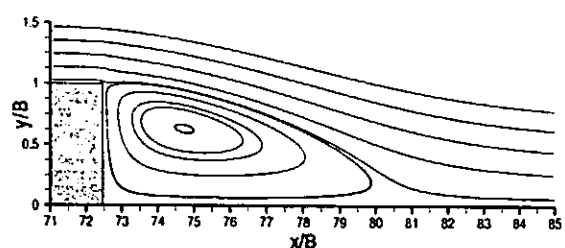
การคำนวณหาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ได้กระทำการคำนวณในช่วงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ 100 ถึง 200 ซึ่งเป็นช่วงในสภาวะการไหลคงตัว สำหรับข้อมูลและเงื่อนไขต่างๆ แสดงไว้ในตาราง 8

ตาราง 8 ข้อมูลการคำนวณค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในสภาวะการไหลคงตัว

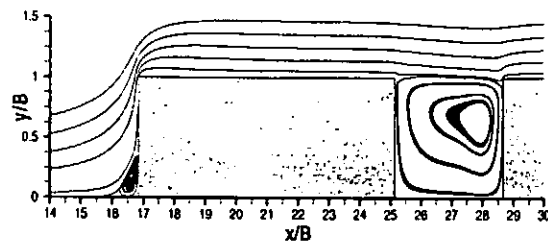
$Re_B$	$Br(\%)$	$S/W(\%)$
100- 200	25	42



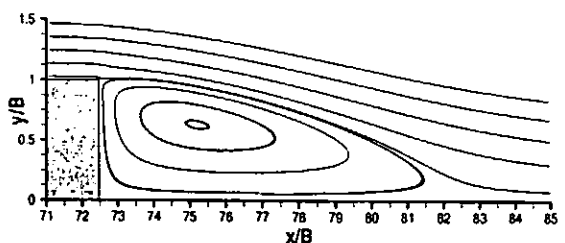
(A)  $Re_B = 100$



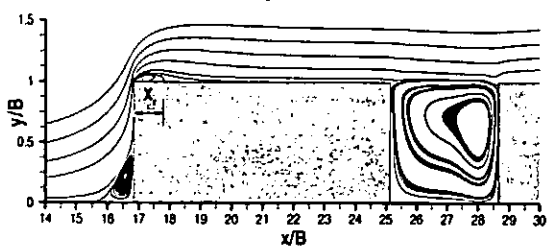
(B)  $Re_B = 100$



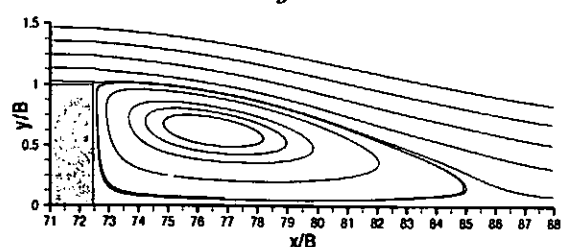
(C)  $Re_B = 130$



(D)  $Re_B = 130$



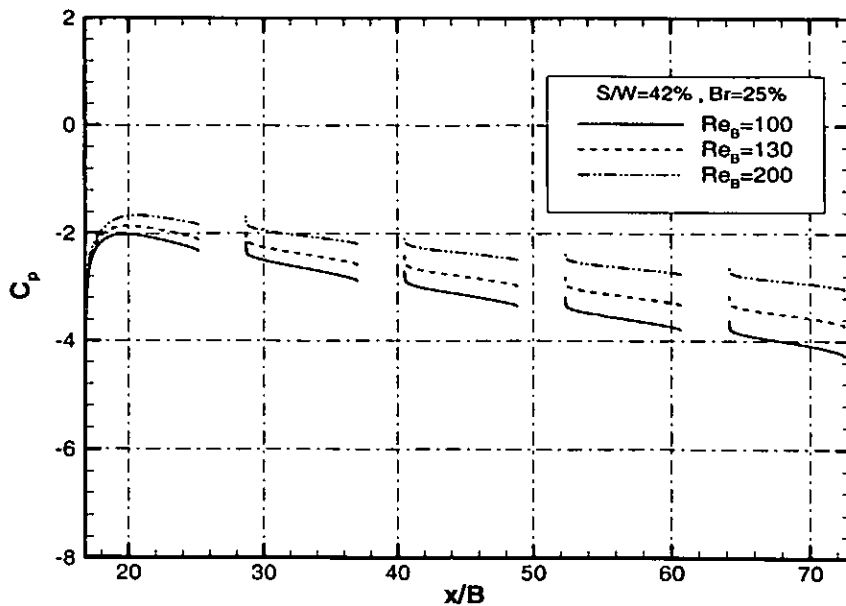
(E)  $Re_B = 200$



(F)  $Re_B = 200$

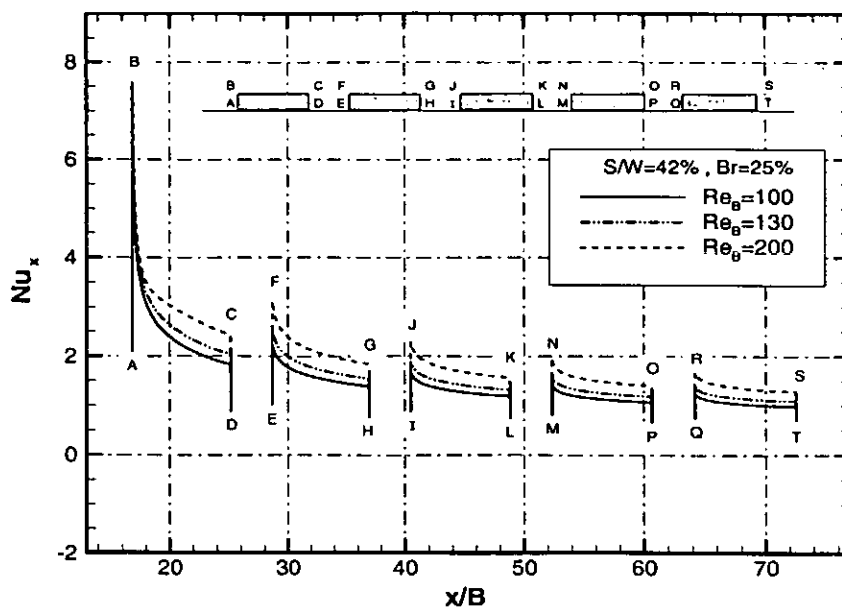
ภาพประกอบ 26 เส้นทางการไหลของของไหลที่ผ่านซีพตัวที่หนึ่งและตัวที่ห้าที่ค่า  $Br = 25\%$

$$S/W = 42\%$$

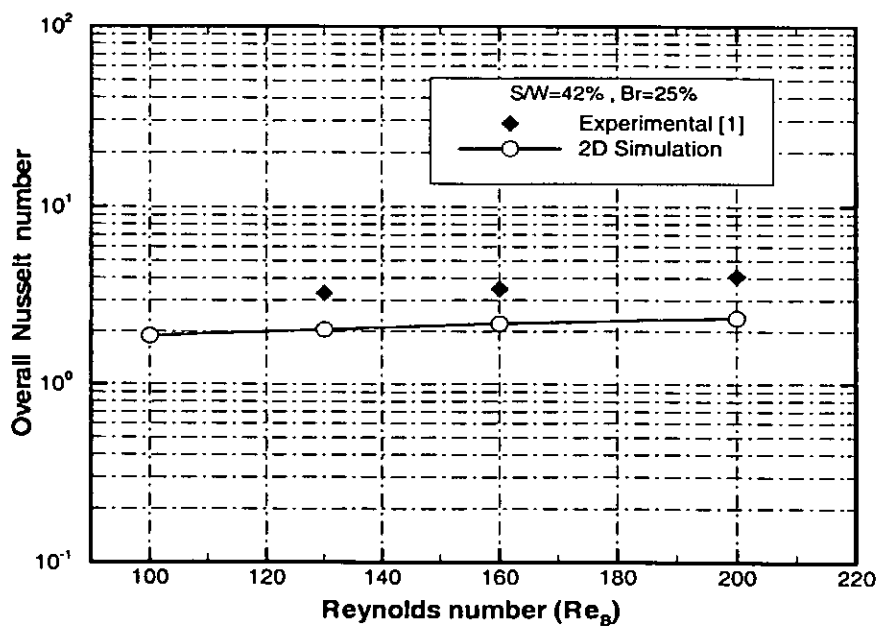


ภาพประกอบ 27 ค่าสัมประสิทธิ์ความดันของการคำนวณผลกระทบค่า  $Re_B$

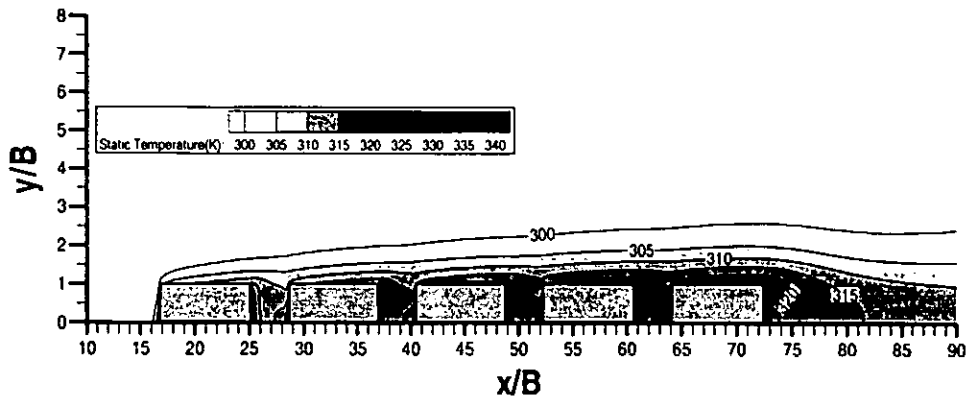
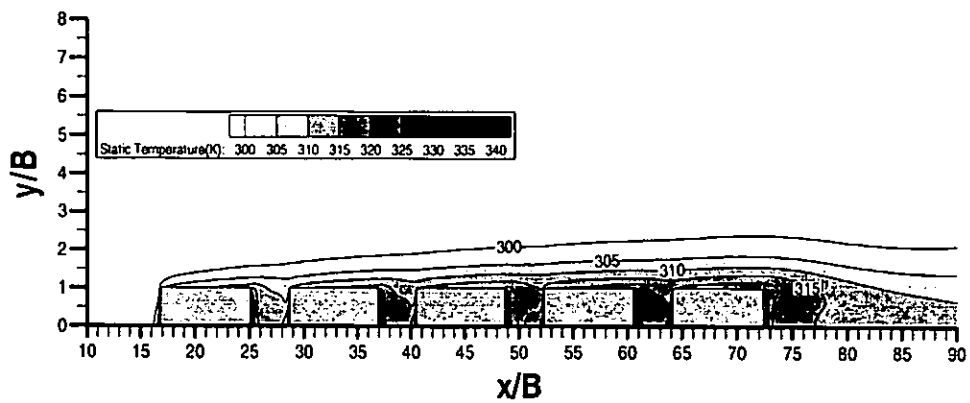
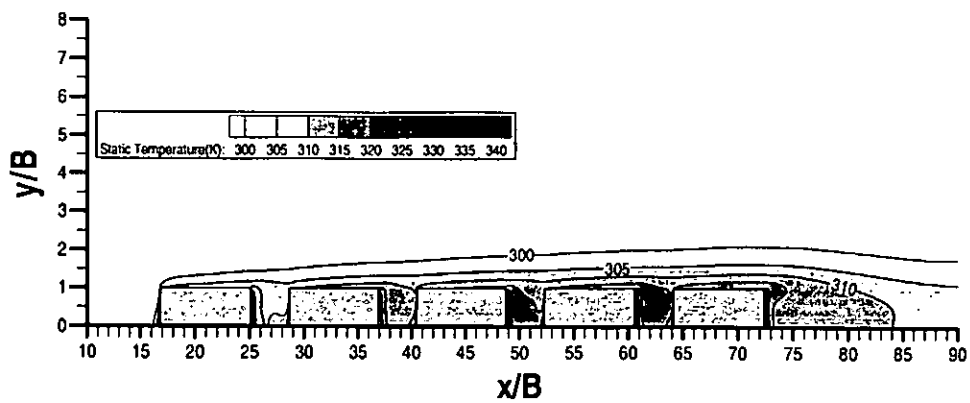
ในภาพประกอบ 26 (A), (C) และ (E) แสดงเส้นทางการไหล (Streamlines) ของของไหลที่เคลื่อนผ่านซีพตัวที่ 1 ณ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ 100, 130 และ 200 ตามลำดับ พบว่าเมื่อกระแสการไหลได้ไหลเข้าปะทะผนังด้านหน้าของซีพตัวที่ 1 ทำให้เกิดกระแสหมุนวนขนาดเล็กที่มุมด้านล่างในบริเวณด้านหน้าของผนังซีพโดยค่าตัวเลขเรย์โนลด์ทั้งสามกรณีเกิดขึ้นคล้ายกัน ส่วนที่ผนังด้านบนของซีพตัวที่ 1 ไม่เกิดการหมุนวนของกระแสการไหลหรือการไหลบรรจบ จากค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่ 100 และ 130 แต่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่ 200 เกิดการไหลบรรจบที่ผนังด้านบนของซีพโดยมีขนาดค่อนข้างเล็ก ซึ่งมีความยาวโดยประมาณ  $X_r/B = 1.1$  ( $X_r$  คือ ความยาวของการไหลบรรจบ) และเมื่อกระแสการไหลเคลื่อนผ่านซีพตัวที่ 5 ซึ่งเป็นซีพตัวสุดท้ายได้เกิดการหมุนวนที่บริเวณด้านท้ายของซีพ ดังแสดงในภาพประกอบ 26 (B), (D) และ (F) ขนาดของการไหลหมุนวนด้านท้ายของซีพตัวที่ 5 ซึ่งวัดจากด้านท้ายของซีพออกไปโดยมีค่า  $X_r/B$  ประมาณ 7.5, 9.0 และ 12.5 ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 100, 130 และ 200 ตามลำดับ แสดงว่าอัตราการเพิ่มของขนาดการหมุนวนด้านท้ายนี้มีลักษณะแปรผันตรงกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มขึ้น สำหรับการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์ความดัน ( $C_p$ ) บนผนังของซีพในสภาวะการไหลคงตัวนี้ ดังแสดงในภาพประกอบ 27 ซึ่งพบว่าที่ผนังซีพตัวที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์ความดันมีค่าตกลงที่มุมผนังเนื่องจากเป็นจุดสแตกเนชัน (Stagnation point) มีค่า  $U_0 = 0$  และความดันสถิตมีค่าสูงสุด เมื่อสังเกตการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังซีพตัวที่ 2 ถึงตัวที่ 5 ซึ่งพบว่ามึลักษณะการกระจายตัวที่ราบเรียบเป็นเพราะอยู่ในสภาวะการไหล



ภาพประกอบ 28 ค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ของการคำนวณผลกระทบบค่า  $Re_B$



ภาพประกอบ 29 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลท์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบบค่า  $Re_B$

(A)  $Re_B = 100$ (B)  $Re_B = 130$ (C)  $Re_B = 200$ 

ภาพประกอบ 30 การกระจายตัวของอุณหภูมิในการคำนวณผลกระทบบค่า  $Re_B$  ที่ค่า  $Br = 25\%$

$$S/W = 42\%$$

คงตัว และผลของการเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีผลทำให้ค่าความชันของความดันของการไหล ( $dp/dx$ ) มีค่าสูงขึ้นประมาณ 30% ถ้าค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเพิ่มขึ้น 23% และสูงขึ้น 61.5% ถ้าค่าตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น 50% ซึ่งแสดงว่าการเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีผลต่อค่าความดันตกคร่อมของการไหล

สำหรับผลกระทบของค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่มีต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน พบว่าเมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าน้อย ทำให้เกิดการกระจายตัวของค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉพาะที่ต่ำลง ดังแสดงในภาพประกอบ 28 โดยที่ค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉพาะที่มีค่ามากสุดในตำแหน่ง B ซึ่งเป็นมุมผนังของชิพตัวที่ 1 เนื่องจากเป็นจุดที่กระแสการไหลเคลื่อนเข้าปะทะกับผนังของชิพ ทำให้มีผลความแตกต่างของอุณหภูมิน้อยหลังจากนั้นค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉพาะที่ได้มีค่าลดลงตามระยะทาง ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับแกน  $x$  กระทั่งมีค่าต่ำสุดที่ชิพตัวที่ 5 การที่ค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉพาะที่ในชิพตัวที่ 2, 3, 4 และ 5 มีค่าลดลงตามระยะทางนั้น สามารถอธิบายได้โดยภาพประกอบ 30 (A), (B) และ (C) ที่แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 100, 130 และ 200 ตามลำดับ กล่าวคือ เมื่อกระแสการไหลได้ไหลผ่านชิพตัวที่ 1 ซึ่งได้กำหนดค่าฟลักซ์ความร้อนไว้ทำให้อุณหภูมิของของไหลมีค่าสูงขึ้นหลังจากนั้นกระแสการไหลได้พาความร้อนจากชิพตัวที่ 1 ไปยังชิพตัวที่ 2 และพาความร้อนไปสู่ชิพตัวต่อๆ ไปทำให้ชิพที่อยู่ในตำแหน่งด้านท้ายเกิดการสะสมของอุณหภูมิส่งผลถึงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของชิพตัวนั้น และในภาพประกอบ 30 ยังบ่งบอกว่าค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่มีค่าน้อยนั้น ชั้นขอบความร้อน (Thermal boundary layer) มีความหนาเพิ่มขึ้นตามระยะทางของการไหล แต่ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูงพบว่าชั้นขอบความร้อนมีความหนาน้อยลง ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น<sup>(15)</sup>

พิจารณาในภาพประกอบ 29 ซึ่งเป็นภาพแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวม ( $\overline{Nu}_{overall} = \overline{h}_{overall} B / k$ ) ของการคำนวณค่าตัวเลขเรย์โนลด์ สำหรับการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของชิพแต่ละตัว ก่อนปรับเปลี่ยนมาเป็นค่าตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมนั้น ได้ทำการคำนวณอุณหภูมิผนังเฉพาะตำแหน่งผนังด้านบนของชิพ เพื่อให้มีความสอดคล้องกับผลการทดลอง<sup>(1)</sup> ที่ทำการวัดอุณหภูมิผิวเฉพาะตำแหน่งนี้ ซึ่งพบว่า การเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์ทำให้ชิพมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ คงที่ ซึ่งผลการคำนวณมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับการทดลอง<sup>(1)</sup> ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ทำให้เทอมการพาในสมการอนุรักษ์พลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่วนการที่ผลการคำนวณมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมต่ำกว่าการทดลองนั้น เพราะเกิดจากการใช้แบบจำลองการไหล 2 มิติ ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3

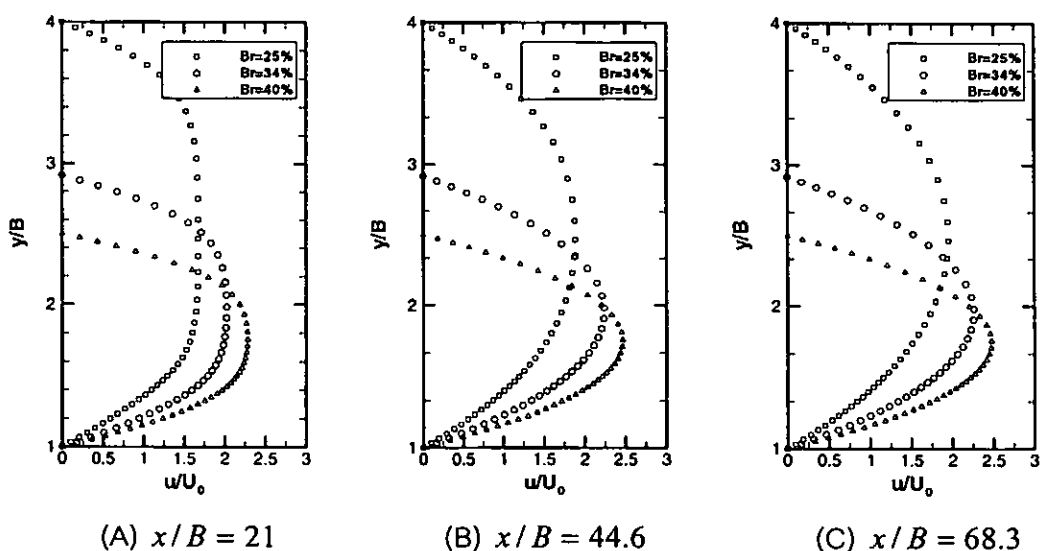
ผลจากการคำนวณนี้สรุปได้ว่า การปรับเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในสภาวะการไหลคงตัวสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชิพได้ ซึ่งถ้าพิจารณาปรับเพิ่มจากค่าตัวเลขเรย์โนลด์ 100 เป็น 200 ที่ค่า  $Br = 25\%$ ,  $S/W = 42\%$  ชิพมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมเพิ่มขึ้น 20.7% แต่การเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีผลต่อความดันตกคร่อมของการไหลที่เพิ่มขึ้นด้วย

#### 4.2.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความสูงของซีฟต่อความสูงของแบบจำลองการไหล

การคำนวณหาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความสูงของซีฟ ต่อความสูงของแบบจำลองการไหลในสภาวะการไหลคงตัว ได้กระทำการคำนวณในช่วง 12.5% ถึง 40% สำหรับข้อมูลและเงื่อนไขต่างๆ แสดงในตาราง 9

