

การศึกษาเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบราบเรียบในช่องทางไหล  
ภายใต้การเคลื่อนที่ของขอบเขตที่กำหนด

นาย ชีรพรรดิ เจริญวัฒน์หิรัญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2550  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**A NUMERICAL STUDY OF LAMINAR CHANNEL FLOW  
UNDER SPECIFIED MOVING BOUNDARIES**

**Mr. Teerapat Jarernwattanahirun**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering  
Department of Mechanical Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2007  
Copyright of Chulalongkorn University**

**500305**

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบราบเรียบในช่องทาง  
ไหลภายใต้การเคลื่อนที่ของขอบเขตที่กำหนด

โดย

นาย ชีรพรรคี เจริญวัฒน์หิรัญ

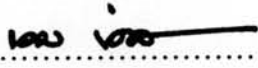
สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

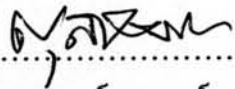
อาจารย์ที่ปรึกษา


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


.....  ..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  ..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดุลย์ มณีวัฒนา)

.....  ..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

.....  ..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์)

.....  ..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. กุณhini มณีรัตน์)

ธีรพรรค เจริญวัฒน์ศิริ : การศึกษาเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบราบเรียบใน  
ช่องทางไหลภายใต้การเคลื่อนที่ของขอบเขตที่กำหนด. (A NUMERICAL  
STUDY OF LAMINAR CHANNEL FLOW UNDER SPECIFIED  
MOVING BOUNDARIES) อ. ที่ปรึกษา: ผศ. ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์,  
99 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบราบเรียบใน  
ช่องทางไหลผ่านสิ่งกีดขวางซึ่งเคลื่อนที่ติดจากการไหล ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม โดย  
สมมติให้การไหลเป็นแบบหนืดและอัดตัวไม่ได้ใน 2 มิติ ที่สภาวะเสมือนคงตัว

การทำวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยนำ  
ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณในปัญหาการไหลผ่านสิ่งกีดขวางไปเปรียบเทียบกับผลการ  
ทดลองและผลการคำนวณเชิงตัวเลขอื่นๆ พบว่า ทั้งค่าความเค้นเฉือนที่ผนังและค่าเวกเตอร์  
ความเร็วนั้นมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองและผลการคำนวณอื่นๆ จากนั้นจึงนำโปรแกรมไป  
ประยุกต์ใช้กับปัญหาการไหลผ่านสิ่งกีดขวางซึ่งเคลื่อนที่ติดจากการไหลต่อไป

ปัญหานี้ทำการศึกษการไหลที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ เท่ากับ 1000 โดยพิจารณา  
ตำแหน่งสิ่งกีดขวางเคลื่อนที่ติดจากการไหล ซึ่งทำให้ช่องทางไหลเปิด 66.67, 60, 43.33  
และ 30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า เมื่อช่องทางไหลปิดแคบลง ทำให้เกิด  
บริเวณการหมุนวนของของไหลที่ผนังด้านบน 2 ตำแหน่ง และด้านล่าง 3 ตำแหน่ง หาก  
พิจารณาผนังด้านล่างที่บริเวณการหมุนวนสองตำแหน่งแรก พบว่ามีการหมุนวนของการไหล  
สวนทางกัน โดยตำแหน่งแรกมีการหมุนวนทวนเข็มนาฬิกา ในขณะที่การหมุนวนตำแหน่งที่  
สองมีทิศทางการหมุนวนเข็มนาฬิกา

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต.....ธีรพรรค เจริญวัฒน์ศิริ.....  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา 2550

## 4770593021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING  
 KEY WORD: LAMINAR FLOW, FINITE VOLUME, MOVING BODY  
 TEERAPAT JARERNWATTANAHIRUN : A NUMERICAL STUDY OF  
 LAMINAR CHANNEL FLOW UNDER SPECIFIED MOVING  
 BOUNDARIES. THESIS ADVISOR : SOMPONG PUTIVISUTISAK,  
 Ph.D., 99 pp.

This thesis presents a finite volume method for laminar flows in a channel. The flows pass an obstacle which moves perpendicular to the channel. The two-dimensional quasi-steady flows are assumed to be viscous and incompressible.

