

ผลของขนาดช่องเปิดที่ผนังด้านท้ายต่อรูปแบบการไหลภายในห้อง  
จากการศึกษาเชิงตัวเลข



นาย สุทธิโชค นันทสุขเกษม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1298-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF AN END-WALL OPENING ON THE FLOW PATTERN  
IN A CHAMBER FROM NUMERICAL STUDY

Mr. Suthichock Nunthasookkasame



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering  
Department of Mechanical Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2001  
ISBN 974-03-1298-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของขนาดช่องเปิดที่ผนังด้านท้ายต่อรูปแบบการไหลภายในห้อง  
จากการศึกษาเชิงตัวเลข  
โดย นาย สุทธิโชค นันทสุขเกษม  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์)

..... กรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

สุทธิโชค นันทสุขเกษม : ผลของขนาดช่องเปิดที่ผนังด้านท้ายต่อรูปแบบการไหลภายใน  
ห้องจากการศึกษาเชิงตัวเลข (EFFECTS OF AN END-WALL OPENING ON  
THE FLOW PATTERN IN A CHAMBER FROM NUMERICAL STUDY)  
อ.ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์ ; 213 หน้า  
ISBN 974-03-1298-5

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่อรูปแบบการไหลแบบราบ  
เรียบภายในห้องระบายอากาศ ใน 2 มิติ ที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ 1, 10 และ 100 ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัว  
เลข สำหรับห้องที่ใช้ในการศึกษามีขนาดสูง 50 ซม. และยาว 100 ซม. มีช่องทางอากาศเข้าสู่สูง 4  
ซม. อยู่บนผนังข้างหนึ่งได้เพดาน และมีช่องระบายอากาศออกที่สามารถปรับเปลี่ยนขนาดได้อยู่  
บนผนังฝั่งตรงข้ามเหนือพื้นห้อง ในการคำนวณใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มร่วมกับการวางกริด  
แบบ Staggered แล้วคำนวณตามขั้นตอนการคำนวณแบบ SIMPLE

ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า (1) ในกรณีเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่ำ ( $Re = 1$  และ  $10$ ) การเปลี่ยน  
แปลงเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์จะมีผลกระทบต่อรูปแบบการไหลภายในห้องเฉพาะในบริเวณครึ่งห้องทาง  
Upstream และการเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องเปิดด้านท้ายจะมีผลกระทบต่อรูปแบบการไหลภายใน  
ห้องเฉพาะในบริเวณครึ่งห้องทาง Downstream (2) ในกรณีเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สูง ( $Re = 100$ )  
รูปแบบการไหลที่คำนวณได้จะแตกต่างจากการไหลที่  $Re = 1$  และ  $10$  อย่างมาก โดยทั้งเรย์โนลด์  
นัมเบอร์และขนาดของช่องเปิดด้านท้ายจะมีผลกระทบต่อรูปแบบการไหลทั่วทั้งห้อง ซึ่งรูปแบบ  
การไหลจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายเฉพาะในช่วงที่เปิดเต็มที่ (100%) จนถึงเปิด  
ประมาณ 40% แต่เมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดน้อยกว่า 40% รูปแบบการไหลแทบจะไม่เปลี่ยน  
แปลงตามขนาดช่องเปิด

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการคำนวณร่วมกับผลจากงานวิจัยของ Stitsuwongkul (2000)  
และ Stitsuwongkul and Bunyajitradulya (2000) พบว่า คุณลักษณะการไหลภายในห้องจะขึ้น  
กับขนาดของช่องเปิดด้านท้ายในช่วงที่ผนังท้ายห้องปิดลงมาไม่เกินคุณลักษณะความสูงช่องเปิด  $\delta_c$   
ในทางตรงข้ามเมื่อผนังท้ายห้องปิดลงมามากกว่า  $\delta_c$  แล้ว คุณลักษณะของการไหลภายในห้อง  
แทบจะไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดของผนังท้ายห้องที่ปิดลงมา จากการวิเคราะห์ทางกายภาพพบว่า  
คุณลักษณะความสูง  $\delta_c$  คือความสูงของผนังท้ายห้องที่ทำให้ Wall jet เปลี่ยนทิศพุ่งลงสู่พื้นห้อง  
แล้วทำให้เกิดจุด Reattachment ขึ้นภายในห้อง ซึ่งในช่วงที่ผนังท้ายห้องปิดลงมาน้อยกว่า  $\delta_c$  จะ  
มีอากาศจากภายนอกห้องถูกดึงเข้ามาภายในห้อง แต่เมื่อผนังท้ายห้องปิดลงมามากกว่า  $\delta_c$  แล้วจะ  
ไม่เกิดการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา.....2544.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4170594121: MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD : VENTILATED CHAMBER / RECIRCULATION / LAMINAR FLOW / COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS / FINITE VOLUME METHOD

SUTHICHOCK NUNTHASOOKKASAME : EFFECTS OF AN END-WALL OPENING ON THE FLOW PATTERN IN A CHAMBER FROM NUMERICAL STUDY

THESIS ADVISOR: ASST. PROF. ASI BUNYAJITRADULYA, Ph.D., 213 pp.  
ISBN 974-03-1298-5

Effects of end-wall opening on laminar flow pattern in a ventilated chamber at low Reynolds numbers of 1, 10 and 100 were investigated numerically. Two-dimensional ventilated chamber was 50 cm. high and 100 cm. long. The supply inlet with 4 cm. high was located on one wall immediately under the ceiling. The adjustable outlet was located on the opposite wall immediately above the floor. In the calculation, finite volume method with staggered grid arrangement was used with SIMPLE procedure.

The results indicated that (1) at low Reynolds number,  $Re = 1$  and 10, Reynolds number influenced the flow pattern only in the upstream portion of the chamber while end-wall opening influenced the flow pattern only in the downstream portion of the chamber. (2) In contrast, at high Reynolds number,  $Re = 100$ , the calculated flow pattern had different characteristics from those of  $Re = 1$  and 10. Namely, both Reynolds number and end-wall opening influenced the flow pattern in the whole chamber. In particular, the flow pattern depended on end-wall opening only in the range from full opening (100%) to 40% opening. On the contrary, in the range of end-wall opening less than 40%, the flow pattern was nearly unchanged.

In addition, when the results were compared with those of Stitsuwongkul (2000) and Stitsuwongkul and Bunyajitradulya (2000), they revealed the followings. The flow characteristics depended on the end-wall closing only in the range of closing from 0 (full opening) to the end-wall closing characteristic height,  $\delta_c$ . Beyond  $\delta_c$ , the flow characteristics were relatively independent of the closing. It was found from physical considerations that the end-wall closing characteristic height,  $\delta_c$ , was the closing height that diverted wall jet towards the floor, causing the impingement of the jet and the existence of the reattachment point inside the chamber. In the range of end-wall closing above this height, outside fluid was found to be entrained into the chamber. In contrast, in the range of end-wall closing below this height, no entrainment was allowed.

Department..... Mechanical..... Student's signature.....  
Field of study..... Mechanical..... Advisor's signature.....  
Academic year..... 2001..... Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่อาจสำเร็จลุล่วงไปได้ ถ้ามิรับคำแนะนำ และความช่วยเหลือจาก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของผู้วิจัย ท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์. ดร. อติ บุญจิตราคุลย์ ผู้ซึ่งให้ความรู้ ประสบการณ์ แนวความคิด และโอกาสที่ดีต่างๆ ทั้งที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษา และการดำเนินชีวิตของผู้วิจัย

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คณะกรรมการวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ และอาจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ ที่ได้ให้คำแนะนำต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ตลอดเวลาที่ผู้วิจัยศึกษา และทำวิทยานิพนธ์ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล ผู้วิจัยได้รับคำแนะนำ ความช่วยเหลือ และน้ำใจจากพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ สมาชิกห้องปฏิบัติการเป็นอย่างดี ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณ พี่อลงกรณ์ พิมพ์พิณ พี่ทศพล สถิตสุวรรณกุล และพี่เกียรติศักดิ์ กอบกาญจนานกร ที่ได้ถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ และให้คำปรึกษาในทุกๆ ด้าน ขอขอบคุณ พงศ์พฤทธิ์ อุปถัมภ์รารากร สุเมธ ไตรภพสกุล และวีรินทร์ หวังจิรนิรันดร์ ที่เอื้อเฟื้อน้ำใจ และฝ่าฟันอุปสรรคต่างๆ มาด้วยกัน โดยตลอด นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ ประมะ พรหมสุทธิรักษ์ ปิติพงษ์ เย็นจิตต์ ชมพิชาน์ กุหิรัญ สิทธิพงษ์ สถาพรนันทน์ สุพจน์ เทพพิพัฒน์ และบุคลากรทุกคน ซึ่งไม่สามารถยกมากล่าวในที่นี้ได้ทั้งหมด ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณครอบครัวของผู้วิจัยทุกคนที่ให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยมีกำลังใจในการทำงาน และผ่านพ้นอุปสรรคต่างๆ ที่เกิดขึ้น สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขออุทิศความสำเร็จทั้งหมดแด่มารดาของผู้วิจัย

สุทธิโชค นันทสุขเกษม

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
รายการสัญลักษณ์.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์.....	10
1.4 ขอบเขตของงานทำวิจัย.....	10
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	12
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	12
บทที่ 2 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....	13
2.1 สมการควบคุมการไหล.....	13
2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม.....	16
2.3 วิธีการประมาณค่าสำหรับ Convective flux.....	18
2.4 การวางตัวของกริดที่ใช้ในการคำนวณ.....	22
2.5 สมการผลต่างความดัน.....	25
2.6 ขั้นตอนการคำนวณแบบ SIMPLE.....	27
2.7 ลักษณะการไหลและเงื่อนไขขอบเขต.....	28
2.8 การหาผลเฉลยของระบบสมการพีชคณิต.....	30
บทที่ 3 การวิเคราะห์ผลการคำนวณ.....	37
3.1 การวิเคราะห์ผลการคำนวณเชิงตัวเลข.....	37
3.2 การวิเคราะห์ผลการคำนวณเชิงกายภาพ.....	43



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 อภิปรายผลการคำนวณ.....	75
บทที่ 5 สรุปผลการคำนวณ.....	83
5.1 สรุปผลการคำนวณ.....	83
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	85
ประมวลตาราง.....	87
ประมวลรูปภาพ.....	98
รายการอ้างอิง.....	165
ภาคผนวก.....	168
ภาคผนวก ก.....	169
ภาคผนวก ข.....	176
ภาคผนวก ค.....	198
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	213

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1	ตารางแสดงรายละเอียดและผลการศึกษการไหลหมุนวนใน Ventilated chamber..... 88
ตารางที่ 1.2	ตารางแสดงรายละเอียดของพารามิเตอร์และผลที่ได้จากการศึกษการไหลผ่าน BFS..... 93
ตารางที่ 2.1	ตัวแปรและค่าคงที่ต่างๆ ในสมการ 2.8..... 97
ตารางที่ 3.1	ค่าสัมประสิทธิ์ความดันเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ย สำหรับการไหลภายในห้องที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์และช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ..... 97
ตารางที่ 4.1	ค่า $\delta_c$ ที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ 8,800, 1,000 และ 100..... 97

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	ลักษณะของห้องที่ใช้ในการศึกษาของ Nielsen et al. (1978).....	99
รูปที่ 1.2	ลักษณะของ BFS และ Confined ventilated enclosure ในการศึกษา ของ Peng et al. (1997).....	99
รูปที่ 1.3	ลักษณะของห้องที่ใช้ในการศึกษาของ Sezai and Mohamad (1998).....	100
รูปที่ 1.4	ลักษณะของห้อง ระบบแกนพิกัด (บน) และผลการคำนวณด้วย LES (ล่าง) จากการศึกษาของ Davidson et al. (2000).....	100
รูปที่ 1.5	ลักษณะการไหลผ่าน Backward facing step ในการศึกษาของ Bradshaw and Wong (1972).....	101
รูปที่ 1.6	กราฟแสดงผลการวัดระยะ Reattachment ตามการเปลี่ยนแปลงค่าเรย์ โนลด์นัมเบอร์ของ Armaly et al. (1983).....	101
รูปที่ 1.7	กราฟแสดงผลของ Expansion ratio ต่อระยะ Reattachment (ซ้าย) และระบบแกนพิกัด (ขวา) ที่ใช้ในงานวิจัยของ Otugen (1991) .....	102
รูปที่ 1.8	ลักษณะของ Ventilated chamber และระบบแกนพิกัดที่ใช้ในวิทยา นิพนธ์ฉบับนี้.....	102
รูปที่ 2.1	ขอบเขตของปัญหาที่ถูกแบ่งออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็กๆ ด้วยระเบียบวิธี ไฟไนต์วอลุ่ม.....	103
รูปที่ 2.2	ลักษณะการประมาณแบบ Upwind differencing scheme .....	103
รูปที่ 2.3	ลักษณะการประมาณแบบ Central differencing scheme.....	104
รูปที่ 2.4	การวางกริดแบบ Colocated grid arrangement.....	104
รูปที่ 2.5	การกระจายความดันแบบ Checker board.....	105
รูปที่ 2.6	การวางกริดแบบ Stagger grid arrangement.....	106
รูปที่ 2.7	แผนภูมิขั้นตอนการคำนวณแบบ SIMPLE.....	107
รูปที่ 2.8	ปริมาตรควบคุมของความดันแก้ไข ( $P'$ ) ที่อยู่ติดกับช่องทางเข้า.....	108
รูปที่ 2.9	ทิศทางการคำนวณหาค่าของแต่ละเอลิเมนต์ในเมตริกซ์ $L$ , $U$ และ $R$ .....	108
รูปที่ 2.10	แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทำงานของ Strongly Implicit Procedure (Stone, 1968).....	109
รูปที่ 3.1	ลักษณะการไหลภายในช่องว่าง.....	110
รูปที่ 3.2	รูปร่างความเร็วของการไหลภายในช่องว่างที่ $Re = 100$ .....	111
รูปที่ 3.3	Stream line contour ของการไหลภายในช่องว่างที่ $Re = 100$ (82x82).....	111

## สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.4	รูปร่างความเร็วของการไหลภายในช่องว่างที่ $Re = 1,000$ ..... 112
รูปที่ 3.5	Seam line contour ของการไหลภายในช่องว่างที่ $Re = 1,000$ (82x82) ... 112
รูปที่ 3.6	ลักษณะการไหลผ่าน Backward facing step ..... 113
รูปที่ 3.7	การไหลผ่าน BFS (Expansion ratio = 1.94) ที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ต่างๆ ... 114
รูปที่ 3.8	ระยะ Reattachment จากการคำนวณที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ต่างๆ เปรียบเทียบกับผลของ Armaly et al. (1983) ..... 115
รูปที่ 3.9	การไหลผ่าน BFS (Expansion ratio = 4.0) ที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ 100 ..... 116
รูปที่ 3.10	ลักษณะ และความสัมพันธ์ของกริดทั้ง 3 ขนาด ..... 117
รูปที่ 3.11	รูปร่างความเร็วจากการคำนวณด้วยวิธี HDS บนกริดขนาดต่างๆ ..... 118
รูปที่ 3.12	รูปร่างความเร็วจากการคำนวณด้วยวิธี CDS บนกริดขนาดต่างๆ ..... 121
รูปที่ 3.13	Stream line contour ของการไหลภายในห้องที่ $Re = 1$ สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ ..... 124
รูปที่ 3.14	การกระจายตัวของความเร็ว $u/U_{in}$ และ Stream line ของการไหลภายในห้องที่ $Re = 1$ สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ ..... 126
รูปที่ 3.15	การกระจายตัวของความเร็ว $v/U_{in}$ และ Stream line ของการไหลภายในห้องที่ $Re = 1$ สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ ..... 127
รูปที่ 3.16	การกระจายของสัมประสิทธิ์ความดัน และ Stream line ของการไหลภายในห้องที่ $Re = 1$ สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ ..... 128
รูปที่ 3.17	ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อรูปร่างความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวการไหล สำหรับการไหลที่ $Re = 1$ ..... 129
รูปที่ 3.18	ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่ออัตราส่วนการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง (Entrainment ratio) สำหรับการไหลที่ $Re = 1$ ..... 130
รูปที่ 3.19	ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อระยะ Reattachment สำหรับการไหลที่ $Re = 1$ ..... 130
รูปที่ 3.20	ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลัก สำหรับการไหลที่ $Re = 1$ ..... 131
รูปที่ 3.21	Stream line contour ของการไหลภายในห้องที่ $Re = 10$ สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ ..... 132

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.22	การกระจายตัวของ $u/U_{in}$ และ Stream line ของการไหลภายในห้องที่ $Re = 10$ สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ..... 134
รูปที่ 3.23	การกระจายตัวของ $v/U_{in}$ และ Stream line ของการไหลภายในห้องที่ $Re = 10$ สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ..... 135
รูปที่ 3.24	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความดันและ Stream line ของการไหลภายในห้องที่ $Re = 10$ สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ..... 136
รูปที่ 3.25	ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อรูปร่างความเร็ว $u$ ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวการไหล สำหรับการไหลที่ $Re = 10$ ..... 137
รูปที่ 3.26	ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่ออัตราส่วนการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง (Entrainment ratio) สำหรับการไหลที่ $Re = 10$ ..... 138
รูปที่ 3.27	ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อระยะ Reattachment สำหรับการไหลที่ $Re = 10$ ..... 138
รูปที่ 3.28	ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลัก สำหรับการไหลที่ $Re = 10$ ..... 139
รูปที่ 3.29	Stream line contour ของการไหลภายในห้องที่ $Re = 100$ สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ..... 140
รูปที่ 3.30	การกระจายตัวของ $u/U_{in}$ และ Stream line ของการไหลภายในห้องที่ $Re = 100$ สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ..... 142
รูปที่ 3.31	การกระจายตัวของ $v/U_{in}$ และ Stream line ของการไหลภายในห้องที่ $Re = 100$ สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ..... 144
รูปที่ 3.32	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความดันและ Stream line ของการไหลภายในห้องที่ $Re = 100$ สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ..... 146
รูปที่ 3.33	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความดัน, ความเร็วตามแนว Stream wise, Transverse และ Stream line สำหรับการไหลที่อัตราส่วนช่องเปิดเท่ากับ 0.10..... 148
รูปที่ 3.34	ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อการกระจายรูปร่างความเร็ว $u$ ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวการไหล สำหรับการไหลที่ $Re = 100$ ..... 149

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.35	ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่ออัตราส่วนการดึงอากาศจากภายนอกห้อง เข้ามาภายในห้อง (Entrainment ratio) สำหรับการไหลที่ $Re = 100$ ..... 150
รูปที่ 3.36	ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อระยะ Reattachment สำหรับการไหลที่ $Re = 100$ ..... 150
รูปที่ 3.37	ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวน หลัก สำหรับการไหลที่ $Re = 100$ ..... 151
รูปที่ 3.38	ผลของเรย์โนลด์์นัมเบอร์ต่อรูปแบบการไหลที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้าย เท่ากับ 1.0, 0.60 และ 0.08 ..... 152
รูปที่ 3.39	ผลของเรย์โนลด์์นัมเบอร์ต่อรูปร่างความเร็ว $u$ ตามแนว Downstream ที่ ช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ ..... 153
รูปที่ 3.40	ผลของเรย์โนลด์์นัมเบอร์ต่ออัตราส่วนการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้า มาภายในห้อง (Entrainment ratio) ที่ช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ ..... 156
รูปที่ 3.41	ผลของเรย์โนลด์์นัมเบอร์ต่อระยะ Reattachment ที่ช่องเปิดด้านท้าย ขนาดต่างๆ ..... 156
รูปที่ 3.42	ผลของเรย์โนลด์์นัมเบอร์ต่อตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลักที่ ช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ ..... 157
รูปที่ 3.43	งบลุดของสมการการถ่ายเทโมเมนตัมตามแนวแกน $x$ ที่ความสูง $y/H =$ $0.5$ สำหรับการไหลที่ $Re = 1, 10$ และ $100$ ..... 158
รูปที่ 4.1	กราฟแสดงผลของความเร็วที่ช่องทางอากาศเข้าต่อการกระจายตัวของ อุณหภูมิเฉลี่ย ( $C_T$ ) ในบริเวณด้านบนและด้านล่างของห้องในกรณีที่ไม่มี Lobed nozzle (Stitsuwongkul and Bunyajitradulya, 2000) ..... 160
รูปที่ 4.2	กราฟแสดงผลของความเร็วที่ช่องทางอากาศเข้าต่อลักษณะการกระจายตัวของ อุณหภูมิเฉลี่ย ( $C_T$ ) ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนว Downstream บน Center plane (Stitsuwongkul and Bunyajitradulya, 2000) ..... 161
รูปที่ 4.3	ภาพ Flow visualization ด้วยวิธี Smoke-wire (Stitsuwongkul, 2000) ..... 162

## รายการสัญลักษณ์

### อักษรลาติน

<b>A</b>	เวกเตอร์ของพื้นที่ เมตริกซ์ของสัมประสิทธิ์ในระบบสมการพีชคณิต
<i>A</i>	พื้นที่ผิวของปริมาตรควบคุม
<i>a</i>	สัมประสิทธิ์การคำนวณในสมการพีชคณิต
$B_i$	แรงจากภายนอกที่กระทำกับปริมาตรควบคุมต่อหน่วยปริมาตร ในทิศทาง <i>i</i>
<i>b</i>	Source term ในสมการพีชคณิต
$C_p$	สัมประสิทธิ์ความดัน ( $C_p = \frac{P - P_{ref.}}{\frac{1}{2} \rho U_{in}^2}$ )
<i>D</i>	Diffusive flux ( $D = \frac{\Gamma A}{\delta n}$ )
<i>ER</i>	อัตราส่วนการดึงอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้อง (Entrainment ratio, $ER = \frac{\dot{m}_{outlet}}{\dot{m}_{inlet}} \times 100\%$ )
$E_r$	อัตราส่วนการขยาย (Expansion ratio, $E_r = H/h$ )
<i>F</i>	Convective flux ( $F = \rho u_i A$ )
<i>H</i>	ความสูงของห้อง
<i>h</i>	ความสูงของช่องทางเข้า
<i>L</i>	ความยาวของห้อง
<b>L</b>	เมตริกซ์ประกอบของเมตริกซ์ <b>M</b> ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ตลอดแถบบนขวาเป็นศูนย์
MAX(A,B)	ฟังก์ชันการเลือกค่าที่มากที่สุดระหว่าง A และ B
<b>M</b>	เมตริกซ์ประมาณค่าของเมตริกซ์ <b>A</b>
<i>m</i>	อัตราการไหลเชิงมวล (Mass flux)
<b>N</b>	เมตริกซ์ผลต่างระหว่างเมตริกซ์ <b>M</b> และ <b>A</b>
<i>P</i>	ความดัน
<i>Pe</i>	เพคเลตน์ัมเบอร์ (Peclet number, $Pe = \frac{F}{D}$ )
<b>Q</b>	เวกเตอร์ของตัวรู้ค่าในระบบสมการพีชคณิต
<i>q</i>	Total flux, ผลรวมของ Convective flux กับ Diffusive flux
<i>Re</i>	เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ( $Re = \frac{\rho U_{in} h}{\mu}$ )



<b>R</b>	เมตริกซ์ชั่วครวในการแก้ระบบสมการด้วยวิธี SIP ( $\mathbf{R} = \mathbf{U}\delta$ )
$S_\phi$	รูปทั่วไปของ Source term ในสมการการอนุรักษ์
$\bar{S}$	ค่าเฉลี่ยของ Source term ในแต่ละปริมาตรควบคุม ( $\bar{S} = S_C + S_P\phi_P$ )
$t$	เวลา
	ความสูงของช่องเปิดด้านท้าย
<b>U</b>	เวกเตอร์ของความเร็ว
	เมตริกซ์ประกอบของเมตริกซ์ <b>M</b> ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ตลอดแถบล่างซ้ายเป็นศูนย์
$U_{in}$	ความเร็วของอากาศที่ช่องทางเข้า
$u_i$	ความเร็วใน Cartesian coordinate โดย $u_1 = u$ คือความเร็วในแนวแกน $x$ , $u_2 = v$ คือความเร็วในแนวแกน $y$ และ $u_3 = w$ คือความเร็วในแนวแกน $z$
$V$	ปริมาตรของปริมาตรควบคุม
$X_r$	ระยะ Reattachment
$x_i$	แกนพิกัดในระบบ Cartesian coordinate โดย $x_1 = x$ , $x_2 = y$ และ $x_3 = z$

### อักษรกรีก

$\alpha$	ตัวประกอบการผ่อนปรนต่ำ (Under relaxation factor)
$\beta$	ตัวประกอบการผสม (Blending factor)
$\delta_{ij}$	Kronecker delta, โดย $\delta_{ij} = 1$ เมื่อ $i = j$ และ $\delta_{ij} = 0$ เมื่อ $i \neq j$
$\delta_C$	คุณลักษณะความสูงของผนังท้ายห้อง (End-wall closing characteristic height)
$\delta$	เวกเตอร์ของค่าแก้ไข
$\Delta$	ขนาดของกริด
$\varepsilon$	ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ (Convergence criteria)
$\phi$	เวกเตอร์ของตัวแปรในระบบสมการพีชคณิต
$\phi$	คุณสมบัติใดๆ ของของไหล
$\lambda$	ตัวประกอบน้ำหนักเรขาคณิต (Geometric weight factor)
$\Gamma_\phi$	รูปทั่วไปของสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (General diffusivity coefficient)
$\mu$	ความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute viscosity, $\text{Ns/m}^2$ )
$\rho$	เวกเตอร์ของค่าเสถียรเฉลี่ยในระบบสมการพีชคณิต
$\rho$	ความหนาแน่นของของไหล (Density, $\text{Kg/m}^3$ )
$\sigma_{ij}$	Stress tensor



**ตัวห้อย**

$E$	โหนดของปริมาตรควบคุมทางทิศตะวันออก
$e$	ผิวของปริมาตรควบคุมทางทิศตะวันออก
$i$	ดัชนีแสดงตำแหน่งของโหนดบนกริดตามแนวแกน $x$
$j$	ดัชนีแสดงตำแหน่งของโหนดบนกริดตามแนวแกน $y$
$N$	โหนดของปริมาตรควบคุมทางทิศเหนือ
$NB$	โหนดของปริมาตรควบคุมที่อยู่รอบข้าง
$n$	ผิวของปริมาตรควบคุมทางทิศเหนือ ทิศทางที่ตั้งฉากกับผิวของปริมาตรควบคุม
$nb$	ผิวของปริมาตรควบคุมด้านต่างๆ
$P$	โหนดที่กำลังพิจารณา (Present node)
$S$	โหนดของปริมาตรควบคุมทางทิศใต้
$s$	ผิวของปริมาตรควบคุมทางทิศใต้
$W$	โหนดของปริมาตรควบคุมทางทิศตะวันตก
$w$	ผิวของปริมาตรควบคุมทางทิศตะวันตก

**ตัวยก**

$H$	ระเบียบวิธีอันดับสูง (Higher order)
$L$	ระเบียบวิธีอันดับต่ำ (Lower order)
$*$	ค่าของตัวแปรที่คำนวณครั้งล่าสุด
$/$	ค่าของตัวแปรแก้ไข
$\sim$	ค่าของตัวแปรที่คำนวณจากความเร็วแก้ไข

**ตัวย่อ**

CDS	Central Difference Scheme
HDS	Hybrid Difference Scheme
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
SIP	Strongly Implicit Procedure
SOU	Second Order Upwind scheme
TDMA	Tri-Diagonal Matrix Algorithm
UDS	Upwind Difference Scheme

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การไหลหมุนวน (Recirculating flow) เป็นลักษณะของการไหลที่มีของไหลส่วนหนึ่งในการไหลเคลื่อนที่หมุนวนเป็นวงปิด ซึ่งเป็นบริเวณที่yakต่อการวัดค่าความเร็ว ความดัน หรือคุณสมบัติอื่นๆ รวมทั้งยังyakต่อการทำนายการไหลด้วยวิธีทางทฤษฎี (Theoretical analysis) และระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical analysis) การไหลลักษณะนี้สามารถพบเห็นได้ทั่วไปในงานด้านวิศวกรรม เช่น การไหลของอากาศผ่านปีกเครื่องบินในขณะที่เกิดสภาวะไร้แรงยก (Stall), การไหลผ่านดักฟิวเซอร์ (Diffuser), การไหลผ่านท่อ หรือช่องทางการไหลที่ขยายหรือลดพื้นที่หน้าตัดทันที (Sudden expansion or contraction duct), การไหลผ่านสิ่งกีดขวางต่างๆ (Flow through bluff body) รวมถึงการไหลภายในห้องที่มีการระบายอากาศ (Flow in ventilation chamber) เป็นต้น

ในห้องที่มีระบบระบายอากาศ (Ventilated room) การไหลหมุนวนจะเป็นลักษณะการไหลที่สำคัญ และสังเกตเห็นได้ชัดเจนที่สุด โดยมีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ (Temperature distribution), การกระจายตัวของฝุ่นผง หรือกลิ่น (Contaminant distribution) และการใช้พลังงานภายในห้อง ตัวอย่างของการไหลภายในห้องที่มีระบบระบายอากาศที่เห็นได้ชัดเจน ได้แก่ การไหลของอากาศภายในห้องที่มีการติดตั้งเครื่องปรับอากาศ ซึ่งส่วนมากจะติดตั้งเครื่องปรับอากาศไว้ในบริเวณใต้เพดานทำให้เกิดการไหลหมุนวนขึ้น เนื่องจากเจ็ต (Jet) ของอากาศเย็นจากเครื่องปรับอากาศเหนี่ยวนำให้อากาศนิ่งรอบข้างเคลื่อนที่ ร่วมกับผลจากการเปลี่ยนทิศทางของเจ็ตเมื่อชนกับผนัง ลักษณะเช่นนี้ทำให้บริเวณที่อยู่ภายในการไหลหมุนวน เช่น ในบริเวณกลางห้องมีอุณหภูมิต่ำ ส่วนบริเวณที่อยู่นอกขอบเขตของการไหลหมุนวน เช่น บริเวณใต้เครื่องปรับอากาศ หรือตามมุมห้องจะมีอุณหภูมิสูงกว่า

การไหลของอากาศในโกดังเก็บสินค้าตามโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ก็เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของการไหลภายในห้องที่มีระบบระบายอากาศ ภายในโกดังเก็บของที่ประตูท้ายโกดังสามารถเลื่อนปรับระดับได้นั้น จะพบว่าลักษณะการไหลของอากาศ, การระบายอากาศและการกระจายตัวของอุณหภูมิจะแตกต่างกันออกไปตามระดับความสูงของการเปิดประตูท้ายโกดัง โดยถ้าประตูท้ายโกดังเปิดเพียงเล็กน้อยจะทำให้เกิดลักษณะของการไหลหมุนวนได้ง่ายกว่า และเกิดเป็นบริเวณกว้างกว่าในกรณีที่เปิดประตูท้ายโกดังมาก ๆ ที่ความเร็วอากาศเข้าเดียวกัน ซึ่งจะมีผลอย่างมาก

ต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่เก็บอยู่ภายในโกดัง ดังนั้นหากเรามีความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะการไหลของอากาศภายในห้องที่มีขนาดช่องระบายอากาศออกต่างๆ กันแล้ว ก็จะทำให้สามารถควบคุมคุณลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นภายในห้องนั้นๆ ให้เหมาะสมกับความต้องการได้ดียิ่งขึ้น

## 1.2 การศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมา

การไหลหมุนวนที่เกิดขึ้นภายในห้อง (Recirculating flow in a ventilation chamber) ได้มีการศึกษากันมาบ้างแล้ว แต่งานวิจัยส่วนมากจะเป็นการศึกษาถึงรูปแบบการไหลภายในห้องที่ช่องเปิดด้านท้ายห้องมีขนาดคงที่เพียงค่าเดียว หรือการประยุกต์ Turbulence model ชนิดต่างๆ กับการไหลภายในห้อง ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยที่ผ่านมาต่อไปนี้

Nielsen et al. (1978) ศึกษาลักษณะของการไหลภายในห้อง ทั้งแบบ 2 และ 3 มิติ ด้วยการทดลอง และการคำนวณ สำหรับห้องที่ศึกษามีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยห้องมีความสูง ( $H$ ) 89.3 มิลลิเมตร ยาว  $3H$  และกว้าง  $1H$  ช่องทางอากาศเข้าอยู่สูงติดเพดาน มีความสูง  $0.056H$  กว้าง  $0.5H$  และ  $1H$  ส่วนช่องทางอากาศไหลออกมีความสูง  $0.16H$  และกว้าง  $1H$  ติดตั้งอยู่ที่ด้านล่างของผนังฝั่งตรงข้ามกับช่องทางอากาศเข้า ในการทดลอง ใช้ Laser-Doppler Anemometry (LDA) วัดค่าของความเร็วเฉลี่ย และความเร็ว rms ของการไหล โดยช่วงของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ( $Re_h$ ) ที่ทำการทดลองอยู่ระหว่าง 5,000 ถึง 10,000 ซึ่งผลของการทดลองแสดงให้เห็นว่าการไหลจะมีลักษณะแบบ Wall jet ในบริเวณด้านบนของห้อง และเกิดลักษณะของการไหลหมุนวน (Recirculating flow) ที่บริเวณกลางห้อง ในการคำนวณนั้นใช้ TEACH คอมพิวเตอร์โปรแกรม (Gosman and Pun, 1974) จำลองการไหลแบบปั่นป่วนในลักษณะเดียวกันนี้ทั้งใน 2 และ 3 มิติ โดยเพิ่มลักษณะพิเศษของเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) แบบ Wall jet ที่บริเวณช่องทางอากาศเข้า ผลจากการคำนวณที่ได้ถูกตรวจสอบกับผลจากการทดลองในกรณีที่ไม่ปิดผนังทางด้านท้าย ซึ่งให้ผลที่มีค่าผิดพลาดอยู่ในช่วง  $\pm 5\%$  ของความเร็วที่ทางเข้า แล้วจำลองการไหลในกรณีที่มีผนังด้านท้าย และปรับเปลี่ยนรูปร่างของช่องทางอากาศเข้า ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ที่ความเร็วทางเข้าคงที่ ค่าความเร็วย้อนกลับสูงสุดในบริเวณของการไหลหมุนวนจะแปรผันตามขนาดของช่องทางอากาศเข้า และแปรผกผันกับความยาวของห้อง ส่วนในกรณีที่ช่องทางอากาศเข้ามีลักษณะเป็นช่องแคบพบว่า อัตราส่วนของความเร็วย้อนกลับสูงสุดต่อความเร็วที่ทางเข้าจะแปรผันตาม อัตราส่วนของความสูงของช่องทางเข้าต่อความสูงของห้อง ยกกำลัง 0.5

Gosman et al. (1980) ศึกษาผลของขนาดช่องทางอากาศเข้าต่อลักษณะการไหลภายในห้อง โดยทำการทดลองและการคำนวณ ในการทดลอง วัดค่าของความเร็วเฉลี่ย และ Normal stress

ตามแนวความยาวของห้องด้วย LDA ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 9,000 สำหรับห้องที่ใช้ศึกษามีขนาดเช่นเดียวกับของ Nielsen et al. (1978) ต่างกันตรงช่องทางอากาศเข้าที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $0.1H \times 0.1H$  ส่วนในการคำนวณ ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference method) ในการแก้สมการ Time averaged Navier-Stokes ใน 3 มิติ และใช้  $k - \epsilon$  โมเดลเพื่อทำนายการไหลแบบปั่นป่วน ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า การไหลภายในห้องที่ศึกษามีลักษณะเป็น 3 มิติ ที่มีลักษณะใกล้เคียงกันแม้ว่าจะเปลี่ยนขนาดพื้นที่หน้าตัดของช่องทางอากาศเข้า โดยที่ยังคงความเร็วทางเข้าไว้เท่าเดิม สำหรับค่าความเร็วย้อนกลับสูงสุดในบริเวณของการไหลหมุนวนจะแปรผันตามพื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศเข้า โดยไม่ขึ้นกับรูปร่าง และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณกับผลการทดลอง พบว่าแตกต่างกันอยู่ในช่วง  $\pm 5\%$  ของความเร็วสูงสุด

Peng et al. (1996, 1997) ศึกษาการไหลแบบหมุนวน โดยพัฒนา Low-Reynolds-Number  $k - \omega$  Model (Wilcox, 1994) เพื่อทำนายลักษณะการไหลในบริเวณใกล้ผนังให้แม่นยำยิ่งขึ้น ด้วยการเพิ่มเทอมของ Turbulent cross diffusion ลงในสมการของ Specific dissipation rate of turbulent kinetic energy ( $\omega$ ) รวมทั้งปรับปรุง Damping function และค่าคงที่ต่างๆ เมื่อนำโมเดลที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้มาใช้ทำนายการไหลผ่าน Backward facing step (BFS) และการไหลภายใน Confined ventilation enclosure ดังแสดงในรูปที่ 1.2 แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโมเดลอื่นและผลการทดลองของ Restivo (1979) พบว่าโมเดลตัวใหม่นี้สามารถทำนายการไหลได้ใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าโมเดลอื่น โดยเฉพาะในบริเวณใกล้ผนัง

Davidson (1996) และ Davidson and Nielsen (1996) ศึกษาการไหลภายในห้องที่มีลักษณะเดียวกับการทดลองของ Restivo (1979) ด้วยวิธี Large Eddy Simulation (LES) ซึ่งเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน นอกเหนือจากการใช้ Turbulence model ประเภท Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) โดยในการศึกษานี้ได้เลือกใช้ Subgrid stress model สองชนิด คือ Smagorinsky model (Smagorinsky, 1963) และ Dynamic model (Germano, 1991) เปรียบเทียบกับผลจากการวัดด้วย LDA ของ Restivo (1979) ผลการคำนวณที่ได้พบว่า Smagorinsky model ให้ค่าที่ค่อนข้างสอดคล้องกับผลการทดลอง แต่ผลที่ได้ขึ้นกับค่าคงที่อิสระ  $C_s$  (Smagorinsky constant) ในโมเดลอย่างมาก ทำให้เมื่อใช้งาน Smagorinsky model ต้องปรับค่าคงที่อิสระตัวนี้ให้เหมาะสมกับการไหลนั้นๆ ก่อน ส่วน Dynamic model ก็ให้ผลการคำนวณที่สอดคล้องกับผลจากการทดลองเช่นกัน แต่ไม่จำเป็นต้องปรับค่าคงที่อิสระ เนื่องจาก Dynamic model จะคำนวณค่าคงที่อิสระตัวนี้จากคุณสมบัติของการไหลเอง ทำให้โมเดลนี้เหมาะที่จะนำไปใช้จำลองการไหลต่างๆ ไปมากกว่า

นอกจากนี้ผลการคำนวณที่ได้จาก Subgrid stress model ทั้งสองยังแสดงให้เห็นว่า รูปแบบการไหลภายในห้องมีลักษณะที่แตกต่างกันในแต่ละบริเวณ โดยในบริเวณใกล้กับเพดาน การไหลมีลักษณะเป็น Wall jet ส่วนในตอนกลางของห้องเกิดบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดใหญ่ และมีบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดเล็กที่มีทิศทางการหมุนตรงข้ามกับการไหลหมุนวนขนาดใหญ่อยู่ที่มุมขวาบน และมุมซ้ายล่างของห้อง สำหรับคุณสมบัติของการไหลภายในห้องนั้นมิได้เป็น Fully turbulent เหมือนกันตลอดทั่วทั้งห้อง แต่มีบางบริเวณที่การไหลไม่มีเสถียรภาพ (Unstable) มีการแกว่งของค่าความเร็วอย่างมาก (Strong fluctuation) ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้เองทำให้ Turbulence model ประเภท RANS ทำนายลักษณะการไหลภายในห้องได้ไม่ดีนัก

Sezai and Mohamad (1998) ศึกษารูปแบบการไหลและการพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural convection) ที่เกิดขึ้นภายในห้องที่มีผนังหนึ่งเปิดออกสู่บรรยากาศ ด้วยการจำลองการไหลแบบ 3 มิติที่สภาวะคงตัว (Steady state) ห้องที่ใช้ในการศึกษามีความสูง  $H$  ยาว  $L$  และกว้าง  $B$  ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ผนังด้านหนึ่งของห้องมีอุณหภูมิคงที่ ( $t_h$ ) ส่วนผนังอีก 4 ด้านที่เหลือหุ้มฉนวนกันความร้อน ( $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$  เมื่อ  $n$  เป็นทิศทางที่ตั้งฉากกับผนัง) ผนังตรงข้ามกับผนังที่มีอุณหภูมิคงที่ที่เปิดออกสู่บรรยากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ( $t_c$ ) ดังนั้นการไหลภายในห้องจึงเกิดขึ้นจากความร้อนที่ผนังทำให้อากาศใกล้ผนังลอยตัวขึ้นชนเพดานแล้วเคลื่อนที่ออกไปนอกห้อง ในขณะที่เดียวกัน บริเวณด้านล่างของห้องก็จะมีอากาศเย็นจากนอกห้องเคลื่อนตัวเข้ามาแทนที่

ในการศึกษานี้กำหนดค่า Prandtl number ( $Pr$ ) ของอากาศให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.71 โดยเปลี่ยนค่า Rayleigh number ( $Ra$ ) ตั้งแต่  $10^3$  จนถึง  $10^6$  และปรับเปลี่ยนอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของห้อง (Lateral aspect ratio,  $B/H$ ) จาก 0.125 จนถึง 2.0 ผลที่ได้จากการคำนวณพบว่า 1.) เมื่อคงค่า  $Ra$  ไว้เท่ากับ  $10^6$  แล้วเปลี่ยนอัตราส่วน  $B/H$  จะเกิดลักษณะของการไหลหมุนวนที่มีแกนของการหมุนอยู่ในแนวความกว้างของห้อง (Span-wise direction) ในบริเวณใกล้กับรอยต่อระหว่างเพดานกับผนังด้านที่มีอุณหภูมิสูง โดยบริเวณของการไหลหมุนวนจะเคลื่อนที่ต่ำลงมายังกลางห้อง และมีขนาดเล็กลงจนหายไปหมดเมื่ออัตราส่วน  $B/H$  มีค่าลดลงจาก 2.0 จนถึง 0.25 และที่อัตราส่วน  $B/H$  มีค่ามากกว่า 1.0 รูปแบบการไหลจะไม่แตกต่างกันมากนัก 2.) เมื่อคงอัตราส่วน  $B/H$  ไว้เท่ากับ 1.0 แล้วเปลี่ยนค่า  $Ra$  พบว่า การไหลจะมีลักษณะเป็น 3 มิติเมื่อ  $Ra$  มีค่ามากกว่า  $10^5$  ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ารูปแบบการไหลภายในห้องที่มีผนังด้านหนึ่งเปิดออกสู่บรรยากาศจะมีลักษณะเป็น 2 มิติ เมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของห้องมีค่ามากกว่า 1 และมีค่า  $Ra$  น้อยกว่า  $10^5$

Kuhhiran et al. (1999) ศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนความสูงของผนังท้ายห้องต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้อง โดยห้องที่ใช้ในการศึกษามีขนาดกว้าง ( $W$ ) 50 ซม. ยาว ( $L$ )



100 ซม. และสูง( $H$ ) 50 ซม. มีช่องทางอากาศเข้าสูง( $h$ ) 4 ซม. และกว้างตลอดความกว้างของห้องติดตั้งอยู่ใต้เพดานบนผนังฝั่งหนึ่ง และมีช่องทางอากาศออกที่สามารถปรับเปลี่ยนความสูงได้ อยู่บนผนังฝั่งตรงข้าม ที่ช่องทางเข้า อากาศมีความเร็ว 4.4 เมตรต่อวินาทีและมีเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ประมาณ  $10^4$  ในการทดลอง อากาศจะถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศประมาณ 40 องศาเซลเซียสก่อนที่จะผ่านเข้าไปในห้อง แล้วจึงวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องที่ปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดที่ผนังท้ายห้องด้วย Thermocouple ผลจากการทดลองพบว่า อากาศที่ไหลออกจากช่องทางเข้ามีลักษณะเป็น Wall jet ในบริเวณด้านบนของห้อง และเกิดบริเวณของการไหลหมุนวนที่กกลางห้อง และในกรณีที่มีผนังท้ายห้องปิดลงมาต่ำกว่า  $\delta$  เมื่อ  $\delta$  คือความหนาของเจ็ตบนช่องทางออกในกรณีที่ไม่มีการปิดผนังด้านท้าย เจ็ตส่วนหนึ่งจะเคลื่อนที่ชนกับผนังแล้วตกลงมายังพื้นห้อง แต่ยังคงมีเจ็ตบางส่วนเคลื่อนที่ข้ามผนังท้ายห้องออกไปได้ทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิแตกต่างกันมากภายในห้อง แต่ในกรณีที่ผนังท้ายห้องปิดลงมาต่ำกว่า  $\delta$  เจ็ตจะเคลื่อนที่ไปชนกับผนังท้ายห้องแล้วสะท้อนลงมายังพื้นห้องทั้งหมด จึงทำให้อากาศส่วนใหญ่เคลื่อนที่หมุนวนอยู่ในห้อง ดังนั้นการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องจึงค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งห้อง

Stitsuwongkul (2000) และ Stitsuwongkul and Bunyajitradulya (2000) ศึกษาเกี่ยวกับการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องระบายอากาศ โดยศึกษาผลของการใช้ Lobed nozzle รูปทรงปิรามิดและผลของการปรับเปลี่ยนความเร็วอากาศเข้า ควบคู่กับการปรับเปลี่ยนขนาดของช่องระบายอากาศด้านท้ายห้อง สำหรับห้องที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเช่นเดียวกับห้องทดลองที่ใช้ในงานของ Khuhiran et al. (1999) โดยในการทดลองนี้อากาศที่ผ่านช่องอากาศเข้าถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศประมาณ 40 องศาเซลเซียส มีค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ( $Re_h$ ) ประมาณ 1,000 สำหรับกรณีความเร็วต่ำ ( $U = 0.5$  m/s) และ 8,800 สำหรับกรณีความเร็วสูง ( $U = 4.4$  m/s) แล้ววัดการกระจายตัวของอุณหภูมิด้วย Thermocouple

ผลจากการทดลองพบว่า Lobed nozzle ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผสม และทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศภายในห้องมีความสม่ำเสมอมากขึ้นกว่ากรณีที่ไม่ใช้ Lobed nozzle โดยเฉพาะในกรณีที่อัตราส่วนพื้นที่การเปิดผนังท้ายห้องน้อย สำหรับผลของความเร็วอากาศเข้านั้นพบว่า การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยที่บริเวณด้านบนและด้านล่างของห้องมีลักษณะที่ต่างกันตามการเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องระบายอากาศออก คือ ที่บริเวณด้านบนของห้อง อุณหภูมิเฉลี่ยจะขึ้นอยู่กับขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องเฉพาะในช่วงตั้งแต่กรณีที่เปิดผนังท้ายห้องเต็มที่ จนถึงกรณีที่ปิดผนังลงมาไม่เกิน  $\delta$  (เมื่อ  $\delta$  คือความหนาของ Wall jet ที่ตำแหน่งท้ายห้องในกรณีที่เปิดผนังด้านท้ายเต็มที่) แต่เมื่อปิดผนังลงมามากกว่า  $\delta$  แล้วอุณหภูมิเฉลี่ยที่บริเวณด้านบนของห้องจะมีค่าประมาณคงที่ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยที่บริเวณด้านบนของห้องลักษณะนี้พบได้ทั้งในกรณีความเร็วต่ำและความเร็วสูง แต่ในทางตรงข้าม ที่บริเวณด้านล่างของห้องการเปลี่ยนแปลง

อุณหภูมิเฉลี่ยตามขนาดช่องเปิดจะขึ้นกับความเร็วอากาศเข้าอย่างมาก โดยในกรณีความเร็วสูงพบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยจะมีลักษณะเช่นเดียวกับบริเวณด้านบน คืออุณหภูมิเฉลี่ยจะขึ้นกับขนาดของช่องเปิดตั้งแต่กรณีเปิดเต็มที่ถึงกรณีปิดลงมาไม่เกิน  $\delta$  และมีค่าประมาณคงที่เมื่อปิดผนังลงมากกว่า  $\delta$  ส่วนในกรณีความเร็วต่ำพบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยยังคงขึ้นกับขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้องถึงแม้ว่าผนังจะปิดลงมามากกว่า  $\delta$  แล้วก็ตาม โดยการเปลี่ยนแปลงนี้มีลักษณะแปรผกผันแบบเชิงเส้นกับขนาดช่องเปิดในช่วงกลางของการเปิด-ปิด นอกจากนี้ยังพบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยที่บริเวณด้านล่างของห้องในกรณีความเร็วต่ำ มีความสม่ำเสมอน้อยกว่าในกรณีความเร็วสูง และลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยแบบท้องช้าง (Dip) ที่พบในกรณีความเร็วสูงหายไป ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความรุนแรงที่ลดลงของการไหลหมุนวน

Davidson et al. (2000) ศึกษาลักษณะการไหลภายในห้องระบายอากาศที่มีค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่ำ ด้วยการคำนวณใน 3 ลักษณะ คือ 1.) การคำนวณโดยมีสมมติฐานว่าการไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบที่ไม่คงตัวใน 2 มิติ (Unsteady, 2D Laminar flow), 2.) การคำนวณโดยใช้ Turbulence model ประเภท RANS โดยเลือกใช้  $k - \omega$  ของ Peng et al. (1997) และ 3.) การคำนวณโดยใช้ LES ร่วมกับ Dynamic One-Equation model สำหรับการไหลที่ศึกษามีค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ( $Re_h$ ) เท่ากับ 600 โดยห้องที่ใช้มีความสูง  $H$  หน่วย ยาว ( $L$ )  $1.68H$  และกว้าง ( $W$ )  $1.44H$  มีช่องทางอากาศเข้าสูง ( $h$ )  $0.008H$  อยู่บนผนังฝั่งซ้ายได้เพดาน และมีช่องทางอากาศออกสูง ( $t$ )  $0.16H$  อยู่ติดพื้นบนผนังฝั่งเดียวกัน ช่องทางอากาศเข้าและออกมีความกว้างตลอดความกว้างของห้อง ดังแสดงในรูปที่ 1.4 (บน)

ผลจากการคำนวณพบว่า ลักษณะของการไหลในบริเวณระนาบกึ่งกลาง (Center plane) ที่ได้จากการคำนวณแบบราบเรียบที่ไม่คงตัวใน 2 มิติ จะขึ้นอยู่กับการกระจาย Convective term ในสมการนาเวียร์-สโตร์คที่เลือกใช้อย่างมาก สำหรับผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้  $k - \omega$  โมเดลนั้นแตกต่างจากผลที่ได้จากวิธีแรก และผลจากการทดลองอย่างสิ้นเชิง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Turbulence model ประเภท RANS นั้นไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ทำนายการไหลที่มีค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่ำภายในห้อง ส่วนผลจากการคำนวณด้วย LES นั้นพบว่าเจ็ตของอากาศจากช่องทางเข้าจะเคลื่อนที่ไปตามเพดานเป็นระยะทางประมาณ  $1.4H$  แล้วจึงแยกตัวออกจากเพดาน (Detach) พุ่งเข้าชนกับผนังฝั่งตรงข้ามกับช่องทางเข้า จากนั้นจึงเคลื่อนที่ไปตามผนังตกลงสู่พื้นห้อง แล้วเคลื่อนที่ย้อนกลับไปตามพื้นห้องสู่ช่องทางออก ลักษณะการไหลเช่นนี้ทำให้เกิดบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดใหญ่ตรงกลางของห้อง และบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดเล็กที่มีทิศการหมุนตรงข้ามที่บริเวณมุมด้านบนของห้อง ดังแสดงในรูปที่ 1.4 (ล่าง) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณด้วย LES กับผลจากการทดลองของ Topp et al. (2000) พบว่าสอดคล้องกันเป็นอย่างดี นอกจากนี้ผลการคำนวณยังแสดงให้เห็นว่าการไหลภายในห้องนั้นไม่ได้มีลักษณะเป็น Fully



turbulent ตลอดทั่วทั้งห้อง แต่มีบางบริเวณที่การไหลมีลักษณะเป็น Transitional flow ซึ่งลักษณะของการไหลที่แตกต่างกันไปในแต่ละบริเวณนี้เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ Turbulence model ไม่สามารถทำนายการไหลประเภทนี้ได้

จากการศึกษางานวิจัยในอดีตเกี่ยวกับการไหลภายในห้องระบายอากาศที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่างานวิจัยส่วนมากจะศึกษาลักษณะการไหลในห้องระบายอากาศที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สูง และช่องทางอากาศออกมีขนาดคงที่เพียงค่าเดียว แต่ช่องทางอากาศเข้าอาจเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและรูปร่าง ผลจากการศึกษาพอจะสรุปได้ว่า สำหรับห้องระบายอากาศที่มีช่องทางอากาศเข้าอยู่บนผนังฝั่งหนึ่งในบริเวณใต้เพดาน และมีช่องทางอากาศออกอยู่บนผนังฝั่งตรงข้ามติดพื้น การไหลภายในห้องจะมีลักษณะเป็น Wall jet ในบริเวณใกล้เพดาน ส่วนในตอนกลางห้องจะเกิดบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดใหญ่ขึ้น และมีบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดเล็กที่มีทิศการหมุนตรงข้ามกับบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดใหญ่อยู่ตามมุมห้อง

ในกรณีที่ห้องมีความยาวมากพอจะพบว่า การไหลของอากาศภายในห้องมีลักษณะคล้ายกับการไหลผ่าน Backward Facing Step (BFS) ยกเว้นในบริเวณใกล้ช่องทางอากาศออกของห้อง ซึ่งการไหลจะได้รับอิทธิพลจากผนังท้ายห้อง ดังนั้นการไหลผ่าน BFS จึงเป็นตัวอย่างที่ดีที่จะศึกษาถึงลักษณะของการไหลหมุนวนที่เกิดขึ้นภายในห้อง

สำหรับการไหลผ่าน BFS โดยทั่วไปแล้วมีลักษณะการไหลที่สำคัญเกิดขึ้น 2 บริเวณได้แก่ บริเวณของการไหลหมุนวน (Recirculation region) และบริเวณของการปรับตัวสู่สภาวะสมดุล (Relaxation region) โดยมีจุด Reattachment เป็นจุดแบ่งบริเวณทั้งสองนี้ ซึ่งลักษณะการไหลภายในบริเวณทั้งสองนี้ขึ้นกับปัจจัยหลายๆ ประการ เช่น ชนิดของการไหลก่อนผ่าน BFS (Laminar หรือ Turbulent), ความหนาของชั้นขอบเขตของของไหล (Boundary layer) ก่อนผ่าน BFS หรือ อัตราส่วนความสูงของช่องทางเข้าต่อความสูงทั้งหมดของช่องทางไหล ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยที่ผ่านมามาต่อไปนี้

Bradshaw and Wong (1972) เป็นหนึ่งในนักวิจัยกลุ่มแรกๆ ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการไหลผ่าน BFS โดยเน้นการศึกษาบริเวณของการปรับตัวเข้าสู่สภาวะสมดุล ในการศึกษานี้ได้พิจารณาการไหลผ่าน BFS ออกเป็นสองบริเวณหลักๆ ดังแสดงในรูปที่ 1.5 คือ

1. บริเวณของการไหลหมุนวน (Recirculation region) เป็นบริเวณที่อยู่ถัดจากผนังด้านข้างของ BFS ซึ่งของไหลส่วนหนึ่งเคลื่อนตัวหมุนวนอยู่กับที่ บริเวณนี้เกิดขึ้นจากการที่ Shear layer ที่มาจาก Upstream เคลื่อนที่หลุดออกจากขอบของ BFS แล้วตกลงมาชนกับพื้นด้านล่าง ทำให้ของไหลแยกตัวออกเป็นสองส่วนที่จุด Reattachment ซึ่งมวลส่วนหนึ่งของของไหลที่

สะท้อนกับพื้นแล้วเคลื่อนที่ย้อนกลับไปยังด้านหน้าของจุด Reattachment เป็นตัวทำให้เกิดการไหลหมุนวนขึ้น

2. บริเวณของการปรับตัวเข้าสู่ภาวะสมดุล (Relaxation region) เป็นบริเวณที่อยู่หลังจุด Reattachment โดย Shear layer ที่ชนกับพื้นแล้วสะท้อนไปยังด้านหลังของจุด Reattachment จะค่อยๆ ปรับตัวเข้าสู่ภาวะสมดุลของ Boundary layer ซึ่งใช้ระยะทางประมาณ 30 เท่าของความสูงของ Step

Moss et al. (1979) ทำการทดลองวัดค่าของความเร็วเฉลี่ย, Reynolds stress และความดันบนผนังของการไหลผ่าน BFS ด้วย Pulse-wire anemometer และ X-array hot-wire anemometer แล้วเปรียบเทียบผลจากการวัดกับผลที่ได้จากการคำนวณของ Launder and Spalding, (1972) จากการทดลองพบว่า ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของการไหลย้อนกลับในบริเวณของการไหลหมุนวน มีค่าประมาณ 20% ของความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของการไหลหลัก แต่ยังไม่พบลักษณะของ Vortex shedding และไม่สามารถวัด Secondary recirculation ได้เพราะขนาดของเครื่องมือวัดที่ใช้ใหญ่เกินกว่าที่จะวัดค่าที่บริเวณมุมของ BFS ได้ นอกจากนี้ยังได้ทดลองทาน้ำมันบาง ๆ บนพื้นในบริเวณที่เกิดการ Reattach ทำให้เห็นลักษณะของแนวที่ตั้งฉากกับการไหลหลักตามแนวความกว้างของชุดทดลอง (Span wise direction) ซึ่งแสดงว่าการไหลมีลักษณะเป็นสองมิติ และไม่พบ Stream wise structure

Gosman et al. (1979) ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (TEACH) ขึ้นเพื่อทำนายลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนใน 2 มิติ ที่มีการไหลหมุนวน โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method) ร่วมกับการวางกริด (Grid) แบบ Stagger grid และ Standard  $k - \epsilon$  model (Launder and Spalding, 1972) โปรแกรมนี้ได้ถูกตรวจสอบกับการไหลหมุนวนหลายๆ ชนิด ซึ่งการไหลผ่าน BFS ก็เป็นการไหลแบบหนึ่งที่ถูกทดสอบ โดยเปรียบเทียบกับผลการวัดของ Abbott and Kline, (1962) ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกัน และสามารถแสดงรายละเอียดของการไหลในบริเวณ Recirculation ได้มากกว่าด้วย

Armaly et al. (1983) ศึกษาการไหลผ่าน BFS ด้วยการทดลอง และการคำนวณ โดย BFS ที่ใช้ในการศึกษานี้มีอัตราส่วนระหว่างความสูงของช่องทางไหลออกต่อความสูงของช่องทางไหลเข้า (Expansion ratio,  $E_r$ ) ประมาณ 1.94 ในการทดลอง วัดค่าของความเร็วเฉลี่ยด้วย LDA ในช่วงของเรย์โนลด์นัมเบอร์ ( $Re_h$ ) ตั้งแต่ 70 ถึง 8,000 ซึ่งครอบคลุมช่วงการไหลตั้งแต่ Laminar, Transitional จนถึง Turbulent flow การไหลที่ทางเข้ามีลักษณะเป็น Fully developed flow ซึ่งผลจากการทดลอง (รูปที่ 1.6) แสดงให้เห็นว่าสามารถแบ่งช่วงของการไหลตามค่า  $Re_h$  ได้เป็น

- การไหลแบบ Laminar flow อยู่ในช่วงของ  $Re_h$  น้อยกว่า 1,200 พบว่าความยาวของระยะ Reattachment ( $X_r$ ) จะเป็นฟังก์ชันแบบไม่เชิงเส้นกับค่า  $Re_h$  ซึ่งขัดแย้งกับผลการศึกษาของ Goldstein et al. (1970)
- การไหลแบบ Transitional flow อยู่ในช่วงของ  $Re_h$  ตั้งแต่ 1,200 ถึง 6,600 พบว่า  $X_r$  จะลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงค่าต่ำที่สุดที่  $Re_h$  ประมาณ 5,500
- การไหลแบบ Turbulent flow อยู่ในช่วงของ  $Re_h$  มากกว่า 6,600 พบว่า  $X_r$  จะมีค่าค่อนข้างคงที่ประมาณ 8 เท่าของความสูงของ BFS ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Abbott and Kline, (1962) ที่ทำการทดลองในลักษณะเดียวกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับผลของ Brederode and Bradshaw (1972) ซึ่งทำการทดลองที่ Expansion ratio เท่ากับ 1.2 แล้ววัดระยะ  $X_r/S$  (โดย  $S$  คือ ความสูงของ BFS) ได้ประมาณ 6 และผลของ Moss et al. (1979) ซึ่งทำการทดลองที่ Expansion ratio เท่ากับ 1.1 แล้ววัดระยะ  $X_r/S$  ได้ประมาณ 5.5 ทำให้ได้ข้อสังเกตว่าระยะ Reattachment นอกจากจะเป็นฟังก์ชันของ  $Re_h$  แล้ว ยังเป็นฟังก์ชันของ Expansion ratio อีกด้วย

Otugen (1991) ศึกษาถึงผลของ Expansion ratio,  $E_r$  (ในการศึกษานี้ นิยาม  $E_r$  เป็นอัตราส่วนของความสูงของ Step ต่อความสูงของช่องทางเข้า) ที่มีต่อลักษณะของการไหลหมุนวนและระยะ Reattachment ในการไหลผ่าน BFS โดยทดลองเปลี่ยนค่าของ  $E_r$  ไป 3 ค่าคือ 0.5, 1.0 และ 2.13 ด้วยการเปลี่ยนความสูงของ Step แต่คงค่าของพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ ไว้ แล้ววัดค่าความเร็วเฉลี่ย และ Turbulence intensity ด้วย LDA ที่ตำแหน่งต่างๆ หลัง Step ผลจากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 1.7 พบว่า ถ้าขนาดของ  $E_r$  เพิ่มขึ้น ระดับของ Turbulence intensity ใน Shear layer ที่ขอบของ Step จะเพิ่มขึ้น ทำให้ Shear layer โตเร็วขึ้น ดังนั้น ระยะ Reattachment จึงหดสั้นลง

Davidson and Nielsen (1998) ศึกษาการไหลผ่าน BFS ที่มีช่องทางออกสูง ( $H$ ) 3 เมตร ช่องทางเข้าสูง  $1/6H$  และกว้าง  $3H$  ที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ 780 และ 5,000 ด้วยการคำนวณแบบ LES โดยใช้ Dynamic one-equation model ในการคำนวณ Subgrid stress

ผลการคำนวณที่ได้พบว่า ที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ 780 การไหลมีลักษณะค่อนข้างจะเป็น Laminar flow ในบริเวณใกล้กับช่องทางเข้า โดยมี  $U_{rms}$  ประมาณ 1.4% ของความเร็วที่ช่องทางเข้า จากนั้นการไหลจะค่อยๆ เปลี่ยนไปเป็น Fully turbulent ในบริเวณท้ายการไหล ซึ่งมี  $U_{rms}$  ประมาณ 11.5% ของความเร็วที่ช่องทางเข้า ระยะ Reattachment ที่คำนวณได้มีความยาวเท่ากับ 9.2 เท่าของความสูงของ Step ซึ่งยาวกว่าระยะ Reattachment ที่คำนวณได้ที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ 5,000 พฤติกรรมของระยะ Reattachment ที่ลดลงเมื่อค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Armaly et al. (1983) และ Romano et al. (1997) นอกจากนี้ผล

การคำนวณที่ได้ยังแสดงให้เห็นว่ามีบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดเล็กที่มีทิศทางการหมุนตรงข้ามกับบริเวณแรก (Secondary recirculation) ในบริเวณมุมด้านล่างของ BFS สำหรับกรณีที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 5,000 พบว่าการไหลมีลักษณะเป็น Fully turbulent ตั้งแต่ช่องทางเข้า โดยผลการคำนวณที่ได้ค่อนข้างสอดคล้องกับผลการทดลองของ Restivo (1979) ยกเว้นระยะ Reattachment ที่คำนวณได้นั้นยาวกว่าผลการทดลองประมาณ 20% ซึ่งความแตกต่างนี้น่าจะมีสาเหตุมาจาก การใช้กริดที่ไม่ละเอียดพอในการคำนวณ หรือความไม่เหมาะสมของ Subgrid stress model ที่เลือกใช้ หรือความไม่เหมาะสมของเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในบริเวณช่องทางเข้า

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาพฤติกรรมของการไหลแบบหมุนวนของการไหลใน Ventilated chamber และการไหลผ่าน BFS ที่กล่าวมาข้างต้นได้แสดงรายละเอียดของพารามิเตอร์ และสภาวะที่ทำการทดลองในตารางที่ 1.1 และ 1.2 ตามลำดับ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าการศึกษถึงการไหลภายในห้องพอสสมควรรูปแบบใดก็ตาม นอกเหนือจากงานของ Khuhiran et al. (1999), Stitsuwongkul (2000) และ Stitsuwongkul and Bunyajitradulya (2000) แล้ว การศึกษาผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่อลักษณะการไหลภายในห้องยังมีน้อยอยู่ ซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อขนาดช่องเปิดด้านท้ายเปลี่ยนแปลงไปจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานทางด้านการระบายอากาศ และการออกแบบห้องเผาไหม้ ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

### 1.3 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาผลของขนาดช่องเปิดที่ผนังท้ายห้อง และผลของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของการไหลภายในห้อง ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะนำเอาการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) มาใช้ในการศึกษาลักษณะทางกายภาพของการไหลหมุนวนภายในห้องระบายอากาศ (Ventilated chamber) ที่มีขนาดเช่นเดียวกับที่ใช้ในงานของ Stitsuwongkul (2000) โดยจะจำลองการไหลเป็น 2 มิติ หรือเฉพาะระนาบกึ่งกลาง (Center plane) ของห้องระบายอากาศที่มีความกว้าง ( $W$ ) 0.5 เมตร ยาว ( $L$ ) 1.0 เมตร และสูง ( $H$ ) 0.5 เมตร มีช่องทางอากาศเข้าขนาดสูง ( $h$ ) 0.04 เมตร และช่องทางอากาศออกที่ปรับเปลี่ยนความสูงได้ ( $t$ ) อยู่บนผนังฝั่งตรง

ข้าม ดังแสดงในรูปที่ 1.8 แล้วศึกษาผลของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่อคุณลักษณะของการไหลภายในห้องในช่วงการไหลแบบราบเรียบ

ในการจำลองการไหลจะพัฒนาคอมพิวเตอร์โปรแกรมด้วยภาษา FORTRAN เพื่อแก้สมการนาเวียร์-สโตร์ค (Navier-Stokes equations) และสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) โดยมีสมมติฐานว่าการไหลที่พิจารณาเป็นการไหลหนืดแบบราบเรียบที่อัดตัวไม่ได้ในสองมิติ แล้วทดสอบโปรแกรมกับปัญหาทางการไหลแบบพื้นฐานที่มีผลเฉลยแน่นอนตรง หรือการไหลที่มีผู้ศึกษามาก่อนแล้ว

หลังจากนั้นจะนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้มาใช้ในการศึกษาการไหลภายในห้องที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ 1, 10 และ 100 โดยนิยามเรย์โนลด์์นัมเบอร์จาก

$$Re = \frac{\rho U_{in} h}{\mu}$$

- เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของอากาศ ( $\rho = 1.165 \text{ kg/m}^3$ )  
 $\mu$  คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของอากาศ ( $\mu = 1.864 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$ )  
 $U_{in}$  คือ ความเร็วของอากาศที่ช่องทางเข้า  
 $h$  คือ ความสูงของช่องทางเข้า

สำหรับการไหลที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ 1 และ 10 จะปรับอัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายไป 9 ค่า คือ  $t/H = 0.08, 0.2, 0.4, 0.6, 0.68, 0.76, 0.84, 0.92$  และ 1.0 ส่วนการไหลที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ 100 จะเพิ่มอัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายอีกสามค่า คือ  $t/H = 0.1, 0.3$  และ 0.96

สำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1.) ส่วนการคำนวณก่อนการวิเคราะห์ (Pre-processing part)

ในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างกริด (Grid) สำหรับการไหลใน 2 มิติภายในรูปทรงของปัญหาที่สนใจบน Cartesian coordinate โดยกริดที่สร้างขึ้นจะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม ที่สามารถปรับให้มีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ (Uniform) และไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform) ได้ตามความเหมาะสมกับปัญหา

2.) ส่วนการวิเคราะห์ปัญหา (Analysis part)

ในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยกลุ่มของโปรแกรมย่อย ๆ ที่ใช้ในการแก้สมการนาเวียร์-สโตร์ค และสมการความต่อเนื่อง ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตของปัญหาที่สนใจ โดยอาศัยข้อมูลตำแหน่งของกริดจากโปรแกรมในส่วนการคำนวณก่อนการวิเคราะห์ ผลที่ได้จาก



โปรแกรมส่วนนี้จะอยู่ในรูปของคุณสมบัติของการไหลที่ตำแหน่งต่างๆ บนกริด ได้แก่ ความเร็วตามแนวแกน  $x, y$  และความดัน

### 3.) ส่วนการคำนวณหลังการวิเคราะห์ (Post-processing part)

ในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างภาพ (Plotting program) และคำนวณหาคุณสมบัติของการไหลตัวอื่นๆ เช่น ระยะเวลา Reattachment, อัตราส่วนการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง (Entrainment ratio,  $ER$ ), ตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวน และสัมประสิทธิ์ความดัน (Pressure coefficient,  $C_p$ ) จากข้อมูลความเร็ว และความดัน นอกจากนี้ยังประกอบด้วยโปรแกรมที่ใช้จัดเรียงข้อมูลใหม่เพื่อให้สามารถส่งผลการคำนวณไปพล็อตด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปตัวอื่นๆ ได้

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.) ศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเบื้องต้น เพื่อการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับจำลองการไหลแบบราบเรียบที่อัดตัวไม่ได้ ใน 2 มิติ
- 2.) ทดสอบคอมพิวเตอร์โปรแกรมกับปัญหาการไหลพื้นฐานที่มีผลเฉลยแม่นยำตรง หรือปัญหาการไหลที่มีผลจากการทดลองหรือการคำนวณอื่นอยู่แล้ว
- 3.) จำลองการไหลภายในห้องด้วยคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น เพื่อศึกษาถึงรูปแบบการไหลภายในห้องที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อปรับเปลี่ยนขนาดของช่องเปิดด้านท้าย ที่ค่าเรย์โนลด์ส์ นัมเบอร์ต่างๆ
- 4.) วิเคราะห์ และสรุปผล

## 1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

ผลการศึกษาที่ได้จะขยายความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของการไหลภายในห้องที่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดช่องเปิดด้านท้าย ซึ่งข้อมูลเชิงวิชาการดังกล่าวจะเป็นพื้นฐานในการออกแบบระบบระบายอากาศภายในห้อง, ปรับปรุงประสิทธิภาพการผสมในห้องเผาไหม้ และอาจนำไปใช้เป็นแนวทางในการควบคุมการไหล (Flow control) ด้วยการใช้สิ่งกีดขวางการไหล

นอกจากนี้วิธีการวิเคราะห์ปัญหาการไหลด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ในการศึกษานี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ปัญหาการไหลอื่นๆ ได้อีกด้วย

## บทที่ 2

### ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

การจำลองการไหลด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นการวิเคราะห์ปัญหาของระบบการไหล, การถ่ายเทความร้อน และปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกับการไหล เช่น การเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยการจำลองปัญหาล่าช้าบนคอมพิวเตอร์ (Computer-based simulation) ปรากฏการณ์ทางการไหล, การถ่ายเทความร้อน และปฏิกิริยาเคมีต่างๆ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) ซึ่งไม่สามารถแก้ระบบสมการเหล่านี้เพื่อหาผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution) ได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ (Analytical analysis) ยกเว้นในกรณีพิเศษบางกรณีเท่านั้น

ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical analysis) จึงเข้ามามีบทบาทในการหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximation solution) โดยอาศัยการกระจายเทอมต่างๆ (Discretization) เพื่อประมาณสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้ด้วยระบบสมการพีชคณิต (System of algebraic equations) ซึ่งสามารถหาผลเฉลยของระบบสมการนี้ได้ด้วยคอมพิวเตอร์

#### 2.1 สมการควบคุมการไหล (Governing equations)

การไหลของของไหลลักษณะต่างๆ สามารถอธิบายได้ด้วยกฎการอนุรักษ์มวลและกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมภายในปริมาตรควบคุม (Control volume) ใดๆ โดยเขียนอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยได้ดัง สมการความต่อเนื่อง และสมการโมเมนตัม

##### สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

สมการความต่อเนื่องเป็นสมการที่อธิบายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลภายในปริมาตรควบคุมใดๆ มีค่าเท่ากับปริมาณมวลสุทธิที่ผ่านเข้า และออกจากผิวของปริมาตรควบคุมนั้น ๆ ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.1)$$

เมื่อ  $i$  คือ Cartesian tensor index ที่แสดงถึงปริมาณในแกนพิกัด  $x, y$  และ  $z$



### สมการโมเมนตัม (Momentum equation)

สมการโมเมนตัมเป็นสมการที่อธิบายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมภายในปริมาตรควบคุมใดๆ มีค่าเท่ากับแรงลัพธ์ที่กระทำกับปริมาตร และผิวของปริมาตรควบคุมนั้นๆ ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + B_i \quad (2.2)$$

สำหรับของไหลที่เป็นนิวทอนเนียน (Newtonian fluid) Stress tensor ( $\sigma_{ij}$ ) จะมีความสัมพันธ์กับ Strain rate tensor ตามสมการ Stress-Strain relationship (Melaan, 1990 และ Versteeg and Malalasekera, 1995) ดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$\sigma_{ij} = -\left(P + \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)\delta_{ij} + \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (2.3)$$

โดยที่สัญลักษณ์ Kronecker delta ( $\delta_{ij}$ ) มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ  $i = j$  และมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อ  $i \neq j$  และเมื่อแทนค่าสมการ Stress-Strain relationship ลงในสมการที่ 2.2 จะได้ รูปทั่วไปของสมการนาเวียร์-สโตว์ค (Navier-Stokes equation)

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ -P\delta_{ij} + \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\mu\left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)\delta_{ij} \right] + B_i \quad (2.4)$$

สำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการไหลที่สภาวะคงตัว (Steady state) ของของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) ใน 2 มิติ (Two-dimensional) ดังนั้นสมการที่ 2.1 และ 2.4 จึงถูกลดรูปลงตามสมมติฐานต่อไปนี้

- 1) การไหลอยู่ในสภาวะคงตัว :  $\frac{\partial \phi}{\partial t} = 0$  เมื่อ  $\phi$  คือคุณสมบัติใดๆ ของของไหล
- 2) ของไหลอัดตัวไม่ได้ : ความหนาแน่นของของไหลมีค่าประมาณคงที่  
 $\rho(x_i, t) = \rho = \text{Constant}$
- 3) การไหลแบบ 2 มิติ : คุณสมบัติต่างๆ ของของไหลเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งบนระนาบ  $x$ - $y$  โดยที่ Cartesian tensor index,  $i$  มีค่าเท่ากับ 1 และ 2
- 4) ตัดผลของ Body force : พิจารณาว่า Body force ที่กระทำกับปริมาตรควบคุมมีผลต่อการไหลน้อยมาก,  $B_i = 0$

สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) จะลดรูปลงเป็น

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

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.5)$$

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.6)$$

สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation) จะลดรูปลงเป็น

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ -P \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \right] + B_i \quad (1) \quad (2.6) \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2.7)$$

สมการที่ 2.5 และ 2.7 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปของสมการการอนุรักษ์ (Conservation equation) ได้เป็น

$$\frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right] + S_\phi \quad (2.8)$$

โดย  $\phi$ ,  $\Gamma_\phi$  และ  $S_\phi$  มีค่าดังแสดงในตารางที่ 2.1

รูปทั่วไปของสมการการอนุรักษ์ในสมการ (2.8) เป็นรูปแบบของสมการที่นำไปใช้ในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป นอกจากนี้รูปทั่วไปของสมการการอนุรักษ์ยังสามารถประยุกต์ใช้กับสมการการอนุรักษ์พลังงาน หรือสมการการอนุรักษ์ของปริมาณสเกลาร์ต่างๆ (Scalar properties) ได้อีกด้วย

## 2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่อาศัยการอินทิเกรตสมการการอนุรักษ์บนปริมาตรควบคุม (Control volume) โดยแบ่งขอบเขตของปัญหาที่สนใจ ออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็กๆ จำนวนมาก ดังรูปที่ 2.1 แต่ละปริมาตรควบคุมจะล้อมรอบโหนด (Node) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงค่าเฉลี่ยของปริมาณต่างๆ ในปริมาตรควบคุมนั้น ผลจากการอินทิเกรตสมการการอนุรักษ์ (2.8) แล้วประยุกต์ Gauss divergence theorem จะได้สมการพีชคณิตของแต่ละปริมาตรควบคุมที่มีตัวแปรเป็นค่าของปริมาณใดๆ บนโหนดในปริมาตรควบคุมนั้น และปริมาตรควบคุมรอบข้าง

จากสมการ 2.8 สามารถเขียนให้อยู่ในรูป Divergence form ได้เป็น

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) + S_\phi \quad (2.9)$$

อินทิเกรตสมการ 2.9 บนปริมาตรควบคุมใดๆ (ในที่นี้จะอินทิเกรตบนปริมาตรควบคุมเฉพาะใน 2 มิติ โดยใช้รูปที่ 2.1 เป็นปริมาตรควบคุมตัวอย่าง)

$$\int_{\delta V} \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \phi) dV = \int_{\delta V} \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) dV + \int_{\delta V} S_\phi dV \quad (2.10)$$

ประยุกต์ Gauss divergence theorem กับสมการ 2.10

$$\begin{aligned} \int_{\delta S} \rho \mathbf{U} \phi d\mathbf{A} &= \int_{\delta S} \Gamma_\phi \nabla \phi d\mathbf{A} + \int_{\delta V} S_\phi dV \\ \rho \mathbf{U} \cdot \mathbf{A} \phi|_e - \rho \mathbf{U} \cdot \mathbf{A} \phi|_w + \rho \mathbf{U} \cdot \mathbf{A} \phi|_n - \rho \mathbf{U} \cdot \mathbf{A} \phi|_s &= \\ \Gamma_\phi \mathbf{A} \cdot \nabla \phi|_e - \Gamma_\phi \mathbf{A} \cdot \nabla \phi|_w + \Gamma_\phi \mathbf{A} \cdot \nabla \phi|_n - \Gamma_\phi \mathbf{A} \cdot \nabla \phi|_s + \bar{S}_\phi V & \\ (\rho U_e A_e) \phi_e - (\rho U_w A_w) \phi_w + (\rho U_n A_n) \phi_n - (\rho U_s A_s) \phi_s &= \\ (\Gamma_\phi A_e) \frac{\partial \phi}{\partial n}|_e - (\Gamma_\phi A_w) \frac{\partial \phi}{\partial n}|_w + (\Gamma_\phi A_n) \frac{\partial \phi}{\partial n}|_n - (\Gamma_\phi A_s) \frac{\partial \phi}{\partial n}|_s + \bar{S}_\phi V & \end{aligned} \quad (2.11)$$

เมื่อ

$\phi_{nb}$  คือ ค่าของ  $\phi$  ที่ผิว  $nb$  ของปริมาตรควบคุม

$\frac{\partial \phi}{\partial n}|_{nb}$  คือ ค่าของอัตราการเปลี่ยนแปลงของ  $\phi$  ในทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นผิว  $A_{nb}$  ของปริมาตรควบคุม

$nb$  แสดงถึง ผิวของปริมาตรควบคุมทางทิศตะวันออก ( $e$ ), ตะวันตก ( $w$ ), เหนือ ( $n$ ), หรือใต้ ( $s$ )

สำหรับเทอม  $\phi_{nb}$  ใน Convective flux และ เทอม  $\left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_{nb}$  ใน Diffusive flux ต้องอาศัยการประมาณค่า (Interpolation) จากข้อมูลของ  $\phi$  บนโหนดรอบข้าง

ใน Diffusive flux การประมาณค่า  $\left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_{nb}$  ที่ผิวด้านต่างๆ ของปริมาตรควบคุม ใช้การประมาณค่าแบบเชิงเส้น (Linear interpolation) โดยพิจารณาว่าการเปลี่ยนแปลงระหว่างค่า  $\phi$  บนโหนดที่ใช้ในการคำนวณสองโหนดที่อยู่ติดกันมีการเปลี่ยนแปลงค่าอย่างต่อเนื่องแบบเชิงเส้น ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของ  $\phi$  ที่ผิวของปริมาตรควบคุมซึ่งอยู่ระหว่างโหนดทั้งสองจะมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_e &= \left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_e = \frac{\phi_E - \phi_P}{x_E - x_P}, & \left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_w &= \left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_w = \frac{\phi_P - \phi_W}{x_P - x_W}, \\ \left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_n &= \left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_n = \frac{\phi_N - \phi_P}{y_N - y_P}, & \left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_s &= \left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_s = \frac{\phi_P - \phi_S}{y_P - y_S} \end{aligned} \quad (2.12)$$

แทนสมการ 2.12 ลงในสมการ 2.11

$$\begin{aligned} F_e \phi_e - F_w \phi_w + F_n \phi_n - F_s \phi_s &= D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W) + \\ &D_n (\phi_N - \phi_P) - D_s (\phi_P - \phi_S) + (S_C + S_P \phi_P) V \end{aligned} \quad (2.13)$$

โดย

$$\begin{aligned} F_{nb} &= \rho U_{nb} A_{nb} \\ D_{nb} &= \frac{\Gamma_\phi A_{nb}}{\delta n} \end{aligned}$$

เมื่อแทนค่า  $\phi_{nb}$  ที่ได้จากการประมาณค่าลงในสมการที่ 2.13 แล้วจัดรูปใหม่ จะได้รูปทั่วไปของสมการพีชคณิต ดังสมการที่ 2.14

$$a_P \phi_P = \sum_{NB} a_{NB} \phi_{NB} + b \quad (2.14)$$

เมื่อ

$NB$  แสดงถึงโหนดรอบข้างทางทิศตะวันออก ( $E$ ), ตะวันตก ( $W$ ), เหนือ ( $N$ ) และใต้ ( $S$ )

และ

$$a_p = \sum_{NB} a_{NB} + (F_e - F_w + F_n - F_s) - S_p V$$

$$b = S_C V$$

โดยสัมประสิทธิ์  $a_{NB}$  จะมีค่าขึ้นกับวิธีการประมาณ  $\phi_{nb}$  ที่เลือกใช้ ดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

### 2.3 วิธีการประมาณค่าสำหรับ Convective flux (Interpolation Scheme for Convective flux)

ในการคำนวณ Convective flux จากการอินทิเกรตสมการการอนุรักษ์ จำเป็นต้องรู้ค่าของ  $\phi$  บนผิวของปริมาตรควบคุมซึ่งต้องอาศัยการประมาณค่าจากโหนดรอบข้าง

วิธีการประมาณค่าสำหรับ Convective flux มีอยู่มากมายหลายวิธี ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้วิธีพื้นฐาน 2 วิธี คือ Central differencing scheme ที่ใช้การประมาณค่าแบบเชิงเส้น และ Hybrid differencing scheme ซึ่งจะสลับวิธีที่ใช้ในการประมาณระหว่าง Upwind differencing scheme และ Central differencing scheme โดยพิจารณาจากคุณสมบัติของการไหล

สำหรับวิธีการประมาณแบบต่างๆ จะแสดงรายละเอียดไว้พอสังเขป โดยสามารถศึกษารายละเอียดได้จาก Patankar (1980), Versteeg and Malalasekera (1995) และ Ferziger and Peric (1999)

#### Upwind differencing scheme, UDS

UDS เป็นวิธีการประมาณค่า  $\phi$  บนผิวของปริมาตรควบคุม โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ  $\phi$  บนโหนดที่อยู่ทาง Upstream ของผิวนั้นๆ ตามแนวของกริด (Grid) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งยกตัวอย่างการประมาณค่า  $\phi$  ที่ผิวทางด้านตะวันออก ( $e$ ) ของปริมาตรควบคุม

โดย

$$\phi_e = \phi_p \quad \text{เมื่อ} \quad F_e > 0 \quad \text{และ}$$

$$\phi_e = \phi_E \quad \text{เมื่อ} \quad F_e < 0$$

ในการทำงานเดียวกัน ที่ผิวด้านอื่นๆ ของปริมาตรควบคุม ก็ใช้หลักการเดียวกันนี้ในการประมาณค่า และเมื่อแทนค่า  $\phi_{nb}$  ที่ประมาณด้วย UDS ลงในสมการ 2.13 แล้วจัดรูปสมการใหม่ให้มีลักษณะเดียวกับสมการ 2.14 จะได้สมการของสัมประสิทธิ์  $a_{NB}$  ดังนี้

$$\begin{aligned}
 a_E &= D_e + \text{MAX}(-F_e, 0) \\
 a_W &= D_w + \text{MAX}(F_w, 0) \\
 a_N &= D_n + \text{MAX}(-F_n, 0) \\
 a_S &= D_s + \text{MAX}(F_s, 0)
 \end{aligned}$$

เมื่อ  $\text{MAX}(A, B)$  เป็นฟังก์ชันการเลือกค่าที่มากที่สุดระหว่าง  $A$  และ  $B$

ในเรื่องความแม่นยำ (Accuracy) UDS มีอันดับความแม่นยำเพียง 1<sup>st</sup> Order ดังแสดงได้จากตัวอย่างการกระจาย Taylor-series รอบจุด  $P$  เพื่อหาค่า  $\phi_e$  ในกรณีที่  $F_e$  มีค่ามากกว่า ศูนย์

$$\underbrace{\phi_e = \phi_P}_{\text{UDS}} + \underbrace{(x_e - x_P) \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_P + (x_e - x_P)^2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \Big|_P + \dots}_{\text{Truncation error}} \quad (2.15)$$

จากสมการ 2.15 จะเห็นว่า UDS จะประมาณค่า  $\phi_e$  โดยใช้เพียงแค่เทอมแรกของการกระจาย Taylor-series ส่วนเทอมที่เหลือจึงเป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการประมาณค่าที่เรียกว่า Truncation error เทอมแรกของ Truncation error ซึ่งเป็นเทอมที่มีความสำคัญที่สุดแปรผันตามขนาดของกริด ( $\Delta x = x_e - x_P$ ) และมีลักษณะคล้ายกับ Diffusion flux ในสมการ 2.11 ดังนั้น Truncation error จึงมักจะถูกเรียกว่า Numerical diffusion หรือ False diffusion ซึ่งมีผลทำให้ Diffusion flux ในการคำนวณมีค่าเพิ่มขึ้น

#### Central differencing scheme, CDS

CDS ประมาณค่า  $\phi$  บนผิวของปริมาตรควบคุมด้วยสมการเชิงเส้นระหว่างค่า  $\phi$  บนโหนดสองโหนดที่อยู่ติดกับผิวนั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งยกตัวอย่างการประมาณค่าที่ผิวทางด้านตะวันออก ( $e$ ) ของปริมาตรควบคุม

โดย

$$\phi_e = \lambda_e \phi_E + (1 - \lambda_e) \phi_P$$

เมื่อ  $\lambda_e$  คือ Geometric weight factor ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะทางจากผิว  $e$  ถึงโหนด  $P$  ต่อระยะทางจากโหนด  $P$  ถึงโหนด  $E$  ซึ่งอยู่คนละฝั่งของผิว  $e$

$$\lambda_e = \frac{x_e - x_P}{x_E - x_P}$$

ในการทำงานเดียวกัน ที่ผิวของปริมาตรควบคุมด้านอื่นๆ ก็จะประมาณค่าของ  $\phi$  บนผิวนั้นๆ ได้ในลักษณะเดียวกัน และเมื่อแทนค่า  $\phi$  ที่ประมาณด้วย CDS ลงในสมการ 2.13 แล้วจัดรูปใหม่ ในลักษณะเดียวกับสมการ 2.14 จะได้สมการสำหรับสัมประสิทธิ์  $a_{NB}$  ดังนี้

$$\begin{aligned} a_E &= D_e - \lambda_e F_e \\ a_W &= D_w + \lambda_w F_w \\ a_N &= D_n - \lambda_n F_n \\ a_S &= D_s + \lambda_s F_s \end{aligned}$$