ตาราง 9 ข้อมูลการคำนวณค่าอัตราส่วนความสูงของซีฟต่อความสูงของแบบจำลองการไหลในสภาวะการไหลคงตัว

$Br(\%)$	$S/W(\%)$	$Re_B$
12.5 - 40	42	130

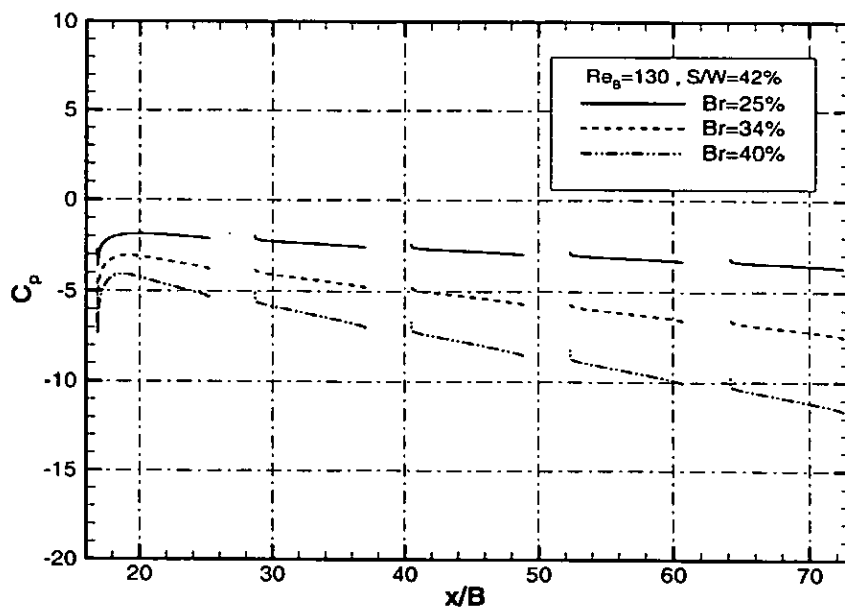


ภาพประกอบ 31 การกระจายตัวของความเร็วในการคำนวณผลกระทบจากค่า  $Br$  ที่ค่า  $Re_B = 130$

$$S/W = 42\%$$

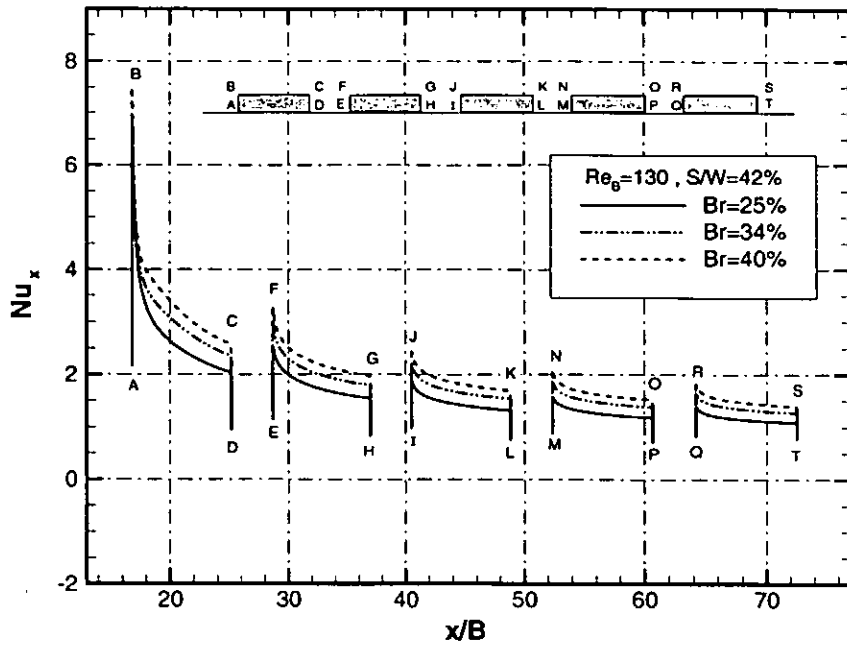
ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความสูงของซีฟ ต่อความสูงของแบบจำลองการไหลในสภาวะการไหลคงตัวนี้ พบว่าทำให้การกระจายตัวของความเร็ว (Profile) เหนือผนังของซีฟเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 31 (A), (B) และ (C) ซึ่งเป็นค่าความเร็วเหนือผนังซีฟตัวที่ 1 ตัวที่ 3 และตัวที่ 5 ตามลำดับ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางตามความยาวของซีฟ ในภาพประกอบ 31 นี้บ่งบอกว่าเมื่อทำการเพิ่มค่า  $Br$  มีผลทำให้ค่า  $w/U_0$  ที่ตำแหน่งบนผนังของซีฟแต่ละตัวนั้นมีค่า

เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเท่ากัน ทั้งนี้เป็นไปตามสมการความต่อเนื่องของการไหลและพบว่าลักษณะการกระจายตัวของความเร็วเหนือผนังของชิพตัวที่ 1 ค่อยๆ เปลี่ยนเป็นรูปแบบของพาราโบลา(Parabola) จนกระทั่งการกระจายตัวของความเร็วเหนือผนังของชิพตัวที่ 3 ถึงตัวที่ 5 ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว ซึ่งแสดงว่าการไหลได้เข้าสู่การไหลแบบพัฒนาอย่างสมบูรณ์แล้ว สำหรับในภาพประกอบ 32 เป็นภาพที่แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังของชิพที่กรณี 25%, 34% และ 40% ซึ่งพบว่าลักษณะการกระจายตัวของความดันมีลักษณะการกระจายตัวเช่นเดียวกับการคำนวณผลกระทบจากค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่ผ่านมา ซึ่งยังคงอยู่ในลักษณะการกระจายตัวของการไหลแบบคงตัว แต่ผลของการเพิ่มค่า  $Br$  พบว่าทำให้มีค่าความชันของความดันของการไหลสูงขึ้นประมาณ 52% ถ้าค่า  $Br$  มีค่าเพิ่มขึ้น 26.4% และสูงขึ้นประมาณ 70% ถ้าค่า  $Br$  เพิ่มขึ้น 37.5% ซึ่งแสดงว่าการเพิ่มค่า  $Br$  มีผลต่อค่าความดันตกคร่อมของการไหล ทั้งนี้เพราะการเพิ่มค่า  $Br$  ทำให้ของไหลไหลผ่านช่องระหว่างผนังที่มีพื้นที่น้อยได้ยากขึ้น

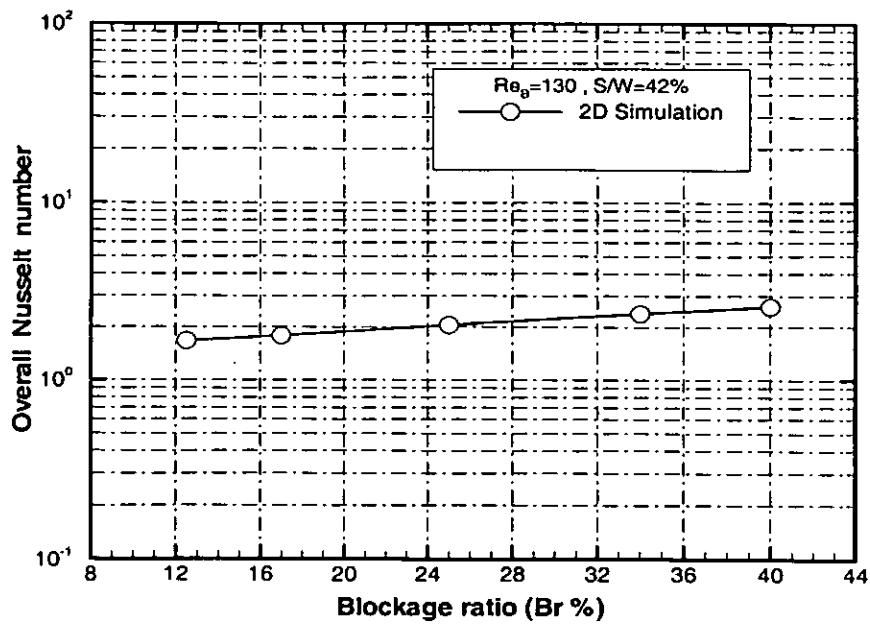


ภาพประกอบ 32 ค่าสัมประสิทธิ์ความดันของการคำนวณผลกระทบค่า  $Br$

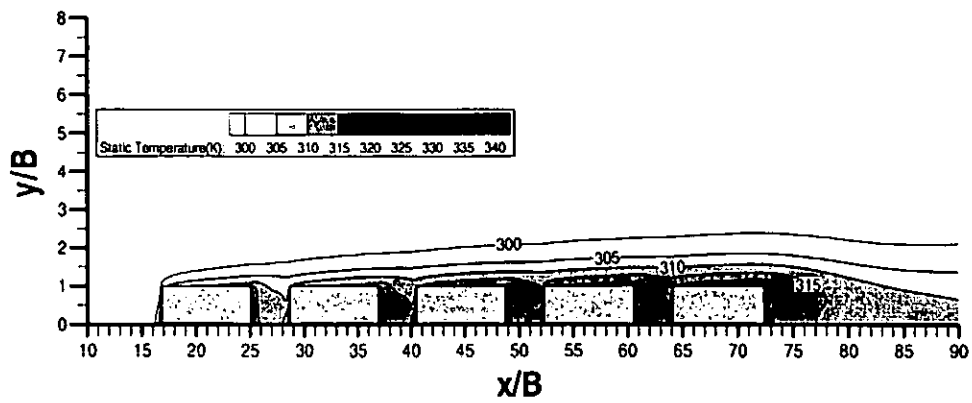
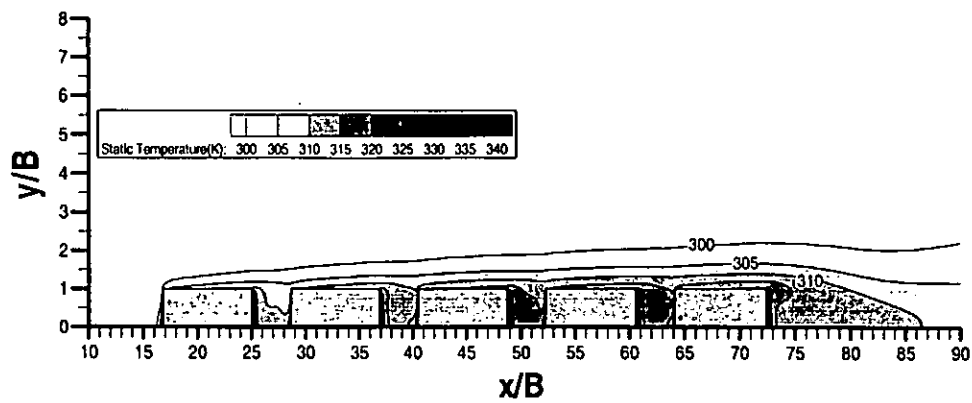
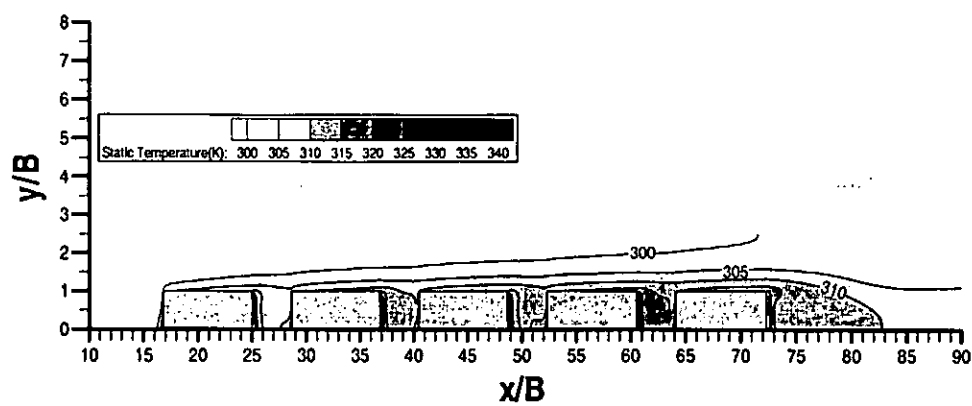
สำหรับผลกระทบในด้านการถ่ายเทความร้อนของชิพ พิจารณาจากภาพประกอบ 33 ซึ่งแสดงการกระจายตัวของค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ พบว่าที่ค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของแบบจำลองการไหลเท่ากับ 25% มีค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ของชิพทุกตัวน้อยกว่ากรณี 34% และ 40% ในขณะที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ไม่เปลี่ยนแปลงและเมื่อพิจารณาในภาพประกอบ 34 ซึ่งเป็นภาพแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของค่า  $Br$  ที่กรณี 12.5%, 17%, 25%



ภาพประกอบ 33 ค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ของการคำนวณผลกระทบบค่า  $Br$



ภาพประกอบ 34 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลท์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบบค่า  $Br$

(A)  $Br = 25\%$ (B)  $Br = 34\%$ (C)  $Br = 40\%$ 

ภาพประกอบ 35 การกระจายตัวของอุณหภูมิในการคำนวณผลกระทบจากค่า  $Br$  ที่ค่า  $Re_B = 130$

$$S/W = 42\%$$

34% และ 40% ในสภาวะการไหลคงตัว ซึ่งพบว่าการเพิ่มค่า  $Br$  ทำให้ซีพมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมเพิ่มขึ้น นั่นคือ ถ้าค่า  $Br$  เพิ่มขึ้น 26.4%, 50%, 63.2% และ 69% ซีพมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมเพิ่มขึ้น 6.5%, 18.5%, 30% และ 36% ตามลำดับ ที่ค่า  $Re_B = 130, S/W = 42%$  เนื่องจากการเพิ่มค่าพารามิเตอร์นี้ทำให้ความเร็วภายในแบบจำลองการไหลมีค่าสูงขึ้น ซึ่งมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของซีพ โดยผลการคำนวณค่าอัตราส่วนความสูงของซีพต่อความสูงของแบบจำลองการไหลนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hacoheh, J.; et al.<sup>(22)</sup> ซึ่งได้ทำการทดลองการถ่ายเทความร้อนของซีพในกรณีการพาความร้อนแบบอิสระและแบบบังคับ โดยผลการทดลองในกรณีการพาความร้อนแบบบังคับ พบว่าการลดความสูงของผนังแบบจำลองการไหลลง หมายถึงการเพิ่มค่า  $Br$  สามารถทำให้ซีพมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงขึ้นได้มากกว่า การเพิ่มความสูงของผนังแบบจำลองการไหล และผลการคำนวณยังมีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Dijlali, N.<sup>(15)</sup> Suksangpanomrung, A.<sup>(23)</sup> และ Velayati, E.; et al.<sup>(24)</sup> ที่ได้ทำการศึกษาผลของค่าตัวเลขเรย์โนลด์และ  $Br$  ที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนในแท่งวัตถุทรงสี่เหลี่ยม (Bluff rectangular plate) ซึ่งพบว่า การเพิ่มค่า  $Br$  ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ ส่งผลดีต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งวัตถุทรงสี่เหลี่ยม สำหรับในภาพประกอบ 35 (A), (B) และ (C) แสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่กรณี 25% 34% และ 40% ตามลำดับ ซึ่งพบได้ว่าการที่ค่า  $Br$  มีค่าเพิ่มขึ้นจะมีชั้นขอบความร้อนลดลงทำให้ซีพมีอุณหภูมิลดลงตามมา

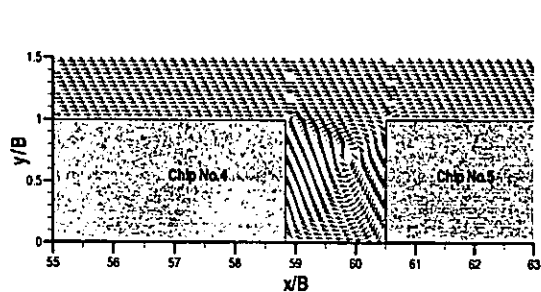
ผลจากการคำนวณทำให้สรุปได้ว่า การเพิ่มค่าอัตราส่วนความสูงของซีพต่อความสูงของแบบจำลองการไหลในสภาวะการไหลคงตัว สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของซีพได้ แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มค่าพารามิเตอร์นี้ควรอยู่ในขอบเขตที่ไม่มากเกินไป เพราะการเพิ่มมากเกินไปนั้นทำให้มีค่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งต้องใช้พลังงานของการไหลที่สูงขึ้นตามเพื่อขับเคลื่อนของไหลให้ไหลผ่านเข้าสู่บริเวณการถ่ายเทความร้อนที่ได้ติดตั้งซีพไว้

#### 4.2.3 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระยะห่างของซีพต่อความยาวของซีพ

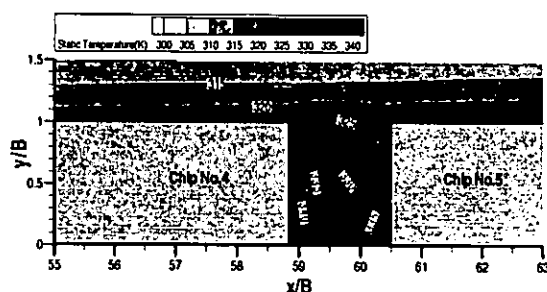
การคำนวณหาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระยะห่างของซีพต่อความยาวของซีพที่มีผลต่อพฤติกรรมกรไหลและการถ่ายเทความร้อน โดยกระทำการคำนวณในช่วง 20% ถึง 100% สำหรับข้อมูลและเงื่อนไขต่างๆ แสดงในตาราง 10

ตาราง 10 ข้อมูลการคำนวณค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิพต่อความยาวของชิพในสภาวะการไหลคงตัว