A computer program is developed and validated by comparing numerical solutions with the problem of flows passing wall-mounted obstacle which have experimental or available numerical results. It is found that both wall-shear stress and velocity profiles are similar to experimental and other numerical solutions. Then, the computer program is applied to the flow pass moving obstacle problem.

The Reynolds number (Re) of the flow is 1000. The obstacle is moved perpendicular to the channel with opening percentage of 66.67, 60, 43.33 and 30 consequently. The results show two upper wall and three lower wall reattachment areas in the channel. For the first 2 reattachment areas at the lower wall, it is found that the flow in the first reattachment area is counterclockwise while those of the second area is clockwise.

Department: Mechanical Engineering Student's signature: ..... *J. Teerapat* .....  
 Field of study: Mechanical Engineering Advisor's signature: ..... *Sompong* .....  
 Academic year: 2007

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนคำปรึกษาที่มีคุณค่ายิ่งในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัย และการทำงานในอนาคต

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภย์ มณีวัฒนา ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.อติ บุญจิตราดุลย์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณี มณีรัตน์ กรรมการ ที่ได้ให้คำแนะนำและถ่ายทอดความรู้ตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยนี้ ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ปริญญาโทและปริญญาเอกในห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์การคำนวณทุกท่านที่เอื้อเฟื้อน้ำใจตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัยนี้

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อันเป็นที่รักยิ่งที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยเสมอมา และคุณค่าอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเป็นกตัญญูตาบูชาแต่บิดา มารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ด
บทที่ 1    บทนำ.....	1
1.1    ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์ .....	1
1.1.1    ปรากฏการณ์การไหลซึ่งวัตถุเคลื่อนที่ส่งผลกระทบต่อการไหล.....	3
1.1.2    ปรากฏการณ์การไหลซึ่งของไหลส่งผลกระทบต่อวัตถุเคลื่อนที่ .....	4
1.2    ลักษณะของปัญหาที่จะทำการศึกษา .....	5
1.3    วัตถุประสงค์ของการทำวิทยานิพนธ์.....	6
1.4    ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	7
1.5    ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	7
1.6    ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	7
บทที่ 2    ทฤษฎีพื้นฐาน.....	8
2.1    การอนุรักษ์ของมวล (Continuity Equation).....	8
2.2    อัตราการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคของไหล .....	11
2.3    การอนุรักษ์ของโมเมนตัม (Conservation of Momentum Equation).....	13
2.4    นาเวียร์-สโตกส์สำหรับของไหลแบบนิวโตเนียน (Navier-Stokes Equation for a Newtonian Fluid) .....	16
2.5    การไหลแบบภายใน (Internal Flow) .....	18
2.6    สรุป .....	20

	หน้า
บทที่ 3	ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม..... 21
3.1	บทนำ ..... 21
3.2	สมการควบคุมพื้นฐาน (Governing Equation)..... 21
3.3	ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มสำหรับปัญหาการพาและการแพร่กระจาย. 21
3.3.1	เทอมการพา ..... 23
3.3.2	เทอมการแพร่กระจาย..... 24
3.3.3	Source term ..... 24
3.4	การประมาณค่าโดยใช้ Numerical scheme ..... 25
3.4.1	Central differencing scheme ..... 25
3.4.2	Upwind differencing scheme ..... 26
3.4.3	Hybrid differencing scheme..... 27
3.4.4	Power-law differencing scheme..... 28
3.5	การแบ่งกริดแบบเอียง (Staggered Grid) ..... 29
3.6	กริดแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-Uniform Grid) ..... 31
3.7	เงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions) ..... 32
3.7.1	เงื่อนไขขอบที่ผนัง (Wall boundary condition)..... 33
3.7.2	เงื่อนไขขอบที่ทางเข้า (Inlet boundary condition)..... 33
3.7.3	เงื่อนไขขอบที่ทางออก (Outlet boundary condition)..... 34
3.7.4	เงื่อนไขขอบแบบสมมาตร (Symmetry)..... 34
3.8	กระบวนการหาผลเฉลย (Solution Procedure)..... 34
3.8.1	การหาผลเฉลยสมการดิสครีไทซ์ด้วยวิธี TDMA ..... 34
3.8.2	ค่า Under-relaxation..... 36
3.8.3	SIMPLE algorithm..... 37
3.9	สรุป ..... 42
บทที่ 4	การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์..... 43
4.1	ปัญหาการไหลแบบราบเรียบผ่าน Backward-facing step..... 43
4.1.1	ความยาวบริเวณการหมุนวน (Reattachment length)..... 46
4.1.2	ความเค้นเฉือนที่ผนังบริเวณชั้นบันได..... 46
4.1.3	ความเร็วตามแกน (Axial velocity)..... 47
4.2	ปัญหาการไหลแบบราบเรียบผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว..... 53