ในเรื่องความแม่นยำ (Accuracy) CDS มีอันดับความแม่นยำเป็น 2<sup>nd</sup> Order ตามการกระจาย Taylor-series รอบจุด  $P$  เพื่อหาค่า  $\phi_e$  ดังแสดงได้ตามสมการ (2.16)

$$\begin{aligned} \phi_e &= \phi_P + \Delta x \left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_P + (\Delta x)^2 \left. \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right|_P + \dots \\ \phi_e &= \phi_P + (x_e - x_P) \left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_P + (\Delta x)^2 \left. \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right|_P + \dots \\ \phi_e &= \phi_P + \lambda_e (\phi_E - \phi_P) + (\Delta x)^2 \left. \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right|_P + \dots \\ \phi_e &= \underbrace{\lambda_e \phi_E + (1 - \lambda_e) \phi_P}_{\text{CDS}} + \underbrace{(\Delta x)^2 \left. \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right|_P + \dots}_{\text{Truncation error}} \end{aligned} \quad (2.16)$$

จากสมการ 2.16 จะพบว่า CDS ประมาณค่า  $\phi_e$  ด้วยสองเทอมแรก ส่วนเทอมที่เหลือเป็น ความผิดพลาดในการประมาณ (Truncation error) ซึ่งเทอมแรกของ Truncation error นั้นแปรผันตามกำลังสองของขนาดของกริดที่ใช้ ( $\Delta x$ ) ดังนั้นถ้าลดขนาดของกริดที่ใช้ในการคำนวณลงเท่าๆ กัน Truncation error ที่เกิดขึ้นใน CDS จึงลดลงมากกว่าใน UDS ผลลัพธ์ที่คำนวณได้จึงมีความแม่นยำสูงกว่า

ถึงแม้ว่า CDS จะมีความแม่นยำในการประมาณสูงกว่า UDS ก็ตาม แต่ CDS ก็มีข้อจำกัดในเรื่องช่วงของการใช้งาน คือสามารถใช้งานได้ในช่วงที่ เพคเล็ทนามเบอร์ (Peclet number,  $Pe = F/D$ ) มีค่าต่ำเท่านั้น ในขณะที่ถ้าใช้งาน CDS ในช่วงที่เพคเล็ทนามเบอร์มีค่าสูง อาจทำให้การคำนวณไม่เสถียร ผลการคำนวณที่ได้อาจมีค่าสั่นไปมา (Wiggle solutions) อย่างไรก็ตามการลดขนาดของ กริดที่ใช้ในการคำนวณให้เล็กลง สามารถลดค่าเพคเล็ทนามเบอร์ลงได้ ดังจะเห็นได้จาก

$$Pe = \frac{F}{D} = \frac{\rho U A}{\mu A / \Delta} = \frac{\rho U \Delta}{\mu}$$



เมื่อ  $\Delta$  คือ ขนาดของกริดที่ใช้ในการคำนวณ  
 ดังนั้นผลการคำนวณที่มีค่าสั้นไปมา จึงอาจเป็นสัญญาณบอกถึงขนาดของกริดที่ใช้ในการ  
 คำนวณยังไม่ละเอียดเพียงพอ

### Hybrid differencing scheme, HDS

HDS เป็นวิธีการประมาณ Convective flux บนผิวของปริมาตรควบคุมที่รวมเอาการ  
 ประมาณแบบ UDS และ CDS เข้าไว้ด้วยกัน โดยเลือกใช้วิธี CDS ที่มีอันดับความแม่นยำสูงกว่า  
 (2<sup>nd</sup> Order) ในช่วงที่เพคเลตัมเบอร์มีค่าน้อย ( $|Pe| < 2$ ) และสลับใช้วิธี UDS ที่มีความเสถียร  
 มากกว่า แต่มีอันดับความแม่นยำน้อยกว่า (1<sup>st</sup> Order) ในช่วงที่เพคเลตัมเบอร์มีค่ามาก ( $|Pe| \geq 2$ )  
 เพื่อหลีกเลี่ยงการสั้นไปมาของผลการคำนวณที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้วิธี CDS ในช่วงนี้

ตัวอย่างการประยุกต์ระเบียบวิธี HDS ในการประมาณค่า Momentum Flux ที่ผิวด้าน  
 ตะวันออก ( $e$ ) ของปริมาตรควบคุม

ในช่วง  $Pe \geq 2$

$$q_e = -F_e \phi_P$$

ในช่วง  $-2 < Pe < 2$

$$\begin{aligned} q_e &= (-0.5F_e \phi_P - 0.5F_e \phi_E) + D_e(\phi_E - \phi_P) \\ &= (D_e - 0.5F_e)\phi_E - (D_e + 0.5F_e)\phi_P \end{aligned}$$

ในช่วง  $-2 \leq Pe$

$$q_e = -F_e \phi_E$$

เมื่อ  $q_e$  คือ Total flux ที่ผ่านผิวด้านตะวันออกของปริมาตรควบคุม

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่า HDS เลือกใช้ CDS ในการประมาณ Convective flux และ  
 Diffusive flux ในช่วงของเพคเลตัมเบอร์มีค่าน้อย ( $|Pe| < 2$ ) แต่เมื่อเพคเลตัมเบอร์มีค่ามาก  
 ( $|Pe| \geq 2$ ) HDS จะเลือกใช้ UDS ในการประมาณ Convective flux และกำหนดให้ Diffusive  
 flux มีค่าเป็นศูนย์ เมื่อแทนการประมาณค่า Total flux ที่ผิวของปริมาตรควบคุมทุกด้านลงในสม  
 การ 2.11 แล้วจัดรูปสมการใหม่ ตามสมการ 2.14 จะได้สมการสำหรับสัมประสิทธิ์  $a_{NB}$  ดังนี้

$$a_E = \text{MAX}(-F_e, (D_e - 0.5F_e), 0)$$

$$a_W = \text{MAX}(F_w, (D_w + 0.5F_w), 0)$$

$$a_N = \text{MAX}(-F_n, (D_n - 0.5F_n), 0)$$

$$a_S = \text{MAX}(F_s, (D_s + 0.5F_s), 0)$$

ถึงแม้ว่า HDS จะดึงเอาข้อดีของ UDS และ CDS มาใช้ในแต่ละช่วงของเพดเหลี่ยมเบอร์ แต่ในเรื่องความแม่นยำถือว่า HDS มีอันดับความแม่นยำเพียง 1<sup>st</sup> Order ตาม Taylor – series เช่นเดียวกับ UDS

นอกเหนือจากวิธีการประมาณค่า Convective flux บนผิวของปริมาตรควบคุมที่กล่าวมาข้างต้นแล้วนั้น ยังมีวิธีการประมาณค่า Convective flux อื่นๆ อีกมากมาย เช่น Second order upwind scheme, (SOU) ที่ใช้การประมาณค่าแบบเชิงเส้นเพื่อหาค่าของ  $\phi$  บนผิวของปริมาตรควบคุมจากโหนดทางด้าน Upstream สองโหนด ทำให้ SOU มีความแม่นยำเป็น 2<sup>nd</sup> Order สูงกว่า UDS แต่ก็มีความซับซ้อน และยากต่อการเขียน โปรแกรมมากกว่า หรือ Deferred correction scheme ที่ประมาณค่า Convective flux ด้วยการผสมวิธีการประมาณที่มีอันดับความแม่นยำต่ำ เข้ากับวิธีการประมาณที่มีอันดับความแม่นยำสูง เพื่อดึงเอาข้อดีเรื่องความเสถียรจากวิธีที่มีอันดับความแม่นยำต่ำ ผสมเข้ากับความต้องการจากวิธีที่มีอันดับความแม่นยำสูง ดังสมการ

$$F_{nb} = F_{nb}^L + \beta(F_{nb}^H - F_{nb}^L)^{old}$$

เมื่อ

$F_{nb}$  คือ Convective flux ที่ประมาณได้ด้วยวิธี Deferred correction

$F_{nb}^L$  คือ Convective flux จากการประมาณด้วยวิธีที่มีความแม่นยำต่ำ (Lower order) เช่น UDS

$F_{nb}^H$  คือ Convective flux จากการประมาณด้วยวิธีที่มีความแม่นยำสูง (Higher order) เช่น CDS

$\beta$  คือ Blending factor,  $0 \leq \beta \leq 1$

โดยเทอมในวงเล็บ คำนวณจากค่าที่คำนวณไว้ก่อนหน้านั้น (Previous iteration)

## 2.4 การวางตัวของกริดที่ใช้ในการคำนวณ (Grid arrangement)

การวางตัวของกริดที่ใช้ในการคำนวณ คือการกำหนดตำแหน่งของตัวแปรซึ่งเป็นปริมาณสเกลาร์หรือปริมาณเวกเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณคุณสมบัติของการไหล โดยทั่วไปแล้วการวางตัวของกริดมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ Colocated grid arrangement และ Staggered grid arrangement

Colocated grid arrangement เป็นการวางตัวของกริดที่กำหนดให้ตัวแปรทุกตัวเก็บอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ทำให้การวางตัวของกริดในลักษณะนี้สะดวกต่อการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แต่ในการคำนวณสมการนาเวียร์-สโตร์คซึ่งความเร็ว และความดันของไหลมีความสัมพันธ์กัน Colocated grid ไม่สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองได้ชัดเจนนัก ดังเห็นได้จากตัวอย่างการกระจายตัวของความดันแบบ Checker board ในรูปที่ 2.5

จากรูปพบว่า เทอมของ Pressure gradient ในสมการนาเวียร์-สโตร์คที่มองเห็นจาก โหนด P จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ( $\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{P_E - P_W}{\Delta x} = 0, \frac{\partial P}{\partial y} = \frac{P_N - P_S}{\Delta y} = 0$ ) ทำให้ความเร็ว ( $u, v$ ) ซึ่งเก็บอยู่ในตำแหน่งเดียวกับความดันจึงไม่ได้รับอิทธิพลจากความแตกต่างความดันที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้ผลการคำนวณที่ได้มีค่าผิดไปจากความเป็นจริง ในการแก้ปัญหาการกระจายความดันแบบ Checker board สามารถทำได้โดยใช้ฟังก์ชันการประมาณแบบพิเศษ (Rhie and Chow, 1982) หรือเลือกใช้การวางกริดแบบ Staggered arrangement

Staggered grid arrangement เป็นการวางตัวของกริดที่กำหนดให้โหนดความเร็ว ( $u, v$  node) วางตัวอยู่บนผิวของปริมาตรควบคุมที่ล้อมรอบโหนดความดัน (Pressure node) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ข้อดีของการวางกริดแบบ Staggered คือสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และความเร็วได้อย่างชัดเจน และเขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ไม่ยากนัก แต่การเขียนโปรแกรมจะมีความซับซ้อนขึ้นมาก เมื่อนำไปใช้กับปัญหาใน 3 มิติบน Non-orthogonal coordinate สำหรับปัญหาการไหลที่มีรูปร่างซับซ้อน

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้การวางกริดแบบ Staggered grid arrangement เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้ฟังก์ชันการประมาณแบบพิเศษ และรูปร่างของปัญหาที่ศึกษาไม่ซับซ้อนสามารถเขียนบน Cartesian coordinate ได้ และเมื่อเปรียบเทียบ Convergence rate หรือ ความแม่นยำ (Accuracy) ของผลการคำนวณที่ได้จากการวางกริดทั้งสองแบบสำหรับปัญหาการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ใน 2 มิติแล้ว การวางกริดทั้งสองแบบให้ผลที่ไม่แตกต่างกันนัก (Peric et al., 1988 และ Ferziger and Peric, 1999)

เมื่อนำเอาระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มและการวางกริดแบบ Staggered grid arrangement ในรูปที่ 2.6 มาประยุกต์ใช้กับสมการโมเมนตัม (สมการนาเวียร์-สโตร์ค) จะได้สมการพีชคณิตของสมการโมเมนตัมในลักษณะเดียวกับสมการ 2.14 ดังนี้

สมการโมเมนตัมตามแนวแกน  $x$  (รูปที่ 2.6 (ก))

$$a_p u_p = \sum_{NB} a_{NB} u_{NB} + S_u - (P_E - P_W)A \quad (2.17)$$

โดย

$$a_p = \sum_{NB} a_{NB} + (F_e - F_w + F_n - F_s)$$

$a_{NB} = a_E, a_W, a_N, a_S$  มีค่าขึ้นกับวิธีการประมาณ Convective flux ที่เลือกใช้

$$S_u = \left[ \frac{\mu \left( \frac{u_E - u_P}{x_E - x_P} \right) - \mu \left( \frac{u_P - u_W}{x_P - x_W} \right)}{x_e - x_w} + \frac{\mu \left( \frac{v_{ne} - v_{mw}}{x_e - x_w} \right) - \mu \left( \frac{v_{se} - v_{sw}}{x_e - x_w} \right)}{y_n - y_s} \right] \cdot V$$

เมื่อ

$A$  คือพื้นที่ผิวของปริมาตรควบคุมที่ล้อมรอบโหนดความดัน ซึ่งโหนดของความเร็ว  $u$  วางตัวอยู่

สมการโมเมนตัมตามแนวแกน  $y$  (รูปที่ 2.6 (ข))

$$a_p v_p = \sum_{NB} a_{NB} v_{NB} + S_v - (P_N - P_S)A \quad (2.18)$$

โดย

$$a_p = \sum_{NB} a_{NB} + (F_e - F_w + F_n - F_s)$$

$a_{NB} = a_E, a_W, a_N, a_S$  มีค่าขึ้นกับวิธีการประมาณ Convective flux ที่เลือกใช้

$$S_v = \left[ \frac{\mu \left( \frac{u_{ne} - u_{se}}{y_n - y_s} \right) - \mu \left( \frac{u_{nw} - u_{sw}}{y_n - y_s} \right)}{x_e - x_w} + \frac{\mu \left( \frac{v_N - v_P}{y_N - y_P} \right) - \mu \left( \frac{v_P - v_S}{y_P - y_S} \right)}{y_n - y_s} \right] \cdot V$$

เมื่อ

$A$  คือพื้นที่ผิวของปริมาตรควบคุมที่ล้อมรอบโหนดความดัน ซึ่งโหนดของความเร็ว  $v$  วางตัวอยู่

เพื่อให้ความเร็ว  $u$  และ  $v$  ที่คำนวณได้จากสมการ 2.17 และ 2.18 สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง ความดันใน Pressure term ของสมการทั้งสองจะต้องสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่องด้วย ดังนั้นตัวแปรในสมการความต่อเนื่องที่อยู่ในรูปของความเร็วจึงถูกแปลงไปเป็นตัวแปรที่

เกี่ยวข้องกับความดันเพื่อใช้คำนวณหาความดันอีกที เรียกสมการใหม่นี้ว่า สมการผลต่างความดัน (Pressure-correction equation)

## 2.5 สมการผลต่างความดัน (Pressure-correction equation)

สมการผลต่างความดัน เป็นสมการที่แปลงรูปมาจากสมการความต่อเนื่อง เพื่อใช้คำนวณหาความดันจากความดันแก้ไขที่คำนวณได้ ในการแปลงรูปสมการความต่อเนื่องไปเป็นสมการผลต่างความดัน จะอาศัยความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\begin{aligned} P &= P^* + P' \\ u &= u^* + u' \\ \text{และ} \quad v &= v^* + v' \end{aligned}$$

เมื่อ

$P, u, v$  คือความดัน และความเร็วที่สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่องและสมการโมเมนตัม

$P^*, u^*, v^*$  คือความดันที่กำหนดขึ้น (Guess pressure) และความเร็วที่คำนวณได้จาก  $P^*$

$P', u', v'$  คือความดันแก้ไข (Corrected pressure) และความเร็วแก้ไข (Corrected velocity)

สำหรับความเร็ว  $u^*$  และ  $v^*$  สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.19 และ 2.20 ซึ่งมีลักษณะเดียวกับสมการ 2.17 และ 2.18 คือ

$$a_p u_p^* = \sum_{NB} a_{NB} u_{NB}^* + S_u - (P_E^* - P_W^*)A \quad (2.19)$$

$$a_p v_p^* = \sum_{NB} a_{NB} v_{NB}^* + S_v - (P_N^* - P_S^*)A \quad (2.20)$$

นำสมการที่ 2.19 และ 2.20 ไปลบออกจากสมการที่ 2.17 และ 2.18 ตามลำดับ จะได้สมการของความเร็วกแก้ไข

$$a_p u_p' = \sum_{NB} a_{NB} u_{NB}' - (P_E' - P_W')A$$

$$a_p v_p' = \sum_{NB} a_{NB} v_{NB}' - (P_N' - P_S')A$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$u_p' = \tilde{u}_p' - \frac{1}{a_p} (P_E' - P_W')A$$

$$v_p' = \tilde{v}_p' - \frac{1}{a_p} (P_N' - P_S')A$$

$$\text{เมื่อ } \tilde{u}'_p = \frac{\sum_{NB} a_{NB} u'_{NB}}{a_p} \quad \text{และ} \quad \tilde{v}'_p = \frac{\sum_{NB} a_{NB} v'_{NB}}{a_p}$$

แทนค่า  $u'_p$  และ  $v'_p$  ลงในความสัมพันธ์เริ่มต้น จะได้

$$u_p = u_p^* + u'_p = u_p^* + \tilde{u}'_p - \frac{1}{a_p} (P'_E - P'_W) A \quad (2.21)$$

$$v_p = v_p^* + v'_p = v_p^* + \tilde{v}'_p - \frac{1}{a_p} (P'_N - P'_S) A \quad (2.22)$$

จากนั้นอินทิเกรตสมการความต่อเนื่องบนปริมาตรควบคุมที่ล้อมรอบโหนดความดัน แล้วแทนค่าความเร็ว  $u$  และ  $v$  ในสมการที่ 2.21 และ 2.22 ซึ่งเป็นความเร็วบนโหนดความเร็วที่วางตัวอยู่บนผิวของปริมาตรควบคุมที่ล้อมรอบโหนดความดัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก)

$$\int_{\delta V} \left( \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} \right) dV = 0$$

$$\rho u A|_w^e + \rho v A|_s^n = 0$$

$$\rho u_e A_e - \rho u_w A_w + \rho v_n A_n - \rho v_s A_s = 0 \quad (2.23)$$

$$\left( \rho u_e^* A_e + \rho \tilde{u}'_e A_e - \rho \frac{A_e^2}{a_p^u} (P'_E - P'_p) \right) - \left( \rho u_w^* A_w + \rho \tilde{u}'_w A_w - \rho \frac{A_w^2}{a_p^u} (P'_p - P'_W) \right) +$$

$$\left( \rho v_n^* A_n + \rho \tilde{v}'_n A_n - \rho \frac{A_n^2}{a_p^v} (P'_N - P'_p) \right) - \left( \rho v_s^* A_s + \rho \tilde{v}'_s A_s - \rho \frac{A_s^2}{a_p^v} (P'_p - P'_S) \right) = 0$$

$$\left( F_e^* + \tilde{F}'_e - a_E^p (P'_E - P'_p) \right) - \left( F_w^* + \tilde{F}'_w - a_W^p (P'_p - P'_W) \right) +$$

$$\left( F_n^* + \tilde{F}'_n - a_N^p (P'_N - P'_p) \right) - \left( F_s^* + \tilde{F}'_s - a_S^p (P'_p - P'_S) \right) = 0$$

จัดรูปสมการใหม่ให้อยู่ในลักษณะเดียวกับสมการ 2.14

$$a_p^p P'_p = \sum_{NB} a_{NB}^p P'_{NB} - \Delta \dot{m}^* - \Delta \tilde{m}' \quad (2.24)$$

โดย

$$a_E^p = \rho \frac{A_e^2}{a_p^u}, \quad a_W^p = \rho \frac{A_w^2}{a_p^u},$$

$$a_N^p = \rho \frac{A_n^2}{a_p^v}, \quad a_S^p = \rho \frac{A_s^2}{a_p^v},$$



$$a_p^p = \sum_{NB} a_{NB}^p$$

$$\Delta \tilde{m}^* = F_e^* - F_w^* + F_n^* - F_s^*$$

$$\Delta \tilde{m}' = \tilde{F}'_e - \tilde{F}'_w + \tilde{F}'_n - \tilde{F}'_s$$

เมื่อ ค่ายก  $u, v$  และ  $p$  แสดงถึงปริมาตรควบคุมที่ล้อมรอบโหนดความเร็ว และ โหนดความดันที่ สัมประสิทธิ์  $a_p$  และ  $a_{NB}$  อ้างอิงถึง

## 2.6 ขั้นตอนการคำนวณแบบ SIMPLE (SIMPLE algorithm)

SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) เป็นขั้นตอน การคำนวณหาค่าความเร็ว และความดันของการไหล จากสมการโมเมนตัม และสมการผลต่างความ ดัน โดยประมาณสมการผลต่างความดันด้วยการตัดทอน  $\Delta \tilde{m}'$  ซึ่งเป็น Mass source เนื่องจาก ความเร็ว  $\tilde{u}'$  และ  $\tilde{v}'$  เพื่อจำกัดตัวแปรที่ไม่ทราบค่าให้เหลือเพียงความดันแก้ไข (Corrected pressure) ซึ่งการประมาณนี้จะไม่ผลกระทบต่อผลลัพธ์ที่คำนวณได้ เพราะเมื่อผลลัพธ์ที่คำนวณ ได้เข้าสู่คำตอบที่สอดคล้องกับสมการ โมเมนตัม และสมการความต่อเนื่อง (Converge solution) แล้ว ค่าของความเร็วแก้ไข และความดันแก้ไขจะมีค่าเป็นศูนย์ ( $u' = 0, v' = 0$  และ  $P' = 0$ ) ทำ ให้เทอม  $\tilde{u}'$  และ  $\tilde{v}'$  มีค่าเป็นศูนย์ไปด้วย ดังนั้นสมการผลต่างความดัน (สมการที่ 2.24) จึงลด รูปเป็น

$$a_p^p P'_p = \sum_{NB} a_{NB}^p P'_{NB} - \Delta \tilde{m}^* \quad (2.25)$$

และด้วยเหตุผลเดียวกัน ความเร็วแก้ไขจะลดรูปลงเหลือเพียง

$$u'_p = -\frac{1}{a_p} (P'_E - P'_W) A \quad (2.26)$$

$$v'_p = -\frac{1}{a_p} (P'_N - P'_S) A \quad (2.27)$$

สำหรับการคำนวณแบบ SIMPLE มีขั้นตอนการคำนวณอยู่ 6 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) สมมติค่าของ  $P^*$
- 2) คำนวณค่า  $u^*$  และ  $v^*$  ใหม่จากสมการโมเมนตัมตามแนวแกน  $x$  (2.19) และแนวแกน  $y$  (2.20)
- 3) คำนวณค่า  $P'$  จากสมการผลต่างความดัน (2.25) โดยใช้ความเร็ว  $u^*$  และ  $v^*$  ค่าใหม่
- 4) คำนวณความดันค่าใหม่จากความดันแก้ไข โดย  $P^{new} = P^* + P'$

5) คำนวณความเร็วค่าใหม่จากความเร็วแก้ไข (2.26 และ 2.27) โดย

$$u^{new} = u^* + u', \quad v^{new} = v^* + v'$$

6) ทำการคำนวณซ้ำจากขั้นตอนที่ 2 ถึง 5 จนกว่าค่าของ  $u^*$ ,  $v^*$  และ  $P^*$  จะเข้าสู่ค่าที่สอดคล้องกับสมการโมเมนตัมและสมการความต่อเนื่อง โดยพิจารณาจากการลดลงของเทอม  $|\Delta m^*|$  (Mass source) ในสมการ 2.25 จนมีค่าน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ (Convergence criteria,  $\varepsilon$ )

ขั้นตอนการคำนวณแบบ SIMPLE สามารถเขียนเป็นแผนภูมิแสดงทำงานได้ดังแสดงในรูปที่ 2.7

## 2.7 ลักษณะการไหลและเงื่อนไขขอบเขต

### (Flow configuration and boundary conditions)

การไหลที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการไหลภายในห้องระบายอากาศที่มีขนาดสูง 0.5 เมตร ยาว 1.0 เมตร มีช่องทางอากาศเข้าสู่สูง 0.04 เมตร อยู่ติดเพดานบนผนังฝั่งหนึ่ง และมีช่องทางอากาศออกที่ปรับเปลี่ยนความสูงได้ อยู่ติดพื้นบนผนังฝั่งตรงข้าม ดังแสดงในรูปที่ 1.8 ที่ช่องทางเข้าอากาศมีความเร็ว ( $U_{in}$ )  $3.634 \times 10^{-4}$ ,  $3.634 \times 10^{-3}$  และ  $3.634 \times 10^{-2}$  เมตรต่อวินาที ที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 1, 10 และ 100 ตามลำดับ

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณการไหลภายในห้องระบายอากาศแต่ละด้านประกอบไปด้วย

#### เงื่อนไขขอบเขตสำหรับความเร็ว (สมการโมเมนตัม)

##### เงื่อนไขขอบเขตที่ช่องทางเข้า (Inflow boundary condition)

อากาศในบริเวณช่องทางเข้าจะมีการกระจายตัวของรูปร่างความเร็วแบบสม่ำเสมอ (Uniform velocity profile) ตลอดความสูงของช่องทางเข้า ซึ่งสามารถกำหนดได้โดยให้ความเร็วของอากาศตามแนวแกน  $x$  ที่ช่องทางเข้ามีค่าคงที่เท่ากับ  $U_{in}$  สำหรับแต่ละค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ และความเร็วของอากาศตามแนวแกน  $y$  ที่ช่องทางเข้ามีค่าเท่ากับศูนย์

$$\begin{aligned} u &= U_{in} \\ v &= 0 \end{aligned}$$

##### เงื่อนไขขอบเขตที่ผนัง (Wall boundary condition)

อากาศที่อยู่ติดกับผนังจะมีความเร็วเท่ากับผนังตาม No-Slip condition ซึ่งในกรณีนี้ผนังไม่มีการเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงกำหนดให้ความเร็วตามแนวแกน  $x$  และ  $y$  ของอากาศบนผนังทุกด้านมีค่าเท่ากับศูนย์

$$\begin{aligned}u_{wall} &= 0 \\v_{wall} &= 0\end{aligned}$$

เงื่อนไขขอบเขตที่ช่องทางออก (Outflow boundary condition)

ในบริเวณช่องทางออกความเร็วของอากาศตามแนวแกน  $x$  จะคำนวณจากเงื่อนไขของกฎการอนุรักษ์มวลซึ่ง Mass flux ที่ช่องทางออกจะต้องมีค่าเท่ากับ Mass flux ที่ช่องทางเข้าเสมอ ซึ่งในการคำนวณความเร็ว  $u$  ที่ช่องทางออกจะใช้วิธีการบวกด้วยค่าความเร็วคงที่ (UINC) หรือคูณด้วยตัวคูณความเร็ว (UFAC) เข้ากับความเร็ว  $u$  ของทุกปริมาตรควบคุมที่อยู่บนช่องทางออก โดยจะเลือกใช้วิธีการบวกด้วย UINC เมื่อความเร็ว  $u$  ที่โหนดใดโหนดหนึ่งบนช่องทางออกมีค่าเป็นลบ (เกิดการเคลื่อนที่ย้อนกลับของอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง) และเลือกใช้วิธีคูณด้วย UFAC เมื่อความเร็ว  $u$  บนช่องทางออกทุกโหนดมีค่าเป็นบวก

โดย 
$$\text{UINC} = \frac{\dot{m}_{inlet} - \dot{m}_{outlet}}{\rho A_{out}}$$

และ 
$$\text{UFAC} = \frac{\dot{m}_{inlet}}{\dot{m}_{outlet}}$$

สำหรับความเร็วของอากาศตามแนวแกน  $y$  จะพิจารณาว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามแนวแกน  $x$  (Zero gradient assumption) ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว  $v$  ตามแนวแกน  $x$  ที่ช่องทางออกจึงมีค่าเท่ากับศูนย์

$$\left. \frac{\partial v}{\partial x} \right|_{outlet} = 0$$

เงื่อนไขขอบเขตสำหรับความดันแก้ไข (สมการผลต่างความดัน)

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตของสมการความดันแก้ไขสามารถประยุกต์เข้าไปในสมการได้โดยตรงในขั้นตอนการสร้างสมการความดันแก้ไขสำหรับปริมาตรควบคุมที่อยู่ติดกับขอบด้านที่มีการกำหนด Mass flux ผ่านผิวของปริมาตรควบคุม เช่น ด้านทางเข้า (Inlet), ด้านทางออก (Outlet) และผนัง เป็นต้น ด้วยการแทนค่า Mass flux ที่กำหนดให้ลงในสมการที่อินทิเกรตจากสมการความต่อเนื่อง (2.23)

ในที่นี้จะยกตัวอย่างปริมาตรควบคุมที่อยู่ติดกับช่องทางเข้า ดังแสดงในรูปที่ 2.8 จากสมการ 2.23

$$\rho u_e A_e - \rho u_w A_w + \rho v_n A_n - \rho v_s A_s = 0$$

เมื่อ  $u_w = U_{in}$  ดังนั้น  $\rho U_{in} A_w = \dot{m}_{in}$

$$\left( \rho u_e^* A_e - \rho \frac{A_e^2}{a_p^u} (P'_E - P'_P) \right) - \dot{m}_{in} + \left( \rho v_n^* A_n - \rho \frac{A_n^2}{a_p^v} (P'_N - P'_P) \right) - \left( \rho v_s^* A_s - \rho \frac{A_s^2}{a_p^v} (P'_P - P'_S) \right) = 0$$

$$\left( F_e^* - a_E^p (P'_E - P'_P) \right) - \dot{m}_{in} + \left( F_n^* - a_N^p (P'_N - P'_P) \right) - \left( F_s^* - a_S^p (P'_P - P'_S) \right) = 0$$

$$a_p^p P'_P = a_E^p P'_E + a_N^p P'_N + a_S^p P'_S - (F_e^* - \dot{m}_{in} + F_n^* - F_s^*) \quad (2.28)$$

จากสมการ 2.28 จะพบว่าไม่มีเทอมของ  $P'_W$  ในสมการ และเมื่อเปรียบเทียบกับสมการ 2.24 ซึ่งเป็นสมการของความดันแก้ไขสำหรับทุกปริมาตรควบคุมแล้ว จะพบว่าสมการ 2.24 จะมีรูปเดียวกับสมการ 2.28 เมื่อกำหนดให้ สมการ 2.24 มีค่า  $a_w^p = 0$  และ  $F_w = \dot{m}_{in}$

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาด้านอื่น ๆ ก็สามารถประยุกต์เข้าไปในสมการผลต่างความดันได้ในทำนองเดียวกัน

## 2.8 การหาผลเฉลยของระบบสมการพีชคณิต (Solution of algebraic equation system)

การหาผลเฉลยของระบบสมการพีชคณิตที่แปลงรูปมาจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเป็นส่วนสำคัญ และใช้เวลาในการคำนวณมากที่สุด โดยเฉพาะการหาผลเฉลยของระบบสมการแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear) ที่แปลงมาจากสมการนาเวียร์-สโตร์ค ดังที่กล่าวไปในหัวข้อ 2.4 – 2.7

โดยทั่วไปแล้วการหาผลเฉลยของระบบสมการพีชคณิตมี 2 วิธี (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2538) คือ 1.) การแก้ระบบสมการโดยตรง (Direct method) เช่น ระเบียบวิธีการกำจัดแบบเกาส์ (Gauss elimination), ระเบียบวิธีการแยกแบบแอลยู (LU Decomposition method), Tri-diagonal matrix algorithm (TDMA) เป็นต้น 2.) การแก้ระบบสมการด้วยการคำนวณซ้ำ (Iteration method) เช่น ระเบียบวิธีการทำซ้ำแบบเกาส์-ไซเดล (Gauss-Seidel method), Strongly implicit procedure (SIP) เป็นต้น

ข้อได้เปรียบของการแก้ระบบสมการด้วยวิธีการคำนวณซ้ำ คือ สามารถคำนวณหาผลลัพธ์จนลู่เข้าสู่คำตอบที่มีค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้ทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์น้อยกว่าการแก้ระบบสมการโดยตรง

ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้การแก้ระบบสมการด้วยวิธีการคำนวณซ้ำแบบ SIP ในการหาผลเฉลยของระบบสมการพีชคณิตที่เกิดจากสมการนาเวียร์-สโตร์ค และสมการความต่อเนื่อง (สมการ



ในการคำนวณค่า  $\delta^n$  จากสมการ 2.30 จะแยกเมทริกซ์  $\mathbf{M}$  ออกเป็นเมทริกซ์  $\mathbf{L}$  และ  $\mathbf{U}$  ในลักษณะเดียวกับระเบียบวิธีการแยกแบบแอลยู

$$\mathbf{M} = \mathbf{LU}$$

โดย

$$\begin{bmatrix} & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} M_W^{i,j} &= L_W^{i,j} \\ M_{NW}^{i,j} &= L_W^{i,j} U_N^{i-1,j} \\ M_S^{i,j} &= L_S^{i,j} \\ M_P^{i,j} &= L_W^{i,j} U_E^{i-1,j} + L_S^{i,j} U_N^{i,j-1} + L_P^{i,j} \\ M_N^{i,j} &= U_N^{i,j} L_P^{i,j} \\ M_{SE}^{i,j} &= L_S^{i,j} U_E^{i,j-1} \\ M_E^{i,j} &= U_E^{i,j} L_P^{i,j} \end{aligned} \quad (2.31)$$

เมื่อ  $i$  และ  $j$  แสดงถึงตำแหน่งของโหนดบนกริดตามแนวแกน  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าเมทริกซ์  $\mathbf{M}$  จะมีเอลิเมนต์ที่ไม่เป็นศูนย์ตามแนวทแยงมุม 7 แนว ซึ่งมากกว่าเมทริกซ์  $\mathbf{A}$  ที่มี 5 แนว ดังนั้นเพื่อให้เมทริกซ์  $\mathbf{M}$  ประมาณค่าเมทริกซ์  $\mathbf{A}$  ได้ดี เมทริกซ์  $\mathbf{N}$  จะต้องมีเพียงเอลิเมนต์ของเมทริกซ์  $\mathbf{M}$  ตามแนว NW และ SE ส่วนเอลิเมนต์อื่นๆ ต้องมีค่าเป็นศูนย์เพื่อหักล้างกับเอลิเมนต์เหล่านี้ในเมทริกซ์  $\mathbf{M}$  แต่อัตราการลู่เข้าของวิธีนี้ค่อนข้างช้า

Stone, (1968) เสนอว่าสามารถเร่งอัตราการลู่เข้าของผลลัพธ์ได้ด้วยการกระจายเอลิเมนต์ต่างๆ ในแนว NW และ SE ของเมทริกซ์  $\mathbf{N}$  ให้อยู่ในแนวทแยงมุม 5 แนวที่ตรงกับเมทริกซ์  $\mathbf{A}$  โดย

$$\begin{aligned} \mathbf{N}\phi &\approx 0 \\ N_P\phi_P + N_E\phi_E + N_W\phi_W + N_N\phi_N + N_S\phi_S + M_{NW}\phi_{NW} + M_{SE}\phi_{SE} &\approx 0 \end{aligned} \quad (2.32)$$

แล้วลดรูปสมการ 2.32 ลงให้เหลือ



$$M_{NW}(\phi_{NW} - \phi_{NW}^*) + M_{SE}(\phi_{SE} - \phi_{SE}^*) \approx 0 \quad (2.33)$$

เมื่อ  $\phi_{NW}^*$  และ  $\phi_{SE}^*$  เป็นค่าประมาณของ  $\phi_{NW}$  และ  $\phi_{SE}$  ที่เกิดจากเทอมอื่นๆ นอกจาก 2 เทอมตามแนว NW และ SE ในสมการ 2.32

Stone ประมาณค่าของ  $\phi_{NW}^*$  และ  $\phi_{SE}^*$  โดยมีสมมติฐานว่าสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยแบบ Elliptic เช่น สมการนาเวียร์-สโตร์ค จะมีคำตอบที่ต่อเนื่อง (Smooth solution) ดังนั้น

$$\begin{aligned} \phi_{NW}^* &\approx \alpha(\phi_W + \phi_N - \phi_P) \\ \phi_{SE}^* &\approx \alpha(\phi_S + \phi_E - \phi_P) \end{aligned} \quad (2.34)$$

โดย  $\alpha$  คือ Under relaxation factor ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 เพื่อให้การคำนวณซ้ำมีเสถียรภาพ แทนค่าสมการ 2.34 ลงในสมการ 2.33 จะได้

$$M_{NW}\phi_{NW} + M_{SE}\phi_{SE} = \alpha M_{NW}(\phi_N + \phi_W - \phi_P) + \alpha M_{SE}(\phi_S + \phi_E - \phi_P) \quad (2.35)$$

แทนค่าสมการ 2.35 กลับลงในสมการ 2.32 แล้วจัดรูปใหม่ จะได้

$$\begin{aligned} (N_P - \alpha M_{NW} - \alpha M_{SE})\phi_P + (N_W + \alpha M_{NW})\phi_W + (N_E + \alpha M_{SE})\phi_E + \\ (N_S + \alpha M_{SE})\phi_S + (N_N + \alpha M_{NW})\phi_N \approx 0 \end{aligned} \quad (2.36)$$

เพื่อให้สมการ 2.36 เป็นจริง ทุกเทอมในวงเล็บต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นทุกเอลิเมนต์ของเมตริกซ์  $\mathbf{N}$  ในแนวทแยงทั้ง 5 แนวจะเป็นฟังก์ชันของ  $M_{NW}$  และ  $M_{SE}$  ดังนี้

$$\begin{aligned} N_P &= \alpha M_{NW} + \alpha M_{SE} \\ N_W &= -\alpha M_{NW} \\ N_E &= -\alpha M_{SE} \\ N_S &= -\alpha M_{NW} \\ N_N &= -\alpha M_{SE} \end{aligned} \quad (2.37)$$

เมื่อรวมเมตริกซ์  $\mathbf{N}$  ที่ได้นี้เข้ากับเมตริกซ์  $\mathbf{A}$  จะได้เมตริกซ์  $\mathbf{M}$  ซึ่งเป็นผลคูณของเมตริกซ์  $\mathbf{L}$  และ  $\mathbf{U}$  ดังสมการ

$$\mathbf{M} = \mathbf{A} + \mathbf{N} = \mathbf{LU}$$

พิจารณาเอลิเมนต์  $M_W$  ในเมตริกซ์  $\mathbf{M}$  จะได้

$$M_W = A_W + N_W$$

แทนค่าเอลิเมนต์  $M_W$  จากสมการ 2.31 และ 2.37 จะได้

$$\begin{aligned} L_W^{i,j} &= A_W^{i,j} - \alpha M_{NW}^{i,j} = A_W^{i,j} - \alpha L_W^{i,j} U_N^{i-1,j} \\ L_W^{i,j} &= A_W^{i,j} / (1 + \alpha U_N^{i-1,j}) \end{aligned} \quad (2.38 ก)$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาเอลิเมนต์  $M_S, M_P, M_N$  และ  $M_E$  จะได้

$$L_S^{i,j} = A_S^{i,j} / (1 + \alpha U_E^{i,j-1}) \quad (2.38 ข)$$

$$L_P^{i,j} = A_P^{i,j} + \alpha (L_W^{i,j} U_N^{i-1,j} + L_S^{i,j} U_E^{i,j-1}) - L_W^{i,j} U_E^{i-1,j} - L_S^{i,j} U_N^{i,j-1} \quad (2.38 ค)$$

$$U_N^{i,j} = (A_N^{i,j} - \alpha L_W^{i,j} U_N^{i-1,j}) / L_P^{i,j} \quad (2.38 ง)$$

$$U_E^{i,j} = (A_E^{i,j} - \alpha L_S^{i,j} U_E^{i,j-1}) / L_P^{i,j} \quad (2.38 จ)$$

ในการคำนวณค่าของแต่ละเอลิเมนต์ในเมตริกซ์  $L$  และ  $U$  จะเริ่มคำนวณจากโหนดที่อยู่ถัดจากขอบของปัญหาทางด้านตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ไล่ไปทางทิศเหนือ (N) จนถึงโหนดสุดท้ายที่อยู่ถัดจากขอบเขตของปัญหา จากนั้นจึงขยับไปทางทิศตะวันออก (E) ของแนวกริดเดิม แล้วเริ่มคำนวณไล่ไปในทิศเหนืออีกครั้ง เช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนถึงโหนดสุดท้ายที่อยู่ถัดจากขอบบนมุมด้านตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ของกริดดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยในระหว่างการคำนวณ กำหนดให้ค่าของเอลิเมนต์ของเมตริกซ์  $L$  และ  $U$  ที่อยู่บนขอบของปัญหามีค่าเป็นศูนย์

เมื่อคำนวณหาเมตริกซ์  $L$  และ  $U$  ได้แล้ว แทนค่าเมตริกซ์ทั้งสองลงในสมการ 2.30 แล้วแก้ระบบสมการด้วยวิธีเดียวกับระเบียบวิธีการแยกแบบแอลยู ดังนี้

$$\begin{aligned} M\delta^n &= \rho^n \\ LU\delta^n &= \rho^n \\ LR^n &= \rho^n \\ R^n &= L^{-1}\rho^n \end{aligned} \quad (2.39)$$

เมื่อ

$$R^{i,j} = (\rho^{i,j} - L_S^{i,j} R^{i,j-1} - L_W^{i,j} R^{i-1,j}) / L_P^{i,j}$$

โดยคำนวณแต่ละเอลิเมนต์ในทิศทางเดียวกับการคำนวณเมตริกซ์  $L$  และ  $U$  (รูปที่ 2.9) จากนั้นจึงคำนวณ  $\delta^n$  จาก

$$\begin{aligned} \mathbf{U}\delta^n &= \mathbf{R}^n \\ \delta^n &= \mathbf{U}^{-1}\mathbf{R}^n \end{aligned} \quad (2.40)$$

เมื่อ

$$\delta^{i,j} = R^{i,j} - U_N^{i,j} \delta^{i,j+1} - U_E^{i,j} \delta^{i+1,j}$$

โดยคำนวณแต่ละเอลิเมนต์ในทิศทางตรงกันข้ามกับการคำนวณเมตริกซ์  $\mathbf{R}$  แล้วแก้ไขค่าเมตริกซ์  $\boldsymbol{\varphi}^n$  ด้วย  $\delta^n$  ที่คำนวณได้ ตามสมการ 2.41

$$\boldsymbol{\varphi}^{n+1} = \boldsymbol{\varphi}^n + \delta^n \quad (2.41)$$

โดยสรุปแล้ว การแก้ระบบสมการเชิงเส้นด้วยวิธีการคำนวณซ้ำแบบ SIP มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

- 1) คำนวณเอลิเมนต์ของเมตริกซ์  $\mathbf{L}$  และ  $\mathbf{U}$  จากเมตริกซ์  $\mathbf{A}$  (สมการ 2.38)
- 2) คำนวณเวกเตอร์ของเศษคงเหลือ ( $\boldsymbol{\rho}^n = \mathbf{Q} - \mathbf{A}\boldsymbol{\varphi}^n$ )
- 3) คำนวณเมตริกซ์  $\mathbf{R}^n$  (สมการ 2.39)
- 4) คำนวณเมตริกซ์  $\delta^n$  (สมการ 2.40)
- 5) คำนวณค่า  $\boldsymbol{\varphi}^{n+1}$  (สมการ 2.41)
- 6) ตรวจสอบการลู่เข้าของการคำนวณ โดยพิจารณาจากผลรวมของขนาดของทุกเอลิเมนต์ในเวกเตอร์  $\boldsymbol{\rho}^n$  ว่ามีค่าน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้หรือไม่ ถ้าไม่ก็เริ่มการคำนวณซ้ำตั้งแต่มขั้นตอนที่ 2 จนถึง 5 อีกครั้ง

สำหรับขั้นตอนการทำงานของการแก้ระบบสมการเชิงเส้นด้วยวิธีการคำนวณซ้ำแบบ SIP ได้แสดงไว้เป็นแผนภูมิการทำงานในรูปที่ 2.10

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงระเบียบวิธีเชิงตัวเลขส่วนต่างๆ ที่ประกอบกันขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ส่วนการวิเคราะห์ปัญหา (Analysis part) โดยเริ่มจากการแปลงรูปสมการควบคุมการไหล, การแบ่งขอบเขตของปัญหาออกเป็นปริมาตรขนาดเล็กๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม, การกระจาย Convective term ด้วยวิธี UDS, CDS และ HDS การวางตัวของกริดแบบ Staggered grid arrangement, การแปลงรูปสมการความต่อเนื่องไปเป็นสมการผลต่างความดัน, ขั้นตอนการคำนวณแบบ SIMPLE, การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตเข้ากับสมการต่างๆ และการหาผลเฉลยของระบบสมการพีชคณิตด้วยวิธีการคำนวณซ้ำแบบ SIP

สำหรับรายละเอียดของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ส่วนการคำนวณก่อนการวิเคราะห์ (Pre-processing part) และส่วนการคำนวณหลังการวิเคราะห์ (Post-processing part) จะแสดงไว้ในภาคผนวก



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### การวิเคราะห์ผลการคำนวณ

ในวิทยานิพนธ์นี้แบ่งการวิเคราะห์ผลการคำนวณออกเป็นสองส่วนคือ การวิเคราะห์ผลการคำนวณเชิงตัวเลข และการวิเคราะห์ผลการคำนวณเชิงกายภาพ

ในส่วนการวิเคราะห์ผลการคำนวณเชิงตัวเลข เป็นการตรวจสอบระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ในการคำนวณ โดยแบ่งเป็น การตรวจสอบโปรแกรม (Program validation) และการตรวจสอบผลของขนาดกริดที่ใช้ในการคำนวณ (Grid resolution test)

ในส่วนการวิเคราะห์ผลการคำนวณเชิงกายภาพ เป็นการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของการไหลภายในห้อง โดยแบ่งการพิจารณาเป็น ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้าย (Effects of end wall opening) และผลของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Effects of Reynolds number)

#### 3.1 การวิเคราะห์ผลการคำนวณเชิงตัวเลข

ในส่วนการวิเคราะห์ผลการคำนวณเชิงตัวเลข เป็นการตรวจสอบระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในบทที่ 2 ที่นำมาใช้เขียนเป็นโปรแกรมส่วนการวิเคราะห์ปัญหา โดยแบ่งเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม และ การตรวจสอบขนาดของกริดที่ใช้ในการคำนวณเพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่ไม่ขึ้นกับขนาดของกริด (Grid independent result)

##### 3.1.1 การตรวจสอบโปรแกรม (Program validation)

ในการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมส่วนการวิเคราะห์ปัญหา (SIMPLE.for) ก่อนที่จะนำโปรแกรมไปใช้ในการศึกษาต่อไปนั้น ได้เลือกทดสอบกับปัญหาการไหลสองชนิด คือ การไหลภายในช่องว่าง (Cavity flow) และ การไหลผ่าน Backward Facing Step (BFS)

##### การไหลภายในช่องว่าง (Cavity flow)

ปัญหาการไหลภายในช่องว่างที่เลือกใช้ตรวจสอบ โปรแกรมมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยช่องว่างมีความกว้าง และสูง  $H$  หน่วย ที่ด้านบนของไหลมีความเร็ว  $U_{lid}$  ในการคำนวณการไหลภายในช่องว่างได้คำนวณที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 100 และ 1,000 ผลการคำนวณแสดงไว้ในรูปที่ 3.2 – 3.3 สำหรับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 100 และรูปที่ 3.4 – 3.5 สำหรับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 1,000

รูปที่ 3.2 แสดงการกระจายตัวของรูปร่างความเร็วของการไหลภายในช่องว่างที่เรย์โนลด์ นัมเบอร์เท่ากับ 100 โดยแสดงอยู่ในรูปของความเร็วไร้มิติ ( $u/U_{lid}$ ,  $v/U_{lid}$ ) บนระบบแกนไร้มิติ  $\zeta$  และ  $\eta$  เมื่อ

$$\begin{aligned}\zeta &= 2(x-0.5) & 0 \leq x \leq 1 \\ \eta &= 2(y-0.5) & 0 \leq y \leq 1\end{aligned}$$

จากรูปพบว่าความเร็วไร้มิติที่คำนวณได้บนกริดขนาด  $27 \times 27$  ที่ตำแหน่ง  $\zeta = 0$  ( $x = 0.5$ ) และ  $\eta = 0$  ( $y = 0.5$ ) มีค่าสอดคล้องกับผลการคำนวณของ Ghia et al. (1982) เป็นอย่างดี

รูปที่ 3.3 แสดง Stream line contour ของการไหลภายในช่องว่างที่เรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 100 จากการคำนวณบนกริดขนาด  $82 \times 82$  จากรูปพบว่า เกิดบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดใหญ่ภายในช่องว่าง (Cavity) โดยมีศูนย์กลางของการไหลหมุนวนอยู่บริเวณด้านบนเยื้องไปทางด้านข้างเล็กน้อยตามทิศทางของความเร็ว  $U_{lid}$

รูปที่ 3.4 แสดงการกระจายตัวของรูปร่างความเร็วไร้มิติสำหรับการไหลภายในช่องว่างที่เรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 1,000 บนพิคัดไร้มิติเช่นเดียวกับรูปที่ 3.2 จากรูปพบว่าผลการคำนวณบนกริดขนาด  $27 \times 27$  มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับผลการคำนวณของ Ghia et al. (1982) ยกเว้นในบริเวณที่เกิดค่ามากที่สุดและค่าน้อยที่สุด และผลการคำนวณที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับผลของ Ghia et al. (1982) มากยิ่งขึ้นเมื่อใช้กริดที่มีความละเอียดเพิ่มมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากผลการคำนวณบนกริดขนาด  $52 \times 52$  และ  $82 \times 82$

รูปที่ 3.5 แสดง Stream line contour ของการไหลภายในช่องว่างที่เรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 1,000 จากการคำนวณบนกริดขนาด  $82 \times 82$  จากรูปพบว่า มีบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดใหญ่ภายในช่องว่าง โดยมีศูนย์กลางของการไหลหมุนวนอยู่ในบริเวณตอนกลางของช่องว่าง และมีบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดเล็กที่มีทิศทางตรงข้ามอยู่ที่มุมขวาล่าง

#### การไหลผ่าน Backward facing step (BFS)

ปัญหาการไหลผ่าน BFS ที่ใช้ตรวจสอบโปรแกรมมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดย Step มีความสูง  $S$  ช่องทางการไหลเข้ามีความสูง  $h$  ช่องทางการไหลออกมีความสูง  $H$  และช่องทางการไหลทั้งหมดมีความยาว  $L$  ที่ช่องทางเข้า ของไหลมีรูปร่างความเร็วเป็นรูปพาราโบลา ซึ่งมีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ  $U_{bulk}$  และนิยามเรย์โนลด์นัมเบอร์จาก  $Re = \frac{\rho U_{bulk} 2h}{\mu}$



ในการตรวจสอบ ได้คำนวณการไหลผ่าน BFS ที่มีอัตราส่วนการขยาย (Expansion ratio,  $E_r = \frac{H}{h}$ ) สองค่า คือ 1.94 และ 4.0 เพื่อเปรียบเทียบผลที่คำนวณได้กับผลของ Armaly et al. (1983) และ Thangam and Knight (1990) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 – 3.9

รูปที่ 3.7 แสดง Vector plot ของการไหลผ่าน BFS ที่อัตราส่วนการขยายเท่ากับ 1.94 ซึ่งช่องทางการไหลออกมีความสูง ( $H$ ) 10.1 มิลลิเมตร และช่องทางการไหลทั้งหมดยาว ( $L$ ) 101 มิลลิเมตร ( $10H$ ) สำหรับเรย์โนลด์์นัมเบอร์ที่คำนวณมีค่าตั้งแต่ 100 จนถึง 500 โดยคำนวณบนกริดขนาด  $122 \times 62$  และใช้ระเบียบวิธี CDS ในการกระจาย Convective term จากรูปพบว่าเกิดบริเวณของการไหลหมุนวนขึ้นได้ช่องทางเข้าติดกับ Step โดยบริเวณดังกล่าวจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเรย์โนลด์์นัมเบอร์มีค่ามากขึ้น หลังจากนั้นการไหลจะปรับตัวเข้าสู่สภาวะการไหลที่พัฒนาตัวเต็มที่ (Fully developed flow) ในลักษณะเดียวกับการไหลผ่านช่องทางการไหล (Channel flow)

รูปที่ 3.8 แสดงระยะ Reattachment ( $X_r$ ) จากการคำนวณที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ตั้งแต่ 100 จนถึง 500 เปรียบเทียบกับผลการคำนวณ และการทดลองของ Armaly et al. (1983) จากรูปพบว่าขนาดของระยะ  $X_r$  ที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองสำหรับทุกค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ในช่วงการคำนวณ โดยมีความแตกต่างกันไม่เกิน 7% ในขณะที่ผลการคำนวณของ Armaly เองจะแตกต่างจากผลการทดลองเมื่อเรย์โนลด์์นัมเบอร์มีค่ามากกว่า 400 ทั้งนี้ น่าจะมีสาเหตุมาจากความละเอียดของกริดที่ใช้ในการคำนวณ โดยกริดที่ Armaly ใช้มีขนาดเพียง  $45 \times 45$  ซึ่งมีจำนวนโหนดน้อยกว่ากริดที่ใช้ในการคำนวณ โดยโปรแกรมส่วนการวิเคราะห์ปัญหาประมาณ 3.6 เท่า

รูปที่ 3.9 แสดง Stream line contour ของการไหลผ่าน BFS ที่อัตราส่วนการขยายเท่ากับ 4.0 ซึ่งมีช่องทางการไหลออกสูง ( $H$ ) 1 หน่วย และช่องทางการไหลทั้งหมดยาว  $10H$  ที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ 100 โดยเปรียบเทียบผลของระเบียบวิธีที่ใช้ในการกระจาย Convective term จากรูปพบว่าผลการคำนวณด้วยทุกระเบียบวิธีแสดงลักษณะการไหลที่มีรูปแบบเดียวกัน คือเกิดบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดใหญ่ได้ช่องทางเข้า หลังจากนั้นการไหลจะปรับตัวเข้าสู่สภาวะการไหลที่พัฒนาตัวเต็มที่ เช่นเดียวกับผลในรูปที่ 3.7 สำหรับความยาวของระยะ  $X_r$  ที่คำนวณได้จากแต่ละวิธีนั้นจะมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย โดยระเบียบวิธี UDS คำนวณระยะ  $X_r/S$  ได้เท่ากับ 3.133 ระเบียบวิธี HDS คำนวณได้ 3.44 และระเบียบวิธี CDS คำนวณได้ 3.327 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณของ Thangam and Knight (1990) ที่คำนวณได้ 3.33 มากที่สุด

จากผลการคำนวณข้างต้นแสดงให้เห็นว่า โปรแกรมส่วนการวิเคราะห์ปัญหาสามารถแสดงลักษณะทางกายภาพของปัญหาการไหลหมุนวนที่เลือกมาทดสอบได้ถูกต้องในระดับหนึ่ง เมื่อ

เปรียบเทียบกับผลการทดลองหรือผลการคำนวณของนักวิจัยท่านอื่น ดังนั้นโปรแกรมส่วนการวิเคราะห์ปัญหาจึงน่าจะแสดงลักษณะทางกายภาพของปัญหาการไหลใน 2 มิติได้ถูกต้อง และสามารถนำไปใช้ในการศึกษารูปแบบการไหลภายในห้องต่อไปได้

### 3.1.2 การตรวจสอบขนาดของกริด (Grid resolution test)

ในการตรวจสอบขนาดของกริดที่ใช้ในการคำนวณ ได้เปรียบเทียบผลการคำนวณของปัญหาการไหลภายในห้องที่เรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 100 ซึ่งเป็นค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูงสุดในการศึกษา สำหรับช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ บนกริดสามขนาดคือ 1) 52x52, 2) 102x102 และ 3) 202x202 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาขนาดของกริดที่มีจำนวนโหนดน้อยที่สุดที่ให้ผลลัพธ์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แม้ว่าจะเพิ่มจำนวนโหนดขึ้นก็ตาม (Grid independent result)

สำหรับกริดทั้งสามขนาดนั้นสร้างขึ้นจากโปรแกรมส่วนการคำนวณก่อนการวิเคราะห์ปัญหา (Grid.for, รายละเอียดขั้นตอนการสร้างกริดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.) โดยมีลักษณะการกระจายตัวของกริดแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform) ซึ่งบริเวณใกล้กับผนังจะมีจำนวนโหนดมากกว่าบริเวณกลางห้อง นอกจากนี้กริดทั้งสามขนาดยังมีความสัมพันธ์กันดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยหนึ่งปริมาตรควบคุมที่ล้อมรอบโหนดของกริดหมายเลข 1 จะประกอบไปด้วยสี่ปริมาตรควบคุมที่ล้อมรอบโหนดของกริดหมายเลข 2 ในขณะที่เดียวกันหนึ่งปริมาตรควบคุมที่ล้อมรอบโหนดของกริดหมายเลข 2 จะประกอบไปด้วยสี่ปริมาตรควบคุมที่ล้อมรอบโหนดของกริดหมายเลข 3 ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถสร้างขึ้นได้ด้วยการกำหนดอัตราส่วนการขยายตัว หรือหดตัวของกริดแต่ละขนาดให้มีความสัมพันธ์กันตามสมการ 3.1

$$\gamma_2 = \sqrt{\gamma_1} \quad (3.1 ก)$$

$$\gamma_3 = \sqrt{\gamma_2} = \gamma_1^{1/4} \quad (3.1 ข)$$

เมื่อ  $\gamma_1$  คือ อัตราส่วนการขยายตัว หรือหดตัวของกริดหมายเลข 1

ผลการคำนวณได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.11 – 3.12 โดยเปรียบเทียบรูปร่างความเร็วตามแนว Stream wise ( $u/U_{in}$ ) จากกริดทั้งสามขนาด และ Richardson extrapolation solution สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ ที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.04, 0.36, 0.68$  และ  $0.96$

Richardson extrapolation solution (Ferziger and Peric, 1999) เป็นการประมาณหาผลเฉลยแม่นยำตรงจากการประเมินค่าความผิดพลาดในการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยไปเป็นสมการพีชคณิต (Discretization error) โดย

$$\phi_{\text{Richardson}} = \phi_h + \varepsilon_h^d$$

เมื่อ  $\phi_h$  คือ ผลเฉลยบนกริดที่มีขนาด  $h$

$\varepsilon_h^d$  คือ Discretization error บนกริดขนาด  $h$ ,  $\varepsilon_h^d = \frac{\phi_h - \phi_{2h}}{2^P - 1}$   
 $P$  คือ อันดับความแม่นยำของวิธีที่ใช้ประมาณ Convective flux

ในการคำนวณ Richardson extrapolation solution นั้นกำหนดให้  $P = 1$  สำหรับ HDS และ  $P = 2$  สำหรับ CDS โดยใช้ผลลัพธ์จากกริดหมายเลข 3 เป็นหลัก

ด้วยวิธีการข้างต้น Richardson extrapolation solution จึงเป็นตัวแทนของผลเฉลยแม่นยำตรงจากสมการควบคุมการไหลที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย และใช้เปรียบเทียบกับผลการคำนวณบนกริดทั้งสามเพื่อพิจารณาหากริดที่มีจำนวนโหนดน้อยที่สุดที่ทำให้ Discretization error ที่เกิดขึ้นมีค่าไม่แตกต่างไปจาก Discretization error ที่เกิดขึ้นบนกริดที่มีความละเอียดมากกว่า

รูปที่ 3.11 แสดงรูปร่างความเร็ว  $u$  จากการคำนวณบนกริดทั้งสามด้วยวิธี HDS และผลเฉลยแม่นยำตรงโดยประมาณจาก Richardson extrapolation จากรูปพบว่า

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้าย ( $t/H$ ) เท่ากับ  $1.0 - 0.92$  ผลการคำนวณบนกริดทั้งสามให้ค่าที่เท่ากันและเท่ากับผลเฉลยแม่นยำตรงโดยประมาณจาก Richardson extrapolation บนทุกหน้าตัด

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ  $0.84 - 0.76$  ผลการคำนวณบนกริดทั้งสามและผลเฉลยแม่นยำตรงโดยประมาณมีค่าใกล้เคียงกันบนหน้าตัด  $x/L = 0.04, 0.36$  และ  $0.68$  ส่วนบนหน้าตัด  $x/L = 0.96$  ผลลัพธ์จากกริดทั้งสามค่อนข้างแตกต่างกัน และแตกต่างจากผลเฉลยแม่นยำตรงโดยประมาณ โดยเฉพาะในบริเวณที่เป็นค่าต่ำสุดและค่าสูงสุด ( $y/H = 0.1$  และ  $0.7$ )

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ  $0.68 - 0.08$  ผลการคำนวณบนกริดทั้งสามมีค่าใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงโดยประมาณเฉพาะบนหน้าตัด  $x/L = 0.04$  แต่ที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.36$  ผลการคำนวณบนกริดทั้งสามเริ่มมีความแตกต่างกัน และแตกต่างจากผลเฉลยแม่นยำตรงโดยประมาณ ซึ่งความแตกต่างนี้จะชัดเจนมากยิ่งขึ้นเมื่ออัตราส่วนช่องเปิดมีค่าลดลงถัดมาที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.68$  ผลการคำนวณทั้งสามมีค่าใกล้เคียงกันอีกครั้ง ยกเว้นที่อัตราส่วนช่องเปิดเท่ากับ  $0.68$  และ  $0.60$  ซึ่งมีความแตกต่างกันเกิดขึ้นในบริเวณที่เป็นค่าต่ำสุด ( $y/H = 0.15$ ) สำหรับที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.96$  ผลการคำนวณจากกริดทั้งสามแตกต่างกัน และแตกต่างจากผลเฉลยแม่นยำตรงโดยประมาณอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในบริเวณที่เป็นค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด

โดยสรุปแล้วผลการคำนวณด้วยวิธี HDS บนกริดทั้งสาม ส่วนมากมีค่าที่แตกต่างกัน และแตกต่างจากผลเฉลยแม่นยำตรงโดยประมาณจาก Richardson extrapolation ซึ่งแสดงว่า Discretization error ที่เกิดขึ้นบนกริดแต่ละขนาดมีค่าแตกต่างกัน ทำให้ผลการคำนวณที่ได้ยังคงขึ้นกับขนาดของกริดที่เลือกใช้

รูปที่ 3.12 แสดงรูปร่างความเร็ว  $u$  จากการคำนวณบนกริดทั้งสามด้วยวิธี CDS และผลเฉลยแม่นยำตรงโดยประมาณจาก Richardson extrapolation จากรูปพบว่า

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ  $1.0 - 0.84$  ผลการคำนวณบนกริดทั้งสามแสดงรูปร่างความเร็วที่ไม่แตกต่างกัน และไม่แตกต่างจากผลเฉลยแม่นยำตรงโดยประมาณจาก Richardson extrapolation บนทุกหน้าตัด

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ  $0.76 - 0.68$  ผลการคำนวณบนกริดหมายเลข 1 มีค่าแตกต่างจากผลการคำนวณบนกริดหมายเลข 2, 3 และผลเฉลยแม่นยำตรงโดยประมาณเล็กน้อยบนหน้าตัด  $x/L = 0.68$  และ  $0.96$  ในบริเวณที่เกิดค่าต่ำสุดและค่าสูงสุด ( $y/H = 0.1$  และ  $0.7$ ) ซึ่งความแตกต่างนี้จะเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่ออัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าลดลง ส่วนผลการคำนวณบนกริดหมายเลข 2, 3 และผลเฉลยแม่นยำตรงโดยประมาณมีค่าใกล้เคียงกันบนทุกหน้าตัด

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ  $0.60 - 0.08$  ความแตกต่างระหว่างผลการคำนวณบนกริดหมายเลข 1 กับผลลัพธ์อื่นๆ ยังคงแสดงให้เห็นบนหน้าตัด  $x/L = 0.68$  และ  $0.96$  ในบริเวณที่เกิดค่าต่ำสุด และค่าสูงสุด ส่วนผลจากกริดหมายเลข 2, 3 และผลเฉลยแม่นยำตรงโดยประมาณนั้นแทบจะไม่แตกต่างกันบนทุกหน้าตัด

โดยสรุปแล้วผลการคำนวณด้วยวิธี CDS ที่ได้จากกริดหมายเลข 1 มีค่าค่อนข้างแตกต่างจากผลการคำนวณบนกริดอื่นๆ ในขณะที่ผลการคำนวณบนกริดหมายเลข 2 และ 3 มีค่าใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงโดยประมาณ ซึ่งแสดงว่า Discretization error ที่เกิดขึ้นบนกริดหมายเลข 2 และ 3 มีค่าไม่แตกต่างกันเท่าไรนัก

เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธี HDS และ CDS บนกริดทั้งสามขนาด พบว่า ผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธี HDS บนกริดทั้งสามขนาดยังคงมีความแตกต่างกันอยู่ ซึ่งแสดงว่าผลการคำนวณที่ได้ยังคงขึ้นกับขนาดของกริดที่ใช้ ในขณะที่ระเบียบวิธี CDS จะให้ผลการคำนวณบนกริดหมายเลข 2 ได้ใกล้เคียงกับผลจากกริดหมายเลข 3 มาก ซึ่งแสดงว่า Discretization error ที่เกิดขึ้นบนกริดหมายเลข 2 มีค่าแตกต่างจาก Discretization error ที่เกิดขึ้นบนกริดหมายเลข 3 เพียงเล็กน้อย ดังนั้นขนาดของกริดหมายเลข 2 จึงมีความละเอียดพอเหมาะที่จะนำมาใช้ในการคำนวณ และการเพิ่มความละเอียดของกริดให้มากกว่ากริดหมายเลข 2 จะไม่ทำให้ผลการคำนวณแตกต่างไปมากนัก

ดังนั้นระเบียบวิธี CDS และกริดหมายเลข 2 ที่มีขนาด  $102 \times 102$  จึงเหมาะสม และนำมาใช้ในการศึกษารูปแบบการไหลภายในห้อง

### 3.2 การวิเคราะห์ผลการคำนวณเชิงกายภาพ

ในส่วนการวิเคราะห์ผลการคำนวณเชิงกายภาพ เป็นการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพของการไหลภายในห้อง โดยอาศัยข้อมูลจากผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธี CDS บนกริดขนาด  $102 \times 102$  (กริดหมายเลข 2) สำหรับการไหลภายในห้องที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้าย ( $t/H$ ) เท่ากับ 0.08, 0.20, 0.40, 0.60, 0.68, 0.76, 0.84, 0.92 และ 1.0 ที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 1 และ 10 ส่วนที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 100 จะมีอัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเพิ่มขึ้นอีกสามค่า คือ 0.1, 0.3 และ 0.96

การวิเคราะห์ผลการคำนวณแบ่งการพิจารณาออกเป็น ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้อง (Effects of end wall opening) และ ผลของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Effects of Reynolds number)

#### 3.2.1 ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้อง (Effects of end wall opening)

ในการศึกษาผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อคุณลักษณะของการไหลภายในห้อง พิจารณาจากคุณลักษณะต่อไปนี้

- 1) การกระจายตัวของ Stream line โดยคำนวณ Stream line จากสมการ

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad (3.2)$$

อินทิเกรตสมการ 3.2 บนทุกปริมาตรควบคุม จะได้

$$\int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial \psi}{\partial y} dy = \int_{y_1}^{y_2} u dy$$

จากระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม ได้ประมาณว่าปริมาณใดๆ (ในที่นี้คือความเร็ว  $u$ ) บนปริมาตรควบคุมจะมีลักษณะการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ ดังนั้น

$$\psi_2 - \psi_1 = u(y_2 - y_1) \quad (3.3)$$

$$\psi_2 = \psi_1 + u(y_2 - y_1)$$

โดยที่ตำแหน่งพื้นห้อง ( $y = 0$ ) ค่า  $\psi_0 = 0$  และเพื่อเปรียบเทียบรูปร่างของคุณลักษณะการไหลภายในห้องที่ช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ ได้ปรับสเกลของ Stream line ให้อยู่ในช่วงเดียวกัน โดยคำนวณจากสมการ 3.4

$$\psi = \frac{\psi_n - \psi_{\min}}{\psi_{\max} - \psi_{\min}} \quad (3.4)$$



ดังนั้นค่าของ Stream line สำหรับทุกขนาดช่องเปิดจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 นอกจากนี้เมื่อพิจารณานิยามของ Stream line ตามสมการที่ 3.3 จะเห็นว่า  $\psi$  ยังแสดงถึงอัตราส่วนของ การไหลเชิงปริมาตร (Volume flow) ที่ไหลอยู่ระหว่าง Stream line ใดๆ กับ Stream line ที่มีค่าน้อยที่สุดต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรที่มากที่สุด

- 2) การกระจายตัวของความเร็วตามแนว Stream wise ( $u/U_{in}$ )
- 3) การกระจายตัวของความเร็วตามแนว Transverse ( $v/U_{in}$ )
- 4) การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความดัน ( $C_p$ ) โดยค่าสัมประสิทธิ์ความดันนิยามจาก

$$C_p = \frac{P - P_{ref}}{\frac{1}{2} \rho U_{in}^2}$$

เมื่อ  $P_{ref}$  คือความดันอ้างอิงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของช่องทางเข้า

ในการแสดงผลการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความดัน ได้คำนวณค่าเฉลี่ยตาม ปริมาตรของสัมประสิทธิ์ความดัน ( $\bar{C}_p$ ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ( $SD$ ) ที่ช่องเปิดด้าน ท้ายขนาดต่างๆ หลังจากนั้นนำมาเฉลี่ยรวมทุกขนาดช่องเปิดจะได้ ค่าสัมประสิทธิ์ความดัน เฉลี่ยรวม ( $\bar{\bar{C}}_p$ ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยรวม ( $\widetilde{SD}$ ) เพื่อนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการ แสดงค่า Contour ของสัมประสิทธิ์ความดัน ( $C_p$ ) โดยเลือกแสดงที่ค่าสัมประสิทธิ์ความ ดันเฉลี่ยรวม แล้วขยายไปทางด้านความดันสูงและต่ำ ด้านละห้าเท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เฉลี่ยรวม

สำหรับรายละเอียดของค่าสัมประสิทธิ์ความดันเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของการไหลที่ทุกอัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายและแต่ละเรย์โนลด์นัมเบอร์ได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 3.1

- 5) รูปร่างความเร็ว  $u$  ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนว Downstream
- 6) อัตราส่วนการดึงอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้อง (Entrainment ratio,  $ER$ ) โดยนิยามเป็นอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลที่ไหลเข้ามาภายในห้องจากช่องเปิดด้าน ท้าย ( $\dot{m}_{Outlet}$ ) ต่ออัตราการไหลเชิงมวลที่ไหลเข้ามาภายในห้องจากช่องทางเข้า ( $\dot{m}_{Inlet}$ )

$$ER = \frac{\dot{m}_{Outlet}}{\dot{m}_{Inlet}} \times 100\%$$



- 7) ระยะ Reattachment ( $X_r/L$ ) โดยนิยามระยะ Reattachment, ( $X_r$ ) จากระยะที่ Stream line จากช่องทางเข้าที่โค้งลงมาแตะพื้นห้องในลักษณะเดียวกับการไหลผ่าน BFS (รูปที่ 3.6) ในการคำนวณหาระยะ Reattachment ได้คำนวณจากตำแหน่งตามแนวแกน  $x$  ของความเร็ว  $u$  ที่มีค่าเท่ากับศูนย์บนโหนดแรกที่อยู่เหนือพื้นห้อง
- 8) ตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลัก (Recirculation eye) โดยนิยามบริเวณของการไหลหมุนวนหลักเป็นบริเวณของการไหลหมุนวนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของเจ็ตจากช่องทางเข้า (สำหรับการไหลที่  $Re = 1$  และ  $10$  อยู่ในบริเวณมุมด้านล่างซ้าย ส่วนการไหลที่  $Re = 100$  อยู่ในบริเวณใกล้กับช่องเปิดด้านท้าย) ในการคำนวณหาตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลักที่อัตราส่วนช่องเปิดใดๆ คำนวณจากตำแหน่งที่ Contour ของ Stream line มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งที่การไหลเชิงปริมาตรระหว่างจุดนี้กับพื้นห้อง ( $\psi_0 = 0$ ) มีค่ามากที่สุด ในทิศทางย้อนกลับ หรือส่วนที่ไหลย้อนกลับของการไหลหมุนวนนั่นเอง

### การไหลภายในห้องที่ $Re = 1$

รูปที่ 3.13 แสดงผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อลักษณะการไหลภายในห้อง โดยแสดงอยู่ในรูปของ Stream line จากรูปพบว่า

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0 หรือกรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ Contour ของ Stream line จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในบริเวณใกล้กับช่องทางเข้า โดยแนวของเส้น Stream line จะกระจายตัวออกอย่างรวดเร็วจนเต็มความสูงห้องที่ระยะ  $x/L \sim 0.25$  ทำให้แนวของ Stream line เส้นที่อยู่ด้านล่างมีความโค้ง (Curvature) มากกว่า Stream line ที่อยู่ด้านบน หลังจากนั้นแนวของ Stream line จะกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอจนถึงช่องเปิดด้านท้าย ลักษณะดังกล่าวแสดงถึงการไหลแบบเจ็ตที่พุ่งออกจากช่องทางเข้าได้เพดานจะกระจายตัวออกอย่างรวดเร็วจนเต็มความสูงห้องเมื่อเคลื่อนที่ไปตามแนว Downstream เป็นระยะทางประมาณหนึ่งในสี่ของความยาวห้อง หลังจากนั้นการไหลจะมีลักษณะเหมือนกับการไหลภายในช่องทางการไหล (Channel flow) จนถึงช่องเปิดด้านท้าย

เมื่อพิจารณาถึงภาพรวมของการไหลภายในห้องที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ จะเห็นว่ามีลักษณะคล้ายกับการไหลผ่าน BFS ที่มีอัตราส่วนการขยายสูงมาก ( $E_r = 12.5$ ) ดังนั้นจึงน่าจะมีบริเวณของการไหลหมุนวนเกิดขึ้นที่มุมห้องด้านล่างซ้าย ซึ่งอาจจะมิต้นเล็กจึงไม่สามารถแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนจาก Contour ของ Stream line และการที่เจ็ตจากช่องทางเข้ากระจายตัวออกไปอย่างรวดเร็วนั้นมีสาเหตุมาจาก เจ็ตที่พุ่งเข้ามาภายในห้องมีโมเมนตัมตามแนวแกน  $x$  น้อย

ดังนั้นโมเมนตัมจึงถูกแพร่กระจาย (Diffusion) ให้กับอากาศรอบข้างตามแนวแกน  $y$  ด้วยแรงเสียดทานได้ง่าย และกระจายตัวจนเต็มหน้าตัดในที่สุด

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 0.92 การกระจายตัวของ Stream line มีลักษณะคล้ายกับในกรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ตลอดทั้งห้อง ยกเว้นในบริเวณมุมขวาบน (มุมระหว่างเพดานกับผนังท้ายห้องที่ปิดลงมา) ซึ่ง Stream line จะโค้งตัวลงมาเล็กน้อยตลอดได้ผนังท้ายห้อง ในขณะที่ Stream line ในบริเวณอื่นๆ โดยเฉพาะมุมซ้ายล่างของห้อง ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการไหลภายในห้องมีลักษณะไม่แตกต่างจากในกรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่มากนัก ยกเว้นในบริเวณใกล้กับช่องเปิดด้านท้าย ซึ่งได้รับผลของผนังท้ายห้องที่ปิดลงมาขวางการไหล อากาศบริเวณมุมขวาบนของห้องจึงโค้งตัวลงมาด้านล่างเพื่อไหลผ่านช่องเปิดด้านท้ายที่มีขนาดลดลง ทำให้ Stream line ในบริเวณนี้มีความโค้งมากขึ้น

เมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลงจนถึงกรณีที่ปิดมากที่สุด ( $t/H = 0.84 - 0.08$ ) การกระจายตัวของ Stream line จะมีลักษณะคล้ายกับการกระจายตัวของ Stream line ที่อัตราส่วนช่องเปิดเท่ากับ 0.92 โดย Stream line ที่มีความโค้งมากในบริเวณมุมห้องด้านล่างซ้ายจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในขณะที่บริเวณมุมขวาบนของห้อง Stream line ที่โค้งลงเพื่ออ้อมข้ามผนังท้ายห้องจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างต่อเนื่อง โดยจุดที่ Stream line เริ่มโค้งลงจากเพดานจะเลื่อนไปทาง Upstream และขยายเป็นบริเวณกว้างขึ้นเมื่ออัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าลดลง

รูปที่ 3.14 แสดงการกระจายตัวของความเร็วตามแนว Stream wise,  $u/U_{in}$  (เส้นประ) ที่ช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ โดยมีเส้น Stream line (เส้นทึบ) แสดงซ้อนทับ จากรูปพบว่า

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0 การไหลมีความเร็วสูงเป็นบริเวณเล็กๆ ใกล้กับช่องทางเข้า ซึ่งแสดงถึงลักษณะของเจ็ตที่พุ่งออกมาจากช่องทางเข้าได้เพดาน ส่วนในบริเวณอื่นการไหลมีความเร็วค่อนข้างต่ำตลอดทั้งห้อง ยกเว้นในบริเวณมุมห้องด้านล่างซ้ายที่อากาศมีความเร็วเป็นลบหรือไหลย้อนกลับ ซึ่งแสดงถึงบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดเล็ก

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าเท่ากับ 0.92 - 0.60 ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วตามแนว Stream wise ในห้องโดยส่วนใหญ่ยังคงเหมือนกับในกรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ แต่จะเริ่มเกิดบริเวณที่อากาศมีความเร็วเป็นลบขึ้นที่มุมระหว่างเพดานกับผนังท้ายห้องที่ปิดลงมา ซึ่งแสดงถึงบริเวณของการไหลหมุนวนอีกแห่ง โดยบริเวณนี้จะมีความเร็วสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง

เมื่ออัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าลดลงจนถึงกรณีที่ปิดมากที่สุด ( $t/H = 0.40 - 0.08$ ) จะเกิดบริเวณที่อากาศมีความเร็วสูงอีกครั้งใกล้กับช่องเปิดด้านท้าย เนื่องจากอากาศในบริเวณด้านบนพยายามเคลื่อนตัวลงมาด้านล่างเพื่อลอดใต้ผนังท้ายห้องออกไปนอกห้อง

รูปที่ 3.15 แสดงการกระจายตัวของความเร็วตามแนว Transverse,  $v/U_{in}$  (เส้นประ) ที่ช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ โดยมีเส้น Stream line (เส้นทึบ) แสดงซ้อนทับ จากรูปพบว่า

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0 และ 0.92 การไหลมีบริเวณเล็กๆ ของอากาศที่มีความเร็วเป็นลบ (เคลื่อนที่ลง) ใกล้กับช่องทางเข้า ส่วนในบริเวณอื่นอากาศมีความเร็วค่อนข้างต่ำ ประมาณเท่ากับศูนย์ตลอดทั่วทั้งห้อง ลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เจ็ตของอากาศจากช่องทางเข้าจะเคลื่อนตัวลงมาด้านล่างอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการไหล หลังจากนั้นแทบจะไม่มี การเคลื่อนที่ในแนว Transverse จนถึงช่องเปิดด้านท้าย

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าเท่ากับ 0.84 ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วตามแนว Transverse โดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะคล้ายกับในกรณีที่เปิดเต็มที่ และจะพบบริเวณเล็กๆ ของอากาศที่มีความเร็วเป็นบวก (เคลื่อนที่ขึ้น) ในบริเวณมุมห้องด้านล่างซ้ายและมุมบนขวา ซึ่งเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของความเร็วตามแนว Stream wise (รูปที่ 3.14) ประกอบจะพบว่าเป็น บริเวณของการไหลหมุนวนขนาดเล็กที่มุมทั้งสองแห่ง นอกจากนี้ยังมีบริเวณที่อากาศมีความเร็ว เป็นบวกอีกสองแห่งในบริเวณกลางห้องติดกับเพดานและพื้นห้อง ซึ่งความเร็วในบริเวณทั้งสองนี้ ถึงจะมีค่าเป็นบวกแต่ก็มีค่าต่ำมากประมาณเท่ากับศูนย์เหมือนกับในบริเวณอื่น

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าเท่ากับ 0.76 – 0.20 จะยังคงพบบริเวณของการไหล หมุนวนที่มุมห้องด้านล่างซ้ายและบนขวา แต่จะไม่พบบริเวณที่อากาศมีความเร็วเป็นบวกใน ตอนกลางห้องทั้งสองแห่ง

และเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดแคบที่สุด ( $t/H = 0.08$ ) จะพบบริเวณของอากาศที่มีความเร็วเป็นลบอีกครั้งใกล้กับช่องเปิดด้านท้ายเนื่องจากอากาศที่เคลื่อนตัวลงมาด้านล่างเพื่อลอด ได้ผนังท้ายห้องออกไปนอกห้องจะถูกเร่งให้มีความเร็วสูงขึ้น

รูปที่ 3.16 แสดงการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความดัน,  $C_p$  (เส้นประ) ที่ช่องเปิดด้าน ท้ายขนาดต่างๆ โดยมีเส้น Stream line (เส้นทึบ) แสดงซ้อนทับ จากรูปพบว่า

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0 และ 0.92 การไหลมีบริเวณของความดันสูง ( $C_p > \bar{C}_p$ ) ใกล้กับช่องทางเข้า ซึ่งตรงกับบริเวณของเจ็ตที่พุ่งออกมาจากช่องทางเข้า และมีบริเวณ ของความดันสูงอีกแห่งเหนือพื้นห้อง ซึ่งผลต่างระหว่างความดันในบริเวณนี้กับบริเวณรอบข้างทำ ให้เกิดแรงที่ผลักให้อากาศจากเจ็ตที่กระจายตัวลงมาด้านล่างเปลี่ยนทิศเคลื่อนที่ไปตามแนว Downstream ดังจะเห็นได้จากแนวของ Streamline ที่มีความโค้งมากในบริเวณนี้ นอกจากนี้จุด เริ่มต้นของบริเวณความดันสูงนี้ยังอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับจุด Reattachment (ดังจะกล่าวต่อ ไปในรูปที่ 3.19) ส่วนในบริเวณอื่นของห้องการกระจายตัวของ  $C_p$  จะมีค่าประมาณคงที่ตลอดทั่ว ทั้งห้อง

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าเท่ากับ  $0.84 - 0.60$  บริเวณของความดันสูงใกล้กับช่องทางเข้าจะขยายตัวลงมาด้านล่าง แล้วรวมเข้ากับบริเวณของความดันสูงที่อยู่เหนือพื้นห้องเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง และเริ่มเกิดบริเวณของความดันสูงขนาดเล็กเหนือขอบของผนังท้ายห้อง และบริเวณของความดันต่ำขนาดเล็กใต้ขอบของผนังท้ายห้อง ซึ่งบริเวณทั้งสองนี้จะมีขนาดขยายใหญ่ขึ้นเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าเท่ากับ  $0.40 - 0.08$  การกระจายตัวของความดันโดยส่วนใหญ่แล้วมีลักษณะคล้ายกับในกรณีที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ  $0.60$  โดยบริเวณของความดันต่ำใต้ขอบผนังท้ายห้องจะขยายตัวลงมาจนถึงพื้นห้อง ซึ่งค่าของ  $C_p$  ในบริเวณนี้จะลดลงเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง และเมื่อพิจารณาเกี่ยวกับการกระจายตัวของความเร็วในแนว stream wise และ Transverse (รูปที่ 3.14 และ 3.15) จะพบว่าบริเวณของความดันต่ำนี้สอดคล้องกับบริเวณที่อากาศมีความเร็วสูงขึ้นเพื่อไหลผ่านช่องเปิดด้านท้ายออกไปนอกห้อง

โดยสรุปแล้วลักษณะการไหลภายในห้องที่  $Re = 1$  จะมีการเปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายอย่างต่อเนื่องเฉพาะในบริเวณใกล้กับผนังท้ายห้อง โดยเมื่อช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ การไหลภายในห้องจะมีลักษณะคล้ายกับการไหลผ่าน BFS ที่มีอัตราส่วนการขยายสูง ซึ่งเจ็ทของอากาศจากช่องทางเข้าจะกระจายตัวออกอย่างรวดเร็วเมื่อเคลื่อนที่ไปตามแนว Downstream และเหนี่ยวนำให้เกิดบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดเล็กที่มุมห้องด้านล่างซ้าย ซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนจากการกระจายตัวของ Stream line แต่สามารถสังเกตได้จากการกระจายตัวของความเร็วตามแนว Stream wise และ Transverse

เมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง การไหลในบริเวณครึ่งห้องทาง Upstream จะไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดมากนัก ในขณะที่ครึ่งห้องทางด้าน Downstream โดยเฉพาะบริเวณใกล้กับผนังท้ายห้องจะเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยอากาศที่ไหลมาเต็มหน้าตัดห้องจะเคลื่อนตัวลงมาด้านล่าง และมีความเร็วสูงขึ้นเพื่อเคลื่อนที่ผ่านช่องเปิดด้านท้ายที่มีขนาดลดลง ซึ่งจุดที่อากาศเริ่มเคลื่อนตัวลงมาด้านล่างจะเลื่อนไปทาง Upstream อย่างต่อเนื่องตามการลดลงของขนาดช่องเปิดด้านท้าย

รูปที่ 3.17 แสดงรูปร่างการกระจายตัวของความเร็ว  $u$  ที่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายบนตำแหน่ง  $x/L = 0.04, 0.36, 0.68$  และ  $0.96$  จากรูปพบว่าที่ตำแหน่งใกล้กับช่องทางเข้า ( $x/L = 0.04$ ) รูปร่างความเร็วสำหรับทุกขนาดช่องเปิดมีลักษณะเหมือนกันคือ มีชั้นแคบๆ ของอากาศที่มีความเร็วสูง โดยมีความเร็วสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่ง  $y/H \sim 0.95$



ถัดมาที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.36$  รูปร่างความเร็วสำหรับทุกขนาดช่องเปิดยังคงมีลักษณะเหมือนกันคือ เเจ็ทของอากาศจากช่องทางเข้าจะกระจายตัวออกจนเต็มหน้าตัด และรูปร่างความเร็วจะมีลักษณะเป็นพาราโบลา ซึ่งความเร็วสูงสุดบนหน้าตัดจะมีค่าน้อยกว่าความเร็วสูงสุดบนหน้าตัด  $x/L = 0.04$  และตำแหน่งที่เกิดความเร็วสูงสุดจะเลื่อนต่ำลงมาอยู่ในบริเวณกลางห้อง ( $y/H \sim 0.5$ ) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบรูปร่างความเร็วบนหน้าตัดนี้กับรูปร่างความเร็วของการไหลที่พัฒนาตัวเต็มที่ (Laminar fully developed profile) แล้วจะพบว่ามีความคล้ายกันมาก

ที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.68$  รูปร่างความเร็วเริ่มมีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยที่ช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดเท่ากับ 1.0 ถึง 0.60 รูปร่างความเร็วมีลักษณะเป็นพาราโบลาเหมือนกับการไหลที่พัฒนาตัวเต็มที่แล้ว ส่วนที่ช่องเปิดมีขนาดตั้งแต่ 0.40 ลงมา ตำแหน่งที่เกิดค่าความเร็วสูงสุดจะเลื่อนต่ำลงมาเล็กน้อย ( $y/H \sim 0.3$ )