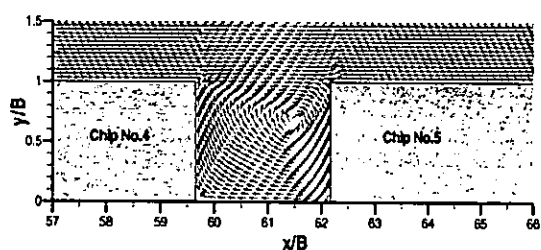
$S/W(\%)$	$Re_B$	$Br(\%)$
20-100	130	25



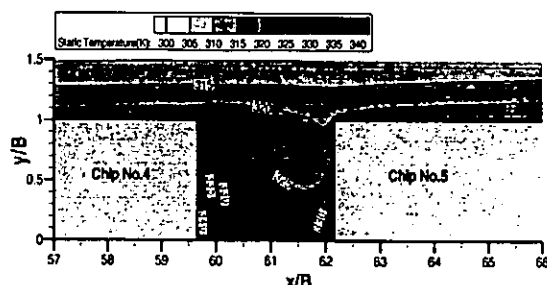
(A)  $S/W = 20\%$



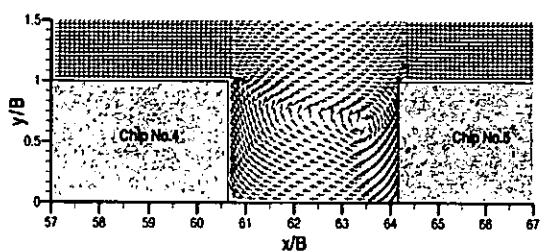
(B)  $S/W = 20\%$



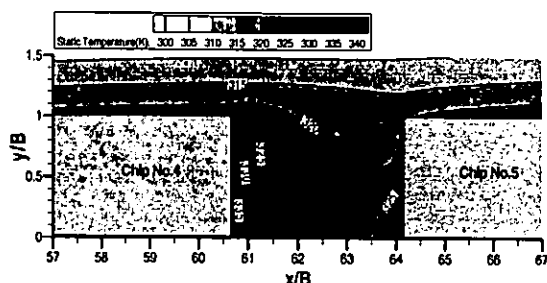
(C)  $S/W = 30\%$



(D)  $S/W = 30\%$

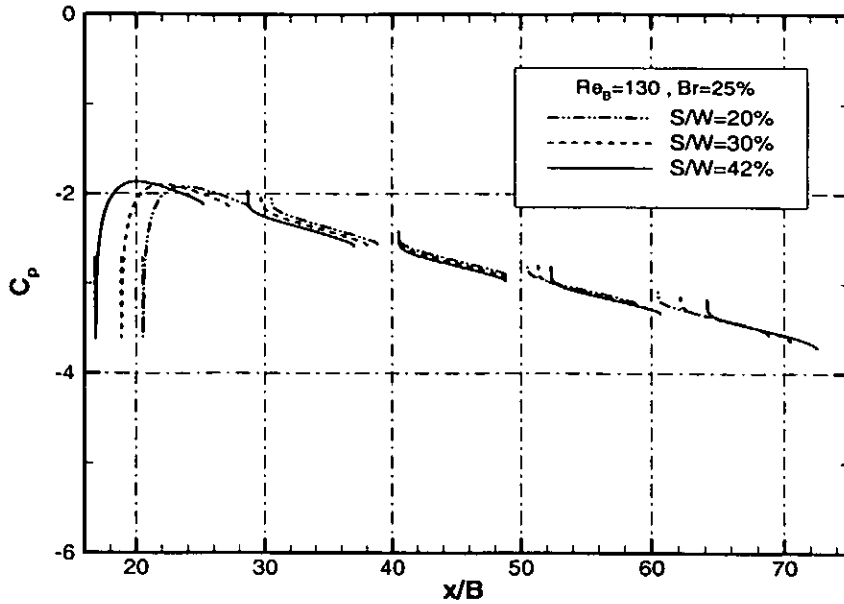


(E)  $S/W = 42\%$



(F)  $S/W = 42\%$

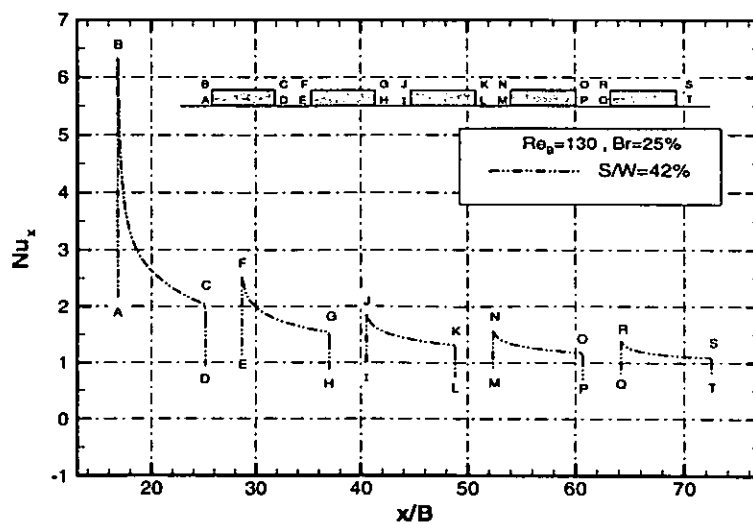
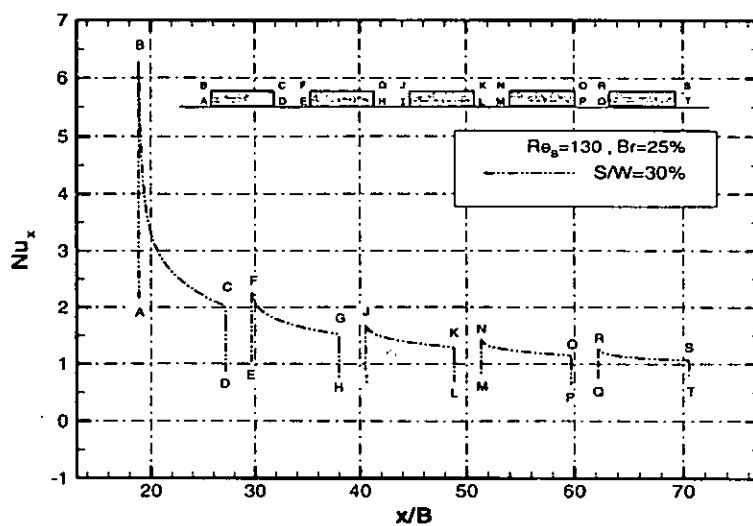
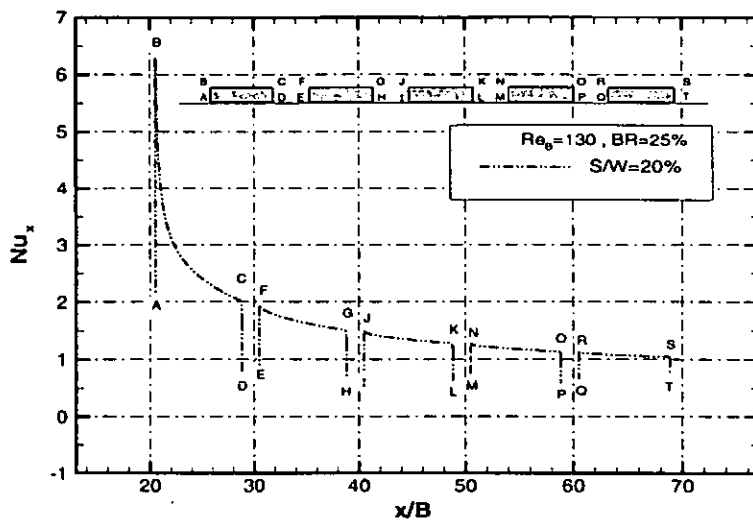
ภาพประกอบ 36 เวกเตอร์ความเร็วและการกระจายตัวของอุณหภูมิในพื้นที่ระหว่างชิพตัวที่สี่และตัวที่ห้าที่ค่า  $Re_B = 130$ ,  $Br = 25\%$



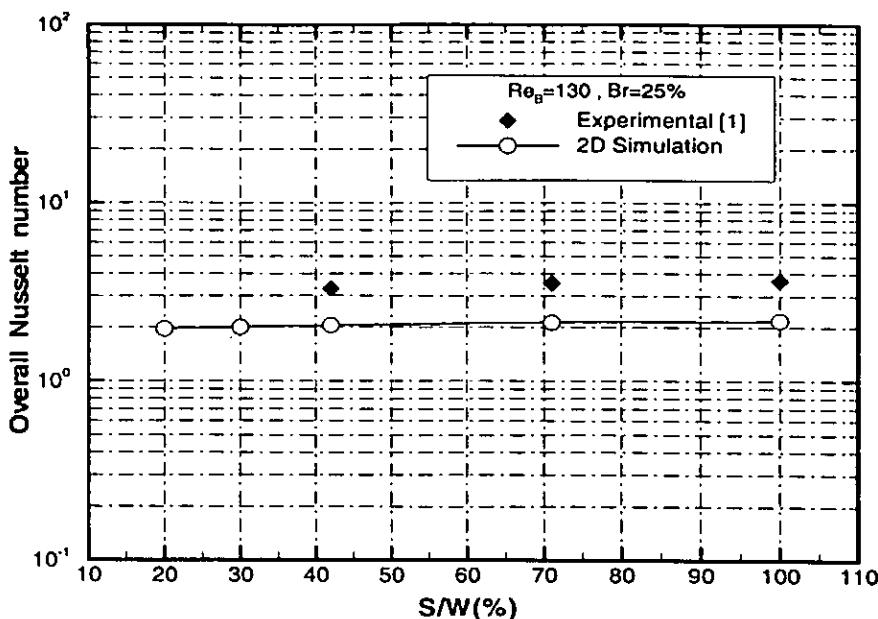
ภาพประกอบ 37 ค่าสัมประสิทธิ์ความดันของการคำนวณผลกระทบค่า  $S/W$

พิจารณาภาพประกอบ 36 (A), (C) และ (E) ซึ่งเป็นภาพแสดงเวกเตอร์ความเร็วในพื้นที่ระหว่างซีฟตัวที่ 4 และตัวที่ 5 ที่ค่า  $S/W$  เท่ากับ 20%, 30% และ 42% ตามลำดับ ซึ่งพบว่าในทุกกรณีนั้นได้เกิดการหมุนวนของกระแสการไหลขึ้น โดยจุดศูนย์กลางของกระแสหมุนวนได้เกิดขึ้นใกล้กับผนังของซีฟตามทิศทางการไหลเอียงไปทางมุมขวาบน ซึ่งเป็นอิทธิพลจากค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และไม่พบกระแสการไหลที่หมุนวนในบริเวณมุมล่างผนังของช่องระหว่างซีฟตัวที่ 4 ตัวที่ 5 และในช่องระหว่างซีฟตัวอื่นๆ ซึ่งการหมุนวนของกระแสการไหลมีขนาดเพิ่มขึ้นตามค่า  $S/W$  ที่สูงขึ้น สำหรับในภาพประกอบ 37 ได้แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์ความดันของการไหลที่ค่า  $S/W$  เท่ากับ 20%, 30% และ 42% ซึ่งมีลักษณะการกระจายตัวที่คล้ายกันและมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงว่าการเพิ่มค่า  $S/W$  มีผลกระทบต่อค่าความดันตกคร่อมของการไหลน้อย

เมื่อพิจารณาในภาพประกอบ 38 (A), (B) และ (C) ซึ่งแสดงผลในด้านการถ่ายเทความร้อน พบว่าการกระจายตัวของค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่สำหรับในกรณี 20% ณ ตำแหน่ง C ซึ่งเป็นตำแหน่งบนผนังด้านท้ายของซีฟตัวที่ 1 มีค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่สูงกว่าตำแหน่ง F ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านหน้าของซีฟตัวที่ 2 โดยซีฟตัวที่ 3, 4 และ 5 มีลักษณะการกระจายตัวของค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่เช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นระหว่างตัวที่ 1 กับตัวที่ 2 การที่ตำแหน่ง C มีค่าสูงกว่าตำแหน่ง F นั้นเป็นผลมาจากการลดระยะห่างระหว่างซีฟ ซึ่งเป็นการลดการปะทะของกระแสการไหลที่สามารถทำให้ค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ ณ มุมผนังมีค่าสูงขึ้นได้ ซึ่งแตกต่างจากกรณี 30% และกรณี 40%



ภาพประกอบ 38 ค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ของการคำนวณผลกระทบบค่า  $S/W$



ภาพประกอบ 39 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบค่า  $S/W$

จากภาพประกอบ 36 (B), (D) และ (F) ซึ่งแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในช่องว่างระหว่างชิพตัวที่ 4 กับตัวที่ 5 พบว่าการหมุนวนของกระแสการไหลในตำแหน่งใกล้กับผนังเยื้องไปทางมุมขวาบนของชิพตัวที่ 5 และมีทิศทางของกระแสการไหลตามเข็มนาฬิกา นั่นทำให้อุณหภูมิของผนังชิพตัวที่ 5 ลดลงแต่ผนังของชิพตัวที่ 4 ยังพบการสะสมของอุณหภูมิ ซึ่งแสดงว่าการเกิดกระแสมุมวนภายในช่องระหว่างชิพสามารถช่วยลดอุณหภูมิบนผนังชิพได้บางส่วน ไม่สามารถลดอุณหภูมิบนผนังของชิพได้ทั้งหมด และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของการเพิ่มค่า  $S/W$  ดังแสดงในภาพประกอบ 39 พบว่าการเพิ่มค่า  $S/W$  สามารถช่วยเพิ่มค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมให้มีค่าสูงขึ้นได้ ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับการทดลอง<sup>(1)</sup> นั่นคือ ถ้าค่า  $S/W$  เพิ่มขึ้น 33.3%, 52.3%, 72% และ 80% ชิพมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมเพิ่มขึ้น 2.2%, 4.5%, 8% และ 10.1% ตามลำดับ ในขณะที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ไม่ได้เปลี่ยนแปลง เพราะการเพิ่มค่า  $S/W$  เป็นการเพิ่มพื้นที่ว่างระหว่างชิพ ซึ่งทำให้อากาศที่หมุนอยู่ระหว่างพื้นที่นี้มีปริมาณมากขึ้นส่งผลให้สามารถพาความร้อนได้ดีกว่าอากาศหมุนในช่องแคบๆ ซึ่งชิพสามารถถ่ายเทความร้อนให้แก่กันได้ง่าย

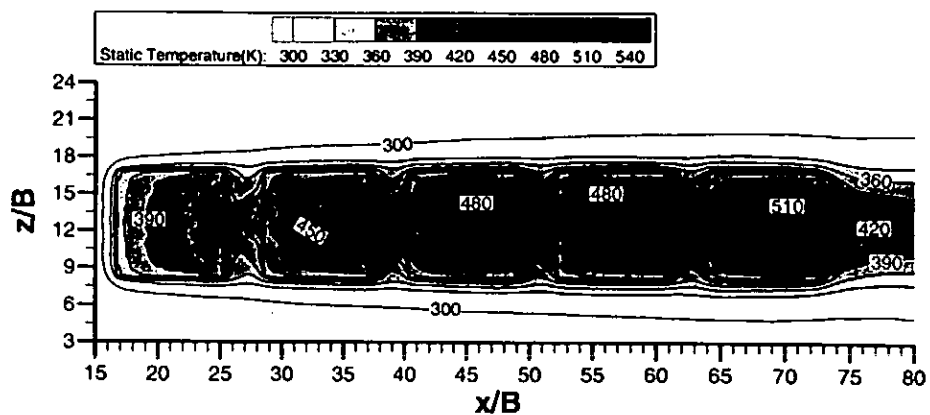
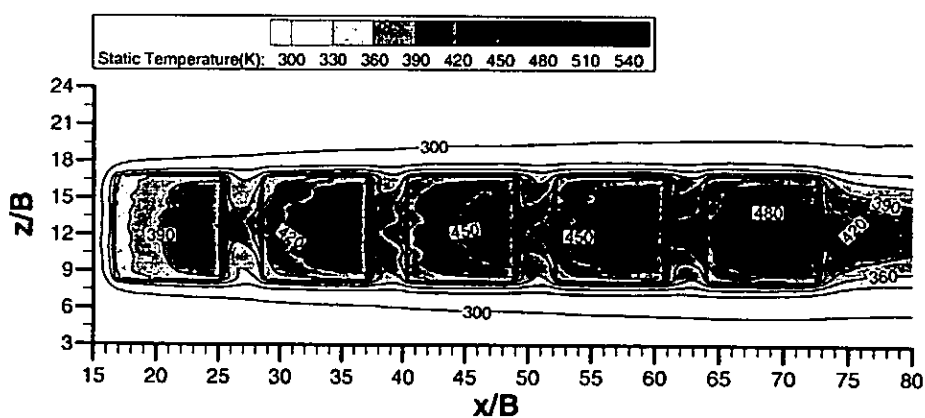
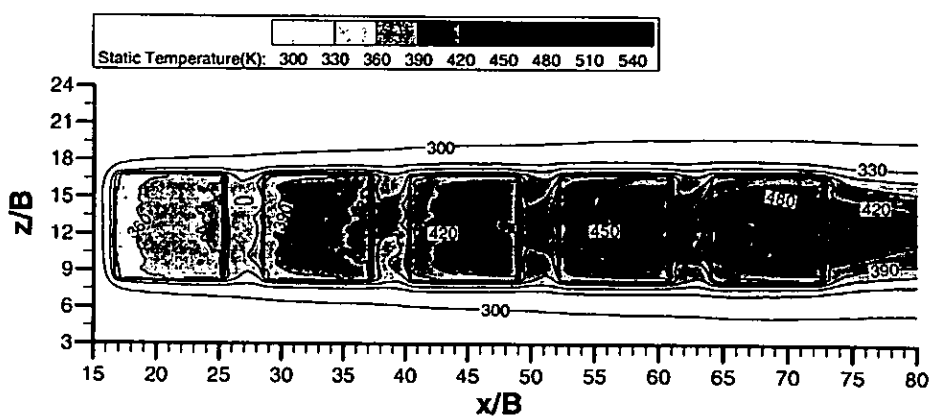
ผลการคำนวณนี้ทำให้สรุปได้ว่าการเพิ่มค่าพารามิเตอร์  $S/W$  เพียงอย่างเดียวนั้นส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชิพแต่ยังไม่สูงมากนัก เมื่อเทียบกับการเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์และการเพิ่มค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของแบบจำลองการไหล และการเพิ่มค่าพารามิเตอร์  $S/W$  จำเป็นต้องใช้พื้นที่ของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มากขึ้นด้วย

### 4.3 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในการไหลสามมิติ

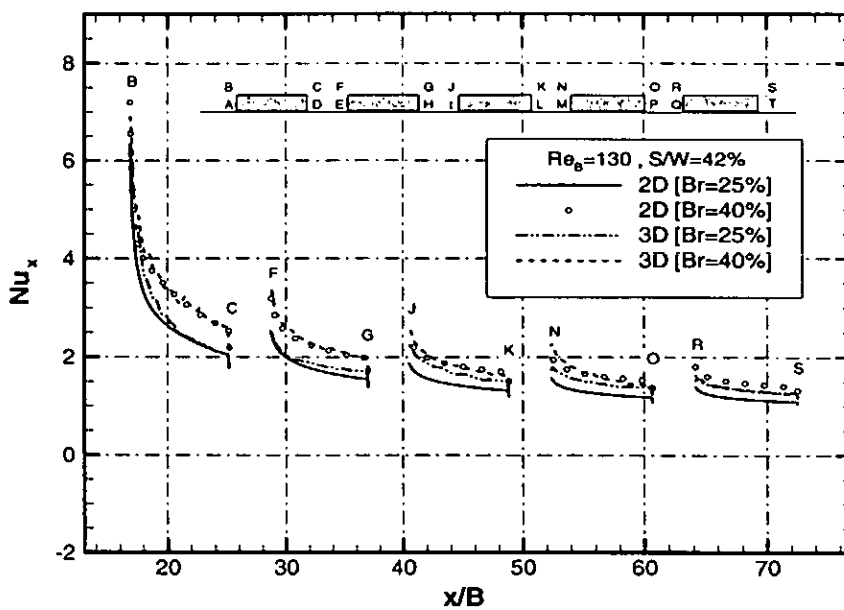
จากผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์ในการไหล 2 มิติที่ผ่านมา ทำให้เข้าใจถึงสนามการไหลในปัญหาต่างๆ ได้ดี แต่การศึกษาใน 2 มิติ พบว่ามีข้อจำกัดที่ไม่สามารถแสดงในเห็นถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชิพที่สอดคล้องกับปัญหาจริงได้ดีนัก ซึ่งเป็นธรรมชาติของปัญหาการไหลใน 2 มิติ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทำการคำนวณผลกระทบค่าพารามิเตอร์ภายในแบบจำลองการไหล 3 มิติเพิ่มเติม เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่ขาดหายไปจากการคำนวณใน 2 มิติ ซึ่งเป็นการทำให้ผลการวิเคราะห์ที่เกิดขึ้นมีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น สำหรับการคำนวณหาผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองการไหล 3 มิติ นี้ ได้เลือกทำการคำนวณในกรณีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของแบบจำลองการไหล โดยใช้ข้อมูลและเงื่อนไขต่างๆ เช่นเดียวกับการคำนวณในแบบจำลองการไหล 2 มิติ ดังที่ได้แสดงไว้ในตาราง 9 และใช้ขนาดของแบบจำลองการไหล ดังแสดงไว้ในภาพประกอบ 7 ของบทที่ 3

#### 4.3.1 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของแบบจำลองการไหล

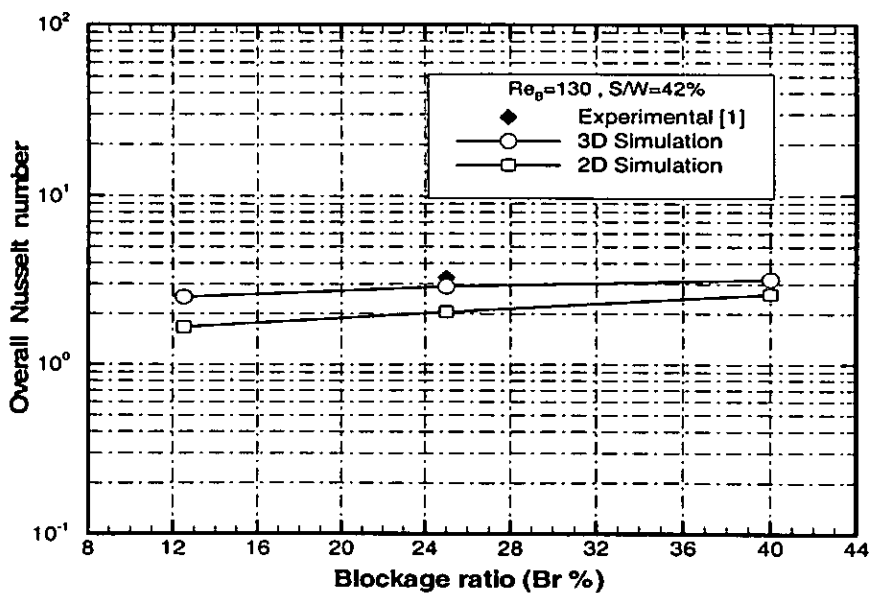
ในภาพประกอบ 40 (A) ถึง (C) แสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิบนผนังชิพในระนาบ  $x-z$  ที่กรณี 12.5%, 25%, 40% ตามลำดับ ซึ่งสังเกตพบว่าชิพตัวที่อยู่ในตำแหน่งด้านท้ายของแบบจำลองการไหลนั้น มีการรวมตัวของอุณหภูมิจากการพาความร้อนของชิพตัวต้นทาง ซึ่งเกิดจากลักษณะการจัดวางชิพในแบบแถวเรียงตรงกัน และพบว่าการสะสมของอุณหภูมิบนผนังชิพมีค่าน้อยลงเมื่อค่า  $B_r$  มีค่าเพิ่มขึ้น และในภาพประกอบ 40 นี้ได้แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิบนผนังชิพในระนาบ  $x-z$  มีลักษณะเป็นชั้นๆ และค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดผนังด้านบนบนของชิพ ซึ่งเป็นคุณลักษณะหนึ่งในสภาวะการไหลคงตัว สำหรับในภาพประกอบ 41 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่จากแบบจำลองการไหล 2 มิติและ 3 มิติ ซึ่งพบว่าในชิพตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 4 จากแบบจำลองไหล 3 มิติที่กรณี 25% และ 40% มีการกระจายตัวที่สูงกว่าแบบจำลองการไหล 2 มิติ ณ ค่า  $B_r$  เดียวกัน ทั้งนี้เพราะแบบจำลองไหล 3 มิติ สามารถกระจายอุณหภูมิไปยังพื้นที่ด้านข้างได้ แต่ในชิพตัวที่ 5 ซึ่งเป็นชิพที่ถูกจัดวางไว้ในตำแหน่งด้านท้ายของแบบจำลองการไหล 3 มิติ นั้นพบว่าในกรณี 25% และ 40% มีตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ใกล้เคียงกัน และพบว่ามีค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่น้อยกว่าแบบจำลองการไหล 2 มิติที่กรณี 40% เป็นเพราะธรรมชาติของการไหลใน 3 มิติ ที่มีสนามการไหลขนาดใหญ่ทำให้ความเร็วสามารถไหลได้ในหลายทิศทางและถูกทำให้ช้าลงจากชิพตัวต้นทาง ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชิพตัวที่ 5 ไม่ดีขึ้น