4.2.1	ปัญหาการไหลผ่านบล็อก (Block) .....	54
4.2.1.1	ความยาวบริเวณการหมุนวน (Reattachment length).....	55
4.2.1.2	ความเค้นเฉือนที่ผนังด้านบนและล่าง .....	55
4.2.1.3	ความเร็วตามแนวแกน (Axial velocity) .....	55
4.2.2	ปัญหาการไหลผ่านรั้วบาง (Fence).....	61
4.2.2.1	ความยาวบริเวณการหมุนวน (Reattachment length).....	62
4.2.2.2	ความเค้นเฉือนที่ผนังด้านบนและล่าง .....	62
4.2.2.3	ความเร็วตามแนวแกน (Axial velocity) .....	62
บทที่ 5	การทำนายการไหลแบบราบเรียบผ่านช่องทางไหลที่มีสิ่งกีดขวางเคลื่อนที่ ที่ตั้งฉากกับการไหล .....	67
5.1	ลักษณะปัญหาและขอบเขตของปัญหา .....	67
5.2	ผลการคำนวณการไหลแบบราบเรียบผ่านช่องทางไหลที่มีสิ่งกีดขวางเคลื่อนที่ ที่ตั้งฉากกับการไหล.....	69
5.2.1	สิ่งกีดขวางเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้น $Y = 0.80$ หรือช่องทางไหลเปิดกว้าง 66.67% .....	71
5.2.2	สิ่งกีดขวางเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่ง $Y = 0.76$ หรือช่องทางไหลเปิด 60%.....	72
5.2.3	สิ่งกีดขวางเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่ง $Y = 0.66$ หรือช่องทางไหลเปิด 43.33%.....	74
5.2.4	สิ่งกีดขวางเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่ง $Y = 0.58$ หรือช่องทางไหลเปิด 30%.....	75
5.2.5	เวกเตอร์ความเร็วของการไหล (Velocity vector) .....	77
5.2.6	Streamline ของการไหล .....	89
5.2.7	การกระจายความดัน (Pressure contour).....	90
5.3	สรุปผลการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มของปัญหาการไหลแบบราบเรียบผ่านช่องทางไหลที่มีสิ่งกีดขวางเคลื่อนที่ ที่ตั้งฉากกับการไหล .....	91

	หน้า
บทที่ 6   สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	93
6.1   สรุปผลการวิจัย.....	93
6.2   ข้อเสนอแนะ .....	95
รายการอ้างอิง.....	96
บรรณานุกรม .....	98
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	99

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ความยาวบริเวณการหมุนวน (Reattachment length).....	44
ตารางที่ 4.2 ลักษณะปัญหาของการไหลผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว .....	53
ตารางที่ 4.3 ความยาวบริเวณการหมุนวน (Reattachment length) ของการไหล ผ่านบล็อก (Block).....	54
ตารางที่ 4.4 ความยาวการหมุนวนของการไหลผ่านรั้วบาง .....	61
ตารางที่ 5.1 บริเวณการหมุนวนและค่าความเค้นเฉือนที่ผนังด้านบนและด้านล่างหลัง วัตถุเคลื่อนที่ซึ่งอยู่ตำแหน่ง $Y$ ใดๆ.....	70