ที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.96$  ซึ่งอยู่ใกล้กับช่องทางออก รูปร่างความเร็วจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดอย่างชัดเจน โดยเมื่อช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ รูปร่างความเร็วจะมีการกระจายตัวเป็นรูปพาราโบลาเหมือนกับการไหลที่พัฒนาตัวเต็มที่แล้ว และเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง จะเกิดบริเวณที่อากาศมีความเร็วประมาณศูนย์ขึ้นไปในบริเวณใกล้เพดาน และจะขยายตัวเป็นบริเวณกว้างขึ้นตามความสูงของผนังท้ายห้องที่ปิดลงมา ในขณะที่เดียวกันความเร็วสูงสุดบนหน้าตัดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น และตำแหน่งที่เกิดค่าสูงสุดจะเลื่อนต่ำลงอย่างต่อเนื่องตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายที่ลดลง

จากผลการกระจายตัวของรูปร่างความเร็วในรูปที่ 3.17 สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) เมื่อช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ การไหลมีลักษณะเป็นเจ็ทที่พุ่งจากช่องทางเข้า ซึ่งจะกระจายโมเมนตัมให้กับอากาศรอบข้างเมื่อเคลื่อนที่ไปตาม Downstream จากนั้นการไหลจะปรับตัวเข้าสู่สภาวะการไหลที่พัฒนาตัวเต็มที่ (Fully developed flow) และเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง การไหลที่พัฒนาตัวเต็มที่ในบริเวณด้านบนของครึ่งห้องทางด้าน Downstream จะเคลื่อนตัวลงมาด้านล่างเพื่อเคลื่อนที่ออกจากห้อง
- 2) รูปร่างความเร็ว  $u$  ในบริเวณครึ่งห้องทางด้าน Upstream จะได้รับผลกระทบจากผนังท้ายห้องที่ปิดลงมาน้อยมาก
- 3) สำหรับการไหลในบริเวณต้นๆ ของครึ่งห้องทางด้าน Downstream ( $x/L = 0.68$ ) จะได้รับอิทธิพลจากผนังท้ายห้องเล็กน้อย เนื่องจากกระบวนการแพร่กระจาย (Diffusion) ที่ส่งผลของผนังด้านท้ายขึ้นมาทางด้าน Upstream ส่วนในบริเวณที่ใกล้กับผนังท้ายห้อง ( $x/L = 0.96$ ) รูปร่างความเร็ว  $u$  จะเปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดอย่างมาก
- 4) ที่ทุกขนาดช่องเปิด ไม่พบบริเวณการไหลย้อนกลับของอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้อง

รูปที่ 3.18 แสดงอัตราส่วนการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้องที่ช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ จากรูปพบว่า อัตราส่วนการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้องมีค่าเท่ากับศูนย์ที่ทุกขนาดช่องเปิด เนื่องจากไม่มีอากาศจากภายนอกห้องไหลย้อนกลับเข้ามาภายในห้อง ดังแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนจากการกระจายตัวของรูปร่างความเร็ว  $u$  ในรูปที่ 3.17

รูปที่ 3.19 แสดงระยะ Reattachment ที่ช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ โดยรูปนี้จะช่วยยืนยันว่ามีการไหลหมุนวนเกิดขึ้นที่มุมห้องด้านล่างซ้ายซึ่ง Contour ของ Stream line และ รูปร่างความเร็ว  $u$  ไม่สามารถแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจน จากรูปพบว่า ระยะ Reattachment,  $X_r/L$  สำหรับการไหลภายในห้องที่  $Re = 1$  มีค่าแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้าย โดยมีค่าประมาณ 0.0743 และเมื่อพิจารณาในรูปเล็กซึ่งขยายสเกลให้ใหญ่ขึ้นจะพบว่า ระยะ Reattachment จะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยอยู่ในช่วง 0.074 ถึง 0.075 ซึ่งช่วงของการเปลี่ยนแปลงนี้คิดเป็นระยะเพียง 0.1% ของความยาวห้อง ดังนั้นจึงพิจารณาได้ว่าระยะ Reattachment มีค่าคงที่ประมาณ 7.43% ของความยาวห้อง

รูปที่ 3.20 แสดงตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลักที่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้าย โดยรูปที่ 3.20(ก) แสดงภาพรวมของตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลักที่ทุกขนาดช่องเปิด จากรูปพบว่า ศูนย์กลางของการไหลหมุนวนแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามขนาดช่องเปิดเลย แต่เมื่อขยายสเกลเฉพาะในกรอบสี่เหลี่ยมให้ใหญ่ขึ้นจะพบว่า ศูนย์กลางของการไหลหมุนวนมีการเคลื่อนที่เล็กน้อยในแนวตั้ง

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ที่ละแนวแกนพบว่า ศูนย์กลางของการไหลหมุนวนไม่เปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามแนวแกน  $x$  ดังแสดงในรูป 3.20(ข) แต่จะมีการเคลื่อนที่เล็กน้อยตามแนวแกน  $y$  ดังแสดงในรูป 3.20(ค) โดยตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวนจะเคลื่อนที่ต่ำลงอยู่ในช่วง  $y/H = 0.060 - 0.065$  เมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดอยู่ในช่วง  $0.60 - 0.20$  ซึ่งช่วงของการต่ำที่เกิดขึ้นคิดเป็นระยะเพียง 0.5% ของความสูงห้องเท่านั้น ดังนั้นจึงพิจารณาได้ว่าตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลักมีค่าคงที่ ที่ตำแหน่ง  $x/L \sim 0.03$  และ  $y/H \sim 0.061$

จากการศึกษาผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อรูปแบบการไหลภายในห้องที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 1 สามารถสรุปได้ว่า

- 1) รูปแบบการไหลในบริเวณครึ่งห้องทางด้าน Upstream ไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องเปิดด้านท้าย แต่ในบริเวณครึ่งห้องทางด้าน Downstream รูปแบบการไหลจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิด โดยเฉพาะในบริเวณใกล้กับผนังท้าย



ห้องที่ขวางการไหล โดยเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลงอากาศที่ไหลมาเต็มหน้าตัดห้อง จะเคลื่อนตัวลงมาด้านล่างมากขึ้น และมีความเร็วสูงขึ้นตามสมการความต่อเนื่อง เพื่อเคลื่อนที่ผ่านช่องเปิดด้านท้ายที่มีขนาดลดลง

- 2) เกิดบริเวณของการไหลหมุนวนขึ้นสองแห่ง ที่มุมห้องด้านล่างซ้าย และมุมระหว่างเพดานกับผนังท้ายห้อง โดยบริเวณของการไหลหมุนวนที่มุมห้องด้านล่างซ้ายจะมีตำแหน่ง และขนาดคงที่ ดังจะเห็นได้จากกราฟแสดงตำแหน่งของศูนย์กลางการไหลหมุนวนหลัก และระยะ Reattachment ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้าย
- 3) ที่ทุกขนาดช่องเปิดด้านท้าย เกิดจุด Reattachment ขึ้นภายในห้อง และไม่มีอากาศจากภายนอกห้องไหลย้อนกลับเข้ามาภายในห้อง

### การไหลภายในห้องที่ $Re = 10$

รูปที่ 3.21 แสดงผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อลักษณะการไหลภายในห้องที่  $Re = 10$  โดยแสดงอยู่ในรูปของ Stream line จากรูปพบว่า

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0 (กรณีที่ผนังท้ายห้องเปิดเต็มที่) Stream line จากช่องทางเข้าจะกระจายตัวออกอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream จนเต็มความสูงห้องที่ระยะ  $x/L \sim 0.6$  หลังจากนั้นแนวของ Stream line จะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดความสูงห้องจนถึงช่องเปิดด้านท้าย นอกจากนี้ยังมี Stream line ที่มีลักษณะเป็นวงปิดขนาดใหญ่อยู่ใต้ช่องทางเข้าติดกับมุมห้องด้านล่างซ้าย ลักษณะดังกล่าวแสดงถึง เจ็ตที่เหนียวทำให้เกิดบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดใหญ่ในบริเวณมุมด้านล่างซ้าย

เมื่อพิจารณาถึงภาพรวมของการไหลภายในห้องที่  $Re = 10$  ในกรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่นั้น จะพบว่าการไหลมีลักษณะคล้ายกับการไหลผ่าน BFS ที่มีอัตราส่วนการขยายสูงชัดเจนกว่าการไหลภายในห้องที่  $Re = 1$  ดังจะเห็นได้จากบริเวณของการไหลหมุนวนในบริเวณมุมห้องด้านล่างซ้ายที่มีขนาดใหญ่กว่ามาก

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 0.92 การกระจายตัวของ Stream line มีลักษณะคล้ายกับในกรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ ยกเว้นในบริเวณใกล้กับผนังท้ายห้อง ซึ่ง Stream line ในบริเวณนี้จะเบี่ยงและโค้งตัวลงมาเล็กน้อย ลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการไหลภายในห้องทางด้าน Upstream นั้นไม่แตกต่างจากกรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่มากนัก แต่ในบริเวณใกล้กับผนังท้ายห้อง อากาศจะโค้งตัวลงมาทางด้านล่างเล็กน้อยเพื่ออ้อมข้ามผนังท้ายห้องที่ขวางการไหล

เมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง ( $t/H = 0.84 - 0.08$ ) การกระจายตัวของ Stream line ทางด้าน Upstream จะไม่แตกต่างกันไปจากการกระจายตัวของ Stream line ที่อัตราส่วนช่องเปิดเท่ากับ 0.92 มากนัก ดังจะเห็นได้จากบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดใหญ่ได้ช่องทางเข้าที่มีทั้งขนาด และตำแหน่ง ไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้าย แต่ในบริเวณใกล้กับผนังท้ายห้อง Stream line จะเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยจะเบี่ยงและโค้งตัวออกจากเพดานอย่างต่อเนื่องเพื่ออ้อมข้ามผนังท้ายห้องที่ปิดลงมา ซึ่งจุดที่ Stream line เริ่มเบี่ยงตัวออกจากเพดานจะเลื่อนไปทาง Upstream อย่างต่อเนื่องเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง

รูปที่ 3.22 แสดงการกระจายตัวของความเร็วตามแนว Stream wise,  $u/U_{in}$  (เส้นประ) ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ โดยมีเส้น Stream line (เส้นทึบ) แสดงซ้อนทับ จากรูปพบว่า

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0 การไหลมีบริเวณของความเร็วสูงใกล้กับปากของช่องทางเข้าในลักษณะเอียงลาดลงเล็กน้อย ซึ่งแสดงถึงการไหลของเจ็ตที่พุ่งเอียงลาดลง เมื่อออกมาจากช่องทางเข้า หลังจากนั้นเจ็ตจะมีความเร็วลดลงจนประมาณคงที่ในบริเวณครึ่งห้องทางด้าน Downstream นอกจากนี้ที่มุมห้องด้านล่างซ้ายมีบริเวณของอากาศที่มีความเร็วเป็นลบขนาดใหญ่ ซึ่งรอยต่อระหว่างบริเวณของอากาศที่มีความเร็วเป็นบวก และลบแสดงถึงบริเวณของการไหลหมุนวน ดังจะเห็นได้จากแนวเส้น โค้งปิดของ Stream line ที่แสดงซ้อนไว้

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าเท่ากับ 0.92 – 0.60 จะพบบริเวณเล็กๆ ของอากาศที่มีความเร็วเป็นลบเพิ่มขึ้นอีกแห่งในบริเวณมุมขวาบน ซึ่งจะมีความเร็วสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง บริเวณดังกล่าวแสดงถึงการไหลหมุนวนขนาดเล็กอีกแห่งที่เกิดขึ้นในบริเวณมุมระหว่างเพดานกับผนังท้ายห้อง

เมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดเล็กถึงจนถึงกรณีที่ปิดมากที่สุด ( $t/H = 0.40 - 0.08$ ) จะเริ่มพบบริเวณที่อากาศถูกเร่งให้มีความเร็วสูงขึ้นอีกครั้งในบริเวณใต้ขอบของผนังท้ายห้อง ซึ่งเกิดจากการที่อากาศเคลื่อนตัวลงมาด้านล่างเพื่อไหลผ่านช่องเปิดด้านท้าย และความเร็วในบริเวณนี้จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ยังมีจุดที่น่าสังเกตอีกแห่งคือ รูปร่างของบริเวณที่มีความเร็วสูงนี้จะลาดเอียงขึ้นเล็กน้อยในทิศทางที่สอดคล้องกับบริเวณของความเร็วสูงหน้าช่องทางอากาศเข้า

รูปที่ 3.23 แสดงการกระจายตัวของความเร็วตามแนว Transverse,  $v/U_{in}$  (เส้นประ) ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ โดยมีเส้น Stream line (เส้นทึบ) แสดงซ้อนทับ จากรูปพบว่า

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0 อากาศจะมีความเร็วสูงในทิศพุ่งลงพื้น (ความเร็วเป็นลบ) เป็นบริเวณเล็กๆ ใกล้กับช่องทางเข้า ซึ่งแสดงถึงเจ็ตจากช่องทางเข้าที่พุ่งเฉียงลงมายังพื้น ถัดจากนั้นความเร็วในแนว Transverse ของการไหลจะมีค่าลดลงจนประมาณเท่ากับศูนย์ตลอดตลอดทั่วทั้งห้องจนถึงช่องเปิดด้านท้าย นอกจากนี้ที่มุมห้องด้านล่างซ้าย มีบริเวณของอากาศที่มีความเร็วพุ่งขึ้น (ความเร็วเป็นบวก) ขนาดใหญ่ ซึ่งตรงกับบริเวณของการไหลหมุนวน ดังแสดงโดยแนวเส้น Stream line

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าเท่ากับ 0.92 – 0.40 Contour ของความเร็วในแนว Transverse ยังคงมีลักษณะเช่นเดียวกับในกรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ โดยมีบริเวณเล็กๆ ของอากาศที่มีความเร็วพุ่งขึ้นอยู่ในบริเวณมุมขวาบนเพิ่มขึ้นอีกแห่ง ซึ่งบริเวณดังกล่าวแสดงถึงลักษณะของการไหลหมุนวนขนาดเล็กที่เกิดขึ้น

เมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง ( $t/H = 0.20 - 0.08$ ) จะเริ่มพบบริเวณของอากาศที่มีความเร็วสูงในทิศพุ่งลงอีกครั้งใกล้กับช่องเปิดด้านท้าย โดยบริเวณนี้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความเร็วสูงขึ้นเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง ซึ่งบริเวณดังกล่าวแสดงถึงบริเวณของอากาศที่เคลื่อนที่ลงมาด้านล่างเพื่อไหลผ่านช่องเปิดด้านท้ายออกไปนอกห้อง

รูปที่ 3.24 แสดงการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความดัน,  $C_p$  (เส้นประ) ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ โดยมีเส้น Stream line (เส้นทึบ) แสดงซ้อนทับ จากรูปพบว่า

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0 การไหลมีบริเวณของความดันสูงขนาดเล็กที่ปากของช่องทางเข้า และมีบริเวณของความดันต่ำขนาดเล็กสองแห่งขนานข้างในบริเวณใต้ช่องทางเข้า ติดกับผนังด้านข้าง และเหนือช่องทางเข้าติดกับเพดาน ลักษณะการกระจายความดันดังกล่าวแสดงถึงการไหลของเจ็ตจากช่องทางเข้าที่ดึงเอาอากาศรอบข้างเข้ามารวมตัวกับเจ็ต ส่วนในบริเวณกลางห้อง จะพบบริเวณของความดันสูงขนาดใหญ่เหนือพื้นห้อง ซึ่งบริเวณนี้ตรงกับบริเวณที่เจ็ตกระจายตัวลงมาถึงพื้นห้อง ดังจะเห็นได้จากแนวของ Stream line สำหรับในบริเวณอื่นของห้อง การกระจายความดันของการไหลจะมีค่าประมาณคงที่ อยู่ในช่วง Contour level แรกที่น้อยกว่าค่าความดันเฉลี่ยรวม

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าเท่ากับ 0.92 – 0.76 การกระจายตัวของความดันโดยส่วนใหญ่มีลักษณะคล้ายกับในกรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ และจะเริ่มพบบริเวณของความดันสูงขนาดเล็กเหนือขอบของผนังท้ายห้องซึ่งจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อผนังท้ายห้องปิดลงมามากขึ้น ผลต่างระหว่างความดันสูงในบริเวณนี้กับบริเวณรอบข้างทำให้เกิดแรง (Pressure force) ผลักให้การไหลของอากาศเปลี่ยนทิศโค้งตัวลงมาเล็กน้อย เพื่อลอดใต้ผนังท้ายห้อง ดังจะเห็นได้จากแนวของ Stream line ที่โค้งตัวลงมามากขึ้นเมื่อผนังท้ายห้องปิดลงมามากขึ้น

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 0.68 บริเวณของความดันสูงที่ผนังท้ายห้องจะขยายตัวใหญ่ขึ้น และเชื่อมต่อกับบริเวณของความดันสูงในบริเวณกลางห้อง แยกบริเวณของความดันต่ำออกจากกัน ส่วนหนึ่งอยู่ติดกับช่องทางอากาศเข้า อีกส่วนหนึ่งอยู่ติดกับช่องเปิดด้านท้าย

เมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลงจนถึงกรณีที่ปิดมากที่สุด ( $t/H = 0.60 - 0.08$ ) จะเริ่มพบบริเวณของความดันต่ำได้ขอบของผนังท้ายห้อง ซึ่งจะมีขนาดใหญ่ขึ้นจนเต็มช่องเปิดด้านท้าย และมีค่าต่ำลงเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง บริเวณของความดันต่ำดังกล่าวตรงกับบริเวณที่อากาศมีความเร็วสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ Contour ของความเร็วตามแนว Stream wise และแนว Transverse (รูปที่ 3.22 และ 3.23 )

โดยสรุปแล้วรูปแบบการไหลภายในห้องที่  $Re = 10$  มีการเปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายอย่างต่อเนื่องเฉพาะในบริเวณครึ่งห้องทาง Downstream โดยในกรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ การไหลจะมีลักษณะคล้ายกับการไหลผ่าน BFS ที่มีอัตราส่วนการขยายสูง เจ็ตที่พุ่งออกจากช่องทางเข้าจะเคลื่อนที่ไปตามแนว Downstream แล้วเหนี่ยวนำให้เกิดบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดใหญ่ได้ช่องทางเข้า ในขณะที่เดียวกันก็จะกระจายตัวออกจนเต็มหน้าตัดห้องที่ระยะประมาณ 60% ของความยาวห้อง แล้วจึงปรับตัวเข้าสู่สภาวะการไหลที่พัฒนาตัวเต็มที่ก่อนไหลออกจากห้องผ่านช่องเปิดด้านท้าย

เมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง การไหลในบริเวณครึ่งห้องทาง Upstream จะไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายมากนัก ดังจะเห็นได้จากตำแหน่ง และขนาดของการไหลหมุนวนที่แทบจะไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ครึ่งห้องทาง Downstream จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยอากาศที่ไหลมาเต็มหน้าตัดจะเคลื่อนตัวลงมาด้านล่างเพื่อไหลผ่านช่องเปิดด้านท้ายที่มีขนาดลดลง ซึ่งจุดที่การไหลเริ่มเคลื่อนตัวลงมาด้านล่างจะเลื่อนขึ้นไปทาง Upstream อย่างต่อเนื่อง และเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดน้อยกว่า 40% ของความสูงห้อง อากาศที่เคลื่อนตัวลงมาด้านล่างจะมีความเร็วสูงขึ้น และความดันต่ำลงมากจนสังเกตได้อย่างชัดเจนจาก Contour ของความเร็วทั้งสองแนวและความดัน โดยบริเวณที่อากาศเริ่มมีความเร็วสูงขึ้นและความดันต่ำลงจะเริ่มขยายตัวจากขอบของผนังท้ายห้องลงมาจนเต็มช่องเปิดเมื่อผนังท้ายห้องปิดลงมามากขึ้น นอกจากนี้ที่มุมระหว่างเพดานกับผนังท้ายห้องมีบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดเล็กเกิดขึ้นอีกแห่ง ซึ่งไม่สามารถแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนจาก Contour ของ Stream line แต่จะสังเกตได้จาก Contour ของความเร็วตามแนว Stream wise และ Transverse

รูปที่ 3.25 แสดงรูปร่างการกระจายตัวของความเร็ว  $u$  ที่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.04, 0.36, 0.68$  และ  $0.96$  จากรูปพบว่า

ที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.04$  รูปร่างความเร็วสำหรับทุกขนาดช่องเปิด มีลักษณะเป็นเจ็ทของอากาศที่มีความเร็วสูง โดยมีความเร็วสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่ง  $y/H \sim 0.95$

ที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.36$  รูปร่างความเร็วสำหรับทุกขนาดช่องเปิดยังคงมีลักษณะเหมือนกัน โดยเจ็ทของอากาศที่เคลื่อนที่ไปตามแนว Downstream จะกระจายตัวออก ทำให้ความเร็วสูงสุดบนหน้าตัดมีค่าต่ำลง และตำแหน่งที่เกิดความความเร็วสูงสุดจะเลื่อนต่ำลงมาอยู่ที่  $y/H \sim 0.7$

ที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.68$  รูปร่างความเร็วจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดเล็กน้อย โดยในกรณีที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าเท่ากับ 1.0 ถึง 0.60 รูปร่างความเร็วจะมีลักษณะเป็นพาราโบลาที่มีความเร็วสูงสุดในบริเวณกลางห้อง ( $y/H = 0.5$ ) สอดคล้องกับรูปร่างความเร็วของการไหลที่พัฒนาตัวเต็มที่แล้ว ส่วนที่ช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดน้อยกว่า 40% ของความสูงห้อง ตำแหน่งที่เกิดค่าความเร็วสูงสุดจะเลื่อนต่ำลงมาเล็กน้อยตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายที่ลดลง

ที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.96$  ซึ่งอยู่ใกล้กับช่องเปิดด้านท้าย รูปร่างความเร็ว  $u$  จะเปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายอย่างมาก โดยในกรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ รูปร่างความเร็วจะมีลักษณะเป็นพาราโบลาเช่นเดียวกับการไหลที่พัฒนาตัวเต็มที่แล้ว และเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง จะมีบริเวณของอากาศที่มีความเร็วประมาณศูนย์เกิดขึ้น ใกล้กับเพดาน และขยายตัวเป็นบริเวณกว้างขึ้นตามความสูงของผนังท้ายห้องที่ปิดลงมา ในขณะที่เดียวกันความเร็วสูงสุดบนหน้าตัดจะมีค่าเพิ่มขึ้น และตำแหน่งที่เกิดค่าความเร็วสูงสุดจะเลื่อนต่ำลงมาใกล้กับพื้นห้องอย่างต่อเนื่องตามขนาดช่องเปิดที่ลดลง

จากผลการกระจายตัวของรูปร่างความเร็วในรูปที่ 3.25 สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ในกรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ การไหลจะมีลักษณะเป็นเจ็ทที่พุ่งจากช่องทางเข้าแล้วกระจายตัวจนเต็มหน้าตัดห้องเมื่อเคลื่อนที่ไปตามแนว Downstream หลังจากนั้นการไหลจะปรับตัวเข้าสู่สภาวะการไหลที่พัฒนาตัวเต็มที่ (Fully developed flow) เมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง อากาศที่ไหลมาเต็มหน้าตัดห้องจะเคลื่อนตัวลงมาด้านล่างเพื่อไหลผ่านช่องเปิดด้านท้ายที่มีขนาดลดลง
- 2) รูปร่างความเร็ว  $u$  ในบริเวณครึ่งห้องทางด้าน Upstream แทบจะไม่ได้รับผลกระทบจากผนังท้ายห้องที่ปิดลงมา ในขณะที่รูปร่างความเร็ว  $u$  ในบริเวณครึ่งห้องทางด้าน Downstream ที่อยู่ใกล้กับช่องเปิดด้านท้าย จะได้รับอิทธิพลจากผนังที่ปิดลงมา จึงทำให้รูปร่างความเร็วเปลี่ยนแปลงอย่างมากตามขนาดช่องเปิดที่ลดลง
- 3) ที่ทุกขนาดช่องเปิด การไหลภายในห้องที่  $Re = 10$  จะไม่มีอากาศจากภายนอกห้องไหลย้อนกลับเข้ามาภายในห้อง เช่นเดียวกับการไหลภายในห้องที่  $Re = 1$

รูปที่ 3.26 แสดงอัตราส่วนการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้องที่ช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ สำหรับการไหลที่  $Re = 10$  จากรูปพบว่า อัตราส่วนการดึงอากาศจากภายนอก



ห้องเข้ามาภายในห้องที่ทุกขนาดช่องเปิดมีค่าเท่ากับศูนย์ เช่นเดียวกับในกรณีที่มี  $Re = 1$  เนื่องจากไม่มีอากาศจากภายนอกห้องไหลย้อนกลับเข้ามาภายในห้องดังแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนจากการกระจายตัวของรูปร่างความเร็ว  $u$  ในรูปที่ 3.25

รูปที่ 3.27 แสดงระยะ Reattachment ที่ช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ จากรูปพบว่า ระยะ Reattachment ( $X_r/L$ ) ที่เกิดขึ้นมีค่าประมาณคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้าย แต่เมื่อพิจารณาในกรอบสี่เหลี่ยมที่ขยายสเกลให้มีความใหญ่ขึ้นจะพบว่า ระยะ  $X_r/L$  มีการเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเล็กน้อย โดยจะมีค่าลดลงจาก 0.384 เป็น 0.376 เมื่ออัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายลดลงจาก 1.0 เป็น 0.08 ซึ่งช่วงของการเปลี่ยนแปลงนี้คิดเป็นระยะเพียง 1% ของความยาวห้อง ดังนั้นจึงพิจารณาได้ว่าระยะ Reattachment สำหรับการไหลที่  $Re = 10$  มีค่าคงที่ประมาณ 38% ของความยาวห้อง

รูปที่ 3.28 แสดงตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลักที่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้าย โดยในรูปที่ 3.28(ก) แสดงภาพรวมของตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวนที่ช่องเปิดขนาดต่างๆ จากรูปพบว่าศูนย์กลางของการไหลหมุนวนมีการเปลี่ยนตำแหน่งเล็กน้อยในแนวดิ่ง

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ที่ละแนวแกนพบว่า ศูนย์กลางของการไหลหมุนวนไม่เปลี่ยนแปลงตามแนวแกน  $x$  ดังแสดงในรูป 3.28(ข) แต่จะมีการเคลื่อนที่ตามแนวแกน  $y$  ดังแสดงในรูป 3.28(ค) โดยเมื่ออัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าอยู่ในช่วง 1.0 – 0.74 ตำแหน่งตามแนวแกน  $y$  มีค่าประมาณคงที่ และเมื่ออัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าลดลง ตำแหน่งตามแนวแกน  $y$  จะเคลื่อนที่ต่ำลงอยู่ในช่วง  $y/H = 0.45 - 0.48$  โดยมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่ลง เมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง ซึ่งช่วงของการต่ำนี้คิดเป็นระยะเพียง 3% ของความสูงห้องเท่านั้น ดังนั้นจึงพิจารณาได้ว่าตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวนมีค่าคงที่ ที่ตำแหน่ง  $x/L \sim 0.14$  และ  $y/H \sim 0.47$

จากการศึกษาผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อรูปแบบการไหลภายในห้องที่เรย์โนลด์สจำนวนเท่ากับ 10 สามารถสรุปได้ว่า

- 1) รูปแบบการไหลในบริเวณครึ่งห้องทางด้าน Upstream เปลี่ยนแปลงตามขนาดของช่องเปิดด้านท้ายเพียงเล็กน้อย ส่วนในบริเวณครึ่งห้องทางด้าน Downstream รูปแบบการไหลจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายที่ลดลงอย่างมาก โดยอากาศที่ไหลมาเต็มหน้าตัดห้อง จะเคลื่อนตัวลงมาด้านล่างเพื่อไหลผ่านช่องเปิดด้านท้ายที่มีขนาดลดลง



- 2) บริเวณของการไหลหมุนวนขนาดใหญ่ที่มุมห้องด้านล่างซ้ายได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องเปิดด้านท้ายเพียงเล็กน้อย ดังจะเห็นได้จากขนาด และตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลักที่แทบจะไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้าย สำหรับบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดเล็กที่มุมระหว่างเพดานกับผนังท้ายห้อง จะเกิดขึ้นเมื่อเริ่มมีผนังท้ายห้องปิดลงมาขวางการไหล และมีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อยในช่วงแรกของการปิด
- 3) ที่ทุกขนาดของช่องเปิดด้านท้าย ไม่มีอากาศจากภายนอกห้องไหลย้อนกลับเข้ามาภายในห้อง เช่นเดียวกับการไหลที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 1

### การไหลภายในห้องที่ $Re = 100$

รูปที่ 3.29 แสดงผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อลักษณะการไหลภายในห้อง โดยแสดงอยู่ในรูปของ Stream line เช่นเดียวกับรูปที่ 3.13 โดยมีอัตราส่วนช่องเปิดเพิ่มขึ้นอีก 3 ค่า คือ 0.96, 0.3 และ 0.1 จากรูปพบว่า

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0 หรือกรณีที่ผนังท้ายห้องเปิดเต็มที่ แนวของ Stream line มีความหนาแน่นมากในบริเวณใต้เพดานตั้งแต่ช่องทางเข้าต่อเนื่องไปยังช่องเปิดด้านท้าย ซึ่งการที่ Stream line รวมตัวกันอย่างหนาแน่น แสดงถึงบริเวณที่อากาศมีความเร็วสูง (สมการ 3.2) ถัดลงมาในช่วงกลางห้อง Stream line จะมีความหนาแน่นน้อยลง และมีรูปร่างเป็นวงเปิดโค้ง ที่มีศูนย์กลางอยู่บนช่องเปิดด้านท้ายที่ความสูงประมาณ 65% ของความสูงห้อง ซึ่งลักษณะดังกล่าว แสดงถึงบริเวณที่อากาศมีความเร็วต่ำ และมีการเปลี่ยนทิศทางการไหล

ดังนั้นเมื่อพิจารณาภาพรวมของการไหลภายในห้องที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ จะเห็นว่าในบริเวณใต้เพดาน การไหลมีลักษณะเป็นเจ็ตที่พุ่งเรียบเพดาน (Wall jet) จากช่องทางเข้าไปยังช่องเปิดด้านท้าย ส่วนในบริเวณกลางห้องการไหลมีความเร็วต่ำและมีการเปลี่ยนทิศทางเป็นวงโค้งเปิด โดยอากาศภายในห้องจะถูก Wall jet เหนี่ยวนำให้เคลื่อนที่ออกไปนอกห้องทางด้านบน และอากาศจากภายนอกห้องจะเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่ทางด้านล่างในลักษณะที่เป็นวงโค้งจากด้านล่างขึ้นไปด้านบนทำให้เกิดบริเวณของการไหลหมุนวนแบบเปิด (Open-loop recirculation) ที่ประกอบไปด้วยอากาศภายในห้อง และภายนอกห้องเคลื่อนที่เป็นวงผ่านช่องเปิดด้านท้าย

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 0.96 แนวของ Stream line ในบริเวณใต้เพดานเอียงลงเล็กน้อย ส่วนในบริเวณกลางห้อง Stream line ที่มีรูปร่างเป็นวงเปิดเริ่มเกิดรูปร่างที่เป็นวงปิดขึ้นรอบตำแหน่งศูนย์กลาง ลักษณะดังกล่าวแสดงถึง การไหลแบบ Wall jet ที่วิ่งเรียบเพดานจากช่องทางเข้าสู่ช่องเปิดด้านท้าย เกิดการเบี่ยงตัวออกจากเพดานเล็กน้อยเพื่ออ้อมข้ามผนังท้ายห้องที่ปิดลงมาขวางการไหล ในขณะที่เดียวกัน Wall jet ก็เหนี่ยวนำให้อากาศภายในห้องเคลื่อนที่ออกไป

นอกห้องทางด้านบนของช่องเปิด พร้อมกับดึงเอาอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้องทางด้านล่าง เกิดเป็นบริเวณของการไหลหมุนวนที่มีศูนย์กลางของการหมุนวนอยู่ใกล้กับช่องเปิดด้านท้าย โดยบริเวณวงนอกของการไหลหมุนวนนี้มีลักษณะเป็นการไหลหมุนวนแบบเปิดที่มีทั้งอากาศภายในห้อง และภายนอกห้องเคลื่อนที่เป็นวง ในขณะที่ศูนย์กลางของการไหลหมุนวนดังกล่าวมีลักษณะเป็นการไหลหมุนวนแบบปิด (Close-loop recirculation) ที่มีเฉพาะอากาศภายในห้องเท่านั้น

นอกจากนี้การที่ Wall jet เบี่ยงตัวลงมาด้านล่างทำให้ศูนย์กลางของการไหลหมุนวนเคลื่อนตัวเข้ามาภายในห้องและลดระดับความสูงลงมาอยู่ที่  $y/H \sim 0.55$

ที่อัตราส่วนช่องเปิดเท่ากับ 0.92 – 0.40 รูปแบบการไหลภายในห้องมีการเปลี่ยนแปลงต่อเนื่องจากรูปแบบการไหลที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 0.96 โดยเมื่ออัตราส่วนช่องเปิดมีค่าลดลง ตำแหน่งที่ Wall jet เริ่มเบนทิศทางออกจากเพดานจะเลื่อนไปทาง Upstream มากขึ้นเพื่อโค้งตัวข้ามผนังท้ายห้องที่ปิดลงมามากขึ้น การเบี่ยงเบนทิศทางของ Wall jet ทำให้ศูนย์กลางของการไหลหมุนวนเคลื่อนตัวเข้ามาภายในห้องพร้อมกับลดระดับความสูงลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่เดียวกันศูนย์กลางของการไหลหมุนวนที่มีลักษณะเป็นการไหลหมุนวนแบบปิดจะขยายตัวออกเป็นวงกว้างขึ้น

นอกจากนี้ยังเกิดบริเวณของการไหลหมุนวนอีกแห่งขึ้นที่มุมด้านล่างซ้ายของห้อง ซึ่งมีทิศทางการหมุนตรงข้ามกับบริเวณแรก โดยเกิดขึ้นจากการไหลย้อนกลับของอากาศจากภายนอกห้องที่ไหลเข้ามาภายในห้อง บริเวณของการไหลหมุนวนแห่งที่สองนี้จะปรากฏชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่ออัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าลดลง ซึ่งแสดงถึงความเร็วของการไหลย้อนกลับ และความรุนแรงของการไหลหมุนวนบริเวณแรกที่เพิ่มขึ้น

ที่อัตราส่วนช่องเปิดเท่ากับ 0.30 – 0.08 รูปแบบการไหลภายในห้องจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดไม่มากนัก อย่างไรก็ตาม สิ่งหนึ่งที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก และเห็นได้ชัดคือ Wall jet ที่เบี่ยงเบนออกจากเพดานจะพุ่งชนกับผนังท้ายห้อง แล้วสะท้อนลงมาชนกับพื้นห้องในลักษณะ Impinging jet ดังแสดงโดยแนวเส้น Stagnation stream line สีดำ ซึ่งเจ็ทของอากาศส่วนล่างของ Stagnation stream line จะพุ่งกลับเข้าไปในห้อง ทำให้บริเวณของการไหลหมุนวนมีลักษณะเป็นการไหลหมุนวนแบบปิดทั้งหมด ในขณะที่เจ็ทของอากาศส่วนบนของ Stagnation stream line จะพุ่งออกไปนอกห้องผ่านช่องเปิดด้านท้ายโดยไม่มีการดึงเอาอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้องเหมือนกับอัตราส่วนช่องเปิดขนาดอื่นๆ สำหรับตำแหน่งที่เจ็ทพุ่งชนพื้นหรือจุด Reattachment point จะเลื่อนจากบริเวณใกล้กับช่องเปิดด้านท้ายเข้ามาภายในห้องมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าลดลง

นอกจากนี้ยังมีบริเวณของการไหลหมุนวนแห่งที่สามในบริเวณมุมระหว่างเพดานกับผนังท้ายห้อง เนื่องจาก Wall jet ที่เบี่ยงตัวออกจากเพดานปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจน

รูปที่ 3.30 แสดงการกระจายตัวของความเร็วตามแนว Stream wise,  $u/U_{in}$  (เส้นประ) ที่ช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ โดยมีเส้น Stream line (เส้นทึบ) แสดงซ้อนทับ จากรูปพบว่า

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0 การไหลจะมีบริเวณของความเร็วสูงจากช่องทางเข้าเรียบเพดานไปจนถึงช่องเปิดด้านท้าย ถัดลงมาในบริเวณกลางห้องอากาศมีความเร็วค่อนข้างต่ำและไหลย้อนกลับเข้าไปในห้อง (ความเร็วเป็นลบ) ลักษณะดังกล่าวแสดงถึงบริเวณของการไหลแบบ Wall jet ที่วิ่งเรียบเพดานจากช่องทางเข้าสู่ช่องเปิดด้านท้าย และบริเวณของอากาศจากภายนอกห้องที่ไหลย้อนกลับเข้าไปในห้องทางด้านล่างของช่องเปิด ดังจะเห็นได้จากแนวของเส้น Stream line ที่แสดงซ้อนทับไว้ ซึ่งบริเวณรอยต่อระหว่างอากาศที่มีความเร็วเป็นบวก และลบ แสดงให้เห็นถึงบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นในตอนกลางของห้อง นอกจากนี้ยังมีบริเวณของอากาศที่มีความเร็วเป็นบวกแต่มีค่าน้อยมากอยู่ที่บริเวณมุมห้องด้านล่างซ้าย ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีบริเวณของการไหลหมุนวนที่มีความรุนแรงน้อย จนไม่สามารถแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนจาก Contour ของ Stream line

เมื่ออัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าเท่ากับ 0.96 – 0.40 แนวของการไหลที่มีความเร็วสูงจะเอียงลงมาด้านล่างอย่างต่อเนื่อง แล้วเบี่ยงให้บริเวณของการไหลย้อนกลับที่มีความเร็วต่ำเคลื่อนตัวลงมาด้านล่าง ซึ่งลักษณะดังกล่าวตรงกับแนวของ Wall jet ที่เบี่ยงตัวลงมาเนื่องจากผนังท้ายห้องที่ขวางการไหล แล้วเบี่ยงให้บริเวณของการไหลหมุนวนเคลื่อนตัวต่ำลงมาจนติดพื้นห้อง ดังจะเห็นได้จากแนวเส้น Stream line ที่แสดงซ้อนอยู่ สำหรับบริเวณของอากาศที่มีความเร็วเป็นบวกที่มุมห้องด้านล่างซ้ายจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีความเร็วสูงขึ้นเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีค่าลดลง ทำให้บริเวณของการไหลหมุนวนมีความรุนแรงมากขึ้นจนเห็นได้ชัดเจนจาก Contour ของ Stream line

ที่มุมระหว่างเพดานกับผนังท้ายห้องเริ่มมีบริเวณที่อากาศมีความเร็วเป็นลบเกิดขึ้น ซึ่งแสดงถึงบริเวณของการไหลหมุนวนอีกแห่ง โดยบริเวณนี้จะขยายขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีค่าลดลง

นอกจากนี้ที่อัตราส่วนช่องเปิดเท่ากับ 0.84 – 0.76 บริเวณของการไหลย้อนกลับเหนือพื้นห้องใกล้กับบริเวณช่องเปิดด้านท้ายจะเริ่มมีความเร็วสูงขึ้นมาอีกหนึ่ง Contour level ซึ่งแสดงถึงความรุนแรงที่เพิ่มขึ้นของการไหลหมุนวนในบริเวณนี้ โดยบริเวณนี้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าเท่ากับ 0.30 – 0.08 ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วตามแนว Stream wise เปลี่ยนแปลงไปจากลักษณะการกระจายตัวที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 0.40 เพียงเล็กน้อย โดยที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 0.30 จะเริ่มไม่มีอากาศจากภายนอกห้องไหลเข้ามาภายในห้อง และเกิดรอยต่อระหว่างบริเวณของอากาศที่มีความเร็วเป็นบวก (อากาศเคลื่อนที่ออกไปนอกห้อง) กับบริเวณของอากาศที่มีความเร็วเป็นลบ (อากาศเคลื่อนที่

ย้อนกลับเข้าไปในห้อง) อยู่บนพื้นห้อง ซึ่งตรงกับตำแหน่งที่เจ็ตพุ่งชนพื้นห้องทำให้เกิดจุด Reattachment ขึ้นภายในห้อง โดยอาจกล่าวได้ว่าจุด Reattachment นี้จะเคลื่อนตัวเข้ามาภายในห้องจากภายนอกห้องเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง

รูปที่ 3.31 แสดงการกระจายตัวของความเร็วตามแนว Transverse,  $v/U_{in}$  (เส้นประ) ที่ช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ โดยมีเส้น Stream line (เส้นทึบ) แสดงซ้อนทับ จากรูปพบว่า

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0 การไหลมีบริเวณที่ความเร็วเป็นลบ (อากาศเคลื่อนที่ลงมายังพื้นห้อง) จากช่องทางเข้าเรียบเพดานไปจนถึงช่องเปิดด้านท้าย ซึ่งแสดงถึงบริเวณของ Wall jet ส่วนในบริเวณตอนกลางถึงพื้นห้องการไหลมีความเร็วเป็นบวก (อากาศเคลื่อนที่ขึ้น) แสดงถึงบริเวณของการไหลย้อนกลับของอากาศจากภายนอกห้องที่ถูกดึง (Entrain) เข้ามาภายในห้องซึ่งเคลื่อนที่ขึ้นไปรวมกับ Wall jet ที่อยู่ด้านบนของห้อง ที่มุมห้องด้านล่างซ้ายมีบริเวณของการไหลที่ความเร็วมีทิศพุ่งลงแต่มีค่าน้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดเล็กที่มีความรุนแรงน้อยที่พบใน Contour ของความเร็วตามแนว Stream wise (รูปที่ 3.30)

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าเท่ากับ 0.96 – 0.40 การไหลที่มีความเร็วเป็นลบในบริเวณใต้เพดานจะขยายตัวลงมาข้างล่างจนถึงพื้นห้องในบริเวณใกล้กับช่องเปิดด้านท้าย ซึ่งความเร็วของอากาศในบริเวณนี้มีค่าเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งถึงสอง Contour level เมื่ออัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าลดลง สำหรับบริเวณของการไหลที่มีความเร็วเป็นบวกในตอนกลางของห้องจะมีขนาดเล็กลง โดยรอยต่อระหว่างบริเวณที่มีความเร็วเป็นบวกและลบแสดงถึงบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดใหญ่ใกล้กับช่องเปิดด้านท้าย ดังจะเห็นได้จากแนวของเส้น Stream line

ที่มุมห้องด้านล่างซ้าย บริเวณของอากาศที่มีความเร็วเป็นลบมีขนาดขยายใหญ่ขึ้น ซึ่งแสดงถึงบริเวณของการไหลหมุนวนที่ขยายใหญ่ขึ้น และมีความรุนแรงมากขึ้นจนเห็นได้อย่างชัดเจนจากแนวของ Stream line ที่แสดงซ้อนไว้เมื่ออัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าน้อยกว่า 0.68

นอกจากนี้ที่มุมระหว่างเพดานกับผนังท้ายห้องยังมีบริเวณของการไหลหมุนวนอีกแห่ง ซึ่งสังเกตได้จากบริเวณที่การไหลมีความเร็วพุ่งขึ้น โดยบริเวณของการไหลหมุนวนนี้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่ออัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าลดลง แต่ยังไม่สามารถแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนจากแนวของ Stream line

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 0.30 – 0.08 ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วตามแนว Transverse เปลี่ยนแปลงไปจากการกระจายตัวของความเร็วที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 0.40 เล็กน้อยในบริเวณใกล้กับช่องเปิด โดยบริเวณของการไหลที่มีความเร็วสูงในทิศพุ่งลงจะเคลื่อนตัวต่ำลงตามผนังท้ายห้องที่ปิดลงมา และในบริเวณกลางห้องเกิดบริเวณเล็กๆ ของการไหล



ที่มีความเร็วสูงขึ้นอีกหนึ่ง Contour level ในทิศพุ่งขึ้น ซึ่งแสดงถึงความรุนแรงของการไหลหมุนวนที่เพิ่มขึ้น

สำหรับตำแหน่งของจุด Reattachment ที่เกิดขึ้นในช่วงการเปิดนี้ ไม่สามารถแสดงให้เห็นได้จาก Contour ของความเร็วตามแนว Transverse

รูปที่ 3.32 แสดงการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความดัน,  $C_p$  (เส้นประ) ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ โดยมีเส้น Stream line (เส้นทึบ) แสดงซ้อนทับ จากรูปพบว่า

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0 การไหลมีบริเวณของความดันสูงขนาดเล็กที่ปากของช่องทางเข้า และมีบริเวณของความดันต่ำขนาดเล็กอีกสองแห่งขนานข้าง ซึ่งแสดงถึงการดึงเอาอากาศรอบข้างเข้าไปผสมของเจ็ตที่พุ่งออกมาจากช่องทางเข้า ส่วนในบริเวณอื่นของห้องความดันภายในห้องจะมีค่าประมาณคงที่

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 0.96 – 0.84 เริ่มมีบริเวณของความดันสูง (Adverse pressure gradient) เกิดขึ้นที่มุมระหว่างเพดานกับผนังท้ายห้องที่ปิดลงมา และเมื่อพิจารณาแนว Stream line จะเห็นว่าตรงกับบริเวณที่ Stream line ของ Wall jet เริ่มเบนออกจากเพดาน ลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า Adverse pressure gradient จากผนังท้ายห้องทำให้เกิดแรงผลัก Wall jet ให้เบนตัวออกห่างจากเพดาน ซึ่งบริเวณของความดันสูงนี้จะมีขนาดขยายใหญ่ขึ้นไปทาง Upstream เมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง นอกจากนี้จะพบบริเวณของความดันต่ำขนาดใหญ่ปรากฏขึ้นใกล้กับช่องเปิดด้านท้าย ซึ่งแสดงถึงบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดใหญ่ใกล้กับช่องเปิดด้านท้าย ดังจะเห็นได้ชัดเจนจากแนวของ Stream line ที่แสดงซ้อนไว้

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 0.76 – 0.40 บริเวณของความดันสูงหน้าผนังท้ายห้องยังคงขยายขนาดใหญ่ขึ้นไปทาง Upstream และมีความดันสูงขึ้นเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง ลักษณะดังกล่าวทำให้ตำแหน่งที่ Wall jet เบนออกจากเพดานเลื่อนขึ้นไปทาง Upstream และโค้งตัวลงมาด้านล่างมากขึ้น สำหรับบริเวณของความดันต่ำใกล้กับช่องเปิดด้านท้ายจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อย และมีค่าลดลงอีกหนึ่ง Contour level นอกจากนี้ยังมีบริเวณของความดันสูงเหนือพื้นห้องติดกับช่องเปิดด้านท้าย และบริเวณของความดันต่ำใต้ขอบของผนังท้ายห้องที่ปิดลงมาเกิดขึ้นอีกด้วย

บริเวณของความดันสูงเหนือพื้นห้องนั้นจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความดันสูงขึ้นเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดเล็กลง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแนว Stream line และ Contour ของความเร็วตามแนว Stream wise (รูปที่ 3.30) จะเห็นว่าเป็นบริเวณที่เกิดการดึงเอาอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง ส่วนบริเวณของความดันต่ำใต้ขอบของผนังท้ายห้องนั้นจะตรงกับบริเวณที่อากาศมีความเร็วสูงขึ้นทั้งในแนว Stream wise (รูปที่ 3.30) และแนว Transverse (รูปที่ 3.31) ก่อนเคลื่อนที่ออกไปจากห้อง

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ  $0.30 - 0.08$  ลักษณะการกระจายตัวของความดันภายในห้องเปลี่ยนแปลงไปจากการกระจายตัวของความดันที่อัตราส่วนช่องเปิดเท่ากับ  $0.40$  เพียงเล็กน้อย โดยบริเวณของความดันสูงหน้าผนังท้ายห้องจะมีขนาดประมาณคงที่ และตำแหน่งที่เกิดค่าความดันสูงสุดจะอยู่บนผนังท้ายห้องที่ความสูงประมาณ  $60\%$  ของความสูงห้องคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิด ส่วนบริเวณของความดันต่ำใต้ขอบของผนังท้ายห้องจะเลื่อนลงมาใกล้พื้นห้องอย่างต่อเนื่องเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดเล็กลง (ผนังท้ายห้องปิดลงมากขึ้น) แล้วเบียดให้บริเวณของความดันสูงเหนือพื้นห้องเคลื่อนที่เข้ามาภายในห้อง โดยเมื่อพิจารณาร่วมกับแนว Stream line จะพบว่าบริเวณของความดันสูงที่อยู่ภายในห้องนี้จะตรงกับบริเวณที่เกิดจุด Reattachment ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ Wall jet พุ่งชนพื้น

นอกจากลักษณะการกระจายตัวของความดันที่กล่าวไปข้างต้นแล้ว ยังมีจุดที่น่าสนใจอีกสามแห่ง คือ (ดังแสดงในรูปที่ 3.33 โดยใช้การไหลที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ  $0.10$  เป็นตัวอย่าง)

- 1) ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ  $0.96 - 0.08$  จะพบว่าแนวของการเปลี่ยนแปลงความดันจากบริเวณของความดันสูงหน้าผนังท้ายห้องไปยังบริเวณของความดันต่ำกลางห้อง มีลักษณะตั้งฉากกับแนวของ Stream line ที่โค้งลงมายังพื้นห้อง ซึ่งแสดงว่าผลต่างของความดันเป็นแรงที่ผลักดันให้ Wall jet เบียดตัวโค้งออกจากเพดานลงมายังพื้น ในลักษณะเดียวกับแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง
- 2) ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ  $0.76 - 0.08$  จะพบลักษณะของกระเปาะความดันสูง (High pressure pocket) ยื่นออกมาจากบริเวณของความดันสูงหน้าผนังท้ายห้อง เมื่อพิจารณารวมกับแนวของ Stream line ที่แสดงซ้อนไว้จะพบว่าเป็นบริเวณที่อากาศจากการไหลหมุนวนเคลื่อนที่ขึ้นมาชนกับแนวของ Wall jet และเมื่อพิจารณาบริเวณของกระเปาะความดันสูงนี้บน Contour ของความเร็วตามแนว Stream wise และแนว Transverse (พิจารณารูป 3.33(ข) และ 3.33(ค) ประกอบ) จะพบว่าอากาศในบริเวณนี้เคลื่อนที่แยกออกจากกันตามแนว  $x$  และเคลื่อนที่เข้ามาชนกันตามแนว  $y$  ทำให้ในบริเวณนี้มีลักษณะเป็นจุด Stagnation point ดังนั้นมวลของอากาศที่จุดนี้จะหยุดนิ่งไม่เกิดการถ่ายเท
- 3) ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ  $0.60 - 0.08$  จะพบบริเวณของความดันต่ำที่บริเวณกลางห้อง กับใต้ขอบของผนังท้ายห้อง และบริเวณของความดันสูงหน้าผนังท้ายห้อง กับเหนือพื้นห้อง ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ตำแหน่งที่อยู่ตรงกลางระหว่างบริเวณของความดันต่ำและสูงทั้งสี่แห่งนี้มีลักษณะเป็นจุด Saddle point โดยเมื่อพิจารณาตามแนว Local minimum ที่จุดนี้จะมีค่าความดันต่ำที่สุด และเมื่อพิจารณาตามแนว Local maximum ที่



จุดนี้จะมีค่าความดันสูงที่สุด ดังนั้นลักษณะของการไหลในบริเวณนี้จึงมีแนวโน้มที่จะไม่เสถียร

โดยสรุปแล้วการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลภายในห้องที่เรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 100 ตามขนาดของช่องเปิดด้านท้าย สามารถแบ่งออกเป็นสามช่วงตามขนาดช่องเปิด ดังนี้

- 1) เมื่อช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ ( $t/H = 1.0$ ) การไหลภายในห้องจะมีลักษณะเป็น Wall jet ที่พุ่งเรียบเพดานจากช่องทางเข้าสู่ช่องเปิดด้านท้าย แล้วเหนี่ยวนำให้อากาศภายในห้องเคลื่อนที่ออกไปนอกห้องทางด้านบนของช่องเปิด และอากาศจากภายนอกห้องเคลื่อนที่เข้ามาภายในห้องทางด้านล่างทำให้เกิดบริเวณของการไหลหมุนวนแบบเปิด (Open-loop recirculation) ที่มีศูนย์กลางอยู่บนช่องเปิดด้านท้าย
- 2) เมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลงจนถึง 40% ของความสูงห้อง ( $t/H = 0.96 - 0.40$ ) ลักษณะการไหลภายในห้องจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างต่อเนื่อง โดยจะเกิดบริเวณความดันสูงหน้าผนังท้ายห้อง (Adverse pressure gradient) ซึ่งจะเบี่ยงเบน Wall jet ให้ออกห่างจากเพดานแล้วอ้อมข้ามผนังท้ายห้องที่ขวางการไหล ทำให้บริเวณของการไหลหมุนวนเคลื่อนตัวเข้ามาในห้องพร้อมกับลดระดับความสูงลง และศูนย์กลางของการหมุนวนจะเริ่มเปลี่ยนเป็นการไหลหมุนวนแบบปิด (Close-loop recirculation) ที่มีเฉพาะอากาศภายในห้องเท่านั้นที่เคลื่อนที่หมุนวน โดยบริเวณของการไหลหมุนวนแบบปิดจะขยายเป็นวงกว้างขึ้นเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดเล็กลง
- 3) เมื่อช่องเปิดด้านท้ายห้องมีขนาดน้อยกว่า 40% ของความสูงห้อง ( $t/H = 0.30 - 0.08$ ) ลักษณะการไหลภายในห้องจะไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดมากนัก เนื่องจาก Wall jet ที่พุ่งออกจากช่องทางเข้าแล้วเบนตัวออกจากเพดานจะชนกับผนังท้ายห้องแล้วสะท้อนลงมาชนกับพื้นห้องในลักษณะ Impinging jet ดังนั้นจึงมีอากาศจากเจ็ตส่วนหนึ่งพุ่งย้อนกลับเข้าไปในห้อง ทำให้บริเวณของการไหลหมุนวนมีลักษณะเป็นแบบปิดทั้งหมด และมีอากาศจากเจ็ตอีกส่วนหนึ่งพุ่งออกจากห้องผ่านช่องเปิดด้านท้าย โดยไม่มีการดึงเอาอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้อง

นอกจากนี้บริเวณของการไหลหมุนวนที่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนจากการกระจายตัวของ Stream line (รูป 3.29) จะมีจำนวนเพิ่มขึ้นเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง โดยที่อัตราส่วนช่องเปิดเท่ากับ 1.0 – 0.96 จะพบบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดใหญ่หนึ่งแห่งใกล้กับช่องทางออก ที่อัตราส่วนช่องเปิดเท่ากับ 0.92 – 0.40 จะพบบริเวณของการไหลหมุนวนแห่งที่สองในบริเวณมุมห้องด้านซ้ายล่าง และที่ช่องเปิดเท่ากับ 0.30 – 0.08 จะพบบริเวณของการไหลหมุนวนแห่งที่สามในบริเวณมุมระหว่างเพดานกับผนังท้ายห้อง

รูปที่ 3.34 แสดงรูปร่างของความเร็ว  $u$  ที่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.04, 0.36, 0.68, 0.96$  และ  $1.0$  จากรูปพบว่า

ที่ตำแหน่งใกล้กับช่องทางเข้า ( $x/L = 0.04$ ) การกระจายตัวของรูปร่างความเร็วสำหรับทุกขนาดช่องเปิดมีลักษณะเหมือนกันคือมีชั้นแคบๆ ของอากาศที่มีความเร็วสูงอยู่ใต้เพดาน ( $y/H = 0.8 - 1.0$ ) โดยมีความเร็วสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่ง  $y/H \sim 0.97$  ถัดลงมาอากาศมีความเร็วเป็นลบเล็กน้อย ส่วนในบริเวณด้านล่างของห้อง อากาศแทบจะไม่มีเคลื่อนที่ ลักษณะดังกล่าวแสดงถึงการไหลแบบ Wall jet ที่พุ่งออกจากช่องทางเข้าเรียบเพดาน แล้วเหนี่ยวนำให้อากาศที่อยู่ติดกันเคลื่อนที่ย้อนกลับเพื่อเข้าไปรวมกับ Wall jet ได้ช่องทางเข้า ในขณะที่ส่วนล่างของห้องนั้นแทบจะไม่ได้รับผลกระทบจากทั้ง Wall jet และผนังท้ายห้องที่ปิดลงมา

ที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.36$  ในกรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ รูปร่างความเร็วแสดงชั้นของ Wall jet ที่มีความกว้างเพิ่มขึ้นและความเร็วสูงสุดลดลง โดยตำแหน่งที่ Wall jet มีความเร็วสูงสุดจะเลื่อนห่างออกจากเพดานลงมาอยู่ที่  $y/H \sim 0.92$  ถัดจากชั้นของ Wall jet ลงมาจนถึงพื้นห้อง อากาศมีความเร็วเป็นลบ ซึ่งแสดงถึงการเคลื่อนที่ย้อนกลับไปทางด้าน Upstream ของอากาศใน ส่วนล่างของห้อง เมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง ชั้นของ Wall jet จะมีลักษณะเช่นเดียวกับในกรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ แต่การไหลในบริเวณที่อยู่ถัดจาก Wall jet ลงมาจะมีความเร็วเป็นลบเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนช่องเปิดมีขนาดน้อยกว่า 60% ของความสูงห้อง รูปร่างความเร็วในบริเวณนี้จึงไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิด

ที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.68$  รูปร่างการไหลบนหน้าตัดนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองบริเวณ บริเวณแรกเป็นบริเวณที่การไหลมีลักษณะเป็น Wall jet ใกล้กับเพดาน ( $0.7 < y/H < 1.0$ ) ที่บริเวณนี้ Wall jet จะเปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดเล็กน้อย โดยเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง ความเร็วสูงสุดของ Wall jet จะลดลง และตำแหน่งที่เกิดค่าความเร็วสูงสุดนี้จะต่ำลงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดน้อยกว่า 40% ของความสูงห้องรูปร่างความเร็วในบริเวณนี้จึงไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิด สำหรับบริเวณที่สองเป็นบริเวณของการไหลที่อยู่ใต้ Wall jet จนถึงพื้นห้อง ( $0.0 < y/H < 0.7$ ) ซึ่งรูปร่างความเร็วจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดอย่างมาก โดยเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดเท่ากับ 0.84 รูปร่างความเร็วในบริเวณนี้จะมีค่าลดลงอย่างเชิงเส้นตามความสูงห้องที่ลดลง จนถึงค่าต่ำสุด (ความเร็วย้อนกลับสูงสุด) ที่ความสูง  $y/H \sim 0.25$  และเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วต่อความสูงห้อง ( $\frac{\partial u}{\partial y}$ ) จะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่าความเร็วจะเปลี่ยนแปลงจากค่าบวกในบริเวณใต้ชั้น Wall jet ไปเป็นค่าลบในบริเวณ ใกล้กับพื้นห้องได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ความเร็วย้อนกลับสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ตำแหน่งที่เกิดค่าสูงสุดจะต่ำลง ลักษณะการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะเป็นไปอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งช่องเปิดมีขนาดน้อยกว่า 40% ของความสูงห้อง รูปร่างความเร็วจึงจะไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาด

ช่องเปิด และการที่รูปร่างความเร็วบนหน้าตัดนี้เปลี่ยนแปลงจากค่าบวกในบริเวณด้านบนไปเป็นค่าลบในบริเวณด้านล่าง แสดงถึงการหมุนวนที่เกิดขึ้นในบริเวณกลางห้อง

ที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.96$  รูปร่างการไหลบนหน้าตัดนี้จะได้รับผลกระทบจากผนังท้ายห้องอย่างมาก โดยเมื่อช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ การไหลจะมีลักษณะเป็น Wall jet ในบริเวณด้านบนใกล้เคียงกับเพดานและมีการไหลย้อนกลับของอากาศจากภายนอกเข้าไปในห้องในบริเวณด้านล่างของห้อง เมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง Wall jet จะเบนตัวออกจากเพดาน แล้วเบียดให้บริเวณของอากาศที่ไหลย้อนกลับเข้าไปในห้องลดระดับลงมาอยู่ใกล้กับพื้นห้อง ดังจะเห็นได้จากจุดที่มีความเร็วสูงสุดทั้งทางด้านบวก (Wall jet) และลบ (ความเร็วย้อนกลับ) เคลื่อนที่ต่ำลงตามขนาดช่องเปิดที่ลดลง และเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดน้อยกว่า 30% ของความสูงห้อง จะพบแต่บริเวณของ Wall jet ที่อยู่เรียบพื้น แต่ไม่พบบริเวณของการไหลย้อนกลับ ซึ่งเกิดจากผนังท้ายห้องที่ปิดลงมากจนทำให้ Wall jet ที่เบียดตัวออกจากเพดานพุ่งชนพื้นในลักษณะ Impinging jet แล้วไหลออกไปนอกห้อง โดยไม่มีอากาศจากภายนอกห้องไหลเข้ามาภายในห้อง

นอกจากนี้การกระจายตัวของรูปร่างความเร็วบนหน้าตัดนี้ยังมีจุดที่น่าสนใจอยู่อีกแห่ง คือในกรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดเท่ากับ 0.30 การไหลย้อนกลับที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากการไหลย้อนกลับในกรณีอื่นๆ เนื่องจากอากาศที่ไหลย้อนกลับเข้าไปในห้องในกรณีอื่นๆ จะเป็นอากาศจากภายนอกห้อง แต่สำหรับกรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 0.30 อากาศที่ไหลย้อนกลับจะเป็นอากาศจากเจ็ดเอง ดังจะเห็นได้จากการกระจายตัวของรูปร่างความเร็วบนช่องเปิดด้านท้าย ( $x/L = 1.0$ ) ซึ่งมีอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้องเมื่ออัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าตั้งแต่ 1.0 ถึง 0.40 แต่ที่อัตราส่วนช่องเปิดน้อยกว่า 0.40 จะมีแต่อากาศจากภายในห้องไหลออกไปนอกห้องเท่านั้น

จากผลการกระจายตัวของรูปร่างความเร็ว  $u$  ในรูปที่ 3.34 สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) รูปร่างความเร็ว  $u$  จะเปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่จนช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดประมาณ 40% ของความสูงห้อง หลังจากนั้นรูปร่างความเร็ว  $u$  จะเปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดไม่มากนัก
- 2) การไหลภายในห้องจะไม่มีการดึงเอาอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้องเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดน้อยกว่า 40% ของความสูงห้อง
- 3) รูปร่างความเร็ว  $u$  ในบริเวณครึ่งห้องทางด้าน Upstream ได้รับผลกระทบจากผนังท้ายห้องเล็กน้อย เนื่องจากอากาศที่ไหลย้อนกลับมาจากครึ่งห้องทางด้าน Downstream จะนำผลของผนังท้ายห้องไปยังครึ่งห้องทางด้าน Upstream ด้วย ซึ่งลักษณะเช่นนี้ไม่ปรากฏในการไหลที่  $Re = 1$  และ 10 ส่วนการไหลในบริเวณครึ่งห้องทางด้าน Downstream รูปร่างความเร็ว  $u$  จะได้รับอิทธิพลจากผนังด้านท้ายอย่างมาก

- 4) ที่ทุกอัตราส่วนช่องเปิด รูปร่างความเร็ว  $u$  ที่ทุกตำแหน่งตามแนว Downstream ไม่สอดคล้องกับรูปร่างความเร็วแบบพาราโบลาของการไหลที่พัฒนาตัวเต็มที่แล้ว (Fully developed profile) ซึ่งแสดงว่าการไหลที่  $Re = 100$  ไม่เกิดการพัฒนาตัวเข้าสู่สภาวะการไหลที่พัฒนาตัวเต็มที่ ทั้งนี้จะมีสาเหตุมาจากห้องที่ใช้ในการศึกษามีความยาวไม่มากพอ

รูปที่ 3.35 แสดงอัตราส่วนการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง ( $ER$ ) ที่ช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ จากรูปพบว่า  $ER$  จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายอย่างมาก โดยในกรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ Wall jet จะดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้องประมาณ 46% ของอัตราการไหลเชิงมวลที่ช่องทางเข้า แต่เมื่ออัตราส่วนช่องเปิดมีค่าลดลงเป็น 0.96  $ER$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 48% หลังจากนั้น  $ER$  จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่ออัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าลดลง จนกระทั่งไม่เกิดการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้องเมื่ออัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าน้อยกว่า 0.40

รูปที่ 3.36 แสดงระยะ Reattachment ที่ช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ สำหรับการไหลที่  $Re = 100$  จากรูปพบว่า ที่อัตราส่วนช่องเปิดตั้งแต่ 1.0 – 0.40 จะไม่เกิดการสัมผัสพื้นของเจ็ตจากช่องทางเข้า (Reattachment) เนื่องจากผนังท้ายห้องที่ปิดลงยังมีขนาดไม่สูงมากนัก เจ็ตจากช่องทางเข้าจึงสามารถวิ่งอ้อมผนังท้ายห้องออกไปนอกห้องได้ ส่วนที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าน้อยกว่า 0.40 ผนังท้ายห้องจะมีความสูงมากพอที่จะขวางเจ็ตไว้ทั้งหมด ทำให้เจ็ตจากช่องทางเข้าพุ่งชนกับผนังท้ายห้องแล้วสะท้อนลงมายังพื้นห้อง ซึ่งตำแหน่งที่เกิดการสัมผัสพื้นจะอยู่ใกล้กับช่องเปิดด้านท้าย ( $X_r/L \sim 0.98$ ) และจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่ออัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าลดลง โดยระยะ Reattachment จะเปลี่ยนแปลงไปเพียง 6.5% ของความยาวห้อง ในขณะที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าลดลงถึง 22%

รูปที่ 3.37 แสดงตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลักที่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้าย โดยรูป 3.37(ก) แสดงภาพรวมของตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลักที่ทุกขนาดช่องเปิด จากรูปพบว่า ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0 ศูนย์กลางของการไหลหมุนวนจะอยู่บนช่องเปิดด้านท้ายที่ระดับความสูงประมาณ 65% ของความสูงห้อง เมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง ศูนย์กลางของการไหลหมุนวนจะเคลื่อนที่เข้ามาภายในห้องพร้อมกับลดระดับลงอย่างต่อเนื่อง



เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลักที่ละแนวแกน พบว่า ศูนย์กลางของการไหลหมุนวนเคลื่อนที่เข้ามาภายในห้องอย่างรวดเร็วตามแนวแกน  $x$  ในช่วงแรกของการปิด ( $t/H = 1.0 - 0.84$ ) หลังจากนั้นการเคลื่อนที่จะมีลักษณะประมาดเชิงเส้นกับขนาดของช่องเปิดที่ลดลง ดังแสดงในรูป 3.37(ข) สำหรับการเคลื่อนที่ตามแนวแกน  $y$  พบว่าศูนย์กลางของการไหลหมุนวนจะลดระดับลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการปิด ( $t/H = 1.0 - 0.60$ ) เช่นกัน หลังจากนั้น ( $t/H = 0.40 - 0.08$ ) ระดับความสูงของศูนย์กลางการไหลหมุนวนจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ดังแสดงในรูป 3.37(ค)

นอกจากนี้เมื่อแบ่งพิจารณาการเคลื่อนที่ของตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวนตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายออกเป็นสามช่วงเช่นเดียวกับผลจาก Stream line contour จะพบว่า ที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ ( $t/H = 1.0$ ) ศูนย์กลางของการไหลหมุนวนจะอยู่บนช่องเปิดด้านท้าย และเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลงจนถึง 40% ของความสูงห้อง ( $t/H = 0.96 - 0.40$ ) ศูนย์กลางของการไหลหมุนวนจะเคลื่อนที่เข้ามาในห้องพร้อมกับลดระดับลงอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในช่วงต้นที่ช่องเปิดมีขนาดลดลง ( $t/H = 0.96 - 0.84$ ) และเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดน้อยกว่า 40% ของความสูงห้อง ศูนย์กลางของการไหลหมุนวนจะเปลี่ยนแปลงเฉพาะในแนวระดับเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

จากการศึกษาผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อรูปแบบการไหลภายในห้องที่  $Re = 100$  สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) รูปแบบการไหลภายในห้องจะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อช่องเปิดด้านท้ายอยู่ในช่วงเปิดเต็มที่จนถึงเปิด 40% ของความสูงห้อง แต่รูปแบบการไหลภายในห้องจะเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดน้อยกว่า 40% ของความสูงห้อง ทั้งนี้เป็นเพราะที่ช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดมากกว่า 40% ของความสูงห้อง Wall jet ที่เบนตัวออกจากเพดานสามารถอ้อมข้ามผนังท้ายห้องออกไปนอกห้อง แล้วดึงเอาอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้อง (รูปที่ 3.35) ทำให้ภาพรวมของการไหลหมุนวนที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นการไหลหมุนวนแบบเปิด (Open-loop recirculation) รูปแบบการไหลจึงเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดน้อยกว่า 40% ของความสูงห้อง Wall jet ที่เบนตัวออกจากเพดานไม่สามารถอ้อมข้ามผนังท้ายห้องที่ปิดลงมาได้ แต่จะพุ่งชนกับผนังท้ายห้องแล้วสะท้อนลงมายังพื้นห้อง ทำให้เกิดจุด Reattachment ขึ้นภายในห้อง และไม่เกิดการดึงอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้อง (รูปที่ 3.35) ทำให้ภาพรวมของการไหลหมุนวนมีลักษณะเป็นการไหลหมุนวนแบบปิดทั้งหมด (Close-loop recirculation) รูปแบบการไหลภายในห้องจึงค่อนข้างคงตัวไม่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดช่องเปิดด้านท้าย

- 2) การไหลที่  $Re = 100$  มีอากาศจากภายนอกห้องไหลย้อนกลับเข้ามาภายในห้อง ต่างจากการไหลที่  $Re = 1$  และ 10 ซึ่งมวลของอากาศที่ถูกดึงเข้ามาในห้องจะขึ้นกับขนาดของช่องเปิดด้านท้าย โดยสามารถดึงอากาศเข้ามาได้มากที่สุดถึง 48% ของการไหลเชิงมวลที่ช่องทางเข้าที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 0.96 และไม่มีการดึงเอาอากาศเข้ามาภายในห้องเมื่อช่องเปิดมีขนาดน้อยกว่า 40% ของความสูงห้อง หรือเมื่อเกิดจุด Reattachment ภายในห้อง
- 3) ศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลักอยู่ในบริเวณครึ่งห้องทาง Downstream ที่ทุกขนาดช่องเปิดด้านท้าย โดยจะเคลื่อนตัวจากบนช่องเปิดด้านท้ายเข้ามาภายในห้องพร้อมกับลดระดับลงอย่างรวดเร็ว เมื่อช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่จนถึงเปิดประมาณ 40% ของความสูงห้อง และเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดน้อยกว่า 40% ของความสูงห้องแล้ว ศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลักจะเคลื่อนที่ในแนวระดับเข้ามาในห้องอีกเพียงเล็กน้อย

### 3.2.2 ผลของเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Effects of Reynolds number)

รูปที่ 3.38 แสดงผลของเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่อรูปแบบการไหลภายในห้องโดยแสดงอยู่ในรูปของ Stream line ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0, 0.60 และ 0.08 จากรูปพบว่า

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0 การไหลที่  $Re = 1$  เจ็ตจากช่องทางเข้าจะกระจายตัวจนเต็มหน้าตัดห้องอย่างรวดเร็วในช่วงครึ่งห้องทาง Upstream หลังจากนั้นจะไหลตรงไปยังช่องเปิดด้านท้าย สำหรับการไหลที่  $Re = 10$  เจ็ตจากช่องทางเข้าจะพุ่งตัวไปข้างหน้าได้ไกลกว่าการไหลที่  $Re = 1$  พร้อมกับเหนี่ยวนำให้เกิดบริเวณของการไหลหมุนวนแบบปิด (Close-loop recirculation) ขนาดใหญ่ที่มุมห้องด้านล่างซ้ายใต้ช่องทางเข้า หลังจากนั้นเจ็ตจะกระจายตัวออกจนเต็มหน้าตัดห้องแล้วไหลตรงไปยังช่องเปิดด้านท้าย ส่วนการไหลที่  $Re = 100$  เจ็ตจากช่องทางเข้าจะพุ่งตรงไปยังช่องเปิดด้านท้ายแล้วดึงเอาอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง ทำให้เกิดบริเวณของการไหลหมุนวนแบบเปิด (Open-loop recirculation) ขนาดใหญ่ทั่วทั้งห้อง

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 0.60 รูปแบบการไหลที่  $Re = 1$  เปลี่ยนแปลงไปจากรูปแบบการไหลในกรณีที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0 เล็กน้อยในบริเวณใกล้กับผนังท้ายห้อง โดยอากาศที่ไหลมาเต็มหน้าตัดห้องจะเคลื่อนตัวลงมาด้านล่างเพื่อลอดใต้ผนังท้ายห้องออกไปนอกห้อง สำหรับการไหลที่  $Re = 10$  เจ็ตที่มีโมเมนตัมมากขึ้นจะเหนี่ยวนำให้เกิดบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดใหญ่ใต้ช่องทางเข้าในบริเวณครึ่งห้องทาง Upstream เช่นเดียวกับในกรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ ส่วนในบริเวณครึ่งห้องทาง Downstream อากาศที่ไหลมาเต็มหน้าตัดห้องจะเคลื่อนตัวลงมาด้านล่างเพื่อลอดใต้ผนังท้ายห้องออกไปนอกห้องในลักษณะเดียวกับการไหลที่  $Re = 1$  และเมื่อการไหลมี  $Re = 100$  รูปแบบการไหลจะแตกต่างจากทั้งสองเรย์โนลด์นัม



เบอร์อย่างชัดเจน โดยเจ็ทที่วิ่งเรียบเพดานจะโค้งอ้อมผนังท้ายห้องออกไปนอกห้องแล้วดึงอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้อง ทำให้เกิดบริเวณของการไหลหมุนวนแบบเปิดขนาดใหญ่ใกล้กับช่องเปิดด้านท้าย ในขณะที่เดียวกันอากาศจากภายนอกห้องที่ถูกดึงเข้ามาในห้องทางด้านล่างของช่องเปิดจะเหนี่ยวนำให้เกิดบริเวณของการไหลหมุนวนแบบปิดที่มุมห้องด้านล่างซ้าย

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 0.08 รูปแบบการไหลที่  $Re = 1$  ในบริเวณครึ่งห้องทาง Upstream ไม่แตกต่างไปจากในกรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0 และ 0.60 ส่วนในบริเวณครึ่งห้องทาง Downstream อากาศที่ไหลมาเต็มหน้าตัดจะเคลื่อนตัวลงมาด้านล่างมากขึ้นเพื่อไหลผ่านช่องเปิดด้านท้ายที่มีขนาดลดลง สำหรับรูปแบบการไหลที่  $Re = 10$  ในบริเวณครึ่งห้องทาง Upstream มีลักษณะเช่นเดียวกับในกรณีที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าเท่ากับ 1.0 และ 0.60 ส่วนในบริเวณครึ่งห้องทาง Downstream อากาศที่ไหลมาเต็มหน้าตัดจะเคลื่อนตัวลงมาด้านล่างมากขึ้นเพื่อไหลผ่านช่องเปิดด้านท้ายที่มีขนาดลดลง เช่นเดียวกับในกรณีที่  $Re = 1$  และเมื่อการไหลมี  $Re = 100$  รูปแบบการไหลยังคงแตกต่างจากการไหลที่  $Re = 1$  และ 10 อย่างชัดเจน โดย Stream line จะแสดงให้เห็นบริเวณของการไหลหมุนวนแบบปิดสามแห่งที่มุมระหว่างเพดานกับผนังท้ายห้อง, บริเวณกลางห้องใกล้ช่องเปิดด้านท้าย และบริเวณมุมห้องด้านล่างซ้าย นอกจากนี้รูปแบบการไหลยังแตกต่างจากในกรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายมีค่าเท่ากับ 1.0 และ 0.60 เนื่องจากเกิดการพุ่งชนพื้นของเจ็ทที่เบี่ยงตัวออกจากเพดาน และมีจุด Reattachment เกิดขึ้นภายในห้องทำให้ไม่มีอากาศจากภายนอกห้องไหลย้อนกลับเข้ามาภายในห้อง

จากรูป 3.38 สามารถสรุปผลของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่อรูปแบบการไหลได้ดังนี้

- 1) ในช่วงเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่ำ ( $Re = 1$  และ 10) รูปแบบการไหลในบริเวณครึ่งห้องทาง Upstream จะเปลี่ยนแปลงตามค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ โดยไม่ขึ้นกับขนาดของช่องเปิดด้านท้าย ส่วนรูปแบบการไหลในบริเวณครึ่งห้องทาง Downstream จะเปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้าย โดยไม่ขึ้นกับค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์
- 2) สำหรับการไหลที่  $Re = 100$  รูปแบบการไหลภายในห้องจะแตกต่างจากทั้งสองเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์อย่างชัดเจน และเปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายอย่างมาก ซึ่งจะเห็นได้จากการเกิดบริเวณของการไหลหมุนวนทั้งแบบเปิดและแบบปิด, การดึงเอาอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้อง และการเกิดจุด Reattachment ขึ้นภายในห้อง ดังที่ได้แสดงไว้ในส่วนผลการไหลภายในห้องที่  $Re = 100$
- 3) สำหรับการไหลที่  $Re = 1$  และ 10 เจ็ทจากช่องทางเข้าเป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิดบริเวณของการไหลหมุนวนแบบปิดที่มุมห้องด้านล่างซ้าย โดยหมุนวนทิศตามเข็มนาฬิกา แต่สำหรับการไหลที่  $Re = 100$  อากาศจากภายนอกห้องที่ถูกดึง (Entrain) เข้ามาในห้องเป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิดบริเวณของการไหลหมุนวนแบบปิดที่มุมล่างซ้าย โดยหมุนวนทิศทวนเข็มนาฬิกา ตรงข้ามกับการไหลที่  $Re = 1$  และ 10

รูปที่ 3.39 แสดงผลของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่อการกระจายรูปร่างความเร็ว  $u$  ที่ช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ จากรูปพบว่า

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0 รูปร่างความเร็วของการไหลที่  $Re = 1$  จะกระจายตัวออกอย่างรวดเร็ว จากรูปร่างความเร็วที่มีลักษณะเป็นเจ็ตที่อยู่ใต้เพดานบนหน้าตัด  $x/L = 0.04$  เปลี่ยนไปเป็นรูปพาราโบลาเหมือนกับกรไหลในช่องทางการไหลบนหน้าตัด  $x/L = 0.36$  หลังจากนั้นการไหลก็จะปรับตัวเข้าสู่สถานะที่พัฒนาตัวเต็มที่ ส่วนการไหลที่  $Re = 10$  เจ็ตจากช่องทางเข้าจะกระจายตัวออกช้ากว่า ดังจะเห็นได้จากรูปร่างความเร็วบนหน้าตัด  $x/L = 0.36$  ซึ่งค่าความเร็วสูงสุด และตำแหน่งที่เกิดความเร็วสูงสุดมีค่ามากกว่าและอยู่สูงกว่าการไหลที่  $Re = 1$  หลังจากนั้นรูปร่างความเร็วจะมีลักษณะเป็นรูปพาราโบลาเหมือนกับกรไหลที่  $Re = 1$  บนหน้าตัด  $x/L = 0.68$  และ  $0.96$  สำหรับการไหลที่  $Re = 100$  มีลักษณะที่แตกต่างจากทั้งสองเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์อย่างชัดเจน โดยเจ็ตจากช่องทางเข้าจะมีลักษณะเป็น Wall jet ที่กระจายตัวออกอย่างต่อเนื่อง และเคลื่อนที่เรียบเพดานไปจนถึงช่องเปิดด้านท้าย พร้อมกับดึงเอาอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้องซึ่งจะเห็นได้จากความเร็วที่มีค่าเป็นลบในส่วนล่างของห้องบนทุกหน้าตัด

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ  $0.92 - 0.40$  การไหลที่  $Re = 1$  และ  $10$  ยังคงมีลักษณะเหมือนกับที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0 คือ การไหลที่  $Re = 1$  จะกระจายตัวออกได้เร็วกว่าการไหลที่  $Re = 10$  ในบริเวณครึ่งห้องทาง Upstream ส่วนในบริเวณครึ่งห้องทางด้าน Downstream การไหลทั้งสองเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์จะมีการกระจายรูปร่างความเร็วเหมือนกัน โดยเฉพาะบนหน้าตัด  $x/L = 0.96$  ซึ่งอยู่ใกล้กับผนังท้ายห้อง จะมีบริเวณที่การไหลมีความเร็วประมาณศูนย์อยู่ใต้เพดานเป็นบริเวณกว้างตามขนาดของผนังท้ายห้องที่ปิดลงมา และความเร็วสูงสุดบนหน้าตัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นพร้อมกับเลื่อนตำแหน่งต่ำลงมาใกล้พื้นมากขึ้นตามขนาดช่องเปิดที่ลดลง สำหรับการไหลที่  $Re = 100$  รูปร่างความเร็วยังคงมีลักษณะที่ต่างจากทั้งสองเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์อย่างชัดเจน โดยเฉพาะบริเวณครึ่งห้องทางด้าน Downstream ที่รูปร่างความเร็วมีค่าสูงสุดเกิดขึ้นทั้งทางด้านบวกและลบ ซึ่งแสดงถึงการไหลย้อนกลับของอากาศจากภายนอกห้อง

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ  $0.20 - 0.08$  การไหลที่  $Re = 1$  และ  $10$  มีลักษณะเหมือนกับกรไหลที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0 ในบริเวณครึ่งห้องทาง Upstream ส่วนในบริเวณครึ่งห้องทางด้าน Downstream รูปร่างความเร็วของทั้งสองเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์แตกต่างกันเล็กน้อยบนหน้าตัด  $x/L = 0.96$  โดยความเร็วสูงสุดบนหน้าตัดจะมีค่าลดลงเมื่อเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับการไหลที่  $Re = 100$  ยังคงมีลักษณะต่างจากทั้งสองเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์อย่างชัดเจน แม้ว่าที่ขนาดช่องเปิดนี้จะไม่เกิดการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้องแล้วก็ตาม

โดยสรุปแล้วรูปร่างความเร็ว  $u$  ของการไหลที่  $Re = 1$  และ 10 มีความแตกต่างกันในบริเวณครึ่งห้องทาง Upstream โดยในกรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ เจ็ตจากช่องทางเข้าที่ทั้งสองเรย์โนลด์์นัมเบอร์จะสลายตัวแล้วกระจายความเร็ว  $u$  ให้กับอากาศภายในห้องอย่างรวดเร็วจนรูปร่างความเร็วมีลักษณะเป็นรูปพาราโบลาในบริเวณ Downstream ซึ่งเจ็ตของการไหลที่  $Re = 1$  จะสลายตัวได้เร็วกว่าเจ็ตของการไหลที่  $Re = 10$  และเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง รูปร่างความเร็วในบริเวณครึ่งห้องทาง Upstream ของทั้งสองเรย์โนลด์์นัมเบอร์จะไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้าย แต่ในบริเวณครึ่งห้องทาง Downstream รูปร่างความเร็วของทั้งสองเรย์โนลด์์นัมเบอร์มีลักษณะเหมือนกัน โดยจะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในบริเวณใกล้กับผนังท้ายห้อง

สำหรับการไหลที่  $Re = 100$  รูปร่างความเร็ว  $u$  จะมีลักษณะเป็น Wall jet ที่วิ่งเรียบเพดานจากช่องทางเข้าไปสู่ช่องเปิดด้านท้ายแล้วดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้องในกรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ เมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลงจนถึง 40% ของความสูงห้อง จะเกิดการไหลหมุนวนขึ้นในบริเวณครึ่งห้องทาง Downstream โดยยังคงมีการดึงอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้อง และเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดน้อยกว่า 40% ของความสูงห้อง การไหลหมุนวนยังคงเกิดขึ้นในบริเวณครึ่งห้องทาง Downstream แต่ไม่มีการดึงอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้องแล้ว ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้ไม่สามารถพบได้ในการไหลที่  $Re = 1$  และ 10 จึงทำให้การไหลที่  $Re = 100$  มีคุณลักษณะแตกต่างจากการไหลทั้งสองเรย์โนลด์์นัมเบอร์อย่างมาก

รูปที่ 3.40 แสดงผลของเรย์โนลด์์นัมเบอร์ต่ออัตราส่วนการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง (Entrainment ratio) จากรูปพบว่า การไหลที่  $Re = 1$  และ 10 ไม่มีการดึงเอาอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้องที่ทุกขนาดช่องเปิด ส่วนการไหลที่  $Re = 100$  นั้นจะดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้องในช่วงที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่จนถึงเปิดประมาณ 40% ของความสูงห้อง โดยอัตราส่วนการดึงอากาศเข้าจะแปรผันตามขนาดของช่องเปิดด้านท้าย แต่เมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดน้อยกว่า 40% ของความสูงห้องจะไม่มีมีการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง

รูปที่ 3.41 แสดงผลของเรย์โนลด์์นัมเบอร์ต่อระยะ Reattachment ที่ช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ จากรูปพบว่า การไหลที่  $Re = 1$  และ 10 มีระยะ Reattachment คงที่ที่ทุกขนาดช่องเปิด โดยมีขนาดเท่ากับ 7.43% และ 38% ของความยาวห้องตามลำดับ แต่สำหรับการไหลที่  $Re = 100$  จะเกิดจุด Reattachment ขึ้นเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดน้อยกว่า 40% ของความสูงห้อง ซึ่งผนังท้ายห้องมีความสูงมากพอที่จะเปลี่ยนทิศทางของเจ็ตให้พุ่งลงมายังพื้นห้อง โดยระยะ Reattachment จะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง

โดยสรุปแล้วการสัมผัสพื้นของเจ็ตจากช่องทางเข้าสำหรับการไหลที่  $Re = 1$  และ 10 เกิดขึ้นในบริเวณครึ่งช่องทาง Upstream ซึ่งเป็นบริเวณที่แทบจะไม่ได้รับอิทธิพลของผนังท้ายห้องที่ปิดลงมา ดังนั้นระยะ Reattachment จึงไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดเท่าใดนัก แต่สำหรับการไหลที่  $Re = 100$  การสัมผัสพื้นของเจ็ตเกิดขึ้นในบริเวณครึ่งช่องทาง Downstream ใกล้กับผนังท้ายห้อง ดังนั้นระยะ Reattachment ที่เกิดขึ้นจึงเปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิด

รูปที่ 3.42 แสดงภาพรวมของตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลักสำหรับการไหลทั้งสามเรย์โนลด์นัมเบอร์ จากรูปพบว่า ศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลักของการไหลที่  $Re = 1$  และ 10 แทบจะไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้าย โดยอยู่ในบริเวณครึ่งช่องทาง Upstream แต่สำหรับการไหลที่  $Re = 100$  ศูนย์กลางของการไหลหมุนวนจะเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามขนาดช่องเปิดด้านท้าย โดยจะเคลื่อนที่เข้ามาภายในห้องพร้อมกับลดระดับความสูงลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการปิด ( $t/H = 1.0 - 0.40$ ) หลังจากนั้นศูนย์กลางของการไหลหมุนวนจะเลื่อนเข้ามาภายในห้องในแนวระดับอีกเพียงเล็กน้อย ซึ่งที่ทุกขนาดของช่องเปิดด้านท้าย ศูนย์กลางของการไหลหมุนวนจะอยู่ในบริเวณครึ่งช่องทางด้าน Downstream ทั้งหมด