(A)  $Br = 12.5\%$ (B)  $Br = 25\%$ (C)  $Br = 40\%$ 

ภาพประกอบ 40 การกระจายตัวของอุณหภูมิในระนาบ  $x-z$  ที่ค่า  $Re_b = 130$ ,  $S/W = 42\%$



ภาพประกอบ 41 เปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ของการคำนวณผลกระทบบค่า  $Br$  ในการไหลสองมิติและสามมิติ



ภาพประกอบ 42 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลท์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบบค่า  $Br$

สำหรับในภาพประกอบ 42 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงค่า  $Br$  ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนใน 3 มิติ พบว่าการเพิ่มค่า  $Br$  ในสภาวะการไหลคงตัวมีผลทำให้ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้น โดยสอดคล้องกับผลการคำนวณใน 2 มิติที่ผ่านมาและงานวิจัยที่มีลักษณะปัญหาใกล้เคียง<sup>(15,22-24)</sup> นั่นคือ ถ้าค่า  $Br$  เพิ่มขึ้น 50% และ 69% ชิพมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมเพิ่มขึ้น 13.2% และ 21.3% ตามลำดับ ที่ค่า  $Re_b = 130, S/W = 42%$  ในภาพประกอบ 42 ได้พบว่าการคำนวณใน 3 มิติ มีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมแตกต่างจากการทดลอง<sup>(1)</sup> ประมาณ 11.7% ส่วนการคำนวณใน 2 มิติและ 3 มิติ ให้ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมแตกต่างกันโดยประมาณ 33.7% 30% และ 18.4% ที่ค่า  $Br$  เท่ากับ 12.5%, 25% และ 40% ตามลำดับ ซึ่งผลของความแตกต่างนี้แสดงว่าที่ค่า  $Br$  สูงๆ นั้น การถ่ายเทความร้อนใน 2 มิติและ 3 มิติ มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน เนื่องจากแบบจำลองการไหล 3 มิติ มีผลของค่าอัตราส่วนความสูงของแบบจำลองการไหลต่อความกว้างของแบบจำลองการไหล ( $H/L_z$ ) กล่าวคือ เมื่อเพิ่มค่า  $Br$  เปรียบเสมือนเป็นการบีบให้กระแสการไหลไหลออกไปด้านข้าง ( $L_z$ ) ทำให้ชิพมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดน้อยลง ซึ่งแตกต่างจากแบบจำลองการไหล 2 มิติ การเพิ่มค่า  $Br$  ทำให้ความเร็วบนผนังของชิพสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยรวมของชิพดีขึ้นดังแสดงในภาพประกอบ 42 ดังนั้นถ้าค่า  $H$  มีค่าน้อยกว่า  $L_z$  มากๆ สามารถพิจารณาเป็นการถ่ายเทความร้อนใน 2 มิติได้<sup>(25)</sup> ผลการคำนวณการไหล 3 มิติในสภาวะการไหลคงตัวนี้ สรุปได้ว่าการเพิ่มค่า  $Br$  สามารถช่วยส่งเสริมให้อากาศทำการถ่ายเทความร้อนบนชิพได้ดีขึ้น ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับการคำนวณใน 2 มิติ

#### 4.4 สรุปผลท้ายบท

1 การศึกษาคุณลักษณะการไหลในสภาวะการไหลคงตัวและไม่คงตัว พบว่าเมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเข้าใกล้ประมาณ 500 การไหลได้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปสู่สภาวะการไหลไม่คงตัวและการไหลในสภาวะไม่คงตัวได้แสดงความเด่นชัดมากขึ้นเมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 700

2 สำหรับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ในสภาวะการไหลคงตัวจากแบบจำลองการไหล 2 มิติ พบว่าสามารถทำให้ชิพมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมสูงขึ้น หมายถึงมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีผลต่อค่าความดันตกคร่อมที่สูงขึ้นไปพร้อมๆ กัน สำหรับผลกระทบของค่า  $Br$  ในสภาวะการไหลคงตัว พบว่าการเพิ่มค่าพารามิเตอร์นี้สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชิพได้เช่นกัน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ  $Br$  เป็นการเพิ่มความเร็วของกระแสการไหลภายในแบบจำลองให้สูงขึ้น ขณะที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์คงที่ แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มค่า  $Br$  นี้ควรอยู่ในขอบเขตที่ไม่มากเกินไปการเพิ่มมากเกินไป

จะเป็นตัวลดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชิพ เพราะทำให้ปริมาณอากาศที่ไหลเข้าสู่บริเวณ การถ่ายเทความร้อนลดน้อยลงและต้องใช้พลังงานเพื่อขับเคลื่อนของไหลมากขึ้นตามไปด้วย ส่วนผลกระทบของค่า  $S/W$  ในสภาวะการไหลคงตัว ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่มักพบได้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปนั้น การเพิ่มค่า  $S/W$  สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชิพได้แต่ไม่มากนัก อีกทั้งการเพิ่มค่า  $S/W$  ให้มีค่ามากๆ มักถูกจำกัดด้วยพื้นที่ของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

3 สำหรับการคำนวณอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์บนแบบจำลองการไหล 3 มิติ ในกรณีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของแบบจำลองการไหล ในสภาวะการไหลคงตัว พบว่าการเพิ่มค่าพารามิเตอร์นี้ทำให้ชิพมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลท์โดยรวมเพิ่มขึ้น 13.2% และ 21.3% เมื่อ  $Br$  เพิ่มขึ้น 50% และ 69% ตามลำดับ และผลการคำนวณใน 3 มิติและ 2 มิติมีแนวโน้มของค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลท์โดยรวมที่สอดคล้องกัน

## บทที่ 5

### การศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ในสภาวะการไหลไม่คงตัว

สำหรับในบทนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ ที่มีผลต่อพฤติกรรมของการไหลและการถ่ายเทความร้อนของซีพในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ในสภาวะการไหลไม่คงตัว ซึ่งสภาวะการไหลไม่คงตัวนี้มักเกิดกับงานระบายความร้อนจริงที่ใช้อากาศเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนในช่วงความเร็วสูง ซึ่งมักทำให้การไหลเกิดการเปลี่ยนแปลงจากการไหลที่มีเสถียรภาพไปสู่การไหลที่ไร้เสถียรภาพได้ง่าย ดังที่ได้ทำการศึกษาไว้ในบทที่ 4 สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการศึกษาในบทนี้ ได้แก่ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ( $Re_b$ ) ค่าอัตราส่วนความสูงของซีพต่อความสูงของแบบจำลองการไหล ( $Br = B/H$ ) ค่าอัตราส่วนระยะห่างของซีพต่อความยาวของซีพ ( $S/W$ ) โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 หัวข้อ ดังนี้

หัวข้อ 5.1 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในการไหลสองมิติ

หัวข้อ 5.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในการไหลสามมิติ

หัวข้อ 5.3 สรุปผลท้ายบท

#### 5.1 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในการไหลสองมิติ

ในการคำนวณหาผลกระทบที่มีต่อพฤติกรรมของการไหลและการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในปัญหาการไหล 2 มิติภายใต้สภาวะการไหลไม่คงตัว ได้ใช้ขนาดของแบบจำลองการไหล ดังแสดงในภาพประกอบ 8 ในบทที่ 3 สำหรับแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลขในการประมาณเทอมการพาและเทอมการแพร่ได้เลือกใช้วิธีควิก (QUICK) กระบวนการหาคำตอบใช้วิธีซิมเปิล (SIMPLE) ในการคำนวณภายใต้สภาวะไม่คงตัวเทอมที่ขึ้นอยู่กับเวลา ใช้วิธีของอิมพลีซิทอันดับที่สอง (Second order implicit) ซึ่งวิธีของอิมพลีซิทนี้เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขที่มีความเสถียรแบบไม่มีเงื่อนไข (Unconditionally stable)<sup>(26,27)</sup> ทำให้สามารถใช้ค่าของช่วงเวลา (Time step) ได้สูงกว่าวิธีของเอ็กซ์พลีซิท (Explicit) สำหรับการคำนวณเชิงตัวเลขในกรณีสภาวะการไหลไม่คงตัวนี้ ผลเฉลยที่ได้ในขั้นต้นอยู่ในรูปค่าเวลาชั่วขณะ (Instantaneous values) ซึ่งจะถูกทำให้อยู่ในรูปค่าเฉลี่ยต่อเวลาของการไหล (Time-averaged flow) เพื่อหาค่าอ้างอิงสำหรับการวิเคราะห์ โดยใช้วิธีการคำนวณทางสถิติในรูปของค่าเฉลี่ย R.M.S (Root Mean Square)

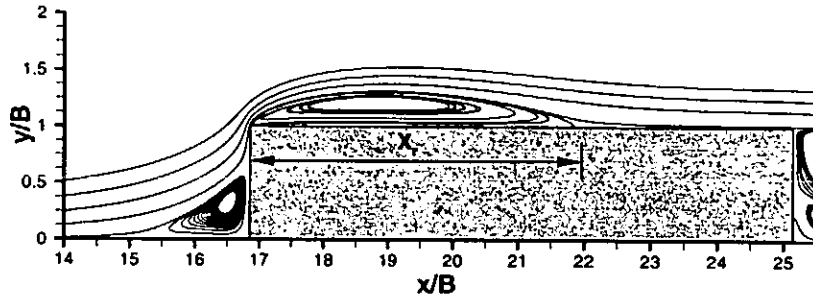
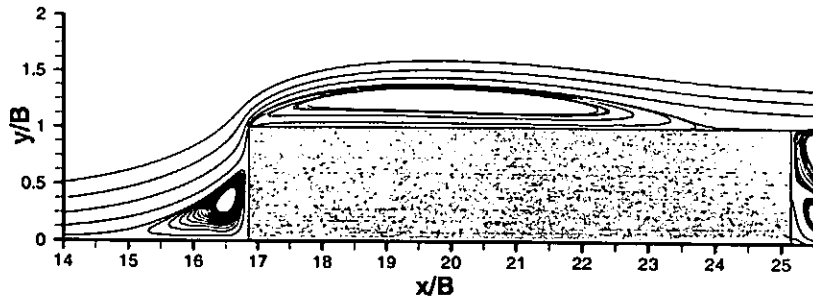
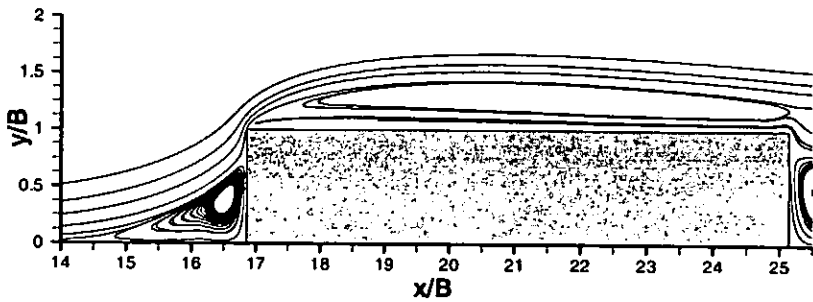
### 5.1.1 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขเรย์โนลด์

การคำนวณหาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ที่มีผลต่อพฤติกรรม การไหลและการถ่ายเทความร้อนในสภาวะการไหลไม่คงตัวนี้ ได้กระทำการคำนวณในช่วง 500 ถึง 1000 โดยกำหนดข้อมูลและเงื่อนไขต่างๆ ดังแสดงในตาราง 11

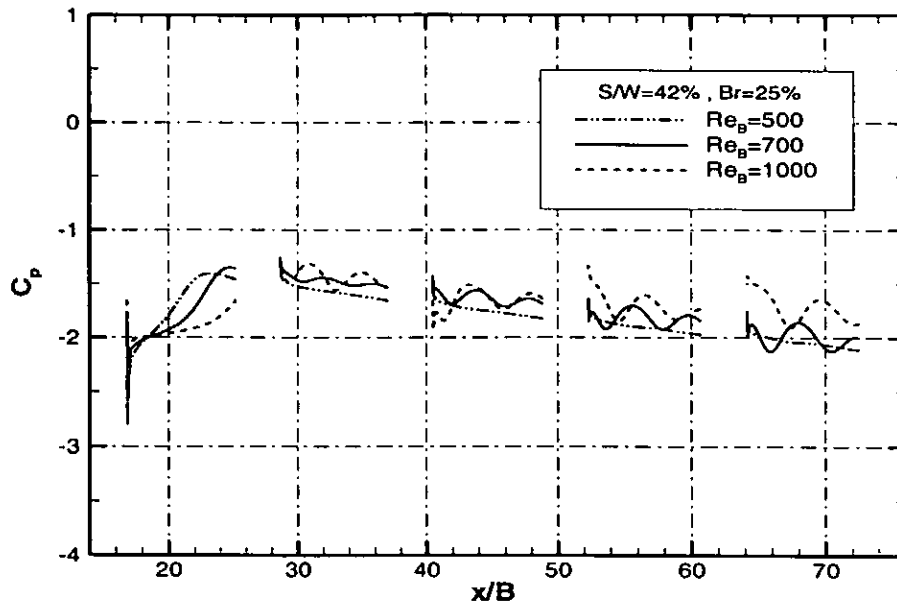
ตาราง 11 ข้อมูลการคำนวณค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในสภาวะการไหลไม่คงตัว

$Re_B$	$S/W(\%)$	$Br(\%)$
500 - 1000	42	25

จากภาพประกอบ 43 (A), (B) และ (C) ซึ่งแสดงเส้นทางการไหลผ่านของชีพตัวที่ 1 ในรูป ค่าเฉลี่ยต่อเวลาที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 500, 700 และ 1000 ตามลำดับ พบว่าเมื่อกระแสการไหล เคลื่อนมากระทบชีพตัวที่ 1 ได้เกิดการไหลย้อนกลับ(Backflow) เมื่อรวมกับการไหลในทิศทางหลักแล้ว ก่อให้เกิดการไหลบรจบนผนังด้านบนของชีพ โดยตำแหน่งที่กระแสการไหลตกกระทบผนังของชีพ มีค่าความเค้นเฉือน (Shear stress) เป็นศูนย์ ในภาพประกอบ 43 นี้บ่งบอกว่าขนาดของการไหล บรจบนผนังชีพเป็นฟังก์ชันของค่าตัวเลขเรย์โนลด์ นั่นคือ การเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์ทำให้ขนาดของ การไหลบรจบนผนังเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สำหรับในภาพประกอบ 44 เป็นภาพแสดงการกระจายตัว ของค่าสัมประสิทธิ์ความดันชั่วขณะบนผนังชีพ สังเกตที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 500 ซึ่งอยู่ในช่วง เปลี่ยนแปลงคุณลักษณะการไหล พบว่าการกระจายตัวของความดันบนผนังชีพตัวที่ 2, 3, 4 และ 5 คล้ายกับการไหลในสภาวะการไหลคงตัว แต่ชีพตัวที่ 1 นั้นมีลักษณะที่แตกต่างไป คือ หลังจากเกิด การไหลแตกแยกแล้วความดันไม่สามารถกลับเพิ่มขึ้นมาได้ทันที เนื่องจากผลของการไหลบรจบน ผนังชีพ สำหรับการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังชีพตัวที่ 2, 3, 4 และ 5 ของค่า ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 700 และ 1000 มีลักษณะแตกต่างจากกรณี 500 และการไหลในสภาวะคงตัว คือ มีการกระจายตัวที่ไม่ราบเรียบมีการสั่นหรือการแกว่งตลอดความยาวบนผนังของชีพ ซึ่งเป็นคุณ ลักษณะเฉพาะของสภาวะการไหลไม่คงตัว

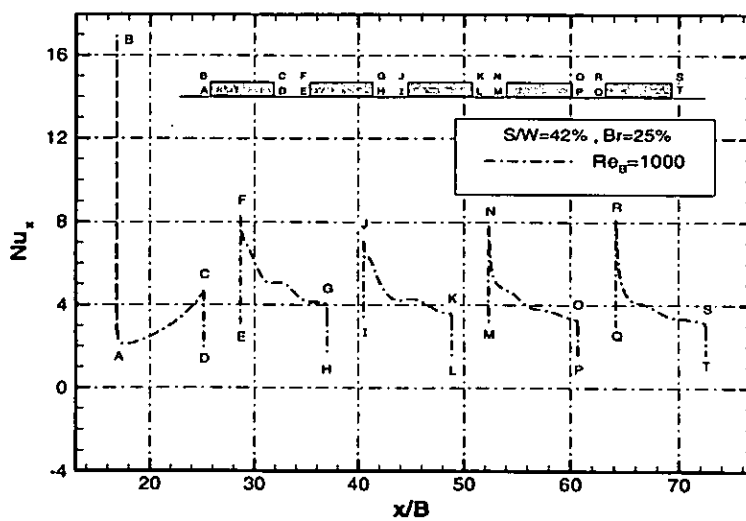
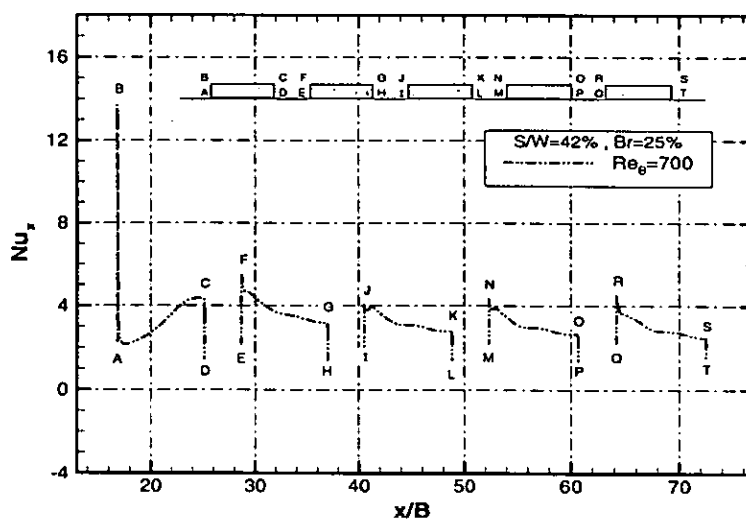
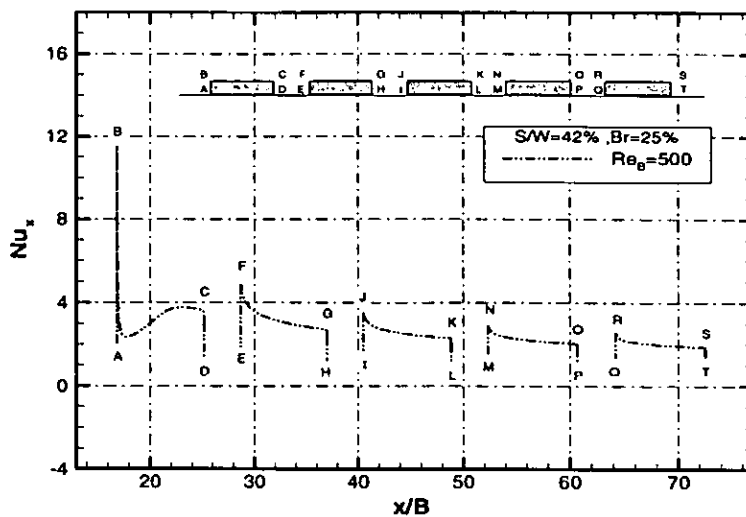
(A)  $Re_B = 500$ (B)  $Re_B = 700$ (C)  $Re_B = 1000$ 

ภาพประกอบ 43 เส้นทางการไหลของของไหลที่ผ่านขีพตัวที่หนึ่งในรูปค่าเฉลี่ยของเวลาที่ค่า  
 $Br = 25\%$  ,  $S/W = 42\%$