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 หุ่นยนต์ปลาทูน่า (Robotuna) (Barrett, 1996).....	2
รูปที่ 1.2 การบีบหลอดเลือด (from <a href="http://www.childrenshospitala.org">http://www.childrenshospitala.org</a> , 2006)..	2
รูปที่ 1.3 ปัญหาการไหลที่ทำการศึกษา.....	6
รูปที่ 2.1 การไหลเข้าออกของอัตราของมวลผ่านก่อนอนุภาคการไหล .....	9
รูปที่ 2.2 องค์ประกอบความเค้นของอนุภาคของของไหล.....	14
รูปที่ 2.3 ความเค้นในแนวแกน $x$ .....	15
รูปที่ 2.4 การไหลย้อนขาเข้า การไหลที่กำลังพัฒนา และการไหลแบบพัฒนาเต็มที่...	19
รูปที่ 3.1 การวางตัวของปริมาตรควบคุมใน 2 มิติ.....	23
รูปที่ 3.2 ลักษณะการวางกริดแบบเยื้อง (Staggered grid).....	29
รูปที่ 3.3 ลักษณะการวางของ Scalar cell ในโดเมนการคำนวณ.....	30
รูปที่ 3.4 ลักษณะการวางของ $u$ -cell ซึ่งวางเยื้องกับ Scalar cell ในโดเมนการคำนวณ .....	30
รูปที่ 3.5 ลักษณะการวางของ $v$ -cell ซึ่งวางเยื้องกับ Scalar cell ในโดเมนการคำนวณ.....	30
รูปที่ 3.6 ลักษณะของกริดแบบไม่สม่ำเสมอ.....	31
รูปที่ 3.7 การคำนวณกริดแบบไม่สม่ำเสมอ .....	32
รูปที่ 3.8 เงื่อนไขขอบสำหรับโดเมนการคำนวณ.....	33
รูปที่ 3.9 ปริมาตรควบคุมที่ผนัง .....	33
รูปที่ 3.10 โดเมนการคำนวณที่ใช้วิธี TDMA ในการคำนวณ.....	35
รูปที่ 3.11 ขั้นตอนของ SIMPLE algorithm .....	41
รูปที่ 4.1 รูปแบบปัญหาแบบ Backward facing step (Melaen, 1990).....	44
รูปที่ 4.2 ความเค้นเฉือนที่ผนังบริเวณชั้นบันไดของปัญหาแบบ Backward-facing step, $\tau = (H - h) / \text{Re} U_{\max} \cdot \frac{\partial u}{\partial y}$ ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์, Re เท่ากับ 50 .....	46
รูปที่ 4.3 ความเค้นเฉือนที่ผนังบริเวณชั้นบันไดของปัญหาแบบ Backward-facing step, $\tau = (H - h) / \text{Re} U_{\max} \cdot \frac{\partial u}{\partial y}$ ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์, Re เท่ากับ 150 .....	47
รูปที่ 4.4 ความเค้นเฉือนที่ผนังบริเวณชั้นบันไดของปัญหาแบบ Backward-facing step, $\tau = (H - h) / \text{Re} U_{\max} \cdot \frac{\partial u}{\partial y}$ ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์, Re เท่ากับ 500.....	48