#### งบดุลของสมการการถ่ายเทโมเมนตัมตามแนวแกน $x$ (Budget of $x$ Momentum transport equation)

จากผลของเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่อคุณลักษณะการไหลภายในห้องที่ช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ แสดงให้เห็นว่าการไหลที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างกันจะมีสถานะของการไหลที่ต่างกัน ซึ่งสถานะของการไหลนั้นสามารถพิจารณาได้จากความสำคัญของกลไกการถ่ายเทโมเมนตัม

ในการพิจารณาสถานะของการไหลนั้น สามารถพิจารณาได้จาก สมดุลของเทอมต่างๆ ในสมการการถ่ายเทโมเมนตัมตามแนวแกน  $x$  ซึ่งเป็นทิศทางหลักของการไหล ดังสมการ 3.5

$$\underbrace{\frac{\partial \rho u u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v u}{\partial y}}_{\text{Convection term}} = - \underbrace{\frac{\partial P}{\partial x}}_{\text{Pressure gradient term}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right)}_{\text{Diffusion term}} \quad (3.5)$$



รูปที่ 3.43 แสดงบดูลของสมการการถ่ายเทโมเมนตัมตามแนวแกน  $x$  ที่ระดับความสูง  $y/H = 0.5$  สำหรับการไหลทั้งสามเรย์โนลด์นัมเบอร์ ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0, 0.60 และ 0.08 โดย  $\phi$  แทนค่าปริมาณต่างๆ ในสมการการถ่ายเทโมเมนตัมตามแนวแกน  $x$  (สมการ 3.5) ต่อโมเมนตัมที่ช่องทางเข้า จากรูปพบว่า

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0 สำหรับการไหลที่  $Re = 1$  เทอมของการแพร่กระจาย (Diffusion term) มีค่ามากกว่าเทอมของการพา (Convection term) มาก และมีค่าประมาณเท่ากับเทอมของอัตราการเปลี่ยนแปลงความดัน (Pressure gradient term) ซึ่งแสดงว่าการไหลนี้มีกลไกการแพร่กระจายสำคัญกว่ากลไกการพา เมื่อการไหลมี  $Re = 10$  เทอมของการพาจะมีความสำคัญมากขึ้นใกล้เคียงกับเทอมของการแพร่กระจาย และเมื่อการไหลมี  $Re = 100$  เทอมของการพาจะมีความสำคัญมากกว่าเทอมของการแพร่กระจายเล็กน้อยดังแสดงในกรอบสี่เหลี่ยมซึ่งขยายสเกลให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 0.60 สำหรับการไหลที่  $Re = 1$  เทอมของการแพร่กระจายมีความสำคัญมากกว่าเทอมของการพามาก โดยมีค่าสมดุลกับเทอมของอัตราการเปลี่ยนแปลงความดัน เมื่อการไหลมีค่า  $Re = 10$  เทอมของการพาจะมีความสำคัญเพิ่มขึ้นจนใกล้เคียงกับเทอมของการแพร่กระจาย ซึ่งลักษณะการกระจายตัวของเทอมต่างๆ สำหรับทั้งสองเรย์โนลด์นัมเบอร์นี้ไม่แตกต่างไปจากในกรณีที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าเท่ากับ 1.0 เท่าใดนัก ยกเว้นในบริเวณท้ายห้องที่จะเปลี่ยนแปลงตามขนาดของผนังท้ายห้องที่ปิดลงมา และเมื่อการไหลมี  $Re = 100$  เทอมของการพาจะมีความสำคัญมากกว่าเทอมของการแพร่กระจายอย่างชัดเจน

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 0.08 จะมีลักษณะการกระจายตัวของเทอมต่างๆ คล้ายกับการไหลที่อัตราส่วนช่องเปิดเท่ากับ 0.60 ยกเว้นในบริเวณท้ายห้องที่จะแตกต่างไปเนื่องจากผนังท้ายห้องที่ปิดลงมามากขึ้น โดยการไหลที่  $Re = 1$  เทอมของการแพร่กระจายมีความสำคัญมากกว่าเทอมของการพาอย่างชัดเจน และสมดุลกับเทอมของอัตราการเปลี่ยนแปลงความดัน เมื่อการไหลมีค่า  $Re = 10$  เทอมของการพาเริ่มมีความสำคัญเพิ่มขึ้นมาประมาณเท่ากับเทอมของการแพร่กระจาย และที่การไหลมี  $Re = 100$  เทอมของการพามีความสำคัญมากกว่าเทอมของการแพร่กระจายอย่างมาก

จากบดูลของสมการการถ่ายเทโมเมนตัมตามแนวแกน  $x$  ในรูปที่ 3.43 สามารถสรุปได้ว่า ในกรณีเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำ ( $Re = 1$  และ 10) ที่อัตราส่วนช่องเปิดใดๆ การไหลอยู่ในสภาวะที่กลไกการแพร่กระจายมีความสำคัญต่อการไหล โดยที่กลไกการพาจะมีความสำคัญต่อการไหลเพิ่มมากขึ้นเมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีเรย์โนลด์นัมเบอร์สูง ( $Re = 100$ ) การไหลอยู่ในสภาวะที่กลไกการพามีความสำคัญต่อการไหล โดยความสำคัญของกลไกการพาจะแสดงให้เห็นชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง

อย่างไรก็ตามสถานะของการไหลนั้นขึ้นอยู่กับบริเวณของห้อง และสมการการถ่ายเทโมเมนตัมที่เลือกมาพิจารณาด้วย ซึ่งในรูปที่ 3.43 นั้น พิจารณาสถานะของการไหลภายในห้องจากบริเวณกลางห้อง และสมการการถ่ายเทโมเมนตัมตามแนวแกน  $x$  เท่านั้น ซึ่งถ้าพิจารณาสถานะการไหลอย่างละเอียดแล้วในบางบริเวณของการไหลที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ 100 ก็จะอยู่ในสถานะที่กลไกการแพร่กระจายมีความสำคัญต่อการไหล เช่น ในบริเวณ Boundary layer ที่อยู่ติดผนัง ดังนั้นข้อสรุปข้างต้นจึงเป็นข้อสรุปจากภาพรวมของการไหลภายในห้อง

จากการศึกษาผลของเรย์โนลด์์นัมเบอร์ต่อลักษณะการไหลที่ช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) สถานะของการไหลทั้งสามเรย์โนลด์์นัมเบอร์สามารถพิจารณาได้เป็น 2 กรณี โดย
  - ในกรณีเรย์โนลด์์นัมเบอร์ต่ำ ( $Re = 1$  และ  $10$ ) กลไกการแพร่กระจายมีความสำคัญต่อการไหล (Diffusion dominated) ที่ทุกอัตราส่วนช่องเปิดด้านท้าย โดยกลไกการพาจะมีบทบาทต่อการไหลเพิ่มขึ้นเมื่อเรย์โนลด์์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น
  - ในกรณีเรย์โนลด์์นัมเบอร์สูง ( $Re = 100$ ) กลไกการพามีความสำคัญต่อการไหล (Convection dominated) ซึ่งบทบาทของกลไกการพาจะแสดงให้เห็นชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง
- 2) ในกรณีเรย์โนลด์์นัมเบอร์ต่ำ ( $Re = 1$  และ  $10$ ) เรย์โนลด์์นัมเบอร์จะมีผลต่อคุณลักษณะการไหลเฉพาะในบริเวณครึ่งห้องทาง Upstream ในขณะที่ขนาดของช่องเปิดด้านท้ายจะมีผลต่อคุณลักษณะการไหลเฉพาะในบริเวณครึ่งห้องทาง Downstream
- 3) ในกรณีเรย์โนลด์์นัมเบอร์สูง ( $Re = 100$ ) ทั้งเรย์โนลด์์นัมเบอร์และขนาดของช่องเปิดด้านท้ายจะมีผลต่อคุณลักษณะการไหลตลอดทั้งห้อง



## บทที่ 4

### อภิปรายผลการคำนวณ

จากการศึกษารูปแบบการไหลภายในห้องที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ 100 ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถนำผลการศึกษามาขยายความรู้ และความเข้าใจเพิ่มเติมเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของการไหลภายในห้องเสริมจากงานของ Stitsuwongkul and Bunyajitradulya (2000) และ Stitsuwongkul (2000) ในย่านความเร็วต่ำ โดยการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ 100 ของการศึกษานี้ และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ในงานของ Stitsuwongkul and Bunyajitradulya (2000) และ Stitsuwongkul (2000) ต่างก็เป็นการไหลที่กลไกการพามีความสำคัญต่อการไหล (Convection dominated) เช่นเดียวกัน โดยมีประเด็นสำคัญ 2 ประเด็น ดังนี้

#### ๘ ในงานวิจัยของ Stitsuwongkul and Bunyajitradulya (2000) และ Stitsuwongkul (2000) คืออะไร

จากงานวิจัยของ Stitsuwongkul and Bunyajitradulya (2000) และ Stitsuwongkul (2000) ในส่วนที่เกี่ยวกับผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับการไหลที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ 1,000 ( $U_{in} = 0.5$  m/s) และ 8,800 ( $U_{in} = 4.4$  m/s) พบว่า

ในกรณีความเร็วสูง ( $Re = 8,800$ ) การกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งในบริเวณครึ่งห้องทางด้านบนและบริเวณครึ่งห้องทางด้านล่างจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้าย ในช่วงที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่จนถึงกรณีที่ผนังท้ายห้องปิดลงมาไม่เกิน  $\delta$  ( $\sim 0.24H$ ) เมื่อ  $\delta$  คือความหนาของ Wall jet บนช่องเปิดในกรณีที่ผนังท้ายห้องเปิดเต็มที่ แต่การกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้าย เมื่อผนังท้ายห้องปิดลงมามากกว่า  $\delta$  ซึ่ง Stitsuwongkul (2000) อธิบายลักษณะการไหลในช่วงที่ผนังท้ายห้องปิดลงมามากกว่า  $\delta$  ไว้ว่า Wall jet ที่พุ่งออกมาจากช่องทางเข้าจะมีโมเมนตัมมากพอที่จะวิ่งเรียบเพดานไปปะทะกับผนังท้ายห้องที่ปิดลงมามากกว่าหรือเท่ากับ  $\delta$  และแรงปะทะจะมากพอที่จะหักเหทิศทางการไหลของ Wall jet ให้พุ่งลงมาด้านล่างปะทะกับพื้นห้องในลักษณะ Impinging jet ซึ่งจะทำให้เจ็ตบางส่วนไหลออกไปนอกห้องที่บริเวณช่องระบายอากาศออก และมีเจ็ตบางส่วนไหลย้อนกับเข้าไปในห้องทำให้เกิดการไหลหมุนวนขึ้นภายในห้อง

ในกรณีความเร็วต่ำ ( $Re = 1,000$ ) การกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยในบริเวณครึ่งห้องทางด้านบน มีลักษณะเช่นเดียวกับในกรณีความเร็วสูง คือ การกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยจะ

เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้าย ในช่วงที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่จนถึงกรณีที่ผนังท้ายห้องปิดลงมาไม่เกิน  $\delta$  ( $\sim 0.16H$ ) แต่การกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยในบริเวณครึ่งห้องทางด้านบนจะไม่ขึ้นกับขนาดช่องเปิดด้านท้าย เมื่อผนังท้ายห้องปิดลงมามากกว่า  $\delta$  ส่วนในบริเวณครึ่งห้องทางด้านล่าง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยจะมีลักษณะแปรผกผันแบบเชิงเส้นกับขนาดช่องเปิดในช่วงการเปิด – ปิดช่วงกลางประมาณ 60% ของการเปิดเต็มที่และปิดเต็มที่ถึงแม้ว่าผนังท้ายห้องจะปิดลงมามากกว่า  $\delta$  แล้วก็ตาม ซึ่ง Stitsuwongkul (2000) อธิบายลักษณะการไหลในช่วงนี้ไว้ว่า Wall jet จากช่องทางเข้ามีโมเมนตัมน้อย ดังนั้นจึงถูก Adverse pressure gradient ที่เกิดจากการปิดผนังท้ายห้องเบี่ยงเบนทิศทางการไหลให้โค้งลงมาด้านล่างทำให้เจ็ทของอากาศสามารถลอดใต้ผนังท้ายห้องออกไปนอกห้องได้ ดังนั้นการกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องจึงยังคงเปลี่ยนแปลงแม้ว่าผนังท้ายห้องจะปิดลงมามากกว่า  $\delta$  แล้วก็ตาม

เมื่อพิจารณาผลจากงานวิจัยของ Stitsuwongkul and Bunyajitradulya (2000) และ Stitsuwongkul (2000) แล้วจะพบว่า การศึกษาผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องในการไหลแบบปั่นป่วนที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 8,800 นั้นมีความสัมพันธ์กับ การศึกษาผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อรูปแบบการไหลภายในห้องในการไหลแบบราบเรียบที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 100 ในวิทยานิพนธ์นี้ โดยรูปแบบการไหล และการกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายเฉพาะในช่วงที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่จนถึงกรณีที่ผนังท้ายห้องปิดลงมาไม่เกินคุณลักษณะความสูงของผนังท้ายห้อง (End-wall closing characteristic height,  $\delta_c$ ) แต่เมื่อผนังท้ายห้องปิดลงมามากกว่า  $\delta_c$  แล้วทั้งการกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยและรูปแบบการไหลภายในห้องแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้าย โดยที่  $\delta_c$  ของการไหลที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 8,800 มีค่าประมาณเท่ากับ  $\delta$  ( $\sim 0.16H$ ) ส่วน  $\delta_c$  ของการไหลที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 100 นั้นจะกล่าวถึงต่อไป

จากความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกันของผลการศึกษาทั้งสองเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ทำให้เกิดคำถามสำคัญขึ้นว่า

$\delta_c$  คืออะไร ? และมีความสัมพันธ์กับลักษณะทางกายภาพอย่างไร ?  
หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง

$\delta_c$  ควรจะมีนิยาม และมีความสัมพันธ์ทางกายภาพกับรูปแบบการไหลอย่างไร เพื่อให้สอดคล้องกับปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยและรูปแบบการไหลที่ขึ้นอยู่กับขนาดของช่องเปิดด้านท้าย ทั้งในกรณีการไหลแบบปั่นป่วนในงานของ Stitsuwongkul and Bunyajitradulya (2000) และ Stitsuwongkul (2000) และในกรณีการไหลแบบราบเรียบในวิทยานิพนธ์นี้ ?

ในการที่จะตอบคำถามข้างต้นนั้น ได้พิจารณาการศึกษาผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อรูปแบบการไหลภายในห้องที่เรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 100 ในวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า

รูปแบบการไหลภายในห้องจะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในช่วงที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่จนถึงกรณีที่เปิดประมาณ 40% ของความสูงห้อง (หรือผนังท้ายห้องปิดลงมาประมาณ 60% ของความสูงห้อง) แต่เมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดน้อยกว่า 40% ของความสูงห้องแล้ว รูปแบบการไหลภายในห้องแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้าย ซึ่งผลในส่วนนี้แสดงในเห็นค่า  $\delta_c$  ของการไหลที่เรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 100 มีค่าประมาณ 60% ของความสูงห้อง ( $\delta_c \sim 0.60H$ )

เมื่อพิจารณาอย่างละเอียดถึงการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลดังกล่าว พบว่าเกิดขึ้นเนื่องจาก Wall jet จากช่องทางเข้ามีโมเมนตัมน้อยทำให้เมื่อวิ่งเรียบเพดานไปตามแนว Downstream แล้ว จะถูก Adverse pressure gradient ที่เกิดจากผนังท้ายห้องที่ปิดลงมาเบี่ยงเบนทิศทางการไหลได้ง่าย Wall jet จึงโค้งลงมาด้านล่างเพื่ออ้อมข้ามผนังท้ายห้องออกไปนอกห้อง แล้วเหนียวนำให้อากาศจากภายนอกห้องไหลย้อนกลับเข้ามาภายในห้อง (รูปที่ 3.29) แต่เมื่อผนังท้ายห้องปิดลงมามากกว่า  $\delta_c$  แล้ว ผนังท้ายห้องจะมีความสูงมากพอที่จะขวาง Wall jet ที่เบี่ยงตัวลงมาได้ทั้งหมด ทำให้ Wall jet วิ่งชนกับผนังท้ายห้องแล้วสะท้อนลงมายังพื้นห้องในลักษณะ Impinging jet ดังนั้นจึงเกิดจุด Reattachment ขึ้นภายในห้อง ซึ่งเจ็ตของอากาศที่จุด Reattachment นี้จะถูกแยกออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเคลื่อนที่ย้อนกลับเข้าไปในห้องทำให้เกิดบริเวณของการไหลหมุนวนแบบปิดขนาดใหญ่ใกล้กับช่องเปิดด้านท้าย ส่วนที่สองจะเคลื่อนที่ผ่านช่องเปิดด้านท้ายออกไปนอกห้อง โดยไม่มีการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง (รูปที่ 3.29) ซึ่งการที่ Wall jet วิ่งชนกับผนังท้ายห้องแล้วสะท้อนลงมายังพื้นห้องแบบ Impinging jet นี้สอดคล้องกับลักษณะการไหลที่เรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 8,800 ตามที่ Stitsuwongkul (2000) อธิบายไว้

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดจุด Reattachment และการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง ( $ER$ ) ในรูปที่ 3.35 และ 3.36 จะพบว่าเมื่อผนังท้ายห้องเปิดเต็มที่จนถึงกรณีที่ปิดลงมาประมาณ  $\delta_c$  ( $t/H = 1.0 - 0.40$ ) จะยังไม่เกิดจุด Reattachment ขึ้นภายในห้อง แต่จะมีการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง ( $ER > 0$ ) และเมื่อผนังท้ายห้องปิดลงมามากกว่า  $\delta_c$  แล้ว ( $t/H = 0.30 - 0.08$ ) จะเกิดจุด Reattachment ขึ้นภายในห้องใกล้กับช่องเปิดด้านท้าย แต่จะไม่มีการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง ( $ER = 0$ ) ดังนั้นรูปแบบการไหลภายในห้องจึงไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายเท่าใดนัก

จากความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลภายในห้องกับ  $\delta_c$  และความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดจุด Reattachment กับการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง

(ER) ทำให้สามารถสรุปและตอบคำถามข้างต้นได้ว่า คุณลักษณะของการไหลภายในห้องจะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายในช่วงที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่จนถึงกรณีที่ผนังท้ายห้องปิดลงมาไม่เกิน  $\delta_c$  แต่เมื่อผนังท้ายห้องปิดลงมามากกว่า  $\delta_c$  แล้ว คุณลักษณะของการไหลภายในห้องแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้าย เมื่อ  $\delta_c$  คือ ความสูงของผนังท้ายห้องที่ทำให้เกิดจุด Reattachment ขึ้นภายในห้อง หรืออีกนัยหนึ่ง  $\delta_c$  คือ ความสูงของผนังท้ายห้องที่ทำให้ไม่เกิดการดึงอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้อง ( $ER = 0$ )

จากข้อสรุปและนิยามของ  $\delta_c$  ที่พบจากผลการศึกษาที่สอดคล้องกันระหว่างการไหลที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 100 และ 8,800 ทำให้เกิดข้อสมมติฐานต่อไปว่า การไหลที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 1,000 นั้นก็น่าจะมีค่าความสูงของผนังท้ายห้องที่ทำให้คุณลักษณะของการไหลภายในห้องไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายเช่นกัน ซึ่งประเด็นนี้มีได้มีการกล่าวไว้อย่างชัดเจนในงานของ Stitsuwongkul and Bunyajitradulya (2000) และ Stitsuwongkul (2000) ในที่นี้ผู้วิจัยจึงวิเคราะห์ตรวจสอบสมมติฐานข้างต้น ดังนี้

รูปที่ 4.1 แสดงผลของความเร็วที่ช่องทางอากาศเข้าต่อการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสในบริเวณครึ่งห้องทางด้านบนและครึ่งห้องทางด้านล่าง จากงานวิจัยของ Stitsuwongkul and Bunyajitradulya (2000) จากรูปพบว่า การกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสสำหรับการไหลที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 1,000 ( $U_{in} = 0.5 \text{ m/s}$ ) ในบริเวณครึ่งห้องทางด้านล่าง (โซน 5 – 8) จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องแม้ว่าผนังท้ายห้องจะปิดลงมามากกว่า  $\delta$  ( $\sim 0.16H$ ) แล้วก็ตาม ( $0.24 < t/H < 1.0$ ) แต่เมื่อผนังท้ายห้องปิดลงมามากกว่า 76% ของความสูงห้อง ( $t/H < 0.24$ ) แล้ว พบว่าอนุภาคนิวเคลียสในบริเวณครึ่งห้องทางด้านล่างจะมีค่าประมาณเท่ากัน (บริเวณที่วงกลม)

รูปที่ 4.2 แสดงผลของความเร็วที่ช่องทางอากาศเข้าต่อการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนว Downstream บน Center plane จากงานวิจัยของ Stitsuwongkul and Bunyajitradulya (2000) เช่นกัน จากรูปพบว่า การกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสของการไหลที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 1,000 (รูปบน) มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องเมื่ออัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีค่าอยู่ในช่วง 1.0 – 0.24 แต่เมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีค่าน้อยกว่า 0.24 (เส้นกราฟที่ลูกศรชี้) การกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสจะมีค่าใกล้เคียงกันมากตลอดทั้งหน้าตัดบนทุกตำแหน่งตามแนว Downstream ยกเว้นแต่บริเวณพื้นห้องที่หน้าตัดใกล้ทางออก

จากลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสที่พบในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ช่วยชี้ให้เห็นได้ว่าการไหลที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 1,000 ก็มีความสูงของผนังท้ายห้องที่ทำให้คุณลักษณะของการไหลภายในห้องไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายเช่นเดียวกับการไหลที่เรย์โนลด์ส์



นมเบอร์เท่ากับ 8,800 และ 100 สอดคล้องกับสมมติฐานข้างต้น โดย  $\delta_c$  สำหรับการไหลที่เรย์โนลด์์นมเบอร์เท่ากับ 1,000 นี้มีค่าประมาณ 76% ของความสูงห้อง ( $\delta_c \sim 0.76H$ )

ดังนั้นการไหลทั้งสามเรย์โนลด์์นมเบอร์จึงมีคุณลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายสอดคล้องกับข้อสรุปข้างต้น โดยที่  $\delta_c$  สำหรับแต่ละค่าเรย์โนลด์์นมเบอร์นั้นจะมีค่าแตกต่างกัน ดังแสดงสรุปไว้ในตารางที่ 4.1

การที่การไหลที่เรย์โนลด์์นมเบอร์เท่ากับ 1,000 มีค่าความสูงของผนังท้ายห้อง  $\delta_c$  ที่ทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายนั้น ทำให้เกิดข้อสมมติฐานต่อไปอีกว่า เมื่อผนังท้ายห้องปิดลงมากกว่า  $\delta_c$  ( $\sim 0.76H$ ) แล้วก็น่าจะพบจุด Reattachment เกิดขึ้นภายในห้อง และไม่เกิดการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง ( $ER = 0$ ) เช่นกัน

เพื่อตรวจสอบสมมติฐานดังกล่าว จึงได้พิจารณา รูปแบบการไหลจากภาพ Flow visualization ด้วยวิธี Smoke-wire สำหรับการไหลภายในห้องที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0, 0.92, 0.76, 0.5, 0.24 และ 0.08 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งจากงานวิจัยของ Stitsuwongkul (2000) โดยในภาพที่อัตราส่วนช่องเปิดเท่ากับ 1.0 – 0.24 จะสังเกตเห็นแนวโค้งสีดำแห่งตามแนว Downstream บน Center plane แต่ที่อัตราส่วนช่องเปิดเท่ากับ 0.08 ไม่มีภาพ Flow visualization จากการซึ่งลวดทั้งสีดำแห่ง มีเพียงภาพจากการซึ่งลวดตำแหน่งเดียวหน้าช่องทางอากาศเข้า จากรูปพบว่า

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0 จะเห็นลักษณะของกลุ่มควันที่อยู่ทางขวาของเส้นลวดเส้นที่ 4 ในบริเวณด้านบนของห้อง ซึ่งแสดงถึงการเคลื่อนที่ของ Wall jet ที่วิ่งเรียบเพดานจากช่องทางเข้าตรงไปยังช่องเปิดด้านท้ายไหลออกไปนอกห้อง ส่วนในบริเวณด้านล่างของห้องจะเห็นกลุ่มควันที่มีอยู่แต่ทางซ้ายของเส้นลวด ซึ่งแสดงถึงการเคลื่อนที่ของอากาศจากภายนอกห้อง (เดิมยังไม่มีควัน) เข้ามาภายในห้อง (ผ่านเส้นลวดแล้วจึงมีควันขึ้น) และยังไม่พบลักษณะของกลุ่มควันใดที่แสดงถึงการพุ่งชนพื้น ดังนั้นที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่จึงแสดงให้เห็นว่ามีการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง ( $ER > 0$ ) และไม่เกิดจุด Reattachment ขึ้นภายในห้อง

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง ( $t/H = 0.92 - 0.5$ ) แนวของกลุ่มควันในบริเวณด้านบนของห้อง จะโค้งลงมาอย่างต่อเนื่องตามขนาดของช่องเปิดด้านท้ายที่ลดลง ลักษณะดังกล่าวแสดงถึงการไหลของ Wall jet ที่โค้งลงมาด้านล่างเนื่องจากผนังท้ายห้องที่ปิดลงมาขวางการไหลมากขึ้น ส่วนในบริเวณด้านล่างยังคงเห็นกลุ่มควันที่เคลื่อนที่ย้อนกลับจากช่องเปิดด้านท้ายเข้ามาภายในห้องอย่างชัดเจน และเมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของกลุ่มควันจากลวดเส้นสุดท้ายใกล้กับช่องเปิด จะเห็นลักษณะของกลุ่มควันที่อยู่ทางด้านขวาของเส้นลวดในบริเวณด้านบนของช่อง



เปิด ซึ่งแสดงถึงการเคลื่อนที่ของอากาศจาก Wall jet ออกไปนอกห้องในบริเวณด้านบนของช่องเปิดด้านท้าย และจะเห็นกลุ่มควันที่มีอยู่แต่ทางซ้ายของเส้นลวดในบริเวณด้านล่างของช่องเปิด ซึ่งแสดงถึงการเคลื่อนที่ของอากาศจากภายนอกห้อง (เดิมไม่มีควัน) เข้ามาภายในห้องบริเวณด้านล่างของช่องเปิด (เข้ามาแล้วมีควัน) ดังนั้นลักษณะของการไหลในช่วงการเปิดนี้จึงยังมีการดึง (Entrain) อากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง ( $ER > 0$ ) แต่ยังไม่เกิดการพุ่งชนพื้นห้องของเจ็ต และยังไม่พบจุด Reattachment ภายในห้อง

ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 0.24 จะเห็นแนวของกลุ่มควันที่โค้งลงมาจากผนังท้ายห้อง พุ่งลงมาปะทะพื้นห้องใกล้กับช่องเปิดด้านท้ายในลักษณะของ Impinging jet แล้วแยกตัวออกจากกัน เคลื่อนที่ไปในสองทิศทาง ส่วนแรกเคลื่อนที่ย้อนกลับเข้าไปในห้อง และส่วนที่สองเคลื่อนที่ไปทางช่องเปิดด้านท้ายเพื่อเคลื่อนที่ออกไปนอกห้อง ลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า Wall jet จากเพดานที่เบี่ยงตัวโค้งลงมาตามผนังท้ายห้อง จะพุ่งลงมาปะทะพื้นห้องทำให้เกิดจุด Reattachment ขึ้นภายในห้องใกล้กับช่องเปิดด้านท้าย และอากาศจากเจ็ตที่จุด Reattachment นี้จะแยกออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเคลื่อนที่ย้อนกลับเข้าไปในห้อง และส่วนที่สองเคลื่อนที่ออกไปจากห้อง

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาจากกลุ่มควันจากลวดเส้นสุดท้ายในบริเวณใกล้กับช่องเปิดด้านท้ายจะเห็นว่าไม่มีควันกระจายอยู่ทั้งสองด้านของเส้นลวด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่มีอากาศจากภายนอกห้อง (อากาศที่ไม่มีควัน) ไหลเข้ามาภายในห้อง หรือไม่เกิดการดึงอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้องนั่นเอง ( $ER = 0$ )

สำหรับการไหลที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 0.08 ถึงแม้การบันทึกภาพ Flow visualization จะมีแต่ภาพจากการยิงลวดเพียงเส้นเดียวใกล้กับช่องทางการไหลเข้า ซึ่งทำให้แสดงลักษณะการไหลในบริเวณ Downstream ได้ไม่ชัดเจนนัก แต่จากแนวของกลุ่มควันที่ปรากฏแสดงให้เห็นว่า กลุ่มควันที่โค้งลงมาจากเพดานจะชนเข้ากับผนังท้ายห้องแล้วสะท้อนลงมายังพื้นห้อง ซึ่งแสดงถึงการพุ่งชนพื้นของเจ็ต และการเกิดจุด Reattachment ขึ้นภายในห้อง

โดยสรุปแล้วภาพ Flow visualization ในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ลักษณะการไหลที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายตั้งแต่ 1.0 – 0.5 ยังคงมีการดึงอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้อง แต่ยังไม่เกิดการพุ่งชนพื้นของเจ็ต ดังนั้นจึงยังไม่มีจุด Reattachment เกิดขึ้นภายในห้อง แต่ที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.24 ( $t/H = 0.24$  และ 0.08) จะไม่มีการดึงอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้อง แต่จะเกิดการพุ่งชนพื้นของเจ็ตใกล้กับช่องเปิดด้านท้าย ดังนั้นจึงมีจุด Reattachment เกิดขึ้นภายในห้อง ซึ่งผลที่ได้จากรูปที่ 4.3 นี้จึงสอดคล้องกับสมมติฐานข้างต้นที่ว่า การไหลที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ 1,000 ก็มีจุด Reattachment เกิดขึ้นภายในห้อง และไม่เกิดการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง ( $ER = 0$ ) เมื่อผนังท้ายห้องปิดลงมามากกว่า  $\delta_c$

ผลที่ได้จากรูปที่ 4.3 ยังมีจุดที่น่าสังเกตอีกว่า การดึงเอาอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง (Entrainment) กับการเกิดจุด Reattachment ภายในห้องก็มีความสัมพันธ์กัน ประมาณเช่นเดียวกับผลที่ได้จากการศึกษานี้ กล่าวโดยสังเขปคือ ในกรณีที่ผนังท้ายห้องปิดลงมาไม่เกิน  $\delta_c$  เสมือนจะยังไม่มีจุด Reattachment เกิดขึ้นภายในห้อง (สังเกตจากการที่ไม่มี Impinging jet ชัดเจน) แต่จะมีการดึงอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้อง ( $ER > 0$ ) ในทางตรงข้ามเมื่อผนังท้ายห้องปิดลงมาต่ำกว่า  $\delta_c$  แล้ว จะพบจุด Reattachment เกิดขึ้นภายในห้อง (สังเกตจากการที่มี Impinging jet ก่อนข้างชัดเจน) แต่จะไม่มีมีการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง ( $ER = 0$ ) ซึ่งการที่ไม่มีอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้องนั้นทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดของช่องเปิดด้านท้ายในช่วงการปิดนี้ นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดจุด Reattachment กับการดึงเอาอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง (Entrainment) สำหรับการไหลที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ 1,000 ในรูปที่ 4.3 นี้ยังสอดคล้องกับความสัมพันธ์ของคุณลักษณะทั้งสองที่พบในการไหลที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ 100 ในการศึกษานี้อีกด้วย

โดยสรุปแล้ว ผลการอภิปรายนี้แสดงให้เห็นว่า คุณลักษณะของการไหลภายในห้องจะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายในช่วงที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่จนถึงกรณีที่ผนังท้ายห้องปิดลงมาไม่เกิน  $\delta_c$  แต่เมื่อผนังท้ายห้องปิดลงมาต่ำกว่า  $\delta_c$  แล้วคุณลักษณะของการไหลภายในห้องแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดของช่องเปิดด้านท้ายเลย โดยนิยามของ  $\delta_c$  ที่สอดคล้องกับปรากฏการณ์นี้คือ

$\delta_c$  คือความสูงของผนังท้ายห้องที่ทำให้เกิดจุด Reattachment ขึ้นภายในห้อง หรืออีกนัยหนึ่ง

$\delta_c$  คือความสูงของผนังท้ายห้องที่ทำให้ไม่เกิดการดึงเอาอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้อง ( $ER = 0$ )

นอกจากนี้เมื่อขยายผลของข้อสรุปนี้ไปยังการไหลที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ 1 และ 10 จะพบว่า การไหลทั้งสองเรย์โนลด์์นัมเบอร์นี้มีจุด Reattachment เกิดขึ้นภายในห้อง และไม่มีมีการดึงเอาอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้องตั้งแต่กรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ ดังนั้นคุณลักษณะของการไหลที่ทั้งสองเรย์โนลด์์นัมเบอร์นี้จึงแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้าย ยกเว้นในบริเวณใกล้กับผนังท้ายห้อง

อย่างไรก็ตาม พึงระลึกว่าการไหลของทั้งสองการศึกษานั้นแตกต่างกัน กล่าวคือ การศึกษาของ Stitsuwongkul and Bunyajitradulya (2000) และ Stitsuwongkul (2000) เป็นการไหลแบบปั่นป่วน ในขณะที่การไหลในการศึกษานี้เป็นการไหลแบบราบเรียบ ดังนั้นข้อสรุปที่ได้ใน

ประเด็นนี้จึงเป็นข้อสรุปเชิงคุณภาพ (Qualitative) เท่านั้น ผลของความแตกต่างของการไหลทั้งสองแบบจะอภิปรายเป็นประเด็นต่อไป

### ผลของการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ กับค่า  $\delta_c$  ในตารางที่ 4.1 จะพบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวไม่ได้มีแนวโน้มไปในแนวทางเดียวกันโดยตลอด กล่าวคือ เมื่อเรย์โนลด์์นัมเบอร์มีค่าลดลงจาก 8,800 เป็น 1,000  $\delta_c$  จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเรย์โนลด์์นัมเบอร์มีค่าลดลงจาก 1,000 เป็น 100 แล้ว  $\delta_c$  กลับมีค่าลดลง ทั้งนี้ถ้าพิจารณาจากเรย์โนลด์์นัมเบอร์เริ่มต้นของเจ็ตที่ช่องทางเข้าแล้ว เจ็ตที่มีโมเมนตัมน้อย ( $Re = 1,000$ ) จะถูกเบี่ยงเบนทิศทางด้วย Adverse pressure gradient จากผนังท้ายห้องได้ง่าย จึงสามารถไหลหลบลอดใต้ผนังท้ายห้องออกไปได้ ในขณะที่เจ็ตที่มีโมเมนตัมมาก ( $Re = 8,800$ ) จะถูกเบี่ยงเบนทิศทางด้วย Adverse pressure gradient จากผนังท้ายห้องได้ยาก ดังนั้นจึงพุ่งชนเข้ากับผนังท้ายห้องที่ปิดลงมาโดยตรงแล้วเปลี่ยนทิศพุ่งลงสู่พื้นห้องทำให้เกิดจุด Reattachment ภายในห้องได้ง่ายกว่า ในลักษณะเดียวกับกรณีที่  $\delta_c$  มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเรย์โนลด์์นัมเบอร์มีค่าลดลงจาก 8,800 เป็น 1,000 แต่จากตารางที่ 4.1 พบว่า  $\delta_c$  กลับมีค่าลดลงเมื่อเรย์โนลด์์นัมเบอร์มีค่าลดลงจาก 1,000 เป็น 100

ลักษณะดังกล่าวน่าจะมีสาเหตุมาจากความแตกต่างระหว่างพฤติกรรมของการไหลที่เป็น การไหลแบบราบเรียบ ( $Re = 100$ ) และการไหลแบบปั่นป่วน ( $Re = 1,000$  และ 8,800) เพราะในการไหลแบบปั่นป่วนจะมีกลไกการ Entrainment และการถ่ายเทโมเมนตัมด้วย Fluctuation เพิ่มขึ้นมาจากกลไกการ Entrainment และกลไกถ่ายเทโมเมนตัมในการไหลแบบราบเรียบ ซึ่ง Fluctuation จะช่วยทำให้เกิดการดึงอากาศภายในห้องเข้าไปใน Wall jet และจาก Wall jet ออกสู่ห้อง ซึ่งส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้องได้มากขึ้น ดังนั้นการไหลแบบปั่นป่วนจึงสามารถดึงอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้องได้มากกว่าการไหลแบบราบเรียบ

ด้วยเหตุผลดังกล่าว เมื่อการไหลภายในห้องมีการเปลี่ยนรูปแบบ (Transition) จาก การไหลแบบราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ผนังท้ายห้องจึงต้องปิดลงมากขึ้นในช่วงของการเปลี่ยนรูปแบบนี้เพื่อทำให้ไม่เกิดการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง ( $ER = 0$ ) และทำให้คุณลักษณะของการไหลภายในห้องไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้าย ดังนั้นจึงทำให้  $\delta_c$  สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนมีค่ามากกว่าการไหลแบบราบเรียบในช่วงการเปลี่ยนรูปแบบ ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่า  $\delta_c$  ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเรย์โนลด์์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 100 เป็น 1,000 ในตารางที่ 4.1

## บทที่ 5

### สรุปผลการคำนวณ

#### 5.1 สรุปผลการคำนวณ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาลักษณะการไหลของอากาศภายในห้อง โดยใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) เพื่อศึกษาผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้อง และผลของความเร็วอากาศจากช่องทางเข้า (ผลของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์) ที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในห้อง ในการคำนวณ ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มร่วมกับการวางกริดแบบ Staggered grid arrangement ที่มีการกระจายตัวแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid) ขนาด 102x102 โหนด และใช้ระเบียบวิธี CDS (Central differencing scheme) ในการกระจายเทอม Convection และ Diffusion แล้วคำนวณตามขั้นตอนแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)

จากผลการศึกษสามารถสรุปได้ว่า

1. สำหรับการไหลในกรณีเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่ำ ( $Re = 1$  และ  $10$ )
  - 1.1. ในภาพรวมของการไหลภายในห้องแล้ว กลไกการแพร่กระจายมีความสำคัญต่อการไหล (Diffusion dominated) ที่ทุกขนาดช่องเปิด โดยที่กลไกการพาจะมีความสำคัญต่อการไหลเพิ่มขึ้นเมื่อเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามสภาวะของการไหลนี้ก็ขึ้นกับบริเวณของห้องด้วย
  - 1.2. ในกรณีที่ช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่ รูปแบบการไหลภายในห้องมีลักษณะคล้ายการไหลผ่าน BFS (Backward facing step) ซึ่งเจ็ตจากช่องทางเข้าจะเหนี่ยวนำให้เกิดบริเวณของการไหลหมุนวนขึ้นใต้ช่องทางอากาศเข้า ซึ่งบริเวณของการไหลหมุนวนนี้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นเจ็ตจากช่องทางเข้าก็จะสลายตัวไปอย่างรวดเร็วในบริเวณครึ่งห้องทาง Upstream เนื่องจากแรงเสียดทานการไหล ทำให้การไหลในบริเวณครึ่งห้องทาง Downstream มีลักษณะเหมือนกับการไหลในช่องทางการไหล (Channel flow) จากนั้นการไหลจึงปรับตัวเข้าสู่สภาวะการไหลที่พัฒนาตัวเต็มที่ (Fully developed flow) (รูปที่ 3.13 – 3.17 และ รูปที่ 3.21 – 3.25)
  - 1.3. ศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลักที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของเจ็ตจากช่องทางเข้า และจุด Reattachment เกิดขึ้นในบริเวณครึ่งห้องทาง Upstream ซึ่งตำแหน่งและขนาดจะ

เปลี่ยนแปลงตามค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ โดยไม่ขึ้นกับขนาดช่องเปิดด้านท้าย (รูปที่ 3.20 และ 3.28)

- 1.4. ขนาดของช่องเปิดด้านท้ายจะมีผลต่อการไหลเฉพาะในบริเวณครึ่งห้องทาง Downstream โดยเฉพาะในบริเวณใกล้กับช่องเปิดด้านท้าย แต่แทบจะไม่มีผลต่อคุณลักษณะการไหลในบริเวณครึ่งห้องทาง Upstream ในขณะที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์จะมีผลต่อคุณลักษณะการไหลเฉพาะในบริเวณครึ่งห้องทาง Upstream แต่ไม่มีผลต่อการไหลในบริเวณ Downstream (รูปที่ 3.38)
2. สำหรับการไหลในกรณีเรย์โนลด์์นัมเบอร์สูง
    - 2.1. ในภาพรวมของการไหลภายในห้องแล้ว กลไกการพามีความสำคัญต่อการไหล (Convection dominated) ซึ่งบทบาทของกลไกการพาจะแสดงให้เห็นชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง
    - 2.2. รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นจะแตกต่างไปจากการไหลที่  $Re = 1$  และ 10 อย่างชัดเจน โดยรูปแบบการไหลจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายอย่างมากเมื่อช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่จนถึงเปิดประมาณ 40% ของความสูงห้อง แต่เมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดน้อยกว่า 40% ของความสูงห้องแล้ว รูปแบบการไหลภายในห้องแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดเลย (รูปที่ 3.29 – 3.32 และ 3.34)
    - 2.3. อากาศจากภายนอกห้องจะถูกดึง (Entrain) เข้ามาภายในห้องเมื่อช่องเปิดด้านท้ายเปิดเต็มที่จนถึงเปิดประมาณ 40% ของความสูงห้อง โดยอัตราส่วนการดึงอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้องจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อช่องเปิดเริ่มลดลงจากกรณีที่เปิดเต็มที่ หลังจากนั้นอัตราส่วนการดึงอากาศจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามขนาดช่องเปิดที่ลดลง จนในที่สุดจะไม่เกิดการดึงอากาศเข้ามาภายในห้องเลยเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดน้อยกว่า 40% ของความสูงห้อง (รูปที่ 3.35)
    - 2.4. จุด Reattachment จะเกิดขึ้นภายในห้องเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดน้อยกว่า 40% ของความสูงห้อง โดยจะเคลื่อนที่เข้ามาภายในห้องเล็กน้อยเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลง (รูปที่ 3.36)
    - 2.5. ศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลักจะเคลื่อนตัวจากบนช่องเปิดด้านท้ายเข้ามาภายในห้องพร้อมกับลดระดับลงอย่างรวดเร็วเมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดลดลงจากกรณีที่เปิดเต็มที่จนถึงเปิดประมาณ 40% ของความสูงห้อง แต่เมื่อช่องเปิดด้านท้ายมีขนาดน้อยกว่า 40% ของความสูงห้องแล้ว ศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลักจะเคลื่อนที่ในแนวระดับเข้ามาในห้องอีกเพียงเล็กน้อย (รูปที่ 3.37)



3. จากการวิเคราะห์ผลการคำนวณร่วมกับงานวิจัยของ Stitsuwongkul and Bunyajitradulya (2000) และ Stitsuwongkul (2000) สรุปได้ว่า คุณลักษณะของการไหลภายในห้องจะขึ้นกับขนาดของช่องเปิดด้านท้ายเฉพาะในช่วงที่ผนังท้ายห้องปิดลงมาไม่เกิน End-wall closing characteristic height,  $\delta_c$  แต่เมื่อผนังท้ายห้องปิดลงมาเกินกว่า  $\delta_c$  แล้ว คุณลักษณะของการไหลภายในห้องแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้าย เมื่อ  $\delta_c$  คือความสูงของผนังท้ายห้องที่ทำให้เกิดจุด Reattachment ขึ้นภายในห้อง หรืออีกนัยหนึ่ง  $\delta_c$  คือความสูงของผนังท้ายห้องที่ทำให้ไม่เกิดการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง ซึ่ง  $\delta_c$  ของแต่ละเรย์โนลด์์นัมเบอร์จะมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นกับพฤติกรรมของการไหลว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบหรือการไหลแบบปั่นป่วน เพราะการไหลทั้งสองลักษณะนี้มีความสามารถในการดึง (Entrain) อากาศเข้ามาภายในห้องได้ไม่เหมือนกัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

จากผลการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ทำให้เกิดคำถามเกี่ยวกับคุณลักษณะของการไหลภายในห้องต่อไปอีก ดังนี้

- $\delta_c$  จะมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์อย่างไรทั้งในช่วงที่เป็นการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน เพราะ  $\delta_c$  ที่นิยามขึ้นในการศึกษานี้ นิยามขึ้นจากข้อมูลของการไหลที่สามเรย์โนลด์์นัมเบอร์ ทั้งการไหลที่เป็นแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน และเนื่องจากในงานวิทยานิพนธ์นี้และงานวิจัยของ Stitsuwongkul and Bunyajitradulya (2000) และ Stitsuwongkul (2000) ศึกษาการไหลภายในห้องที่มีขนาดเดียวกัน ดังนั้นขนาดของห้อง (ความยาวและความสูง) จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง  $\delta_c$  อย่างไร จึงเป็นเรื่องที่น่าจะศึกษาต่อไปเพื่อความเข้าใจในลักษณะทางกายภาพของการไหลภายในห้องที่ชัดเจนยิ่งขึ้น
- ในการนำ  $\delta_c$  ไปใช้งานนั้น  $\delta_c$  อาจจะวัดได้ยากกว่า  $\delta$  ที่นิยามเป็นความหนาของ Wall jet ในกรณีที่เปิดเต็มที่ ดังนั้นการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $\delta_c$  กับ  $\delta$  ที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ต่างๆ จะทำให้สามารถนำ  $\delta_c$  ไปใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้น ซึ่งในการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สามารถทำได้ไม่ยากนักด้วยการวัดค่า  $\delta$  ที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ใดๆ จากนั้นจึงวัดค่า  $\delta_c$  ด้วยการปิดผนังท้ายห้องลงมาอย่างต่อเนื่องจนเกิดจุด Reattachment ขึ้นภายในห้อง หรือไม่เกิดการดึงเอาอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้อง
- อัตราส่วนการดึงอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้อง (Entrainment ratio) ที่แต่ละขนาดช่องเปิด ( $t/H$ ) จะเปลี่ยนแปลงตามค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์อย่างไร ก็เป็นอีกหนึ่งคุณลักษณะของการไหลภายในห้องที่น่าสนใจ

ซึ่งข้อมูลจากคำถามเหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบการระบายอากาศภายในห้อง หรือออกแบบการหมุนเวียนของอากาศในห้องเผาไหม้ได้

- นอกจากนี้ถ้าเรามีเงื่อนไขของขนาดช่องเปิดให้ต้องปิดลงมาได้น้อย ทำให้มีการดึงอากาศภายนอกเข้ามาภายในห้องได้มาก ดังนั้นจึงมีคำถามเกิดขึ้นว่า จะมีการออกแบบการควบคุมการไหลอย่างง่าย (Simple flow control) ได้อย่างไรที่จะทำให้เกิดการดึงอากาศเข้ามาในห้องได้น้อยลง ในทางตรงข้ามถ้าต้องปิดผนังท้ายห้องลงมามาก ซึ่งทำให้เกิดการดึงอากาศเข้ามาได้น้อย แต่ต้องการการดึงอากาศเข้ามามาก จะมีวิธีออกแบบการควบคุมการไหลได้อย่างไร

สำหรับในด้าน การคำนวณ การศึกษารูปแบบการไหลภายในห้องในวิทยานิพนธ์นี้มีค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สูงสุดที่คำนวณได้โดยที่การไหลที่ศึกษายังคงเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ในสถานะคงตัว (Steady state) ประมาณ 100 ซึ่งไม่สูงนัก ดังนั้นการขยายขอบเขตของค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ในการคำนวณให้สูงขึ้นจะทำให้เข้าใจลักษณะทางกายภาพของการไหลภายในห้องได้ดีขึ้น แต่การที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์มีค่าสูงขึ้นนั้นสถานะของการไหลจะเริ่มเปลี่ยนแปลงเข้าสู่สถานะที่ไม่คงตัว (Unsteady flow) และเปลี่ยนเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ในที่สุด ดังนั้นจึงต้องพัฒนาขั้นตอนการคำนวณ (Numerical algorithm) ให้เหมาะสมกับสถานะการไหลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและจำเป็นต้องใช้ Turbulence model ในการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน นอกจากนี้ยังควรขยายขอบเขตการคำนวณไปสู่การไหลใน 3 มิติด้วย เพราะการไหลจะมีลักษณะเป็น 3 มิติมากขึ้นเมื่อเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์มีค่าสูงขึ้น จากงานวิจัยของ Davidson et al. (2000) พบว่าการไหลภายในห้องนั้นไม่ได้มีลักษณะเป็น Fully turbulent ตลอดทั่วทั้งห้อง แต่มีบางบริเวณที่การไหลมีลักษณะเป็น Transitional flow ซึ่งทำให้ Turbulence model ประเภท RANS ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการจำลองการไหลภายในห้อง

ดังนั้นเพื่อให้การศึกษารูปแบบการไหลภายในห้องด้วยการจำลองการไหลมีความถูกต้อง แม่นยำ Large Eddy Simulation (LES) จึงน่าจะเป็นวิธีการจำลองการไหลที่เหมาะสมในการศึกษาคุณลักษณะของการไหลภายในห้อง ซึ่ง LES เป็นการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาใน 3 มิติอีกวิธีหนึ่งนอกเหนือจากการใช้ Turbulence model โดย LES จะคำนวณลักษณะการไหลของ Large scale structure แบบที่เที่ยงตรง (Exact) และจะ โมเดลเฉพาะ Small scale structure ในการไหลเท่านั้น



# ประมวลตาราง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงรายละเอียด และผลการศึกษาคาร์ไหลหมุนวนใน Ventilated chamber

Flow in ventilated room		รายละเอียดการศึกษา	ผลที่ได้จากการศึกษา
ลำดับที่	ชื่อนักวิจัย		
1	Stitsuwongkul (2000) และ Stitsuwongkul and Bunyajitradulya (2000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาถึงผลของการใช้ Lobed nozzle รูปทรงปิรามิด และผลของความเร็วอากาศเข้า ควบคู่กับขนาดของช่องระบายอากาศด้านท้ายห้องต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้อง</li> <li>ในการทดลองใช้ Thermocouple เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิ และใช้ Pitot probe ในการวัดความเร็วอากาศที่ช่องทางเข้า</li> <li>อากาศที่เข้ามาในห้องมีความเร็ว 0.5 และ 4.4 m/s (<math>Re_h = 1,000</math> และ 8,800) มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิจานอากาศประมาณ 40 องศาเซลเซียส</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lobed nozzle ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผสม และทำให้การกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอมากกว่ากรณีไม่ใช้ Lobed nozzle โดยเฉพาะในกรณีที่อัตราส่วนพื้นที่การเปิดผนังท้ายห้องน้อยกว่า 24%</li> <li>สำหรับผลของความเร็วที่ช่องอากาศเข้าในกรณีไม่ติด Lobed nozzle นั้นพบว่า ที่ความเร็วสูงการกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยในบริเวณด้านบนและด้านล่างของห้องจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดของช่องเปิดท้ายห้องในช่วงตั้งแต่ผนังด้านท้ายเปิดเต็มที่จนปิดลงมาไม่เกิน <math>\delta</math> ส่วนที่ความเร็วต่ำการกระจายของอุณหภูมิเฉลี่ยในบริเวณด้านบนของห้องจะเหมือนในกรณีความเร็วสูง แต่ด้านล่างของห้องจะยังคงเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามการปิดผนังท้ายห้องแม้ว่าจะปิดผนังลงมาต่ำกว่า <math>\delta</math> แล้วก็ตาม</li> </ul>

Flow in ventilated room		รายละเอียดการศึกษา	ผลที่ได้จากการศึกษา
ลำดับที่	ชื่อนักวิจัย		
2	Davidson et al. (2000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ศึกษาลักษณะการไหลภายในห้องที่มีค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่ำ (<math>Re_h = 600</math>)</li> <li>• ห้องที่ใช้ในการศึกษามีความสูง <math>H</math> กว้าง (<math>W</math>) <math>1.44H</math> และยาว (<math>L</math>) <math>1.68H</math> มีช่องทางอากาศเข้าสูง (<math>h</math>) <math>0.008H</math> อยู่บนผนังใต้เพดาน และช่องทางอากาศออกสูง (<math>t</math>) <math>0.16H</math> อยู่ติดพื้นบนผนังฝั่งเดียวกัน</li> <li>• ทำการคำนวณใน 3 ลักษณะ คือ 1.) การคำนวณการไหลแบบราบเรียบที่ไม่คงตัวใน 2 มิติ, 2.) การคำนวณโดยใช้ <math>k - \omega</math> Turbulence model และ 3.) การคำนวณด้วยวิธี LES โดยใช้ Dynamic One-Equation model การคำนวณ Subgrid stress</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ผลที่ได้จากการคำนวณแบบราบเรียบที่ไม่คงตัวใน 2 มิติ นั้นขึ้นกับระเบียบวิธีที่ใช้ในการกระจาย Convective term ในสมการนาเวียร์-สโตร์ค</li> <li>• ผลการคำนวณโดยใช้ <math>k - \omega</math> โมเดลแตกต่างจากผลจากการคำนวณด้วยวิธีแรก และผลจากการทดลองอย่างมาก</li> <li>• ผลการคำนวณโดยใช้ LES แสดงให้เห็นบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดใหญ่ตรงกลางห้องและบริเวณการไหลหมุนวนขนาดเล็กในบริเวณมุมด้านบนของห้อง ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการทดลองของ Topp et al.(2000)</li> </ul>

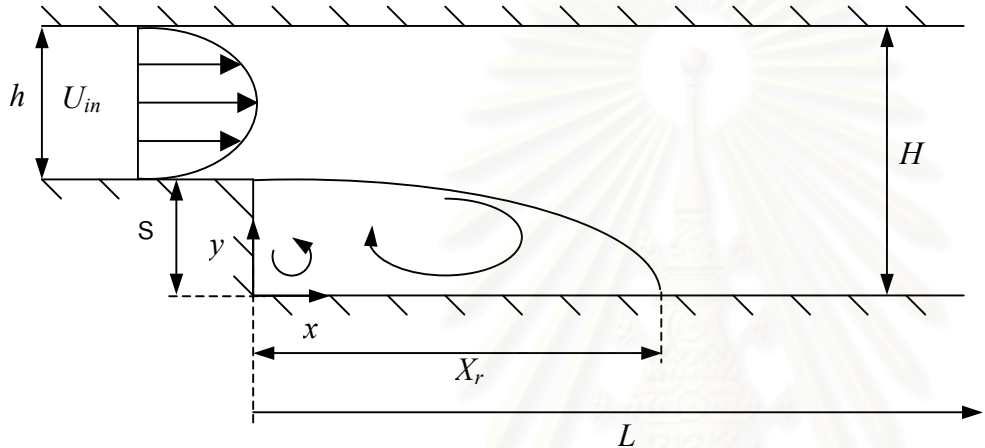


Flow in ventilated room		รายละเอียดการศึกษา	ผลที่ได้จากการศึกษา
ลำดับที่	ชื่อนักวิจัย		
3	Khuhiran et al. (1999)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาถึงผลของการปรับเปลี่ยนความสูงของผนังท้ายห้องต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้อง</li> <li>ในการทดลองใช้ Thermocouple เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิ</li> <li>อากาศที่ช่องทางเข้ามีความเร็ว 4.4 m/s (<math>Re_h \sim 10^4</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ความสูงของช่องเปิดที่ผนังท้ายห้องมีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเฉพาะในช่วงที่ผนังด้านท้ายมีความสูงน้อยกว่าความหนาของเจ็ท เพราะมีเจ็ทบางส่วนสามารถเคลื่อนที่ข้ามผนังไปได้ แต่ถ้าผนังด้านท้ายมีความสูงมากกว่านี้ เจ็ททั้งหมดจะวิ่งชนกับผนังแล้วเคลื่อนที่ตกลงมายังพื้นห้องเหมือนกันทั้งหมด</li> </ul>
4	Sezai and Mohamad (1998)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษารูปแบบการไหล และการพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural convection) ที่เกิดขึ้นภายในห้อง ด้วยการจำลองการไหลแบบ 3 มิติที่สภาวะคงตัว โดยเปลี่ยนค่า Rayleigh number (<math>Ra</math>) ในช่วง <math>10^3</math> ถึง <math>10^6</math> และเปลี่ยนอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของห้องจาก 0.125 ถึง 2.0</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ที่ค่า <math>Ra</math> เท่ากับ <math>10^6</math> เกิดลักษณะการไหลหมุนวนที่มีแกนของการหมุนวนอยู่ในแนวความกว้างของห้อง ใกล้กับรอยต่อระหว่างเพดานกับผนังที่มีอุณหภูมิสูง โดยบริเวณของการไหลหมุนวนนี้จะเคลื่อนที่ต่ำลงมายังกลางห้อง และมีขนาดเล็กลงเมื่ออัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของห้องลดลง</li> <li>เมื่อคงอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของห้องไว้เท่ากับ 1.0 แล้วเปลี่ยนค่า <math>Ra</math> พบว่า การไหลมีลักษณะเป็น 3 มิติเมื่อ <math>Ra</math> มีค่ามากกว่า <math>10^5</math></li> </ul>

Flow in ventilated room		รายละเอียดการศึกษา	ผลที่ได้จากการศึกษา
ลำดับที่	ชื่อนักวิจัย		
5	Peng et al. (1996,1997)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาและพัฒนา Low-Reynolds-Number <math>k-\omega</math> Model เพื่อทำนายการไหลหมุนวนในการไหลผ่าน BFS และ Confined ventilation enclosure (รูปที่ 1.2) โดยเพิ่มเติมของ Turbulence cross diffusion ลงในสมการการถ่ายเทของ <math>\omega</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Turbulence model ที่พัฒนาขึ้น ให้ผลการคำนวณได้ใกล้เคียงกับผลจากการทดลองของ Restivo (1979) มากกว่าโมเดลอื่น ๆ ที่นำมาเปรียบเทียบกัน</li> </ul>
6	Davidson (1996) และ Davidson and Nielsen (1996)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาลักษณะการไหลหมุนวนภายในห้องด้วยการคำนวณแบบ LES โดยเปรียบเทียบผลจากการใช้ Subgrid stress model สองชนิดคือ Smagorinsky model และ Dynamic model</li> <li>ห้องที่ใช้ในการศึกษามีขนาดสูง(<math>H</math>) 3 เมตร กว้าง <math>1H</math> และยาว <math>3H</math> มีช่องทางอากาศเข้า สูง <math>0.056H</math> อยู่ใต้เพดานบนผนังฝั่งหนึ่ง และมีช่องทางอากาศออก สูง <math>0.16H</math> อยู่ติดพื้นบนผนังฝั่งตรงข้าม</li> <li>อากาศที่ช่องทางเข้ามีความเร็ว <math>0.445</math> m/s มีค่า <math>Re_h = 5,300</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Subgrid stress model ทั้งสองให้ผลที่ค่อนข้างสอดคล้องกับผลการวัด โดยผลที่ได้จาก Smagorinsky model ขึ้นกับค่าคงที่อิสระในโมเดลอย่างมาก แต่ Dynamic model จะคำนวณค่าคงที่ตัวนี้จากคุณสมบัติของการไหลเอง</li> <li>การไหลภายในห้องมีลักษณะแตกต่างกันในแต่ละบริเวณ โดยบริเวณใกล้กับเพดานมีลักษณะเป็น Wall Jet ส่วนบริเวณกลางห้องมีลักษณะเป็นบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดใหญ่ และยังมีบริเวณของการไหลหมุนวนขนาดเล็กซึ่งมีทิศการหมุนตรงข้ามเกิดขึ้นที่มุมขวาบน และมุมซ้ายล่างของห้อง</li> </ul>

Flow in ventilated room		รายละเอียดการศึกษา	ผลที่ได้จากการศึกษา
ลำดับที่	ชื่อนักวิจัย		
7	Gosman et al. (1980)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาถึงผลของขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อการไหลหมุนวนใน Ventilated room ด้วยการทดลองและการคำนวณ</li> <li>ในการทดลอง ใช้แบบจำลองของห้องที่มีขนาดเดียวกับของ Nielsen et al. (1978) ต่างกันตรงที่ ช่องทางอากาศเข้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส แล้ววัดความเร็วเฉลี่ย และ Normal stress ด้วย LDA ที่ <math>Re_h = 9,000</math></li> <li>ในการคำนวณ ใช้ <math>k - \omega</math> โมเดลในการทำนายการไหลแบบปั่นป่วน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ค่าความเร็วย้อนกลับสูงสุดจะขึ้นกับพื้นที่ของช่องอากาศเข้า แต่ไม่ขึ้นกับรูปร่างของช่องนั้น</li> </ul>
8	Nielsen et al. (1978)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาลักษณะการไหลหมุนวนใน Ventilated room ด้วยการทดลองและการคำนวณ</li> <li>ในการทดลอง ใช้ LDA วัดค่าความเร็วเฉลี่ย และ Normal stress ในแบบจำลองห้อง ที่ <math>Re_h</math> ตั้งแต่ 5,000 ถึง 10,000</li> <li>ในการคำนวณ ใช้ TEACH คอมพิวเตอร์โปรแกรมจำลองการไหลใน 2 และ 3 มิติ โดยเพิ่มลักษณะพิเศษของ Boundary condition แบบ Wall jet ที่บริเวณทางออกของช่องอากาศเข้า</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nondimensional velocity profile ของอากาศที่พุ่งออกมาจากช่องอากาศเข้า ไม่ขึ้นกับค่า <math>Re_h</math> ในช่วงที่ทำการทดลอง</li> <li>ค่าสูงสุดของความเร็วย้อนกลับจะแปรผันตามขนาดของพื้นที่ช่องอากาศเข้า และแปรผกผันกับความยาวของห้อง</li> </ul>

ตารางที่ 1.2 ตารางแสดงรายละเอียดของพารามิเตอร์ และผลที่ได้จากการศึกษาการไหลผ่าน BFS



- $Re_h = \rho U_{in} h / \mu$
- Step height :  $S$
  - Channel height :  $H$
  - Channel width :  $W$
  - Expansion ratio :  $H/h$
  - Area ratio :  $H/S$
  - Aspect ratio :  $W/h$
  - Reattachment length :  $X_r$
  - Boundary layer thickness :  $\delta$

Recirculating flow in BFS		พารามิเตอร์						ผลที่ได้จากการศึกษา
ลำดับที่	ชื่อนักวิจัย	$Re_h$	Expansion ratio	Area ratio	Aspect ratio	$\delta/S$	$X_r/S$	
1	Davidson and Nielsen (1998)	780 5,000	6	1.2	3.6		9.2 7.3–7.6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ที่ <math>Re_h = 780</math> ผลที่ได้จากการคำนวณแสดงให้เห็นว่าการไหลมีลักษณะเป็น Laminar ในบริเวณ ใกล้กับ ช่องทางเข้า (<math>U_{rms}/U_{in} \sim 0.01</math>) แล้วจึงค่อยๆ พัฒนาไปเป็น Fully turbulent ในบริเวณ ท้ายการไหล (<math>U_{rms}/U_{in} \sim 0.11</math>) ระยะ Reattachment ที่คำนวณได้มีค่าประมาณ <math>9S</math> มากกว่าค่าที่คำนวณได้ที่ <math>Re_h</math></li> </ul>

Recirculating flow in BFS		พารามิเตอร์						ผลที่ได้จากการศึกษา
ลำดับที่	ชื่อนักวิจัย	$Re_h$	Expansion ratio	Area ratio	Aspect ratio	$\delta/S$	$X_r/S$	
								<p>เท่ากับ 5,000 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Armaly et al. (1983) และ Romano et al. (1997)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ที่ <math>Re_h = 5,000</math> พบว่าการไหลมีลักษณะเป็น Fully turbulent ตั้งแต่ช่องทางเข้า ซึ่งผลการคำนวณที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Restivo (1997) ยกเว้นระยะ Reattachment ที่ยาวกว่าผลการทดลองประมาณ 20% ทั้งนี้ น่าจะมีสาเหตุมาจากขนาดของกริดที่ใช้, ความไม่เหมาะสมของ Subgrid stress model หรือความไม่เหมาะสมของเงื่อนไขขอบเขตที่ทางเข้า</li> </ul>



Recirculating flow in BFS		พารามิเตอร์						ผลที่ได้จากการศึกษา
ลำดับที่	ชื่อนักวิจัย	$Re_h$	Expansion ratio	Area ratio	Aspect ratio	$\delta/S$	$X_r/S$	
2	Otugen (1991)	16,600	1.5 2 3	3 2 1.5	31.1 15.5 7.7	0.09 0.045 0.022	6.8 6.5 6.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>เมื่อเพิ่มขนาดของ Expansion ratio จะทำให้ระดับความปั่นป่วน (Turbulence intensity) ใน Separate shear layer เพิ่มขึ้น เป็นผลให้ Separate shear layer โตเร็วขึ้น ดังนั้นระยะ Reattachment จึงลดลง</li> </ul>
3	Armaly et al. (1983)	70-8,000	1.94	2.06	18		แสดงในรูปที่ 1.6	<ul style="list-style-type: none"> <li>เมื่อ <math>Re_h</math> น้อยกว่า 1,200 การไหลมีลักษณะเป็น Laminar flow และระยะ <math>X_r/S</math> จะเป็นฟังก์ชันของ <math>Re_h</math> แบบไม่เชิงเส้น</li> <li>เมื่อ <math>Re_h</math> อยู่ในช่วง 1,200 ถึง 6,600 การไหลมีลักษณะเป็น Transitional flow ระยะ <math>X_r/S</math> ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อ <math>Re_h</math> เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการเกิด Velocity fluctuation ขึ้นในการไหล</li> <li>เมื่อ <math>Re_h</math> มากกว่า 6,600 การไหลมีลักษณะเป็น Turbulent flow และมีระยะ <math>X_r/S</math> คงที่ประมาณ 8</li> </ul>

Recirculating flow in BFS		พารามิเตอร์						ผลที่ได้จากการศึกษา
ลำดับที่	ชื่อนักวิจัย	$Re_h$	Expansion ratio	Area ratio	Aspect ratio	$\delta/S$	$X_r/S$	
4	Gosman et al. (1979)	$5 \times 10^4$	1.11 1.2 1.56	2.78 6 10.1			1.3 4 6.25	<ul style="list-style-type: none"> <li>ทำการศึกษา BFS ที่สมมาตรกันทั้งสองข้าง ด้วยการคำนวณ พบว่าระยะ Reattachment จะแปรตาม Expansion ratio</li> </ul>
5	Moss et al. (1979)	$5 \times 10^4$	1.099	11.03			$\sim 6$	<ul style="list-style-type: none"> <li>การทดลองแนะนำว่าควรให้ <math>\delta/S</math> น้อยกว่า 1 มากๆ เพื่อลดผลกระทบจาก Boundary layer</li> <li>ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของการไหลย้อนกลับ มีค่าประมาณ 0.2 เท่า ของความเร็วในกระแสการไหลหลัก</li> <li>พบ Secondary recirculation หมุนในทิศทางตรงข้าม ที่บริเวณมุมด้านล่างของ BFS</li> </ul>
6	Bradshaw and Wong (1972)		1.25	5	30	0.128	$\sim 6$	<ul style="list-style-type: none"> <li>ที่บริเวณหลังจุด Separation ลักษณะของ Boundary layer ที่เกิดขึ้นมีลักษณะต่างไปจาก Boundary layer ธรรมดา จากนั้นจึงค่อยๆ ปรับตัวเข้าสู่ภาวะสมดุลอย่างช้าๆ</li> </ul>

Equation	$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
Continuity	1	0	0
Navier-Stokes	$u_i$	$\mu$	$-\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i})$

ตารางที่ 2.1 ตัวแปร และค่าคงที่ต่างๆ ในสมการ 2.8

$t/H$	$\bar{C}_p$			$SD$		
	$Re$			$Re$		
	1	10	100	1	10	100
1.0	-9.7149	-0.5082	-0.1404	0.5253	0.0478	0.0081
0.92	-	-0.5082	-0.1409	-	-	0.0092
0.96	-9.71462	-	-0.1412	0.5252	0.0478	0.0120
0.84	-9.71472	-0.5085	-0.1425	0.5252	0.0479	0.0191
0.76	-9.71010	-0.5745	-0.1422	0.5251	0.0479	0.0264
0.68	-9.6928	-0.5016	-0.1381	0.5245	0.0478	0.0330
0.60	-9.7068	-0.5065	-0.1418	0.5258	0.0480	0.0396
0.40	-9.6975	-0.5024	-0.1358	0.5294	0.0490	0.0495
0.30	-	-	-0.1364	-	-	0.0541
0.20	-9.7073	-0.5045	-0.1334	0.5513	0.0565	0.0554
0.10	-	-	-0.1345	-	-	0.0597
0.08	-9.7292	-0.5106	-0.1362	0.6705	0.0965	0.0646
Total average	-9.7098	-0.5064	-0.1386	0.5447	0.0544	0.0359

ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความดันเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน สำหรับการไหลภายในห้องที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ และช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ

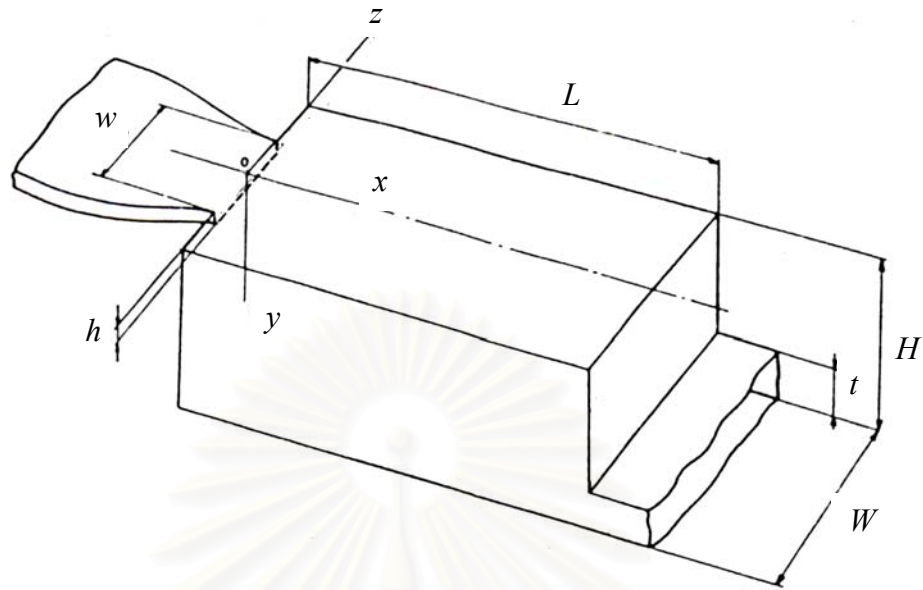
	$Re$	$\delta_c$
Laminar (Present study)	100	$\sim 0.60H$
Turbulent (Stitsuwongkul and Bunyajitradulya, 2000)	1,000	$\sim 0.76H$
	8,800	$\sim 0.24H$

ตารางที่ 4.1 ค่า  $\delta_c$  ที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 100, 1,000 และ 8,800

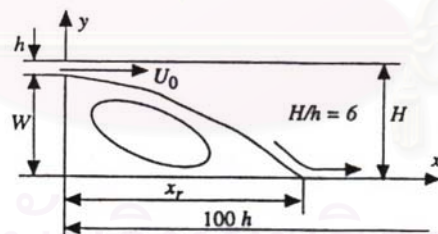


# ประมวลรูปภาพ

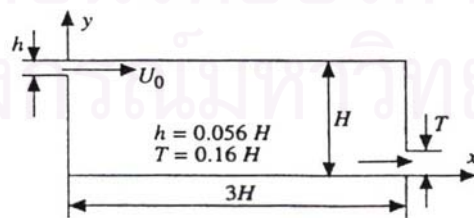
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1.1 ลักษณะของห้องที่ใช้ในการศึกษาของ Nielsen et al. (1978)



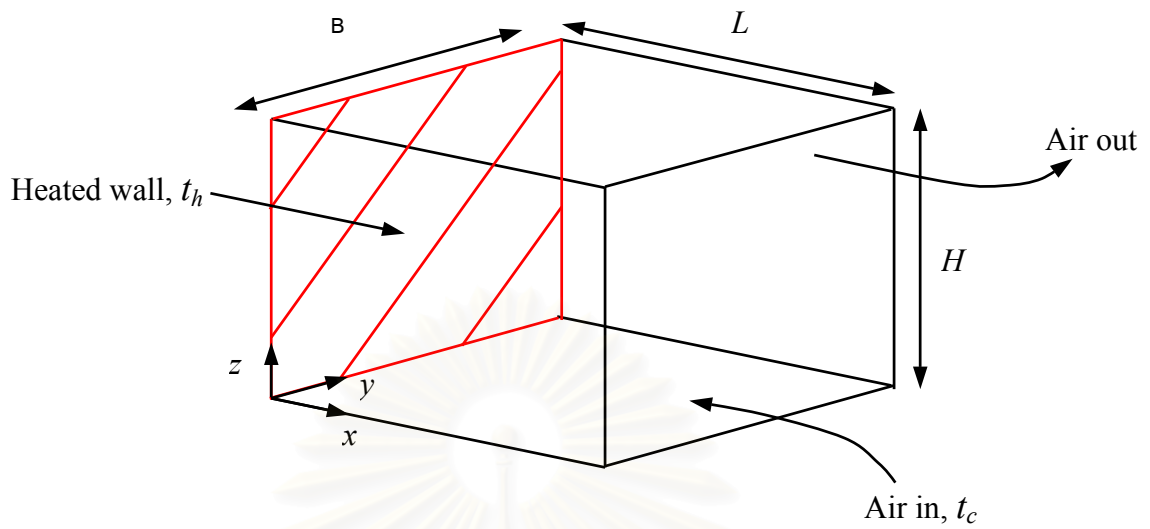
a) Backward facing step



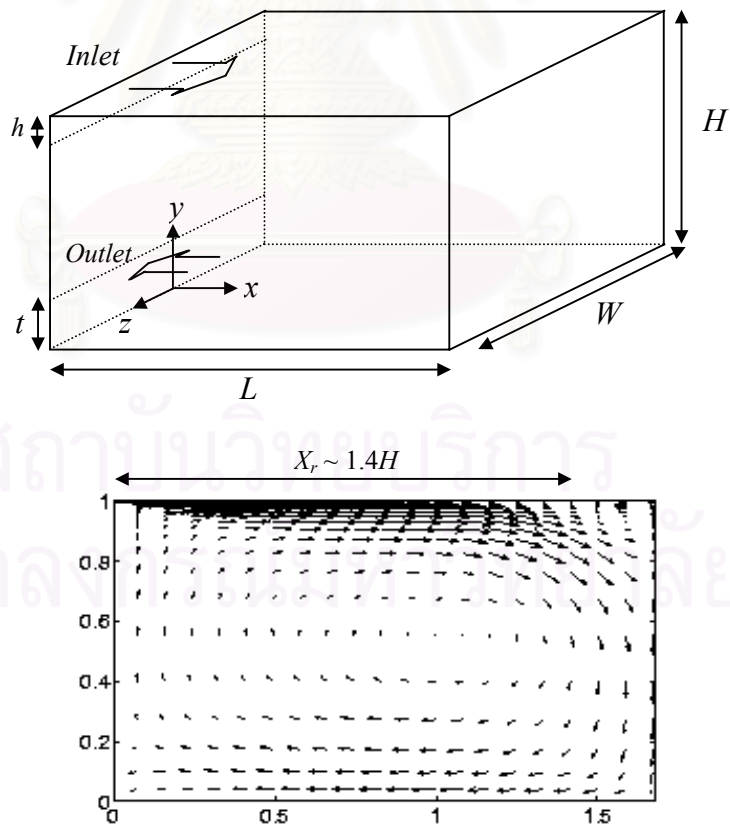
b) Confined ventilation enclosure

รูปที่ 1.2 ลักษณะของ BFS และ Confined ventilation enclosure  
ในการศึกษาของ Peng et al. (1997)

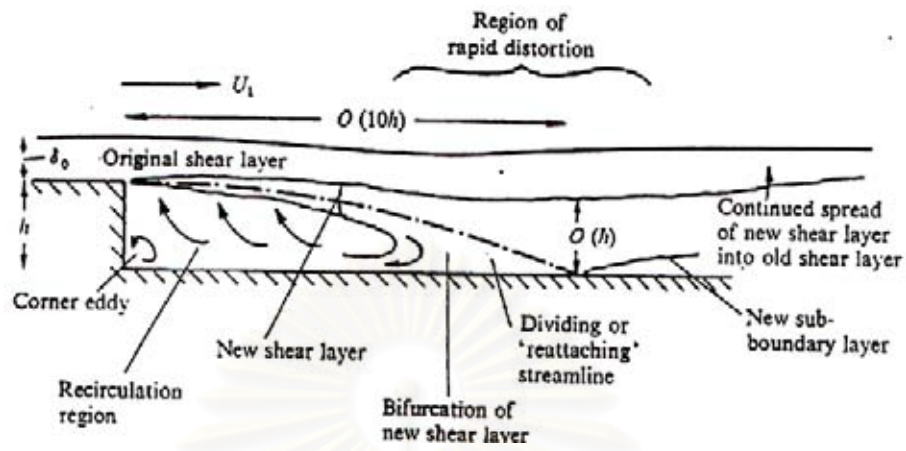




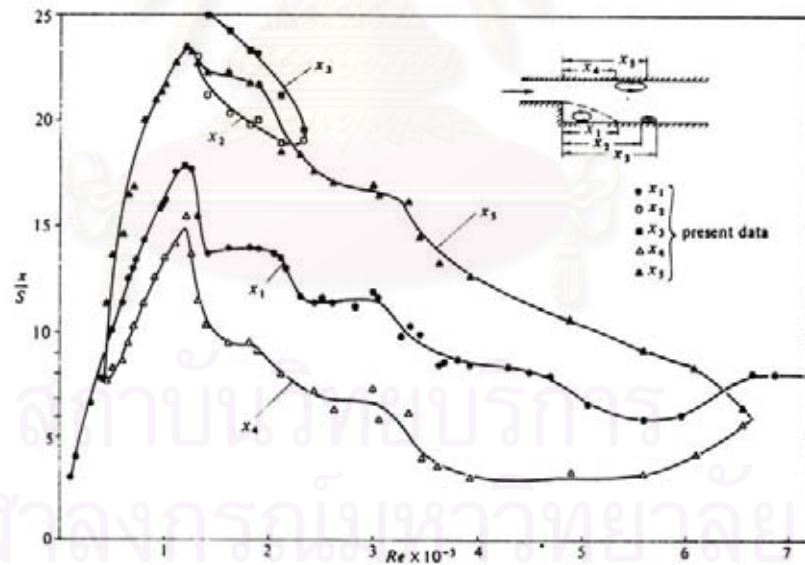
รูปที่ 1.3 ลักษณะของห้องที่ใช้ในการศึกษาของ Sezai and Mohamad (1998)



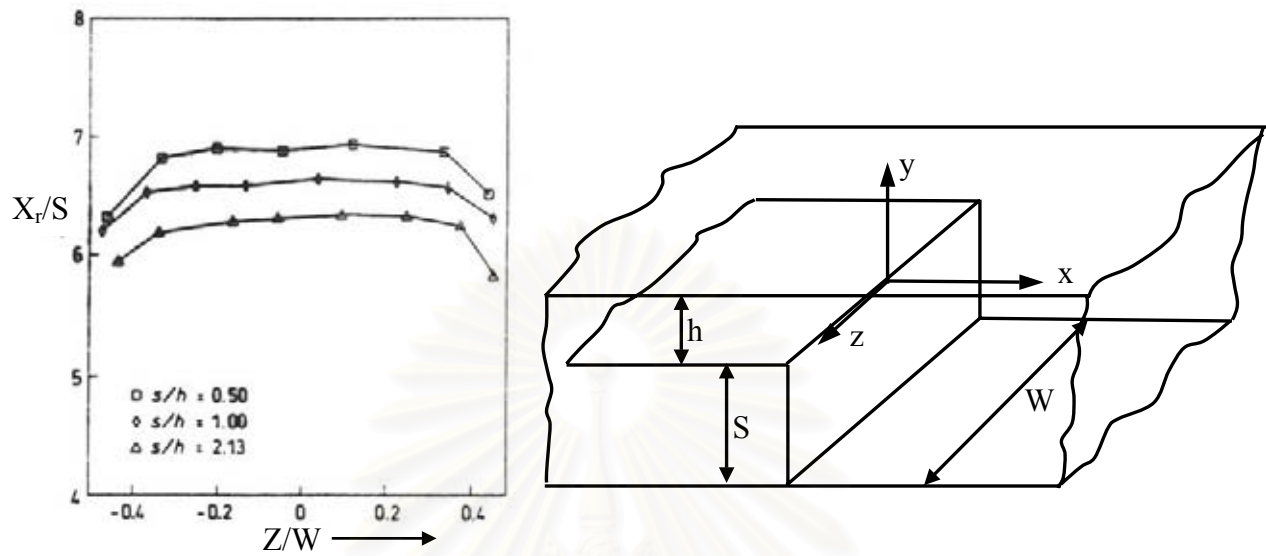
รูปที่ 1.4 ลักษณะของห้อง ระบบแกนพิกัด (บน) และผลการคำนวณด้วย LES (ล่าง) จากการ  
ศึกษาของ Davidson et al. (2000)



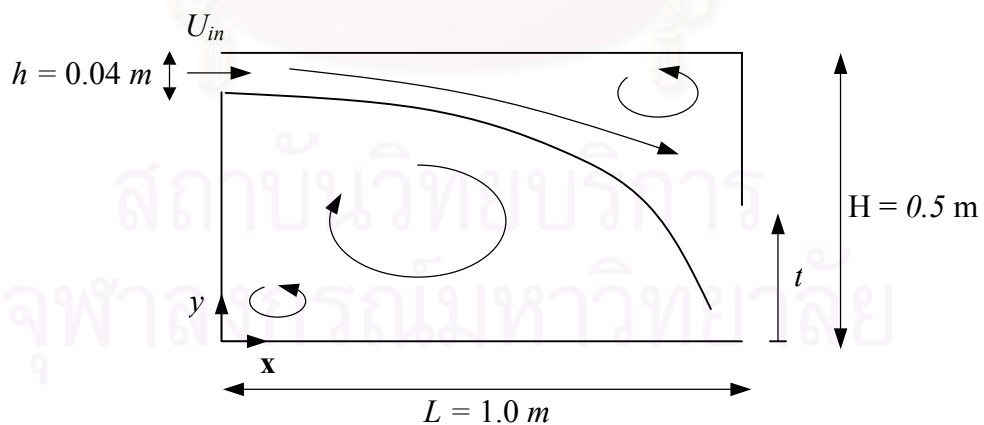
รูปที่ 1.5 ลักษณะการไหลผ่าน Backward facing step ในการศึกษาของ Bradshaw and Wong (1972)



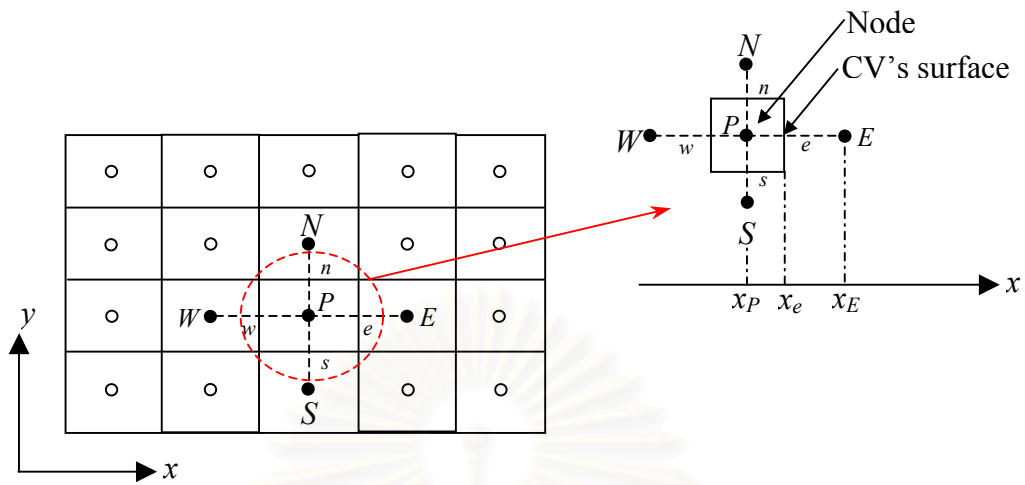
รูปที่ 1.6 กราฟแสดงผลการวัดระยะ Reattachment ตามการเปลี่ยนแปลงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ของ Armaly et al. (1983)



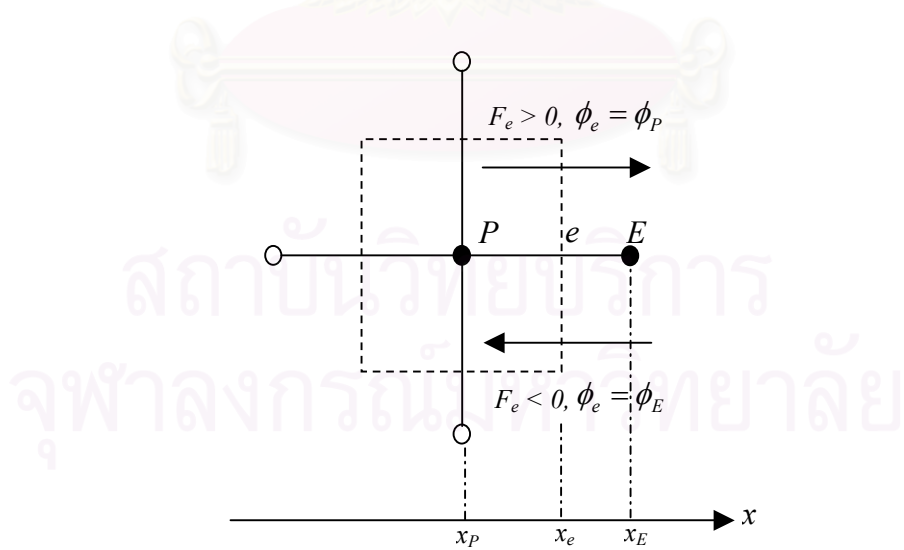
รูปที่ 1.7 กราฟแสดงผลของ Expansion ratio ต่อระยะ Reattachment (ซ้าย) และระบบแกนพิกัด (ขวา) ที่ใช้ในงานวิจัยของ Otugen (1991)



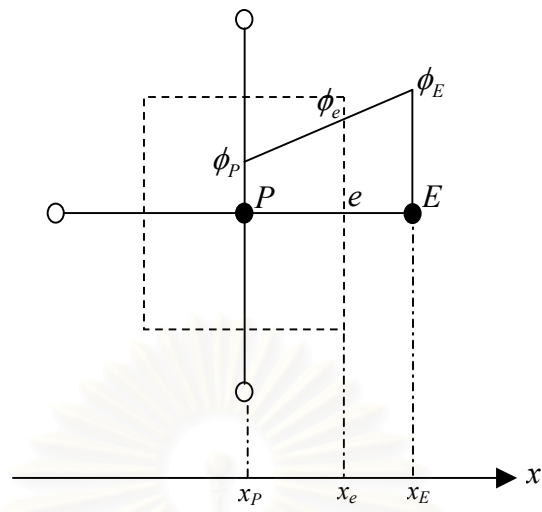
รูปที่ 1.8 ลักษณะของ Ventilated chamber และระบบพิกัดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