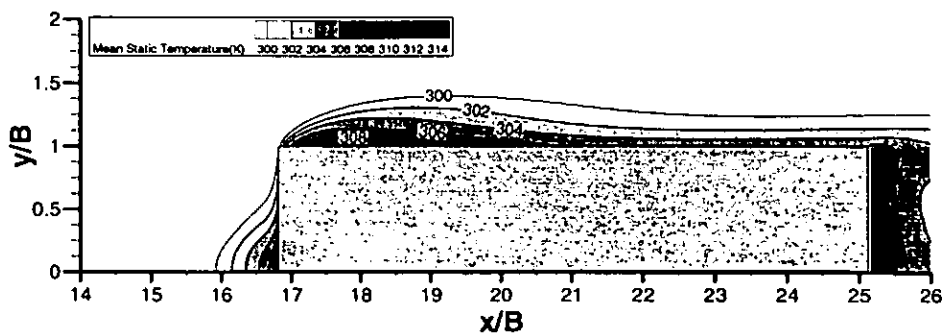
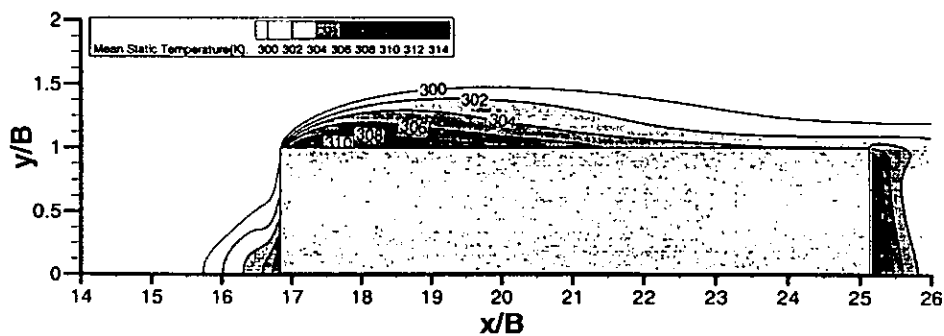
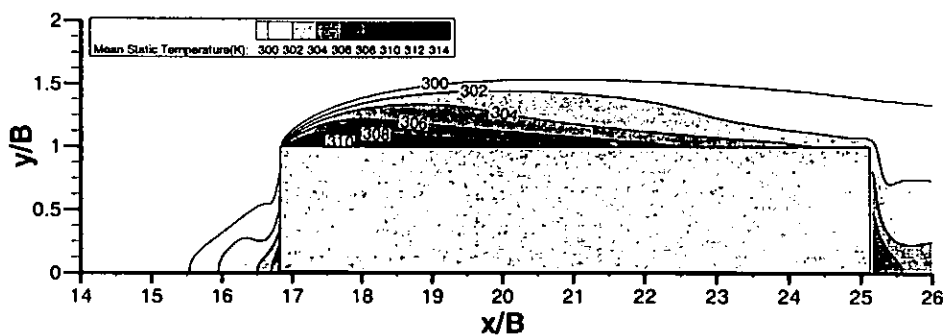


ภาพประกอบ 44 ค่าสัมประสิทธิ์ความดันชั่วขณะของการคำนวณผลกระทบบค่า  $Re_b$

สำหรับในภาพประกอบ 45 แสดงการกระจายตัวของค่าตัวเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ในสภาวะชั่วขณะที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 500, 700 และ 1000 สังเกตที่จุด B-C ซึ่งเป็นตำแหน่งผนังด้านบนของซีพตัวที่ 1 ของทั้ง 3 กรณี พบว่ามีลักษณะการกระจายตัวของค่าตัวเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ลดน้อยลงตามการเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ทั้งนี้เนื่องจากผลของการไหลบรรจบที่มีขนาดใหญ่ทำให้มีการสะสมอุณหภูมิบนผนังของซีพ ดังแสดงในภาพประกอบ 46 ซึ่งการไหลที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ 500 มีชั้นขอบความร้อนของซีพตัวที่ 1 ค่อนข้างหนาที่ตำแหน่ง  $x/B = 19$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดการไหลบรรจบขึ้นและชั้นขอบความร้อนได้เริ่มมีความหนาลดลงหลังจากผ่านตำแหน่ง  $x/B = 19$  แต่การไหลที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ 700 นั้นชั้นขอบความร้อนมีความหนาเกือบตลอดความยาวของซีพ โดยที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ 1000 ชั้นขอบความร้อนมีความหนาตลอดความยาวของซีพ ซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อนของซีพตัวที่ 1 ต่ำลง ส่วนการกระจายตัวของค่าตัวเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ในซีพตัวที่ 2, 3, 4 และ 5 ณ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 500 ซึ่งเป็นค่าที่เริ่มเข้าสู่การไหลในสภาวะไม่คงตัวพบว่าการกระจายตัวของค่าตัวเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ค่อนข้างราบเรียบ แต่ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 700 และ 1000 พบการกระจายตัวที่ไม่ราบเรียบเป็นเพราะการไหลที่ตัวเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 700 ขึ้นไปนั้น ได้เข้าสู่สภาวะการไหลไม่คงตัวเต็มที่ และเมื่อพิจารณาในภาพประกอบ 47 ซึ่งแสดงค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ในซีพแต่ละตัว สังเกตซีพตัวที่ 2 ณ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ทั้ง 3 กรณี พบว่ามีแนวโน้มที่แตกต่างกันโดยค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 500 มีแนวโน้มของค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์คล้ายกับการไหลในสภาวะคงตัว กล่าวคือ มีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์สูงสุดที่ซีพตัวที่ 1 และต่ำสุดที่ซีพตัวที่ 5 ซึ่งแสดงว่าการไหลบรรจบ

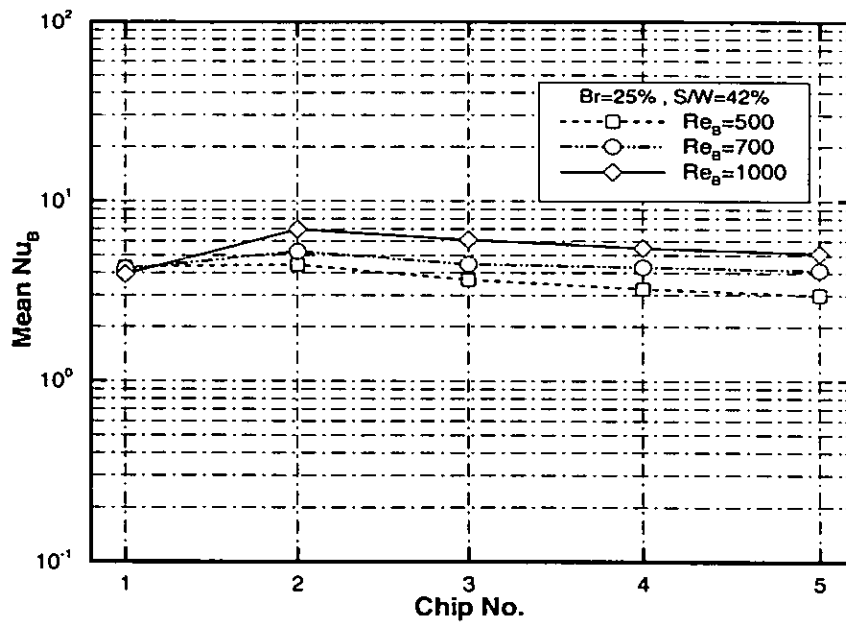


ภาพประกอบ 45 ค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ของการคำนวณผลกระทบบค่า  $Re_b$

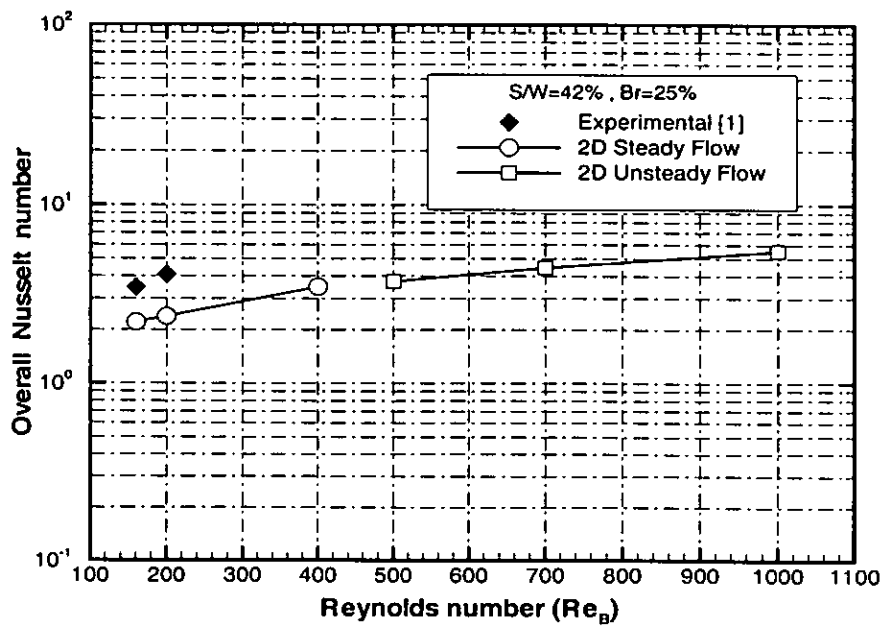
(A)  $Re_B = 500$ (B)  $Re_B = 700$ (C)  $Re_B = 1000$ 

ภาพประกอบ 46 การกระจายตัวของอุณหภูมิบนชีพตัวที่หนึ่งในรูปค่าเฉลี่ยต่อเวลาที่ค่า  $Br = 25\%$

$$S/W = 42\%$$



ภาพประกอบ 47 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลท์ของชิพแต่ละตัวของการคำนวณผลกระทบบค่า  $Re_B$



ภาพประกอบ 48 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลท์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบบค่า  $Re_B$

บนผนังซีพตัวที่ 1 ยังมีอิทธิพลน้อยอยู่ แต่ในกรณี 700 และ 1000 กลับมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์สูงสุดที่ซีพตัว 2 ซึ่งผลการคำนวณนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Meinders, E.R.; et al.<sup>(4)</sup> ที่ทำการทดลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนของซีพจำนวน 6 ตัว พบว่าที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูงมากนั้นซีพตัวที่ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงกว่าซีพตัวที่ 1 เนื่องจากผนังด้านบนของซีพตัวแรกมีการสะสมอนุภาคนอกจากการเกิดการไหลบรรจุบนผนังซีพ

พิจารณาในภาพประกอบ 48 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ พบว่าการไหลในสภาวะการไหลคงตัวมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์โดยรวมต่ำกว่าการไหลเมื่อเข้าสู่สภาวะไม่คงตัว แต่อย่างไรก็ตามการไหลทั้งสองมีแนวโน้มของค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์โดยรวมเหมือนกัน กล่าวคือ มีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์โดยรวมเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ผลจากการคำนวณทำให้สรุปได้ว่าการเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์ให้มีค่าสูงมากๆ ซึ่งทำให้เกิดการไหลที่ไร้เสถียรภาพหรือสภาวะการไหลแบบไม่คงตัว ทำให้มีการส่งถ่ายโมเมนตัมและพลังงานมากกว่าการไหลในสภาวะคงตัว และส่งผลดีต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนโดยรวมของซีพ ซึ่งถ้าพิจารณาเพิ่มจากค่าตัวเลขเรย์โนลด์ 160 เป็น 1000 ซีพมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์โดยรวมเพิ่มขึ้นประมาณ 60% แต่การเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์มากเกินไปทำให้ซีพตัวที่ 1 มีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์ลดลงโดยแปรผันตรงกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น ควรพิจารณาจัดวางซีพที่มีค่าพลาซซ์ความร้อนน้อยไว้ในตำแหน่งของซีพตัวที่ 1 เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการถ่ายเทความร้อน ณ บริเวณนี้

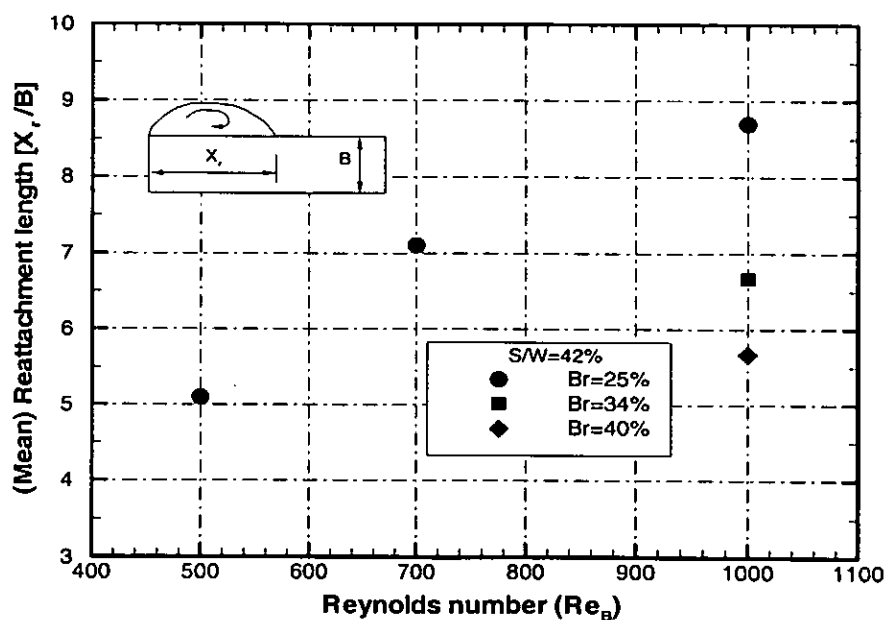
### 5.1.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความสูงของซีพต่อความสูงของแบบจำลองการไหล

การคำนวณหาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความสูงของซีพ ต่อความสูงของแบบจำลองการไหลในสภาวะการไหลไม่คงตัว ได้กระทำการคำนวณในช่วง 25% ถึง 40% สำหรับข้อมูลและเงื่อนไขต่างๆ ได้แสดงในตาราง 12

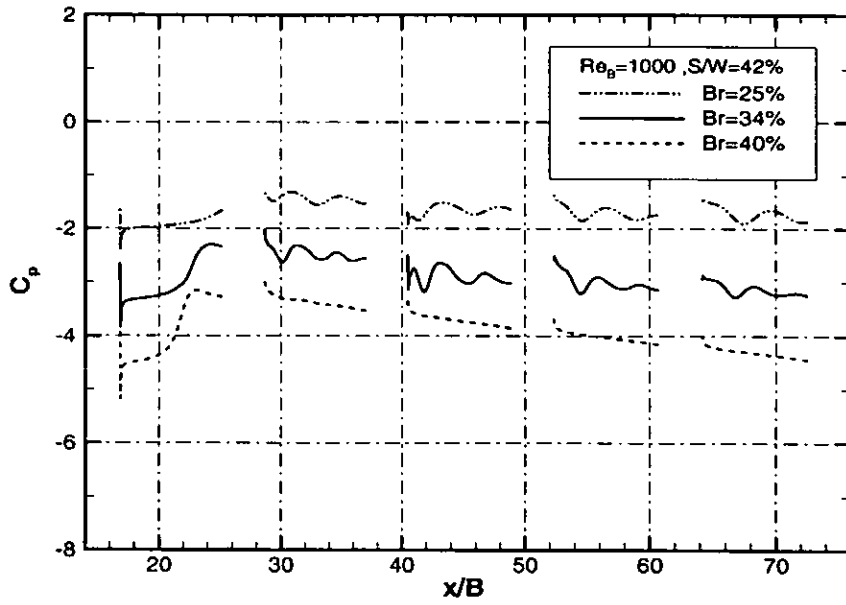
ตาราง 12 ข้อมูลการคำนวณค่าอัตราส่วนความสูงของซีพต่อความสูงของแบบจำลองการไหลในสภาวะการไหลไม่คงตัว

$Br(\%)$	$S/W(\%)$	$Re_B$
25 - 40	42	1000

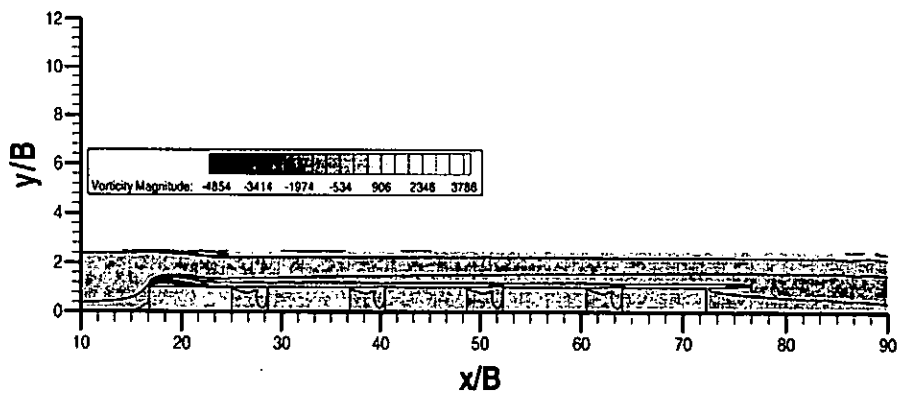
สำหรับผลจากการเปลี่ยนแปลงค่า  $Br$  ในสภาวะการไหลไม่คงตัว พบว่านอกจากการเพิ่มค่า  $Br$  ทำให้ความเร็วภายในแบบจำลองการไหลสูงขึ้นแล้ว ดังที่ได้ทำการคำนวณในสภาวะการไหลคงตัวที่ผ่านมา ยังมีผลต่อขนาดของการไหลบรรจบบนผนังชีพตัวที่ 1 ดังแสดงในภาพประกอบ 49 โดยการเพิ่มค่า  $Br$  ทำให้การไหลบรรจบมีขนาดลดลง ถึงแม้การไหลมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูงก็ตาม แสดงว่าขนาดการไหลบรรจบบนผนังชีพเป็นฟังก์ชันทั้งของค่าตัวเลขเรย์โนลด์และค่า  $Br$  ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Djilai, N.<sup>(15)</sup> สำหรับผลการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์ความดันในกรณีการเปลี่ยนแปลงค่า  $Br$  ถูกแสดงในภาพประกอบ 50 ซึ่งพบว่าการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์ความดันในชีพตัวที่ 2, 3, 4 และ 5 ของกรณี 25% และ 34% มีการกระจายตัวที่ไม่ราบเรียบเกิดการสันตลอดความยาวบนผนังชีพ โดยมีความแตกต่างจากกรณี 40% ซึ่งพบการกระจายตัวค่อนข้างราบเรียบและเมื่อพิจารณาจากภาพประกอบ 51 (A) และ (B) ได้พบว่าการเพิ่มค่า  $Br$  เป็น 40% นั้นเป็นการหวังให้สภาวะไร้เสถียรภาพเกิดขึ้นช้าลงทำให้คุณลักษณะการไหลที่ค่า  $Br$  เท่ากับ 40% เกิดเป็นการไหลที่มีเสถียรภาพแม้ขณะการไหลมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูง และในภาพประกอบ 50 ยังบ่งบอกว่าการเพิ่มค่า  $Br$  ในสภาวะการไหลไม่คงตัว มีผลทำให้ค่าความชันของความดันของการไหลสูงขึ้น ทำให้มีผลต่อค่าความดันตกคร่อมของการไหล ซึ่งมีความสอดคล้องกับในสภาวะการไหลคงตัว



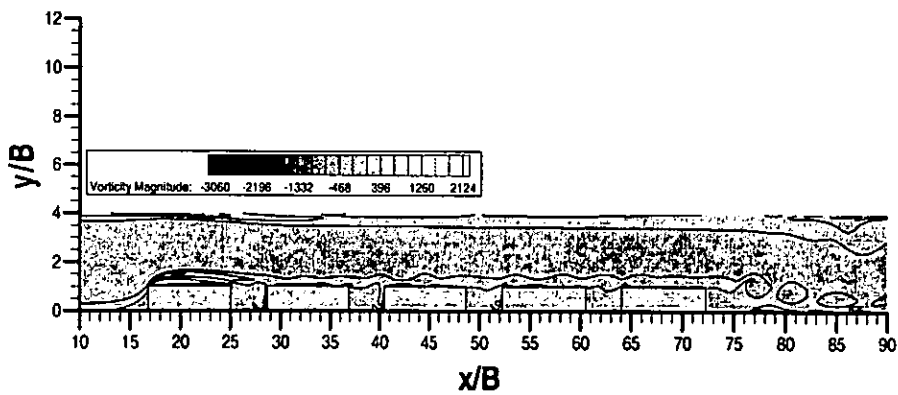
ภาพประกอบ 49 ขนาดของการไหลบรรจบบนผนังของชีพตัวที่หนึ่ง



ภาพประกอบ 50 ค่าสัมประสิทธิ์ความดันชั่วขณะของการคำนวณผลกระทบบค่า  $Br$

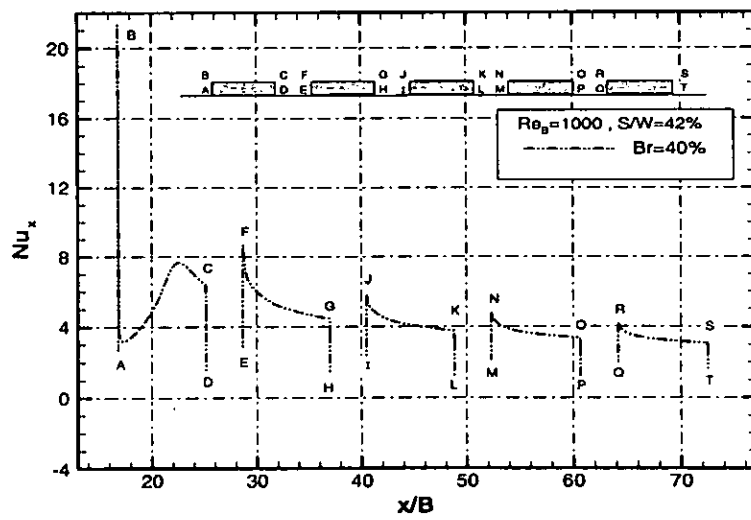
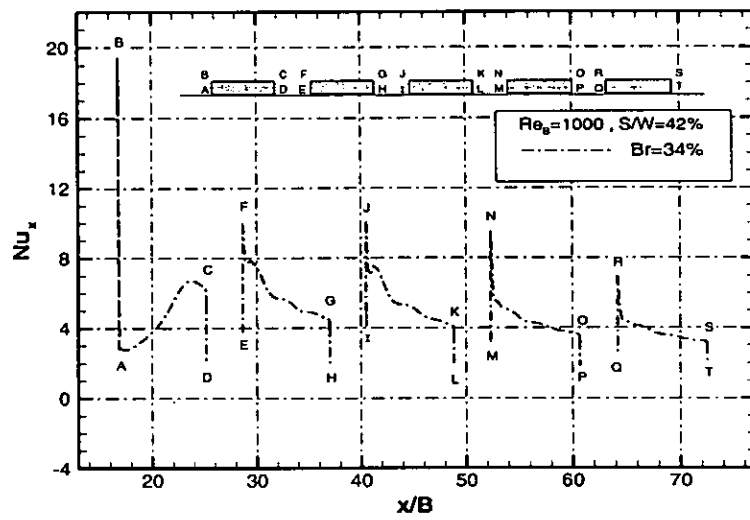
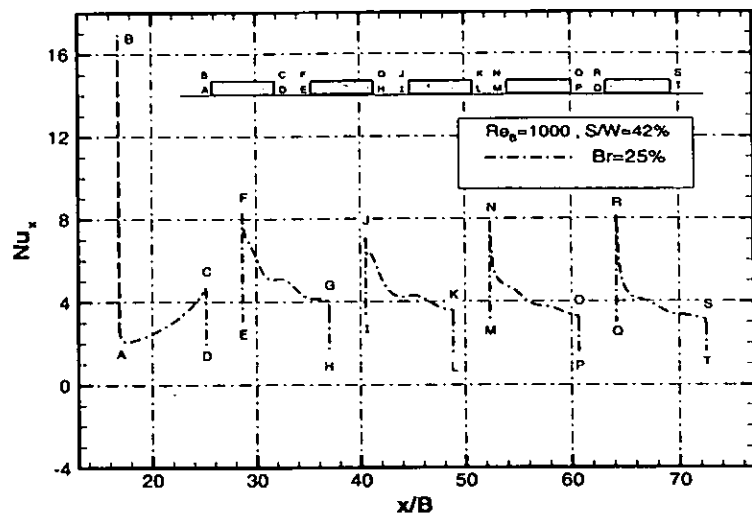