รูปที่ 4.5	ความเค้นเฉือนที่ผนังด้านบนของปัญหาแบบ Backward-facing step, $\tau = (H-h)/ReU_{max} \cdot \frac{\partial u}{\partial y}$ ที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์, Re เท่ากับ 500 .....	48
รูปที่ 4.6	รูปร่างความเร็วตามแนวแกนของปัญหาแบบ Backward-facing step ที่ ตำแหน่ง $x = 1.6, 4.0, 8.0$ และ $24$ ที่ เรย์โนลด์์นัมเบอร์, Re เท่ากับ 150..	49
รูปที่ 4.7	ความยาวบริเวณการหมุนวน ที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ 50, 150 และ 500 .....	50
รูปที่ 4.8	Streamline $\psi / (H-h)U_{max}$ ของการไหลผ่าน Backward-facing step, Re = 50 (Not to scale) .....	51
รูปที่ 4.9	Streamline $\psi / (H-h)U_{max}$ ของการไหลผ่าน Backward-facing step, Re = 150 (Not to scale) .....	51
รูปที่ 4.10	การกระจายความดัน (Pressure contour) $p Re / \rho U_{max}^2$ ของการไหลผ่าน Backward-facing step, Re = 50 (Not to scale) .....	51
รูปที่ 4.11	การกระจายความดัน (Pressure contour) $p Re / \rho U_{max}^2$ ของการไหลผ่าน Backward-facing step, Re = 150 (Not to scale) .....	51
รูปที่ 4.12	Streamline $\psi / (H-h)U_{max}$ ของการไหลผ่าน Backward-facing step, Re = 500 (Not to scale) .....	52
รูปที่ 4.13	การกระจายความดัน (Pressure contour) $p Re / \rho U_{max}^2$ ของการไหลผ่าน Backward-facing step, Re = 500 (Not to Scale) .....	52
รูปที่ 4.14	รูปแบบของปัญหาแบบราบเรียบผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว .....	53
รูปที่ 4.15	ความเค้นเฉือนที่ผนังด้านล่างของการไหลผ่านบล็อก (Block), $\tau = (H-h)/ReU_{max} \cdot \frac{\partial u}{\partial y}$ ที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์, Re เท่ากับ 144 .....	56
รูปที่ 4.16	ความเค้นเฉือนที่ผนังด้านบนของการไหลผ่านบล็อก (Block), $\tau = (H-h)/ReU_{max} \cdot \frac{\partial u}{\partial y}$ ที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์, Re เท่ากับ 144 .....	56
รูปที่ 4.17	รูปร่างความเร็วตามแนวแกนของการไหลผ่านบล็อกที่ตำแหน่ง $X = 1.6$ ที่ เรย์โนลด์์นัมเบอร์, Re เท่ากับ 144 .....	57
รูปที่ 4.18	รูปร่างความเร็วตามแนวแกนของการไหลผ่านบล็อกที่ตำแหน่ง $X = 4.0$ ที่ เรย์โนลด์์นัมเบอร์, Re เท่ากับ 144 .....	57
รูปที่ 4.19	รูปร่างความเร็วตามแนวแกนของการไหลผ่านบล็อกที่ตำแหน่ง $X = 6.0$ ที่ เรย์โนลด์์นัมเบอร์, Re เท่ากับ 144 .....	58

รูปที่ 4.20	รูปร่างความเร็วตามแนวแกนของการไหลผ่านบล็อกที่ตำแหน่ง $X = 8.0$ ที่ เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์, Re เท่ากับ 144 .....	58
รูปที่ 4.21	รูปร่างความเร็วตามแนวแกนของการไหลผ่านบล็อกที่ตำแหน่ง $X = 10$ ที่ เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์, Re เท่ากับ 144 .....	59
รูปที่ 4.22	การกระจายความดัน (Pressure contour) $p / \rho U_{\max}^2$ ของการไหลผ่าน บล็อก (Block), Re = 144 (Not to scale).....	59
รูปที่ 4.23	Streamline $\psi / (H - h)U_{\max}$ ของการไหลผ่านบล็อก (Block), Re = 144 (Not to scale).....	60
รูปที่ 4.24	เวกเตอร์ความเร็ว (Velocity vector) ของการไหลผ่านบล็อก (Block) แบบ Upwind สำหรับ Re = 144 (Not to scale).....	60
รูปที่ 4.25	ความยาวบริเวณการหมุนวนของปัญหาการไหลผ่านบล็อก.....	60
รูปที่ 4.26	ความเค้นเฉือนที่ผนังด้านล่างของการไหลผ่านรั้วบาง (Fence), $\tau = (H - h) / \text{Re}U_{\max} \cdot \frac{\partial u}{\partial y}$ ที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์, Re เท่ากับ 217.5 .....	63
รูปที่ 4.27	ความเค้นเฉือนที่ผนังด้านบนของการไหลผ่านรั้วบาง (Fence), $\tau = (H - h) / \text{Re}U_{\max} \cdot \frac{\partial u}{\partial y}$ ที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์, Re เท่ากับ 217.5 .....	63
รูปที่ 4.28	รูปร่างความเร็วตามแนวแกนของการไหลผ่านรั้วบาง ที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์, Re เท่ากับ 217.5.....	64
รูปที่ 4.29	Streamline $\psi / (H - h)U_{\max}$ ของการไหลผ่านรั้วบาง (Fence), Re = 217.5 (Not to scale).....	65
รูปที่ 4.30	การกระจายความดัน (Pressure contour) $p / \rho U_{\max}^2$ ของการไหลผ่านรั้ว บาง (Fence), Re = 217.5 (Not to scale).....	65
รูปที่ 4.31	ความยาวบริเวณการหมุนวนของปัญหาการไหลผ่านรั้วบาง .....	66
รูปที่ 5.1	รูปแบบปัญหาการไหลแบบราบเรียบผ่านช่องทางไหลที่มีสิ่งกีดขวาง เคลื่อนที่ตั้งฉากกับการไหล .....	68
รูปที่ 5.2	การเคลื่อนที่ของสิ่งกีดขวาง ณ ตำแหน่ง $Y$ ใดๆ ที่เวลาต่างๆ.....	69
รูปที่ 5.5	ความยาวบริเวณการหมุนวนที่ผนังด้านบนที่ตำแหน่ง $Y = 0.66$ ซึ่งกริด ขนาดต่างๆกัน 108x102, 163x102 และ 183x102 ตามลำดับ.....	75
รูปที่ 5.6	ความยาวบริเวณการหมุนวนที่ผนังด้านบนที่ตำแหน่ง $Y = 0.58$ ซึ่งกริด ขนาดต่างๆกัน 108x102, 163x102 และ 183x102 ตามลำดับ.....	76