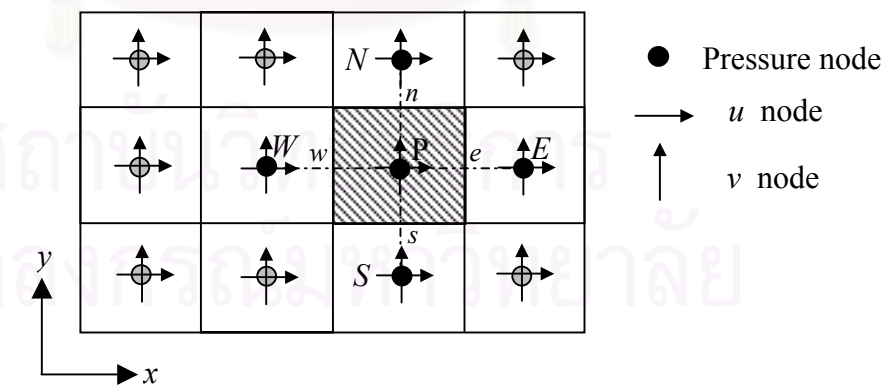
รูปที่ 2.1 ขอบเขตของปัญหาที่ถูกแบ่งออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็ก ๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม



รูปที่ 2.2 ลักษณะการประมาณแบบ Upwind differencing scheme

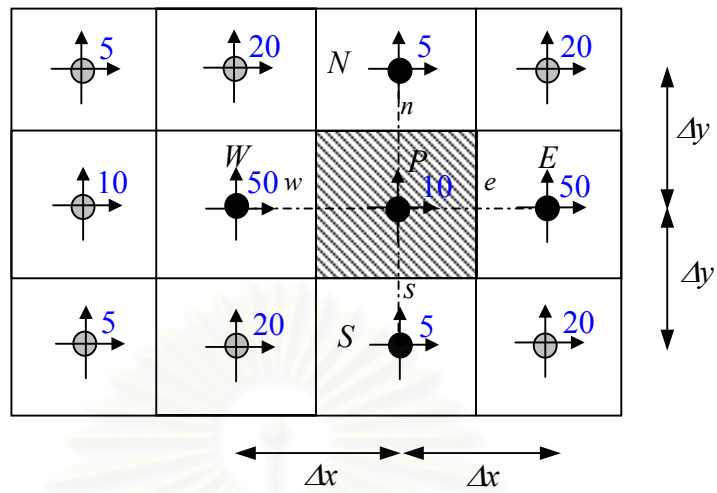


รูปที่ 2.3 ลักษณะการประมาณแบบ Central differencing scheme



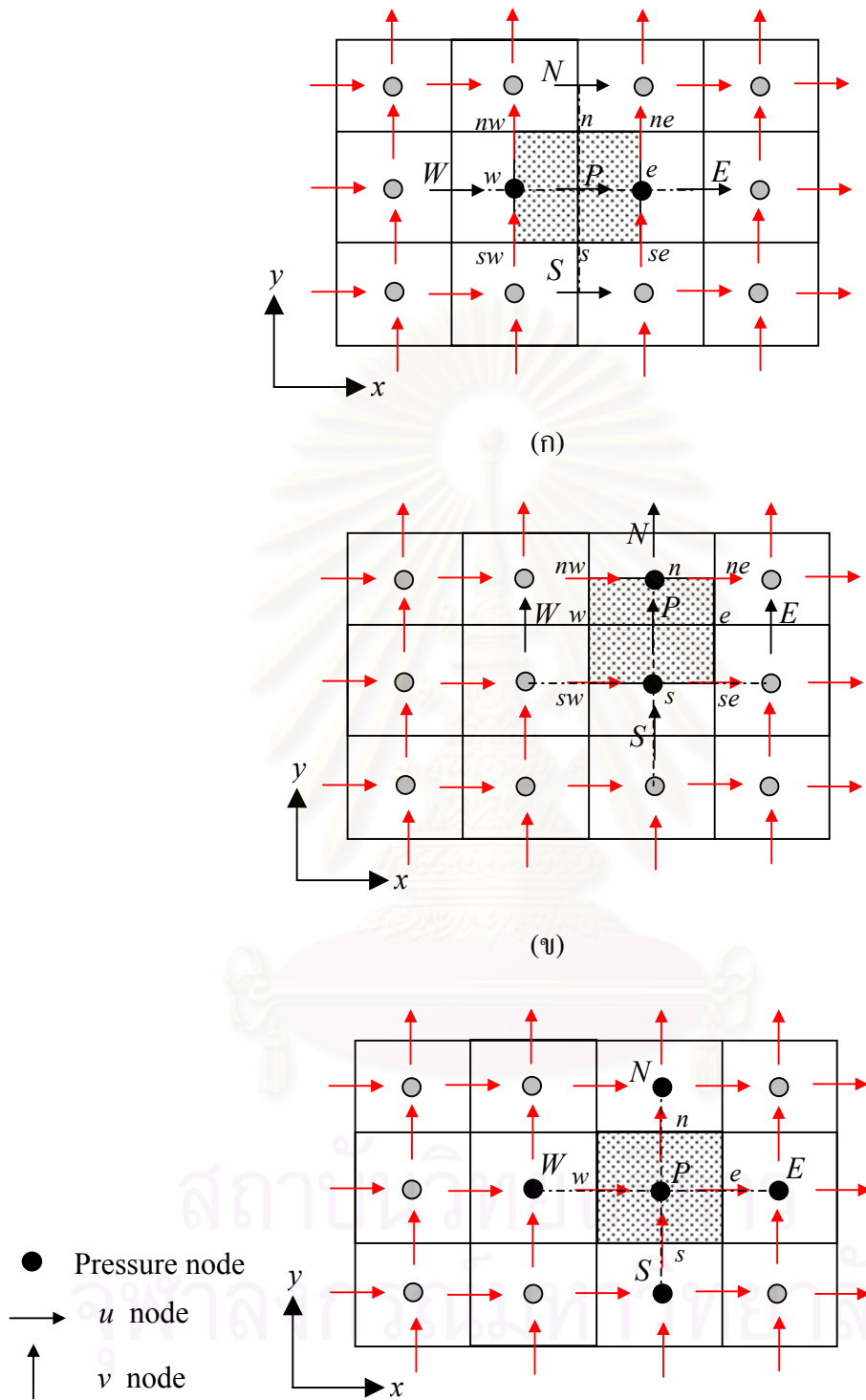
รูปที่ 2.4 การวางกริดแบบ Colocated grid arrangement



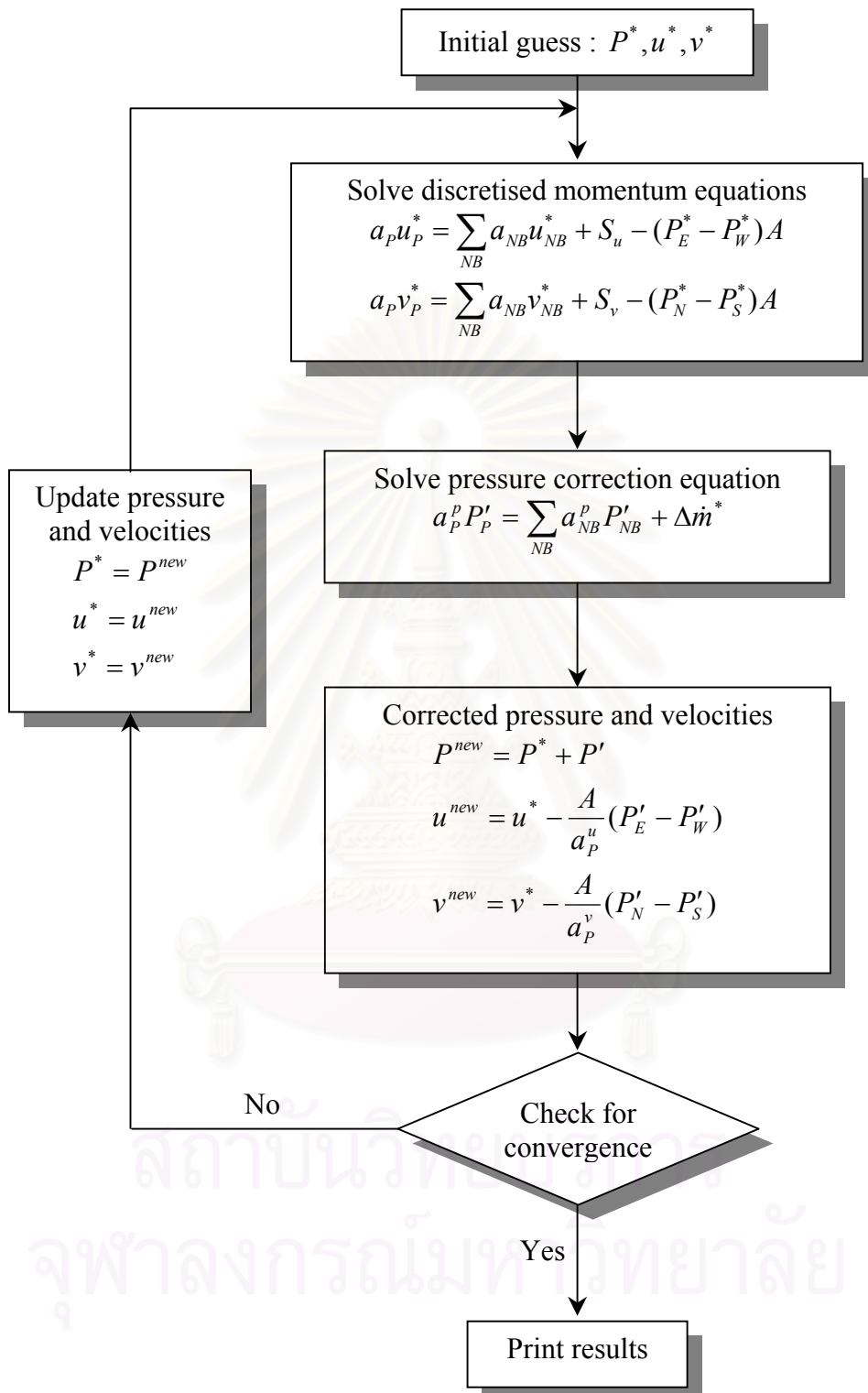


รูปที่ 2.5 การกระจายความดันแบบ Checker board

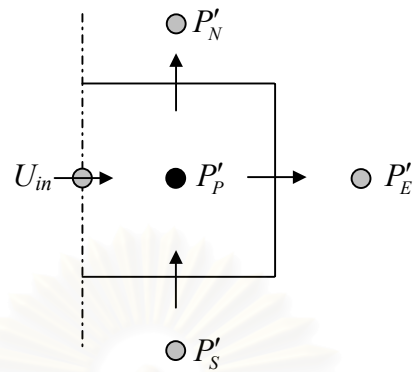
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



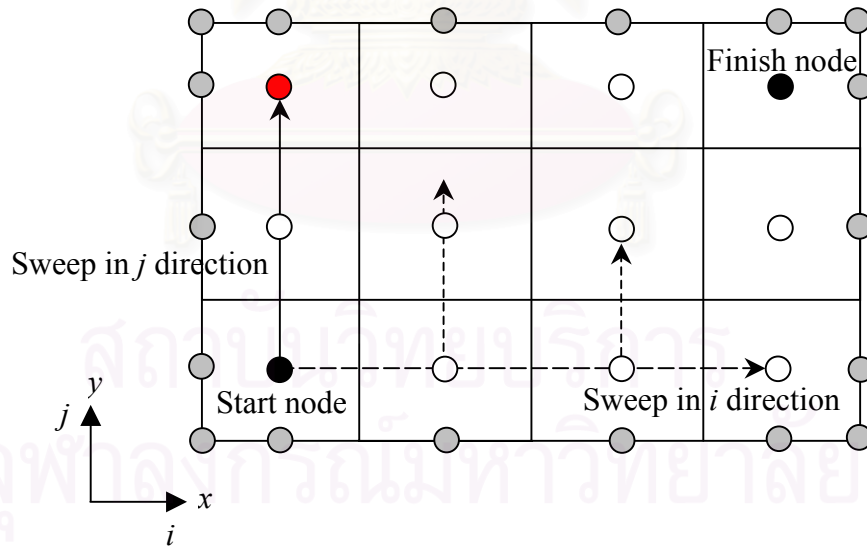
รูปที่ 2.6 การวางกริดแบบ Staggered grid arrangement  
 (ก) ปริมาตรควบคุมที่ล้อมรอบ  $u$  node  
 (ข) ปริมาตรควบคุมที่ล้อมรอบ  $v$  node  
 (ค) ปริมาตรควบคุมที่ล้อมรอบ Pressure node



รูปที่ 2.7 แผนภูมิขั้นตอนการคำนวณแบบ SIMPLE

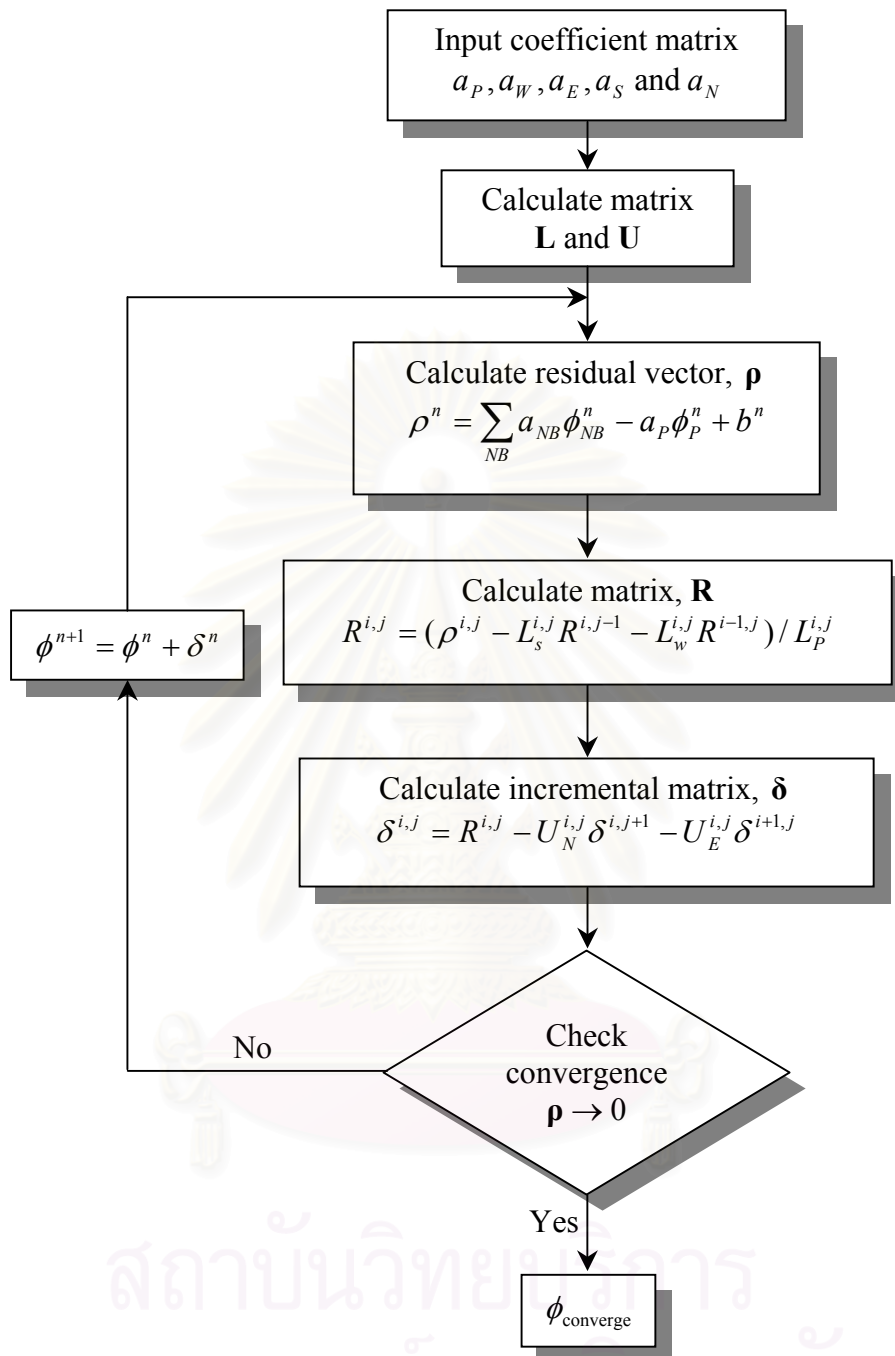


รูปที่ 2.8 ปริมาตรควบคุมของความดันแก้ไข ( $P'$ ) ที่อยู่ติดกับช่องทางเข้า

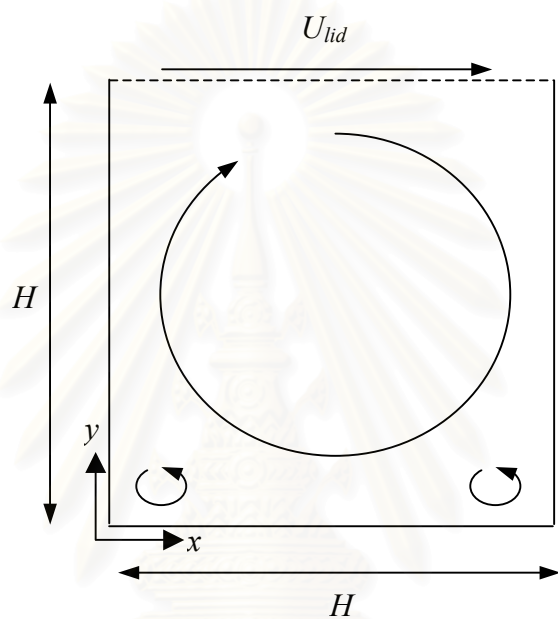


Sweep in  $j$  direction for each  $i$  location.

รูปที่ 2.9 ทิศทางการคำนวณค่าของแต่ละเอลิเมนต์ในเมตริกซ์  $L$ ,  $U$  และ  $R$



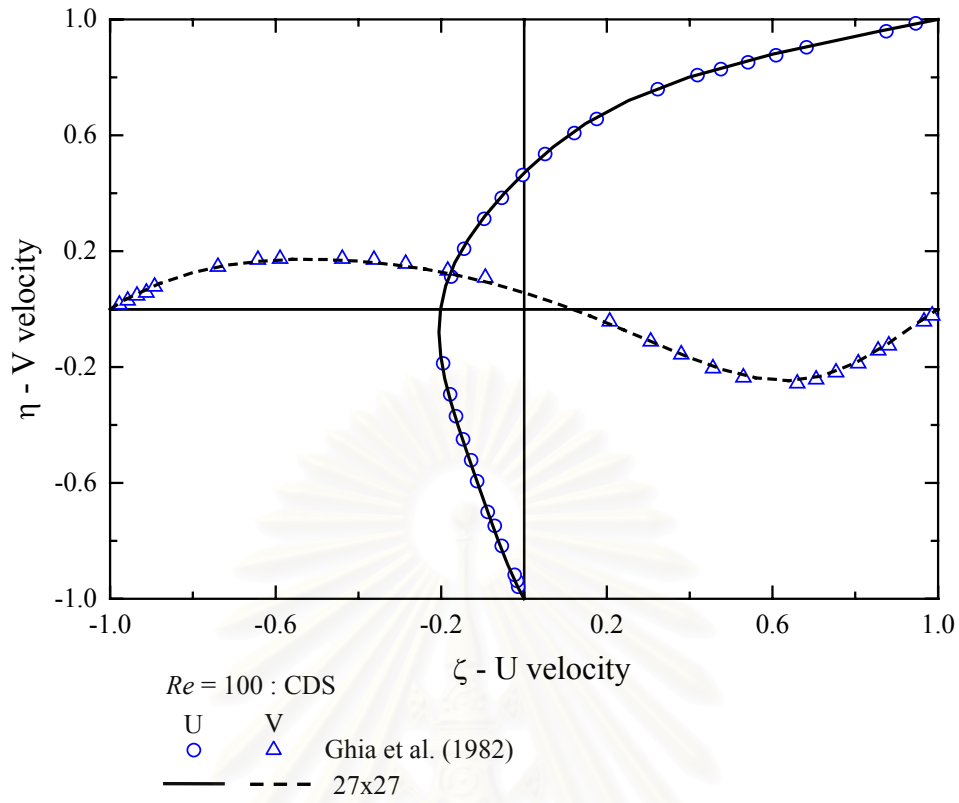
รูปที่ 2.10 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทำงานของ Strongly Implicit Procedure (Stone ,1968)



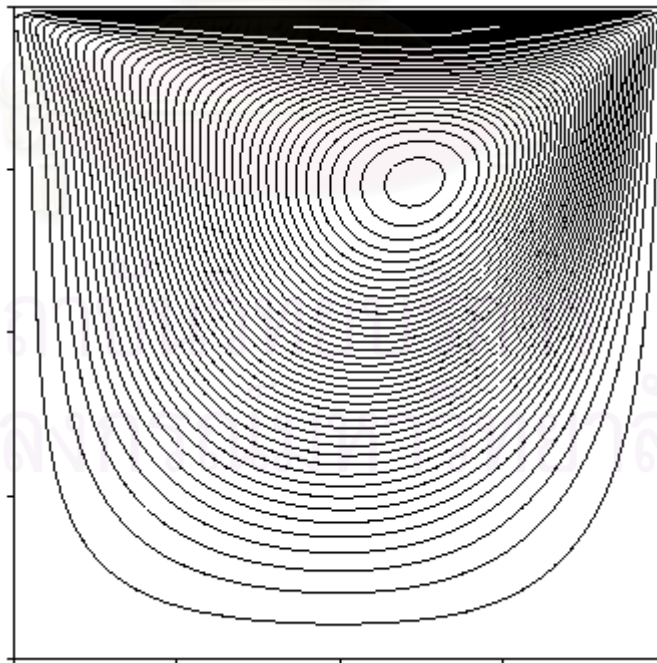
รูปที่ 3.1 ลักษณะการไหลภายในช่องว่าง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

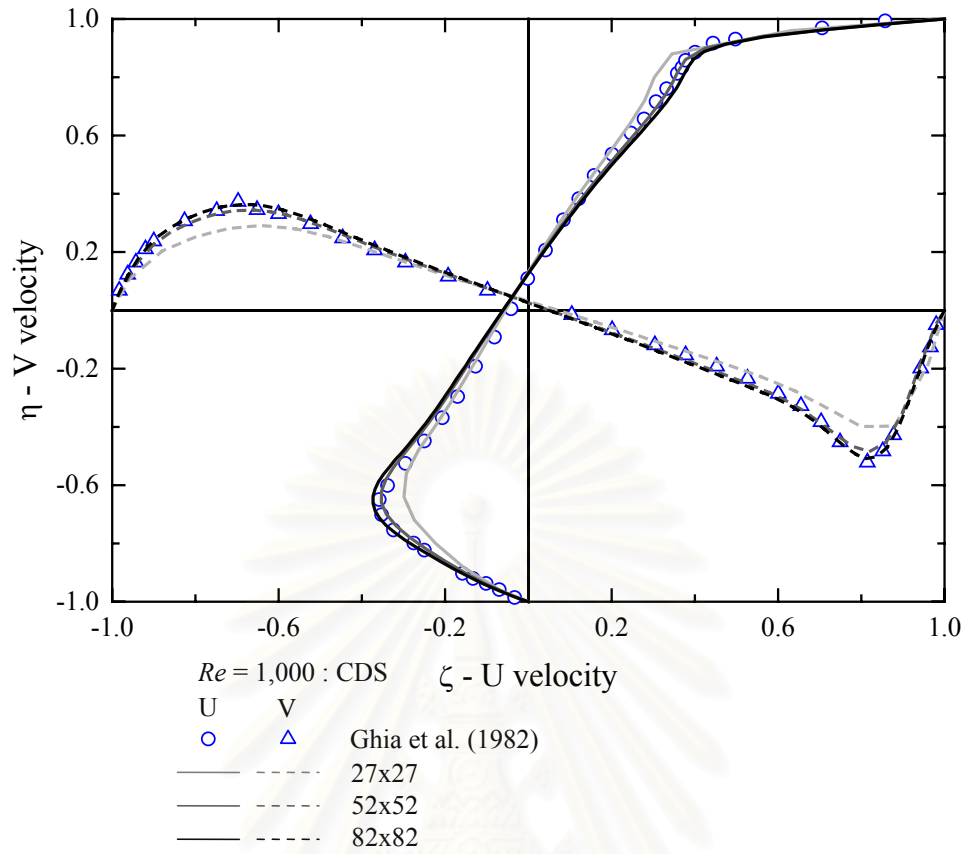




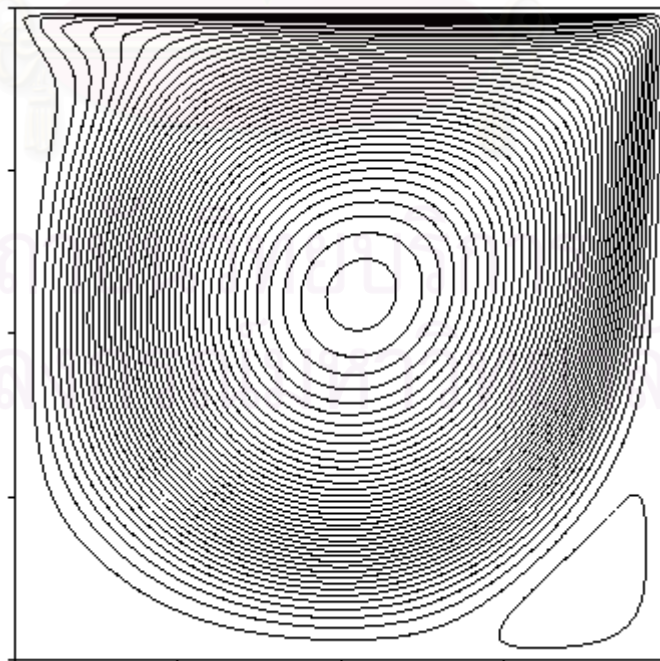
รูปที่ 3.2 รูปร่างความเร็วของการไหลภายในช่องว่างที่  $Re = 100$



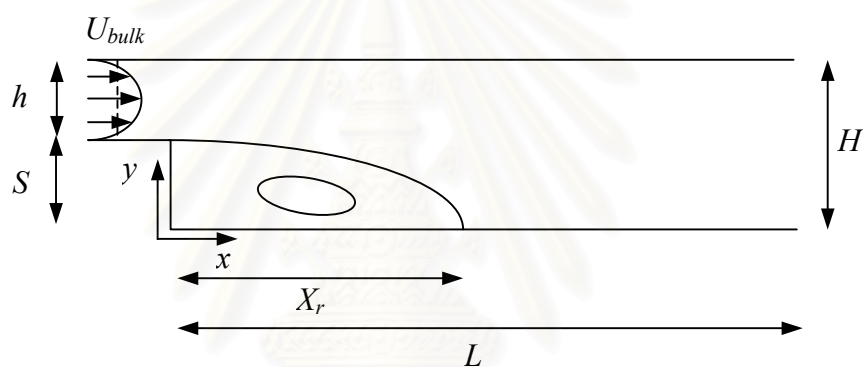
รูปที่ 3.3 Stream line contour ของการไหลภายในช่องว่างที่  $Re = 100$  (82x82)



รูปที่ 3.4 รูปร่างความเร็วของการไหลภายในช่องว่างที่  $Re = 1,000$

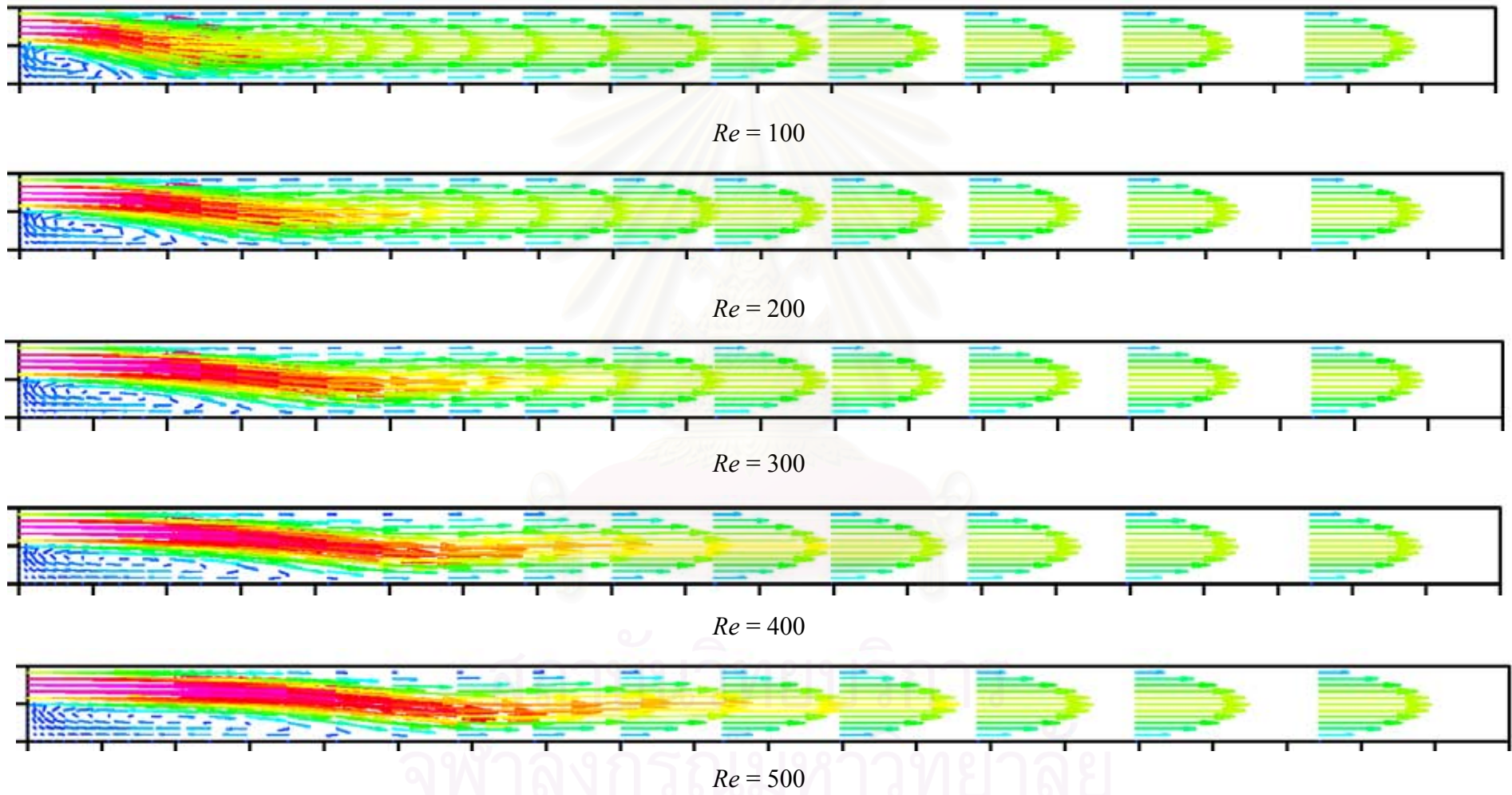


รูปที่ 3.5 Stream line contour ของการไหลภายในช่องว่างที่  $Re = 1,000$  (82x82)

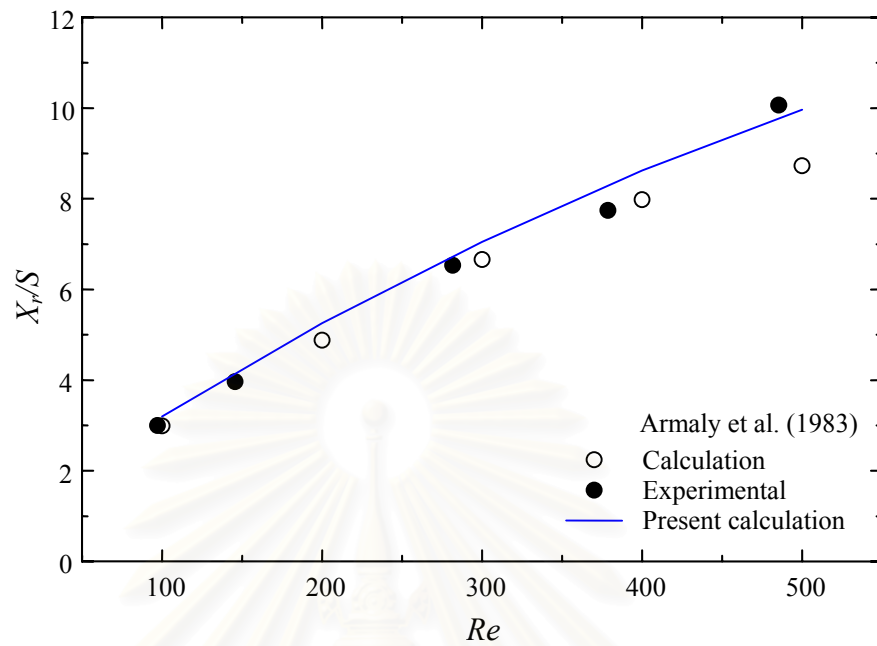


รูปที่ 3.6 ลักษณะการไหลผ่าน Backward facing step

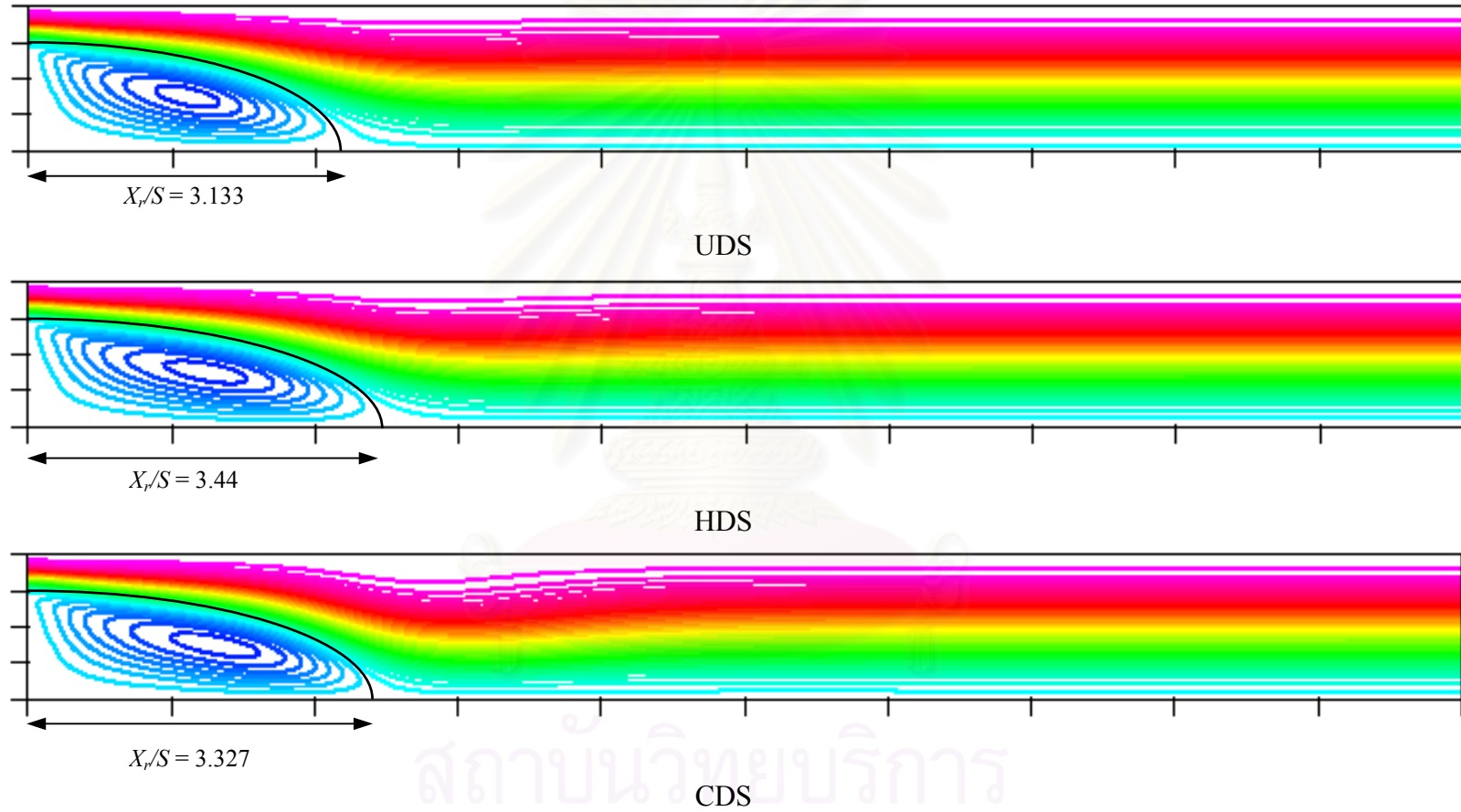
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.7 การไหลผ่าน BFS (Expansion ratio = 1.94) ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ

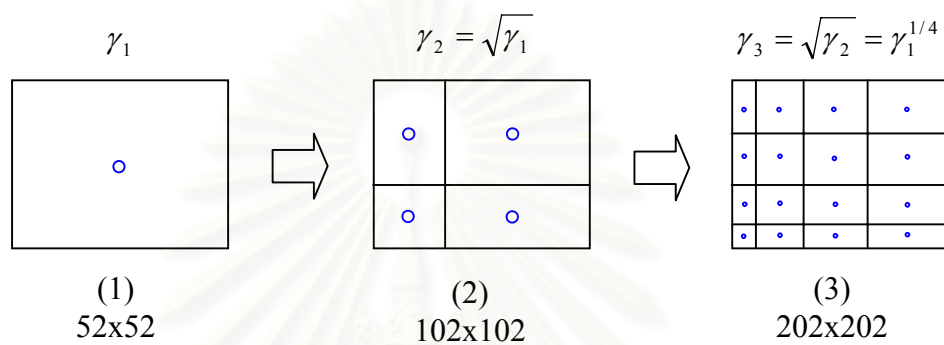


รูปที่ 3.8 ระยะ Reattachment จากการคำนวณที่ค่าเรย์โนลด์คัมเบอร์ต่างๆ เปรียบเทียบกับผลของ Armaly et al. (1983)



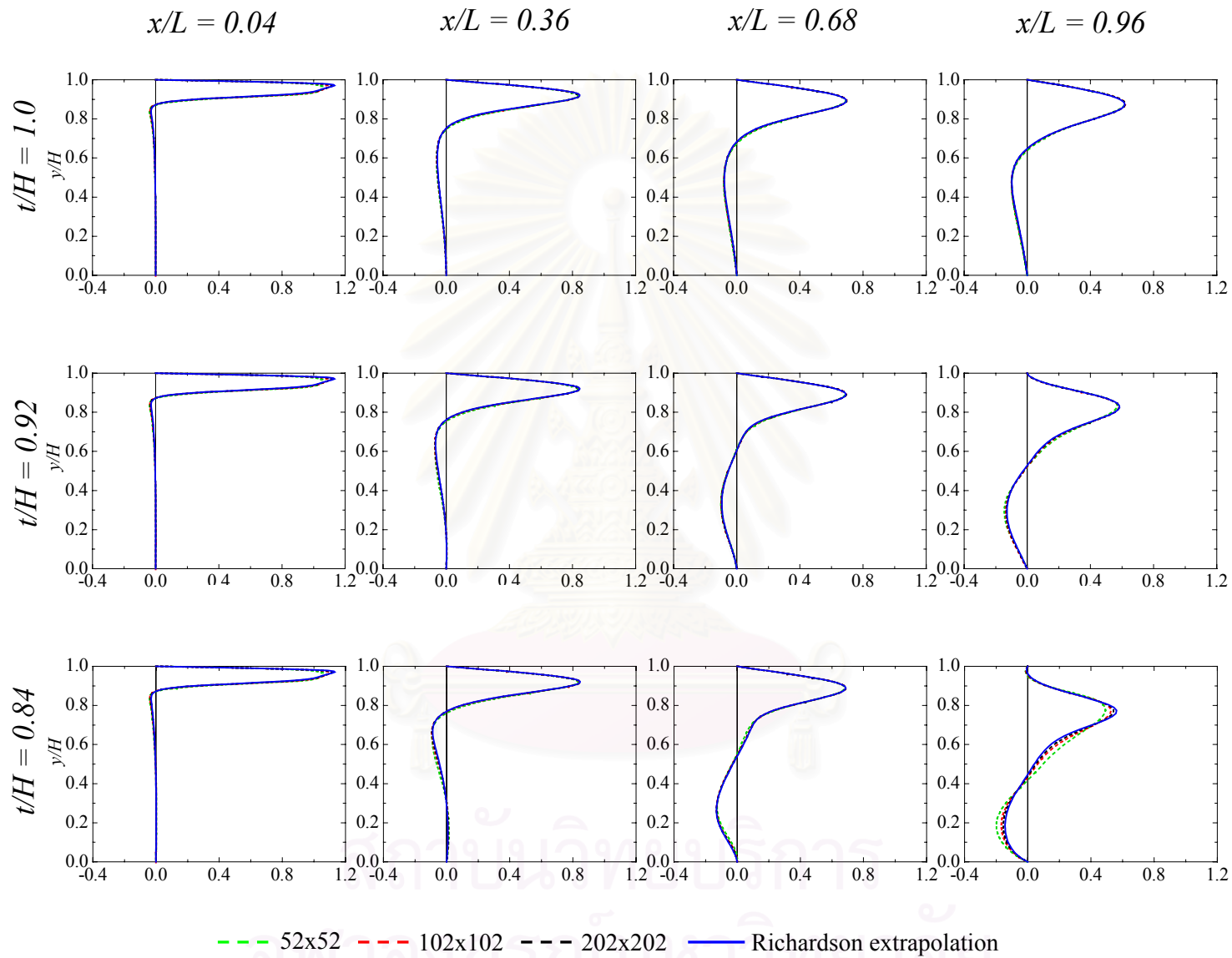
รูปที่ 3.9 การไหลผ่าน BFS (Expansion ratio = 4.0) ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 100



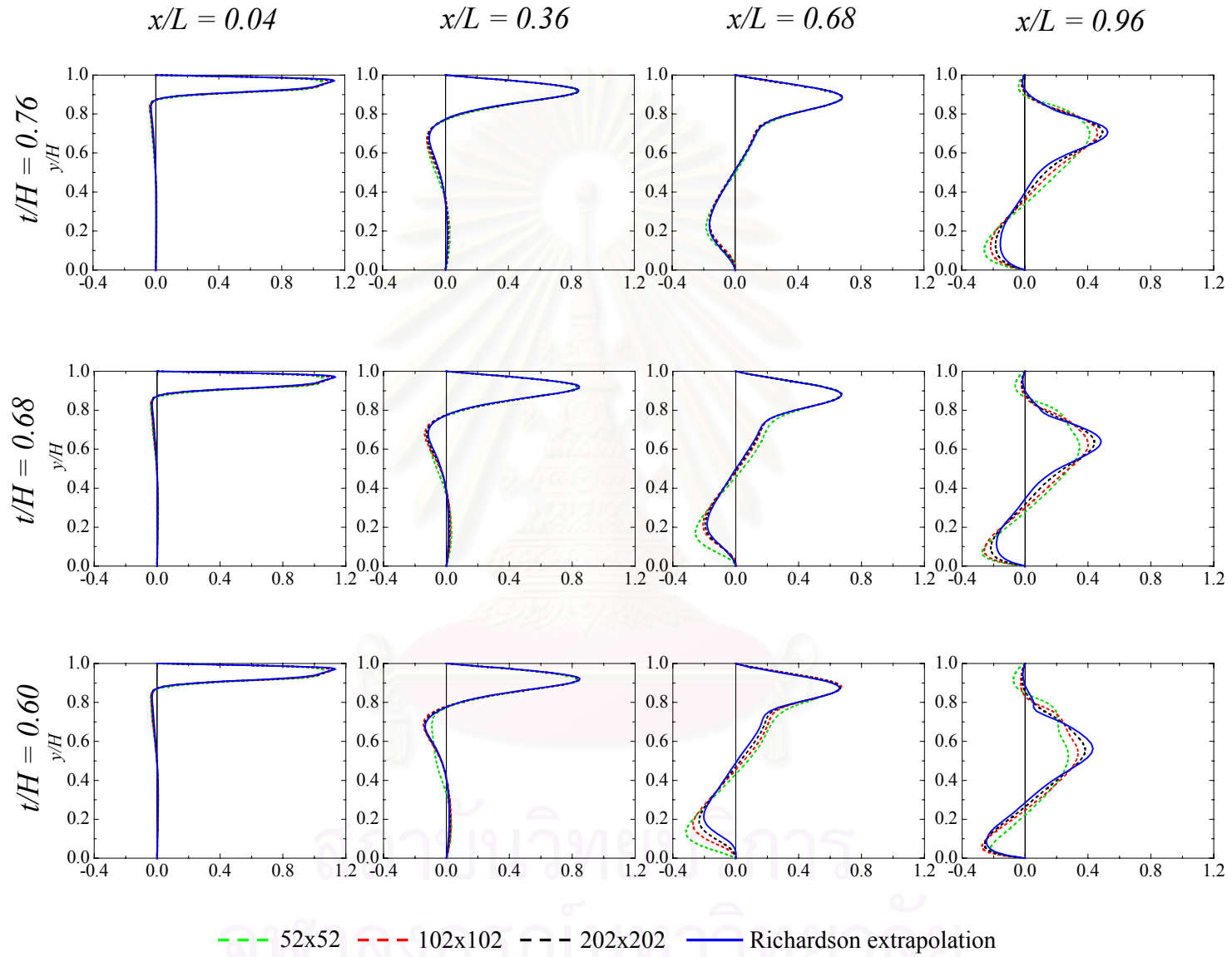


รูปที่ 3.10 ลักษณะและความสัมพันธ์ของกริดทั้ง 3 ขนาด

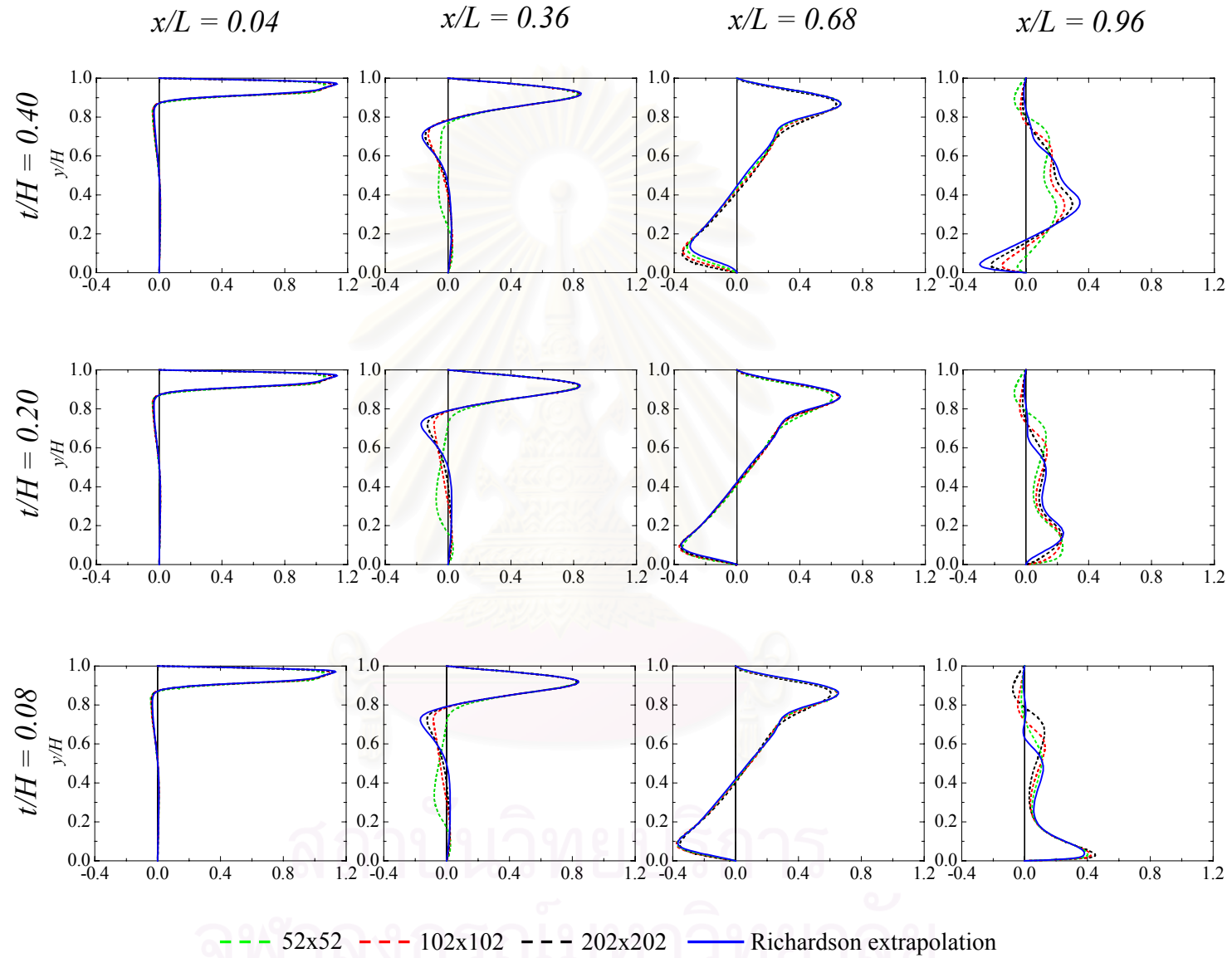
สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



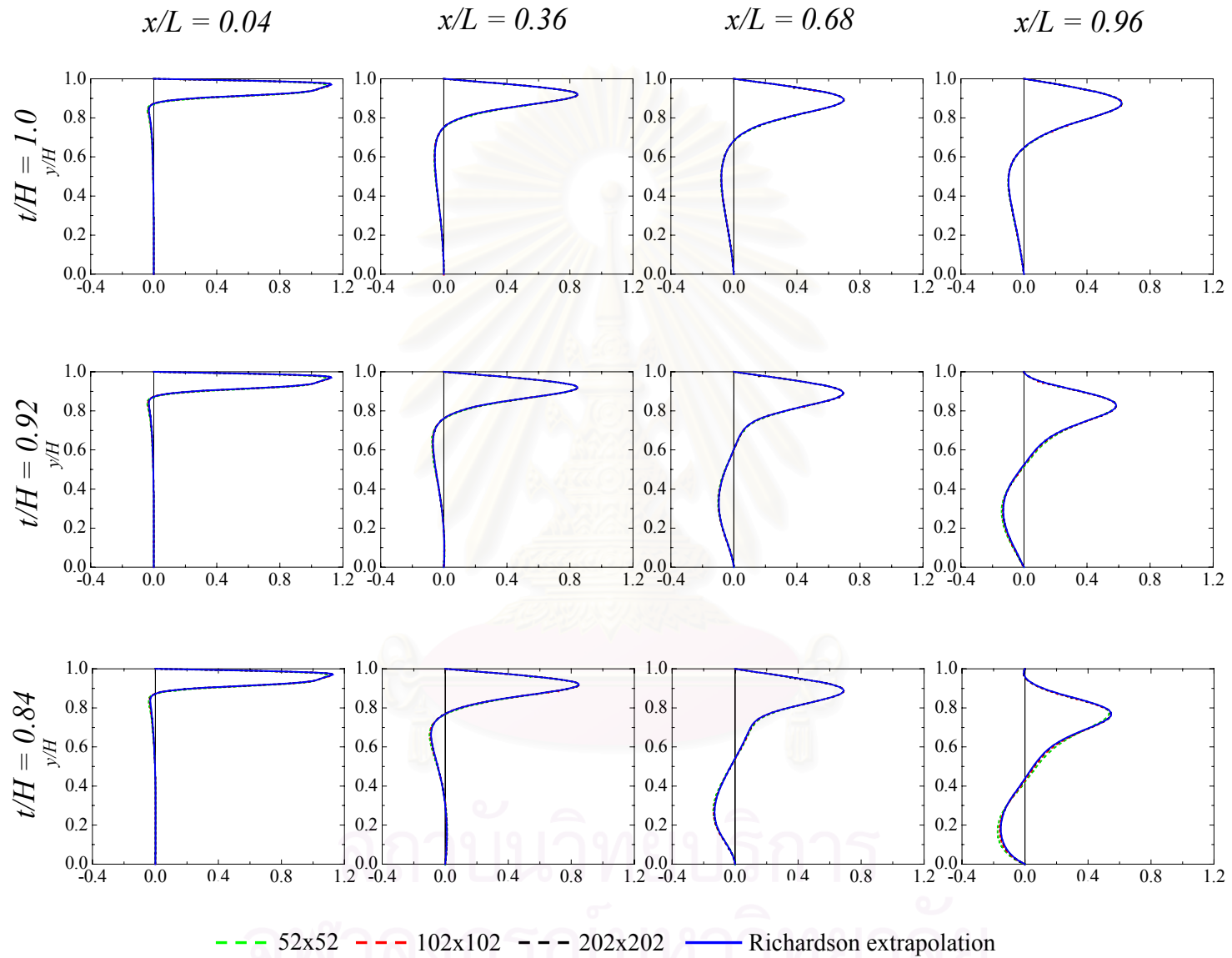
รูปที่ 3.11 รูปร่างความเร็วจากการคำนวณด้วยวิธี HDS บนกริดขนาดต่างๆ



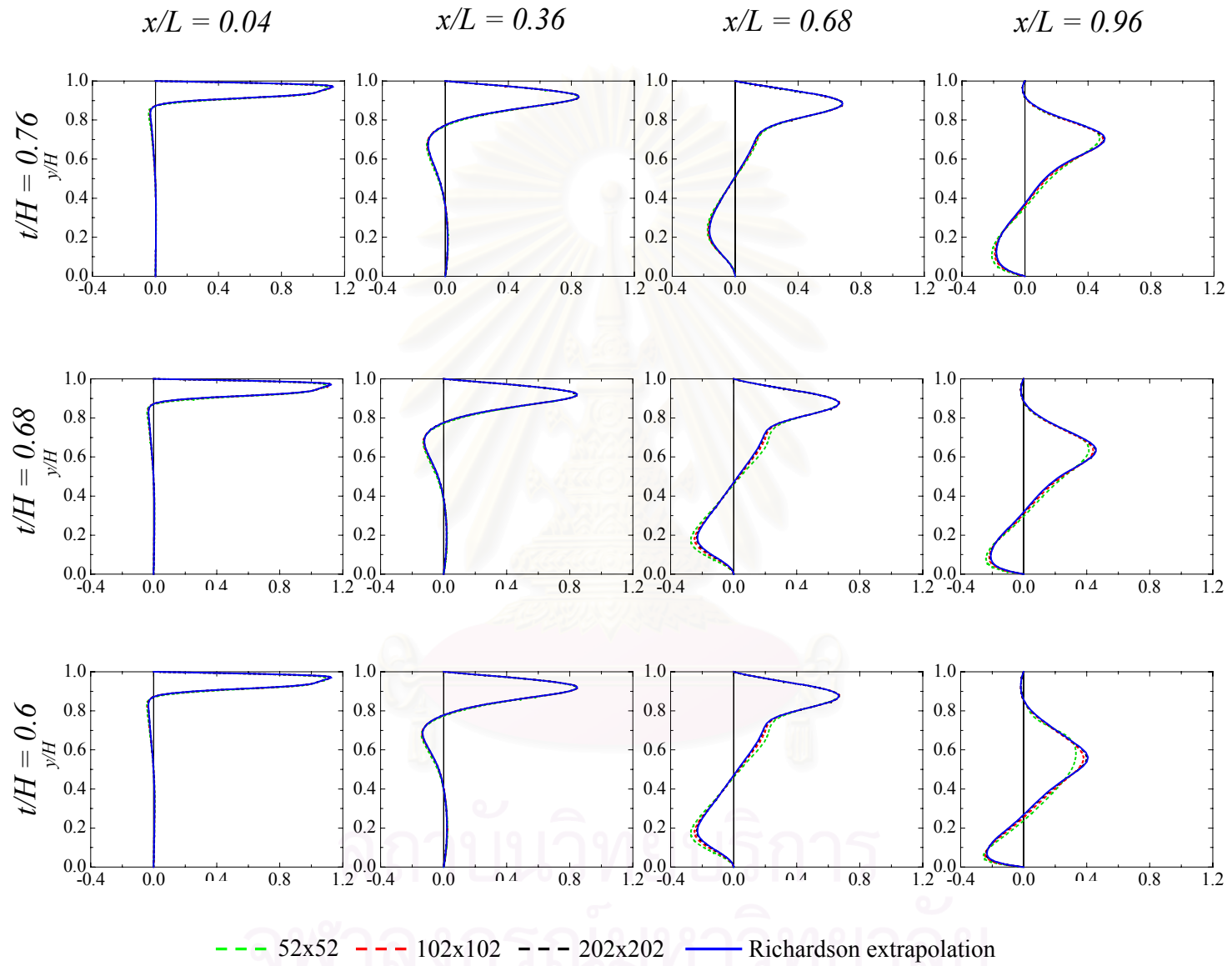
รูปที่ 3.11 (ต่อ)



รูปที่ 3.11 (ต่อ)

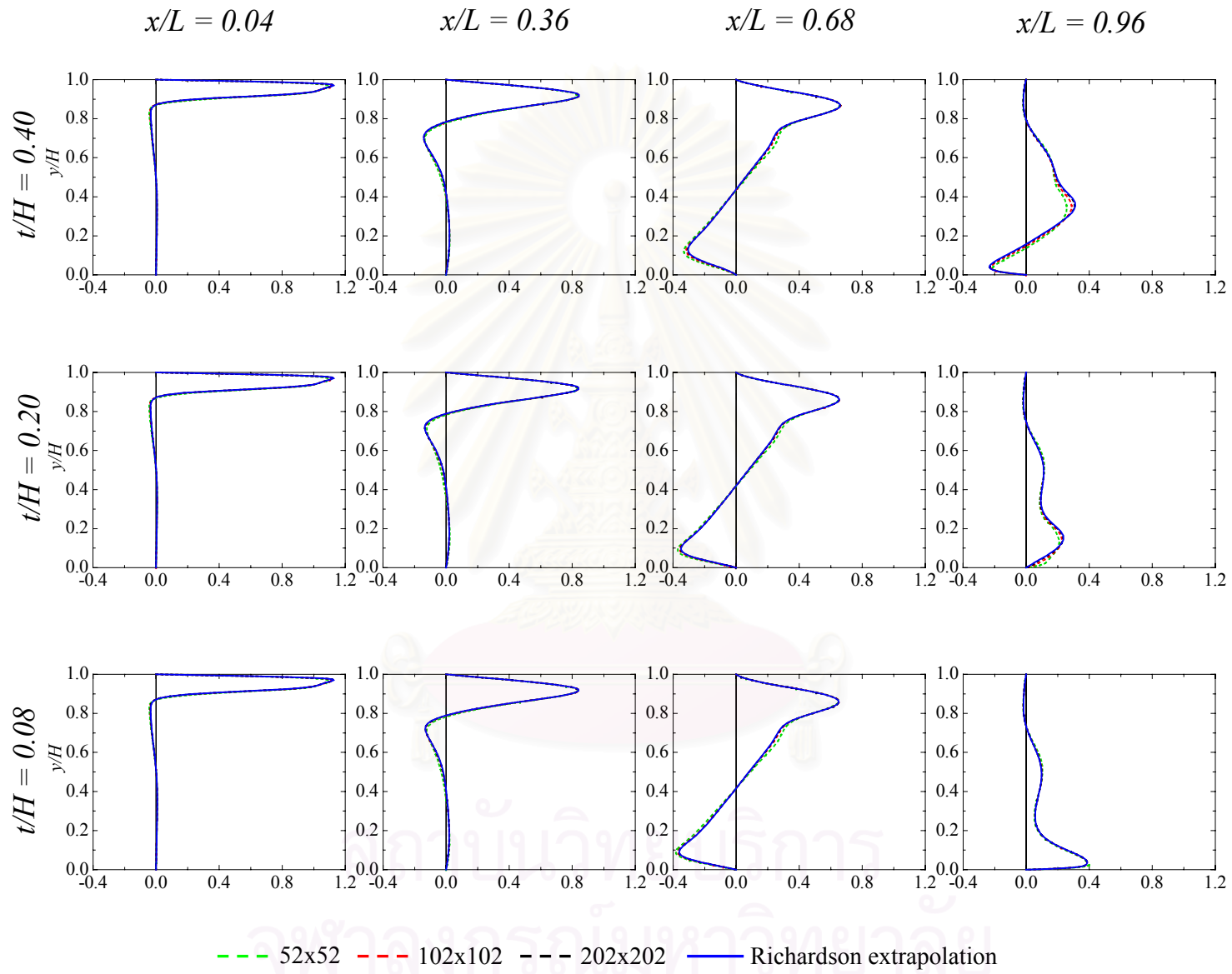


รูปที่ 3.12 รูปร่างความเร็วจากการคำนวณด้วยวิธี CDS บนกริดขนาดต่างๆ

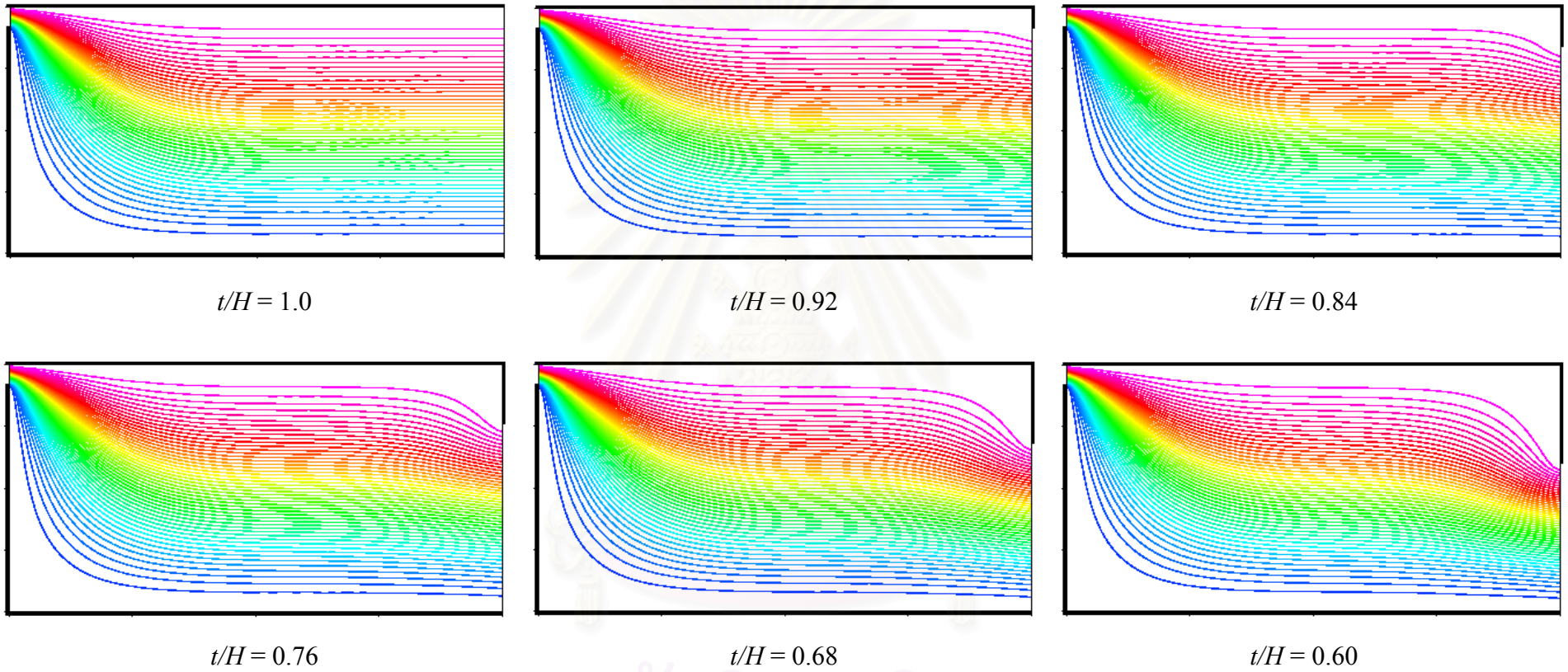


รูปที่ 3.12 (ต่อ)



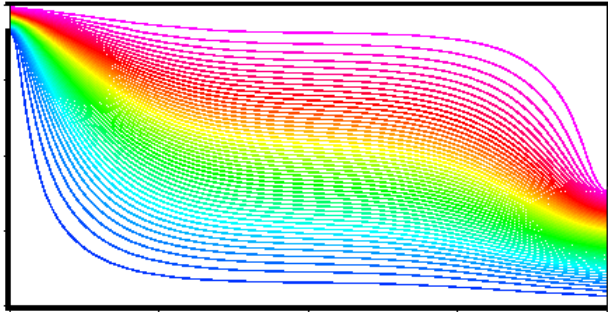


รูปที่ 3.12 (ต่อ)

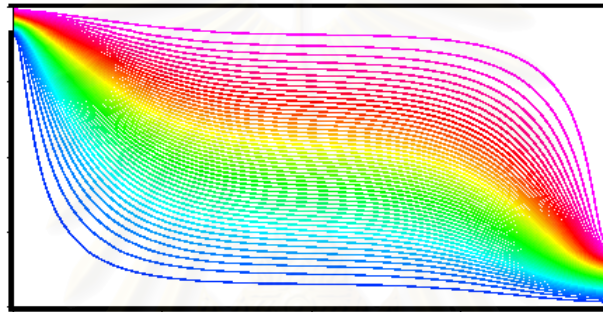


รูปที่ 3.13 Stream line contour ของการไหลภายในห้องที่  $Re = 1$  สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ

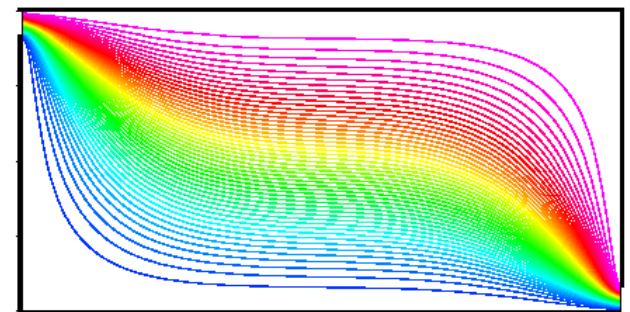
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



$t/H = 0.40$



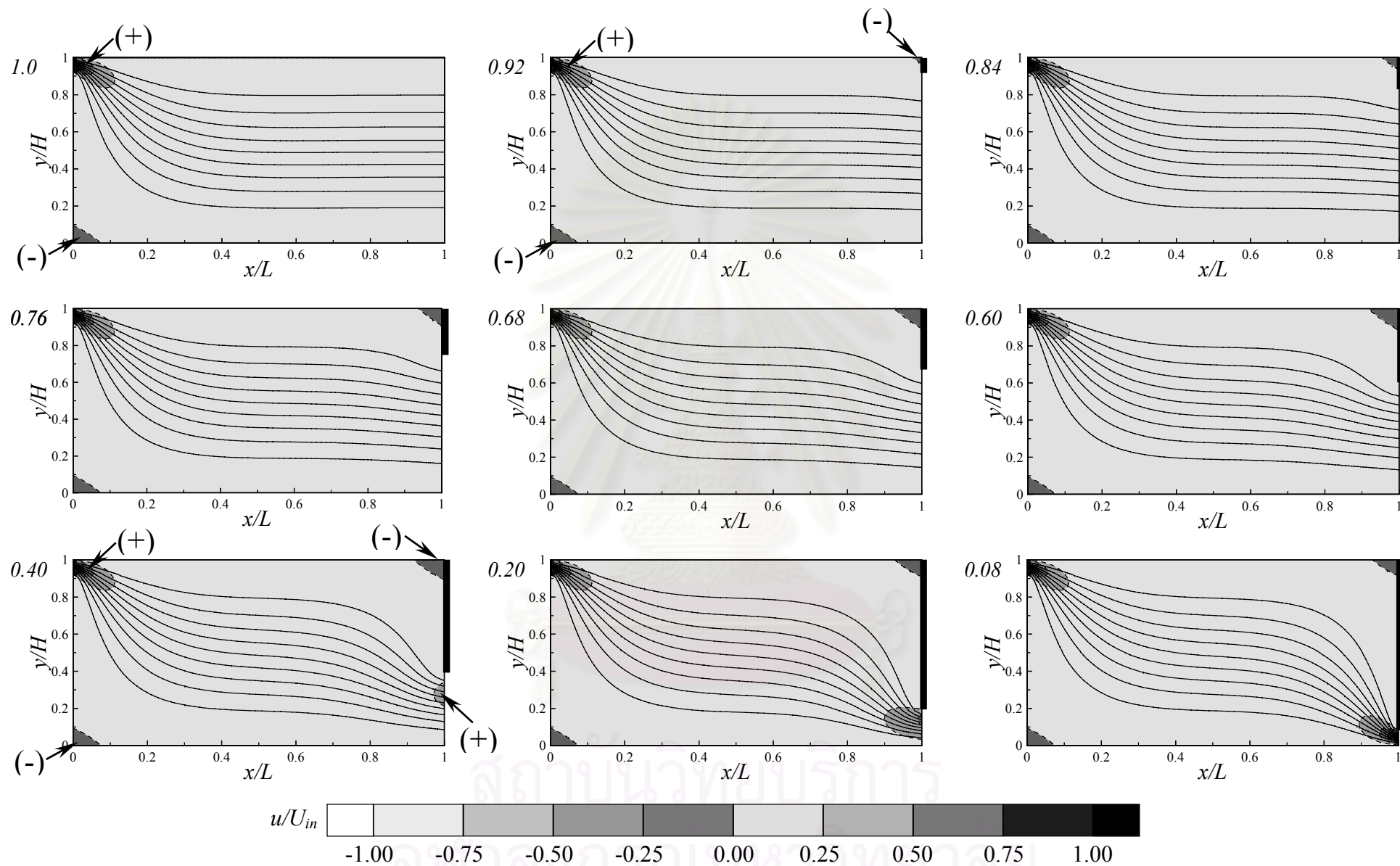
$t/H = 0.20$



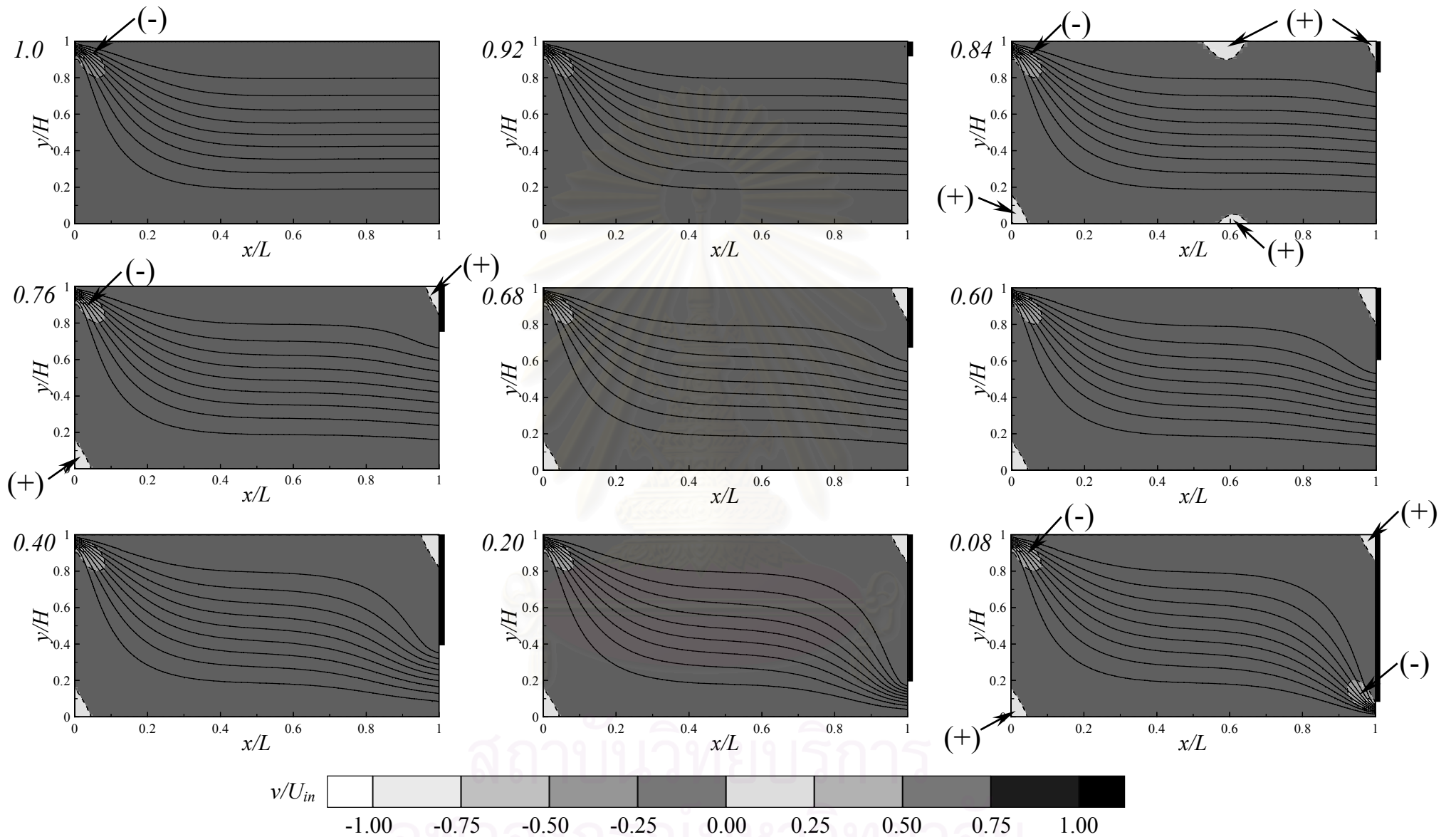
$t/H = 0.08$

รูปที่ 3.13 (ต่อ)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

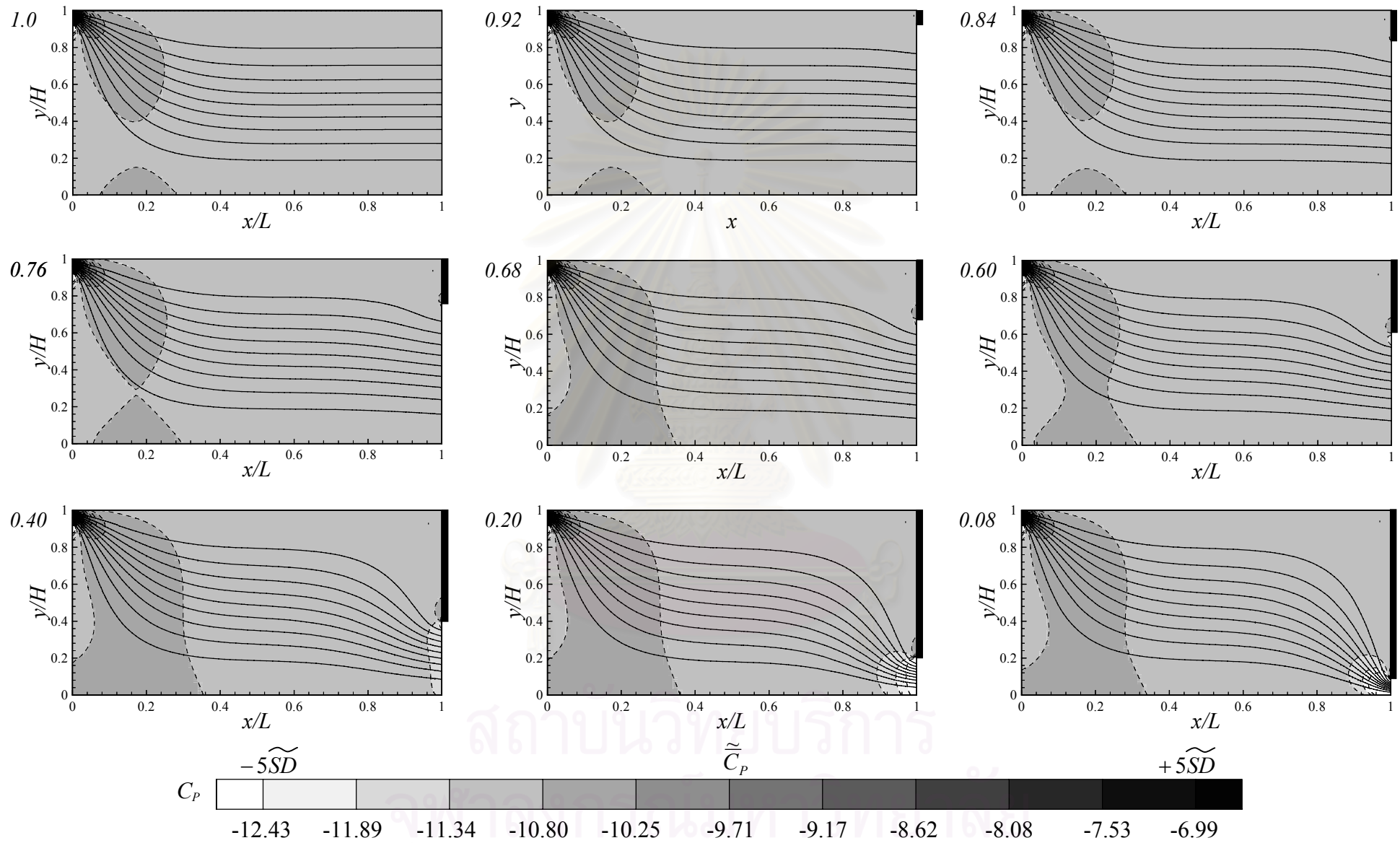


รูปที่ 3.14 การกระจายตัวของความเร็ว  $u/U_{in}$  และ Stream line ของการไหลภายในห้องที่  $Re = 1$  สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ



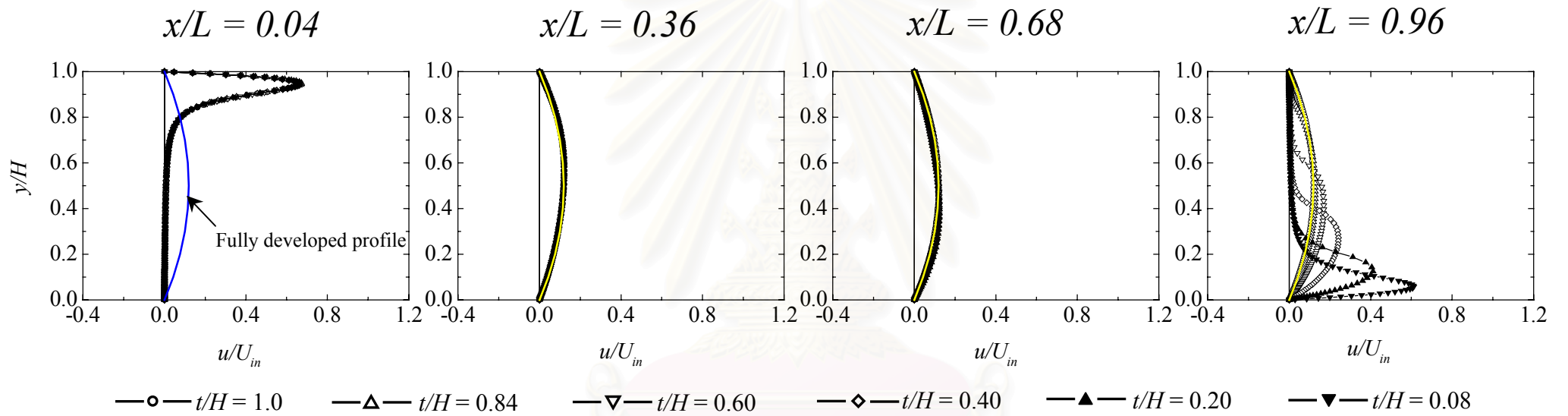
รูปที่ 3.15 การกระจายตัวของความเร็ว  $v/U_{in}$  และ Stream line ของการไหลภายในห้องที่  $Re = 1$  สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ





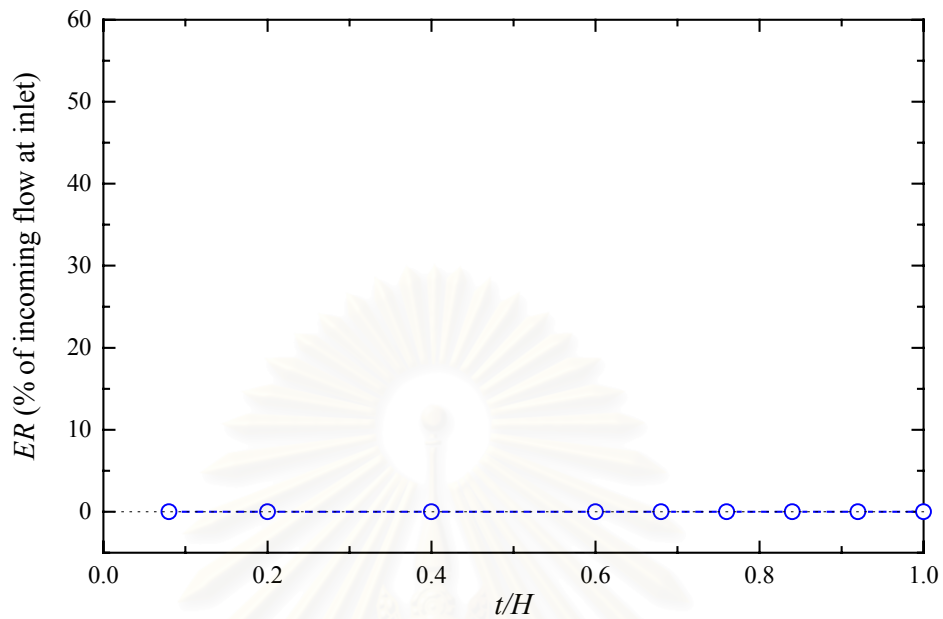
รูปที่ 3.16 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความดัน และ Stream line ของการไหลภายในห้องที่  $Re = 1$  สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ



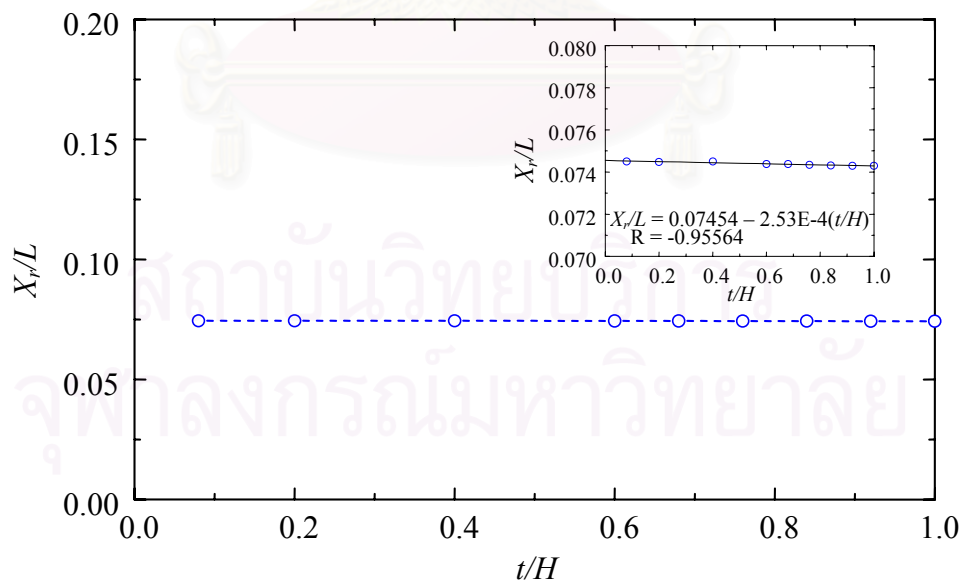


รูปที่ 3.17 ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อรูปร่างความเร็ว  $u$  ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวการไหล สำหรับการไหลที่  $Re = 1$

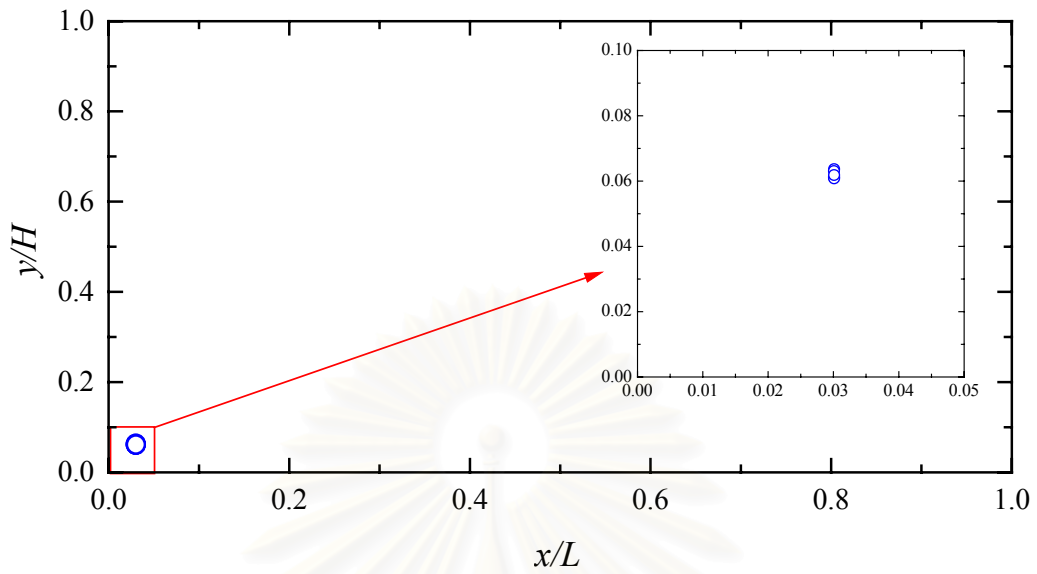
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



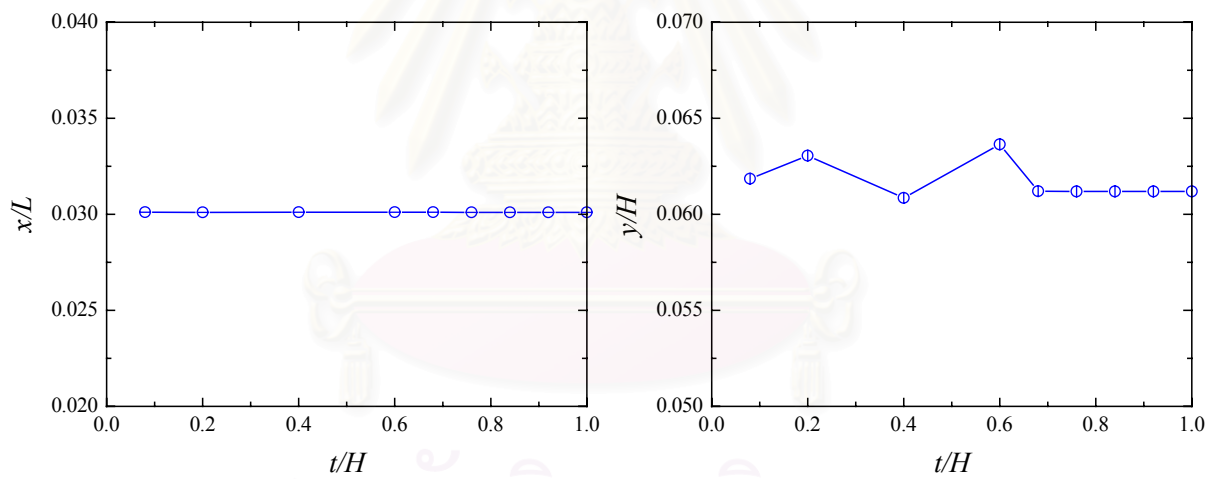
รูปที่ 3.18 ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่ออัตราส่วนการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง (Entrainment ratio) สำหรับการไหลที่  $Re = 1$



รูปที่ 3.19 ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อระยะ Reattachment สำหรับการไหลที่  $Re = 1$



ก)