(A)  $Br = 40\%$

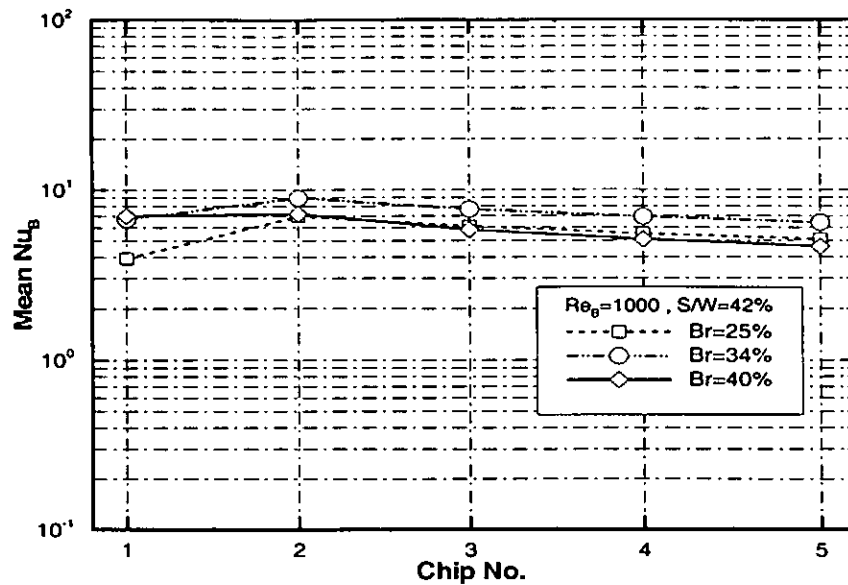


(B)  $Br = 25\%$

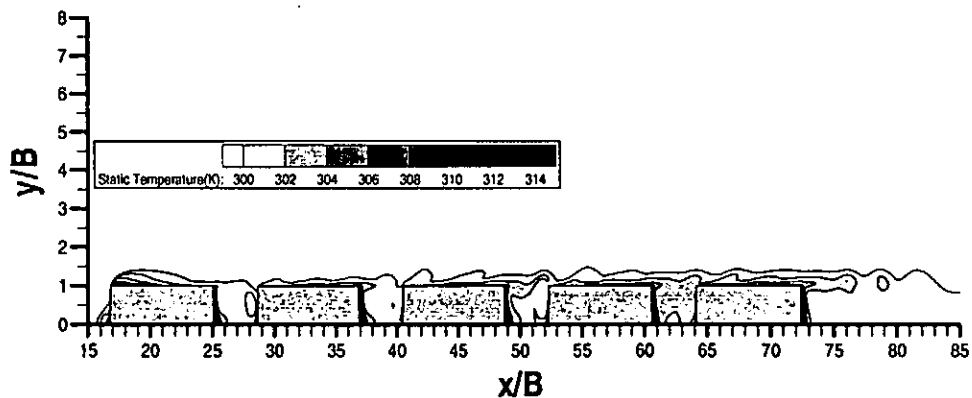
ภาพประกอบ 51 การไหลวนชั่วขณะที่ค่า  $Re_b = 1000$ ,  $S/W = 42\%$ ,  $t' = 969.0$



ภาพประกอบ 52 ค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉพาะที่ของการคำนวณผลกระทบค่า  $Br$



ภาพประกอบ 53 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลท์ของชิพแต่ละตัวของการคำนวณผลกระทบบค่า  $Br$



ภาพประกอบ 54 การกระจายตัวของอุณหภูมิช่วงเวลาที่  $Br = 34\%$ ,  $S/W = 42\%$ ,  $t' = 969.0$

สำหรับในภาพประกอบ 52 เป็นภาพแสดงการกระจายตัวของค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ในกรณี 25%, 34% และ 40% ที่เกิดจากอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่า  $Br$  ซึ่งพบว่าในชิพตัวที่ 1 ของกรณี 25% การกระจายตัวของค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่บนผนังชิพมีค่าลดลง แต่เมื่อทำการเพิ่มเป็นกรณี 34% และ 40% พบว่ามีการกระจายตัวที่ดีขึ้นตามลำดับทั้งนี้เนื่องจากผลของการไหลบรรจบบนผนังของชิพมีค่าลดลงทำให้ชิพตัวที่ 1 สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น และสำหรับในกรณี 40% นี้ยังพบว่าการกระจายตัวของค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ในชิพตัวที่ 2, 3, 4 และ 5 ค่อนข้างราบเรียบ

กว่ากรณี 25% และ 34% ซึ่งเป็นผลมาจากคุณลักษณะการไหลในสภาวะคงตัว และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความสามารถในการถ่ายเทความร้อนในแต่ละกรณีนั้น ดังแสดงในภาพประกอบ 53 สังเกตที่กรณี 25% การถ่ายเทความร้อนของชีพตัวที่ 2, 3, 4 และ 5 มีค่าน้อยกว่าที่กรณี 34% ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณในสภาวะการไหลคงตัว แต่เมื่อทำการเพิ่มค่า  $Br$  เป็นกรณี 40% การถ่ายเทความร้อนของชีพตัวที่ 2 ถึงตัวที่ 5 กลับมีค่าลดต่ำกว่ากรณี 25% และ 34% ซึ่งให้ผลตรงกันข้ามกับการคำนวณในสภาวะการไหลคงตัว ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มค่า  $Br$  ให้มีค่ามากขึ้น นั้นในที่นี้คือประมาณ 40% ทำให้คุณลักษณะการไหลเกิดการเปลี่ยนแปลงจากการไหลที่ไร้เสถียรภาพไปเป็นการไหลที่มีเสถียรภาพ ทำให้ไม่เกิดการเคลื่อนตัวของของไหลวน(Vortex) ที่อยู่ในชั้นขีดผิวของชีพที่จะรับและถ่ายเทความร้อนออกไปได้เท่าที่ควรจึงทำให้การเพิ่มค่า  $Br$  ที่กรณี 40% ส่งผลดีเฉพาะการถ่ายเทความร้อนของชีพตัวที่ 1 เท่านั้น แต่ในกรณีการไหลที่ค่า  $Br$  เท่ากับ 34% นั้นการถ่ายเทความร้อนเกิดจากการไหลของกระแสการไหลหลักร่วมกับการก่อตัวของของไหลวน ดังแสดงในภาพประกอบ 54 จึงทำให้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีกว่า ซึ่งการคำนวณมีความสอดคล้องกับศึกษาของ Suksangpanomrung, A<sup>(23)</sup> ที่พบว่าในสภาวะการไหลไม่คงตัวการเพิ่มค่า  $Br$  สูงๆ นั้นทำให้แท่งวัตถุทรงสี่เหลี่ยมมีการถ่ายเทความร้อนลดลง

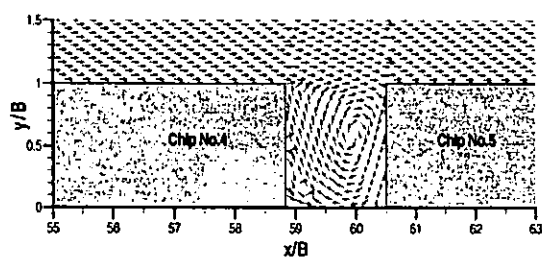
ผลจากการคำนวณค่า  $Br$  นี้สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มค่า  $Br$  ให้มีค่าสูงมากจนถึงจุดหนึ่ง คุณลักษณะการไหลจะเกิดการปรับเปลี่ยนจากการไหลในสภาวะไม่คงตัว ไปสู่การไหลในสภาวะคงตัว ทำให้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง ดังนั้น การเพิ่มค่าพารามิเตอร์นี้ควรอยู่ในขอบเขตที่ไม่มากเกินไปเพื่อทำให้เกิดการไหลที่ไร้เสถียรภาพและมีการก่อตัวของของไหลวนเพื่อช่วยรับและพาความร้อนออกไป ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชีพโดยรวมดีขึ้น นั่นคือ ถ้าค่า  $Br$  เพิ่มขึ้น 26.4% ชีพมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมเพิ่มขึ้น 24.8% และถ้าให้ค่า  $Br$  เพิ่มขึ้น 37.5% ชีพมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมเพิ่มขึ้นเพียง 7.1% เท่านั้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มค่า  $Br$  ในสภาวะการไหลไม่คงตัวยังมีค่ามากกว่าในสภาวะการไหลคงตัว ณ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ 130 ประมาณ 67.6% และ 56.17% เมื่อค่า  $Br$  เพิ่มขึ้น 26.4% และ 37.5% ตามลำดับ

### 5.1.3 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระยะห่างของชีพต่อความยาวของชีพ

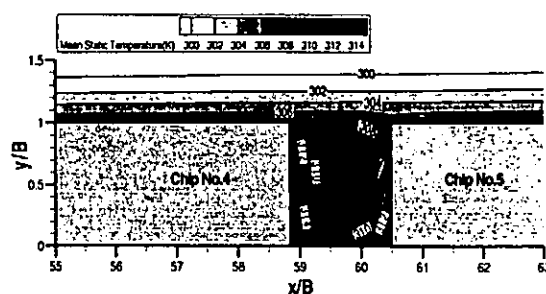
สำหรับการคำนวณผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลง ค่าอัตราส่วนระยะห่างของชีพต่อความยาวของชีพที่มีผลต่อพฤติกรรมกรไหลและการถ่ายเทความร้อน ซึ่งกระทำในช่วง 20% ถึง 71% โดยใช้ข้อมูลและเงื่อนไขต่างๆ ดังแสดงในตาราง 13

ตาราง 13 ข้อมูลการคำนวณค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิพต่อความยาวของชิพในสภาวะการไหลไม่คงตัว

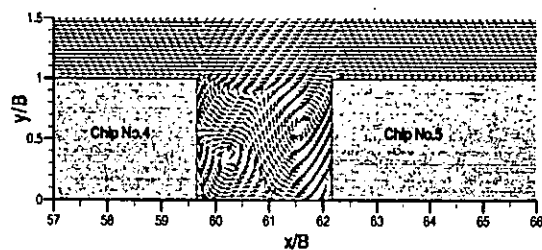
$S/W(\%)$	$Br(\%)$	$Re_B$
20-71	25	1000



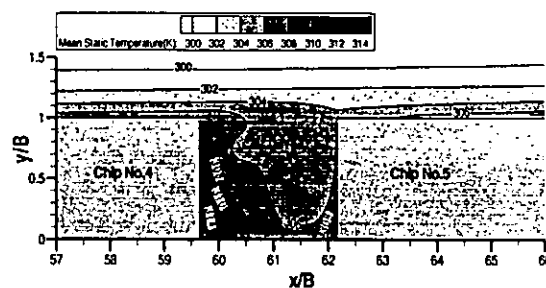
(A)  $S/W = 20\%$



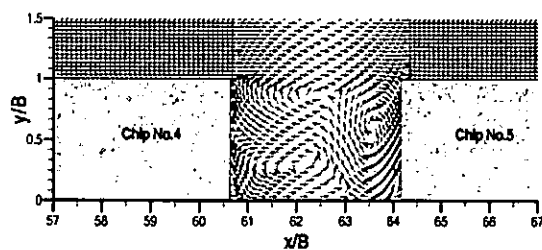
(B)  $S/W = 20\%$



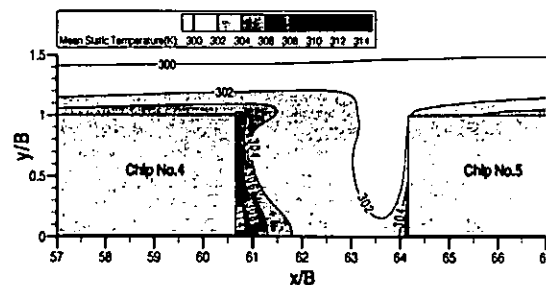
(C)  $S/W = 30\%$



(D)  $S/W = 30\%$

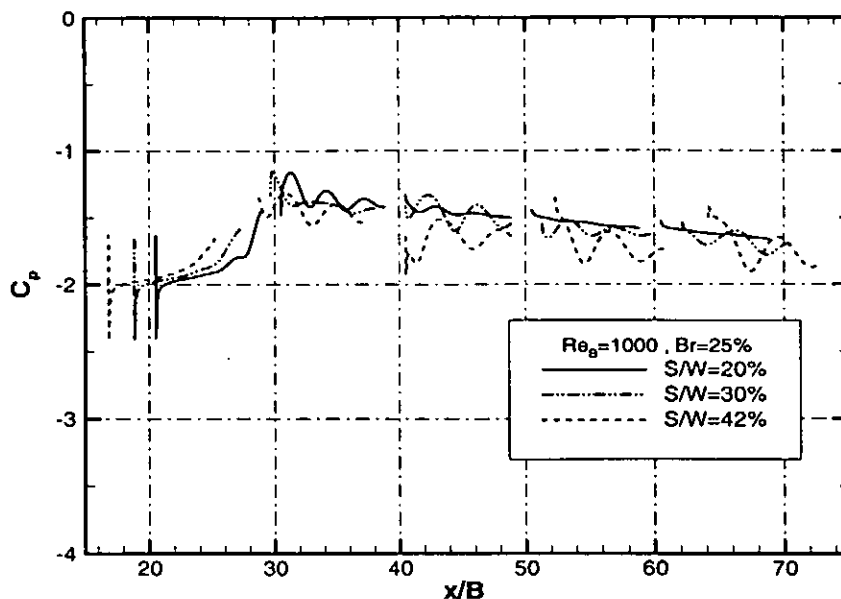


(E)  $S/W = 42\%$



(F)  $S/W = 42\%$

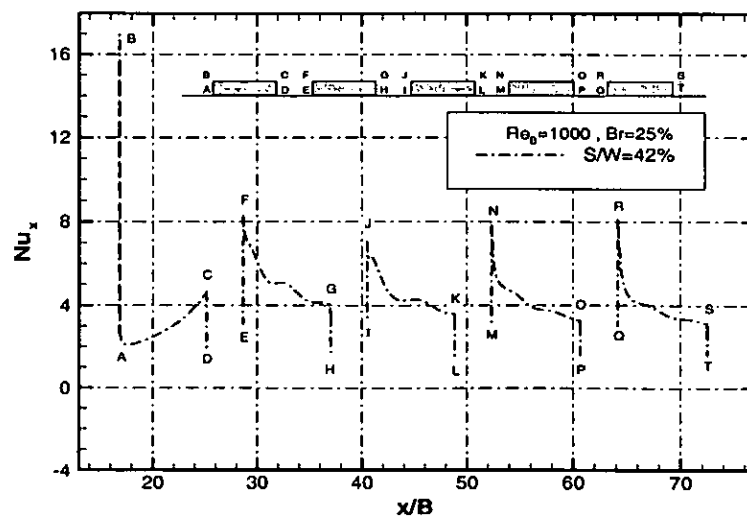
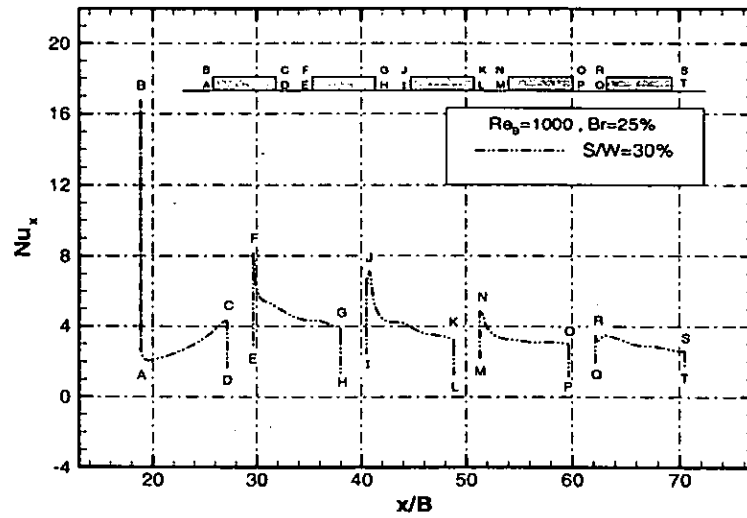
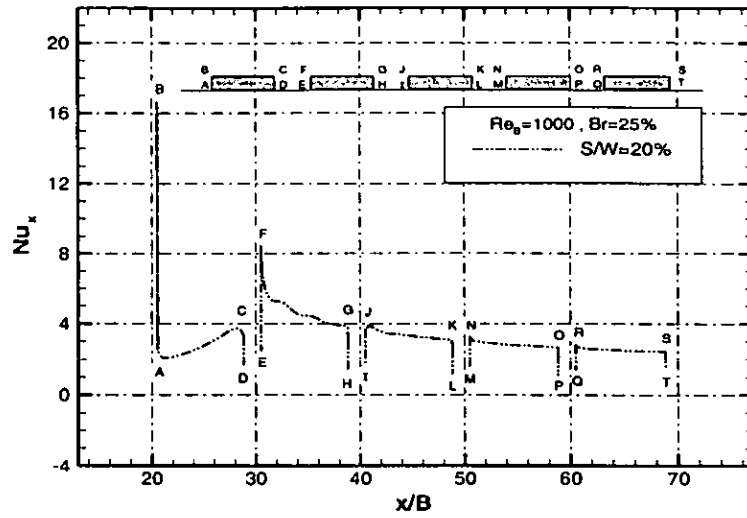
ภาพประกอบ 55 เวกเตอร์ความเร็วและการกระจายตัวของอุณหภูมิในพื้นที่ระหว่างชิพตัวที่สี่และตัวที่ห้าในรูปค่าเฉลี่ยต่อเวลาที่ค่า  $Re_B = 1000$ ,  $Br = 25\%$



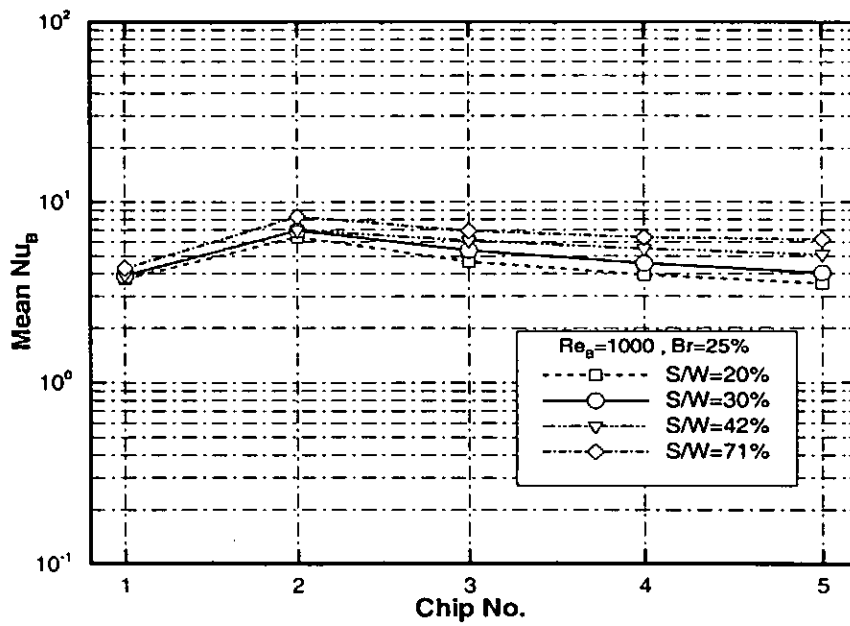
ภาพประกอบ 56 ค่าสัมประสิทธิ์ความดันชั่วขณะของการคำนวณผลกระทบค่า  $S/W$