รูปที่ 5.7	ค่าความเค้นเฉือนที่ผนังด้านบน ณ ตำแหน่งสิ่งกีดขวาง $Y$ เท่ากับ 0.80 หรือช่องทางไหลเปิด 66.67%.....	78
รูปที่ 5.8	ค่าความเค้นเฉือนที่ผนังด้านล่าง ณ ตำแหน่งสิ่งกีดขวาง $Y$ เท่ากับ 0.80 หรือช่องทางไหลเปิด 66.67%.....	78
รูปที่ 5.9	ค่าความเค้นเฉือนที่ผนังด้านบน ณ ตำแหน่งสิ่งกีดขวาง $Y$ เท่ากับ 0.76 หรือช่องทางไหลเปิด 60%.....	79
รูปที่ 5.10	ค่าความเค้นเฉือนที่ผนังด้านล่าง ณ ตำแหน่งสิ่งกีดขวาง $Y$ เท่ากับ 0.76 หรือช่องทางไหลเปิด 60%.....	79
รูปที่ 5.11	ค่าความเค้นเฉือนที่ผนังด้านบน ณ ตำแหน่งสิ่งกีดขวาง $Y$ เท่ากับ 0.66 หรือช่องทางไหลเปิด 43.33%.....	80
รูปที่ 5.12	ค่าความเค้นเฉือนที่ผนังด้านล่าง ณ ตำแหน่งสิ่งกีดขวาง $Y$ เท่ากับ 0.66 หรือช่องทางไหลเปิด 43.33%.....	80
รูปที่ 5.13	ค่าความเค้นเฉือนที่ผนังด้านบน ณ ตำแหน่งสิ่งกีดขวาง $Y$ เท่ากับ 0.58 หรือช่องทางไหลเปิด 30% ของกริดขนาดต่างกัน 3 ขนาด .....	81
รูปที่ 5.14	ค่าความเค้นเฉือนที่ผนังด้านบน ณ ตำแหน่งสิ่งกีดขวาง $Y$ เท่ากับ 0.58 หรือช่องทางไหลเปิด 30%.....	81
รูปที่ 5.15	ค่าความเค้นเฉือนที่ผนังด้านล่าง ณ ตำแหน่งสิ่งกีดขวาง $Y$ เท่ากับ 0.58 หรือช่องทางไหลเปิด 30%.....	82
รูปที่ 5.16	รูปร่างความเร็วตามแนวแกน ซึ่งวัตถุเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่ง $Y$ เท่ากับ 0.80 หรือช่องทางไหลเปิด 66.67%.....	83
รูปที่ 5.17	รูปร่างความเร็วตามแนวแกน ซึ่งวัตถุเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่ง $Y$ เท่ากับ 0.76 หรือช่องทางไหลเปิด 60%.....	84
รูปที่ 5.18	รูปร่างความเร็วตามแนวแกน ซึ่งวัตถุเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่ง $Y$ เท่ากับ 0.66 หรือช่องทางไหลเปิด 43.33%.....	85
รูปที่ 5.19	รูปร่างความเร็วตามแนวแกน ซึ่งวัตถุเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่ง $Y$ เท่ากับ 0.58 หรือช่องทางไหลเปิด 30%.....	86
รูปที่ 5.20	เวกเตอร์ความเร็วการไหลที่เวลาต่างๆของ Kerh et al. (1998) .....	87
รูปที่ 5.21	เวกเตอร์ความเร็วการไหลจากระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มที่ $Y$ เท่ากับ 0.80, 0.76, 0.66 และ 0.58 ตามลำดับ.....	87