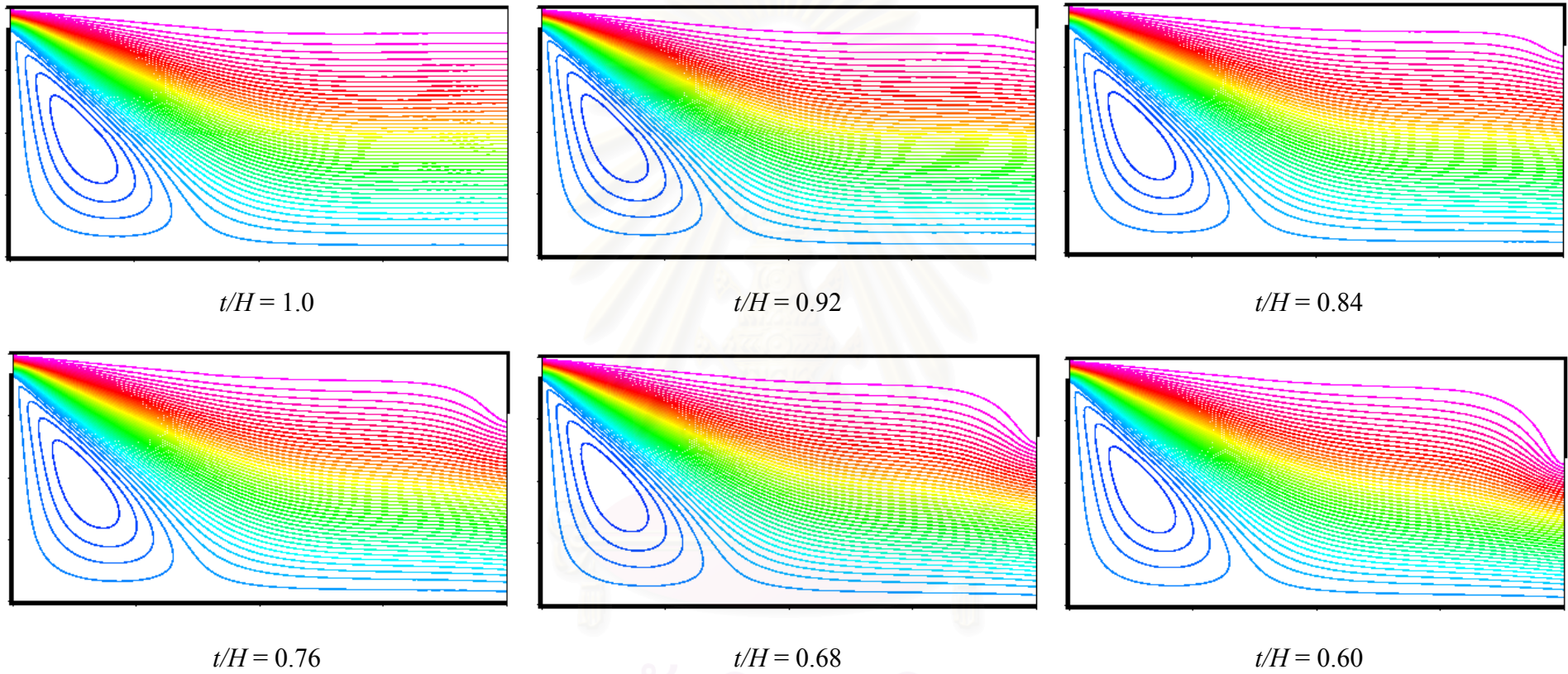


ข)

ค)

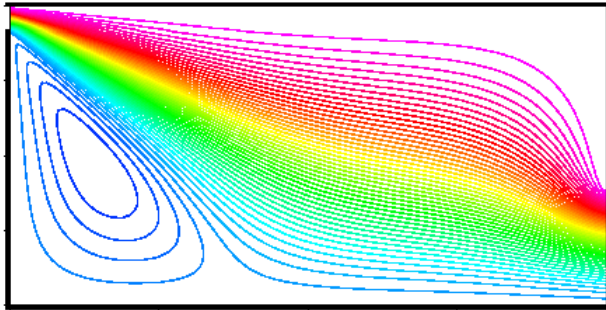
รูปที่ 3.20 ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลัก สำหรับการไหลที่  $Re = 1$

- ก) ภาพรวมของตำแหน่งของการไหลหมุนวนที่ทุกขนาดช่องเปิด
- ข) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามแนวแกน  $x$
- ค) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามแนวแกน  $y$

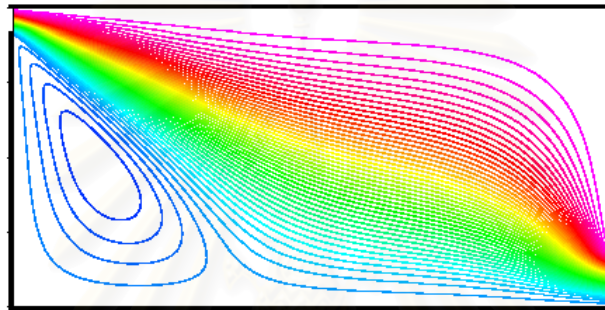


รูปที่ 3.21 Stream line contour ของการไหลภายในห้องที่  $Re = 10$  สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ

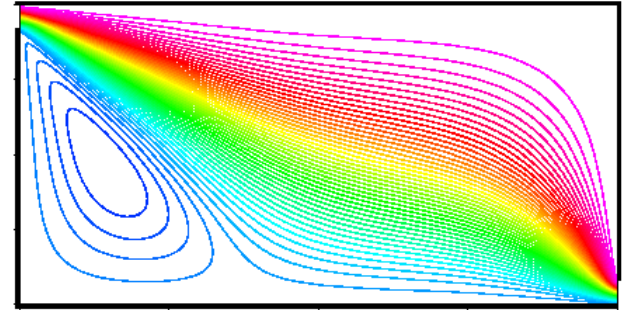
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



$t/H = 0.40$



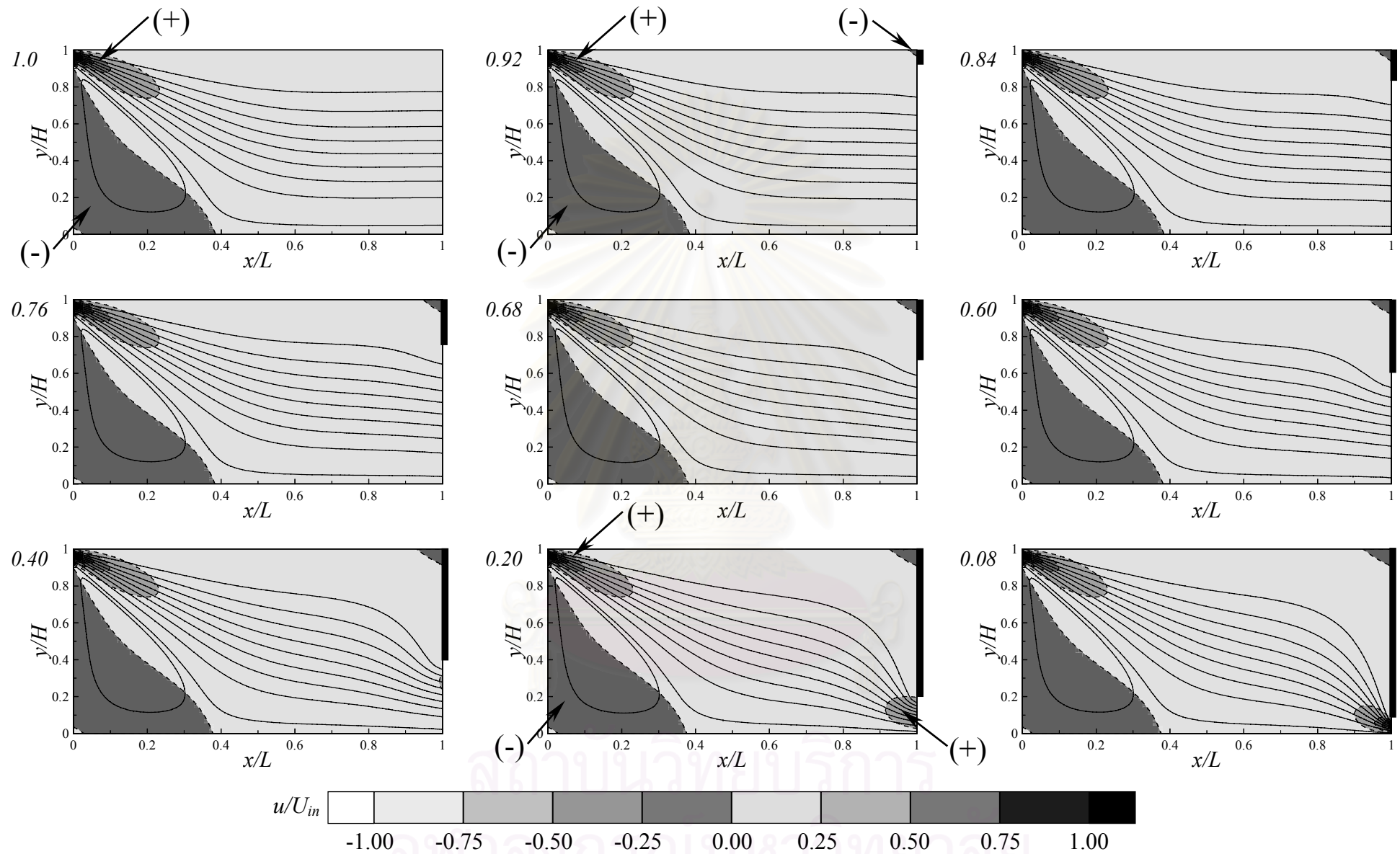
$t/H = 0.20$



$t/H = 0.08$

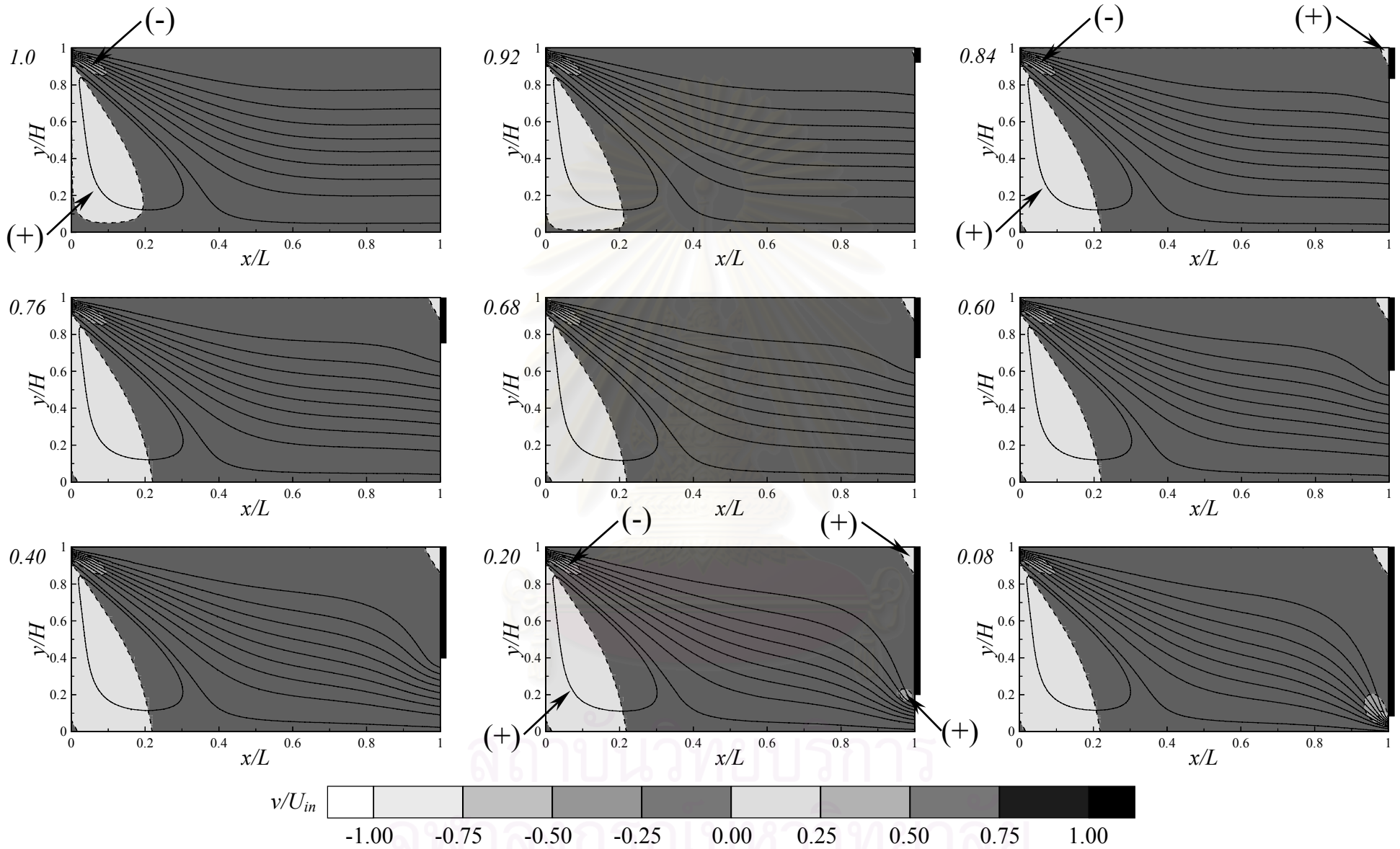
รูปที่ 3.21 (ต่อ)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

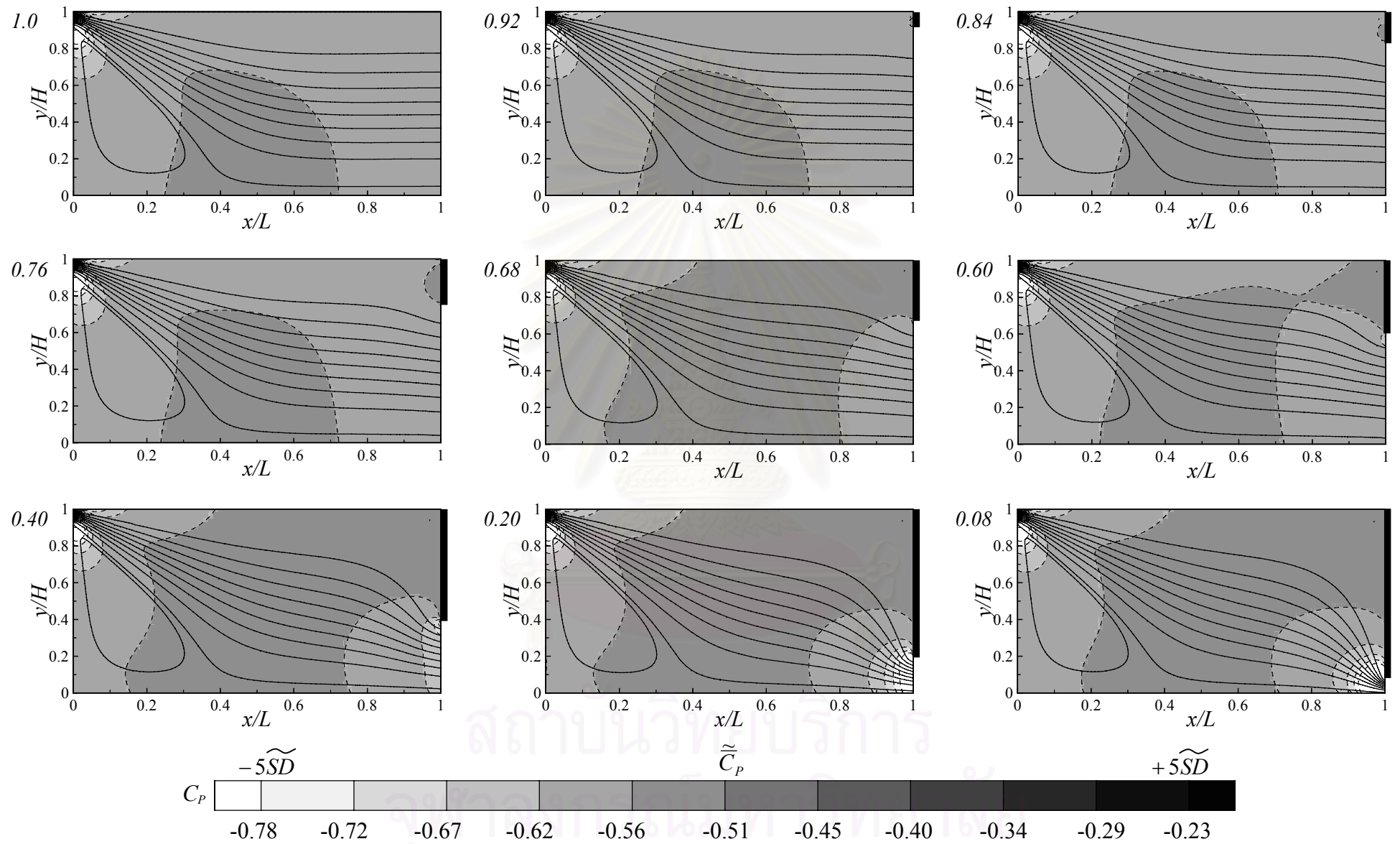


รูปที่ 3.22 การกระจายตัวของ  $u/U_{in}$  และ Stream line ของการไหลภายในห้องที่  $Re = 10$  สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ

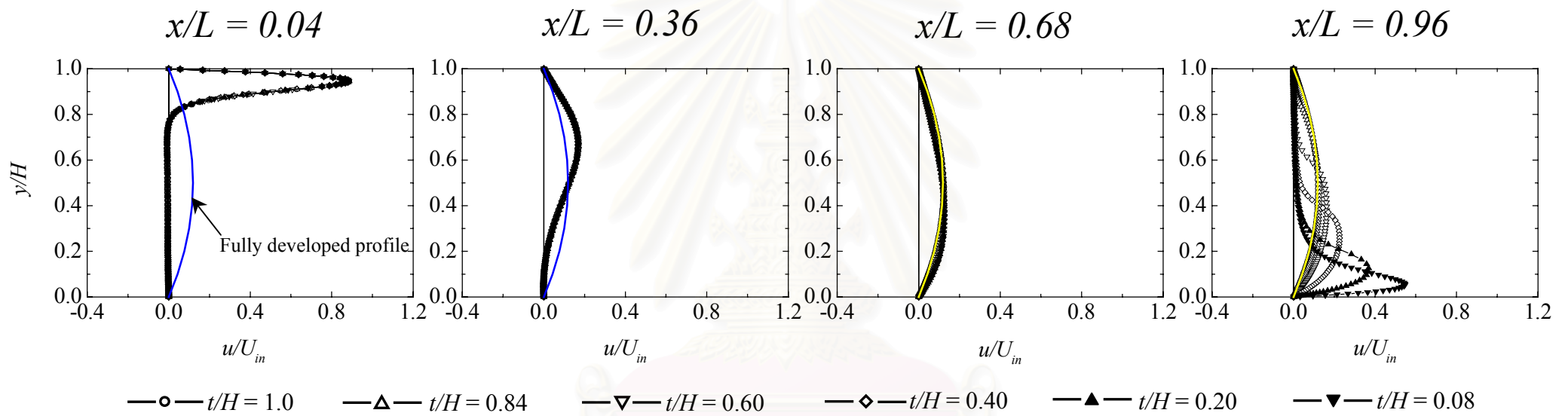




รูปที่ 3.23 การกระจายตัวของ  $v/U_{in}$  และ Stream line ของการไหลภายในห้องที่  $Re = 10$  สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ

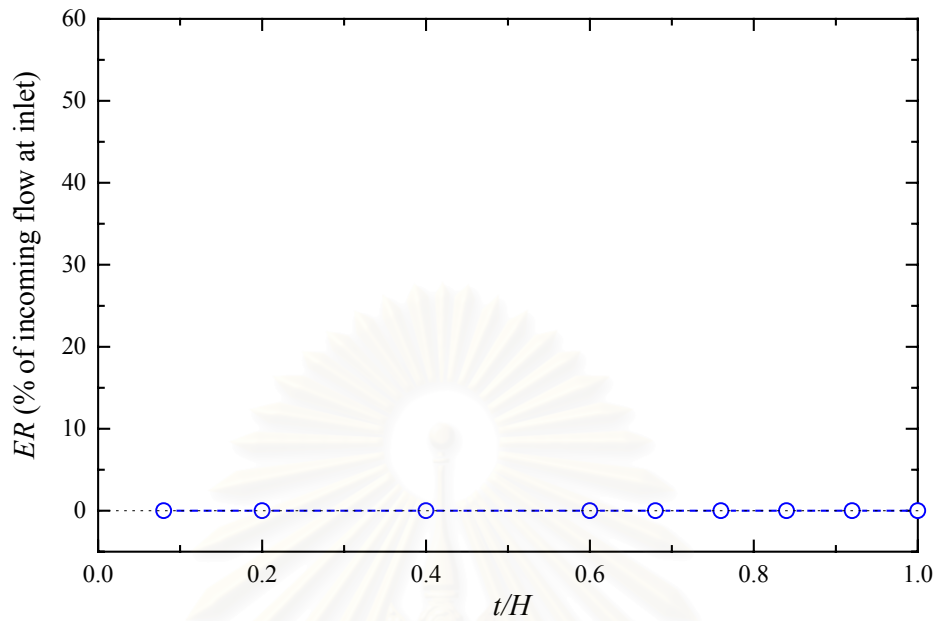


รูปที่ 3.24 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความดันและ Stream line ของการไหลภายในห้องที่  $Re = 10$  สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ

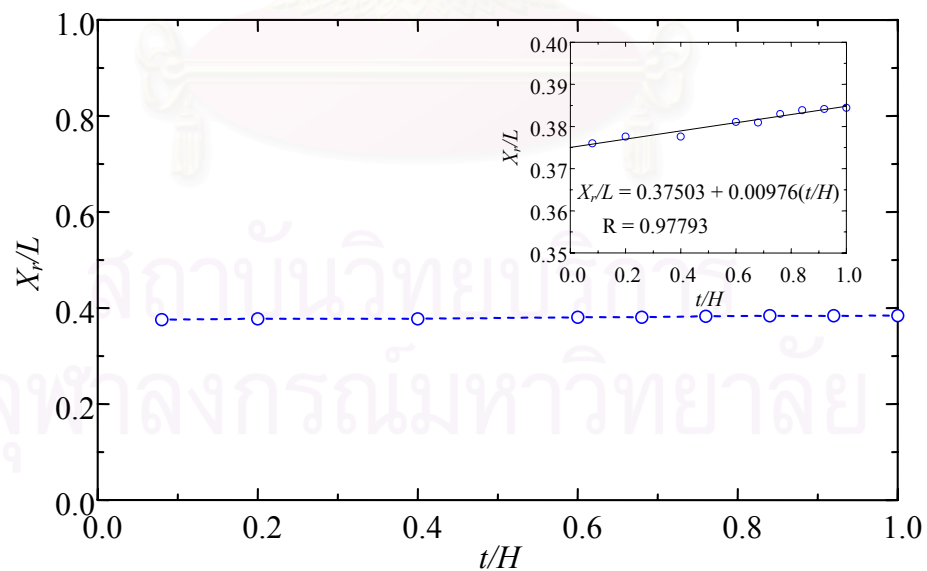


รูปที่ 3.25 ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อรูปร่างความเร็ว  $u$  ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวการไหล สำหรับการไหลที่  $Re = 10$

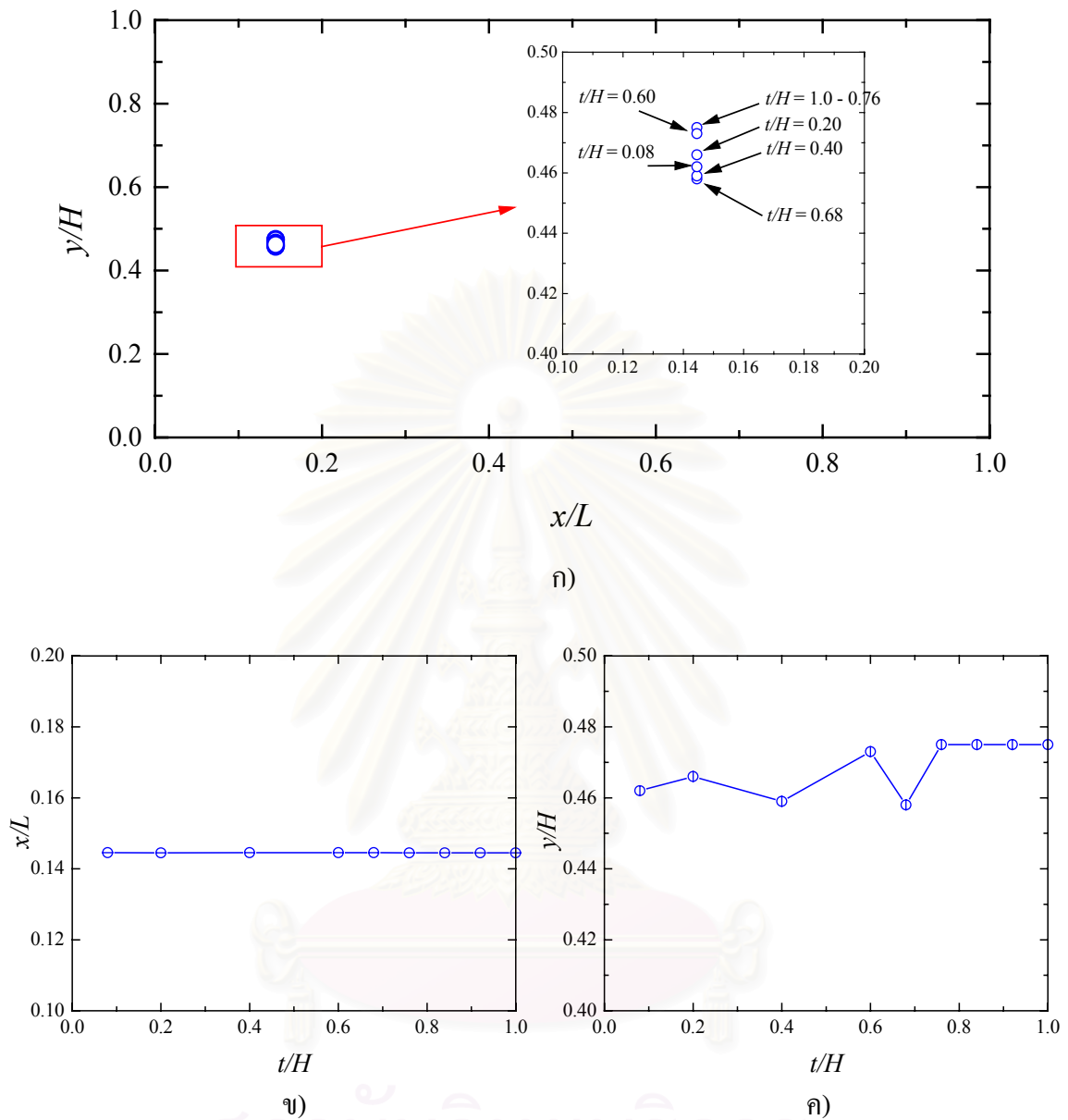
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.26 ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่ออัตราส่วนการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง (Entrainment ratio) สำหรับกรณีไหลที่  $Re = 10$



รูปที่ 3.27 ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อระยะ Reattachment สำหรับกรณีไหลที่  $Re = 10$

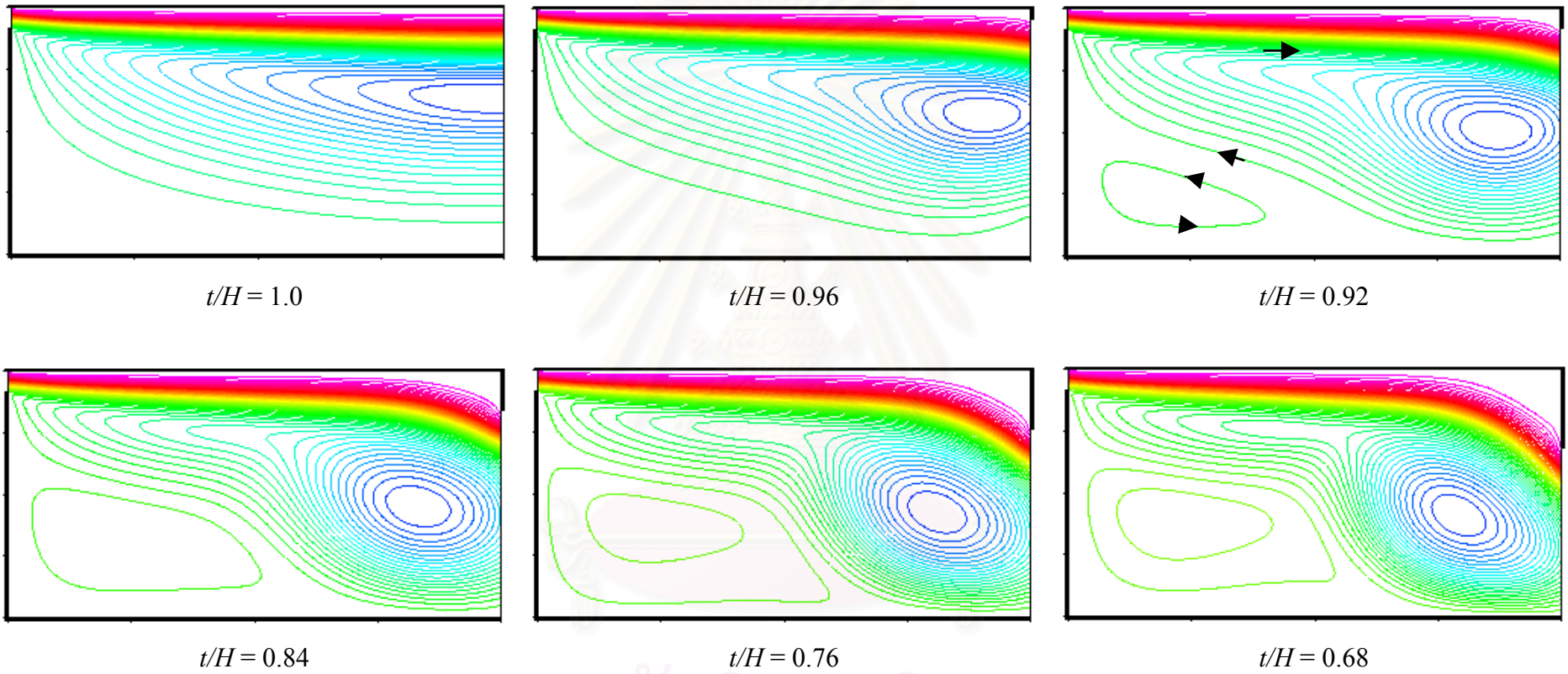


รูปที่ 3.28 ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลัก สำหรับการไหลที่  $Re = 10$

ก) ภาพรวมของตำแหน่งของการไหลหมุนวนที่ทุกขนาดช่องเปิด

ข) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามแนวแกน  $x$

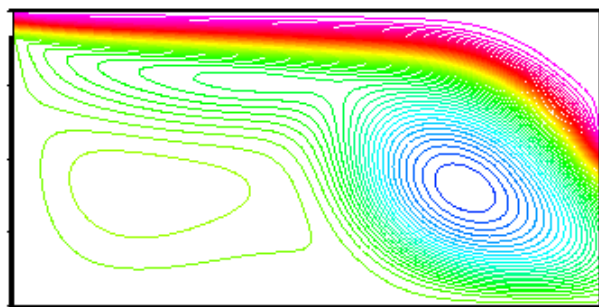
ค) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามแนวแกน  $y$



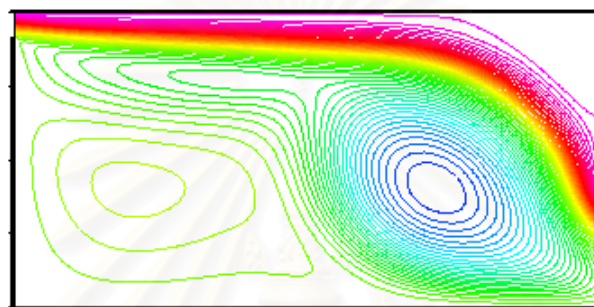
รูปที่ 3.29 Stream line contour ของการไหลภายในห้องที่  $Re = 100$  สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

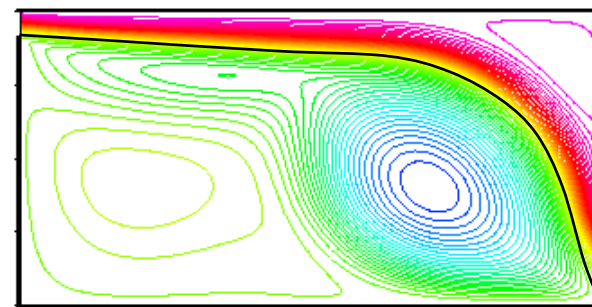




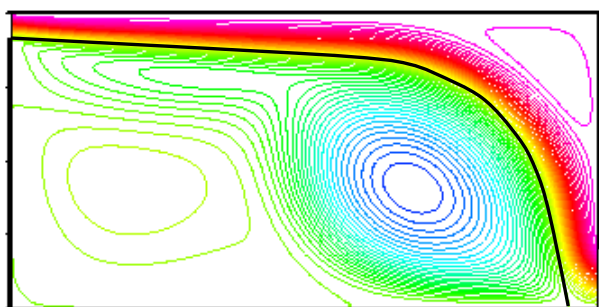
$t/H = 0.60$



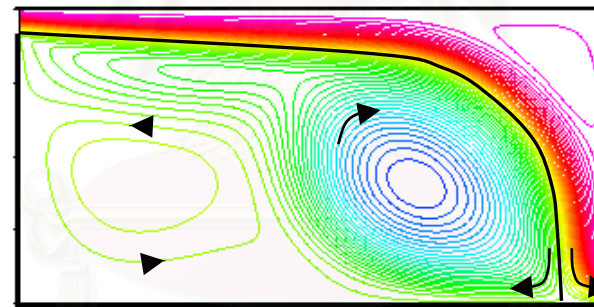
$t/H = 0.40$



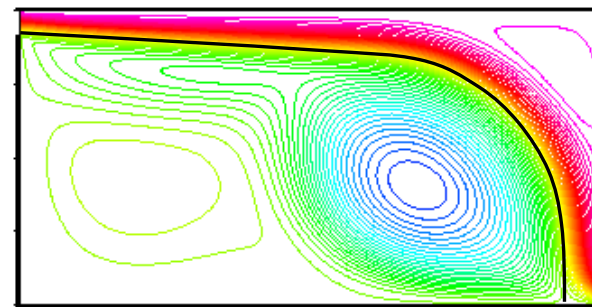
$t/H = 0.30$



$t/H = 0.20$



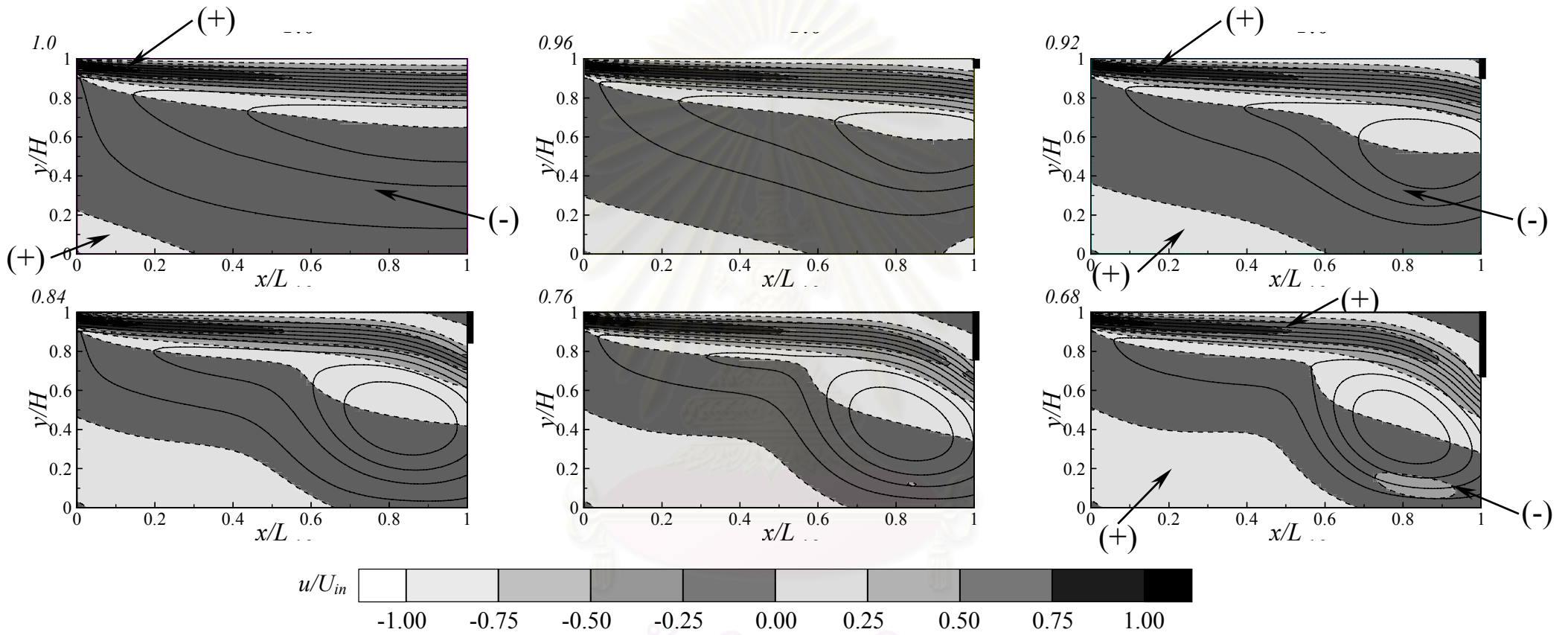
$t/H = 0.10$



$t/H = 0.08$

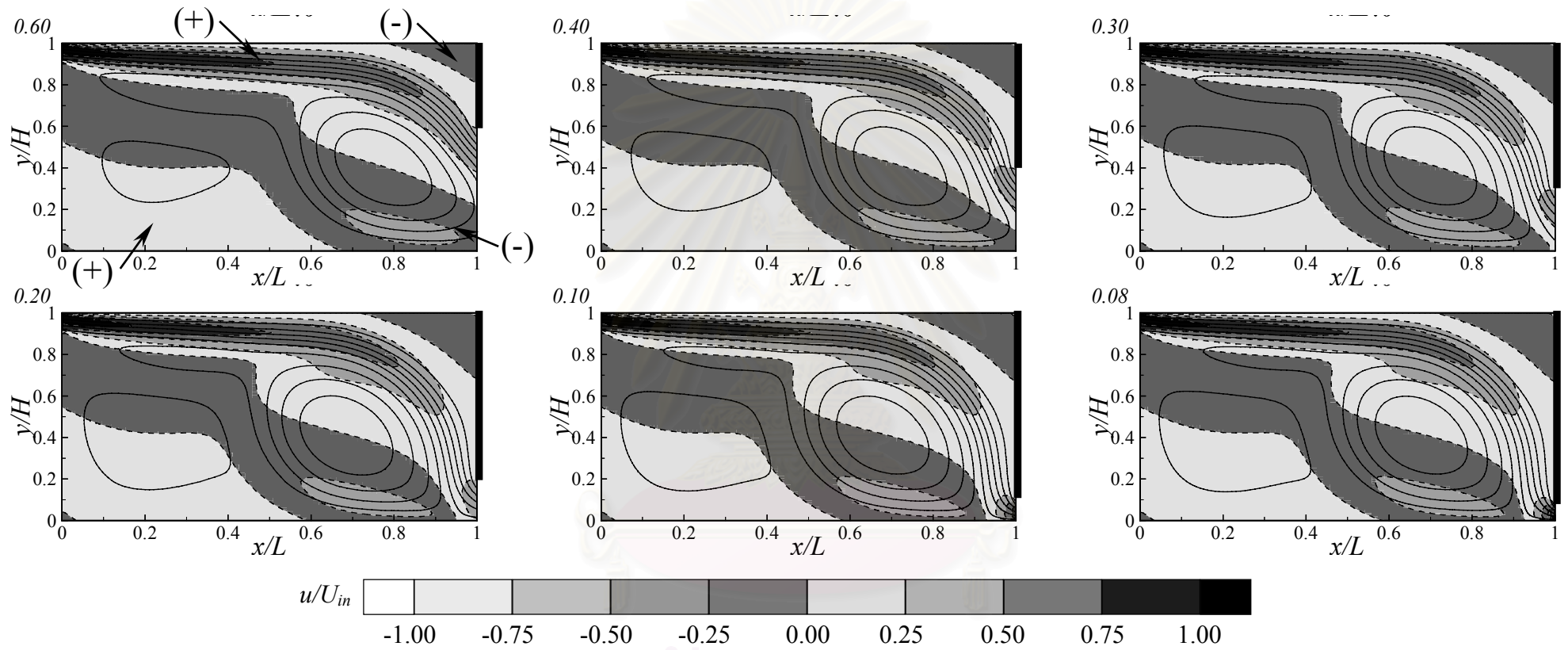
สถาบันวิจัยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.29 (ต่อ)

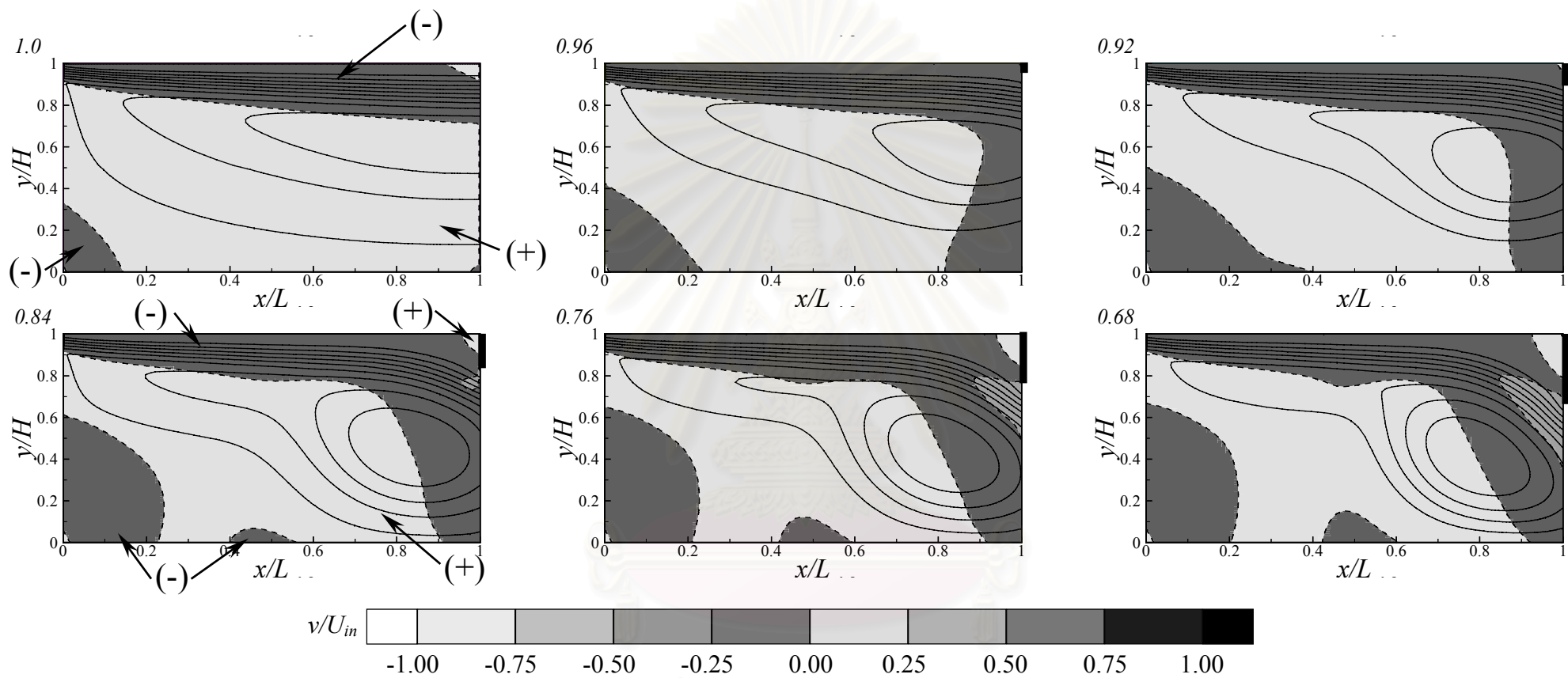


รูปที่ 3.30 การกระจายตัวของ  $u/U_{in}$  และ Stream line ของการไหลภายในห้องที่  $Re = 100$  สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ

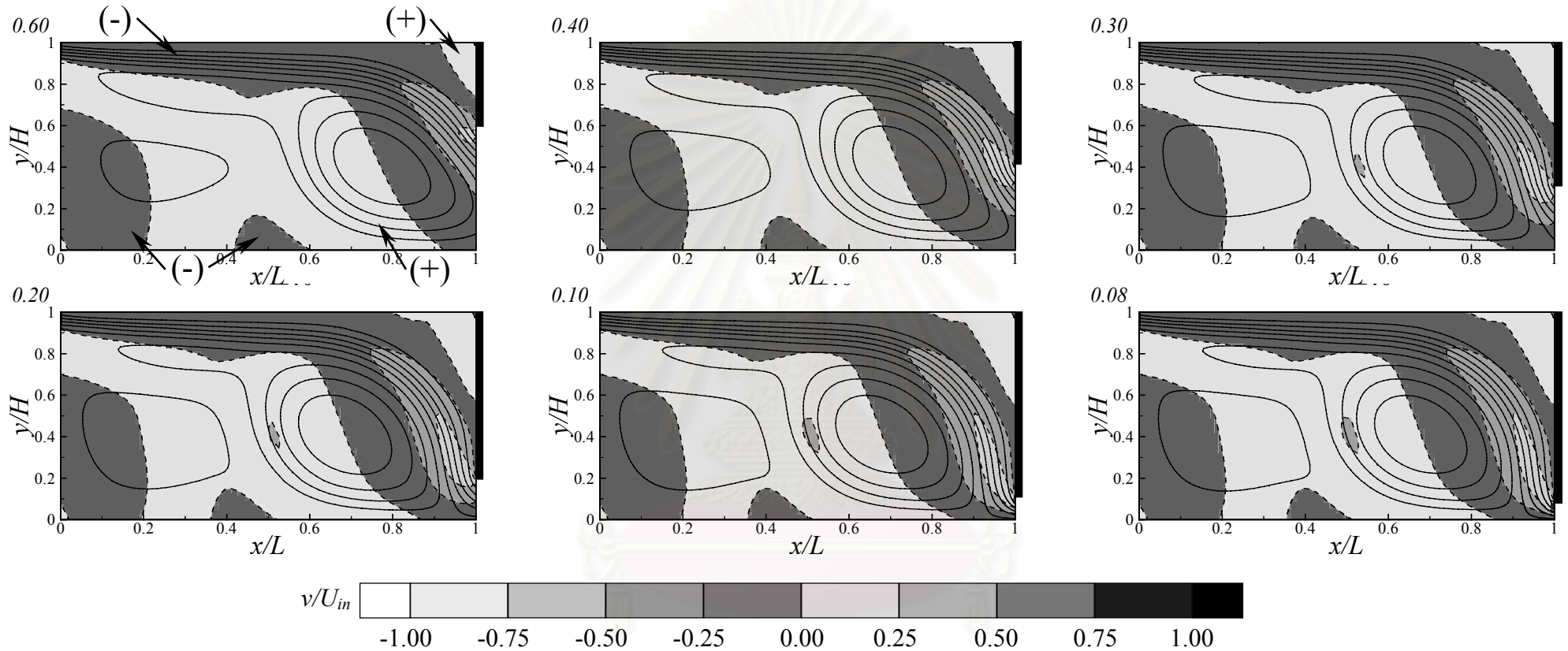
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.30 (ต่อ)  
 สถาบันวิจัยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



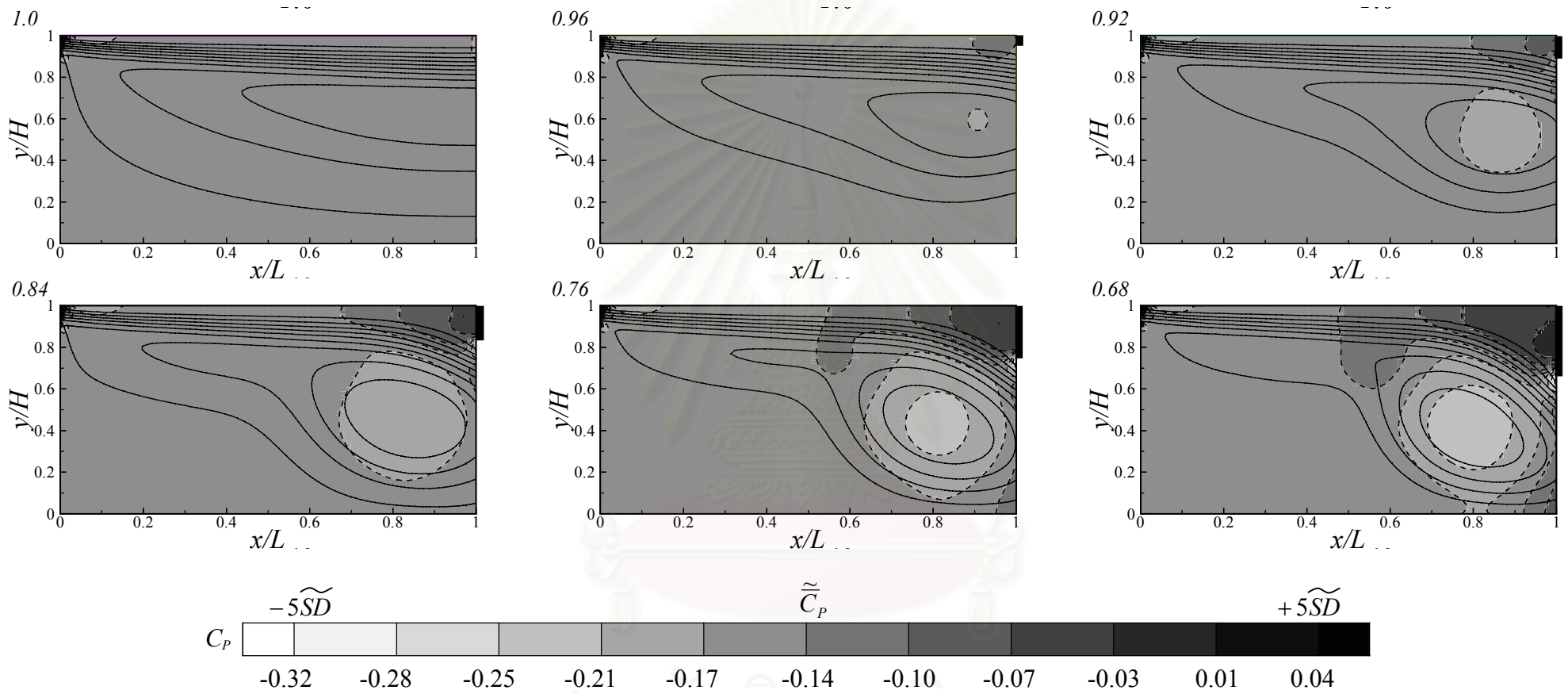
รูปที่ 3.31 การกระจายตัวของ  $v/U_{in}$  และ Stream line ของการไหลภายในห้องที่  $Re = 100$  สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ



รูปที่ 3.31 (ต่อ)

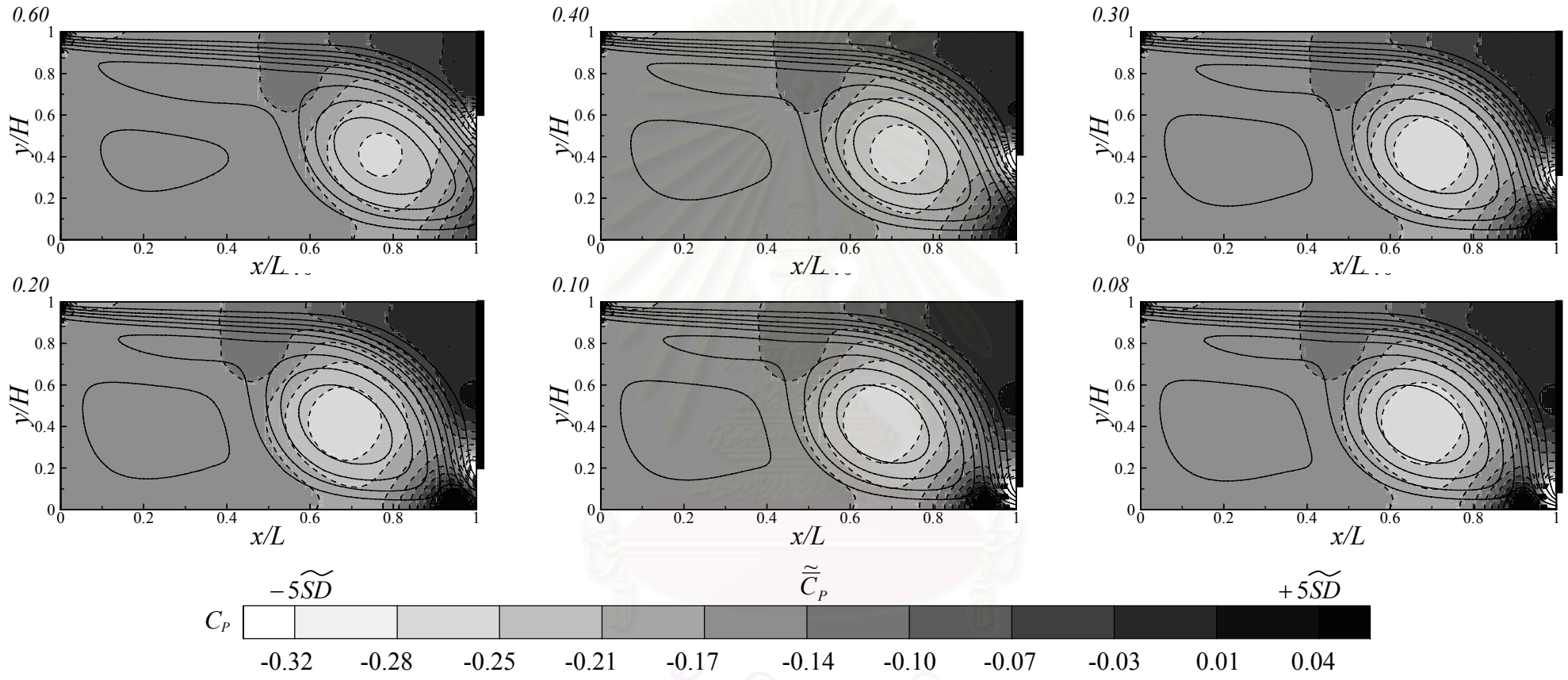
สถาบันวิจัยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





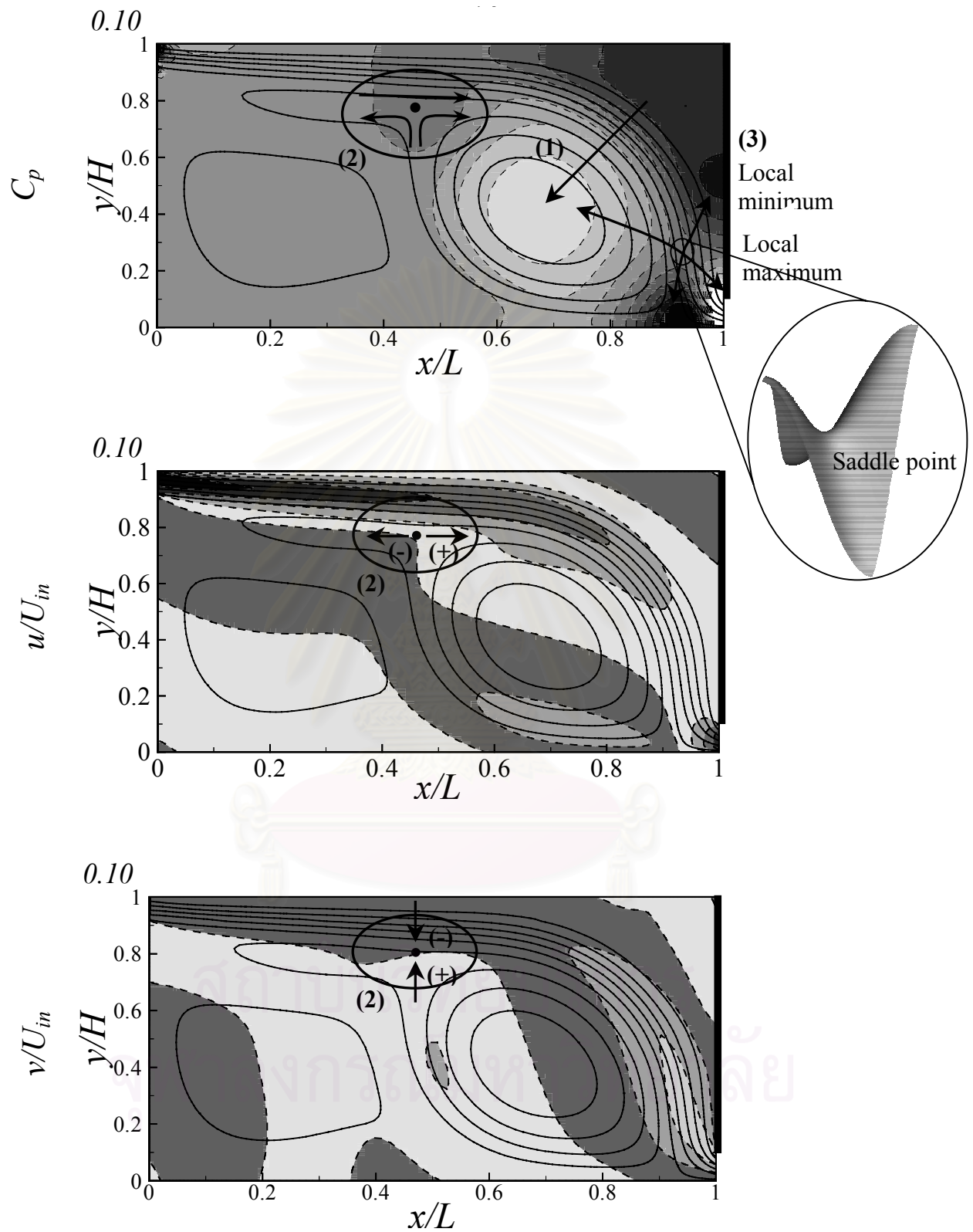
รูปที่ 3.32 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความดันและ Stream line ของการไหลภายในห้องที่  $Re = 100$  สำหรับช่องเปิดขนาดต่างๆ



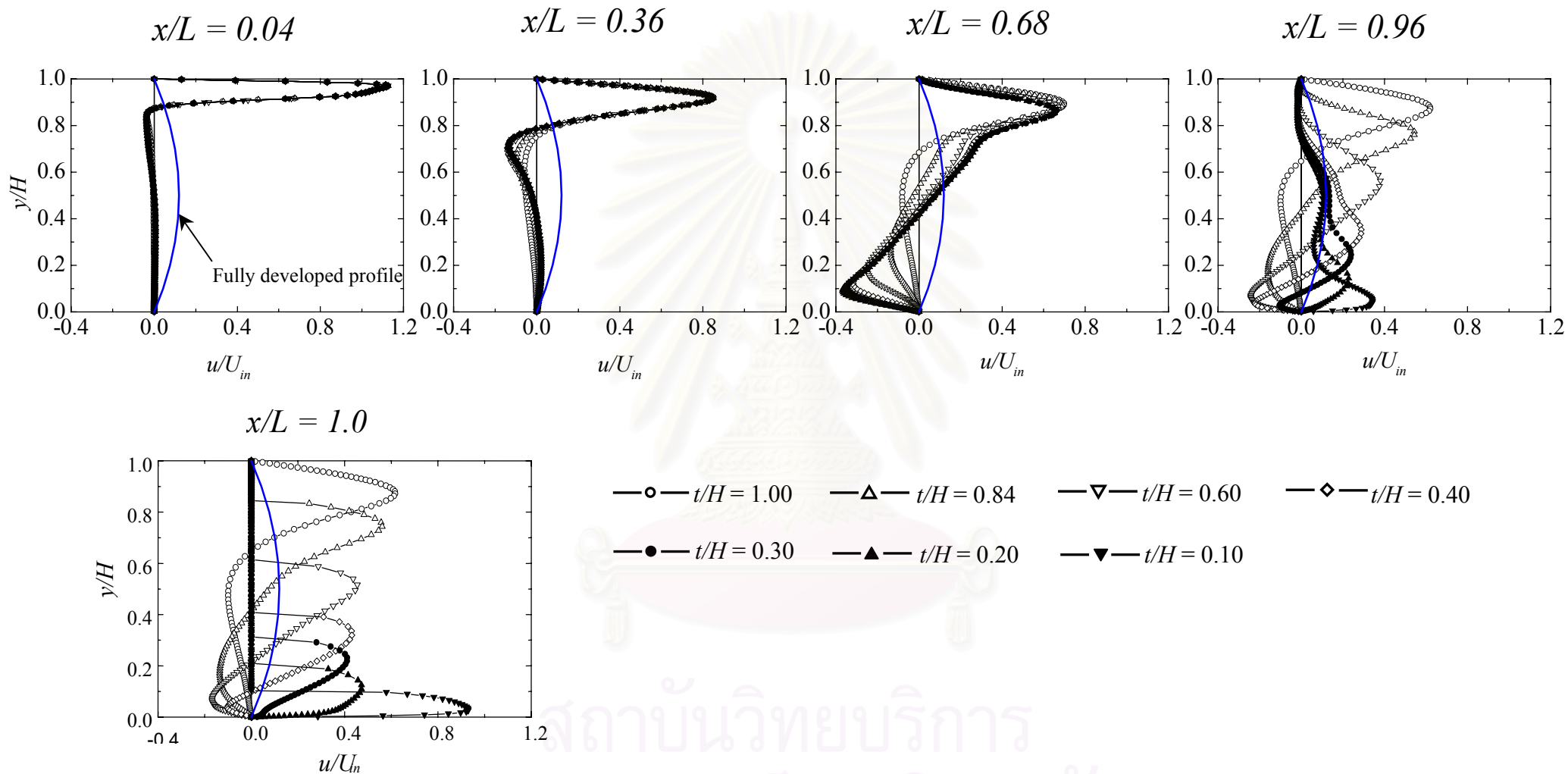


รูปที่ 3.32 (ต่อ)

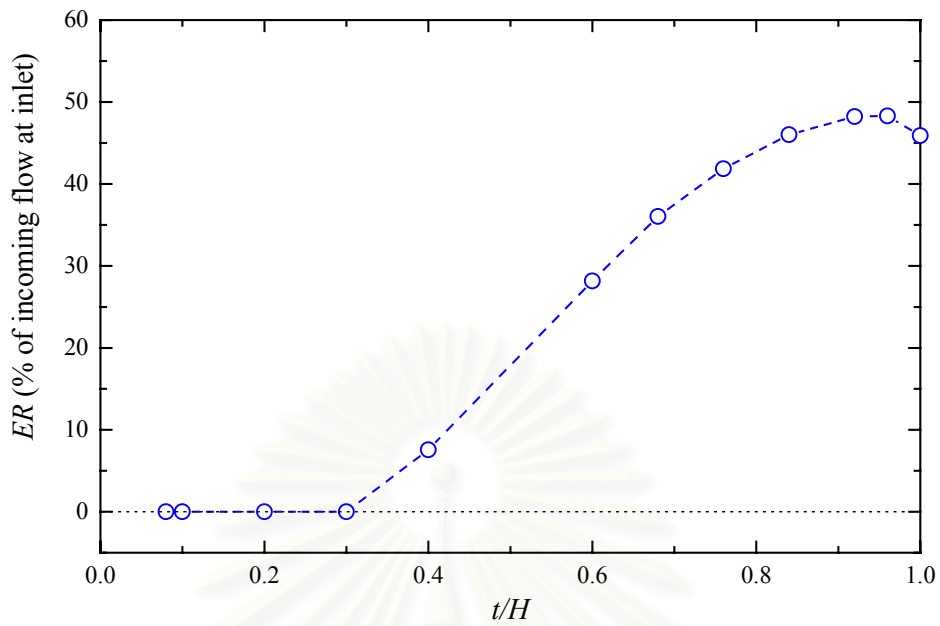
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



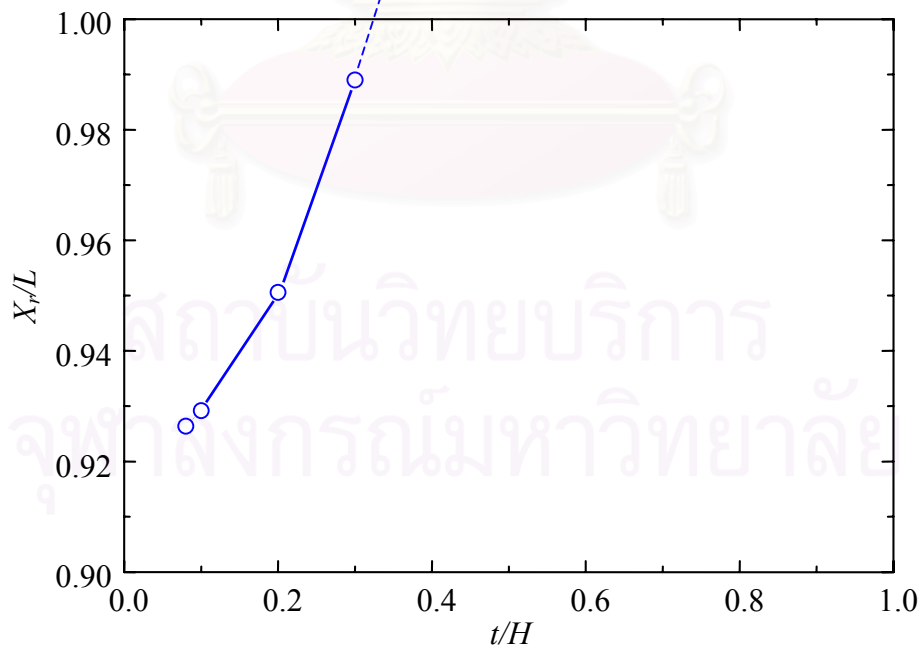
รูปที่ 3.33 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความดัน, ความเร็วตามแนว Stream wise, Transverse และ Stream line สำหรับการไหลที่อัตราส่วนช่องเปิดเท่ากับ 0.10



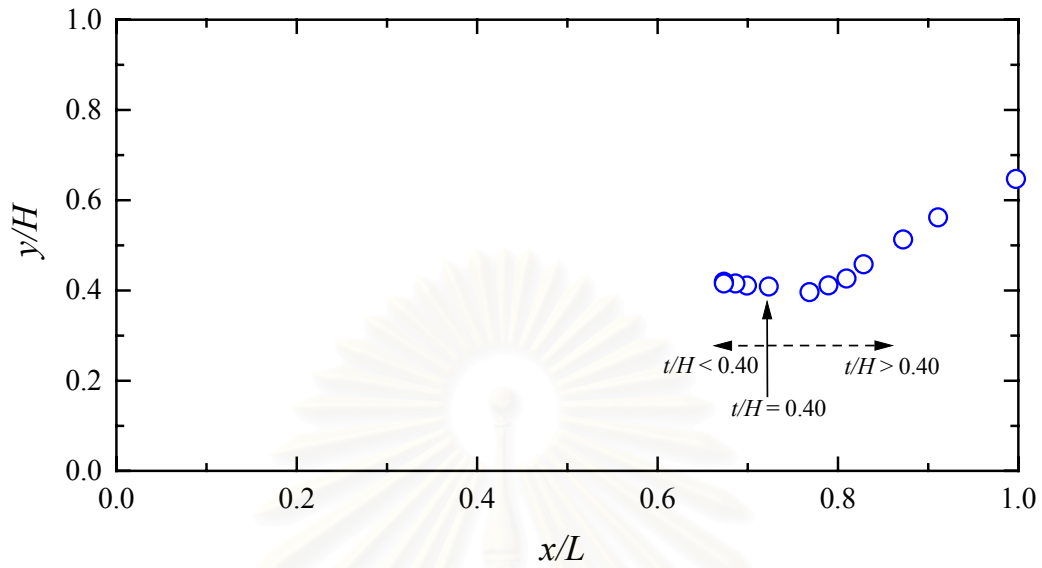
รูปที่ 3.34 ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อการกระจายรูปร่างความเร็ว  $u$  ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวการไหล สำหรับการไหลที่  $Re = 100$



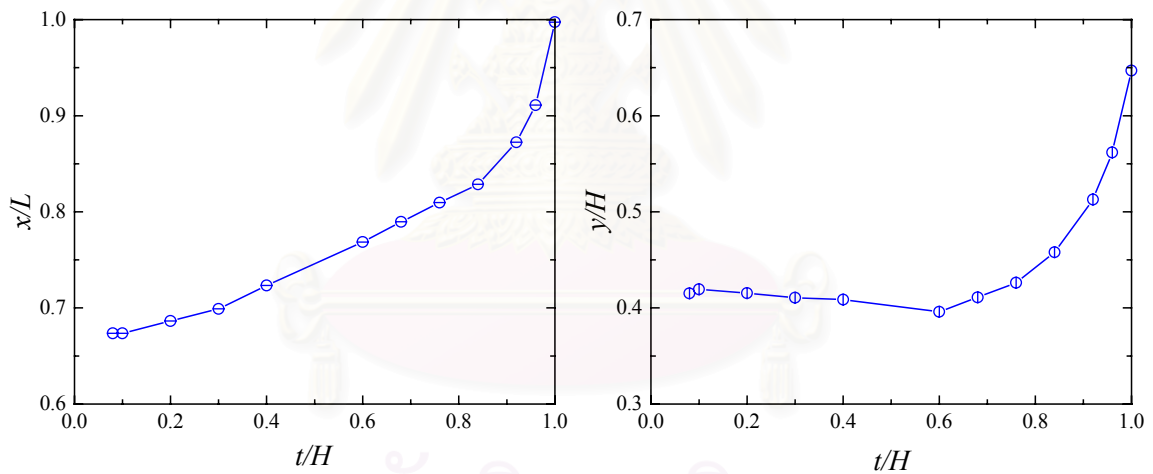
รูปที่ 3.35 ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่ออัตราส่วนการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง (Entrainment ratio) สำหรับการไหลที่  $Re = 100$



รูปที่ 3.36 ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อระยะ Reattachment สำหรับการไหลที่  $Re = 100$



ก)

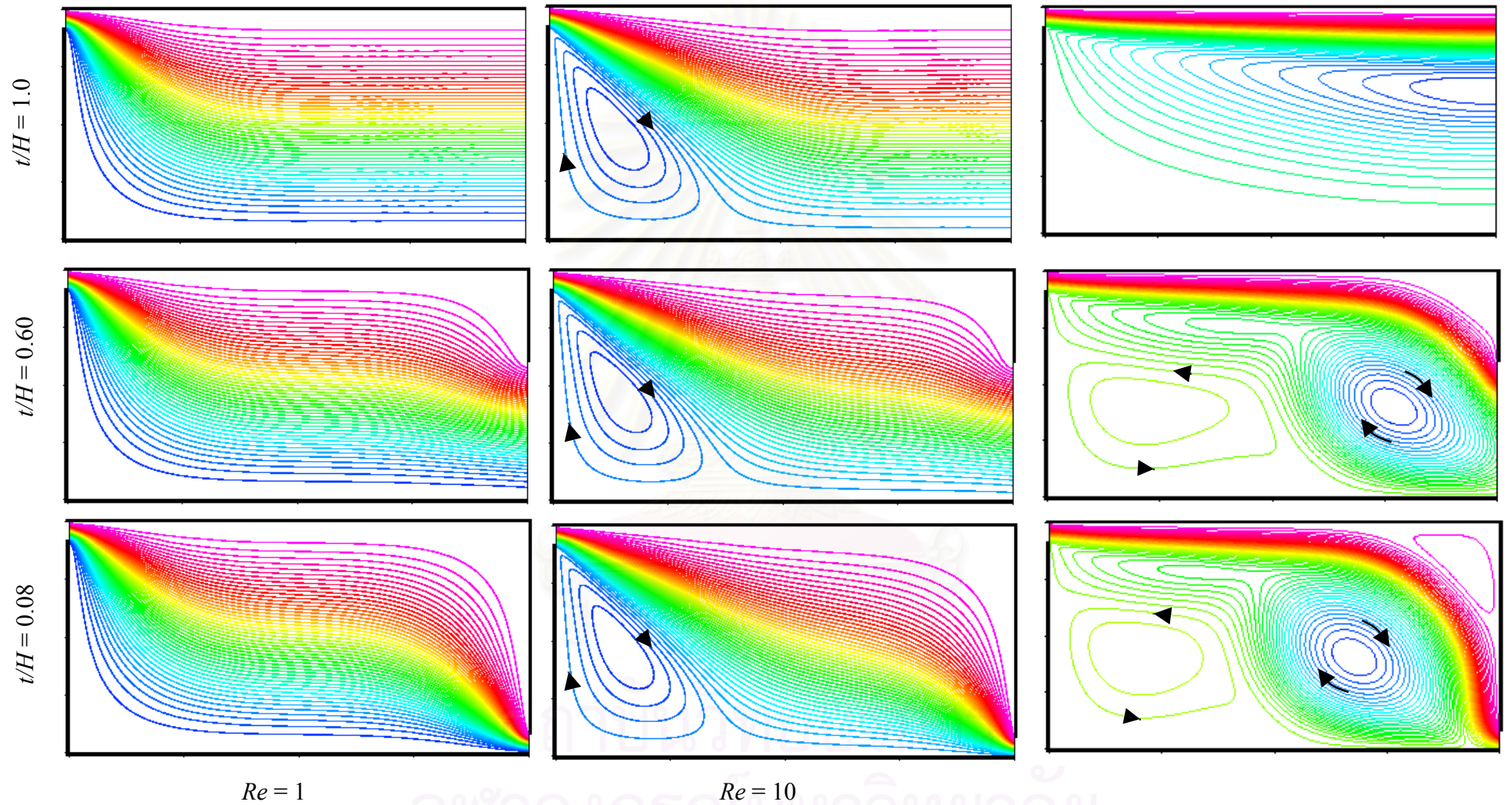


ข)

ค)

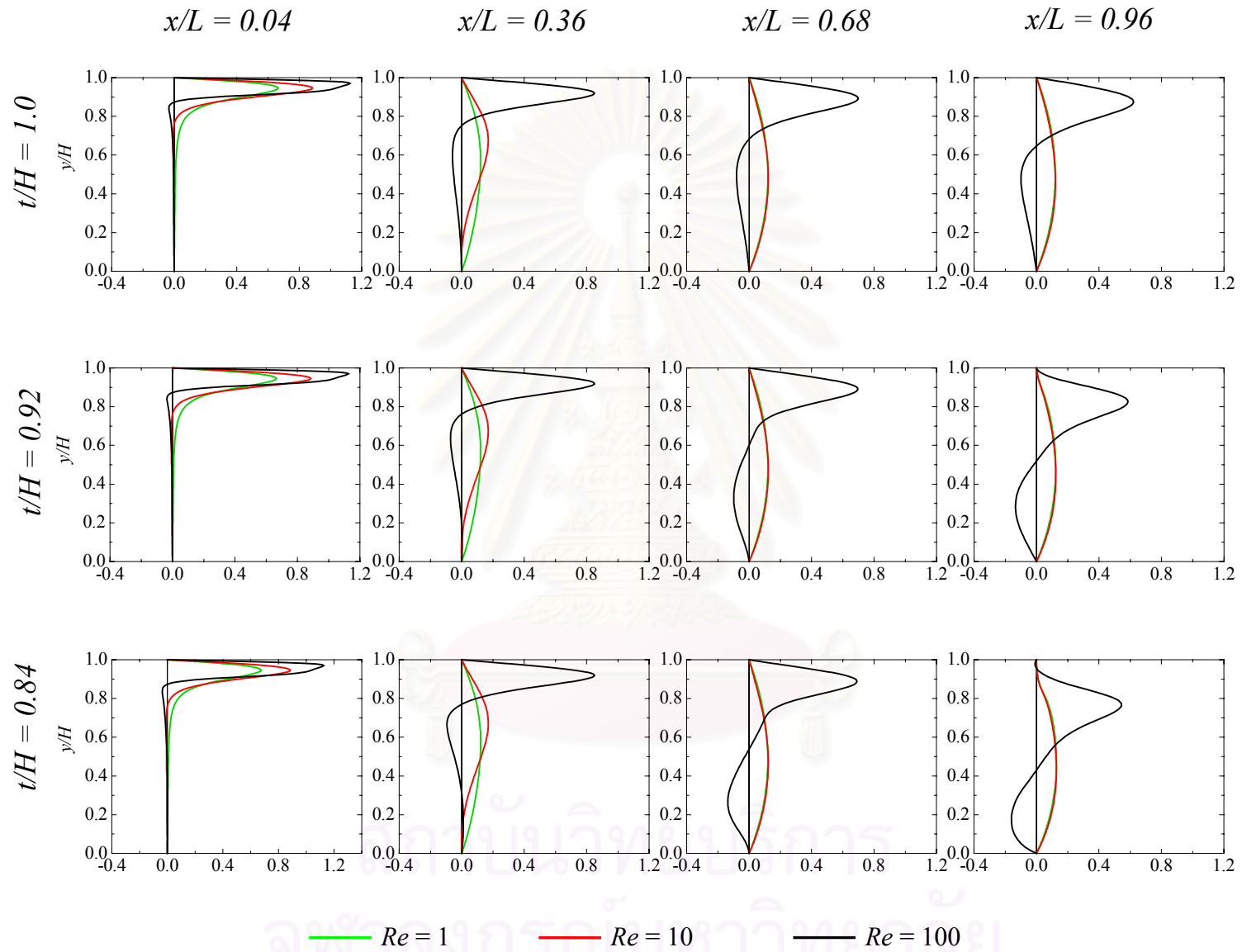
รูปที่ 3.37 ผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายต่อตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลัก สำหรับการไหลที่  $Re = 100$

- ก) ภาพรวมของตำแหน่งของการไหลหมุนวนที่ทุกขนาดช่องเปิด
- ข) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามแนวแกน  $x$
- ค) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามแนวแกน  $y$

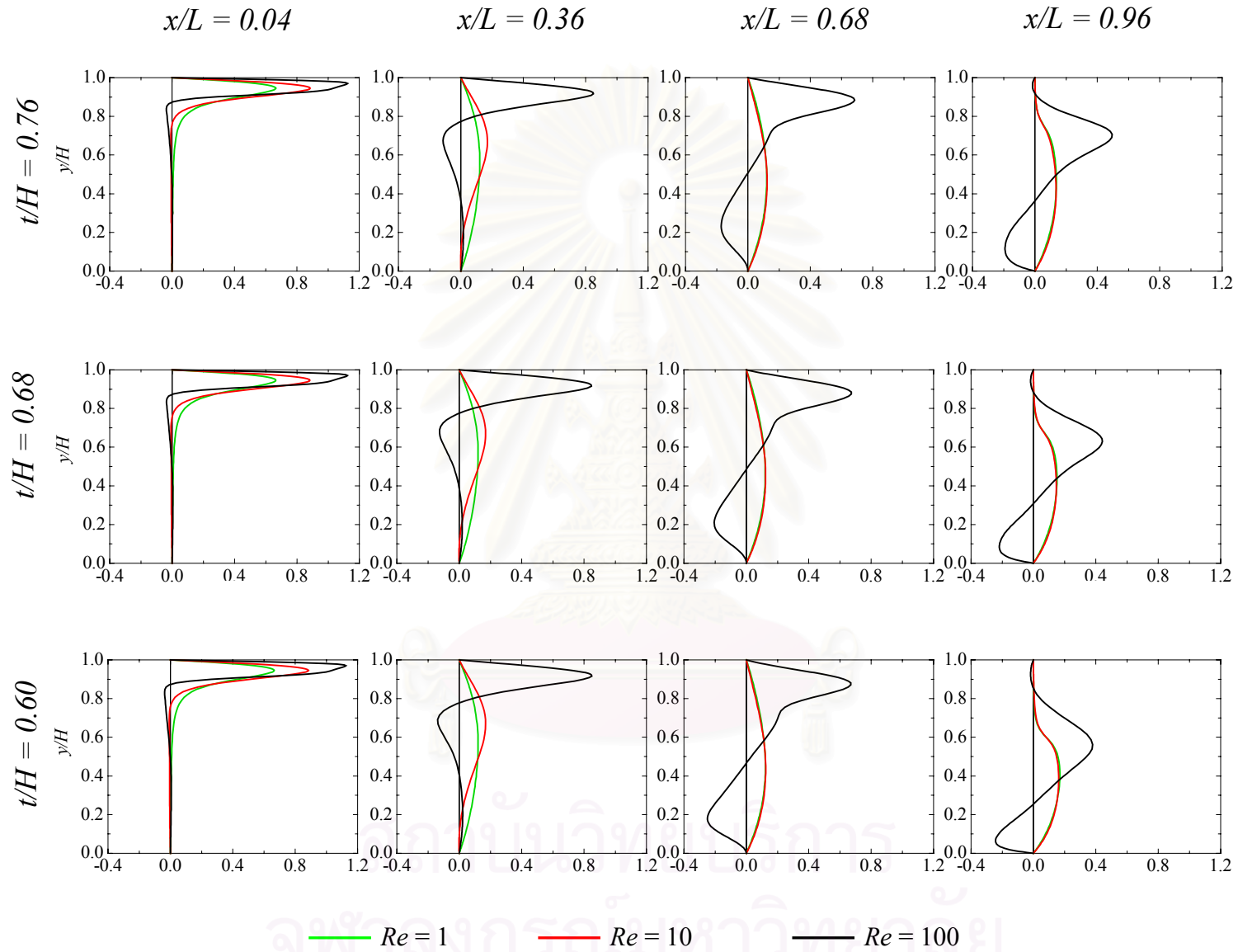


รูปที่ 3.38 ผลของเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่อรูปแบบการไหลที่อัตราส่วนช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 1.0, 0.60 และ 0.08

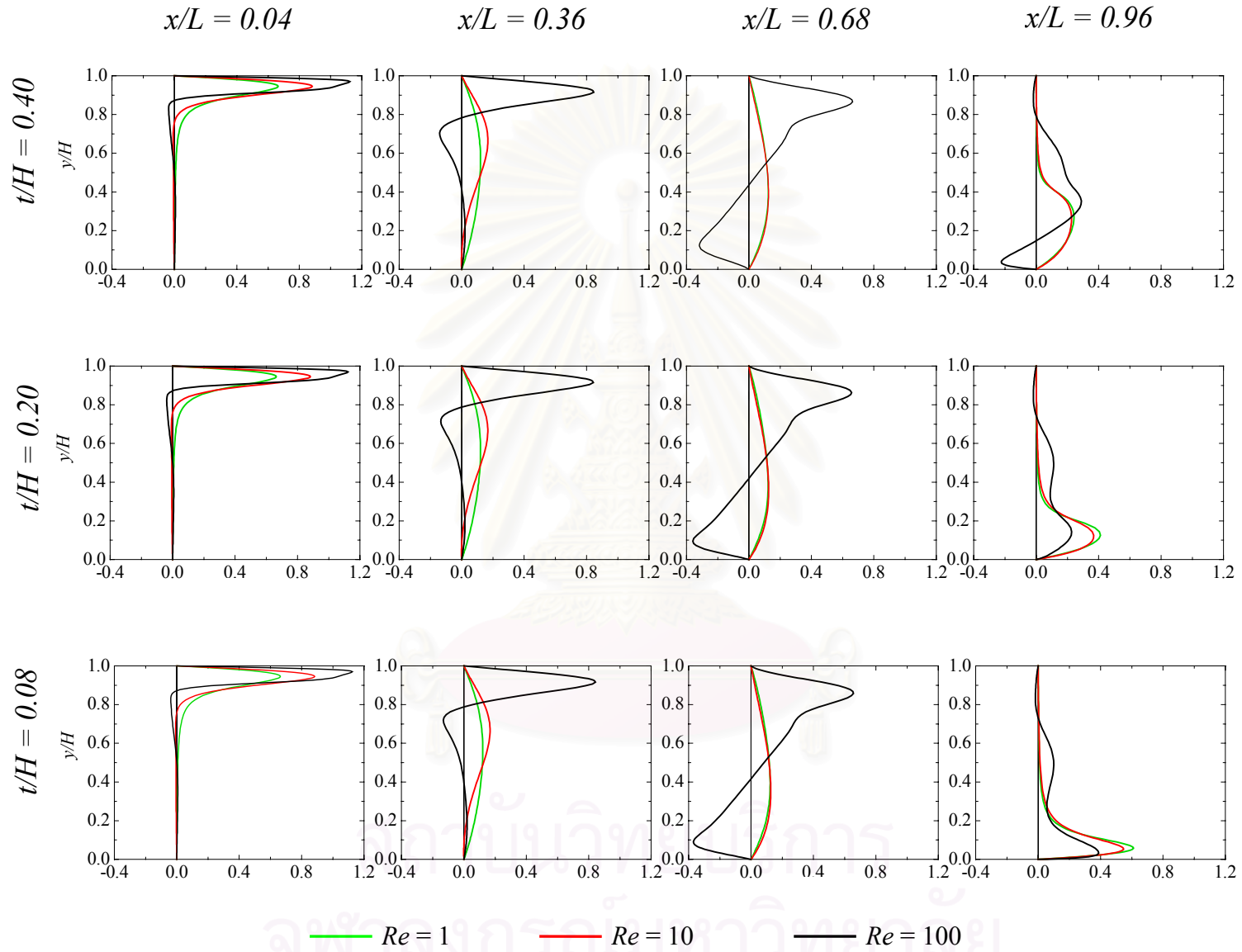




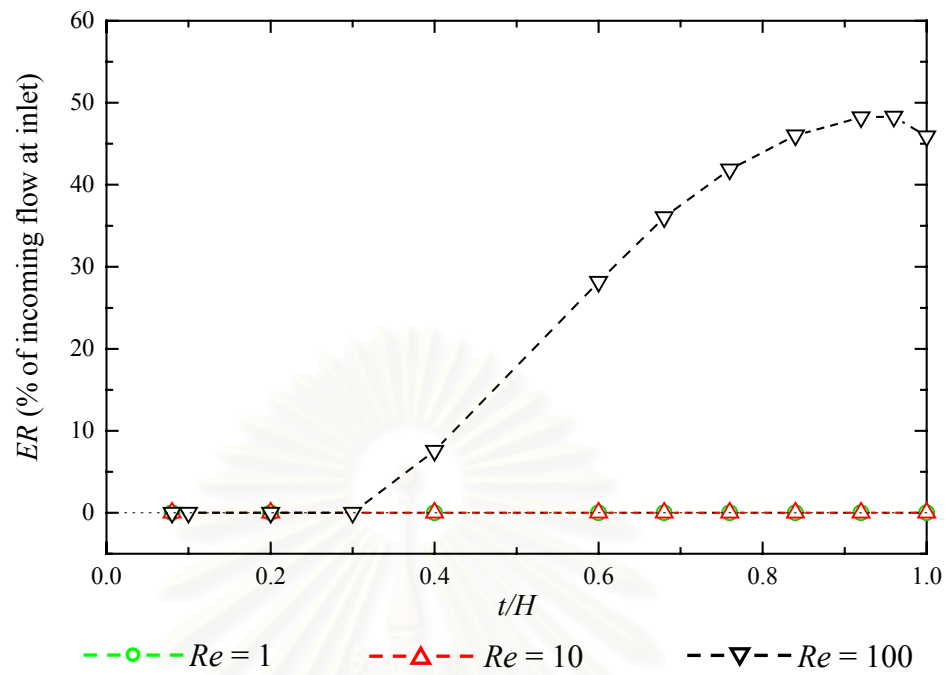
รูปที่ 3.39 ผลของเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่อรูปร่างความเร็ว  $u$  ตามแนว Downstream ที่ช่องเปิดขนาดต่างๆ