ในภาพประกอบ 55 (A), (C) และ (E) ซึ่งเป็นภาพแสดงเวกเตอร์ความเร็วในพื้นที่ระหว่างชิพตัวที่ 4 และตัวที่ 5 ในรูปค่าเฉลี่ยต่อเวลาจากกรณี 20%, 30% และ 42% ตามลำดับ ซึ่งได้เกิดการหมุนวนของกระแสการไหลภายในพื้นที่ว่างระหว่างชิพทั้งสองตัวขึ้น โดยเกิดจุดศูนย์กลางของกระแสมหมุนวนจำนวน 2 จุด และหมุนในทิศทางตรงกันข้ามกัน ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่มีค่าสูง โดยการหมุนวนเช่นนี้ไม่พบจากการคำนวณในสภาวะการไหลคงตัว ซึ่งมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ และขนาดของการหมุนวนภายในพื้นที่นี้มีขนาดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มค่า  $S/W$  และพบว่า การหมุนวนที่เกิดขึ้นภายในพื้นที่ว่างระหว่างชิพไม่สามารถลดอุณหภูมิในช่องว่างระหว่างชิพได้ทั้งหมด ดังแสดงในภาพประกอบ 55 (B), (D), (F) สำหรับในภาพประกอบ 56 ได้แสดงผลของค่าสัมประสิทธิ์ความดัน ซึ่งพบว่าชิพตัวที่ 1 มีลักษณะการกระจายตัวที่คล้ายกันกับที่เกิดกับกรณีการศึกษาอิทธิพลของค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในสภาวะการไหลไม่คงตัว แต่ในชิพตัวที่ 2 ถึงตัวที่ 5 มีลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งการเพิ่มค่า  $S/W$  ทำให้เกิดการสั้นของค่าสัมประสิทธิ์ความดันอย่างรุนแรงตลอดความยาวของผนังชิพตัวที่ 2 ถึงตัวที่ 5 เพราะการเพิ่มพื้นที่ระหว่างชิพทำให้เกิดการไหลแตกแยก ณ มุมผนังชิพแต่ละตัวได้ง่ายขึ้นและทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของความดันสูง พร้อมทั้งทำให้เสถียรภาพของการไหลถูกรบกวนมากขึ้น

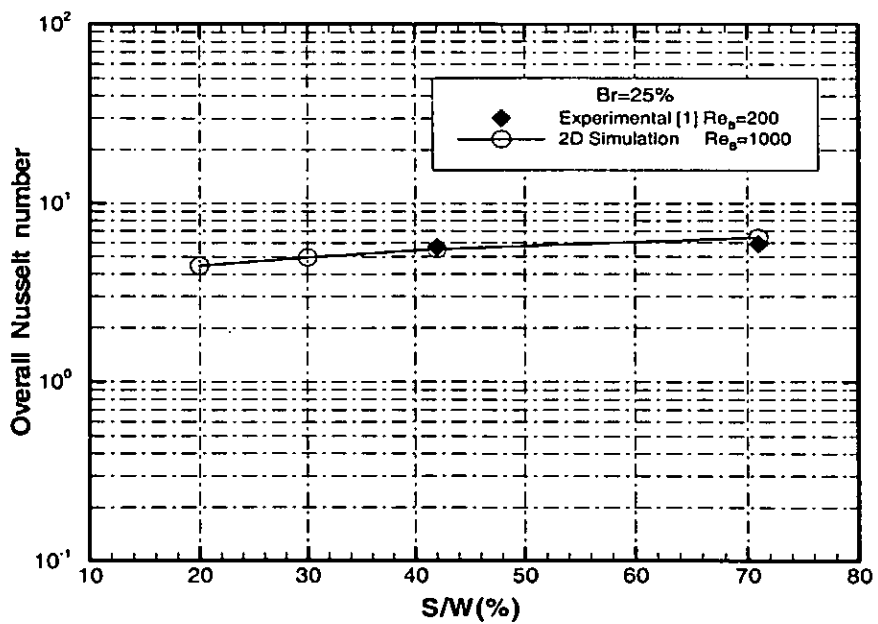
สำหรับผลในด้านการถ่ายเทความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์นี้ พิจารณาในภาพประกอบ 57 พบว่าการกระจายตัวของค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉพาะที่สำหรับในกรณี 20% มีลักษณะที่แตกต่างจากกรณี 30% และ 42% โดยมีการกระจายตัวที่น้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการคำนวณ



ภาพประกอบ 57 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ของการคำนวณผลกระทบบค่า  $S/W$



ภาพประกอบ 58 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลท์ของชิพแต่ละตัวของ การคำนวณผลกระทบบค่า  $S/W$



ภาพประกอบ 59 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลท์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบบค่า  $S/W$

ในสภาวะการไหลคงตัว และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์ของชิพแต่ละตัว พบว่าค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์ของชิพตัวที่ 1 จากทั้ง 3 กรณีมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากการเพิ่มค่า  $S/W$  ไม่สามารถช่วยลดขนาดของการไหลบรรจบบนผนังชิพได้ แต่ในชิพตัวอื่นๆ นั้น พบมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์แตกต่างกันตามการเพิ่มขึ้นของค่าพารามิเตอร์นี้ ซึ่งชิพตัวที่ 5 มีความแตกต่างกันมากที่สุดโดยชิพมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์เท่ากับ 3.5344, 4.0480, 5.1189, 6.2130 ที่ค่า  $S/W$  เท่ากับ 20%, 30%, 42% และ 71% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 58 และเมื่อพิจารณาผลของค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์โดยรวม พบว่าการเพิ่มค่า  $S/W$  ทำให้ชิพมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์โดยรวมเพิ่มขึ้นซึ่งมีความสอดคล้องกับการไหลในสภาวะคงตัว ดังแสดงในภาพประกอบ 59 นั่นคือ ถ้าค่า  $S/W$  เพิ่มขึ้น 33.3%, 52.3% และ 72% ชิพมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์โดยรวมเพิ่มขึ้น 10.2%, 19.4% และ 30.6% ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าในสภาวะการไหลคงตัว ณ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ 130 ประมาณ 60%, 63% และ 77.7% ตามลำดับ

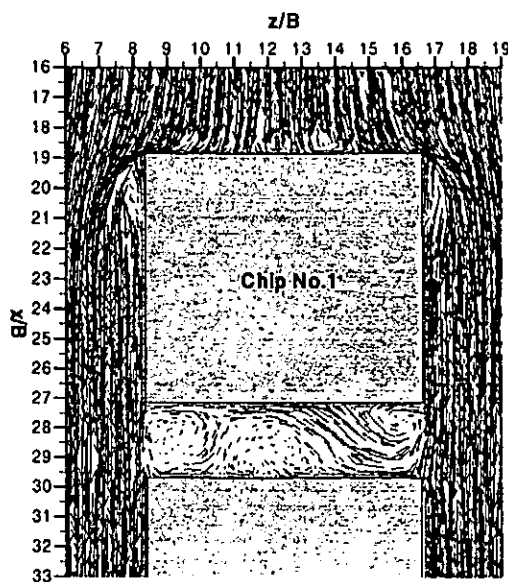
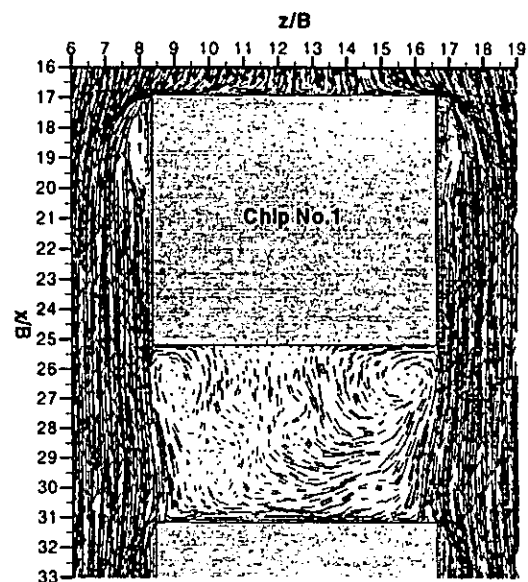
## 5.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในการไหลสามมิติ

การคำนวณหาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ ในแบบจำลองการไหล 3 มิติ ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่ขาดหายไปจากการคำนวณใน 2 มิติ โดยได้เลือกทำการคำนวณในกรณีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิพต่อความยาวของชิพ ทั้งนี้เนื่องจากการคำนวณค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของแบบจำลองการไหลในสภาวะการไหลคงตัวที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าการถ่ายเทความร้อนใน 2 มิติและ 3 มิติให้ผลที่ไม่แตกต่างกันมากนักในช่วงที่ค่าพารามิเตอร์นี้มีค่าสูงๆ สำหรับการคำนวณอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ใน 3 มิตินี้ได้กระทำที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1000 โดยใช้ข้อมูลและเงื่อนไขต่างๆ เช่นเดียวกับการคำนวณในแบบจำลองการไหล 2 มิติ ดังที่กล่าวในหัวข้อ 5.1 และที่ได้แสดงไว้ในตาราง 13 โดยใช้ขนาดของแบบจำลองการไหลดังแสดงในภาพประกอบ 7 ในบทที่ 3

### 5.2.1 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิพต่อความยาวของชิพ

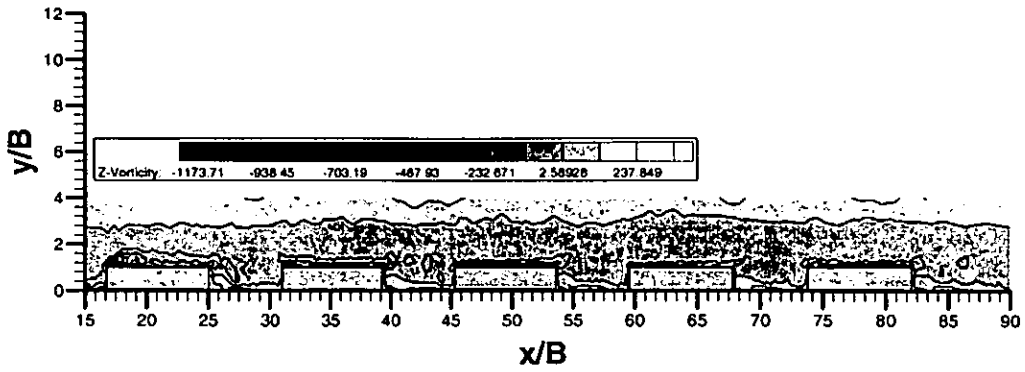
จากภาพประกอบ 60 (A) และ (B) ซึ่งแสดงค่าเวกเตอร์ความเร็วในรูปค่าเฉลี่ยต่อเวลาบนระนาบ  $x-z$  ในกรณี  $S/W$  เท่ากับ 30% และ 71% ตามลำดับ พบว่าในทั้ง 2 กรณีนั้น กระแสการไหลส่วนใหญ่เมื่อไหลผ่านชิพในตำแหน่งต้นทางแล้วได้เคลื่อนตัวต่อไปยังชิพตัวอื่นๆ ในตำแหน่งด้านท้าย แต่มีกระแสการไหลส่วนหนึ่งซึ่งเคลื่อนตัวผ่านบริเวณพื้นที่ว่างระหว่างชิพได้ม้วนตัวและไหลเข้าสู่พื้นที่ว่างนี้เกิดการหมุนวนของกระแสการไหลขึ้น โดยขนาดของการหมุนวนนี้มีขนาดมากขึ้นตามการ

เพิ่มค่า  $S/W$  ซึ่งสอดคล้องกับการไหล 2 มิติที่ผ่านมา และพบว่าการหมุนวนที่เกิดขึ้นกับกรณีค่า  $S/W$  เท่ากับ 30% ซึ่งมีพื้นที่แคบนั้นไม่สามารถเคลื่อนตัวออกจากพื้นที่ว่างระหว่างชิปได้ง่ายนัก เนื่องจากรูปทรงสัณฐานของชิปที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันหมด ทำให้ปิดกั้นการเคลื่อนตัวของกระแสการไหลประกอบกับความเร็วของของไหลโดยรอบพื้นที่ว่างนี้มีค่าสูง ซึ่งต่างจากค่า  $S/W$  เท่ากับ 71% ที่สามารถเคลื่อนตัวได้ง่ายกว่า สำหรับในภาพประกอบ 61 แสดงการไหลวนชั่วขณะที่ระนาบ  $x-y$  ณ ตำแหน่ง  $z/B = 12.5$  ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางของชิปในแบบจำลองการไหล ในภาพ (B) นี้ได้พบการก่อตัวและการเคลื่อนตัวของของไหลวนในบริเวณใกล้ผิวของชิปและพบการสลับตัวของของไหลวนในบริเวณด้านท้ายของชิปแต่ละตัว ซึ่งอาจพบได้ยากเมื่อค่า  $S/W$  มีค่าน้อยๆ

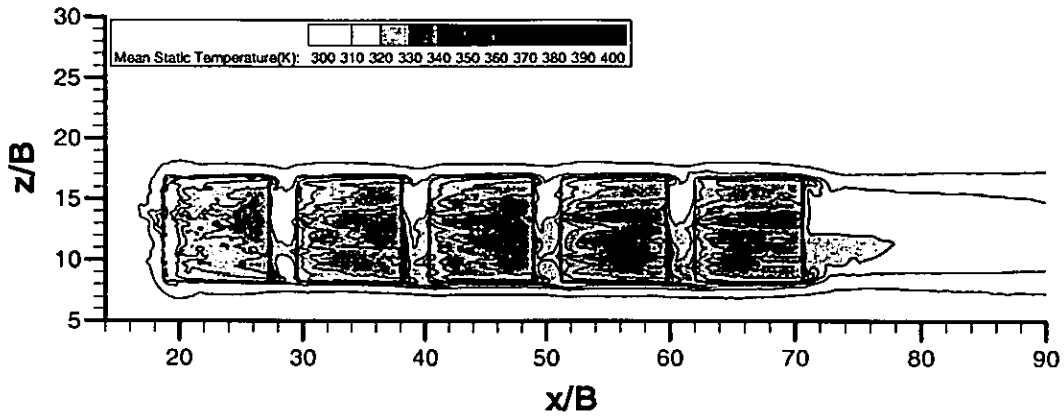
(A)  $S/W = 30\%$ (B)  $S/W = 71\%$ 

ภาพประกอบ 60 เวกเตอร์ความเร็วในพื้นที่ระหว่างชิปตัวที่หนึ่งและตัวที่สองในรูปค่าเฉลี่ยต่อเวลาที่  
ค่า  $Re_B = 1000$ ,  $Br = 25\%$

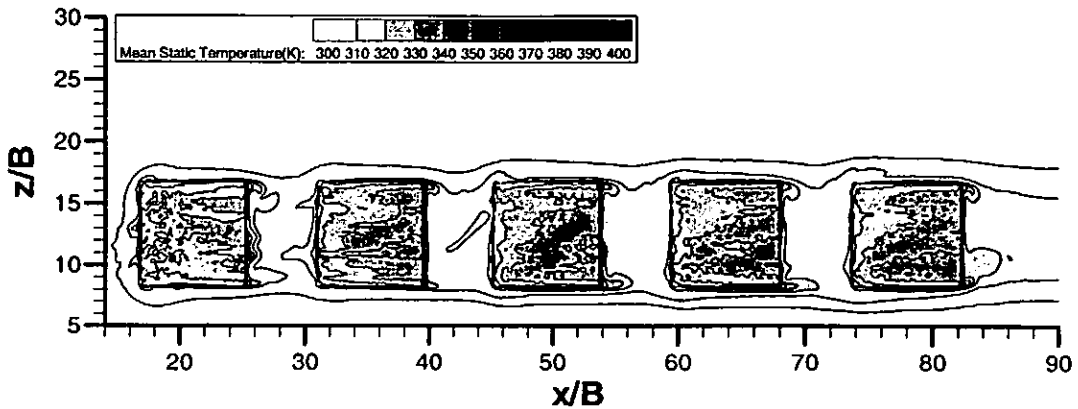
ในภาพประกอบ 62 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิบนผนังชิปในระนาบ  $x-z$  ซึ่งพบว่า มีลักษณะการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอโดยมีความแตกต่างจากการกระจายตัวในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนใน 3 มิติที่สภาวะการไหลคงตัวในบทที่ 4 แต่การกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งเป็นสภาวะการไหลไม่คงตัวนี้สามารถลดอุณหภูมิบนผนังของชิปได้ดีกว่า นั่นคือ การเพิ่มค่า  $S/W$  ทำให้ชิปมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น กล่าวคือ กระแสการไหลสามารถไหลเข้าระบายความร้อนจากชิปแต่ละตัวได้ทั่วถึงในปริมาณมาก ทั้งยังมีการหมุนวนในพื้นที่ระหว่างชิปช่วยให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับของไหลและทำให้ของไหลวน (Vortex) ที่เกิดขึ้นสามารถเคลื่อนตัวพาความ



ภาพประกอบ 61 การไหลวนชั่วขณะที่ระนาบ  $x - y$  ที่  $z/B = 12.5$  ( $\omega_z$ ) ,  $Re_B = 1000$   
 $S/W = 71%$  ,  $Br = 25%$  , เวลา  $t' = 107.6$



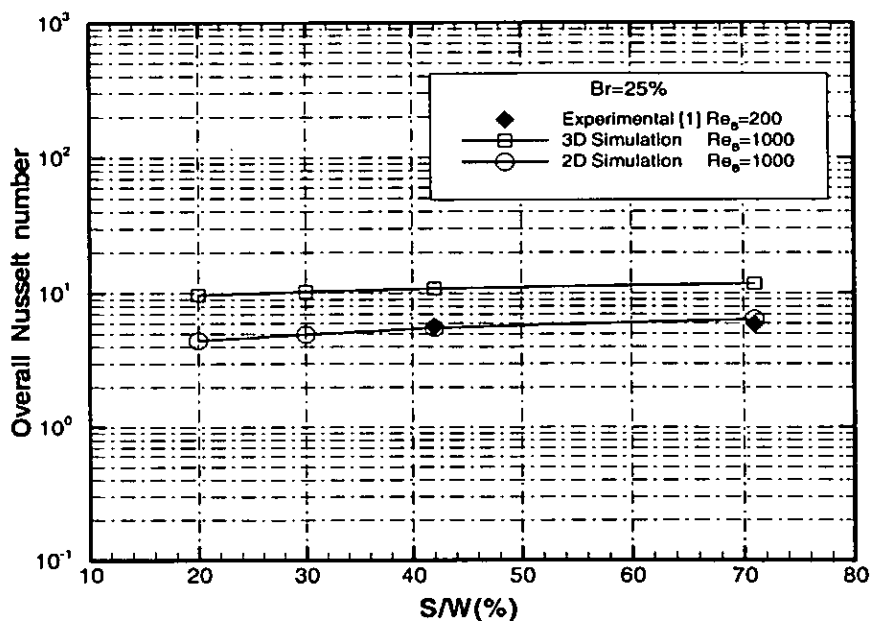
(A)  $S/W = 30%$



(B)  $S/W = 71%$

ภาพประกอบ 62 การกระจายตัวของอุณหภูมิในรูปค่าเฉลี่ยต่อเวลาบนระนาบ  $x - z$  ที่ค่า  
 $Re_B = 1000$  ,  $Br = 25%$

ร้อนออกไปได้ง่ายกว่า ดังแสดงในภาพประกอบ 62 (B) ซึ่งตรงกันข้ามการลดค่า  $S/W$  การลดลงทำให้ชีพสามารถถ่ายเทความร้อนให้แก่กันได้ง่ายขึ้น และทำให้ชีพที่ถูกจัดวางในตำแหน่งด้านท้ายของกระแสน้ำไหลมีการสะสมอุณหภูมิ ดังแสดงในภาพประกอบ 62 (A)



ภาพประกอบ 63 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบค่า  $S/W$

สำหรับในภาพประกอบ 63 แสดงค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมของชีพ พบว่าการคำนวณใน 2 มิติ 3 มิติและการไหลในสภาวะคงตัว ( $Re_b = 200$ ) ให้แนวโน้มการถ่ายเทความร้อนไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ การเพิ่มค่า  $S/W$  ทำให้ชีพมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมเพิ่มขึ้น นั่นคือ ถ้าค่า  $S/W$  เพิ่มขึ้น 33.3%, 52.3% และ 72% ชีพมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมเพิ่มขึ้น 5.9%, 10.4% และ 17.5% ตามลำดับ ณ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ 1000 สำหรับการคำนวณใน 3 มิติมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมมากกว่าการคำนวณใน 2 มิติประมาณ 54%, 51.7, 49% และ 45.8% ที่ค่า  $S/W$  เท่ากับ 20%, 30%, 42% และ 71% ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะธรรมชาติของปัญหา 2 มิติที่ขาดผลกระทบของพื้นที่ด้านแกน  $z$  ทำให้ไม่สามารถกระจายอุณหภูมิไปยังพื้นที่นี้ได้ แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณใน 2 มิติ ยังคงมีแนวโน้มของค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมที่สอดคล้องกับการคำนวณใน 3 มิติ และเมื่อเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนใน 3 มิติระหว่างสภาวะการไหลไม่คงตัวกับการไหลในสภาวะคงตัว พบว่าการปรับเพิ่มค่า  $S/W$  ในสภาวะการไหลไม่คงตัวมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมมากกว่าการไหลในสภาวะคงตัว ณ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ 130 ประมาณ 73.2% ที่ค่า  $S/W$  เท่ากับ 42% ,  $Br = 25\%$

### 5.3 สรุปผลท้ายบท

1 กรณีการศึกษาอิทธิพลของค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในสภาวะการไหลไม่คงตัว การคำนวณพบว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของซีพตัวที่ 1 มีค่าลดลง โดยแปรผันตรงกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยรวมของซีพ พบว่าการเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์ยังส่งผลดีต่อการถ่ายเทความร้อนของซีพ เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในสภาวะการไหลคงตัว

2 กรณีการศึกษาอิทธิพลของค่าอัตราส่วนความสูงของซีพ ต่อความสูงของแบบจำลองการไหล พบว่าการเพิ่มค่าพารามิเตอร์นี้ สามารถช่วยให้ซีพมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยรวมเพิ่มขึ้นได้ แต่การเพิ่มค่าพารามิเตอร์นี้ควรอยู่ในขอบเขตที่ไม่มากเกินไป การเพิ่มมากเกินไปจนถึงประมาณ 40% ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยรวมของซีพลดลง ซึ่งมีผลตรงกันข้ามกับสภาวะการไหลคงตัวที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ การปรับเพิ่มเป็นกรณี 40% ซีพจะมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น

3 กรณีการศึกษาอิทธิพลของค่าอัตราส่วนระยะห่างของซีพต่อความยาวของซีพ โดยได้ทำการศึกษาทั้งในแบบจำลองการไหล 2 มิติและ 3 มิติ พบว่าผลการเพิ่มค่าพารามิเตอร์นี้ทั้งในการคำนวณในแบบจำลองการไหล 2 มิติและ 3 มิติ ให้ผลการถ่ายเทความร้อนที่สอดคล้องกันและมีความสอดคล้องกับการคำนวณและผลการทดลองในสภาวะการไหลคงตัว นั่นคือ การเพิ่มค่าพารามิเตอร์นี้สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของซีพได้

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอเชิงทฤษฎีจากการวิจัย

#### 6.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยในปริญญานีพนธ์นี้ มุ่งเน้นการศึกษากาโรไลและการถ่ายเทความร้อนของชิพที่ถูกจัดวางแบบแถวเรียงตรงกัน โดยศึกษาจากชิพจำนวน 5 ตัว และใช้ระเบียบวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อน. เป็นเครื่องมือเพื่อศึกษาหาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของแบบจำลองการไหลและค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิพต่อความยาวของชิพ สำหรับการศึกษาได้แบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ในสภาวะการไหลคงตัว และกรณีการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ในสภาวะการไหลไม่คงตัว ซึ่งสามารถสรุปผลงานวิจัยได้ดังนี้

##### 6.1.1 สรุปผลการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ในสภาวะการไหลคงตัว

ผลการคำนวณขนาดและจำนวนกริดที่มีผลกระทบต่อคำตอบ ทำให้ทราบขนาดของกริดที่เหมาะสมคือ  $dx_{\min} / B = 3.3\%$  และเมื่อทำการตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้คำนวณกับผลการทดลองและงานวิจัยเชิงตัวเลขที่เป็นที่ยอมรับ พบว่าแบบจำลองการไหล 2 มิติ 3 มิติและโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณในงานวิจัยนี้ให้ผลเฉลยเป็นที่น่าพอใจ

ผลการคำนวณคุณลักษณะการไหล พบว่าคุณลักษณะการไหลได้เกิดการเปลี่ยนแปลงตามการเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ซึ่งการไหลที่มีเสถียรภาพเริ่มเปลี่ยนไปสู่การไหลที่ไร้เสถียรภาพ เมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าประมาณ 500 ที่ค่า  $Br = 25\%$ ,  $S/W = 42\%$  และพบว่าเสถียรภาพของการไหลจะถูกบกรบจนมากขึ้นตามการเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ซึ่งคุณลักษณะการไหลที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ 700 มีรูปแบบการไหลในสภาวะไม่คงตัวเต็มที่

ผลการคำนวณอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ( $Re_b$ ) ในสภาวะการไหลคงตัว ในช่วง 100 ถึง 200 ที่ค่า  $Br = 25\%$ ,  $S/W = 42\%$  พบว่าค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์ของชิพแต่ละตัวมีค่าสูงสุดที่ชิพตัวที่ 1 และลดลงตามตำแหน่งจนมีค่าต่ำสุดที่ชิพตัวที่ 5 ซึ่งการคำนวณในแบบจำลองการไหล 2 มิติและ 3 มิติให้ผลที่สอดคล้องกันและผลการเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์ สามารถช่วยส่งเสริมให้ชิพมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นได้ โดยผลการคำนวณสอดคล้องกับการทดลอง<sup>(1)</sup> ซึ่งถ้าพิจารณาเพิ่มจากค่าตัวเลขเรย์โนลด์ 100 เป็น 200 ชิพมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลล์ท์โดยรวมเพิ่มขึ้น 20.7% แต่การเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์ยังมีผลกระทบต่อค่าความดันตกคร่อมที่ตามมา

ผลการคำนวณอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลง ค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของแบบจำลองการไหล ( $Br$ ) โดยทำการคำนวณในช่วง 12.5% ถึง 40% บนแบบจำลองการไหลทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติที่ค่า  $Re_B = 130, S/W = 42\%$  พบว่าการเพิ่มค่า  $Br$  ทำให้ความเร็วภายในแบบจำลองการไหลมีค่าเพิ่มขึ้นและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยรวมของชิพได้ โดยผลการคำนวณสอดคล้องกับงานวิจัยที่ใกล้เคียง<sup>(15,22-24)</sup> ซึ่งผลการคำนวณในแบบจำลองการไหล 2 มิติและ 3 มิติให้ผลที่สอดคล้องกัน นั่นคือ ถ้าค่า  $Br$  เพิ่มขึ้น 50% และ 69% ชิพมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลท์โดยรวมเพิ่มขึ้น 13.2% และ 21.3% ตามลำดับซึ่งเป็นผลการคำนวณใน 3 มิติ แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มค่า  $Br$  ไม่ควรมากเกินไป ซึ่งอาจทำให้อากาศไหลเข้าสู่บริเวณการถ่ายเทความร้อนซึ่งมีชิพติดตั้งอยู่ไม่ทั่วถึงและการเพิ่มค่า  $Br$  มีผลต่อความดันตกคร่อมของการไหลที่เพิ่มขึ้นพร้อมกันด้วย

ผลการคำนวณอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิพ ต่อความยาวของชิพ ( $S/W$ ) ในแบบจำลองการไหล 2 มิติ โดยได้กระทำการคำนวณในช่วง 20% ถึง 100% ที่ค่า  $Re_B = 130, Br = 25\%$  พบว่าการเพิ่มค่า  $S/W$  นี้ทำให้ชิพมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง<sup>(1)</sup> นั่นคือ ถ้าค่า  $S/W$  เพิ่มขึ้น 33.3%, 52.3%, 72% และ 80% ชิพมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลท์โดยรวมเพิ่มขึ้น 2.2%, 4.5%, 8% และ 10.1% ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการเพิ่มค่า  $S/W$  เพียงอย่างเดียวทำให้ชิพมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นไม่มากนักในสภาวะการไหลคงตัว เมื่อถูกเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์อื่นอีกทั้งการเพิ่มค่า  $S/W$  ให้มีค่ามากๆ มักถูกจำกัดด้วยพื้นที่ของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ถึงแม้มีผลต่อค่าความดันตกคร่อมของการไหลน้อยก็ตาม

### 6.1.2 สรุปผลการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ในสภาวะการไหลไม่คงตัว

ผลการคำนวณอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลง ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในช่วง 500 ถึง 1000 ที่ค่า  $Br = 25\%, S/W = 42\%$  ซึ่งเป็นช่วงในสภาวะการไหลไม่คงตัวในแบบจำลองการไหล 2 มิติ พบว่าขนาดของการไหลบรรจบ ( $X_r/B$ ) บนผนังชิพตัวที่ 1 มีอัตราการเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์และการเกิดการไหลบรรจบนี้ทำให้ชิพตัวที่ 1 มีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลท์ลดลง แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยรวมของชิพ พบว่าการเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์ยังส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยรวมของชิพ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยรวมในสภาวะการไหลคงตัว นั่นคือ ถ้าพิจารณาเพิ่มจากค่าตัวเลขเรย์โนลด์ 160 เป็น 1000 ชิพมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลท์โดยรวมเพิ่มขึ้นประมาณ 60% ดังนั้น จึงควรพิจารณาจัดวางชิพที่มีค่าฟลักซ์ความร้อนน้อยไว้ในตำแหน่งของชิพตัวที่ 1 เพื่อให้เหมาะสมกับการถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งนี้

ผลการศึกษาอิทธิพลของค่าอัตราส่วนความสูงของชิฟต่อความสูงของแบบจำลองการไหล ( $Br$ ) โดยกระทำในช่วง 25% ถึง 40% ที่ค่า  $Re_b = 1000$ ,  $S/W = 42\%$  ในแบบจำลองการไหล 2 มิติ พบว่าการเพิ่มค่า  $Br$  สามารถช่วยลดขนาดของการไหลบรจบนผนังชิฟตัวที่ 1 ได้ โดยมีอัตราการลดลงตามการเพิ่มค่า  $Br$  รวมทั้งสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยรวมของชิฟได้ แต่การเพิ่มค่า  $Br$  ต้องอยู่ในขอบเขตที่ค่อนข้างจำกัดมากกว่าการไหลในสภาวะคงตัว นั่นคือ ถ้าค่า  $Br$  เพิ่มขึ้น 26.4% ชิฟมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมเพิ่มขึ้น 24.8% และถ้าให้ค่า  $Br$  เพิ่มขึ้น 37.5% ชิฟมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมเพิ่มขึ้นเพียง 7.1% เท่านั้น เนื่องจากถ้าให้ค่า  $Br$  เพิ่มขึ้น 37.5% คุณลักษณะการไหลได้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการไหลที่ไร้เสถียรภาพไปเป็นการไหลที่มีเสถียรภาพ ทำให้ไม่เกิดการเคลื่อนตัวของของไหลวน (Vortex) ที่อยู่ในชั้นขีดผิวของชิฟที่จะรับและถ่ายเทความร้อนออกไปได้เท่าที่ควร ทำให้ชิฟมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยรวมต่ำลง ซึ่งมีผลตรงกันข้ามกับสภาวะการไหลคงตัวที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ เพราะถ้าค่า  $Br$  เพิ่มขึ้น 37.5% ชิฟมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น

ผลการศึกษาอิทธิพลของค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิฟต่อความยาวของชิฟ ( $S/W$ ) โดยได้ทำการศึกษาทั้งในแบบจำลองการไหล 2 มิติและ 3 มิติ ในช่วง 20% ถึง 71% ที่ค่า  $Re_b = 1000$ ,  $Br = 25\%$  พบว่าการเพิ่มค่า  $S/W$  ทั้งในการคำนวณบนแบบจำลองการไหล 2 มิติและ 3 มิติในสภาวะการไหลไม่คงตัวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยรวมของชิฟได้ นั่นคือ ถ้าค่า  $S/W$  เพิ่มขึ้น 33.3%, 52.3% และ 72% ชิฟมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมเพิ่มขึ้น 5.9% 10.4% และ 17.5% ตามลำดับซึ่งเป็นผลการคำนวณใน 3 มิติ และพบว่าการเพิ่มค่า  $S/W$  ในสภาวะการไหลไม่คงตัวมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยรวมมากกว่าการไหลในสภาวะคงตัวใน 3 มิติ ประมาณ 73.2% ที่ค่า  $S/W = 42\%$ ,  $Re_b = 130$  และ  $Br = 25\%$

ผลจากการศึกษาทั้งในกรณีการไหลในสภาวะคงตัวและไม่คงตัว พบว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในสภาวะคงตัว ซึ่งมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วงประมาณไม่เกิน 500 ณ ค่า  $Br = 25\%$ ,  $S/W = 42\%$  ไม่ดีเท่ากับการไหลในสภาวะไม่คงตัว ซึ่งค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วงประมาณ 500 ถึง 1000 ณ  $Br = 25\%$ ,  $S/W = 42\%$  ดังนั้น จึงควรพิจารณาเลือกค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในช่วงสภาวะการไหลไม่คงตัวเป็นลำดับแรก และถ้าพิจารณาการถ่ายเทความร้อนที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1000 พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ควรพิจารณาในเรื่องของการออกแบบลำดับต่อมา ได้แก่ ค่าอัตราส่วนความสูงของชิฟต่อความสูงของแบบจำลองการไหล ( $Br$ ) ในที่นี้คือ  $Br = 34\%$ ,  $S/W = 42\%$  ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมเท่ากับ 7.3454 ซึ่งการใช้ค่า  $Br$  จะเหมาะสมกับรูปทรงบรรจุภัณฑ์ที่มีขนาดเล็ก แต่การเพิ่มค่า  $Br$  ต้องคำนึงถึงผลในเรื่องของความดันตกคร่อมของการไหลที่เกิดขึ้นตามมาเช่นกัน และค่าพารามิเตอร์ลำดับสุดท้ายที่ควรพิจารณาในการออกแบบ คือ

ค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิฟต่อความยาว ( $S/W$ ) ในที่นี้คือ  $S/W = 71\%$  ซึ่งชิฟถูกจัดวางเกือบเต็มระยะความยาว ( $L_p$ ) ของแผงวงจรโดยให้ค่าเฉลี่ยตัวเลขชั้นเซลล์โดยรวมเท่ากับ 6.4147 ซึ่งอาจมีค่าใกล้เคียงกับค่า  $Br = 34\%$  แต่การเพิ่มค่า  $S/W$  นี้ต้องการใช้พื้นที่ของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มาก โดยอาจจะไม่เหมาะสมกับความต้องการรูปทรงบรรจุภัณฑ์ในปัจจุบันที่ต้องการให้มีขนาดเล็ก

## 6.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยขั้นต่อไป

ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้ระเบียบวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล และการถ่ายเทความร้อนสามารถใช้เป็นเครื่องมือเพื่อการวิเคราะห์ผลและย้ำความมั่นใจก่อนเข้าสู่กระบวนการออกแบบจริงได้ ซึ่งมีความสะดวกและมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการทดลอง สำหรับผลการศึกษานางานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาและออกแบบการจัดวางชิฟบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในกรณีจัดวางชิฟแบบแถวเรียงตรงกันให้มีความเหมาะสมได้ ทั้งยังสามารถนำไปเป็นแนวทางการวิจัยในระดับสูงต่อไป เช่น ควบคู่กับการไหลและการถ่ายเทความร้อนของชิฟ โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนในการคำนวณ 3 มิติ การศึกษาอิทธิพลของค่าอัตราส่วนความยาวของชิฟต่อความสูงของชิฟ ซึ่งมักพบในงานอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชิฟโดยใช้วิธีการปรับแต่งกระแสการไหลเข้าให้ไหลแบบเป็นจังหวะ (Pulsating flow) และการจัดเรียงตัวของชิฟ เป็นต้น

## บรรณานุกรม

## บรรณานุกรม

1. น้ามนต์ โชติวิศรุต. การพาความร้อนของชุดแท่งจัดรัศรร้อนที่ทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลและเรียงตัวในแนวเดียวกัน [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล]. เชียงใหม่: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2546.
2. Davalath, J.; & Bayazitoglu, Y. *Forced convection cooling across rectangular blocks*. Journal of Heat Transfer. 1987; 109: 321-328.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. สุริยนต์ ชมดี; อติพงศ์ นันทพันธุ์; และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. *ปัจจัยในการพาความร้อนของชิพบนแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์*. ใน: การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, 15-17 ตุลาคม 2546; ปราณบุรี, ประเทศไทย: 2546; หน้า 214.
8. Shaw, C. T. *Using computational fluid dynamics*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall; 1992.
9. Pantankar ,Suhas V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. New York: Hemisphere;1980.
10. Versteeg, H. K.; & Malalasekera, W. *An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method*. Malaysia: Longman Scientific & Technical; 1995.
11. Cengel, Yunus A. *Heat transfer a practical approach*. International edition. New York: McGraw-Hill; 1998.
12. Ozisik, M. Necati. *Heat transfer a basis approach*. International edition. Singapore: McGraw-Hill; 1985.

13. Hiramatsu, Michio.; Ishimatsu Tsuneo.; & Ohkouchi Takaki. *Numerical analysis of innerfins for Intercooler*. JSME International Journal. 1992; 35(3): 406-411.
14. วีรชาติ นวรุ่งเรือง; อโณทัย สุขแสงพรหมรุ่ง และ อุดมเกียรติ นนทแก้ว. *การวิเคราะห์ผลการไหลแบบสภาวะไม่คงตัวผ่านครีบบระบายความร้อนแบบเกร็ด*. ใน: การประชุมวิชาการการถ่ายเทความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 1, 24-25 มีนาคม 2546; ศูนย์ฝึกอบรมแม่เมาะการไฟฟ้าฝ่ายผลิต อำเภอแม่เมาะ ลำปาง; ประเทศไทย: 2546. หน้า 31-35.
15. Djilali, N. *Forced laminar convection in an array of stacked plates*. Numerical Heat Transfer. 1994; 25: 393-408.
16. 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.
17. วีรชาติ นวรุ่งเรือง; อุดมเกียรติ นนทแก้ว และ อโณทัย สุขแสงพรหมรุ่ง. *การวิเคราะห์คุณลักษณะความถี่ของการไหลผ่านครีบบระบายความร้อนแบบเกร็ด*. ใน: การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, 15-17 ตุลาคม 2546; ปราชญ์บุรี, ประเทศไทย: 2546; หน้า 1001-1006.
18. Wilson, Howard B.; & Turcotte, Louis H. *Advanced Mathematics and mechanics applications using MATLAB*. Florida : CRC; 1994
19. Schilling, Robert J.; & Harris, Sandra L. *Applied numerical method for engineers using MATLAB and C*. New York: Brooks Cole; 1999.
20. 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.
21. 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.
22. Hacohen, 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.
23. 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.

24. 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.
25. มนตรี พิรุณเกษตร. *กลศาสตร์ของไหล*. กรุงเทพฯ: บริษัทจูนพับลิชชิ่ง; 2545.
26. Anderson, John D., Jr. *Computational fluid dynamics The basic with applications*. New York : McGraw-Hill; 1995.
27. Chapra, Steven C. & Canale, Raymond P. *Numerical method for engineers with software and programming applications*. 4th ed. New York: McGraw-Hill; 2002.
28. 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.
29. Incropera, F.P. *Convective heat transfer in electronic equipment cooling*. Journal of Heat Transfer. 1988; 110: 1097-1111.
30. Fung, C. T. *A first course in continuum mechanics*. 3rd ed. New Jersey: Prentice-Hall; 1994.
31. 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.
32. Chikh, S.; Boumediene, A.; Bouhadeif, K; & Lauriat, G. *Analysis of fluid flow and heat transfer in a channel with intermittent heated porous blocks*. Heat and Mass Transfer. 1998; 33: 405-413.
33. White, Frank M. *Fluid mechanics*. 4th ed. Singapore: McGraw-Hill; 1999.
34. Yang, R.-J.; & Fu, L.-M. *Thermal and flow analysis of a heated electronic component*. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2001; 44: 2261-2275.
35. Valencia, Alvaro. *The effects on heat transfer of unsteady flow around two square bars mounted staggered in a plate channel*. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2002; 29(2): 233-242.
36. Furukawa, Takahiro.; Yang, Wen-Jei. *Thermal fluid flow in parallel boards with heat generating blocks*. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2003; 46: 5005-5015.

37. มนต์รี พิรุณเกษตร. การถ่ายเทความร้อนฉบับเตรียมสอบและเสริมประสบการณ์. กรุงเทพฯ: บริษัทพิมพ์ดีด; 2541.
38. สมศรี จรุงเรือง. ระเบียบวิธีวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2542.
39. ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการคำนวณพลศาสตร์ของไหล. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2545.
40. เกரியไกร ปัญญรัตน์ และ สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์. การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง 2 แห่งที่วางเรียงกันในช่องทางไหล. ใน: การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16, 14-16 ตุลาคม 2545; ภูเก็ต, ประเทศไทย: 2545; หน้า 172-177.
41. กิตติศักดิ์ คู่ขวัญ และ สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์. การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซที่มีเทอร์บิวเรเตอร์ติดตั้ง. ใน: การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, 15-17 ตุลาคม 2546; ปราจีนบุรี, ประเทศไทย: 2546; หน้า 214-219.

ประวัติย่อผู้วิจัย

## ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ-ชื่อสกุล

นายชาญณรงค์ วันทา

สถานที่อยู่ปัจจุบัน

55/1 หมู่ 4 ต. บางหลวง อ. เมือง จ. ปทุมธานี 12000

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2544

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล อ. ธัญบุรี จ. ปทุมธานี

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. ชาญณรงค์ วันทา อโณทัย สุขแสงพนมรุ่ง และ วรณวิไล ไกรเพชร. *การคำนวณการพาความร้อนแบบสภาวะคงตัวในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์*. วารสารวิชาการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 2548; 1(1) : 90-101.
2. ชาญณรงค์ วันทา อโณทัย สุขแสงพนมรุ่ง และ วรณวิไล ไกรเพชร. *ผลกระทบการไหลแบบสภาวะไม่คงตัวที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์* ใน: การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19, 19-21 ตุลาคม 2548; ภูเก็ต, ประเทศไทย: 2548.