รูปที่ 5.22	เวกเตอร์ความเร็วการไหลที่ $y$ เท่ากับ 0.58 (Not to scale) .....	88
รูปที่ 5.23	รายละเอียดของเวกเตอร์ความเร็วการไหลที่ $Y$ เท่ากับ 0.58 (Not to scale) ในบริเวณการหมุนวนที่ 1 .....	88
รูปที่ 5.24	รายละเอียดของเวกเตอร์ความเร็วการไหลที่ $Y$ เท่ากับ 0.58 (Not to scale) ในบริเวณการหมุนวนที่ 2 .....	88
รูปที่ 5.25	รายละเอียดของเวกเตอร์ความเร็วการไหลที่ $Y$ เท่ากับ 0.58 (Not to scale) ในบริเวณการหมุนวนที่ 3 .....	88
รูปที่ 5.26	รายละเอียดของเวกเตอร์ความเร็วการไหลที่ $Y$ เท่ากับ 0.58 (Not to scale) ในบริเวณการหมุนวนที่ 4 .....	89
รูปที่ 5.27	Streamline ของสิ่งกีดขวางเคลื่อนที่ ณ $y$ ตำแหน่งต่างๆ ( $Y = 0.80, 0.76, 0.66$ และ $0.58$ ) (Not to scale) .....	89
รูปที่ 5.28	การกระจายความดัน (Pressure contour) ของสิ่งกีดขวางเคลื่อนที่ ณ $Y$ ตำแหน่งต่างๆ ( $Y = 0.80, 0.76, 0.66$ และ $0.58$ ) (Not to scale) .....	90



## คำอธิบายสัญลักษณ์

$A$	พื้นที่หน้าตัดของปริมาตรควบคุม
$a$	ความเร็ว
$D$	ความกว้างของแผ่นคู่ขนาน, Diffusion conductance
$E$	พลังงาน
$e$	อัตราการเปลี่ยนรูป
$F$	แรง, Convective mass flux
$g$	แรงโน้มถ่วงโลก
$H$	ความกว้างของช่องทางไหล
$L$	ความยาวของช่องทางไหล
$L_e$	Entrance length
$m$	น้ำหนัก
$Pe$	เพกเลตน์มเบอร์ (Peclet number)
$p$	ความดัน
$Re$	เรย์โนลด์์นัมเบอร์ (Reynolds number)
$S_u$	Source term
$S_\phi$	Source term
$T$	อุณหภูมิ
$t$	เวลา
$u_i$	Velocity vector
$u$	ความเร็วในแนวแกน $x$
$V$	ปริมาตรควบคุม
$v$	ความเร็วในแนวแกน $y$
$w$	ความเร็วในแนวแกน $z$
$X_r$	ความยาวบริเวณการหมุนวน
$X_1$	จุด Separation ของ Secondary recirculation
$X_2$	จุด Reattachment ของ Secondary recirculation
$x$	ระยะในแนวแกน $x$
$y$	ระยะในแนวแกน $y$
$z$	ระยะในแนวแกน $z$
$\phi$	ตัวแปรสเกลาร์
$\mu$	ความหนืดจลศาสตร์ (Dynamic viscosity)
$\rho$	ความหนาแน่น
$\Gamma$	สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย
$\psi$	Stream function

$\tau$  ความเค้นเฉือน

### ตัวห้อย (Subscripts)

$e, w, n, s$  Control volume face  
 $E, W, N, S$  จุดที่อยู่ข้างเคียงบน east, west, north และ south  
 $nb$  จุดต่อที่อยู่ข้างเคียง  
 $x, y, z$  ทิศทางในแนวแกน  $x, y, z$

### ตัวยก (Superscripts)

- ค่าเฉลี่ย  
\* Current value