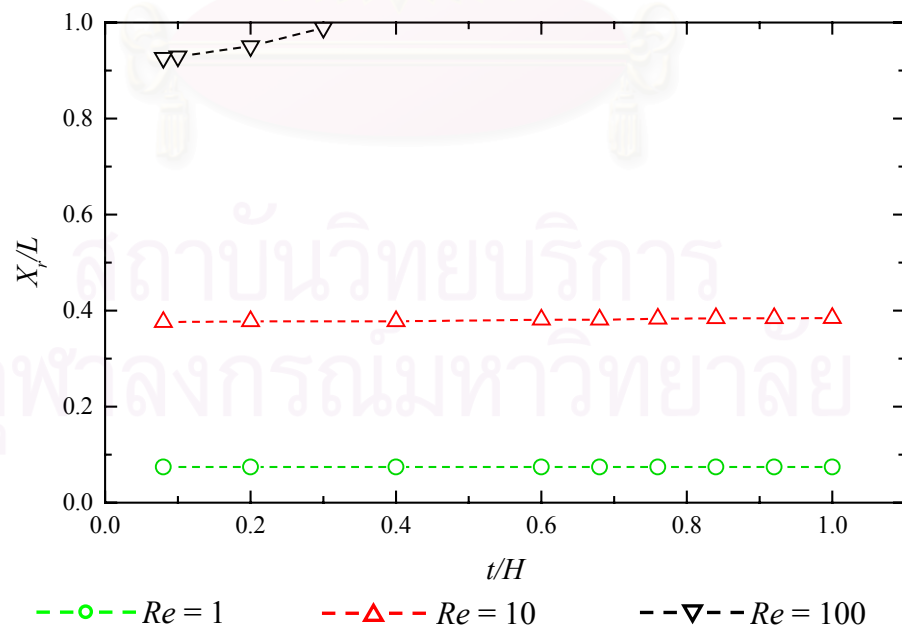
รูปที่ 3.39 (ต่อ)



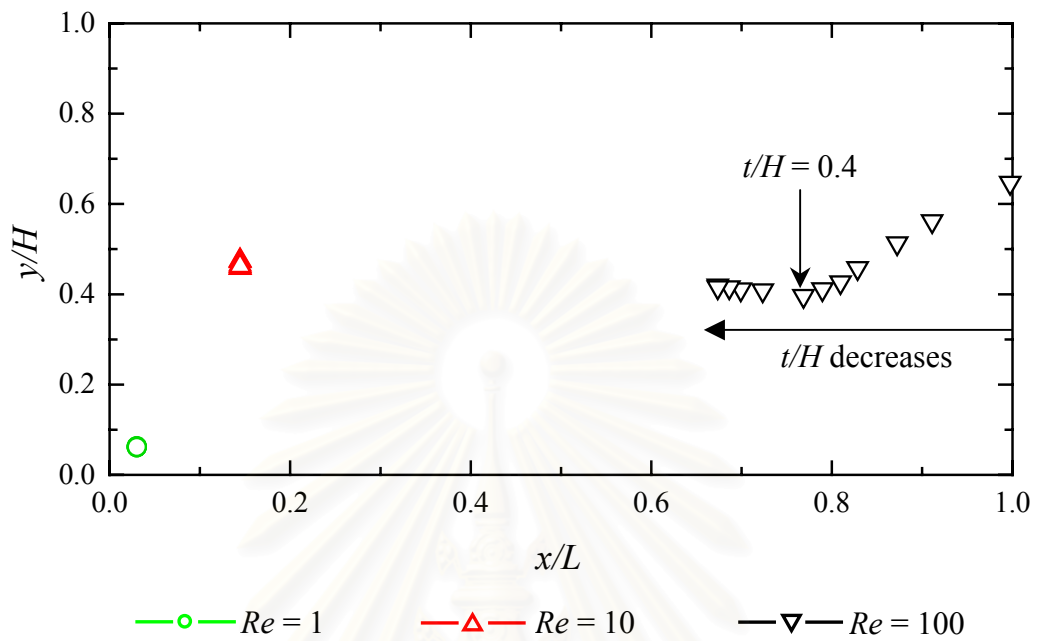
รูปที่ 3.39 (ต่อ)



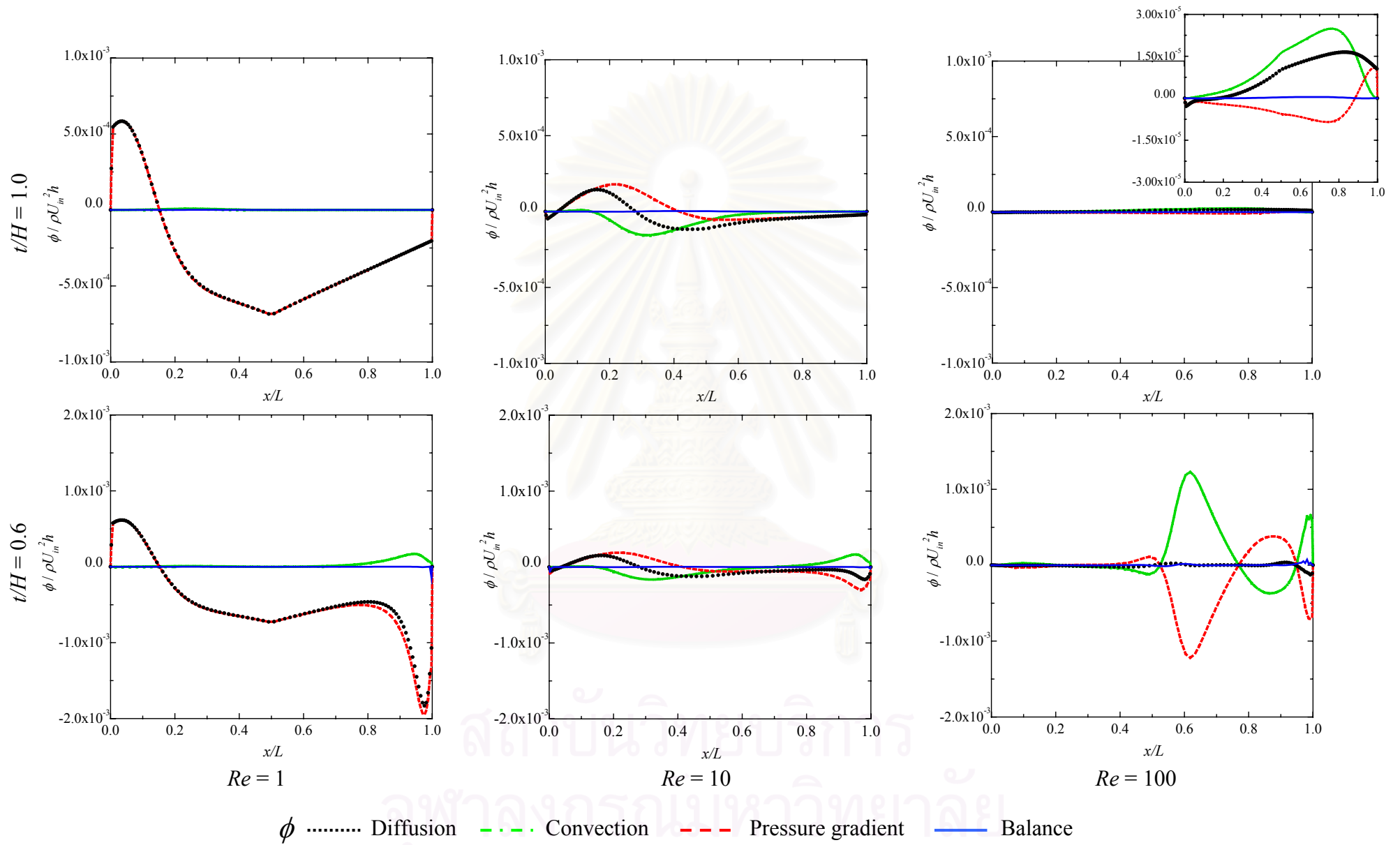
รูปที่ 3.40 ผลของเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ออัตราส่วนการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง (Entrainment ratio) ที่ช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ



รูปที่ 3.41 ผลของเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่อระยะ Reattachment ที่ช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ

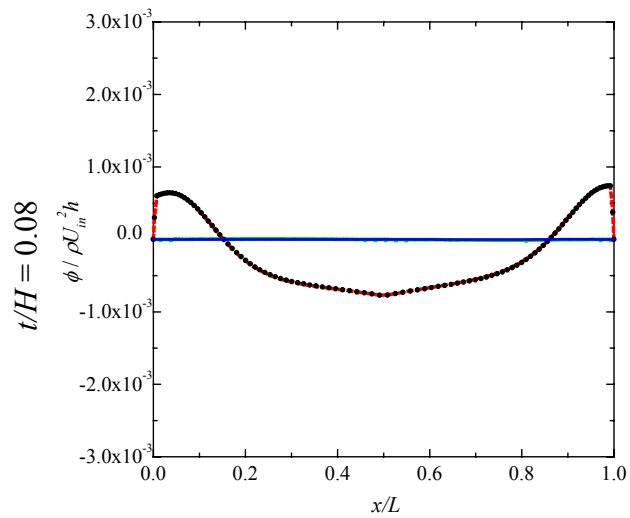


รูปที่ 3.42 ผลของเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่อตำแหน่งศูนย์กลางการไหลหมุนวนหลักที่ช่องเปิดด้านท้ายขนาดต่างๆ

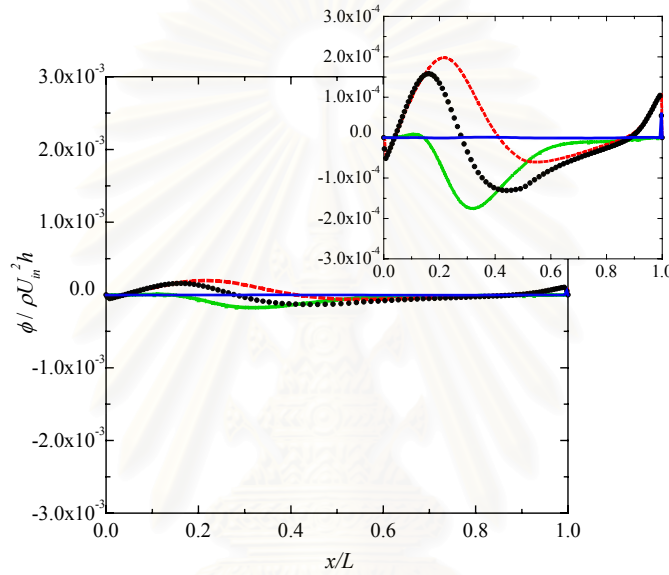


รูปที่ 3.43 งบดุลของสมการการถ่ายเทโมเมนตัมตามแนวแกน  $x$  ที่ความสูง  $y/H = 0.5$  สำหรับการไหลที่  $Re = 1, 10$  และ  $100$

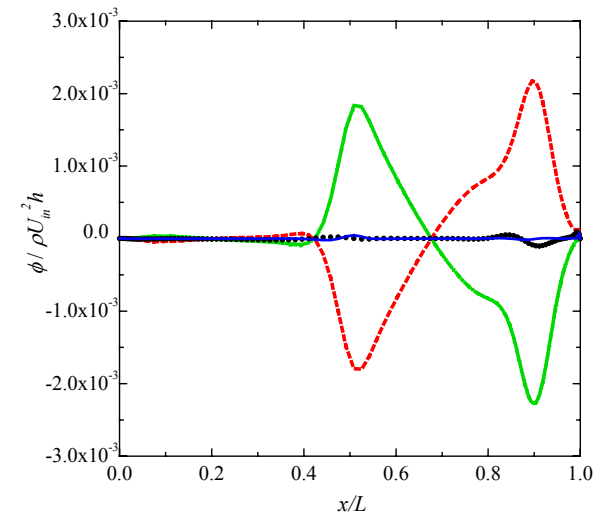




$Re = 1$



$Re = 10$



$Re = 100$

$\phi$  ..... Diffusion    - · - · Convection    - - - Pressure gradient    — Balance

รูปที่ 3.43 (ต่อ)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

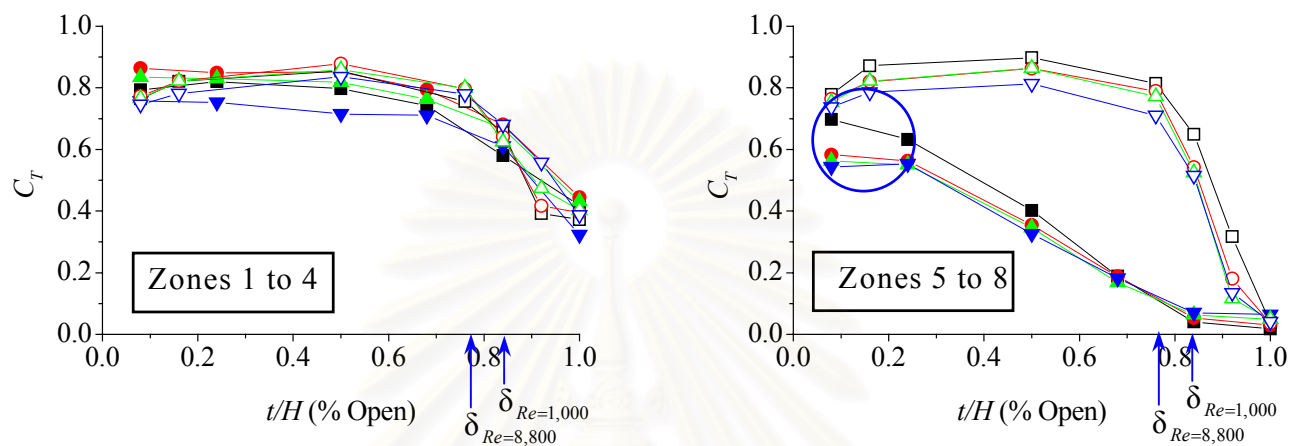


Fig. 8. Effects of supply-air velocity on the average temperatures in the upper and the lower zones for case L000; solid symbols - low supply-air velocity (present study), open symbols - high-supply air velocity (past study: Khuhiran et al., 1999). Note that each line represents the data for each zone

รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลของความเร็วที่ช่องทางอากาศเข้าต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ย ( $C_T$ ) ในบริเวณด้านบนและด้านล่างของห้องในกรณีที่ไม่มีการมี Lobed nozzle (Stitsuwongkul and Bunyajitradulya, 2000)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

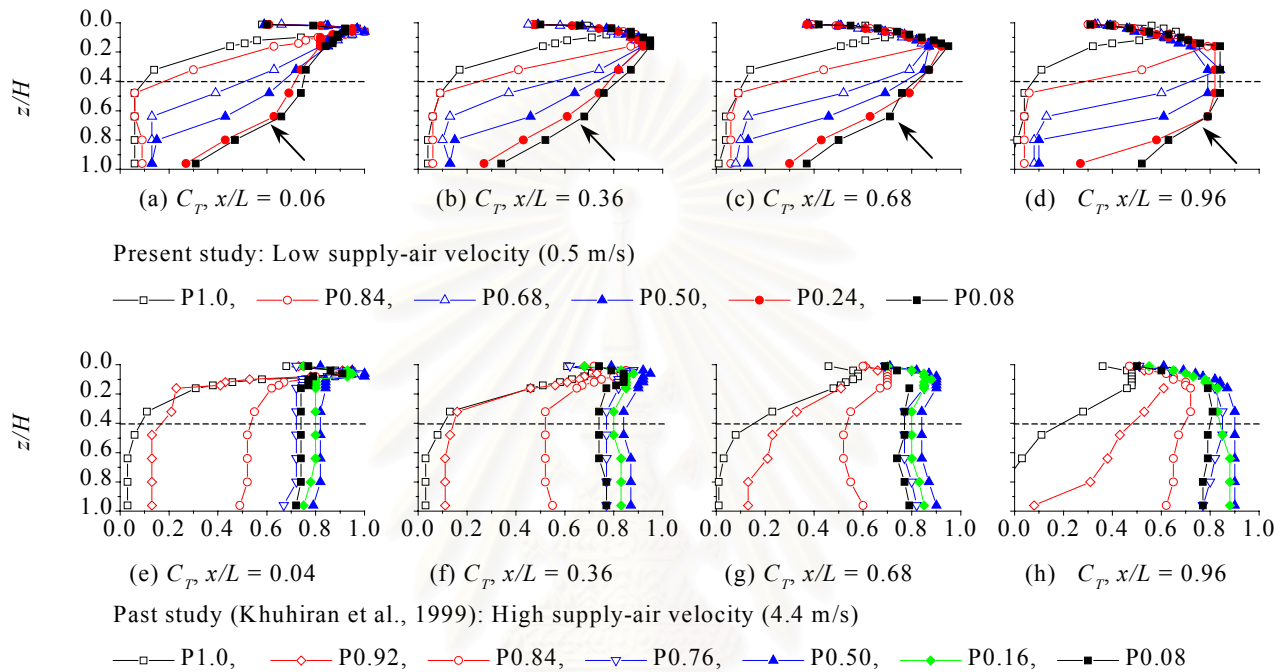
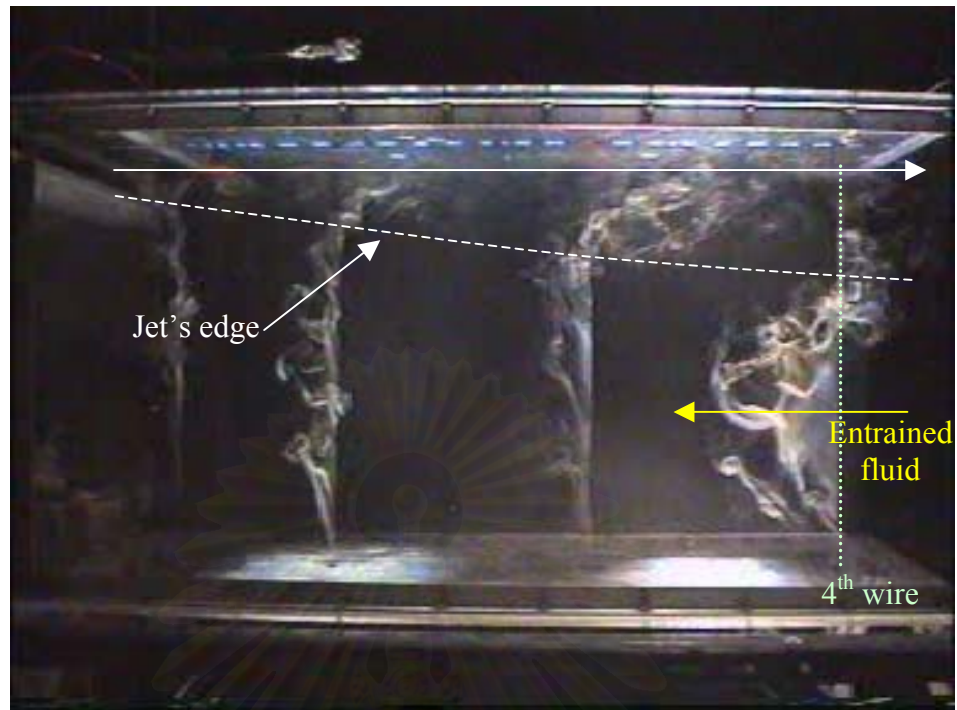
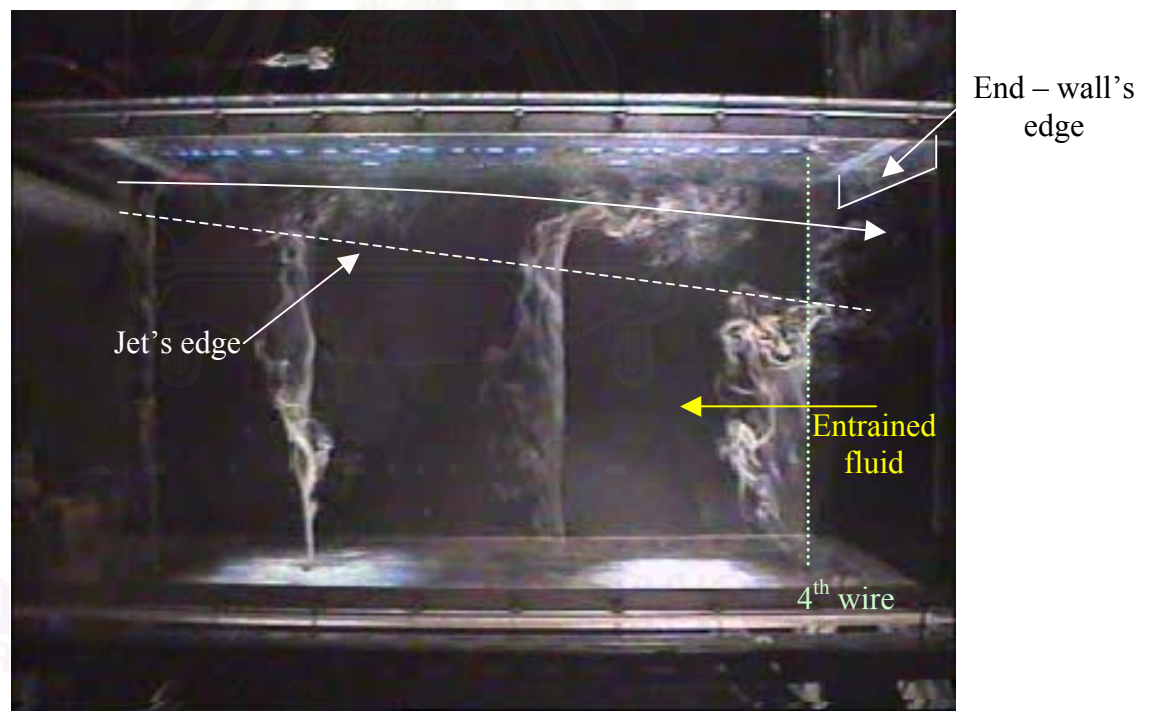


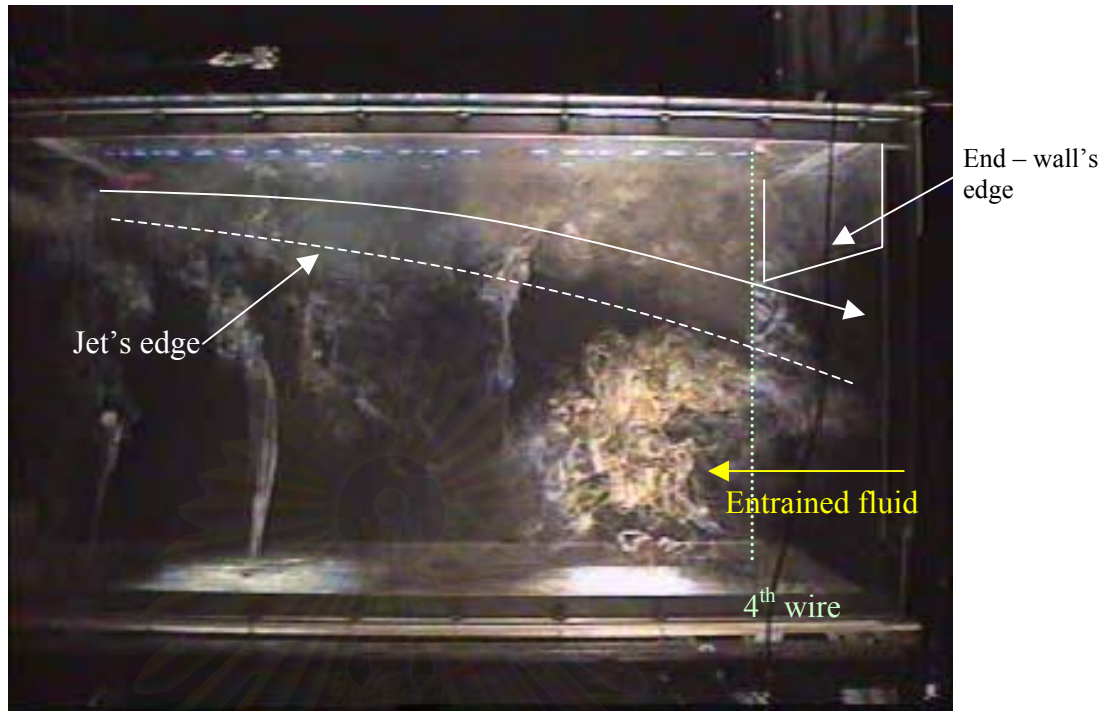
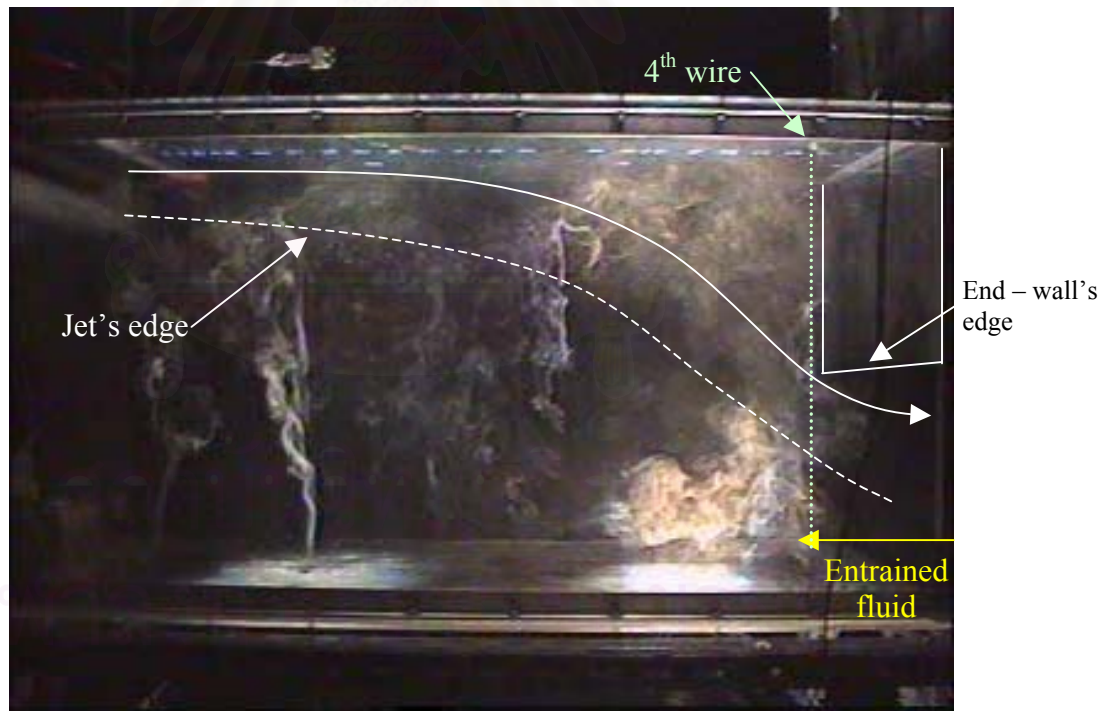
Fig. 9. Effect of supply-air velocity on temperature distribution inside the chamber for cases L000; (a)-(d) present study (velocity = 0.5 m/s), (e)-(h) past study (Khuhiran et al., 1999; velocity = 4.4 m/s). Dotted lines indicate the division between the upper and lower zones

รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลของความเร็วที่ช่องอากาศเข้าต่อลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ย ( $C_T$ ) ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนว Downstream บน Center plane (Stitsuwongkul and Bunyajitradulya, 2000)

(ก)  $t/H = 1.0$ (ข)  $t/H = 0.92$ 

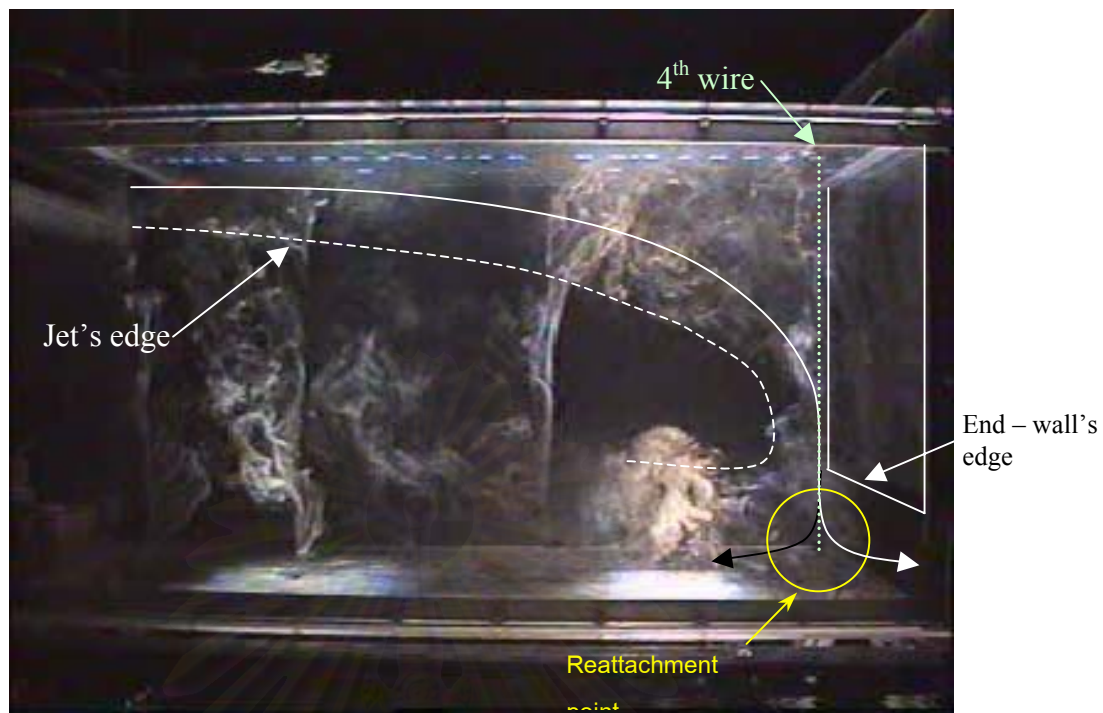
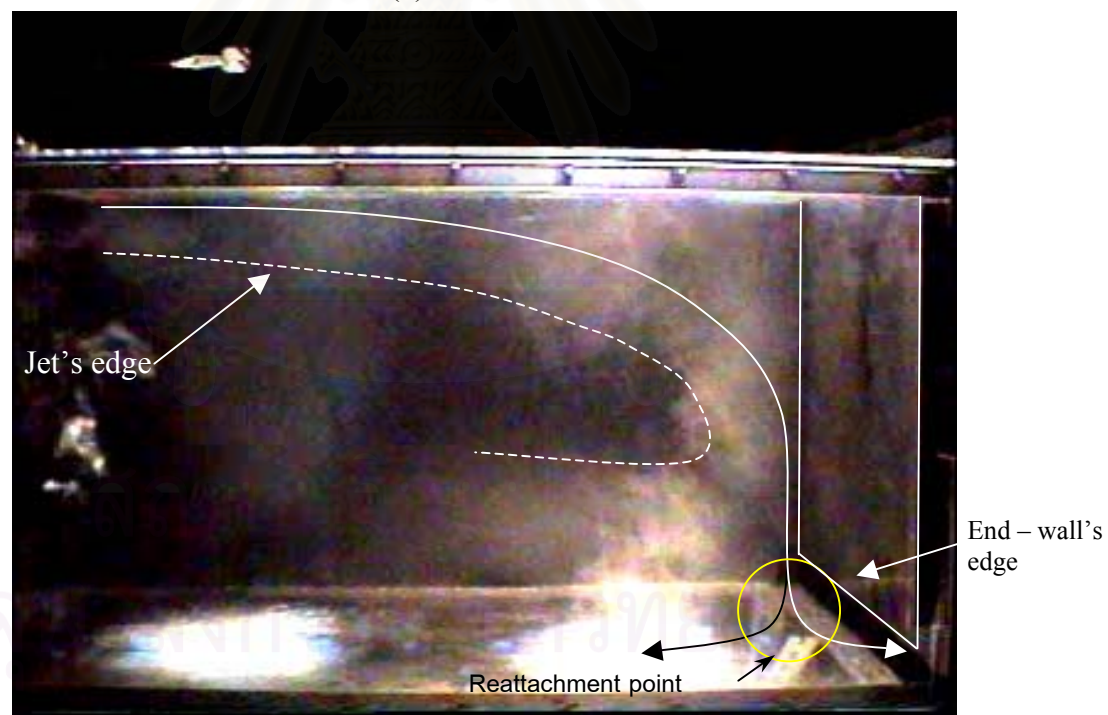
รูปที่ 4.3 ภาพ Flow visualization ด้วยวิธี Smoke – wire (Stitsuwongkul, 2000)

(ก)  $t/H = 1.0$ , (ข)  $t/H = 0.92$ , (ค)  $t/H = 0.76$ ,(ง)  $t/H = 0.5$ , (จ)  $t/H = 0.24$ , (ฉ)  $t/H = 0.08$

(ก)  $t/H = 0.76$ (ข)  $t/H = 0.5$ 

รูปที่ 4.3 (ต่อ)



(จ)  $t/H = 0.24$ (ข)  $t/H = 0.08$ 

รูปที่ 4.3 (ต่อ)



## รายการอ้างอิง

- Abbott, D.E., and Kline, S.J., (1962), "Experimental investigation of subsonic turbulent flow over single and double backward facing steps," *Trans. A.S.M.E. D : J.Basic Eng.*, Vol. 84, pp. 317.
- Armaly, B.F., Durst, F., Pereira, J.C.F., and Schonung, B., (1983), "Experimental and Theoretical Investigation of Backward – Facing Step Flow," *J.Fluid Mech.*, Vol. 127, pp. 473-496.
- Bradshaw, P., and Wong, F.Y.F., (1972), "The Reattachment and Relaxation of a Turbulent Shear Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 52, pp. 113-135.
- Brederode, V. de, and Bradshaw, P., (1972), "Three-dimensional flow in nominally two-dimensional separation bubbles," Flow behind a rearward-facing step. *I.C. Aero – Rep.*, pp.72-19
- Davidson, L. and Nielsen, P.V., (1996), "Large Eddy Simulations of The Flow in a Three-dimensional Ventilated Room," *In 5<sup>th</sup> Int. Conf. On Air Distributions in Rooms, ROOMVENT'96*, July 17-19, Vol. 2, pp. 161-168, Yokohama, Japan.
- Davidson, L. and Nielsen, P.V., (1998), "A Study of Low-Reynolds Number Effects in Backward-Facing Step Flow Using Large Eddy Simulations," *In 6<sup>th</sup> Int. Conf. On Air Distributions in Rooms, ROOMVENT'98*, Vol. 1, pp. 125-132, Stockholm, Sweden.
- Davidson, L., (1996), "Implementation of Large Eddy Simulation Method Applied to Recirculating Flow in a Ventilated Room," *Report ISSN 1395-7953 R9611*, Dep. Of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University.
- Davidson, L., Nielsen, P.V. and Topp. C., (2000), "Low-Reynolds Number Effects in Ventilated Rooms : A Numerical Study," *In 7<sup>th</sup> Int. Conf. On Air Distributions in Rooms, ROOMVENT 2000*, pp. 307 – 312, Reading, U.K.
- Ferziger, J.H., and Peric, M., (1999), Computational Methods for Fluid Dynamics, 2<sup>nd</sup> Edition, Springer-Verlag.
- Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W.H., (1991), "A Dynamic Subgrid-scale Eddy Viscosity Model," *Phys. Fluids A* , Vol. 3, 1760 – 1765.
- Ghia, U., Ghia, K.N. and Shin, C.T., (1982), "High-Re solutions for incompressible flow using the Navier-Stokes equations and a multigrid method," *J.Comput. Phys.*, Vol. 48, pp. 387 – 411.
- Goldstein, R.J., Eriksen, V.L., Olson, R.M., and Eckert, E.R.G., (1970), "Laminar Separation, Reattachment, and Transition of the Flow over a Downstream-facing Step," *J.Basic Eng., Trans. ASME*, Vol. 92, pp. 732 – 741.
- Gosman, A.D., and Pun, W.M., (1974), "Calculation of Recirculating Flows," Lecture notes for the course entitled, Imperial College, Heat Transfer Section, Report HTS/74/2
- Gosman, A.D., Khalil, E.E., and Whitelaw, J.H., (1979), "The Calculation of Two-Dimension Turbulent Recirculating Flows," Turbulent Shear Flow I, Springer-Verlag, New York, pp. 237-255.
- Gosman, A.D., Nielsen, P.V., Restivo, A., and Whitelaw, J.H., (1980), "The Flow Properties of Rooms With Small Ventilation Openings," *ASME Journal Fluids Engineering*, Vol. 102, pp. 316-323.
- Kuhiran, C., Mantajit, J., Wetchagarun, S., Boonrat, S., Katsuwon, T., Stitsuwongkul, T., and Bunyajitradulya, A. (1999), "Effect of End-Wall Opening on Temperature Distribution in A Ventilated Chamber," *Preceeding of*

- the 13<sup>th</sup> National Mechanical Engineering Conference*, 2-3 December 1999, Royal Cliff Beach Resort Hotel, South Pattaya, Chonburi.
- Lauder, B.E., and Spalding, D.B., (1972), Mathematical Models of Turbulence, Academic Press, London.
- Melaen, M.C., (1990), "Analysis of Curvilinear Non-Orthogonal Coordinates for Numerical Calculation of Fluid Flow in Complex Geometries," Ph.D. Thesis, University of Trondheim.
- Moss, W.D., Baker, S., and Bradbury, L.J.S., (1979), "Measurements of Mean Velocity and Reynolds Stresses in Some Regions of Recirculating Flow," Turbulent Shear Flow I, Springer-Verlag, New York, pp. 198-207.
- Nielsen, P.V., Restivo, A., and Whitelaw, J.H., (1978), "The Velocity Characteristics of Ventilated Rooms," *ASME Journal Fluids Engineering*, Vol. 100, pp. 291-298.
- Otugen, M.V., (1991), "Expansion ratio effects on the separated shear layer and reattachment downstream of a backward-facing step," *Experiments in fluids*, Vol. 10, pp. 273-280.
- Patankar, S.V., (1980), Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation.
- Peng, S.H., Davidson, L. and Holmberg, S., (1996), "The Two-Equation Turbulence  $k - \omega$  Model Applied to Recirculating Ventilated Flows," Report 96/13, Dept. of Thermo and Fluid Dynamics, Chalmers University of Technology, Gothenberg.
- Peng, S.H., Davidson, L., and Holmberg, S., (1997), "A Modified Low-Reynolds-Number  $k - \omega$  Model for Recirculating Flows," *ASME Journal Fluids Engineering*, Vol. 119, pp. 867-875.
- Peric, M., Kessler, R. and Scheuerer, G., (1988), "Comparison of finite-volume numerical methods with staggered and collocated grids," *Computer & Fluids*, Vol. 16, No. 4, pp. 389-403.
- Restivo, A., (1979), "Turbulent Flow in Ventilation Rooms," Ph.D. Thesis, University of London, Imperial College of Science and Technology, Mechanical Engineering Department.
- Rhie, C.M. and Chow, W.L., (1982), "A numerical study of the turbulent flow past an isolated airfoil with trailing edge separation," *AIAA-82-0998*.
- Romano, G.P., Pomponio, S. and Querzoli, G., (1997), "An Investigation on the Fluctuations of the Reattachment Point Downstream Backward Facing Step Using Particle Tracking Velocimetry," *In 11<sup>th</sup> Int. Symp. on Turbulent Shear Flow, Grenoble*, Vol. 3, pp. 30.7-30.12.
- Sezai, I and Mohamad, A.A., (1998), "Three-dimensional Simulation of Natural Convection in Cavities with Side Opening," *Int. J. of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, Vol. 8, No. 7, pp. 800-813.
- Smagorinsky, J., (1963), "General Circulation Experiments with the Primitive Equations," *Monthly Weather Review*, Vol. 91, pp. 99-165.
- Stitsuwongkul, T. and Bunyajitradulya, A., (2000), "Temperature Distribution Inside A Ventilated Chamber : Effects of Lobed Nozzle, Supply-Air Velocity and End-Opening," *R&D Journal of EIT*, Vol. 11, No. 3, pp. 57-68.
- Stitsuwongkul, T., (2000), "Mixing Enhancement in a Ventilated Chamber by Means of Manipulation of a Nozzle Exit," M. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.
- Stone, H.L., (1968), "Iterative solution of implicit approximations of multidimensional partial differential equations," *SIAM J. Numer. Anal.*, Vol. 5, pp. 530-558.

- Thangam, S. and Knight, D. D., (1990), "A computational scheme in generalized coordinates for viscous incompressible flows," *Computers & Fluids*, Vol. 18, pp. 317 – 327.
- Topp. C., Nielsen, P.V. and Davidson, L, (2000), "Room Airflows with Low Reynolds Number Effects," *In 7<sup>th</sup> Int. Conf. On Air Distributions in Rooms, ROOMVENT 2000*, Reading, U.K.
- Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., (1995), An Introduction to Computational Fluid Dynamics : The Finite Volume Method, Longman Scientific & Technical, Longman Group Limited.
- Wilcox, D.C., (1994), "Simulation of Transition with a Two-Equation Turbulence Model," *AIAA Journal*, Vol. 32, pp. 247-255.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ, (2538), ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**ภาคผนวก**

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก.

### โปรแกรมส่วนการคำนวณก่อนการวิเคราะห์

โปรแกรมส่วนการคำนวณก่อนการวิเคราะห์ ประกอบด้วยโปรแกรม GRID.for ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างกริดสำหรับการคำนวณ จากรูปร่างของปัญหาที่สนใจ ในขั้นตอนนี้โปรแกรมสามารถสร้างกริดรูปสี่เหลี่ยมที่มีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ (Uniform grid) และไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid) ในระบบแกนพิกัดฉาก (Cartesian coordinate) สำหรับปัญหาใน 2 มิติ แต่การปรับปรุงโปรแกรมให้สร้างกริดสำหรับปัญหาใน 3 มิติสามารถทำได้ไม่ยากนัก

สำหรับการทำงานของโปรแกรม จะคำนวณตำแหน่งของผิวปริมาตรควบคุมที่ละแกนพิกัด โดยโหนดซึ่งเป็นตำแหน่งที่เก็บค่าของตัวแปรต่างๆ จะอยู่กึ่งกลางระหว่างผิวของปริมาตรควบคุม

ในการคำนวณจะเริ่มจากแกน  $x$  แล้วจึงเป็นแกน  $y$  โดยในแต่ละแกนพิกัดจะแบ่งออกเป็นช่วงเล็กๆ (Sub-section) หลายๆ ช่วง และในแต่ละช่วงจะแบ่งออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็กๆ อีกทีหนึ่ง เพื่อให้โปรแกรมสามารถสร้างกริดที่เหมาะสมกับปัญหาได้หลากหลายรูปแบบ ดังนั้นโปรแกรม GRID.for จึงต้องการข้อมูลของ 1) จำนวนช่วงที่แบ่งในแต่ละแกนพิกัด 2) ความยาวของแต่ละช่วง 3) จำนวนปริมาตรควบคุมในแต่ละช่วง และ 4) อัตราส่วนการขยายตัว หรือหดตัวของปริมาตรควบคุม (Expansion or compression ratio) เพื่อควบคุมลักษณะการกระจายตัวของปริมาตรควบคุมในแต่ละช่วง

สำหรับผลที่ได้จากโปรแกรม GRID.for จะเป็นตำแหน่งของผิวปริมาตรควบคุมในแกนพิกัด  $x$  และ  $y$  โดยเขียนลงในไฟล์ GRID.inp ซึ่งเป็นไฟล์แบบ ASCII เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณ และแสดงผลต่อไป

#### ก.1 ขั้นตอนการคำนวณ

ในการคำนวณจะใช้สมการที่ ก.1 ซึ่งเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์พื้นฐานระหว่างตำแหน่งของผิวปริมาตรควบคุม

$$X_{i+1} = X_i + \Delta X_{i+1} \quad \text{เมื่อ} \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, NI \quad (\text{ก.1})$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 X_1 &= X_0 + \Delta X_1 \\
 X_2 &= X_1 + \Delta X_2 \\
 X_3 &= X_2 + \Delta X_3 \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 &\vdots
 \end{aligned}$$

เพื่อควบคุมให้ขนาดของปริมาณควบคุมมีการกระจายตัวที่คงที่ในแต่ละช่วง จึงต้องกำหนดอัตราส่วนการขยายตัว หรือหดตัวของปริมาณควบคุม

$$\gamma = \frac{\Delta X_{i+1}}{\Delta X_i} \quad (\text{ก.2})$$

แทนค่าสมการ ก.2 ลงในสมการ ก.1 แล้วจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\begin{aligned}
 X_1 &= X_0 + \Delta X_1 \\
 X_2 &= X_1 + \Delta X_2 = X_1 + \gamma \Delta X_1 = X_0 + \Delta X_1 + \gamma \Delta X_1 \\
 X_3 &= X_2 + \Delta X_3 = X_2 + \gamma^2 \Delta X_1 = X_0 + \Delta X_1 + \gamma \Delta X_1 + \gamma^2 \Delta X_1 \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 X_{NI} &= X_{NI-1} + \Delta X_{NI} = X_{NI-1} + \gamma^{NI-1} \Delta X_1 = X_0 + \Delta X_1 \sum_{M=1}^{NI} \gamma^{M-1}
 \end{aligned}$$

และเมื่อผลต่างระหว่าง  $X_{NI}$  กับ  $X_0$  คือระยะทางทั้งหมดในช่วงนั้น จะได้

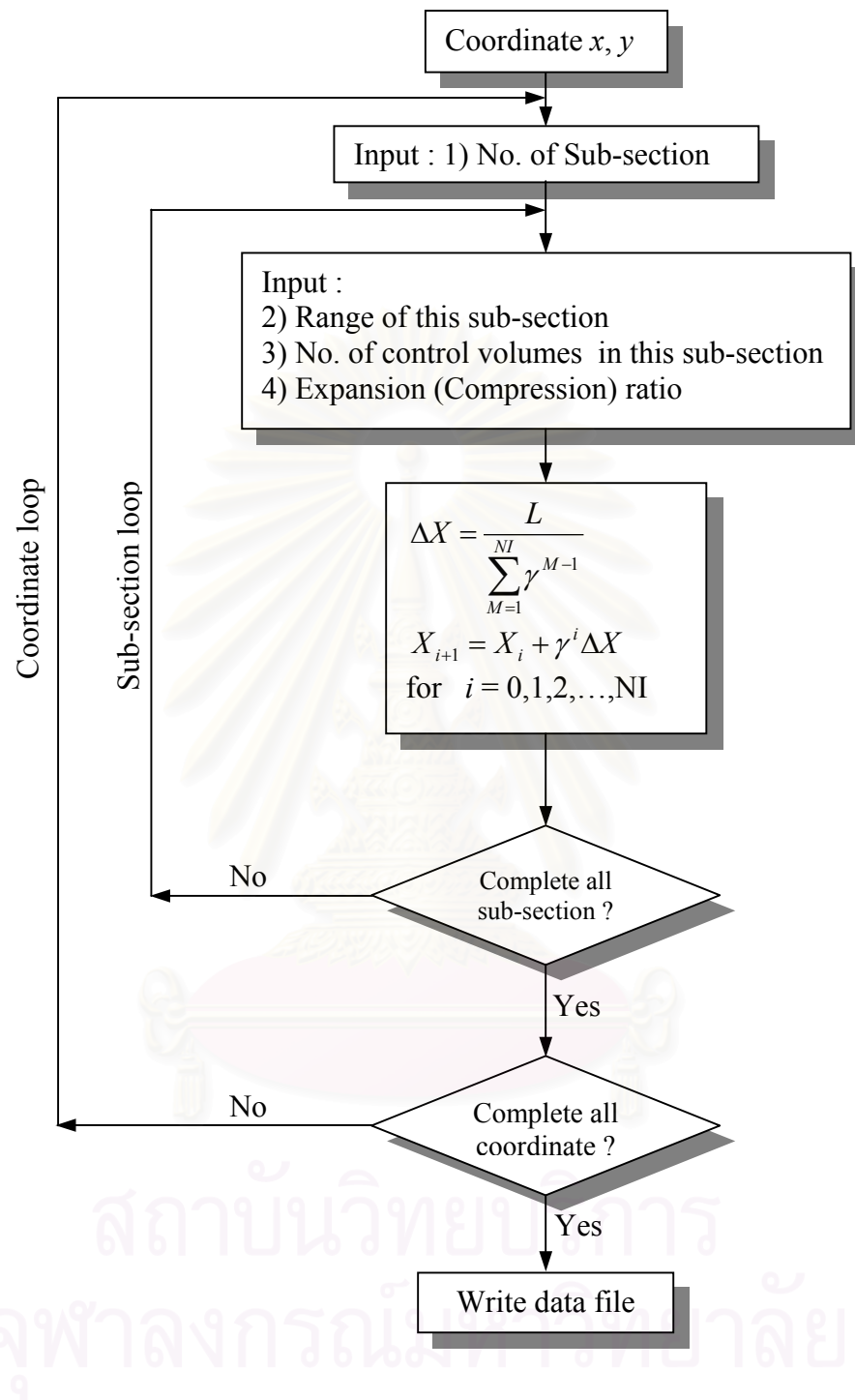
$$\begin{aligned}
 X_{NI} - X_0 &= L = X_0 + \Delta X_1 \sum_{M=1}^{NI} \gamma^{M-1} - X_0 \\
 \Delta X_1 &= \frac{L}{\sum_{M=1}^{NI} \gamma^{M-1}} \quad (\text{ก.3})
 \end{aligned}$$

ดังนั้นในการคำนวณหาตำแหน่งของผิวปริมาณควบคุม จึงต้องคำนวณ  $\Delta X_1$  จากอัตราส่วนการขยายตัว หรือหดตัวของปริมาณควบคุมที่กำหนดสำหรับแต่ละช่วงเสียก่อน จากนั้นจึงคำนวณตำแหน่งของผิวปริมาณควบคุมในช่วงนั้นๆ ตามสมการที่ ก.4

$$X_{i+1} = X_i + \gamma^i \Delta X_1 \quad \text{เมื่อ} \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, NI \quad (\text{ก.4})$$

สำหรับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม GRID.for ได้แสดงไว้เป็นแผนภูมิการทำงานในรูปที่ ก.1





รูปที่ ก.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม GRID.for

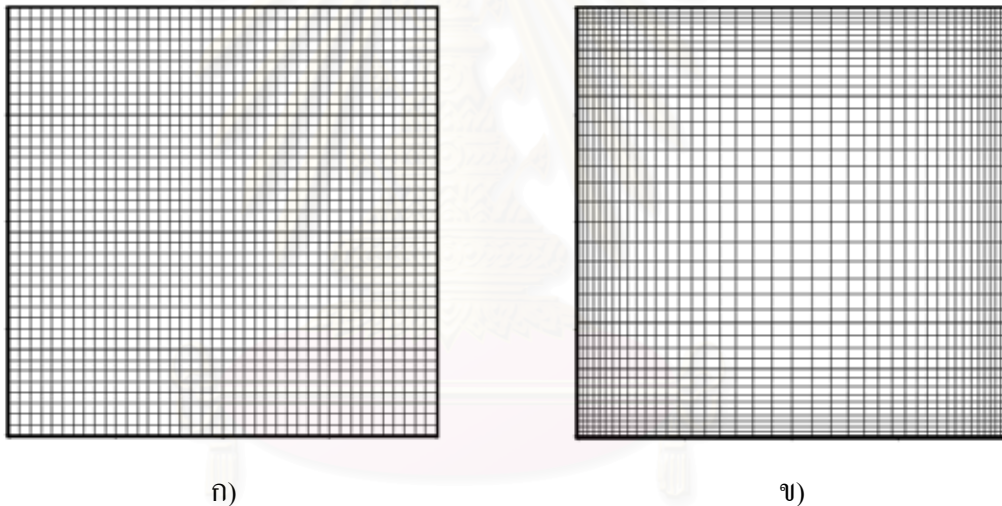
## ก.2 ผลที่ได้จากโปรแกรม

รูปที่ ก.2 – ก.4 แสดงตัวอย่างกริดที่ได้จากโปรแกรม GRID.for สำหรับปัญหาการไหลแบบต่างๆ โดย

รูปที่ ก.2 (ก) แสดงกริดที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (Uniform grid) และรูปที่ ก.2 (ข) แสดงกริดที่มีการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid) สำหรับปัญหาการไหลในช่องว่าง (Cavity flow)

รูปที่ ก.3 แสดงกริดที่ใช้ในการจำลองการไหลภายในห้องระบายอากาศ ในกรณีที่เปิดผนังท้ายห้องเต็มๆ ( $t/H = 1.0$ )

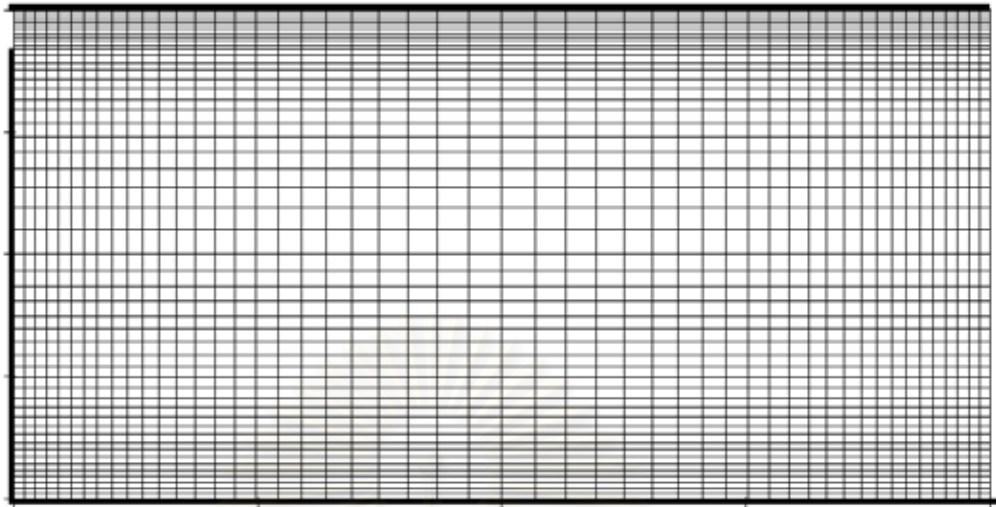
และรูปที่ ก.4 แสดงกริดสำหรับปัญหาการไหลผ่านทรงกระบอกสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Flow past a square cylinder)



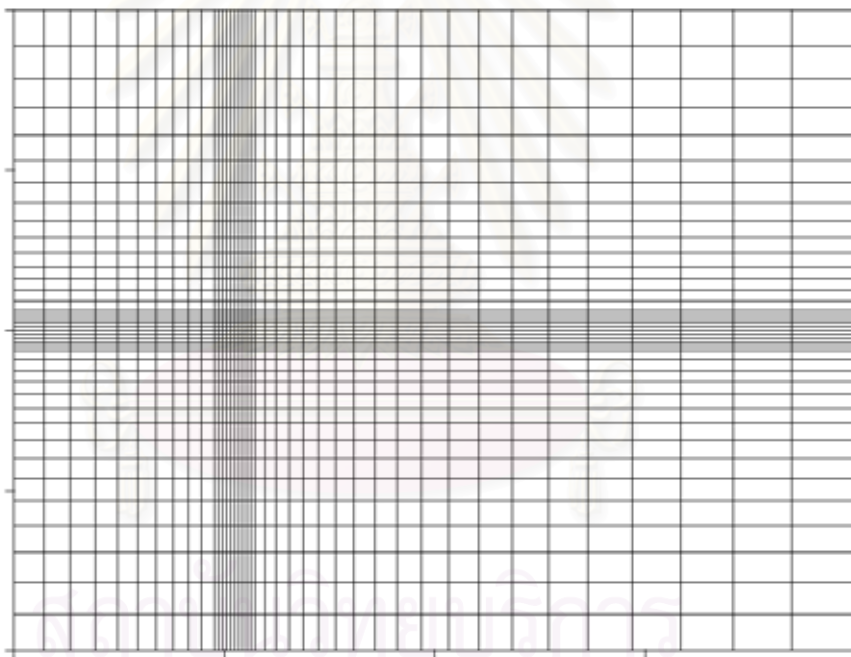
รูปที่ ก.2 กริดสำหรับปัญหาการไหลในช่องว่าง (Cavity flow)

ก) กริดที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

ข) กริดที่มีการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ ก.3 กริดสำหรับปัญหาการไหลภายในห้องระบายอากาศ (กรณี  $t/H = 1.0$ )



รูปที่ ก.4 กริดสำหรับปัญหาการไหลผ่านทรงกระบอกสี่เหลี่ยมจัตุรัส

จากผลที่ได้ในรูปที่ ก.2 – ก.4 แสดงให้เห็นว่าโปรแกรม GRID.for สามารถสร้างกริดที่เหมาะสมกับปัญหาการไหลในลักษณะต่างๆ ได้ ทั้งยังสามารถปรับเปลี่ยนจำนวน และลักษณะการกระจายตัวของปริมาตรควบคุมให้เหมาะสมกับความละเอียดของการวิเคราะห์ได้อีกด้วย และถึงแม้ว่าโปรแกรม GRID.for จะมีข้อจำกัดในการสร้างกริดได้เฉพาะในระบบแกนพิกัดฉาก (Cartesian coordinate) เท่านั้น แต่ก็เพียงพอสำหรับงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และการวิเคราะห์ปัญหาพื้นฐานทั่วไป

### ก.3 รายละเอียดโปรแกรม GRID.for

```

PROGRAM GRID
PARAMETER (NX=250,NY=250)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
COMMON/GEO/XU(NX),YV(NY),JSTART(NX),JEND(NY),Z(NX)
COMMON/CONT/ NI,NJ,NIM1,NJM1,JWIN,JOUT

C-----
C GENERATE NON-UNIFORM GRID
C-----
WRITE(*,*) 'GENERATED GRID FOR FLOW IN VENTILATED CHAMBER'
WRITE(*,*) 'ARE YOU READY TO GO ?'
PAUSE

XU(1) = 0.0
XU(2) = 0.0
YV(1) = 0.0
YV(2) = 0.0

C-----
C READ DATA FROM MONITOR AND
C GENERATE X AND Y COORDINATE BY
C USE Z(NX) AS A TEMPORARY ARRAY
C-----

C-----
C OPEN ECHO INPUT FILE
C-----
OPEN (UNIT=5,FILE='ECHO.DAT')
REWIND(5)

DO L=1,2
IF (L.EQ.1) THEN
WRITE(*,*)
WRITE(*,*) 'X - COORDINATE'

WRITE(5,*)
WRITE(5,*) 'X - COORDINATE'

ELSE
WRITE(*,*)
WRITE(*,*) 'Y - COORDINATE'

WRITE(5,*)
WRITE(5,*) 'Y - COORDINATE'

END IF

WRITE(*,*) 'ENTER NUMBER OF SUB-SECTION'
READ(*,*) NSUB

N = 2
DO K=1,NSUB
WRITE(*,*) 'ENTER LENGTH OF ',K,' SUB-SECTION'
READ(*,*) RANGE

WRITE(5,*) 'LENGTH OF ',K,' SUB-SECTION'
WRITE(5,*) RANGE

WRITE(*,*) 'ENTER NUMBER OF CONTROL VOLUME'
READ(*,*) NISUB

WRITE(5,*) 'NUMBER OF CONTROL VOLUME'
WRITE(5,*) NISUB

WRITE(*,*) 'ENTER EXPANSION RATIO AND CLUSTER SIDE'
WRITE(*,*) '0 : NEAR ORIGIN, 1 : NEAR END'
READ(*,*) RZ,IZ

WRITE(5,*) 'EXPANSION RATIO AND CLUSTER SIDE'
WRITE(5,*) RZ,IZ

NN = N + NISUB
TOZ = 0.0
DO I=N+1,NN
TOZ = TOZ + RZ**(I-N-1)
END DO
DZ = RANGE/TOZ
IF (IZ.EQ.0) THEN
DO I=N+1,NN
Z(I) = Z(I-1) + DZ*RZ**(I-N-1)
END DO
ELSE
DO I=N+1,NN
II = N+1+NN-I
Z(I) = Z(I-1) + DZ*RZ**(II-N-1)
END DO
END IF

N = NN
END DO

C-----
C COPY Z TO X OR Y
C-----
IF (L.EQ.1) THEN
NI = N
NIM1 = NI - 1
DO I=1,NI
XU(I) = Z(I)
END DO
ELSE

```

```

      NJ = N
      NJM1 = NJ - 1
      DO J=1,NJ
        YV(J) = Z(J)
      END DO
    END IF
  END DO

C-----
C      SET UP JSTART(I) AND JEND(I)
C-----
  DO I=1,NI
    JSTART(I) = 2
    JEND(I) = NJM1
  END DO

C-----
C      CALCULATE INLET AND OUTLET POSITION
C      JWIN POSITION OF A INLET
C      JOUT POSITION OF A OUTLET
C-----
  WRITE(*,*)
  WRITE(*,*) 'ENTER INLET POSITION (H-h)'
  READ(*,*) YWIN

  WRITE(*,*) 'ENTER OUTPUT POSITION (t)'
  READ(*,*) YOUT

  JWIN = 0
  JOUT = 0
  DO J=1,NJ
    IF (ABS(YV(J)-YWIN).LE.1E-8) JWIN = J-1
    IF (ABS(YV(J)-YOUT).LE.1E-8) JOUT = J-1
  END DO

  IF ((JWIN.EQ.0).OR.(JOUT.EQ.0)) THEN
    WRITE(*,*) 'INLET OR OUTLET COORDINATE IS NOT MATCH.'
    STOP
  END IF

C-----
C      WRITE OUTPUT FILE
C-----

C-----
      CALL PGRID
      CLOSE(5)
      END

      SUBROUTINE PGRID
C*****
C      WRITE GRID DATA FILE FOR PSpIot.for
C*****
      PARAMETER (NX=250,NY=250)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      COMMON/Geo/ XU(NX),YV(NY),JSTART(NX),JEND(NY),Z(NX)
      COMMON/CONT/ NI,NJ,NIM1,NJM1,JWIN,JOUT
      CHARACTER NAME*15

      WRITE(*,*) 'ENTER GRID INPUT FILE NAME (Grid.inp)'
      READ(*,1001) NAME
1001 FORMAT(A15)

      OPEN(UNIT=9,FILE=NAME)
      REWIND (9)
      WRITE(9,1002) NI,NJ,JWIN,JOUT
1002 FORMAT(8 I5)

      DO I=1,NI
        WRITE(9,1003) XU(I),JSTART(I),JEND(I)
1003 FORMAT(E15.8,2I5)

        DO J=1,NJ
          WRITE(9,1004) YV(J)
1004 FORMAT(E15.8)
        END DO
      END DO
      CLOSE(9)

      RETURN
      END

```

## ภาคผนวก ข.

### โปรแกรมส่วนการวิเคราะห์ปัญหา

โปรแกรมส่วนการวิเคราะห์ปัญหา (SIMPLE) เป็นกลุ่มโปรแกรมที่ทำหน้าที่คำนวณหาผลลัพธ์ของปัญหาการไหลที่สนใจด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขส่วนต่างๆ ดังที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 2 โปรแกรมนี้ประกอบไปด้วยโปรแกรมหลัก และกลุ่มของโปรแกรมย่อย (Sub-routine) ซึ่งเขียนแยกเป็นคอมไพเลอร์ไฟล์ภาษา FORTAN จำนวน 10 ไฟล์ เพื่อความสะดวกในการตรวจสอบแก้ไข หรือคัดแปลงโปรแกรมให้เหมาะสมกับแต่ละปัญหาที่สนใจ โดยรายชื่อ และหน้าที่ของคอมไพเลอร์ไฟล์ทั้งหมดในโปรแกรมนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ ข.1 โปรแกรม SIMPLE จะมีไฟล์ชื่อ SIMPLE.for เป็นโปรแกรมหลัก (Main program) ซึ่งจะทำหน้าที่เรียกใช้งานโปรแกรมย่อยที่ถูกเขียนแยกไว้ในแต่ละไฟล์ โดยมีไฟล์ Data.ref ทำหน้าที่อ้างอิงตัวแปรต่างๆ ที่เรียกใช้ในทุกโปรแกรมย่อย ส่วนผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมส่วนนี้จะบันทึกไว้ในไฟล์ชื่อ Dat.inp เพื่อใช้ในการแสดงผล และคำนวณหาข้อมูลอื่นๆ ต่อไป

#### ข.1 ขั้นตอนการคำนวณ

ในส่วนการทำงาน of โปรแกรม SIMPLE จะเริ่มจากโปรแกรมหลักจะเรียกโปรแกรมย่อย MODINP เพื่ออ่านข้อมูลของพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของโปรแกรมจากไฟล์ VC.inp แล้วจึงเรียกโปรแกรมย่อย GRIDIN เพื่ออ่านข้อมูลตำแหน่งของกริดสำหรับการคำนวณจากไฟล์ GRID.inp ซึ่งเป็นผลที่ได้จากโปรแกรมส่วนการคำนวณก่อนการวิเคราะห์ (GRID.for)

ต่อมาโปรแกรมหลักจะเตรียมค่าของตัวแปรทุกตัว และคุณสมบัติของของไหล ก่อนการคำนวณโดยเรียกโปรแกรมย่อย INIT และ PROPS ตามลำดับ หลังจากนั้น การทำงานของโปรแกรมหลักจะเข้าสู่รอบการคำนวณหลัก (Main iteration loop)

ในวงรอบการคำนวณหลัก จะเริ่มจากการเรียกโปรแกรมย่อย CALCU เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การคำนวณของสมการโมเมนต์ตามแนวแกน  $x$  ที่มี  $u$  เป็นตัวแปรบนทุกปริมาตรควบคุมที่ล้อมรอบโหนด  $u$  จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตเข้ากับระบบสมการ โดยเรียกโปรแกรมย่อย MODU แล้วจึงแก้ระบบสมการทั้งหมดเพื่อคำนวณค่าความเร็ว  $u$  ค่าใหม่ โดยเรียกโปรแกรมย่อย LISOLV

หลังจากโปรแกรมย่อย CALCU ทำงานเสร็จเรียบร้อยแล้ว โปรแกรมหลักก็จะเรียกโปรแกรมย่อย CALCV และ CALCP ให้ทำงานต่อตามลำดับ ซึ่งโปรแกรมย่อยทั้งสองจะมีขั้นตอนการทำงานภายในเหมือนกับโปรแกรมย่อย CALCU โดย CALCV จะคำนวณหาค่า



ความเร็ว  $v$  ค่าใหม่จากสมการโมเมนต์ตามแนวแกน  $y$  ในขณะที่ CALCP จะคำนวณหาค่าความดันแก้ไข ( $P'$ ) จากสมการผลต่างความดัน และแก้ไขค่าความเร็ว  $u, v$  และความดัน

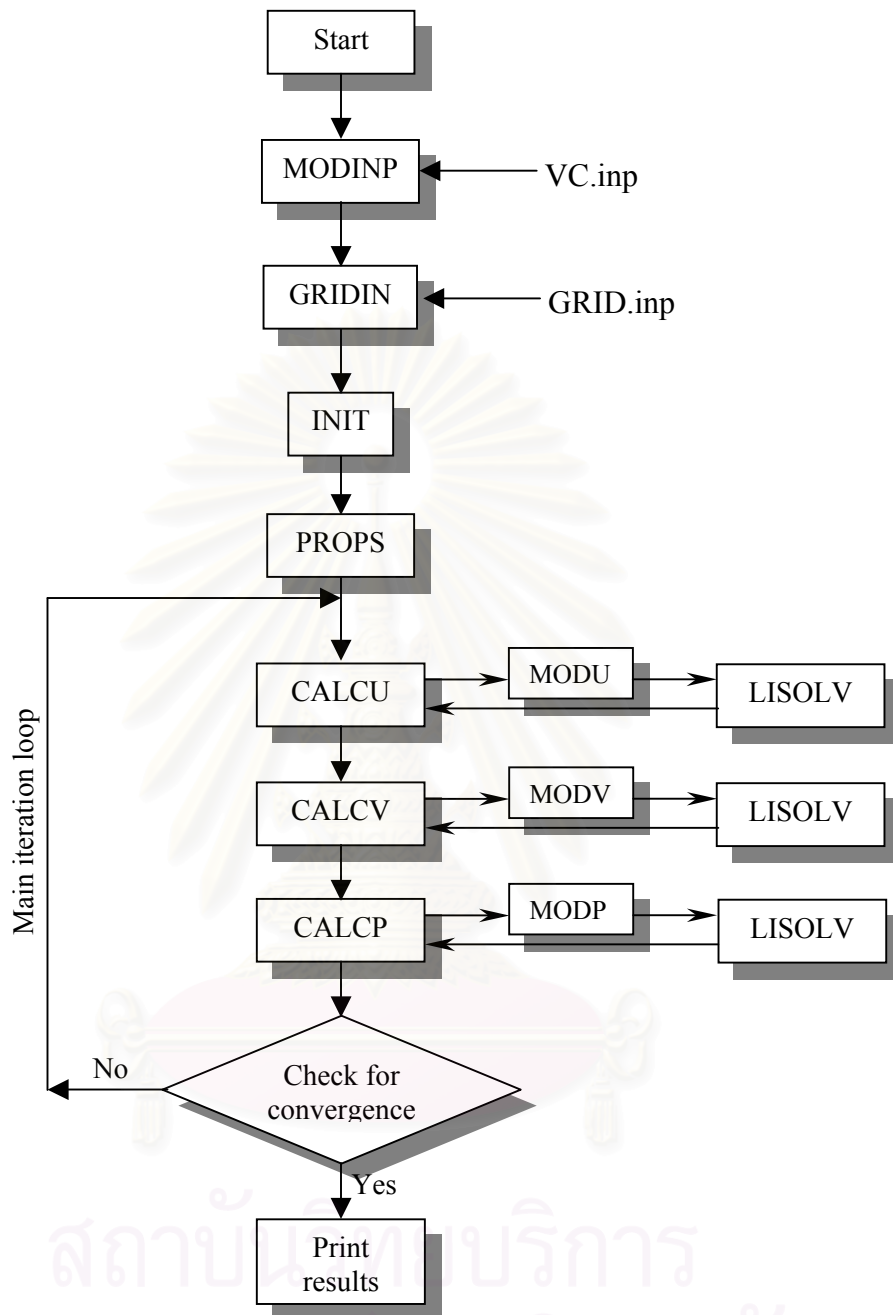
ต่อจากนั้นโปรแกรมจะตรวจสอบการลู่เข้าของการคำนวณ โดยพิจารณาจากค่าที่มากที่สุดของค่าเศษคงเหลือจากสมการทั้งสาม หากว่าค่าเศษคงเหลือที่มากที่สุดนี้มีค่ามากกว่าค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ (Convergence criteria,  $\epsilon$ ) โปรแกรมจะเริ่มการคำนวณในวงรอบการคำนวณหลักซ้ำอีกครั้ง จนกว่าค่าเศษคงเหลือที่มากที่สุดจะมีค่าน้อยกว่า  $\epsilon$  จากนั้นโปรแกรมจึงจะเขียนผลลัพธ์ที่คำนวณได้ทั้งหมดลงในไฟล์ Dat.inp ซึ่งเป็นไฟล์แบบ ASCII เพื่อนำไปใช้ในการแสดงผลต่อไป สำหรับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม ได้สรุปไว้เป็นแผนภูมิการทำงานในรูปที่ ข.1



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายชื่อโปรแกรมไฟล์	รายละเอียดการทำงาน
SIMPLE.for	เป็นส่วนหลักของโปรแกรมทั้งหมด ทำหน้าที่เรียกใช้โปรแกรมย่อยส่วนต่าง ๆ
MODINP.for	อ่านข้อมูลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของโปรแกรม SIMPLE จากไฟล์ VC.inp
GRIDIN.for	อ่านข้อมูลตำแหน่งของกริดจากไฟล์ Grid.inp
USER.for	ประกอบด้วยโปรแกรมย่อยที่ทำหน้าที่เตรียมข้อมูลของตัวแปรทุกตัว (INIT), คำนวณคุณสมบัติของของไหล (PROPS) และ การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตเข้ากับแต่ละสมการ (MODU, MODV และ MODP) ซึ่งในส่วนนี้ผู้ใช้โปรแกรมสามารถปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับแต่ละปัญหาได้
CALCU.for	คำนวณหาสัมประสิทธิ์การคำนวณ สำหรับความเร็ว $u$ จากสมการโมเมนตัมตามแนวแกน $x$
CALCV.for	คำนวณหาสัมประสิทธิ์การคำนวณ สำหรับความเร็ว $v$ จากสมการโมเมนตัมตามแนวแกน $y$
CALCP.for	คำนวณหาสัมประสิทธิ์การคำนวณ สำหรับความดันแก้ไข ( $P'$ ) จากสมการผลต่างความดัน และแก้ไขค่าความเร็ว และความดัน
LISOLV.for	ประกอบด้วยกลุ่มของโปรแกรมย่อยที่ทำหน้าที่หาผลเฉลยของระบบสมการเชิงเส้นด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบต่าง ๆ เช่น Strongly Implicit Procedure (SIP), Tri-Diagonal Matrix Algorithm (TDMA) หรือ Alternating Direction Implicit TDMA (ADI-TDMA)
MODOUT.for	ประกอบด้วยกลุ่มของโปรแกรมย่อยที่ทำหน้าที่เขียนข้อมูลที่คำนวณได้ให้อยู่ในรูปแบบต่างๆ
DATA.ref	เป็นไฟล์ข้อมูลที่อ้างอิงตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในทุกโปรแกรมย่อย

ตารางที่ ข.1 รายชื่อ และหน้าที่ของคอมพิวเตอร์ไฟล์ทั้งหมดใน โปรแกรม SIMPLE



รูปที่ ข.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมหลัก (SIMPLE.for)

## ข.2 รายละเอียดของโปรแกรม

### VC.inp

```
Flow in Ventilated Chamber (Re = 100, t/H = 0.08, CDS, Grid 102x102)
T T T F F          INCALU, INCALV, INCALP, INCALPRO, IREAD
0.2 0.2 0.9 0.5    URFU, URFV, URFP, URFVIS
0.2 0.2 0.1        EPSU, EPSV, EPSP
1 1.0E-5 25000 2 1 1 1000  INCOD, EPLON, ITERMAX, ISOLVE, IREF, JREF, NBAK
1.0 1.0            BETAU, BETAV
1.225 1.781E-5    DENT, VIS
0.03634 0.0       UIN, VIN
```

### Data.ref

```
PARAMETER (NX=250,NY=250)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
COMMON/VAR/  U(NX,NY),V(NX,NY),P(NX,NY),PP(NX,NY),PSI(NX,NY),
1          DEN(NX,NY),VIS(NX,NY)

COMMON/COEF/AP(NX,NY),AS(NX,NY),AN(NX,NY),AW(NX,NY),AE(NX,NY),
1          SU(NX,NY),SP(NX,NY),DU(NX,NY),DV(NX,NY),
2          JSTART(NX),JEND(NX)

COMMON/GEO/  X(NX),XU(NX),Y(NY),YV(NY),R(NY),RV(NY),RCC(NY),
1          DXEP(NX),DXPW(NX),DXEPU(NX),DXPWU(NX),
2          DYNP(NY),DYPS(NY),DYNPV(NY),DYPSV(NY),
3          SEW(NX),SEWU(NX),SNS(NY),SNSV(NY)

COMMON/LOGI/INCALU, INCALV, INCALP, INCALPRO, IREAD

COMMON/CONT/INCOD, IREF, JREF, ISOLVE, GREAT, ZERO, ITERMAX, EPLON,
1          NI, NJ, NIM1, NJM1, JWIN, JOUT, FLOWIN, FREEFL, ITER, NBAK,
2          BETAU, BETAV

COMMON/URF/  URFU, URFV, URFP, URFVIS

COMMON/INN/  EPSU, EPSV, EPSP

COMMON/RES/  RESORU, RESORV, RESORM, RESORK, RESORD, RESORT

COMMON/FLU/  DENT, VISC, UIN, VIN,

LOGICAL      INCALU, INCALV, INCALP, INCALPRO, IREAD
```

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## SIMPLE.for

```
C-----
C          PROGRAM SIMPLE
C-----
C          This code solves the 2D Navier-Stokes equations by
C          Finite Volume Method. SIMPLE algorithm on stagger grid
C          is used.
C
C          INCLUDE 'DATA.REF'
C          OPEN(UNIT=7,FILE='DAT.OUT',STATUS='UNKNOWN')
C          OPEN(UNIT=8,FILE='SOURCE.DAT',STATUS='UNKNOWN')
C
C***** SECTION 1 PRELIMINARY *****
C          READ INPUT DATA
C          CALL MODINP
C
C          READ GRID DATA
C          CALL GRIDIN
C
C***** SECTION 2 INITIAL OPERATIONS *****
C          INITIALIZED FLOW FIELD
C          CALL INIT
C
C          INITIALIZED INLET CONDITIONS
C          FLOWIN = 0.0
C          XMONIN = 0.0
C          XKININ = 0.0
C
C          DO J=2,NJML
C             IF (J.GT.JWIN) THEN
C                U(1,J) = UIN
C                U(2,J) = U(1,J)
C                V(1,J) = VIN
C             END IF
C             ARDEN = DEN(1,J)*R(J)*SNS(J)
C             FLOWIN = FLOWIN + ARDEN*U(1,J)
C             XMONIN = XMONIN + ARDEN*U(1,J)*U(1,J)
C          END DO
C
C          CALCULATE FLUID PROPERTY
C          IF(INCALPRO) CALL PROPS
C
C***** SECTION 3 ITERATION *****
C-----
C          READ DATA FROM BACKUP FILE
C-----
C          IF (IREAD) THEN
C             OPEN(UNIT=11,FILE='BAK.OUT',STATUS='OLD',FORM='UNFORMATTED')
C             CALL DATBAKIN
C             CLOSE(11)
C          ENDIF
C-----
5000 ITER = ITER + 1
C-----
C          IF(INCALU) CALL CALCU
C          IF(INCALV) CALL CALCV
C          IF(INCALP) CALL CALCP
C
C          UPDATE FLUID PROPERTY
C          IF (INCALPRO) CALL PROPS
C
C          NORMALIZED RESIDUAL
C          RESORM = RESORM/FLOWIN
C          RESORU = RESORU/XMONIN
C          RESORV = RESORV/XMONIN
C
C          SOURCE = MAX(RESORM,RESORU,RESORV)
C
C          WRITE(8,1510) ITER ,SOURCE, U(26,26)
C-----
C          WRITE BACK UP DATA FILE AT EVERY ITERATION EQUAL TO NBAK
C-----
C          IF (MOD(ITER,NBAK).EQ.0) THEN
C             OPEN(UNIT=11,FILE='BAK.OUT',STATUS='UNKNOWN',FORM='UNFORMATTE
D')
C             CALL DATBAKOUT
C             CLOSE(11)
C             WRITE(*,1511) ITER ,SOURCE
C             ENDF
C-----
C          IF (ITER.GE.ITERMAX) THEN
C             WRITE(*,*) ('ITER is equal to ITERMAX')
C             GOTO 9000
C          END IF
C          IF (SOURCE.GE.EPLON) GOTO 5000
C***** SECTION 4 PREPARE OUTPUT *****
C          9000 CONTINUE
C          WRITE(*,*) ITER,SOURCE
C          FLOWOUT = 0.0
C          XMONOUT = 0.0
```

```

DO J=2,NJM1
  ARDEN = 0.5*(DEN(NIM1,J)+DEN(NI,J))*SNS(J)*R(J)
  FLOWOUT = FLOWOUT + ARDEN*U(NI,J)
  XMONOUT = XMONOUT + ARDEN*U(NI,J)*U(NI,J)
END DO

C
C***** SECTION 5  CALCULATION OF THE STREAM FUNCTION PSI
C*****
C
DO I=2,NI
  JS = JSTART(I-1)
  JE = JEND(I-1)
  DO J=JS,JE
    PSI(I,J) = 0.5*(DEN(I-
1,J)+DEN(I,J))*U(I,J)*R(J)*SNS(J) +
1      PSI(I,J-1)
  END DO
END DO

C
NO NORMALIZATION

C
C***** SECTION 6  PRINT OUTPUT *****
C
WRITE(7,1500) NI,NJ,JWIN,JOUT
WRITE(7,1501) DENT,VISC
WRITE(7,1502) FLOWIN ,XMONIN
WRITE(7,1503) FLOWOUT,XMONOUT
WRITE(7,1504) ITER,SOURCE

IF (ISOLVE.EQ.1) WRITE(7,1505)
IF (ISOLVE.EQ.2) WRITE(7,1506)
IF (ISOLVE.EQ.3) WRITE(7,1507)

1 IF (INCALU) WRITE(7,1508) 'ENABLE CALCU,   URFU = ',URFU,
2   ' EPSU = ',EPSU,
   ' BETAU = ',BETAU

IF (INCALV) WRITE(7,1508) 'ENABLE CALCV,   URFV = ',URFV,
1   ' EPSV = ',EPSV,
2   ' BETAV = ',BETAV

IF (INCALP) WRITE(7,1509) 'ENABLE CALCP,   URFP = ',URFP,
1   ' EPSP = ',EPSP

IF (INCALPRO)WRITE(7,1509)'ENABLE PROPS, URFVIS = ',URFVIS

CALL PRINT(U,NI,NJ,XU,Y,' U ')
CALL PRINT(V,NI,NJ,X,YV,' V ')
CALL PRINT(P,NI,NJ,X,Y,' P ')
CALL PRINT(PSI,NI,NJ,XU,Y,' PSI')

CALL DATOUT

1500 FORMAT('NI = ',I5,3X,'NJ = ',I5,3X,'JWIN = ',I5,3X,'JOUT =
',I5)
1501 FORMAT('DENSITY = ',E15.5,/,
A 'VISCOSITY = ',E15.5)
1502 FORMAT('MASS FLOW IN = ',E15.8,' Kg/s',/,
A 'X MOMENTUM IN = ',E15.8,' N')
1503 FORMAT('MASS FLOW OUT = ',E15.8,' Kg/s',/,
A 'X MOMENTUM OUT = ',E15.8,' N')
1504 FORMAT('ITERATION = ',I5,' SOURCE = ',E15.5)
1505 FORMAT('SOLVER IS TDMA')
1506 FORMAT('SOLVER IS SIP')
1507 FORMAT('SOLVER IS ADI-TDMA')
1508 FORMAT(A23,E15.5,A8,E15.5,A9,E15.5)
1509 FORMAT(A23,E15.5,A8,E15.5)
1510 FORMAT(3X,I6,3X,E15.5,3X,E15.5)
1511 FORMAT(' Back Up File ',I5,3X,E15.5)
      CLOSE(7)
      CLOSE(8)
      END

C-----END MAIN -----

```



## MODINP.for

```

*****
SUBROUTINE MODINP
*****
INCLUDE 'DATA.REF'
CHARACTER TITLE*80,NAME*20
IN THIS ROUTINE,INPUT DATAS ARE READ

WRITE(*,*) 'INPUT DATA FILE NAME (vc.inp)'
READ(*, '(A20)') NAME

OPEN(UNIT=5,FILE=NAME)
REWIND(5)

C READ AND WRITE JOB'S TITLE
READ(5, '(A80)') TITLE
WRITE(7, '(A80)') TITLE
-----
READ CONTROL LOGICAL PARAMETERS (.TRUE. OR .FALSE.)
C INCALU : CALCULATE U MOMENTUM
C INCALV : CALCULATE V MOMENTUM
C INCALP : CALCULATE PRESSURE CORRECTION
C INCALPRO : CALCULATE FLUID PROPERTY
C IREAD : READ DATA FROM PREVIOUS SIMULATION
READ(5,*) INCALU, INCALV, INCALP, INCALPRO, IREAD
-----
C READ UNDER RELAXATION FACTOR
C URFU : UNDER RELAXATION FACTOR FOR U MOMENTUM
C URFV : UNDER RELAXATION FACTOR FOR V MOMENTUM
C URFP : UNDER RELAXATION FACTOR FOR PRESSURE CORRECTION
C URFVIS : UNDER RELAXATION FACTOR FOR EFFECTIVE VISCOSITY

READ(5,*) URFU, URFV, URFP, URFVIS
-----
C READ INNER CONVERGENCE CRITERIA
C EPSU : INNER CONVERGENCE CRITERIA FOR U MOMENTUM
C EPSV : INNER CONVERGENCE CRITERIA FOR V MOMENTUM
C EPSP : INNER CONVERGENCE CRITERIA FOR PRESSURE CORRECTION
READ(5,*) EPSU, EPSV, EPSP
-----
INCOD : COORDINATE INDEX (1 -> CARTESIAN, 2 -> POLAR)
EPLON : MAXIMUM CRITERIA ERROR OF SIMULATION
ISOLVE : SOLVER INDEX (1 -> TDMA, 2 -> SIP, 3 -> ADITDMA)
IREF, JREF : REFERENCE LOCATION FOR PRESSURE CORRECTION
NBAK : NUMBER OF ITERATION TO BE BACKUP
READ(5,*) INCOD, EPLON, ITERMAX, ISOLVE, IREF, JREF, NBAK
-----
BETA- : CONVECTIVE DISCRETIZATION SCHEME BLENDING FACTOR
0 -> 1 : UPWIND -> CDS
OTHER : HYBRID
READ(5,*) BETAU, BETAV
-----
READ FLUID PROPERTIES
C DENT : FLUID DENSITY
C VISC : FLUID VISCOSITY (THIS CAN BE A FUNCTION OF
TEMPERATURE)
READ(5,*) DENT, VISC
-----
C UIN, VIN ARE VELOCITY AT INLET ON X AND Y DIRECTION
READ(5,*) UIN, VIN
CLOSE(5)

C SET UP CONSTANT
GREAT = 1.E30
ZERO = 0.0
RETURN
END

```

## GRIDIN.for

```
*****  
SUBROUTINE GRIDIN  
*****  
INCLUDE 'DATA.REF'  
CHARACTER NAME*15  
C-----  
C READ GRID DATA FROM FILE (Grid.inp)  
C-----  
WRITE(*,*) 'ENTER GRIDINPUT FILE NAME'  
READ(*,1001) NAME  
1001 FORMAT(A15)  
OPEN(UNIT=9, FILE=NAME)  
REWIND(9)  
1002 READ(9,1002) NI,NJ,JWIN,JOUT  
1002 FORMAT(8I5)  
DO I=1,NI  
READ(9,1003) XU(I),JSTART(I),JEND(I)  
1003 FORMAT(E15.8,2I5)  
END DO  
DO J=1,NJ  
READ(9,1004) YV(J)  
1004 FORMAT(E15.8)  
END DO  
CLOSE(9)  
RETURN  
END
```

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## USER.for

```

*****
SUBROUTINE PROMOD
*****
INCLUDE 'DATA.REF'
LOGICAL UNEG

C FLOW IN VENTILATED CHAMBER
C***** U MOMENTUM *****
C ENTRY MODU
C NORTH WALL
DO I=3,NIM1
  J = JEND(I-1)
  YP = YV(J+1) - Y(J)
  TMULT = VISC/YP
  AN(I,J) = 0.0
  SP(I,J) = SP(I,J) - TMULT*SEWU(I)*RV(J+1)
  U(I,J+1) = 0.0
END DO

C SOUTH WALL
DO I=3,NIM1
  J = JSTART(I-1)
  YP = Y(J) - YV(J)
  TMULT = VISC/YP
  AS(I,J) = 0.0
  SP(I,J) = SP(I,J) - TMULT*SEWU(I)*RV(J)
  U(I,J-1) = 0.0
END DO

C WEST WALL
I = 3
JS = JSTART(I-1)
JE = JWIN
DO J=JS,JE
  AW(I,J) = 0.0
  U(I-1,J) = 0.0
END DO

RETURN
ENTRY MODU1
-----
C
C INTEGRAL CONTINUITY EQN. AT OUTLET
C
C OUTLET
C FREEFL IS THE FLOW AT NIM1 BUT THAT DOES NOT BUMP INTO
C THE OUTWALL, FLOWM1, IS THE FLOW AT NIM1 FOR J=2 TO NJM1.
C THE LATTER IS CALCULATED FOR CHECK PURPOSES.
C *** THE U-VELOCITY CORRECTION CAN BE DONE ***
C A) BY MULTIPLYING U(NIM1,J) BY A FACTOR UFAC, OR
C B) BY ADDING A CONSTANT UINC TO U(NIM1,J);
C A) SYSTEM IS USED IF ALL U>0
C B) SYSTEM IS USED IF ONE U<0 OR =0
C-----
-

ARDENT = 0.
FLOWM1 = 0.

FREEFL = 0.
UNEG = .FALSE.

C - CALCULATE FLOW AT NIM1
DO J=2,NJM1
  ARDEN = 0.5*(DEN(NIM1,J)+DEN(NI-2,J))*R(J)*SNS(J)
  FLOWM1 = FLOWM1 + ARDEN*U(NIM1,J)
  IF (U(NIM1,J).LT.0) UNEG = .TRUE.
  AE(NIM1,J) = 0.0
  IF (J.GT.JOUT) U(NI,J) = 0.0
END DO

C - CALCULATE FREE FLOW AT NI.
DO J=2,JOUT
  ARDEN = 0.5*(DEN(NIM1,J)+DEN(NI,J))*R(J)*SNS(J)
  U(NI,J) = U(NIM1,J)
  FREEFL = FREEFL + ARDEN * U(NI,J)
  ARDENT = ARDENT + ARDEN
END DO

C - CALCULATE NEW U(NI,J) USING A) OR B) SYSTEM
UINC = (FLOWIN - FREEFL)/ARDENT
IF (UNEG.AND.UINC.GE.0.) THEN

C - B -
DO J=2,JOUT
  U(NI,J) = U(NI,J) + UINC
END DO

ELSE
UFAC = FLOWIN/(FREEFL+1E-20)

C - A -
DO J=2,JOUT
  U(NI,J) = U(NI,J) * UFAC
END DO

ENDIF
RETURN

```

```

C***** V MOMENTUM *****
ENTRY MODV
C NORTH WALL
DO I=2,NIM1
    J = JEND(I)
    AN(I,J) = 0.0
    V(I,J+1) = 0.0
END DO

C SOUTH WALL
DO I=2,NIM1
    J = JSTART(I)+1
    AS(I,J) = 0.0
    V(I,J-1) = 0.0
END DO

C WEST WALL
I = 2
JS = JSTART(I)+1
JE = JWIN+1
XP = X(I) - XU(I)
DO J=JS,JE
    TMULT = VISC/XP
    AW(I,J) = 0.0
    IF (J.EQ.JE) TMULT = 0.5*TMULT
    SP(I,J) = SP(I,J) - TMULT*SNSV(J)*RCC(J)
    V(I-1,J) = 0.0
END DO

C EAST WALL
I = NIM1
JS = JSTART(I)+1
JE = JEND(I)
JOUTP1 = JOUT+1

IF (JOUTP1.GE.NJ) GOTO 100
XP = XU(I+1) - X(I)
DO J=JOUTP1,JE
    TMULT = VISC/XP
    AE(I,J) = 0.0
    IF (J.EQ.JOUTP1) TMULT = 0.5*TMULT
    SP(I,J) = SP(I,J) - TMULT*SNSV(J)*RCC(J)
    V(I+1,J) = 0.0
END DO
100 DO J=JS,JOUT
    V(I+1,J) = V(I,J)
END DO
RETURN

C***** PRESSURE CORRECTION *****
ENTRY MODP
RETURN
END

*****
SUBROUTINE PROPS
*****
C UP DATE EFFECTIVE VISCOSITY
INCLUDE 'DATA.REF'

DO I=2,NIM1
    JS = JSTART(I)
    JE = JEND(I)
    DO J=JS,JE
        VISOLD = VIS(I,J)
        IF (ED(I,J).EQ.0.0) THEN
            VIS(I,J) = VISC
        ELSE
            VIS(I,J) = (DEN(I,J)*CMU*(TE(I,J)**2)/ED(I,J)) + VISC
        END IF
    END DO
    C UNDER-RELAX VISCOSITY
    VIS(I,J) = URFVIS*VIS(I,J) + (1.-URFVIS)*VISOLD
END DO
END DO
RETURN
END

*****
SUBROUTINE INIT
*****
INCLUDE 'DATA.REF'
C CALCULATION DOMAIN GEOMETRY
NIM1 = NI-1
NJM1 = NJ-1

C SCALAR CELL
C ***** X DIRECTION *****
DO I=2,NIM1
    X(I) = 0.5*(XU(I)+XU(I+1))
END DO
X(1) = 0.0
X(NI) = XU(NI)

DXPW(1) = 0.0
DXEP(NI) = 0.0
DO I=1,NIM1
    DXEP(I) = X(I+1)-X(I)
    DXPW(I+1) = DXEP(I)
END DO

C ***** Y DIRECTION *****
DO J=2,NJM1
    Y(J) = 0.5*(YV(J)+YV(J+1))
END DO
Y(1) = 0.0

```

```

Y(NJ) = YV(NJ)
DYPS(1) = 0.0
DYNP(NJ) = 0.0
DO J=1,NJM1
  DYNP(J) = Y(J+1)-Y(J)
  DYPS(J+1) = DYNP(J)
END DO

U CELL

DXPWU(1) = 0.0
DXPWU(2) = 0.0
DXEPU(1) = 0.0
DXEPU(NI) = 0.0
DO I=2,NIM1
  DXEPU(I) = XU(I+1)-XU(I)
  DXPWU(I+1) = DXEPU(I)
END DO

V CELL

DYPSV(1) = 0.0
DYPSV(2) = 0.0
DYNPV(NJ) = 0.0
DO J=2,NJM1
  DYNPV(J) = YV(J+1)-YV(J)
  DYPSV(J+1) = DYNPV(J)
END DO

CALCULATE RADIOUS FOR POLAR COORDINATE
RCC IS CENTER OF V CELL
DO J=1,NJ
  RV(J) = YV(J)
  IF(INCOD.EQ.1) RV(J) = 1.0
END DO

DO J=2,NJM1
  R(J) = 0.5*(RV(J)+RV(J+1))
  IF(J.NE.2) RCC(J) = 0.5*(R(J)+R(J-1))
END DO

CELL LENGTH AND HIGHT

SEW(1) = 0.0E0
SEW(NI) = 0.0E0
SNS(1) = 0.0E0
SNS(NJ) = 0.0E0
SEWU(1) = 0.0E0
SNSV(1) = 0.0E0
DO I=2,NIM1
  SEW(I) = XU(I+1) - XU(I)

```

```

SEWU(I) = X(I) - X(I-1)
END DO
DO J=2,NJM1
  SNS(J) = YV(J+1) - YV(J)
  SNSV(J) = Y(J) - Y(J-1)
END DO

OPEN(UNIT=11,FILE='G.DAT')
REWIND(11)
DO I=1,NI
  WRITE(11,1000) X(I),XU(I)
END DO

DO J=1,NJ
  WRITE(11,1001) Y(J),R(J),YV(J),RV(J),RCC(J)
END DO
1000 FORMAT(3X,2E15.5)
1001 FORMAT(3X,5E15.5)
CLOSE(11)

C
C
C INITIALIZE ALL VARIABLES
C
DO I=1,NI
DO J=1,NJ
  U(I,J) = 0.0
  V(I,J) = 0.0
  P(I,J) = 0.0
  T(I,J) = 0.0
  PP(I,J) = 0.0
  TE(I,J) = 0.0
  ED(I,J) = 0.0
  PSI(I,J) = 0.0
  GEN(I,J) = 0.0
  DEN(I,J) = DENT
  VIS(I,J) = VISC
  AS(I,J) = 0.0
  AN(I,J) = 0.0
  AW(I,J) = 0.0
  AE(I,J) = 0.0
  AP(I,J) = 0.0
  SU(I,J) = 0.0
  SP(I,J) = 0.0
  DU(I,J) = 0.0
  DV(I,J) = 0.0
  SUKD(I,J) = 0.0
  SPKD(I,J) = 0.0
END DO
END DO
RETURN
END
C*****

```

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# CALCU.for

\*\*\*\*\*

SUBROUTINE CALCUL

\*\*\*\*\*

INCLUDE 'DATA.REF'

C \*\*\*\*\* SECTION 1 PRELIMINARY \*\*\*\*\*

C

DO 10 I=3,NIM1  
JS = JSTART(I-1)  
JE = JEND(I-1)  
DO 20 J=JS,JE

C CALCULATE AREAS AND VOLUME

AREAN = RV(J+1)\*SEWU(I)  
AREAS = RV(J)\*SEWU(I)  
AREAEW = R(J)\*SNS(J)  
VOL = R(J)\*SEWU(I)\*SNS(J)

C CALCULATE CONVECTION COEFFICIENTS

C NOTE : VISCOSITY MAY NEED TO MODIFY INTERPOLATION

GNE = 0.5\*(DEN(I,J+1) + DEN(I,J)) \*V(I,J+1)  
GNW = 0.5\*(DEN(I-1,J) + DEN(I-1,J+1)) \*V(I-1,J+1)  
GSE = 0.5\*(DEN(I,J-1) + DEN(I,J)) \*V(I,J)  
GSW = 0.5\*(DEN(I-1,J) + DEN(I-1,J-1)) \*V(I-1,J)  
GE = 0.5\*(DEN(I+1,J) + DEN(I,J)) \*U(I+1,J)  
GP = 0.5\*(DEN(I,J) + DEN(I-1,J)) \*U(I,J)  
GW = 0.5\*(DEN(I-1,J) + DEN(I-2,J)) \*U(I-1,J)

C

F = (XU(I)-X(I-1))/SEWU(I)  
CN = (F\*GNE + (1.-F)\*GNW)\*AREAN  
CS = (F\*GSE + (1.-F)\*GSW)\*AREAS

CE = 0.5\*(GP+GE)\*AREAEW  
CW = 0.5\*(GP+GW)\*AREAEW

C CALCULATE DIFFUSION COEFFICIENTS

C NOTE : VISCOSITY MAY NEED TO MODIFY INTERPOLATION

VISN = 0.25\*(VIS(I,J)+VIS(I,J+1)+VIS(I-1,J)+VIS(I-1,J+1))  
VISS = 0.25\*(VIS(I,J)+VIS(I,J-1)+VIS(I-1,J)+VIS(I-1,J-1))  
DN = VISN\*AREAN/DYNP(J)  
DS = VISS\*AREAS/DYPS(J)  
DE = VIS(I,J)\*AREAEW/DXEPU(I)  
DW = VIS(I-1,J)\*AREAEW/DXPWU(I)

C CALCULATE COEFFICIENTS OF SOURCE TERMS

SMP = CN-CS+CE-CW  
CP = MAX(ZERO,SMP)  
CPO = CP

DU(I,J) = AREAEW  
SU(I,J) = CPO\*U(I,J) + DU(I,J)\*(P(I-1,J)-P(I,J))  
SP(I,J) = -CP

C CALCULATE MAIN COEFFICIENTS

IF (BETAU.GT.1.0) THEN

C ASSEMBLE MAIN COEFFICIENTS BY HYBRID SCHEME

AN(I,J) = MAX(ABS(0.5\*CN),DN) - 0.5\*CN  
AS(I,J) = MAX(ABS(0.5\*CS),DS) + 0.5\*CS  
AE(I,J) = MAX(ABS(0.5\*CE),DE) - 0.5\*CE  
AW(I,J) = MAX(ABS(0.5\*CW),DW) + 0.5\*CW

C ELSE  
ASSEMBLE MAIN COEFFICIENTS BY UPWIND SCHEME

AN1 = MAX(-CN,ZERO)  
AS1 = MAX(CS,ZERO)  
AE1 = MAX(-CE,ZERO)  
AW1 = MAX(CW,ZERO)

AN(I,J) = AN1 + DN  
AS(I,J) = AS1 + DS  
AE(I,J) = AE1 + DE  
AW(I,J) = AW1 + DW

C CALCULATE MOMENTUM FLUX BY DEFERRED CORRECTION METHOD

C BLENDING BETWEEN UPWIND AND CDS

FUDS = (AN1+AS1+AE1+AW1)\*U(I,J)  
1 - AN1\*U(I,J+1) - AS1\*U(I,J-1)  
2 - AE1\*U(I+1,J) - AW1\*U(I-1,J)

FN = (YV(J+1) - Y(J))/DYNP(J)  
FS = (Y(J) - YV(J))/DYPS(J)  
1 FCDS = CN\*(FN\*U(I,J+1) + (1-FN)\*U(I,J)) -  
2 CS\*(FS\*U(I,J-1) + (1-FS)\*U(I,J)) - +  
3 CE\*0.5\*(U(I+1,J) + U(I,J))  
CW\*0.5\*(U(I-1,J) + U(I,J))

SU(I,J) = SU(I,J) + BETAU\*(FUDS - FCDS)

END IF

C CALCULATE DIFFUSION SOURCE TERM

DUDXP = (U(I+1,J) - U(I,J))/SEWU(I)  
DUDXM = (U(I,J) - U(I-1,J))/SEWU(I-1)  
SU(I,J) = (VIS(I,J)\*DUDXP - VIS(I-1,J)\*DUDXM)/SEWU(I)\*VOL  
1 + SU(I,J)

C

GAMP = 0.25\*(VIS(I,J) + VIS(I-1,J) +  
1 VIS(I,J+1) + VIS(I-1,J+1))  
DVDXP = RV(J+1)\*(V(I,J+1) - V(I-1,J+1))/DXPW(I)

C

GAMM = 0.25\*(VIS(I,J) + VIS(I-1,J) +  
1 VIS(I,J-1) + VIS(I-1,J-1))  
DVDXM = RV(J)\*(V(I,J) - V(I-1,J))/DXPW(I)



```

C          SU(I,J) = SU(I,J)+(GAMP*DVDXP -
                GAMM*DVDXM)/SNS(J)/R(J)*VOL
20 CONTINUE
10 CONTINUE
C          SU = -dP/dX + d/dX(VIS*dU/dX) + 1/R*d/dR(R*VIS*dU/dX)
C***** SECTION 2 BOUNDARY CONDITION *****
C          CALL MODU
C***** SECTION 3 FINAL COEFF. ASSEMBLY *****
C          AND RESIDUAL SOURCE CALCULATION
RESORU=0.0
DO 30 I=3,NIM1
JS = JSTART(I-1)
JE = JEND(I-1)
DO 40 J=JS,JE
    AP(I,J) = AN(I,J) + AS(I,J) + AE(I,J) + AW(I,J) -
                SP(I,J)
    DU(I,J) = DU(I,J)/AP(I,J)
1          RESOR = AN(I,J)*U(I,J+1) + AS(I,J)*U(I,J-1) +
2          AE(I,J)*U(I+1,J) + AW(I,J)*U(I-1,J) -
                AP(I,J)*U(I,J) + SU(I,J)
VOL = R(J)*SEWU(I)*SNS(J)
SORVOL = GREAT*VOL
IF (-SP(I,J).GT.0.5*SORVOL) RESOR = RESOR/SORVOL
SORU(I,J) = RESOR
RESORU = RESORU + ABS(RESOR)
C          UNDER-RELAXATION
AP(I,J) = AP(I,J)/URFU
SU(I,J) = SU(I,J) + (1.-URFU)*AP(I,J)*U(I,J)
DU(I,J) = DU(I,J)*URFU
40 CONTINUE
30 CONTINUE
C***** SECTION 4 SOLVE DISCREATED EQUATION *****
C          IF (ISOLVE.EQ.1) CALL TDMA(U,3,2,EPSU)
          IF (ISOLVE.EQ.2) CALL SIP(U,3,2,EPSU)
          IF (ISOLVE.EQ.3) CALL ADITDMA(U,3,2,EPSU)
          RETURN
          END

```

## CALCV.for

```

*****
SUBROUTINE CALCV
*****
  INCLUDE 'DATA.REF'
C
C***** SECTION 1 PRELIMINARY *****
C
  DO 10 I=2,NIM1
    JS = JSTART(I)+1
    JE = JEND(I)
  DO 20 J=JS,JE
C
  CALCULATE AREAS AND VOLUME
    AREAN = R(J)*SEW(I)
    AREAS = R(J-1)*SEW(I)
    AREAEW = RCC(J)*SNSV(J)
    VOL = RCC(J)*SEW(I)*SNSV(J)
C
  CALCULATE CONVECTION COEFFICIENTS
C
  NOTE : DENSITY MAY NEED TO MODIFY INTERPOLATION
    GN = 0.5*(DEN(I,J+1) + DEN(I,J)) *V(I,J+1)
    GP = 0.5*(DEN(I,J) + DEN(I,J-1)) *V(I,J)
    GS = 0.5*(DEN(I,J-1) + DEN(I,J-2)) *V(I,J-1)
    GNE = 0.5*(DEN(I,J) + DEN(I+1,J)) *U(I+1,J)
    GSE = 0.5*(DEN(I,J-1) + DEN(I+1,J-1)) *U(I+1,J-1)
    GNW = 0.5*(DEN(I,J) + DEN(I-1,J)) *U(I,J)
    GSW = 0.5*(DEN(I,J-1) + DEN(I-1,J-1)) *U(I,J-1)
C
    CN = 0.5*(GP+GN)*AREAN
    CS = 0.5*(GP+GS)*AREAS
    F = (YV(J)-Y(J-1))/SNSV(J)
    CE = (F*GNE + (1.-F)*GSE)*AREAEW
    CW = (F*GNW + (1.-F)*GSW)*AREAEW
C
  CALCULATE DIFFUSION COEFFICIENTS
C
  NOTE : VISCOSITY MAY NEED TO MODIFY INTERPOLATION
    VISE = 0.25*(VIS(I,J)+VIS(I,J-1)+VIS(I+1,J)+VIS(I+1,J-1))
    VISW = 0.25*(VIS(I,J)+VIS(I,J-1)+VIS(I-1,J)+VIS(I-1,J-1))
    DN = VIS(I,J)*AREAN/DYNPV(J)
    DS = VIS(I,J-1)*AREAS/DYPSV(J)
    DE = VISE*AREAEW/DXEP(I)
    DW = VISW*AREAEW/DXPW(I)
C
  CALCULATE COEFFICIENTS OF SOURCE TERMS
    SMP = CN-CS+CE-CW
    CP = MAX(ZERO,SMP)
    CPO = CP
    DV(I,J) = 0.5*(AREAN + AREAS)
    SU(I,J) = CPO*V(I,J) + DV(I,J)*(P(I,J-1)-P(I,J))
    SP(I,J) = -CP
C
  CALCULATE MAIN COEFFICIENTS
  IF (BETAV.GT.1.0) THEN
C
  ASSEMBLE MAIN COEFFICIENTS BY HYBRID SCHEME
    AN(I,J) = MAX(ABS(0.5*CN),DN) - 0.5*CN
    AS(I,J) = MAX(ABS(0.5*CS),DS) + 0.5*CS
    AE(I,J) = MAX(ABS(0.5*CE),DE) - 0.5*CE
    AW(I,J) = MAX(ABS(0.5*CW),DW) + 0.5*CW
  ELSE
C
  ASSEMBLE MAIN COEFFICIENTS BY UPWIND SCHEME
    AN1 = MAX(-CN,ZERO)
    AS1 = MAX(CS,ZERO)
    AE1 = MAX(-CE,ZERO)
    AW1 = MAX(CW,ZERO)
    AN(I,J) = AN1 + DN
    AS(I,J) = AS1 + DS
    AE(I,J) = AE1 + DE
    AW(I,J) = AW1 + DW
C
  CALCULATE MOMENTUM FLUX BY DEFERRED CORRECTION METHOD
  BLENDING BETWEEN UPWIND AND CDS
    1 FUDS = (AN1+AS1+AE1+AW1)*V(I,J)
    2 - AN1*V(I,J+1) - AS1*V(I,J-1)
    3 - AE1*V(I+1,J) - AW1*V(I-1,J)
    FE = (XU(I+1) - X(I))/DXEP(I)
    FW = (X(I) - XU(I))/DXPW(I)
    FCDS = CN*0.5*(V(I,J+1) + V(I,J)) -
    CS*0.5*(V(I,J-1) + V(I,J)) +
    CE*(FE*V(I+1,J) + (1-FE)*V(I,J)) -
    CW*(FW*V(I-1,J) + (1-FW)*V(I,J))
    SU(I,J) = SU(I,J) + BETAV*(FUDS - FCDS)
  END IF
C
  CALCULATE SOURCE FOR CYLINDRICAL COORDINATE
  IF (INCOD.EQ.2) SP(I,J) = SP(I,J) - 2.*VIS(I,J)*VOL/RCC(J)**2.
C
  CALCULATE DIFFUSION SOURCE TERM
    DUDYP = (U(I+1,J) - U(I+1,J-1))/DYPS(J)
    DUDYM = (U(I,J) - U(I,J-1))/DYPS(J)
    GAMP = 0.25*(VIS(I,J)+VIS(I,J-1)+VIS(I+1,J)+VIS(I+1,J-1))
    GAMM = 0.25*(VIS(I,J)+VIS(I,J-1)+VIS(I-1,J)+VIS(I-1,J-1))
    SU(I,J) = SU(I,J)+(GAMP*DUDYP-GAMM*DUDYM)/SEW(I)*VOL
    DVDYP = (V(I,J+1) - V(I,J))/SNS(J)
    DVDYM = (V(I,J) - V(I,J-1))/SNS(J-1)

```

```

RGAMP = VIS(I,J)*R(J)
RGAMM = VIS(I,J-1)*R(J-1)
SU(I,J) = SU(I,J)+(RGAMP*DVDYP-
              RGAMM*DVDYM)/SNSV(J)/RCC(J)*VOL
C
C SU = -dP/DR + d/dX(VIS*dU/dR) + 1/R*d/DR(VIS*R*dV/dY)
20 CONTINUE
10 CONTINUE
C
C***** SECTION 2 BOUNDARY CONDITION *****
C
CALL MODV
C
C***** SECTION 3 FINAL COEFF. ASSEMBLY *****
C AND RESIDUAL SOURCE CALCULATION
RESORV=0.0
DO 30 I=2,NIM1
JS = JSTART(I)+1
JE = JEND(I)
DO 40 J=JS,JE
AP(I,J) = AN(I,J) + AS(I,J) + AE(I,J) + AW(I,J) -
DV(I,J) = DV(I,J)/AP(I,J)
SP(I,J)
RESOR = AN(I,J)*V(I,J+1) + AS(I,J)*V(I,J-1) +
AE(I,J)*V(I+1,J) + AW(I,J)*V(I-1,J) -
AP(I,J)*V(I,J) + SU(I,J)
VOL = RCC(J)*SEW(I)*SNSV(J)
SORVOL = GREAT*VOL
IF (-SP(I,J).GT.0.5*SORVOL) RESOR = RESOR/SORVOL
SORV(I,J) = RESOR
RESORV = RESORV + ABS(RESOR)
C
C UNDER-RELAXATION
AP(I,J) = AP(I,J)/URFV
SU(I,J) = SU(I,J) + (1.-URFV)*AP(I,J)*V(I,J)
DV(I,J) = DV(I,J)*URFV
40 CONTINUE
30 CONTINUE
C
C***** SECTION 4 SOLVE DISCREATED EQUATION *****
C
IF (ISOLVE.EQ.1) CALL TDMA(V,2,3,EPSV)
IF (ISOLVE.EQ.2) CALL SIP(V,2,3,EPSV)
IF (ISOLVE.EQ.3) CALL ADITDMA(V,2,3,EPSV)
RETURN
END

```

## CALCP.for

```

*****
SUBROUTINE CALCP
*****
INCLUDE 'DATA.REF'
C-----
C CONSERVE MASS AT OUTLET
C-----
CALL MODU1
C***** SECTION 1 PRELIMINARY *****
C
RESORM=0.0
DO 10 I=2,NIM1
JS = JSTART(I)
JE = JEND(I)
DO 20 J=JS,JE
C COMPUTE AREAS AND VOLUME
AREAN = RV(J+1)*SEW(I)
AREAS = RV(J)*SEW(I)
AREAEW = R(J)*SNS(J)
VOL = R(J)*SNS(J)*SEW(I)
C CALCULATE COEFFICIENTS
C NOTE : DENSITY MAY NEED TO MODIFY INTERPOLATION
DENN = 0.5*(DEN(I,J)+DEN(I,J+1))
DENS = 0.5*(DEN(I,J)+DEN(I,J-1))
DENE = 0.5*(DEN(I,J)+DEN(I+1,J))
DENW = 0.5*(DEN(I,J)+DEN(I-1,J))
C
AN(I,J) = DENN*AREAN *DV(I,J+1)
AS(I,J) = DENS*AREAS *DV(I,J)
AE(I,J) = DENE*AREAEW*DU(I+1,J)
AW(I,J) = DENW*AREAEW*DU(I,J)
C CALCULATE SOURCE TERMS
CN = DENN*V(I,J+1)*AREAN
CS = DENS*V(I,J)*AREAS
CE = DENE*U(I+1,J)*AREAEW
CW = DENW*U(I,J)*AREAEW
SMP = CN-CS+CE-CW
C
SP(I,J)=0.0
SU(I,J)=-SMP
C COMPUTE SUM OF ABSOLUTE MASS SOURCES
SORM(I,J) = SMP
RESORM = RESORM + ABS(SMP)
20 CONTINUE
10 CONTINUE

```

```

C***** SECTION 2 BOUNDARY CONDITION *****
C
CALL MODP
C***** SECTION 3 FINAL COEFF. ASSEMBLY *****
C AND RESIDUAL SOURCE CALCULATION
C
DO I=2,NIM1
DO J=2,NJM1
AP(I,J)=AN(I,J)+AS(I,J)+AE(I,J)+AW(I,J)-SP(I,J)
END DO
END DO
C***** SECTION 4 SOLVE DISCREATED EQUATION *****
C
IF (ISOLVE.EQ.1) CALL TDMA(PP,2,2,EPSP)
IF (ISOLVE.EQ.2) CALL SIP(PP,2,2,EPSP)
IF (ISOLVE.EQ.3) CALL ADITDMA(PP,2,2,EPSP)
C***** SECTION 5 CORRECTION VELOCITY *****
C
DO I=2,NIM1
JS = JSTART(I)
JE = JEND(I)
DO J=JS,JE
IF (I.NE.2) U(I,J) = U(I,J) + DU(I,J)*(PP(I-1,J) - PP(I,J))
IF (J.NE.JS) V(I,J) = V(I,J) + DV(I,J)*(PP(I,J-1) - PP(I,J))
END DO
END DO
C***** SECTION 6 CORRECTION PRESSURES *****
C (WITH PROVISION FOR UNDER-RELAXATION)
PPREF=PP(IREF,JREF)
DO I=2,NIM1
JS = JSTART(I)
JE = JEND(I)
DO J=JS,JE
P(I,J) = P(I,J) + URFP*(PP(I,J)-PPREF)
PP(I,J) = 0.0
END DO
END DO
RETURN
END

```

## LISOLV.for

```

*****
SUBROUTINE TDMA(PHI,IS,JS,EPS)
*****
INCLUDE 'DATA.REF'
DIMENSION PHI(NX,NY),A(NY),B(NY),C(NY),D(NY),JST(NX),JFIN(NX)
DATA NSWEEP/ 50/

C      IS  JS
C      2   2  -----> P OR SCALAR
C      3   2  -----> U
C      2   3  -----> V

C-----
C      THIS PART CHECK FOR REARWARD-STEP GEOMETRY
C      THAT DEPEND ON JSTART(I) AND JEND(I).
C
C      IF IN CASE THAT HAVE FORWARD-STEP GEOMETRY TOO.
C      IT NEEDS TO USE JSTART(I) AND JEND(I) FOR U,V
C      AND P CELL SEPERATELY.
C-----

      IF (IS.EQ.2) THEN
        IF (JS.EQ.2) THEN
          DO I=IS,NIM1
            JST(I) = JSTART(I)
            JFIN(I) = JEND(I)
          END DO
        ELSE
          JS = 3
          DO I=IS,NIM1
            JST(I) = JSTART(I) + 1
            JFIN(I) = JEND(I)
          END DO
        ENDIF
      ELSE
        IS = 3
        DO I=IS,NIM1
          JST(I) = JSTART(I-1)
          JFIN(I) = JEND(I-1)
        END DO
      ENDIF

C===== INNER ITERATION =====
DO LOOP=1,NSWEEP
  RESN = 0.0
  C----- N-S TRANSVERT -----
  DO I=IS,NIM1
    JSS = JST(I)
    JEE = JFIN(I)
    JSM1 = JSS - 1
    A(JSM1) = 0.0
    C(JSM1) = PHI(I,JSM1)
    DO J=JSS,JEE
      B(J) = AS(I,J)
      D(J) = AP(I,J)
      A(J) = AN(I,J)
      C(J) = SU(I,J) + AE(I,J)*PHI(I+1,J) + AW(I,J)*PHI(I-1,J)
      TEMP = 1./(D(J) - B(J)*A(J-1))
      A(J) = A(J)*TEMP
      C(J) = (B(J)*C(J-1) + C(J))*TEMP
    END DO
    DO JJ=JSS,JEE
      J = JSS+JEE-JJ
      PHI(I,J) = A(J)*PHI(I,J+1) + C(J)
    END DO
  END DO
  C----- END OF N-S TRANSVERT -----
  C----- CALCULATION RESIDUAL -----
  DO I=IS,NIM1
    JSS = JST(I)
    JEE = JFIN(I)
    DO J=JSS,JEE
      RES = AE(I,J)*PHI(I+1,J) + AW(I,J)*PHI(I-1,J) +
            AN(I,J)*PHI(I,J+1) + AS(I,J)*PHI(I,J-1) +
            SU(I,J) - AP(I,J)*PHI(I,J)
      RESN = RESN + ABS(RES)
    END DO
  END DO
  IF(LOOP.EQ.1) RES0 = RESN
  RESN = RESN/(RES0+1.E-20)
  C      CHECK CONVERGENCE FOR INNER ITERATION
  C      IF(RESN.LT.EPS) RETURN
  C-----
END DO
RETURN
END

```

```

*****
SUBROUTINE ADITDMA(PHI, IS, JS, EPS)
*****
INCLUDE 'DATA.REF'
DIMENSION PHI(NX,NY),A(NY),B(NY),C(NY),D(NY),JST(NX),JFIN(NX)
DATA NSWEEP/ 50/

C      IS   JS
C      2    2  -----> P OR SCALAR
C      3    2  -----> U
C      2    3  -----> V

C-----
C      THIS PART CHECK FOR REARWARD-STEP GEOMETRY
C      THAT DEPEND ON JSTART(I) AND JEND(I).
C
C      IF IN CASE THAT HAVE FORWARD-STEP GEOMETRY TOO.
C      IT NEEDS TO USE JSTART(I) AND JEND(I) FOR U,V
C      AND P CELL SEPERATELY.
C-----
      IF (IS.EQ.2) THEN
        IF (JS.EQ.2) THEN
          DO I=IS,NIM1
            JST(I) = JSTART(I)
            JFIN(I) = JEND(I)
          END DO
        ELSE
          JS = 3
          DO I=IS,NIM1
            JST(I) = JSTART(I) + 1
            JFIN(I) = JEND(I)
          END DO
        ENDIF
      ELSE
        IS = 3
        DO I=IS,NIM1
          JST(I) = JSTART(I-1)
          JFIN(I) = JEND(I-1)
        END DO
      ENDIF

C===== INNER ITERATION =====
      DO LOOP=1,NSWEEP
C----- N-S TRANSVERT -----
      DO I=IS,NIM1
        JSS = JST(I)
        JEE = JFIN(I)

        JSM1 = JSS - 1
        A(JSM1) = 0.0
        C(JSM1) = PHI(I,JSM1)

        DO J=JSS,JEE
          B(J) = AS(I,J)
          D(J) = AP(I,J)
          A(J) = AN(I,J)
          C(J) = SU(I,J) + AE(I,J)*PHI(I+1,J) + AW(I,J)*PHI(I-1,J)

          TEMP = 1./(D(J) - B(J)*A(J-1))
          A(J) = A(J)*TEMP
          C(J) = (B(J)*C(J-1) + C(J))*TEMP
        END DO
      1,J)
      END DO

```

```

DO JJ=JSS,JEE
  J = JSS+JEE-JJ
  PHI(I,J) = A(J)*PHI(I,J+1) + C(J)
END DO
END DO

C----- END OF N-S TRANVEART -----

C----- W-E TRANSVERT -----
DO J=JS,NJM1
  ISM1 = IS-1
  A(ISM1) = 0.0
  C(ISM1) = PHI(ISM1,J)

  DO I=IS,NIM1
    B(I) = AW(I,J)
    D(I) = AP(I,J)
    A(I) = AE(I,J)
    C(I) = SU(I,J) + AN(I,J)*PHI(I,J+1) +
    AS(I,J)*PHI(I,J-1)

    TEMP = 1./(D(I) - B(I)*A(I-1))
    A(I) = A(I)*TEMP
    C(I) = (B(I)*C(I-1) + C(I))*TEMP
  END DO

  DO I=NIM1,IS,-1
    PHI(I,J) = A(I)*PHI(I+1,J) + C(I)
  END DO
END DO

C----- END OF W-E TRANSVERT -----

C----- CALCULATION RESIDUAL -----
DO I=IS,NIM1
  JSS = JST(I)
  JEE = JFIN(I)
  DO J=JSS,JEE
    RES = AE(I,J)*PHI(I+1,J) + AW(I,J)*PHI(I-1,J) +
    AN(I,J)*PHI(I,J+1) + AS(I,J)*PHI(I,J-1) +
    1

```



```

2          SU(I,J)          - AP(I,J)*PHI(I,J)
RESN = RESN + ABS(RES)
END DO
END DO
IF(LOOP.EQ.1) RES0 = RESN
RESN = RESN/(RES0+1.E-20)
C CHECK CONVERGENCE FOR INNER ITERATION
IF(RESN.LT.EPS) RETURN
END DO
RETURN
END

```

```

*****
SUBROUTINE SIP(PHI,IS,JS,EPS)
*****
INCLUDE 'DATA.REF'
PARAMETER (NKY=NX*NY)
REAL LW,LS,LPR
DIMENSION PHI(NX,NY),JST(NX),JFIN(NX)
DIMENSION LW(NX,NY),LS(NX,NY),LPR(NX,NY)
DIMENSION UN(NX,NY),UE(NX,NY),RES(NX,NY)
DATA ALFA,NSWEEP/ 0.92,50 /
DATA UN,UE,RES / NXY*0.,NXY*0.,NXY*0./

```

```

C      IS  JS
C      2   2  -----> P OR SCALAR
C      3   2  -----> U
C      2   3  -----> V

```

```

C-----
C      THIS PART CHECK FOR REARWARD-STEP GEOMETRY
C      THAT DEPEND ON JSTART(I) AND JEND(I).
C
C      IF IN CASE THAT HAVE FORWARD-STEP GEOMETRY TOO.
C      IT NEEDS TO USE JSTART(I) AND JEND(I) FOR U,V
C      AND P CELL SEPERATELY.
C-----

```

```

IF (IS.EQ.2) THEN
  IF (JS.EQ.2) THEN
    DO I=IS,NIM1
      JST(I) = JSTART(I)
      JFIN(I) = JEND(I)
    END DO
  ELSE
    JS = 3
    DO I=IS,NIM1
      JST(I) = JSTART(I) + 1
      JFIN(I) = JEND(I)
    END DO
  ENDIF
ELSE
  IS = 3
  DO I=IS,NIM1
    JST(I) = JSTART(I-1)
    JFIN(I) = JEND(I-1)
  END DO
ENDIF

```

```

C-----
C      CALCULTE L AND U MATRIX
C-----

```

```

DO I=IS,NIM1
  JSS = JST(I)
  JEE = JFIN(I)
DO J=JSS,JEE
  LW(I,J) = -1.*AW(I,J)/(1. + ALFA*UN(I-1,J))
  LS(I,J) = -1.*AS(I,J)/(1. + ALFA*UE(I,J-1))
  P1 = ALFA*LW(I,J)*UN(I-1,J)
  P2 = ALFA*LS(I,J)*UE(I,J-1)
  LPR(I,J) = 1./(AP(I,J) + P1 + P2 - LW(I,J)*UE(I-1,J)
  + 1.E-30 - LS(I,J)*UN(I,J-1))
  UN(I,J) = (-1.*AN(I,J) - P1)*LPR(I,J)
  UE(I,J) = (-1.*AE(I,J) - P2)*LPR(I,J)
END DO
END DO

```

```

C=====
C      CALCULATION IN INNER LOOP
C=====

```

```

DO 100 LOOP=1,NSWEEP

```

```

C-----
C      CALCULATE RESIDUAL MATRIX
C      AND FORWARD SUBSTITUTION
C-----

```

```

RESN = 0.0

```

```

DO I=IS,NIM1
  JSS = JST(I)
  JEE = JFIN(I)
DO J=JSS,JEE
  RES(I,J) = SU(I,J) + AN(I,J)*PHI(I,J+1) +
  AS(I,J)*PHI(I,J-1) + AE(I,J)*PHI(I+1,J) +
  AW(I,J)*PHI(I-1,J) - AP(I,J)*PHI(I,J)
  RESN = RESN + ABS(RES(I,J))
  RES(I,J) = (RES(I,J) - LS(I,J)*RES(I,J-1)
  - LW(I,J)*RES(I-1,J))*LPR(I,J)
END DO
END DO

```

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```

C-----
C          CALCULATE INCREMENT AND OBTAINED NEW PHI
C-----
DO I=NIM1,IS,-1
  JSS = JST(I)
  JEE = JFIN(I)
  DO J=JEE,JSS,-1
    RES(I,J) = RES(I,J) - UN(I,J)*RES(I,J+1) - UE(I,J)*RES(I+1,J)
    PHI(I,J) = PHI(I,J) + RES(I,J)
  END DO
END DO

END DO

C          CHECK CONVERGENCE FOR INNER ITERATION
IF(LOOP.EQ.1) RES0 = RESN
RSM = RESN/(RES0 + 1.E-30)
IF (RSM.LT.EPS) RETURN

100 CONTINUE

RETURN
END

```



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## MODOUT.for

```
*****
      SUBROUTINE PRINT(PHI,IE,JE,XX,YY,TITLE)
*****
      PARAMETER (NX=250,NY=250)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      DIMENSION PHI(NX,NY),XX(NX),YY(NY)
      CHARACTER TITLE*3
C-----
C      WRITE DATA IN TO DAT.OUT
C-----
      WRITE(7,*) TITLE
      WRITE(7,1000) (XX(I) , I=1,IE)
      DO 10 J=1,JE
      JJ = JE-J+1
      WRITE(7,1100) YY(JJ), (PHI(I,JJ) , I=1,IE)
10    CONTINUE
      WRITE(7,1200)

1000  FORMAT(1X,' Y/X',15X,250E15.5)
1100  FORMAT(5X,250E15.5)
1200  FORMAT(/)
      RETURN
      END

*****
      SUBROUTINE DATBAKOUT
*****
      INCLUDE 'DATA.REF'
C-----
C      THIS SUBROUTINE USE FOR WRITE A BACK UP FILE,'Bak.out'
C-----
      WRITE(11) ITER,NI,NJ
      WRITE(11) U,V,P,VIS,TE,ED,T

      RETURN
      END

*****
      SUBROUTINE DATBAKIN
*****
      INCLUDE 'DATA.REF'
C-----
C      READ DATA FROM BACK UP FILE,'Bak.out'
C-----
      READ(11) ITER,NI,NJ
      READ(11) U,V,P,VIS,TE,ED,T
      RETURN
      END

*****
      SUBROUTINE DATOUT
*****
      INCLUDE 'DATA.REF'
C-----
C      WRITE DATA IN TO 'Dat.inp' FOR PSPlot.for
C-----
      OPEN(UNIT=9,FILE='Dat.inp')
      REWIND (9)
      WRITE(9,1002) NI,NJ
1002  FORMAT(2I5)
      DO I=1,NI
      DO J=1,NJ
          UPC = 0.5*(U(I,J) + U(I+1,J))
          PSIC = 0.5*(PSI(I,J) + PSI(I+1,J))
          IF (I.EQ.1.OR.I.EQ.NI) THEN
              UPC = U(I,J)
              PSIC = PSI(I,J)
          END IF
          VPC = 0.5*(V(I,J) + V(I,J+1))
          IF (J.EQ.1.OR.J.EQ.NJ) THEN
              VPC = V(I,J)
          END IF
          WRITE(9,1003) UPC,VPC,P(I,J),PSIC,
      END DO
1003  FORMAT(4E15.8)
      CLOSE(9)
      RETURN
      END
```

## ภาคผนวก ค.

### โปรแกรมส่วนการคำนวณหลังการวิเคราะห์

โปรแกรมส่วนการคำนวณหลังการวิเคราะห์ ประกอบด้วยโปรแกรม PSPlot.for, PSPlot.ref และ PSPlot.inp โดยโปรแกรม PSPlot.for เป็นโปรแกรมที่ทำหน้าที่คำนวณหาคุณสมบัติของการไหลอื่นๆ จากข้อมูลความเร็วและความดัน ที่คำนวณได้จากโปรแกรมส่วนการวิเคราะห์ปัญหา แล้วแสดงผลของข้อมูลต่างๆ เป็น Vector plot และ Contour plot ส่วน PSPlot.ref เป็นไฟล์ที่ทำหน้าที่อ้างอิงตัวแปรต่างๆ ที่เรียกใช้ในทุกระบบย่อย และ PSPlot.inp เป็นไฟล์ที่บันทึกข้อมูลพารามิเตอร์ ที่ควบคุมการทำงานของโปรแกรม PSPlot.for

#### ค.1 ขั้นตอนการทำงาน

ในการทำงานของโปรแกรม PSPlot.for จะเริ่มจากการอ่านพารามิเตอร์ที่ควบคุมการทำงานจากไฟล์ PSPlot.inp แล้วจึงอ่านข้อมูลตำแหน่งของกริดจากไฟล์ GRID.inp และผลการคำนวณจากไฟล์ Dat.inp

จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณหาค่าของคุณสมบัติของการไหลอื่นๆ เช่น Stream line, สัมประสิทธิ์ความดัน, อัตราส่วนการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง (Entrainment ratio) และตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลัก (Recirculation eye) จากข้อมูลความเร็วและความดันที่คำนวณได้จากโปรแกรม SIMPLE โดย

- 1) Stream line ( $\psi$ ) คำนวณจากสมการ

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = u$$

เมื่ออินทิเกรตสมการข้างต้นจะได้

$$\psi = \psi_0 + u(y - y_0)$$

- 2) สัมประสิทธิ์ความดัน (Pressure Coefficient,  $C_p$ ) คำนวณจากสมการ

$$C_p = \frac{P - P_{ref}}{\frac{1}{2} \rho U_{in}^2}$$

เมื่อ  $P_{ref}$  คือความดันอ้างอิงอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของช่องทางอากาศเข้า

- 3) อัตราส่วนการดึงอากาศจากภายนอกห้องเข้ามาภายในห้อง (Entrainment ratio) คำนวณจากสมการ

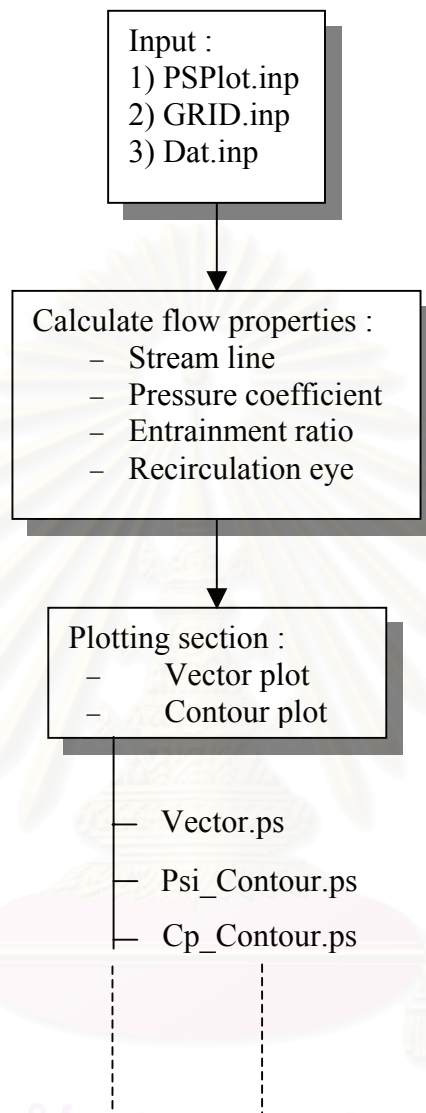
$$ER = \frac{\dot{m}_{Outlet}}{\dot{m}_{Inlet}} \times 100\%$$

เมื่อ  $\dot{m}_{Outlet}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลที่ไหลเข้ามาภายในห้องจากช่องเปิดด้านท้าย  
 $\dot{m}_{Inlet}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลที่ไหลเข้ามาภายในห้องจากช่องทางเข้า

- 4) ตำแหน่งศูนย์กลางของการไหลหมุนวนหลัก คำนวณจาก ตำแหน่งที่ Stream line มีค่าน้อยที่สุด

เมื่อคำนวณหาค่าคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้เรียบร้อยแล้ว โปรแกรมจะส่งผ่านข้อมูล ที่ต้องการจะแสดงผลให้กับโปรแกรมย่อยที่ทำหน้าที่วาด Vector plot และ Contour plot ซึ่งรูปที่วาดขึ้นนี้จะบันทึกเป็น Postscript ไฟล์ที่มีขนาดเล็กและสะดวกต่อการนำไปใช้งานต่อไป ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม PSPlot.for ได้แสดงไว้เป็นแผนภูมิการทำงานในรูปที่ ค.1

สำหรับโปรแกรมย่อยที่ทำหน้าที่วาด Vector plot และ Contour plot นั้นได้ดัดแปลงมาจากส่วนหนึ่งของโปรแกรม Plot.f ซึ่งเป็นโปรแกรมแสดงผลที่ผู้พัฒนาอนุญาตให้นำมาแก้ไขได้ (Open source program) และโปรแกรมนี้ยังเป็นส่วนหนึ่งของ Ferziger and Peric, (1999)



รูปที่ ค.1 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรม PSPlot.for



## ค.2 ผลที่ได้จากโปรแกรม

ในการทดสอบ ได้เปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรม PSpice กับผลที่ได้จากโปรแกรม Matlab โดยเลือกลักษณะการไหลแบบ Free vortex และการไหลในช่องว่าง (Cavity flow) เป็นตัวอย่างเพื่อการเปรียบเทียบ

### การไหลแบบ Free vortex

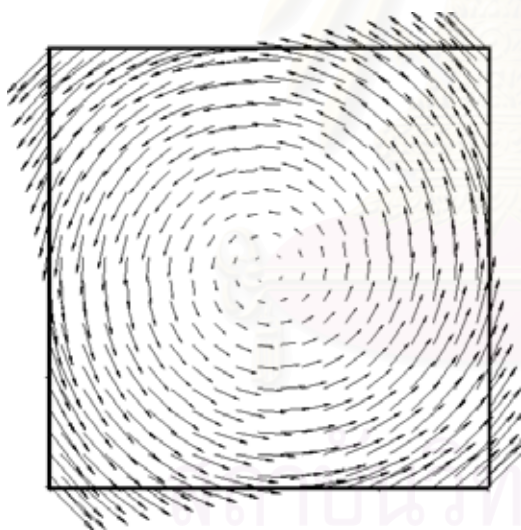
สำหรับการไหลแบบ Free vortex จะกำหนดค่าของความเร็วตามแนวแกน  $x$  และ  $y$  จากสมการ

$$u = -2y, \quad v = 2x$$

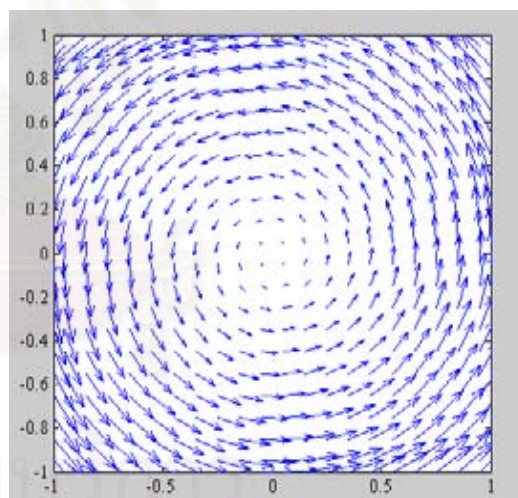
ในช่วง

$$-1 \leq x \leq 1, \quad -1 \leq y \leq 1$$

ผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ ค.2 โดยรูป ค.2 (ก) เป็น Vector plot จากโปรแกรม PSpice และรูป ค.2 (ข) เป็น Vector plot จากโปรแกรม Matlab



ก) Vector plot จากโปรแกรม PSpice



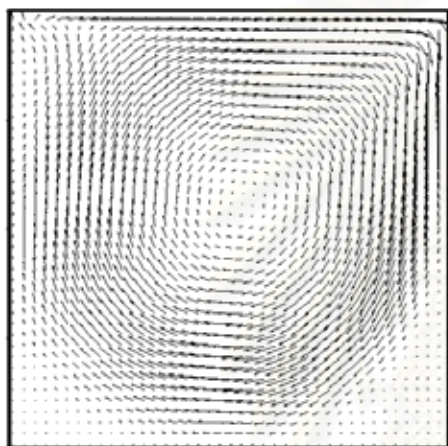
ข) Vector plot จากโปรแกรม Matlab

รูปที่ ค.2 Vector plot ของการไหลแบบ Free vortex ที่ได้จากโปรแกรม PSpice และ Matlab

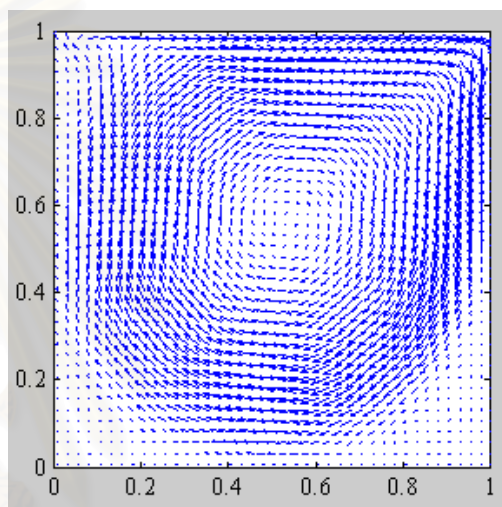
### การไหลภายในช่องว่าง (Cavity flow)

สำหรับการไหลภายในช่องว่าง จะนำผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมส่วนการวิเคราะห์ปัญหา มาใช้เพื่อเปรียบเทียบ โดยช่องว่างมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1 หน่วย การไหลมีค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ 100 ผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ ค.3

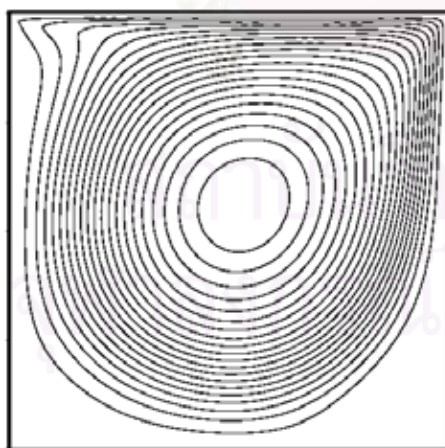
รูปที่ ค.3(ก) และ ค.3(ข) แสดง Vector plot ที่ได้จากโปรแกรม PSPlot.for และ Matlab ตามลำดับ ส่วนรูปที่ ค.3(ค) และ ค.3(ง) แสดง Contour plot ของ Stream line จากโปรแกรม PSPlot.for และ Matlab ตามลำดับ



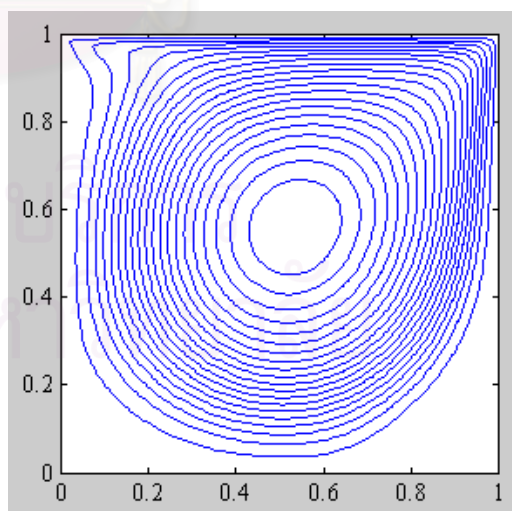
ก) Vector plot จากโปรแกรม PSPlot.for



ข) Vector plot จากโปรแกรม Matlab



ค) Contour ของ Stream line จากโปรแกรม PSPlot.for



ง) Contour ของ Stream line จากโปรแกรม Matlab

รูปที่ ค.3 ลักษณะการไหลภายในช่องว่างที่ได้จากโปรแกรม PSPlot.for และ Matlab

จากรูปที่ ค.2 – ค.3 แสดงให้เห็นว่าโปรแกรม PSPlot.for สามารถแสดงผลของตัวแปรต่างๆ ในรูปของ Vector plot และ Contour plot ได้ดีไม่ต่างจากผลที่ได้จากโปรแกรม Matlab โดยที่โปรแกรม PSPlot.for สามารถทำงานร่วมกับโปรแกรมส่วนการคำนวณก่อนการวิเคราะห์ และโปรแกรมส่วนการวิเคราะห์ปัญหาได้สะดวกกว่าการใช้ Matlab เนื่องจากเขียนเป็นภาษา FORTRAN เช่นเดียวกัน นอกจากนี้รูปของ Vector plot และ Contour plot ที่ได้จะเก็บเป็นไฟล์แบบ Postscript ซึ่งมีขนาดเล็ก ง่ายต่อการถ่ายโอน และนำไปใช้ประกอบงานเอกสารต่างๆ

### ค.3 รายละเอียดของโปรแกรม

#### Psplot.inp

```

5 5                               IX, IY                               : LABEL TICKS NUMBER
40 2 2 1.5                         NCOL, IAR, JAR, AROMAX          : VECTOR PLOT
40 1                               NCON, ICOL                       : CONTOUR PLOT
1.225 1.781E-5 0.003634           DENT, VISC, UREF              : REFERENCE PROPERTIES
T T T T                           IGRIDPL, IDATA, IQDATA, IVEL      : CONTROL PARAMETER
T T T                               IPRESS, IPSI, IVOR

```

#### Psplot.ref

```

PARAMETER (NX=250,NY=250)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
LOGICAL IGRIDPL, IDATA, IQDATA, IVEL, IPRESS, IPSI, IVOR, ITEM,
1 ITE, IED, IVIS, IRESU, IRESV, IRESM
COMMON/GRID/ X(NX), Y(NY), XU(NX), YV(NY), JSTART(NX), JEND(NX)
COMMON/PARA1/ NI, NJ, NIM1, NJM1, SCFG, CVAL(128), CVX(20), CVY(20)
COMMON/PARA2/ NCOL, IAR, JAR, AROMAX, IX, IY, NCON, ICOL, DENT, VISC, UREF
COMMON/XY/ XMIN, XMAX, YMIN, YMAX, XTOT, YTOT, JWIN, JWOUT
COMMON/UV/ U(NX,NY), V(NX,NY), P(NX,NY), PSI(NX,NY), VOR(NX,NY),
1 TE(NX,NY), ED(NX,NY), VLS(NX,NY), T(NX,NY)
COMMON/RGB/ R(255), G(255), B(255)
COMMON/RES/ SORU(NX,NY), SORV(NX,NY), SORM(NX,NY)
COMMON/LOG/ IGRIDPL, IDATA, IQDATA, IVEL, IPRESS, IPSI, IVOR, ITEM,
1 ITE, IED, IVIS, IRESU, IRESV, IRESM

```

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## Psplot.for

```

PROGRAM PSPLIT
C=====
C PROGRAM TO PLOT GRID LINE VELOCITY VECTOR AND
C CONTOUR LINES IN POSTSCRIPT FORMAT
C=====
INCLUDE 'PSPLIT.REF'

C-----
C READ CONTROL PARAMETER AND
C GRID DATA
C-----
CALL MODIN
CALL GRIDIN

C-----
C READ DATA AND QUERY DATA
C-----
IF (IDATA) THEN
CALL DATIN
WRITE(*,*) 'CALL DATIN'
END IF
IF (IQDATA) THEN
CALL QDATA
WRITE(*,*) 'CALL QDATA'
END IF

C-----
C PLOT SECTION
C-----
IF (IGRIDPL) THEN
CALL GRIDPL
WRITE(*,*) 'CALL GRIDPL'
END IF
IF (IVEL) THEN
CALL VELPLOT
WRITE(*,*) 'CALL VELPLOT'
END IF
IF (IPRESS) THEN
CALL CONT(' P ',P)
WRITE(*,*) 'CALL CONT PRESSURE'
END IF
IF (IPSI) THEN
CALL CONT(' PSI',PSI)
WRITE(*,*) 'CALL CONT STREAM'
END IF
STOP
END

C*****
SUBROUTINE MODIN
C*****

```

```

INCLUDE 'PSPLIT.REF'
CHARACTER NAME*10
WRITE(*,*) 'ENTER CONTROL FILE NAME (PSplit.inp)'
READ(*,*) NAME

```

```

OPEN(UNIT=7,FILE=NAME)
REWIND(7)

```

```

C-----
C CONTROL PARAMETER
C-----
C LEBEL
C IX : NUMBER OF TICK LABEL IN X DIRECTION
C IY : NUMBER OF TICK LABEL IN Y DIRECTION
C TICK LABEL LONG 2% OF XTOT
C-----

```

```

READ(7,*) IX,IY

```

```

C-----
C VECTOR PLOT
C-----
C NCOL : NUMBER OF COLOUR LEVEL
C IAR : NUMBER OF SKIP POINTS IN I-DIRECTION
C JAR : NUMBER OF SKIP POINTS IN J-DIRECTION
C AROMAX : MAXIMUM ARROW SIZE (INCH)
C-----
SCALE FACTOR FOR ACCURATE PLOT IN 1200 DPI IS 0.06
C-----

```

```

READ(7,*) NCOL,IAR,JAR,AROMAX

```

```

C-----
C CONTOUR PLOT
C-----
C NCON : NUMBER OF CONTOUR LINES
C ICOL : 0 -->BLACK ,OTHER --> COLOR
C-----
C CONTOUR LEVELS ARE CALCULATED BETWEEN FI(I,J)
C MINIMUM AND MAXIMUM
C-----

```

```

READ(7,*) NCON,ICOL

```

```

C-----
C      REFERENCE PROPERTIES
C      DENT : REFERENCE DENSITY
C      VISC : REFERENCE VISCOSITY
C      UREF : REFERENCE VELOCITY USED TO SCALED VECTOR PLOT
C              IF UREF = 0.0 , MAXIMUM MEAN VELOCITY IS USED
C-----
      READ(7,*) DENT,VISC,UREF

C-----
C      CONTROL PARAMETER
C-----
C      IGRIDPL : PLOT GRID LINE
C      IDATA   : READ DATA
C      IQDATA  : QUERY DATA
C      IVEL    : PLOT VELOCITY VECTOR
C-----
C      IPRESS  : PRESSURE CONTOUR
C      IPSI    : STREAM LINE CONTOUR
C      IVOR    : VORTEX CONTOUR
C-----
      READ(7,*) IGRIDPL, IDATA, IQDATA, IVEL
      READ(7,*) IPRESS , IPSI , IVOR
      CLOSE(7)
      RETURN
      END

C+++++
SUBROUTINE GRIDIN
C+++++
      INCLUDE 'PSPLOT.REF'
      CHARACTER TITLE*20

      WRITE(*,*) 'ENTER GRID INPUT FILE NAME (Grid.inp)'
      READ(*,1001) TITLE
1001 FORMAT(A20)

      OPEN(UNIT=9,FILE=TITLE)
      REWIND(9)
1002 READ(9,1002) NII,NJJ
      FORMAT(2I5)

      IF(NI.NE.NII.OR.NJ.NE.NJJ) THEN
1   WRITE(*,*) 'NI OR NJ FROM GRID.INP DATA IS
      NOT EQUAL TO NI OR NJ FROM DATA.INP'
      STOP
      ENDIF

      DO I=1,NI
      DO J=1,NJ
1003 READ(9,1003) U(I,J),V(I,J),P(I,J)PSI(I,J)
      END DO
      END DO
1003 FORMAT(11E15.8)

      CLOSE(9)
      RETURN
      END

C-----
C      CALCULATE SCALAR CV LOCATION
C-----
      NIM1 = NI - 1
      NJM1 = NJ - 1

      DO I=2,NIM1
          X(I) = 0.5*(XU(I)+XU(I+1))
      END DO

```

```

X(1) = 0.0
X(NI) = XU(NI)

DO J=2,NJM1
    Y(J) = 0.5*(YV(J)+YV(J+1))
END DO
Y(1) = 0.0
Y(NJ) = YV(NJ)
RETURN
END

C+++++
SUBROUTINE DATIN
C+++++
      INCLUDE 'PSPLOT.REF'
      CHARACTER TITLE*20

      WRITE(*,*) 'ENTER DATA INPUT FILE NAME (dat.inp)'
      READ(*,1001) TITLE
1001 FORMAT(A20)

      OPEN(UNIT=9,FILE=TITLE)
      REWIND(9)
1002 READ(9,1002) NII,NJJ
      FORMAT(2I5)

      IF(NI.NE.NII.OR.NJ.NE.NJJ) THEN
1   WRITE(*,*) 'NI OR NJ FROM GRID.INP DATA IS
      NOT EQUAL TO NI OR NJ FROM DATA.INP'
      STOP
      ENDIF

      DO I=1,NI
      DO J=1,NJ
1003 READ(9,1003) U(I,J),V(I,J),P(I,J)PSI(I,J)
      END DO
      END DO
1003 FORMAT(11E15.8)

      CLOSE(9)
      RETURN
      END

```





```

C+++++
SUBROUTINE QDATA
C+++++
INCLUDE 'PSPLOT.REF'

WRITE(7,1001) X(I),FLOW
END DO
1001 FORMAT(2E15.8)
CLOSE(7)

C-----
C SET BOUNDARY PRESSURE
C-----
DYS = (Y(2) - Y(1)) / (Y(3) - Y(2))
DYN = (Y(NJ) - Y(NJM1)) / (Y(NJM1) - Y(NJ-2))
DO I=1,NI
  P(I,1) = P(I,2) - (P(I,3) - P(I,2)) * DYS
  P(I,NJ) = P(I,NJM1) + (P(I,NJM1) - P(I,NJ-2)) * DYN
END DO

DXW = (X(2) - X(1)) / (X(3) - X(2))
DXE = (X(NI) - X(NIM1)) / (X(NIM1) - X(NI-2))
DO J=2,NJ
  P(1,J) = P(2,J) - (P(3,J) - P(2,J)) * DXW
  P(NI,J) = P(NIM1,J) + (P(NIM1,J) - P(NI-2,J)) * DXE
END DO

C-----
C NORMALIZED STREAM LINE BY
C PSI' = (PSI - PSImin) / (PSImax - PSImin)
C-----

DO I=1,NI
  PSI(I,NJ) = PSI(I,NIM1)
END DO

PSIMIN = 1E20
PSIMAX = 1E-20

DO I=1,NI
  DO J=1,NJ
    PSIMAX = MAX(PSIMAX,PSI(I,J))
    PSIMIN = MIN(PSIMIN,PSI(I,J))
  END DO
END DO

DO I=1,NI
  DO J=1,NJ
    PSI(I,J) = (PSI(I,J) - PSIMIN) / (PSIMAX - PSIMIN)
  END DO
END DO

C-----
C CALCULATE MASS FLUX AT EACH CROSS SECTION
C NOTE : U,V VELOCITY IN THIS PROGRAM ARE STORE IN
C SCALAR GRID (COLOCATE GRID)
C-----
OPEN(UNIT=7,FILE='QDATA.DAT')
REWIND(7)

DO I=1,NI
  FLOW = 0.0
  DO J=2,NJM1
    AREANS = (YV(J+1) - YV(J))
    FLUXM = DENT * U(I,J) * AREANS
    FLOW = FLOW + FLUXM
  END DO

```

```

END DO
1001 FORMAT(2E15.8)
CLOSE(7)

```

```

C-----
C CALCULATE VORTICITY
C VORTIVITY = DV/DX - DU/DY
C-----
DO I=2,NIM1
  DO J=2,NJM1
    FE = (X(I+1) - XU(I+1)) / (X(I+1) - X(I))
    VE = FE * V(I,J) + V(I+1,J) * (1 - FE)
    FW = (XU(I) - X(I-1)) / (X(I) - X(I-1))
    VW = FW * V(I,J) + V(I-1,J) * (1 - FW)
    DVDX = (VE - VW) / (XU(I+1) - XU(I))

    FN = (Y(J+1) - YV(J+1)) / (Y(J+1) - Y(J))
    UN = FN * U(I,J) + U(I,J+1) * (1 - FN)
    FS = (YV(J) - Y(J-1)) / (Y(J) - Y(J-1))
    US = FS * U(I,J) + U(I,J-1) * (1 - FS)
    DUDY = (UN - US) / (YV(J+1) - YV(J))

    VOR(I,J) = DVDX - DUDY
  END DO
END DO

```

```

C-----
C CALCULATE ABSOLUTE SOURCE
C-----
DO I=2,NIM1
  JS = JSTART(I)
  JE = JEND(I)
  DO J=JS,JE
    SORU(I,J) = ABS(SORU(I,J))
    SORV(I,J) = ABS(SORV(I,J))
    SORM(I,J) = ABS(SORM(I,J))
  END DO
END DO

RETURN
END

```



```

C+++++
SUBROUTINE GRIDPL
C+++++
INCLUDE 'PSPLOT.REF'
CHARACTER TT*14

XMIN = XU(1)
XMAX = XU(NI)

YMIN = YV(1)
YMAX = YV(NJ)

XTOT = XMAX - XMIN
YTOT = YMAX - YMIN

SCFX = 8400.0/XTOT
SCFY = 8400.0/YTOT
SCFG = MIN(SCFX,SCFY)

WRITE(TT, '(4HGrid,I3,1Hx,I3,3H.ps)') NI,NJ

OPEN(UNIT=7,FILE=TT)
REWIND 7
CALL PSHEAD(XMIN,XMAX,YMIN,YMAX)

DO I=1,NI
  X(I) = (X(I) - XMIN)*SCFG
  XU(I) = (XU(I) - XMIN)*SCFG
END DO

DO J=1,NJ
  Y(J) = (Y(J) - YMIN)*SCFG
  YV(J) = (YV(J) - YMIN)*SCFG
END DO

XMIN = 0.0
YMIN = 0.0

XMAX = XMIN + XTOT*SCFG*0.06
YMAX = YMIN + YTOT*SCFG*0.06

XTOT = XTOT*SCFG
YTOT = YTOT*SCFG

-----
C
C PLOT GRID LINE BOUNDARY
-----
WRITE(7,*) '15 w'
WRITE(7,1000) INT(XU(1)),INT(YV(1)), ' m ',
1 INT(XU(NI)),INT(YV(1)), ' 1 '
WRITE(7,1000) INT(XU(NI)),INT(YV(NJ)), ' 1 ',
1 INT(XU(1)),INT(YV(NJ)), ' 1 '
WRITE(7,1001) INT(XU(1)),INT(YV(1)), ' 1 s'
1000 FORMAT(2I10,A3,2I10,A3)
1001 FORMAT(2I10,A6)
-----
C
C PLOT INNER GRID LINE
-----
WRITE(7,*) '7 w'

C
C HORIZONTAL LINES
C
DO J=2,NJM1
WRITE(7,1002) INT(XU(1)),INT(YV(J)), ' m ',
1 INT(XU(NI)),INT(YV(J)), ' 1 s'

C
C VERTICAL LINES
C
DO I=2,NIM1
WRITE(7,1002) INT(XU(I)),INT(YV(1)), ' m ',
1 INT(XU(I)),INT(YV(NJ)), ' 1 s'

1002 FORMAT(2I10,A3,2I10,A6)

CALL LEBEL
WRITE(7,*) 'p'
CLOSE(7)
RETURN
END

C+++++
SUBROUTINE PSHEAD(X1,X2,Y1,Y2)
C+++++
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)

WRITE(7,*) '%!PS-ADOBE-2.0'
WRITE(7,*) '%%Creator: PSPLOT'
WRITE(7,*) '%%BoundingBox:',X1,Y1,X2,Y2
WRITE(7,*) '%%EndComments'
WRITE(7,*) '/c {currentpoint} def /f {fill} def'
WRITE(7,*) '/gr {grestore} def /gs {gsave} def /l {lineto}
def'
WRITE(7,*) '/m {moveto} def /n {newpath} def /p {showpage}
def'
WRITE(7,*) '/s {stroke} def /sg{setgray} def'
WRITE(7,*) '/w {setlinewidth} def /cp {closepath} def'
WRITE(7,*) '/col {setrgbcolor} def'
WRITE(7,*) '50 50 translate 0.06 0.06 scale'
WRITE(7,*) '1 setlinecap 1 setlinejoin'
RETURN
END

```

```

C+++++
SUBROUTINE VELPLOT
C+++++
INCLUDE 'PSPLOTT.REF'
CHARACTER TT*30

C CONTROL PARAMETER
C NCOL : NUMBER OF COLOUR LEVEL
C IAR : NUMBER OF SKIP POINTS IN I-DIRECTION
C JAR : NUMBER OF SKIP POINTS IN J-DIRECTION
C AROMAX : MAXIMUM ARROW SIZE (INCH)
C SCALE FACTOR FOR ACCURATE PLOT IN 1200 DPI IS 0.06

C-----
C DEFINE FILE NAME AND WRITE PS HEAD
C-----
WRITE(TT,'(7HVelplot,3H.ps)')
OPEN(UNIT=7,FILE=TT)
REWIND 7
CALL PSHEAD(XMIN,XMAX,YMIN,YMAX)

C-----
C PLOT GRID LINE BOUNDARY
C-----
WRITE(7,*) '15 w'
WRITE(7,1000) INT(XU(1)),INT(YV(1)), ' m ',
1 INT(XU(NI)),INT(YV(1)), ' l ',
WRITE(7,1000) INT(XU(NI)),INT(YV(NJ)), ' l ',
1 INT(XU(1)),INT(YV(NJ)), ' l ',
1000 FORMAT(2I10,A3,2I10,A3)
1001 FORMAT(2I10,A6)

CALL LEBEL

C-----
C SET COLOR LEVEL
C-----
CALL SETCOL(NCOL)

C-----
C CALCULATE MEAN VELOCITY AND SCALE FACTOR
C-----
AROMAX = AROMAX*1200
VMAX = -1.0E10
VMIN = 1.0E10
IF (UREF.GT.0.0) THEN
DO 10 I=1,NI
DO 20 J=1,NJ
VMEAN = SQRT(U(I,J)**2. + V(I,J)**2.)
VMIN = MIN(VMIN,VMEAN)
VMAX = MAX(VMAX,VMEAN)
20 CONTINUE
10 CONTINUE
SCF = AROMAX/(UREF+1.0E-15)

ELSE
DO 30 I=1,NI
DO 40 J=1,NJ
VMEAN = SQRT(U(I,J)**2. + V(I,J)**2.)
VMIN = MIN(VMIN,VMEAN)
VMAX = MAX(VMAX,VMEAN)
40 CONTINUE
30 CONTINUE
SCF = AROMAX/(VMAX+1.0E-15)

END IF

C SET VELOCITY COLOR LEVEL (IF NCOL = 1, BLACK IS USED)
DELV = (VMAX - VMIN)/MAX(REAL(NCOL),1.0)
DO 50 N=1,NCOL+1
CVAL(N) = VMIN + REAL(N-1)*DELV
50 CONTINUE
WRITE(7,*) '10 w'
IF (NCOL.EQ.1) WRITE(7,*) '0. 0. 0. col'

C-----
C PLOT VECTORS AT EACH IAR & JAR POSITION
C-----
DO 60 I=2,NIM1,IAR
DO 70 J=2,NJM1,JAR
X1 = U(I,J)*SCF + X(I)
Y1 = V(I,J)*SCF + Y(J)
VMEAN = SQRT(U(I,J)**2. + V(I,J)**2.)

C CHECK FOR COLOR PLOT
IF (NCOL.GT.1) THEN
DO 80 N=2,NCOL+1
IF (VMEAN.LE.CVAL(N).AND.VMEAN.GE.CVAL(N-1))
THEN
WRITE(7,*) R(N-1),G(N-1),B(N-1),' col'
ENDIF
80 CONTINUE
ENDIF

C-----
C DRAW THE ARROW
C-----
CALL ARROW(X(I),Y(J),X1,Y1)

70 CONTINUE
60 CONTINUE

```

```

C-----
C      WRITE TITLE AND VECTOR SCALE
C-----

      TSIZE = 300
      X1 = 0.35*XTOT
      Y1 = YTOT + 3.*TSIZE
      X2 = X1 + AROMAX
      Y2 = Y1

      CALL ARROW(X1,Y1,X2,Y2)

      X2 = X2 + TSIZE
      Y2 = Y2 - 0.5*TSIZE
      WRITE(7,*) INT(X2),INT(Y2),' m'
      WRITE(7,*) '/Times-Roman findfont 250.00 scalefont setfont'
      IF (UREF.GT.0.0) THEN
         WRITE(TT,'(21H U/Uref = 1 , Uref = ,1PE8.2)') UREF
      ELSE
         WRITE(TT,'(4H = ,1PE8.2,5H m/s )') VMAX
      END IF
      WRITE(7,*) '(,TT,') show'
      Y1 = Y1 + 2.*TSIZE
      WRITE(7,*) INT(X1),INT(Y1),' m'

      WRITE(7,*) '0. 0. 0. col'
      WRITE(7,*) '/Helvetica findfont 300.00 scalefont setfont'
      WRITE(TT,'(17HVelocity Vectors)')
      WRITE(7,*) '(,TT,') show s

      WRITE(7,*) 'p'

      CLOSE(7)
      RETURN
      END

C+++++
SUBROUTINE SETCOL(NCOL)
C+++++
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
COMMON/RGB/ R(255),G(255),B(255)
DIMENSION RT(255),GT(255),BT(255)
IF (NCOL.LT.5) RETURN

C-----
C      SET COLOR LEVEL INTO 5 RANGES
C-----
      NDC = NCOL/5
      DC = 1./REAL(NDC)

C      RANGE 1 : PINK --> RED
      DO L=1,NDC
         RT(L) = 1.0
         GT(L) = 0.0
         BT(L) = 1. - (L-1)*DC
      END DO
      NL = NDC

C      RANGE 2 : RED --> YELLOW
      DO L=1,NDC
         RT(NL+L) = 1.
         GT(NL+L) = (L-1)*DC
         BT(NL+L) = 0.

      END DO
      NL = NL + NDC

C      RANGE 3 : YELLOW --> GREEN
      DO L=1,NDC
         RT(NL+L) = 1. - (L-1)*DC
         GT(NL+L) = 1.
         BT(NL+L) = 0.
      END DO
      NL = NL + NDC

C      RANGE 4 : GREEN --> LIGHT BLUE
      DO L=1,NDC
         RT(NL+L) = 0.
         GT(NL+L) = 1.
         BT(NL+L) = (L-1)*DC
      END DO
      NL = NL + NDC
      NDC = NCOL - 4*NDC
      DC = 1./REAL(NDC)

C      RANGE 5 : LIGHT BLUE --> DARK BLUE
      DO L=1,NDC
         RT(NL+L) = 0.
         GT(NL+L) = 1. - (L-1)*DC
         BT(NL+L) = 1.
      END DO

C      SWAP THE ORDER OF COLOR RANGE : DARK BLUE TO BE MINIMUM VALUE
      DO L=1,NCOL
         LL = NCOL-L+1
         R(L) = RT(LL)
         G(L) = GT(LL)
         B(L) = BT(LL)
      END DO
      RETURN
      END

```

```

C+++++
SUBROUTINE ARROW(XC1,YC1,XC2,YC2)
C+++++
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)

VL = SORT((XC2-XC1)**2. + (YC2-YC1)**2.)
IF (VL.GT.1.E-8) THEN
WRITE(7,*) INT(XC1),INT(YC1),' m',INT(XC2),INT(YC2),' l'
    DX = XC2 - XC1
    DY = YC2 - YC1
    X1 = XC2 - 0.2*DX
    Y1 = YC2 - 0.2*DY
    DA = 0.025*VL
    SAL = DY/VL
    CAL = DX/VL
    DX = DA*SAL
    DY = DA*CAL
    X1 = X1 - DX
    Y1 = Y1 + DY
    X2 = X1 + 2.*DX
    Y2 = Y1 - 2.*DY
1 WRITE(7,*) INT(X1),INT(Y1),' l',INT(X2),INT(Y2),' l',
    INT(XC2),INT(YC2),' l s'
ENDIF
RETURN
END

```

```

C+++++
SUBROUTINE LEBEL
C+++++
INCLUDE 'PSPLOT.REF'

C CONTROL PARAMETER
C IX : NUMBER OF TICK LABEL IN X DIRECTION
C IY : NUMBER OF TICK LABEL IN Y DIRECTION
C TICK LABEL LONG 1% OF XTOT

DX = XTOT/REAL(IX-1)
DY = YTOT/REAL(IY-1)
DL = 0.01*XTOT

WRITE(7,*) '15 w'
WRITE(7,*) '0. 0. 0. col'
DO I=1,IX
    X1 = XMIN + DX*(I-1)
    Y1 = YMIN
    X2 = X1
    Y2 = Y1 - DL
WRITE(7,*) INT(X1),INT(Y1),' m ',INT(X2),INT(Y2),' l s'
END DO

DO J=1,IY
    X1 = XMIN
    Y1 = YMIN + DY*(J-1)
    X2 = X1 - DL
    Y2 = Y1
WRITE(7,*) INT(X1),INT(Y1),' m ',INT(X2),INT(Y2),' l s'
END DO

```

```

C DRAW BORDER
BW = 50
WRITE(7,*) '15 w'
WRITE(7,*) '0. 0. 0. col'

```

```

C NORTH BORDER
X1 = XU(1) - BW
Y1 = YV(NJ)
X2 = XU(1) - BW
Y2 = YV(NJ) + BW
X3 = XU(NI)
Y3 = YV(NJ) + BW
X4 = XU(NI)
Y4 = YV(NJ)
WRITE(7,*) INT(X1),INT(Y1),' m'
WRITE(7,*) INT(X2),INT(Y2),' l'
WRITE(7,*) INT(X3),INT(Y3),' l'
WRITE(7,*) INT(X4),INT(Y4),' l'
WRITE(7,*) INT(X1),INT(Y1),' l cp f s'

```

```

C SOUTH BORDER
X1 = XU(1) - BW
Y1 = YV(1)
X2 = XU(1) - BW
Y2 = YV(1) - BW
X3 = XU(NI)
Y3 = YV(1) - BW
X4 = XU(NI)
Y4 = YV(1)
WRITE(7,*) INT(X1),INT(Y1),' m'
WRITE(7,*) INT(X2),INT(Y2),' l'
WRITE(7,*) INT(X3),INT(Y3),' l'
WRITE(7,*) INT(X4),INT(Y4),' l'
WRITE(7,*) INT(X1),INT(Y1),' l cp f s'

```

```

C WEST BORDER
X1 = XU(1)
Y1 = YV(1)
X2 = XU(1) - BW
Y2 = YV(1)
X3 = XU(1) - BW
Y3 = YV(JWIN+1)
X4 = XU(1)
Y4 = YV(JWIN+1)
WRITE(7,*) INT(X1),INT(Y1),' m'
WRITE(7,*) INT(X2),INT(Y2),' l'
WRITE(7,*) INT(X3),INT(Y3),' l'
WRITE(7,*) INT(X4),INT(Y4),' l'
WRITE(7,*) INT(X1),INT(Y1),' l cp f s'

```

```

C      EAST BORDER
      IF (JWOUT+1.LT.NJ) THEN
      X1 = XU(NI)
      Y1 = YV(NJ) + BW
      X2 = XU(NI) + BW
      Y2 = YV(NJ) + BW
      X3 = XU(NI) + BW
      Y3 = YV(JWOUT+1)
      X4 = XU(NI)
      Y4 = YV(JWOUT+1)
      WRITE(7,*) INT(X1),INT(Y1), ' m'
      WRITE(7,*) INT(X2),INT(Y2), ' l'
      WRITE(7,*) INT(X3),INT(Y3), ' l'
      WRITE(7,*) INT(X4),INT(Y4), ' l'
      WRITE(7,*) INT(X1),INT(Y1), ' l cp f s'
      END IF

      RETURN
      END

C+++++
SUBROUTINE CONT(TITLE,FI)
C+++++
PARAMETER (NX=250,NY=250)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
COMMON/GRID/ X(NX),Y(NY),XU(NX),YV(NY),JSTART(NX),JEND(NX)
COMMON/PARA1/ NI,NJ,NIM1,NJM1,SCFG,CVAL(128),CVX(20),CVY(20)
COMMON/PARA2/ NCOL,IAR,JAR,AROMAX,IX,IY,NCON,ICOL,DENT,VISC,
              UREF
COMMON/XY/   XMIN,XMAX,YMIN,YMAX,XTOT,JWIN,JWOUT
COMMON/RGB/  R(255),G(255),B(255)
COMMON/CONTOUR/ F11
DIMENSION FI(NX,NY)
CHARACTER TT*20,TITLE*3

C      WRITE PS HEAD
      WRITE(TT,'(A3,I3,1Hx,I3,3H.ps)') TITLE,NI,NJ
      OPEN(UNIT=7,FILE=TT)
      REWIND 7
      CALL PSHEAD(XMIN,XMAX,YMIN,YMAX)

C      FIND MAX AND MIN
      FIMAX = -1.E20
      FIMIN = 1.E20

      DO I=1,NI
      DO J=1,NJ
          FIMAX = MAX(FIMAX,FI(I,J))
          FIMIN = MIN(FIMIN,FI(I,J))
      END DO
      END DO

C      BACK UP MAX AND MIN VALUE
      FMAX = FIMAX
      FMIN = FIMIN

C      SET CONTOUR LEVELS
      DFI = (FIMAX - FIMIN)/REAL(NCON)
C      CVAL(1) = FIMIN + 0.5*DFI
      CVAL(1) = FIMIN

      DO N=2,NCON
          CVAL(N) = CVAL(N-1) + DFI
      END DO

C      SET LINE THICKNESS
      WRITE(7,*) '20 w'
      IF (ICOL.EQ.0) THEN
          WRITE(7,*) '0. 0. 0. col'
      ELSE
          CALL SETCOL(NCON)
      ENDIF

C      SEARCH EACH CONTROL VOLUME
      DO 10 K=1,NCON
          IF (ICOL.GT.0) WRITE(7,*) R(K),G(K),B(K), ' col'
      DO 20 I=1,NIM1
      DO 30 J=1,NJM1
          F11 = CVAL(K)
          FIMIN = MIN(FI(I,J),FI(I+1,J),FI(I,J+1),FI(I+1,J+1))
          FIMAX = MAX(FI(I,J),FI(I+1,J),FI(I,J+1),FI(I+1,J+1))
          IF (F11.GT.FIMIN).AND.(F11.LT.FIMAX) THEN
              IVC = 0
              CALL NEWC(I,J,I+1,J,IVC,FI)
              CALL NEWC(I+1,J,I+1,J+1,IVC,FI)
              CALL NEWC(I+1,J+1,I,J+1,IVC,FI)
              CALL NEWC(I,J+1,I,J,IVC,FI)
              IF (IVC.GT.1) THEN
                  WRITE(7,*) INT(CVX(1)),INT(CVY(1)), ' m'
                  DO 40 KK=2,IVC
                      WRITE(7,*) INT(CVX(KK)),INT(CVY(KK)), ' l'
                  40 CONTINUE
                  IF (IVC.GT.2) WRITE(7,*) INT(CVX(1)),INT(CVY(1)), ' l'
                  WRITE(7,*) ' s'
                  ENDF
                  ENDF
              30 CONTINUE
              20 CONTINUE
              10 CONTINUE

C      WRITE THE BOX WITH CONTOUR LEVELS AND COLOR SCALE
          WRITE(7,*) '0. 0. 0. col'
          CALL PLBOX(TITLE,FMAX,FMIN)

C      WRITE LABEL LINE
          CALL LABEL

```

```

C-----
C      PLOT GRID LINE BOUNDARY
C-----
      WRITE(7,*) '15 w'
      WRITE(7,1000) INT(XU(1)),INT(YV(1)), ' m ',
1      INT(XU(NI)),INT(YV(NJ)),INT(YV(1)), ' 1 '
      WRITE(7,1000) INT(XU(NI)),INT(YV(NJ)), ' 1 ',
1      INT(XU(1)),INT(YV(NJ)), ' 1 '
      WRITE(7,1001) INT(XU(1)),INT(YV(1)), ' 1 s'
1000 FORMAT(2I10,A3,2I10,A3)
1001 FORMAT(2I10,A6)

      WRITE(7,*) 'p'
      CLOSE(7)
      RETURN
      END

C+++++
SUBROUTINE NEWC(I1,J1,I2,J2,IVC,FI)
C+++++
PARAMETER (NX=250,NY=250)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
COMMON/GRID/ X(NX),Y(NY),XU(NX),YV(NY),JSTART(NX),JEND(NX)
COMMON/PARA1/ NI,NJ,NIM1,NJM1,SCFG,CVAL(128),CVX(20),CVY(20)
COMMON/PARA2/ NCOL,IAR,JAR,AROMAX,IX,IY,NCON,ICOL,DENT,VISC,
      UREF
COMMON/XY/ XMIN,XMAX,YMIN,YMAX,XTOT,YTOT,JWIN,JWOUT
COMMON/RGB/ R(255),G(255),B(255)
COMMON/CONTOUR/ FI1
DIMENSION FI(NX,NY)

      ISTEP = (NCON + 5)/10
      DO N=1,NCON,ISTEP
      IF (ICOL.EQ.1) WRITE(7,*) R(N),G(N),B(N),' col'
      WRITE(7,*) INT(X1),INT(Y1),' m',INT(X2),INT(Y1),' 1 s'
      WRITE(TT,'(1pE9.2)') CVAL(N)
      WRITE(7,*) INT(X2+200),INT(Y1-80),' m','(',TT,') show'
      Y1 = Y1 - 250
      END DO

      RETURN
      END

C-----
C      THIS SUBROUTINE SEARCH FOR CONTOUR POINT
C      ON ONE SIDE OF CONTROL VOLUME
C-----

C      CHECK IF VALUE AT I1,J1 EQUAL VALUE
      IF (FI(I1,J1).EQ.FI1) THEN
      IVC = IVC + 1
      CVX(IVC) = X(I1)
      CVY(IVC) = Y(J1)
      ELSEIF ((FI1.GE.MIN(FI(I1,J1),FI(I2,J2))).AND.
1      (FI1.LE.MAX(FI(I1,J1),FI(I2,J2)))) THEN
      IVC = IVC + 1
      FAC = (FI1 - FI(I1,J1))/(FI(I2,J2) - FI(I1,J1) + 1.E-
20)
      CVX(IVC) = X(I1) + FAC*(X(I2) - X(I1))
      CVY(IVC) = Y(J1) + FAC*(Y(J2) - Y(J1))
      ENDIF
      RETURN
      END

*****
SUBROUTINE PLBOX(TEMP,FMAX,FMIN)
*****
INCLUDE 'PSPLOT.REF'
CHARACTER TT*20,TEMP*3

      XBOX = 3
      YBOX = 7

XBOX = XBOX*1200
YBOX = YBOX*1200

      X1 = XBOX
      Y1 = YTOT + 3900
      WRITE(7,*) '/Times-Roman findfont 250.0 scalefont setfont'
      WRITE(7,*) INT(X1),INT(Y1),' m (' ,TEMP,') show'

      Y1 = Y1 - 300
      WRITE(7,*) INT(X1-300),INT(Y1),' m (' ,TEMP,'max = ',FMAX,')
      show'
      Y1 = Y1 - 300
      WRITE(7,*) INT(X1-300),INT(Y1),' m (' ,TEMP,'min = ',FMIN,')
      show'

      Y1 = Y1 - 300
      WRITE(7,*) '/Helvetica findfont 200.0 scalefont setfont'
      WRITE(7,*) INT(X1),INT(Y1),' m (Contour Levels :) show'
      WRITE(7,*) '100 w'
      X2 = X1 + 700
      Y1 = Y1 - 270

```



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย สุทธิโชค นันทสุขเกษม เกิดวันที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2520 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย