

การเพิ่มประสิทธิภาพการผสมในห้องที่มีการระบายอากาศ  
โดยการปรับเปลี่ยนทางออกของช่องปล่อยอากาศ



นาย ทศพล สติตย์สว่างสกุล

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

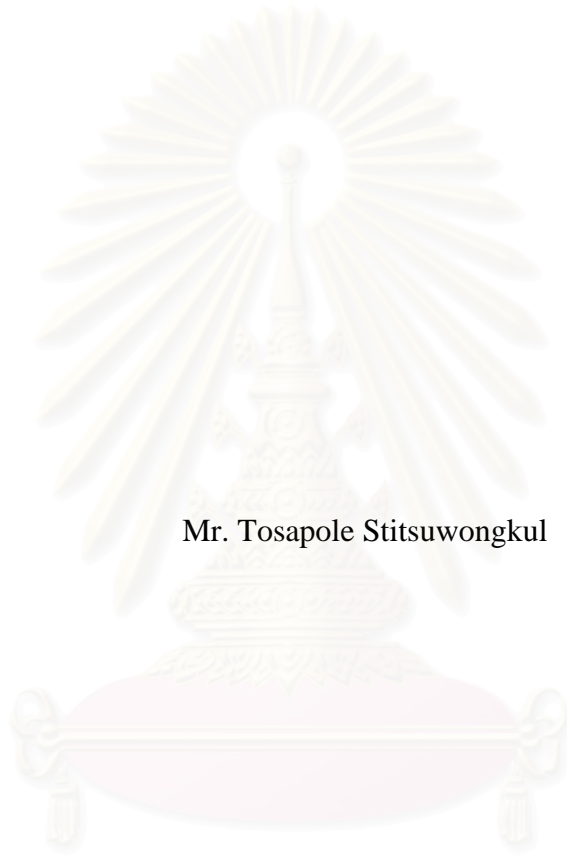
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0030-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MIXING ENHANCEMENT IN A VENTILATED CHAMBER  
BY MEANS OF MANIPULATION OF A NOZZLE EXIT



Mr. Tosapole Stitsuwongkul

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 2000  
ISBN 974-13-0030-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเพิ่มประสิทธิภาพการผสมในห้องที่มีการระบายอากาศโดยการ  
ปรับเปลี่ยนรูปร่างทางออกของช่องปล่อยอากาศ  
โดย นาย ทศพล สถิตย์สูงศักดิ์กุล  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ศักดิ์ มลิลลา)

..... กรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เตชะอำไพ)

บทผล สถิติยสูงศักดิ์กุล : การเพิ่มประสิทธิภาพการผสมในห้องที่มีการระบายอากาศ โดยการปรับเปลี่ยนทางออกของช่องปล่อยอากาศ (MIXING ENHANCEMENT IN A VENTILATED CHAMBER BY MEANS OF MANIPULATION OF A NOZZLE EXIT)

อ.ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์ ; 204 หน้า.

ISBN 974-13-0030-1

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องที่มีการระบายอากาศ โดยศึกษาผลกระทบของการใช้ Lobed nozzle รูปทรงปริมาตรที่มี ความยาวคาบ และระยะห่างระหว่าง Lobe ต่าง ๆ กัน ควบคู่กับขนาดของช่องระบายอากาศออกด้านท้ายห้อง รวมทั้งผลกระทบของความเร็วกว้างขวางของอากาศเข้าควบคู่กับขนาดของช่องระบายอากาศออกด้านท้ายห้องสำหรับกรณีที่ไม่ใช้ Lobed nozzle โดยห้องที่ใช้ในการทดลองมีความกว้าง x ยาว x สูง = 50 x 100 x 50 เซนติเมตร มีช่องปล่อยอากาศเข้าและช่องระบายอากาศออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้างเท่ากับ ความกว้างของห้อง ความสูงของช่องปล่อยอากาศเข้า (h) มีค่าเท่ากับ 4 เซนติเมตร ในขณะที่ความสูงของช่องระบายอากาศออกสามารถปรับเปลี่ยนขนาดได้ สำหรับ Lobed nozzle ที่ใช้มีขนาดออกเป็น 2 ชุด ซึ่งมีความยาวคาบของ Lobe เท่ากับ 2h และ 4h ตามลำดับ โดยในแต่ละชุดได้แปรเปลี่ยนระยะห่างระหว่าง Lobe ทั้งหมด 4 ค่าคือ 0h (Lobe วางติดกัน), 1h, 2h และ 4h และให้มีเอมบลิจูดและความลึกของ Lobe คงที่เท่ากับ 2h และ 1h ตามลำดับ การทดลองนี้ทำที่สภาวะซึ่งมีค่าแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิของอากาศเข้าและอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมประมาณ 40 °C และมีเรโนลด์นัมเบอร์ซึ่งคำนวณจากความสูงของช่องปล่อยอากาศเข้าที่ความเร็วต่ำและสูงเท่ากับ 1,000 และ 8,800 ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่า Lobed nozzle จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผสมและทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศภายในห้องมีความสม่ำเสมอมากขึ้นกว่ากรณีที่ไม่ใช้ Lobed nozzle โดยเฉพาะในกรณีที่อัตราส่วนพื้นที่การเปิดหน้าต่างห้องน้อย (น้อยกว่า 24%) อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่อัตราส่วนพื้นที่การเปิดหน้าต่างห้องมาก Lobed nozzle จะไม่ส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิมากนัก ยกเว้นในบริเวณใกล้ทางออกของ Nozzle และจากจำนวน Lobed nozzle ทั้งหมด 2 ชุดที่ทำการศึกษานั้นพบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศภายในห้องจะขึ้นอยู่กับทั้ง ค่าความยาวคาบ และระยะห่างระหว่าง Lobe ในลักษณะที่ซับซ้อนและควบคู่กันไป โดย Lobed nozzle ชุดคาบ 2h ที่มีระยะห่าง 4h และชุดคาบ 4h ที่มีระยะห่าง 0h จะมีผลทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของห้องเพิ่มขึ้นสูงสุดในแต่ละชุด Lobe นอกจากนี้เมื่อพิจารณารูปร่างการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยละเอียด พบว่า การใช้ Lobed nozzle ทุกแบบจะทำให้รูปร่างการกระจายตัวของอุณหภูมิต่างกันมาทางด้านล่างของห้องมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ Lobed nozzle

สำหรับผลกระทบของความเร็วกว้างขวางในกรณีที่ไม่ใช้ Lobed nozzle นั้นพบว่า การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยที่บริเวณด้านบนและด้านล่างของห้องตามการเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องระบายอากาศออกนั้น มีคุณลักษณะที่ต่างกันไป กล่าวคือ 1)ที่บริเวณด้านบนของห้อง จะมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้อง ในลักษณะที่เหมือนกันทั้งในกรณีความเร็วต่ำและสูง กล่าวคือ 1.1)อุณหภูมิเฉลี่ยจะขึ้นอยู่กับขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องเฉพาะในช่วงการเปิดตั้งแต่กรณีที่เปิดผนังเต็มๆ จนถึงกรณีที่ปิดลงมาไม่เกิน  $\delta$  เมื่อ  $\delta$  คือความหนาของ Wall jet ที่ตำแหน่งท้ายห้องของกรณีที่เปิดผนังเต็มๆ 1.2)แต่หากทำการปิดผนังลงมาต่ำกว่า  $\delta$  แล้ว อุณหภูมิเฉลี่ยที่บริเวณด้านบนของห้องจะมีค่าประมาณคงที่โดยไม่ขึ้นกับขนาดของช่องเปิด ในทางตรงกันข้าม 2)ที่บริเวณด้านล่างของห้องนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยตามขนาดของช่องเปิดที่ขึ้นอยู่กับความเร็วกว้างขวางเข้าเป็นอย่างมาก กล่าวคือ 2.1)ในกรณีความเร็วสูงพบว่า การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยที่บริเวณด้านล่างของห้องจะขึ้นอยู่กับขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องในลักษณะเดียวกับที่บริเวณด้านบนของห้อง นั่นคือ อุณหภูมิเฉลี่ยจะขึ้นอยู่กับขนาดของช่องเปิดตั้งแต่กรณีที่เปิดผนังเต็มๆ จนถึงกรณีที่ปิดลงมาไม่เกิน  $\delta$  แต่จะมีค่าประมาณคงที่โดยไม่ขึ้นกับขนาดของช่องเปิด เมื่อทำการปิดผนังลงมาต่ำกว่า  $\delta$  ในขณะที่ 2.2)ในกรณีความเร็วต่ำพบว่า การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยจะมีลักษณะแปรผกผันแบบเชิงเส้นกับขนาดช่องเปิด ในช่วงการเปิด-ปิดช่วงกลางประมาณ 60% ของการเปิดเต็มที่และปิดเต็มที่ ถึงแม้ว่าจะทำการปิดผนังท้ายห้องลงมาต่ำกว่า  $\delta$  แล้วก็ตาม 3)ความแตกต่างของคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยตามขนาดของช่องเปิดที่ความเร็วต่างกันนี้ สามารถอธิบายอย่างสังเขปได้ด้วยความแตกต่างของความสามารถในการหักเหเปลี่ยนทิศทางของ Wall jet ที่มีโมเมนตัมสูงและต่ำที่ต่างกัน กล่าวคือ เจ็ทที่มีโมเมนตัมสูงกว่าจะพยายามรักษาทิศทางเคลื่อนที่เดิมไว้ได้ดีกว่าเจ็ทที่มีโมเมนตัมต่ำกว่า จึงเป็นผลทำให้เกิดการไหลหมุนวนภายในห้อง (Recirculation) ที่มีระดับความรุนแรงที่ต่างกันไป ดังนั้น จึงได้เสนอให้ใช้ค่าคุณลักษณะเวลา  $\tau$  ซึ่งนิยามเป็นเวลาที่อนุภาคของอากาศต้องใช้ในการเดินทางจากปลายปาก Nozzle ไปยังผนังฝั่งตรงข้ามด้านท้ายห้อง เป็นตัวบ่งชี้ขอบเขตระหว่างความเร็วสูงและต่ำ

ภาควิชา ..... วิศวกรรมเครื่องกล ..... ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา ..... วิศวกรรมเครื่องกล ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา ..... 2543 ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## 4070286821 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD : VENTILATED CHAMBER / MIXING / LOBED NOZZLE /  
STREAMWISE VORTICE / RECIRCULATION

TOSAPOLE STITSUWONGKUL : MIXING ENHANCEMENT IN A VENTILATED  
CHAMBER BY MEANS OF MANIPULATION OF A NOZZLE EXIT

THESIS ADVISOR: ASST. PROF. ASI BUNYAJITRADULYA, Ph.D., 204 pp.  
ISBN 974-13-0030-1

Two main issues regarding the distribution of temperature in a ventilated chamber are investigated. Firstly, the effects of pyramid-like lobed nozzles varying in period and gap in combination with the size of end-wall opening are investigated. Secondly, the effects of supply-air velocity also in combination with the size of end-wall opening in the case of nozzle without lobes are investigated. The dimensions of the test chamber are  $W \times L \times H = 50 \times 100 \times 50 \text{ cm}^3$ . The nozzle exit and the end-wall opening are rectangular with the width spanning the whole width of the chamber. The height of the nozzle exit ( $h$ ) is 4 cm while that of end-wall opening is adjustable. Two series of lobed nozzles are studied : one with the period of 2h, and the other 4h. In each series, the gap between neighboring lobes is varied at 0h (no gap), 1h, 2h, and 4h interval, and the amplitude and the depth of lobes are fixed at 2h and 1h respectively. The experiment is conducted using heated supply air. The temperature difference between that of the supply air and that of ambient air is 40 °C. The Reynolds numbers based on the height of the nozzle exit and supply-air velocity, at low and high velocities, are 1,000 and 8,800 respectively.

The results reveal many interesting characteristics. For the effects of lobed nozzle and the size of end-wall opening, it is found that the lobes help promote mixing and distribution of supply air inside the chamber and, thus, cause the temperature in the chamber to become more uniform, particularly in the lower zones and for cases of small opening (opening ratio less than or equal to 0.24). For cases of large opening, however, the lobes have little effect except near the nozzle exit. The average temperature and the temperature distribution inside the chamber depend on both the period and the gap in complex and coupled manner. In case of the lobed nozzles with 2h period, the 4h gap causes the highest increase in average temperature, while, those of the 4h period, the 0h gap causes the highest increase. Detailed examination reveals that the lobes cause the temperature profiles to become increasingly fuller towards the lower zones as the flow develops downstream in comparison with those of the case of nozzle without lobes.

For the effects of supply-air velocity in the case of nozzle without lobes, it is found that the variations in average temperature with the end-wall opening in the upper and lower zones display different characteristics. Namely, 1) in the upper zones, the variation in average temperature with end-wall opening is relatively independent of the supply-air velocity. Specifically, 1.1) the average temperature depends upon the closing only in the range of closing from 0 (full opening) to  $\delta$ , where  $\delta$  is the wall jet thickness at the far end of the chamber determined from the case of full opening. On the contrary, 1.2) in the range of closing beyond  $\delta$ , the average temperature in the upper zones is approximately constant, independent of the closing. In contrast, 2) in the lower zones, the variation in average temperature with end-wall opening strongly depends upon the supply-air velocity. Namely, 2.1) in the case of high velocity, the average temperature varies with the end-wall opening in basically the same manner as that is found in the upper zones. That is, it varies with the closing only in the range of closing from 0 to  $\delta$  but is approximately constant, independent of the closing, beyond the closing of  $\delta$ . In striking contrast, 2.2) in the case of low velocity, the average temperature exhibits linear dependency on the closing throughout the mid 60% range of closing, even when the closing is beyond  $\delta$ . 3) The difference in the characteristics of variation of average temperature with end-wall opening at different velocities is attributed to the difference in degree in which the direction of high- and low-momentum wall jets can be changed ; high momentum jet is less likely to change its direction than low momentum one. As a result, wall jets of different strength in momentum cause recirculations of different strength. Finally, a time scale  $\tau$ , defined as the lapse time required for the jet to travel from the nozzle to the far end wall, is suggested to be used for the correlation of these results.

Department ..... Mechanical ..... Student's signature .....

Field of study ..... Mechanical ..... Advisor's signature .....

Academic year ..... 2543 ..... Co-advisor's signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งในทุกๆด้านจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านได้ช่วยดูแลการทำงาน ให้ความรู้ และคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย ตลอดจนเรื่องอื่นๆที่จะเป็นประโยชน์ในการดำเนินชีวิตของผู้วิจัยต่อไปในอนาคต

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ศักดิ์ มลิลลา และ ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ ที่กรุณาให้คำแนะนำและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตั้งแต่สมัยที่ข้าพเจ้ายังเรียนอยู่ในระดับปริญญาตรี ตลอดจนให้ความเอื้อเฟื้อและสนับสนุนการทำวิจัยในระดับปริญญาโทเป็นอย่างดี

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ภายใต้กิจกรรมการให้ทุนแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษา ปีงบประมาณ 2542 และจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

นอกจากนี้ขอขอบพระคุณกลุ่มบุคคลในห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล อันประกอบด้วย พี่ เพื่อน และน้อง ที่มีน้ำใจ ห่วงใย และเอื้อเฟื้อเผื่อแผ่ต่อผู้วิจัยเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณ สุธรรม ม้าศรี คุณ อลงกรณ์ พิมพ์พิณ และ คุณ เกียรติศักดิ์ กอบกาญจนการ ที่ร่วมกันฝ่าฟันอุปสรรคการทำงานต่างๆในช่วงเวลาของการเริ่มก่อตั้งห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหลนี้ขึ้นมา

ในท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่ ผู้ซึ่งให้กำลังใจ ความเข้าใจ และทุนทรัพย์ รวมทั้งให้การสนับสนุนในทุกๆด้านแก่ผู้วิจัย จึงทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี



# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
รายการสัญลักษณ์.....	ธ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 แนวทางของการทำวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.5 เป้าหมายของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่ผ่านมาและความเป็นมาของวิทยานิพนธ์.....	4
2.1 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	4
2.2 ความเป็นมาของวิทยานิพนธ์.....	16
บทที่ 3 ความรู้พื้นฐาน.....	18
3.1 การไหลผ่าน Lobed nozzle (รูปทรงปิรามิด).....	18
3.2 สมการ Vorticity.....	18
บทที่ 4 ชุดทดลองและการทดลอง.....	21
4.1 ชุดทดลอง.....	21
4.2 ผลการเปรียบเทียบชุดทดลอง.....	23
4.3 พารามิเตอร์ของการทดลอง.....	24
4.4 การวัดอุณหภูมิ.....	25

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ชุดทดลองและการทดลอง (ต่อ)	
4.5 การวัดความดันสถิต (Static pressure).....	25
4.6 การวัดความดันรวม (Total pressure).....	26
4.7 สัมประสิทธิ์ที่ใช้บ่งบอกการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียส.....	26
4.8 สภาวะของการทดลองและความคลาดเคลื่อน.....	29
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	31
5.1 ผลกระทบของขนาดช่องระบายอากาศออกที่บริเวณท้ายห้องต่อการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสในห้อง ในกรณีความเร็วบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้ามีค่าสูง ( $U_j = 4.4 \text{ m/s}$ ).....	31
5.2 ผลกระทบของความเร็วอากาศควบคู่กับขนาดของช่องระบายอากาศออกที่บริเวณท้ายห้องต่อการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสในห้อง ในกรณีความเร็วบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้ามีค่าสูง ( $U_j = 4.4 \text{ m/s}$ ) และต่ำ ( $U_j = 0.5 \text{ m/s}$ ).....	38
5.3 ผลกระทบของการใช้ Lobed nozzle ควบคู่กับขนาดของช่องระบายอากาศออกที่บริเวณท้ายห้องต่อการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสในห้อง ในกรณีความเร็วบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้ามีค่าต่ำ ( $U_j = 0.5 \text{ m/s}$ ).....	48
บทที่ 6 อภิปรายและสรุปผลการทดลอง.....	67
6.1 อภิปรายผลการทดลอง.....	67
6.2 สรุปผลการทดลอง.....	69
6.3 ข้อเสนอแนะของงานวิจัยในอนาคต.....	74
ประมวลตาราง.....	75
ประมวลรูปภาพ.....	106
รายการอ้างอิง.....	187
ภาคผนวก.....	190
ภาคผนวก ก.....	191



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข .....	193
ภาคผนวก ค .....	196
ภาคผนวก ง .....	200
ประวัติผู้เขียน .....	204



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	ตารางแสดงรายละเอียดและผลการศึกษาการไหลภายในห้องที่มีการระบายอากาศที่ผ่านมาในอดีต ..... 76
ตารางที่ 2.2	ตารางแสดงรายละเอียดและผลการศึกษาการไหลผ่าน BFS ที่ผ่านมาในอดีต ..... 80
ตารางที่ 2.3	ตารางแสดงรายละเอียดและผลการศึกษาเกี่ยวกับ Mixing layer (หรือ Shear layer) ที่ผ่านมาในอดีต ..... 82
ตารางที่ 2.4	ตารางแสดงรายละเอียดและผลการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมผสานของเจ็ทที่ผ่านมาในอดีต ..... 88
ตารางที่ 4.1	ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของ Lobed nozzle ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ..... 97
ตารางที่ 4.2	ตารางแสดงขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้อง (t) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ..... 97
ตารางที่ 5.1	ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉลี่ยโดยรวม ( $C_{TT}$ ) ของกรณี L000 เมื่อ $U_j = 4.4 \text{ m/s}$ ..... 98
ตารางที่ 5.2	ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉลี่ยโดยบริเวณ ( $C_{TZ}$ ) ของกรณี L000 เมื่อ $U_j = 4.4 \text{ m/s}$ ..... 98
ตารางที่ 5.3	ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจสูงสุด ( $C_{T \max}$ ) ของกรณี L000 ที่ตำแหน่ง Center plane ( $y = 0$ ) เมื่อ $U_j = 4.4 \text{ m/s}$ ..... 98
ตารางที่ 5.4	ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉลี่ยโดยเฉลี่ยรวม ( $C_{TT}$ ) เมื่อ $U_j = 0.5 \text{ m/s}$ ..... 99
ตารางที่ 5.5	ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉลี่ยโดยบริเวณ ( $C_{TZ}$ ) ของกรณี L000 เมื่อ $U_j = 0.5 \text{ m/s}$ ..... 99
ตารางที่ 5.6	ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉลี่ยโดยบริเวณ ( $C_{TZ}$ ) ของกรณี L220 เมื่อ $U_j = 0.5 \text{ m/s}$ ..... 99
ตารางที่ 5.7	ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉลี่ยโดยบริเวณ ( $C_{TZ}$ ) ของกรณี L221 เมื่อ $U_j = 0.5 \text{ m/s}$ ..... 100
ตารางที่ 5.8	ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉลี่ยโดยบริเวณ ( $C_{TZ}$ ) ของกรณี L222 เมื่อ $U_j = 0.5 \text{ m/s}$ ..... 100



## สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 5.23	ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิตั้งสูงสุด ( $C_{Tmax}$ ) ของกรณี L000 ที่ตำแหน่ง Center plane ( $y = 0$ ) เมื่อ $U_j = 0.5 \text{ m/s}$ .....	104
ตารางที่ 5.24	ตารางแสดงค่า Blockage ratio ( $B_w$ ) ของทุกกรณี .....	105
ตารางที่ 5.25	ตารางแสดงค่า Uncertainty ของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่แสดงถึง สมรรถนะของ Lobed nozzle .....	105



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูปภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	ภาพแสดงแบบจำลองห้องที่ใช้ในการศึกษาของ Nielsen et al. (1978).....	107
รูปที่ 2.2	ภาพแสดงแบบจำลองห้องที่ใช้ในการศึกษาของ Gosman et al. (1980)....	107
รูปที่ 2.3	ภาพแสดงแบบลักษณะของ BFS และ Confined ventilation enclosure ในการศึกษาของ Peng et al. (1997).....	108
รูปที่ 2.4	ภาพแสดงลักษณะการไหลผ่าน Backward facing step (Bradshaw and Wong, 1972).....	108
รูปที่ 2.5	ภาพแสดงผลการวัดระยะ Reattachment ของ Armaly et al. (1983).....	109
รูปที่ 2.6	ภาพแสดงผลของ Expansion ratio ต่อระยะ Reattachment และ ระบบแกนที่ใช้ในงานวิจัยของ Otugen (1991).....	109
รูปที่ 2.7	ภาพแสดงลักษณะการไหลของ Mixing Layer (Bernal and Roshko, 1986).....	110
รูปที่ 2.8	ภาพแสดง Topology ของ Streamwise vortex line ที่เกิดขึ้นภายใน บริเวณ Braid region (Bernal and Roshko, 1986).....	110
รูปที่ 2.9	ภาพแสดงลักษณะการไหลของ Free Jet ที่มีหน้าตัดทางออกเป็นรูป สี่เหลี่ยมผืนผ้า (Krothapalli et al., 1981).....	111
รูปที่ 2.10	ภาพแสดงลักษณะและการติดตั้ง Tab สามเหลี่ยมที่ใช้ในงานวิจัยของ Reeder and Samimy (1996).....	111
รูปที่ 2.11	ภาพแสดงลักษณะ Streamwise vorticity ที่เกิดจากการไหลผ่าน Tab สามเหลี่ยมที่ใช้ในงานวิจัยของ Reeder and Samimy (1996).....	112
รูปที่ 2.12	ภาพแสดงรูปถ่ายของ Baseline nozzle และ Axisymmetric lobed mixer- nozzle ชนิดต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยของ Belovich and Samimy (1996).....	112
รูปที่ 2.13	ภาพแสดงลักษณะ Injector ต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยของ Smith et al.(1997)....	113
รูปที่ 2.14	ภาพแสดงลักษณะและการติดตั้ง Primary และ Secondary tab รูปสามเหลี่ยมที่ใช้ในงานวิจัยของ Bohl and Foss (1999).....	114
รูปที่ 3.1	ภาพแสดงรูปถ่ายของ Streamwise vortices ที่เกิดขึ้นจากการไหลผ่าน Lobed nozzle รูปทรงปิรามิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	115
รูปที่ 3.2	ภาพแสดงรูปจำลองของ Counter-rotating streamwise vortices ที่เกิดขึ้นจากการไหลผ่าน Lobed nozzle รูปทรงปิรามิดที่ใช้ใน งานวิจัยนี้.....	115

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.3	ภาพแสดงการเปลี่ยน Spanwise vortices ไปสู่ Streamwise vortices อันเนื่องจากการไหลผ่าน Lobed nozzle ..... 116
รูปที่ 4.1	ภาพแสดง Schematic drawing ของอุโมงค์ลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ..... 117
รูปที่ 4.2	รูปแสดงภาพถ่ายของอุโมงค์ลม ..... 118
รูปที่ 4.3	ภาพแสดง Centrifugal blower ..... 119
รูปที่ 4.4	ภาพแสดง Contraction และห้องทดลอง (Test section) ..... 119
รูปที่ 4.5	ภาพแสดงส่วนทำความร้อน (Heating section) ที่ติดตั้งภายในอุโมงค์ลม .. 120
รูปที่ 4.6	ภาพแสดง Variac ขนาด 10 kVA ที่ใช้ในการปรับอุณหภูมิ ..... 120
รูปที่ 4.7	รูปแสดงภาพถ่ายห้องทดลอง (Test section) ..... 121
รูปที่ 4.8	ภาพแสดง Schematic drawing ของห้องทดลอง ..... 122
รูปที่ 4.9	ภาพแสดง Lobed nozzle แบบต่างๆ ..... 123
รูปที่ 4.10	ภาพแสดงพารามิเตอร์ต่างๆของ Lobed nozzle ..... 123
รูปที่ 4.11	ภาพแสดงการติดตั้ง Lobed nozzle ที่บริเวณปากทางเข้าของห้องทดลอง ..... 125
รูปที่ 4.12	ภาพแสดงตำแหน่งต่างๆที่ใช้วัดความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่บริเวณ หน้าตัดทางออกของ Contraction ซึ่งมีขนาด 4 x 50 เซนติเมตร <sup>2</sup> ..... 126
รูปที่ 4.13	ภาพแสดงการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่วัดได้ (m/s) ที่บริเวณหน้าตัดทางออกของ Contraction ..... 126
รูปที่ 4.14	ภาพแสดงตำแหน่งที่ใช้ในการวัดความหนาของชั้น Boundary Layer ที่บริเวณหน้าตัดทางออกของ Contraction ..... 126
รูปที่ 4.15	กราฟแสดงผลการวัด Boundary Layer ที่ปากทางออก Contraction ..... 127
รูปที่ 4.16	ภาพแสดง Probe และตัวอ่านค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ..... 127
รูปที่ 4.17	ภาพแสดงการวัดอุณหภูมิภายในห้องทดลองโดยการยื่น Probe จากทางด้านบน ..... 128
รูปที่ 4.18	ภาพแสดง Pressure transducer ที่ใช้ในการวัดความดันสถิตตกร่อม Lobed nozzle ..... 128
รูปที่ 4.19	ภาพแสดงตัวอ่านค่า (Read out) ที่ใช้ในการวัดความดันสถิตตกร่อม Lobed nozzle ..... 129
รูปที่ 4.20	ภาพแสดงชุด Orifice ที่ติดตั้งบริเวณทางเข้าของอุโมงค์ลม ..... 129



## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.21	ภาพแสดง Inclined manometer ที่ใช้ในการวัดความดันสถิต ตกคร่อม Orifice ..... 130
รูปที่ 4.22	ภาพแสดง Pitot probe ที่ใช้ในการวัดความดันรวม ..... 130
รูปที่ 5.1	กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า $C_{TT}$ ของกรณี L000 ที่อัตราส่วนของ ขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน เมื่อ $U_j = 4.4 \text{ m/s}$ ..... 131
รูปที่ 5.2	กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า $C_{TZ}$ ตามบริเวณต่างๆภายในห้อง ของกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน เมื่อ $U_j = 4.4 \text{ m/s}$ ..... 131
รูปที่ 5.3	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_{TS}$ ของกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่างๆกัน ตามแนว Streamwise เมื่อ $U_j = 4.4 \text{ m/s}$ ..... 132
รูปที่ 5.4	รูปแสดงลักษณะ Recirculation ที่เกิดขึ้นในกรณี P0.84 จนถึง กรณี P0.08 เมื่อ $U_j = 4.4 \text{ m/s}$ ..... 133
รูปที่ 5.5	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_{TS}$ ตามแนว Streamwise ของกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่างๆกัน เมื่อ $U_j = 4.4 \text{ m/s}$ ..... 134
รูปที่ 5.6	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_T$ ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L000 เมื่อ $U_j = 4.4 \text{ m/s}$ ..... 135
รูปที่ 5.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $C_{T \max}$ ที่ตำแหน่ง Center plane และอัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้อง ในกรณี L000 เมื่อ $U_j = 4.4 \text{ m/s}$ ..... 136
รูปที่ 5.8	กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า $C_{TT}$ ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิด ท้ายห้องต่างๆกันเมื่อ $U_j = 0.5$ และ $4.4 \text{ m/s}$ ..... 136
รูปที่ 5.9	กราฟแสดงผลของความเร็วเฉลี่ยบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้าต่อ ลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_{TZ}$ ที่บริเวณด้านบนและด้านล่าง ของห้องในกรณี L000 ..... 137
รูปที่ 5.10	รูปแสดงลักษณะการไหลของเจ็ทภายในห้องเมื่อทำการปิดผนังด้านท้ายห้อง เกินกว่าความหนาของเจ็ท ( $\delta$ ) ..... 138

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 5.11	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_{TS}$ ตามแนว Streamwise ของกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่างๆกัน เมื่อ $U_j = 0.5 \text{ m/s}$ .....	139
รูปที่ 5.12	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_T$ ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L000 ที่ $U_j = 0.5 \text{ m/s}$ .....	140
รูปที่ 5.13	กราฟแสดงผลของความเร็วจนเฉลี่ยบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้าต่อ ลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_T/C_{Tmax}$ ตามบริเวณต่างๆ ภายในห้องที่ตำแหน่ง Center plane ( $y=0$ ) ในกรณี L000-1.00 .....	141
รูปที่ 5.14	กราฟแสดงผลกระทบของความเร็วจนเฉลี่ยบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้า ต่อลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_T$ ที่ตำแหน่ง Center plane ( $y=0$ ) ในกรณี L000 .....	142
รูปที่ 5.15	กราฟแสดงผลกระทบของความเร็วจนเฉลี่ยบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้า ต่อลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_T$ ตามบริเวณต่างๆภายในห้องที่ ตำแหน่ง Center plane ( $y=0$ ) ในกรณี L000 .....	143
รูปที่ 5.16	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_T$ ตามบริเวณต่างๆ ภายในห้อง ที่ตำแหน่ง Center plane ( $y=0$ ) ในกรณี L000 ที่มีความเร็ว เฉลี่ยบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้าต่ำและสูง .....	144
รูปที่ 5.17	รูปแสดงลักษณะของเจ็ทภายในห้องเมื่อทำการปิดผนังด้านท้ายขนาดต่างๆกัน ..	145
รูปที่ 5.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $C_{Tmax}$ ที่ตำแหน่ง Center plane และอัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องในกรณี L000 ที่มีความเร็ว เฉลี่ยบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้าต่างๆกัน .....	146
รูปที่ 5.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $C_{Tmax}$ ที่ตำแหน่ง Center plane และระยะตามแนวการไหลในกรณี L000 ที่ความเร็วเฉลี่ยบริเวณช่อง ปล่อยอากาศเข้าต่างๆกัน .....	147
รูปที่ 5.20	ภาพแสดงการไหลในกรณี P1.00 .....	148
รูปที่ 5.21	ภาพแสดงการไหลในกรณี P0.24 .....	149
รูปที่ 5.22	ภาพแสดงการไหลในกรณี P0.08 .....	150
รูปที่ 5.23	ภาพด้านท้าย (End view) แสดงการไหลของอากาศที่ตำแหน่งใกล้ ปากทางออกของเจ็ท .....	151

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.24	กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า $C_{TT}$ ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิด ท้ายห้องต่างๆกันของการใช้ Lobed nozzle แบบต่างๆ..... 152
รูปที่ 5.25	กราฟแสดงผลกระทบของระยะห่างระหว่าง Lobe ต่อลักษณะการกระจาย ตัวของค่า $C_{TT}$ ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน..... 152
รูปที่ 5.26	กราฟแสดงผลกระทบของความยาวคาบของ Lobed nozzle ต่อลักษณะ การกระจายตัวของค่า $C_{TT}$ ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้อง ต่างๆกัน..... 153
รูปที่ 5.27	กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า $C_{TZ}$ ตามบริเวณต่างๆภายในห้องของ การใช้ Lobed nozzle แบบต่างๆที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้อง ต่างๆกัน..... 154
รูปที่ 5.28	กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า $C_{TZ}$ ตามบริเวณต่างๆภายในห้องของ การใช้ Lobed nozzle ชุด L22X ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้าย ห้องต่างๆกัน..... 155
รูปที่ 5.29	กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า $C_{TZ}$ ตามบริเวณต่างๆภายในห้องของ การใช้ Lobed nozzle ชุด L24X ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้าย ห้องต่างๆกัน..... 156
รูปที่ 5.30	กราฟแสดงผลของความยาวคาบของ Lobed nozzle ที่ $G = 0$ ที่มีต่อ ลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_{TZ}$ ตามบริเวณต่างๆภายในห้อง ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน..... 157
รูปที่ 5.31	กราฟแสดงผลของความยาวคาบของ Lobed nozzle ที่ $G = 1h$ ที่มีต่อ ลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_{TZ}$ ตามบริเวณต่างๆภายในห้อง ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน..... 158
รูปที่ 5.32	กราฟแสดงผลของความยาวคาบของ Lobed nozzle ที่ $G = 2h$ ที่มีต่อ ลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_{TZ}$ ตามบริเวณต่างๆภายในห้อง ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน..... 159
รูปที่ 5.33	กราฟแสดงผลของความยาวคาบของ Lobed nozzle ที่ $G = 4h$ ที่มีต่อ ลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_{TZ}$ ตามบริเวณต่างๆภายในห้อง ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน..... 160

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 5.34	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_{TS}$ ตามบริเวณต่างๆ ภายในห้องของการใช้ LN ชุด L22X เทียบกับกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆ กัน.....	161
รูปที่ 5.35	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_{TS}$ ตามบริเวณต่างๆ ภายในห้องของการใช้ LN ชุด L24X เทียบกับกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆ กัน.....	162
รูปที่ 5.36	กราฟแสดงผลของ Lobed nozzle ต่อค่า $C_{TS\ max}$ ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆ กัน .....	163
รูปที่ 5.37	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_{TS}$ ตามบริเวณต่างๆ ภายในห้องของกรณี L220 เทียบกับกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆ กัน.....	164
รูปที่ 5.38	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_{TS}$ ตามบริเวณต่างๆ ภายในห้องของกรณี L221 เทียบกับกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆ กัน.....	165
รูปที่ 5.39	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_{TS}$ ตามบริเวณต่างๆ ภายในห้องของกรณี L222 เทียบกับกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆ กัน.....	166
รูปที่ 5.40	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_{TS}$ ตามบริเวณต่างๆ ภายในห้องของกรณี L224 เทียบกับกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆ กัน.....	167
รูปที่ 5.41	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_{TS}$ ตามบริเวณต่างๆ ภายในห้องของกรณี L240 เทียบกับกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆ กัน.....	168
รูปที่ 5.42	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_{TS}$ ตามบริเวณต่างๆ ภายในห้องของกรณี L241 เทียบกับกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆ กัน.....	169
รูปที่ 5.43	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_{TS}$ ตามบริเวณต่างๆ ภายในห้องของกรณี L242 เทียบกับกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆ กัน.....	170

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.44	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_{TS}$ ตามบริเวณต่างๆ ภายในห้องของกรณี L244 เทียบกับกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน.....	171
รูปที่ 5.45	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_T$ ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน.....	172
รูปที่ 5.46	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_T$ ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L220 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน.....	173
รูปที่ 5.47	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_T$ ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L221 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน.....	174
รูปที่ 5.48	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_T$ ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L222 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน.....	175
รูปที่ 5.49	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_T$ ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L224 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน.....	176
รูปที่ 5.50	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_T$ ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L240 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน.....	177
รูปที่ 5.51	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_T$ ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L241 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน.....	178
รูปที่ 5.52	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_T$ ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L242 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน.....	179
รูปที่ 5.53	กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_T$ ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L244 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน.....	180
รูปที่ 5.54	กราฟเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_T$ ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L224 และ L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน.....	181
รูปที่ 5.55	กราฟเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_T$ ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L240 และ L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน.....	182

## สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.56	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของ $P_1 - P_{atm}$ และ $U_j$ ของ Lobed nozzle ทุกแบบ ที่ขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่างๆกัน.....	183
รูปที่ 5.57	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $C_p$ และ $U_j$ ของ Lobed nozzle ทุกแบบที่ขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่างๆกัน.....	184
รูปที่ 5.58	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของ $P_1 - P_{atm}$ และ $U_j$ ของกรณี L240 เปรียบเทียบกับกรณี L000 .....	185
รูปที่ 5.59	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ $C_p$ และ $U_j$ ของกรณี L240 เปรียบเทียบกับกรณี L000 .....	185
รูปที่ 5.60	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $C_p$ และ $B_w$ ที่ความเร็วเฉลี่ย บริเวณช่องปล่อยอากาศเข้าต่างๆกันของ Lobed nozzle แบบต่างๆ.....	186

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## รายการสัญลักษณ์

$A$	แอมพลิจูดของ Lobed nozzle หรือ พื้นที่หน้าตัด
$A_{NZ}$	พื้นที่หน้าตัดทางออกของ Nozzle
$A_O$	พื้นที่หน้าตัดการไหลของ Orifice
$A_{\perp}$	พื้นที่ของ Lobed nozzle ที่ตั้งฉากกับการไหล
$B$	ค่าความลึกของ Lobed nozzle
$B_W$	Blockage ratio ของ Lobed nozzle
$C_P$	สัมประสิทธิ์ความดันสถิตเฉลี่ย
$C_T$	สัมประสิทธิ์อุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆในห้องทดลอง
$C_{TS}$	สัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉลี่ยตลอดความกว้างของห้องทดลอง
$C_{TT}$	สัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉลี่ยโดยรวมภายในห้องทดลอง
$C_{TZ}$	สัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉลี่ยตามโซนต่างๆภายในห้องทดลอง
$D$	เส้นผ่านศูนย์กลาง
$D_{ij}$	Strain rate
$D_P$	เส้นผ่านศูนย์กลางของปลาย Probe ที่ใช้วัดอุณหภูมิ
$ER$	Expansion ratio ของ Backward facing step
$G$	ระยะห่างระหว่าง Lobe
$L$	ความยาวของห้องทดลอง
$H$	ความสูงของห้องทดลอง
$h$	ความสูงของช่องปล่อยอากาศเข้า หรือ ค่าคงที่ของการพาความร้อน
$K$	สัมประสิทธิ์ความดันสถิต
$K_O$	ค่าคงที่ของ Orifice
$k$	Turbulent kinetic energy หรือ ค่าคงที่ของการนำความร้อน
$LN$	Lobed nozzle
$n$	จำนวน Lobed nozzle
$Nu$	Nusselt number
$P$	ความดันสถิต
$P_{atm}$	ความดันบรรยากาศ
$Pr$	Prandtl number
$P_T$	ความดันรวม
$Q$	อัตราการไหลโดยปริมาตร

$q$	ความดันจลน์
$q_{cond}$	การถ่ายเทพลังงานความร้อนโดยการนำความร้อน
$q_{conv}$	การถ่ายเทพลังงานความร้อนโดยการพาความร้อน
$Re$	เรโนลด์ส์นัมเบอร์ (Reynolds number)
$S$	ความสูงของชั้นบันได
$s$	ขนาดของผนังด้านท้ายห้องที่ขวางการไหลอยู่
$T$	ความยาวคาบของ Lobed nozzle หรือ ค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งใดๆ
$T_F$	อุณหภูมิจริงของของไหล
$T_J$	อุณหภูมิที่ตำแหน่ง Centerline ของเจ็ทอากาศ ณ ตำแหน่งทางเข้าของ ห้องทดลอง
$T_p$	อุณหภูมิที่วัดได้
$T_{ref}$	อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม
$t$	ความสูงของช่องระบายอากาศออก
$U$	ความเร็วเฉลี่ยตามแนวการไหล
$U_J$	ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทอากาศบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้า
$V$	ปริมาตรของบริเวณ
$V_S$	ปริมาตรของบริเวณซึ่งขวางการไหลตลอดความกว้างของห้องทดลอง
$V_Z$	ปริมาตรของบริเวณที่สนใจภายในห้องทดลอง
$V_T$	ปริมาตรโดยรวมทั้งหมดของห้องทดลอง
$W$	ความกว้างของห้องทดลอง
$w$	ความกว้างของช่องปล่อยอากาศเข้าและช่องระบายอากาศออก
$X_r$	ระยะ Reattachment

### อักษรกรีก

$\beta$	ค่า Area ratio ของ Orifice
$\delta$	ความหนาของชั้นขอบเขต หรือ ความหนาของ Wall jet ที่ตำแหน่งทางออกของห้องเมื่อทำการเปิดผนังด้าน ท้ายห้องทั้งหมด
$\delta_d$	Displacement thickness
$\Delta$	ค่าแตกต่าง
$\alpha$	มุมบาน (Ramp angle) ของ Lobed nozzle
$\lambda$	ความยาวคาบของ Lobed fuel injector
$\varepsilon$	Dissipation rate of turbulent kinetic energy
$\nu$	Kinematic viscosity

$\rho$	ค่าความหนาแน่น
$\tau$	ค่า Time scale ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะทางต่อความเร็ว
$\omega$	Specific dissipation rate of turbulent kinetic energy หรือ ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)
$\omega_x$	Streamwise vorticity
$\bar{\omega}$	Vorticity
$\theta$	Momentum thickness
$\theta_p$	มุมในการติดตั้งของ Primary tab
$\theta_s$	มุมในการติดตั้งของ Secondary tab

**ตัวห้อย**

1	บริเวณช่องปล่อยอากาศเข้าที่ตำแหน่งก่อนถึง Lobed nozzle ( $x = -2$ cm) หรือที่ตำแหน่งก่อนทางเข้า Orifice เป็นระยะเท่ากับความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ
2	ที่ตำแหน่งหลังจากทางออกของ Orifice เป็นระยะเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ
$a$	อากาศ
$atm$	บรรยากาศ
$H$	กรณีความเร็วสูง ( $U_j = 4.4$ m/s)
$L$	กรณีความเร็วต่ำ ( $U_j = 0.5$ m/s)
$LN$	Lobed nozzle
$MAX$	ค่าสูงสุด
$ref$	ตำแหน่งอ้างอิง

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำ

การไหลของอากาศภายในห้องที่มีการระบายอากาศนั้นสามารถพบเห็นได้ทั่วไปในงานทางด้านวิศวกรรม ตัวอย่างหนึ่งที่เราเห็นได้ชัดเจนคือ การไหลของอากาศภายในห้องที่มีเครื่องปรับอากาศ ซึ่งจะพบว่าภายในห้องที่มีเครื่องปรับอากาศติดตั้งอยู่บริเวณเพดานห้องนั้น มักจะมีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ค่อนข้างจะไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ อุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆภายในห้องนั้นค่อนข้างจะแตกต่างกัน โดยเฉพาะบริเวณที่อยู่ใต้เครื่องปรับอากาศและบริเวณตามมุมห้องจะมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่น ซึ่งจะทำให้คนที่อยู่ในบริเวณดังกล่าวรู้สึกร้อนในขณะที่คนที่อยู่ในบริเวณกลางห้องรู้สึกหนาว ที่เป็นเช่นนี้เพราะการผสมผสานและการกระจายตัวของอากาศเย็นที่ออกมาจากเครื่องปรับอากาศซึ่งมีลักษณะเป็นแบบกึ่ง Wall jet นั้นไม่ดีพอ ทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิ (Temperature distribution) ภายในห้องนั้นไม่สม่ำเสมอและเหมาะสม

สำหรับตามโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆที่มีโกดังเก็บของซึ่งที่บริเวณประตูท้ายโกดังนั้นสามารถเลื่อนระดับได้ จะพบว่าลักษณะการไหลของอากาศ (Flow pattern) และการระบายอากาศ (Ventilation) ภายในโกดังอาจจะมีผลอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่เก็บอยู่ภายในโกดังนั้น ซึ่งกรณีที่ประตูท้ายโกดังเปิดที่ระดับต่างๆกันจะพบว่าลักษณะการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นภายในโกดังก็จะแตกต่างกันออกไป โดยถ้าประตูท้ายโกดังเปิดน้อยๆจะทำให้มีบริเวณการไหลแบบหมุนวน (Recirculation region) เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าและเกิดเป็นบริเวณใหญ่กว่ากรณีที่ประตูท้ายโกดังเปิดมากๆ (ที่ความเร็วอากาศเข้าเดียวกัน) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วหากมีลักษณะการไหลของอากาศและการระบายอากาศภายในโกดังที่ดีก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพที่ดีตามไปด้วย ดังนั้นหากมีความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นที่ขนาดของช่องระบายอากาศออกต่างๆกันแล้ว จะทำให้สามารถควบคุมลักษณะการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นภายในโกดังหรือห้องนั้นๆได้ดียิ่งขึ้น

นอกจากนี้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ (Combustion chamber) ทั่วไปที่พบใน Boiler ตามโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆนั้น จะขึ้นอยู่กับลักษณะการไหลภายในห้องเผาไหม้และการผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นอย่างมาก โดยประสิทธิภาพการเผาไหม้จะดีขึ้นถ้าลักษณะการไหลของเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นไปอย่างเหมาะสม และมีการผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่ดี ซึ่งจะส่งผลให้มีการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และช่วยลดมลภาวะที่เกิดจากการเผาไหม้ได้ รวมทั้งยังสามารถช่วยลดขนาดของห้องเผาไหม้ได้

สำหรับวิธีที่ช่วยทำให้ลักษณะการกระจายตัวของอากาศภายในห้องปรับอากาศเป็นไปอย่างทั่วถึงซึ่งจะทำให้คนภายในห้องรู้สึกสบายขึ้นได้ ตลอดจนวิธีที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้นั้นมีหลายวิธีการ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่

แบบไม่อาศัยพลังงานจากภายนอก (Passive control) และแบบอาศัยพลังงานจากภายนอก (Active control) ซึ่งแบบ Passive control นั้นเป็นแบบที่กำลังได้รับความสนใจในปัจจุบัน เนื่องจากสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อยกว่า และดำเนินการได้ง่ายกว่าแบบ Active control โดยเฉพาะการใช้ Tab หรือ Lobed nozzle ติดตั้งที่บริเวณปากทางออกของเจ็ทเพื่อเพิ่มอัตราการผสมของเจ็ทกับอากาศรอบข้าง

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการศึกษาถึงผลของการใช้ Lobed nozzle ซึ่งติดตั้งอยู่บริเวณปากทางออกของช่องปล่อยอากาศเข้าต่อกระบวนการผสมผสานและการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่เกิดขึ้นภายในห้องที่มีการระบายอากาศ (Ventilated chamber) เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ใช้ Lobed nozzle รวมทั้งผลของความเร็วอากาศบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้าต่อลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่เกิดขึ้นภายในห้อง โดยศึกษาในลักษณะที่ควบคุมไปกับผลของขนาดพื้นที่หน้าตัดของช่องระบายอากาศออกด้านท้ายห้อง

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของการใช้ Lobed nozzle รูปทรงปิรามิด ควบคุมกับผลของขนาดช่องระบายอากาศออกด้านท้ายห้อง ต่อลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่เกิดขึ้นภายในห้องที่มีการระบายอากาศ โดย Lobed nozzle ที่ใช้มีความยาวคาบและระยะห่างต่าง ๆ กัน รวมทั้งศึกษาถึงผลกระทบของความเร็วอากาศที่ช่องปล่อยอากาศเข้าควบคุมกับขนาดของช่องระบายอากาศออกด้านท้ายห้องสำหรับกรณีที่ไม่ใช้ Lobed nozzle

## 1.3 แนวทางของการทำวิจัย

ศึกษาโดยการทดลองวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศร้อนภายในห้องที่มีการระบายอากาศ ในกรณีที่ไม่ใช้และใช้ Lobed nozzle ซึ่งมีความยาวคาบและระยะห่างต่าง ๆ กัน โดยมีการแปรเปลี่ยนขนาดของช่องระบายอากาศออกด้านท้ายห้องควบคุมไปด้วย รวมทั้งศึกษาในกรณีที่ไม่ใช้ Lobed nozzle ซึ่งมีการแปรเปลี่ยนความเร็วของอากาศที่ช่องทางเข้า ควบคุมไปกับการแปรเปลี่ยนขนาดของช่องระบายอากาศออกด้านท้ายห้อง

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 สร้างอุโมงค์ลมที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดบริเวณปากทางออก Contraction เท่ากับ  $4 \times 50$  เซนติเมตร<sup>2</sup> และมีความเร็วลมสูงสุดในส่วน Test section ประมาณ 10 เมตรต่อวินาที

1.4.2 สร้างชุดทดลองที่ประกอบด้วย Test section ซึ่งเป็นแบบจำลองของห้องที่มีการระบายอากาศ ขนาด  $50 \times 100 \times 50$  เซนติเมตร<sup>3</sup> และสร้าง Lobed nozzle ที่มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ กัน

1.4.3 ทำการทดลองเพื่อหาลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสอากาศภายในห้อง ที่มีการแปรเปลี่ยนขนาดของช่องระบายอากาศออกที่บริเวณท้ายห้อง ในกรณีที่ใช้ Lobed nozzle พารามิเตอร์ต่าง ๆ กัน โดยทำการทดลองเฉพาะที่ความเร็วอากาศบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้ามีค่าต่ำ ( $U_j$  เท่ากับ 0.5 เมตรต่อวินาที)

1.4.4 ทำการทดลองเพื่อหาลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสอากาศภายในห้อง ที่มีการแปรเปลี่ยนขนาดของช่องระบายอากาศออกที่บริเวณท้ายห้อง ในกรณีที่ไม่ใช้ Lobed nozzle โดยทำการทดลองที่ความเร็วอากาศบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้ามีค่าต่ำและสูง ( $U_j$  เท่ากับ 0.5 และ 4.4 เมตรต่อวินาที)

1.4.5 เปรียบเทียบหาผลของพารามิเตอร์ต่างๆของ Lobed nozzle และผลของความเร็วอากาศบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้า ควบคู่กับขนาดช่องระบายอากาศออกที่บริเวณท้ายห้อง ที่มีต่อการผสมผสานและลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสอากาศภายในห้องที่มีการระบายอากาศนี้

1.4.6 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองตามวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้

## 1.5 เป้าหมายของงานวิจัย

เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับผลของ Lobed nozzle ควบคู่ไปกับผลของขนาดช่องระบายอากาศออกด้านท้ายห้อง ต่อการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสอากาศภายในห้อง และให้ได้มาซึ่งข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ Lobed nozzle นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังมีความมุ่งหวังเพื่อให้ได้มาซึ่ง ผลของความเร็วอากาศบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้าควบคู่ไปกับผลของขนาดช่องระบายอากาศออกด้านท้ายห้อง ต่อลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสอากาศที่เกิดขึ้นภายในห้อง



## บทที่ 2

### งานวิจัยที่ผ่านมาและความเป็นมาของวิทยานิพนธ์

#### 2.1 งานวิจัยที่ผ่านมา

ที่ผ่านมามีการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการไหลภายในห้องที่มีการระบายอากาศ (Ventilated room) ทั้งแบบ 2 และ 3 มิติ โดยเป็นการศึกษาทั้งแบบที่อาศัยการทดลองและอาศัยการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical study) ตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ Nielsen et al. (1978), Gosman et al. (1980), Davidson (1996) และ Peng (1997)

Nielsen et al. (1978) ได้ศึกษาถึงลักษณะการกระจายตัวของความเร็ว (Velocity distribution) ของอากาศภายในห้อง ทั้งแบบ 2 และ 3 มิติ ด้วยการทดลองและการคำนวณสำหรับห้องที่ใช้ในการศึกษาซึ่งเป็นแบบจำลองของห้องที่มีการระบายอากาศนั้น มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยห้องมีความสูง  $H$  (89.3 มิลลิเมตร) ยาว  $3H$  และกว้าง  $1H$  ช่องปล่อยอากาศเข้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าอยู่สูงติดเพดานมีความสูง  $0.056H$  กว้าง  $0.5H$  และ  $1H$  ส่วนช่องระบายอากาศออกมีความสูง  $0.16H$  และกว้าง  $1H$  ติดตั้งอยู่ที่บริเวณด้านล่างของผนังฝั่งตรงข้ามกับช่องปล่อยอากาศเข้า ในการทดลองนั้นใช้ Laser-doppler anemometry (LDA) วัดค่าความเร็วเฉลี่ย และความเร็ว rms โดยช่วงของ Reynolds number ( $Re_h$ ) ที่นิยามโดยค่าความสูงของช่องปล่อยอากาศเข้า  $h$  นั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 5,000 ถึง 10,000 ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการไหลจะมีลักษณะแบบ Wall jet ที่บริเวณผนังด้านบนของห้อง และเกิด Recirculating flow ที่บริเวณกลางห้อง สำหรับ Normalize velocity profiles นั้นพบว่าจะไม่ขึ้นกับค่า Reynolds number ของเจ็ทที่พ่นออกมาจากช่องพ่นอากาศในช่วงค่าที่ทำการทดลอง ในส่วนของการคำนวณนั้นใช้ TEACH คอมพิวเตอร์โปรแกรม (Gosman and Pun, 1974) คำนวณการไหลแบบปั่นป่วนในลักษณะเดียวกันนี้ทั้งแบบ 2 และ 3 มิติ ซึ่งพบว่าที่ความเร็วทางเข้าคงที่นั้นค่าความเร็วย้อนกลับสูงสุด (Maximum reverse velocity) ใน Recirculation region จะแปรผันโดยตรงกับขนาดพื้นที่ของช่องปล่อยอากาศเข้า (Supply opening size) และจะแปรผกผันกับ Inlet angle ของเจ็ทที่พ่นเข้ามาในห้องและความยาวห้อง นอกจากนี้ยังพบว่าห้องที่มีความยาวมากกว่าจะทำให้เกิดการไหลของอากาศแบบ Unsteady flow ได้ง่ายกว่าห้องที่มีความยาวน้อยกว่า สำหรับผลของการคำนวณเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองพบว่าจะให้ผลที่ผิดพลาดอยู่ในช่วง  $\pm 5\%$  ของค่าความเร็วที่ทางเข้า

Gosman et al. (1980) ศึกษาถึงผลของขนาดช่องปล่อยอากาศเข้าต่อลักษณะการไหลของอากาศภายในห้องโดยทำการทดลองและการคำนวณ ในการทดลองได้ทำการวัดค่าของความเร็วเฉลี่ย และ Normal stress ตามแนวความยาวของห้องด้วย LDA ที่  $Re_h$  เท่ากับ 9,000

สำหรับห้องที่ใช้ศึกษามีขนาดเช่นเดียวกับของ Nielsen et al. (1978) แต่ต่างกันตรงช่องปล่อยอากาศเข้าที่มีลักษณะเป็นท่อตรงที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $0.1H$  ดังรูปที่ 2.2 สำหรับการคำนวณนั้นใช้ระเบียบวิธี Finite difference ในการแก้สมการ Time average Navier-Stokes ใน 3 มิติ และใช้ k- $\epsilon$  โมเดล เพื่อทำนายการไหลแบบปั่นป่วน ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า การไหลของอากาศภายในห้องที่ศึกษามีลักษณะเป็นแบบ 3 มิติและมีลักษณะคล้ายคลึงกันแม้จะเปลี่ยนขนาดพื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศเข้าโดยยังคงความเร็วที่ทางเข้าไว้ สำหรับค่าความเร็วย้อนกลับสูงสุดในบริเวณ Recirculation region นั้นจะแปรผันตามขนาดพื้นที่หน้าตัดของช่องปล่อยอากาศเข้าโดยไม่ขึ้นกับรูปร่างของช่องเลย นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับผลจากการทดลองพบว่าจะแตกต่างกันอยู่ในช่วง  $\pm 5\%$  ของค่าความเร็วสูงสุด

ต่อมา Davidson (1996) ทำการศึกษาลักษณะการไหลของอากาศภายในห้อง (Ventilated room) โดยการใช้การคำนวณเชิงตัวเลขด้วยวิธี Large eddy simulation (LES) ซึ่งลักษณะของห้องที่ใช้ศึกษานั้นคล้ายกับของ Nielsen et al. (1978) โดยมีความสูง  $H$  (3 เมตร) กว้าง  $1H$  และยาว  $3H$  โดยมีช่องปล่อยอากาศเข้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าอยู่สูงติดเพดานฝั่งหนึ่งซึ่งมีความสูง ( $h$ ) เท่ากับ  $0.056H$  และกว้างเท่ากับความกว้างของห้องเช่นเดียวกับความกว้างของช่องระบายอากาศออกซึ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความสูง ( $t$ ) เท่ากับ  $0.16H$  ติดตั้งอยู่ที่บริเวณด้านล่างของผนังฝั่งตรงข้าม โดยอากาศที่ช่องปล่อยอากาศเข้านั้นมีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ  $0.455$  เมตรต่อวินาที ( $Re_h$  ประมาณ  $4,300$ ) ที่อุณหภูมิ  $20^\circ C$  โดยในการศึกษานี้ใช้ Dynamic model ของ Germano et al. (1991) เปรียบเทียบกับการใช้ Smagorinsky model ของ Smagorinsky (1963) ซึ่งจากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณจากทั้ง 2 Model พบว่าผลที่ได้จาก Smagorinsky model นั้นขึ้นกับค่าคงที่ของ Model มากดังนั้นการใช้ Dynamic model ในการคำนวณจึงเหมาะสมกว่า และเมื่อนำค่าความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับผลจากการทดลองวัดด้วย LDA ของ Restivo (1979) พบว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างมาก สำหรับเวลาที่ใช้ในการคำนวณพบว่าประมาณ  $80\%$  นั้นใช้ในการแก้สมการความดันที่อยู่ในรูปของ Poisson equation โดยลักษณะการไหลที่ได้จากการคำนวณนี้พบว่าการไหลของอากาศภายในห้องมีลักษณะเป็นแบบ Wall jet ที่บริเวณใกล้เพดานและที่บริเวณกลางห้องจะเกิดการไหลแบบ Recirculating flow ขนาดใหญ่ รวมทั้งเกิด Secondary recirculating flow ที่บริเวณมุมห้องโดยมีทิศทางตรงข้ามกับ Recirculating flow ที่บริเวณกลางห้อง

Peng et al. (1997) ศึกษาการไหลแบบหมุนวน โดยพัฒนา Low-Reynolds-number k- $\omega$  model (Wilcox, 1994) เพื่อทำนายลักษณะการไหลในบริเวณใกล้ๆ ผนังให้แม่นยำยิ่งขึ้น ด้วยการเพิ่มเทอมของ Turbulent cross diffusion ลงในสมการของ Specific dissipation

rate of turbulent kinetic energy ( $\omega$ ) รวมทั้งปรับปรุง Damping function และค่าคงที่ต่างๆ เมื่อนำโมเดลที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้มาใช้ทำนายการไหลผ่านขั้นบันไดด้านหลัง (Backward facing step, BFS) และการไหลภายในห้องระบายอากาศดังแสดงในรูปที่ 2.3 แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโมเดลอื่นและผลการทดลองของ Restivo (1979) พบว่าโมเดลใหม่นี้สามารถทำนายการไหลได้ใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าโมเดลอื่นโดยเฉพาะในบริเวณใกล้ผนัง ทั้งนี้เป็นเพราะ Turbulent cross diffusion term ที่เพิ่มขึ้นมาทำหน้าที่ลดระดับของ  $\omega$  และเพิ่มระดับของ Turbulent kinetic energy ( $k$ ) จึงทำให้เกิดสมดุลในบริเวณใกล้ผนัง

สำหรับกรณีในห้องมีความยาวมากพอพบว่าการไหลของอากาศภายในห้องจะมีบริเวณที่สำคัญเกิดขึ้น 2 บริเวณ คือ บริเวณการไหลหมุนวน (Recirculating region) และบริเวณของการปรับตัวเข้าสู่สภาวะสมดุล (Relaxation region) โดยมีจุด Reattachment (หรือจุด Impingement) เป็นจุดแบ่งบริเวณทั้งสองนี้ ซึ่งลักษณะการไหลภายในบริเวณเหล่านี้จะขึ้นกับปัจจัยหลายๆอย่าง เช่น ชนิดของการไหล, ลักษณะการไหลของของไหลก่อนเข้าสู่ห้อง หรือความหนาของชั้นขอบเขตของของไหลที่ไหลเข้าสู่ห้อง เป็นต้น ซึ่งบริเวณ Recirculation region และบริเวณ Relaxation region ที่เกิดขึ้นนี้จะมีลักษณะคล้ายกับกรณีที่เกิดบริเวณด้านหลังของ Backward facing step (BFS) ยกเว้นที่บริเวณช่องทางออกของห้องซึ่งการไหลจะได้รับอิทธิพลจากผนังท้ายห้องด้วย สำหรับการไหลผ่าน BFS นี้เป็นการไหลอีกแบบหนึ่งที่ทำให้เกิด Recirculating flow ขึ้นและเป็นตัวอย่างที่ดีในการศึกษาถึงลักษณะของ Recirculating flow ที่เกิดขึ้นภายในห้อง โดยการไหลชนิดนี้ได้มีการศึกษากันมาเป็นเวลานาน ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยของ Bradshaw and Wong (1972), Moss et al. (1979), Gosman et al. (1979), Armaly et al. (1983) และ Otugen (1991) โดยรูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการไหลผ่าน BFS

Bradshaw and Wong (1972) เป็นหนึ่งในนักวิจัยกลุ่มแรกๆที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการไหลผ่าน BFS โดยเน้นการศึกษาบริเวณของการปรับตัวเข้าสู่สภาวะสมดุล ในการศึกษานี้ได้พิจารณาการไหลผ่าน BFS ออกเป็นสองบริเวณหลักๆคือ (ดังแสดงในรูปที่ 2.4)

1. บริเวณของการไหลหมุนวน (Recirculating region) เป็นบริเวณที่อยู่ถัดจากผนังของขั้นบันไดซึ่งของไหลบางส่วนเคลื่อนตัวหมุนวนอยู่กับที่ บริเวณนี้เกิดขึ้นจากการที่ Shear layer เคลื่อนที่หลุดออกจากขอบของขั้นบันไดแล้วตกลงมาชนกับผนังด้านล่าง ทำให้แยกตัวออกเป็นสองส่วนที่จุด Reattachment ซึ่งมวลส่วนหนึ่งของของไหลที่สะท้อนกับผนังแล้วเคลื่อนที่ย้อนกลับไปยังด้านหน้าของจุด Reattachment เป็นตัวทำให้เกิดการไหลหมุนวนขึ้น
2. บริเวณของการปรับตัวเข้าสู่สภาวะสมดุล (Relaxation region) เป็นบริเวณที่อยู่หลังจุด Reattachment โดย Shear layer ที่ชนกับผนังแล้วสะท้อนไปยังด้านหลังของจุด

Reattachment จะค่อยๆปรับตัวเข้าสู่สภาวะสมดุลของ Boundary layer ซึ่งใช้ระยะทางประมาณ 30 เท่าของความสูงชั้นบันได

Armaly et al. (1983) ทำการศึกษาการไหลผ่าน BFS โดยทำการทดลอง และการคำนวณทางทฤษฎี โดย BFS ที่ใช้ในการศึกษานี้มีอัตราส่วนระหว่างความสูงของช่องทางไหลออกต่อความสูงของช่องทางไหลเข้า (Expansion ratio, ER) ประมาณ 1.94 ในการทดลองทำการวัดค่าความเร็วเฉลี่ยด้วย LDA ในช่วงของ Reynolds number ( $Re_h$  โดย  $h$  เป็นความสูงของช่องทางเข้า) ตั้งแต่ 70 ถึง 8,000 ซึ่งครอบคลุมช่วงการไหลตั้งแต่ Laminar, Transitional จนถึง Turbulent flow โดยการไหลที่ทางเข้ามีลักษณะเป็น Fully developed flow ซึ่งจากผลการทดลองดังรูปที่ 2.5 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  $X_r$  จะมีค่าค่อนข้างคงที่คือประมาณ 8 เท่าของความสูงของชั้นบันได ( $X_r/S = 8$ ) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Abbott and Kline (1962) ที่ทำการทดลองในลักษณะเดียวกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับผลของ Brederode and Bradshaw (1972) ซึ่งทำการทดลองที่ Expansion ratio เท่ากับ 1.2 แล้ววัดระยะ  $X_r/S$  ได้ประมาณ 6 และผลของ Moss et al. (1979) ซึ่งทำการทดลองที่ Expansion ratio เท่ากับ 1.1 แล้ววัดระยะ  $X_r/S$  ได้ประมาณ 5.5 ทำให้ได้ข้อสังเกตว่าระยะ  $X_r/S$  นอกจากจะเป็นฟังก์ชันของ  $Re_h$  แล้วยังเป็นฟังก์ชันของ Expansion ratio ด้วย

Otugen (1991) ศึกษาถึงผลของ Expansion ratio (ER, ในการศึกษานี้นิยาม ER เป็นอัตราส่วนของความสูงของชั้นบันไดต่อความสูงของช่องทางไหลเข้า) ที่มีต่อลักษณะของการไหลหมุนวนและระยะ Reattachment ในการไหลผ่าน BFS โดยทดลองเปลี่ยนค่าของ ER ไป 3 ค่าคือ 0.5, 1.0 และ 2.13 ด้วยการเปลี่ยนความสูงของชั้นบันไดแต่คงค่าของพารามิเตอร์ตัวอื่นๆไว้แล้วทำการวัดค่าความเร็วเฉลี่ย และ Turbulence intensity ด้วย LDA ที่ตำแหน่งต่างๆหลังชั้นบันได จากผลจากการทดลองดังรูปที่ 2.6 พบว่าถ้าเพิ่มขนาดของ ER ระดับของ Turbulence intensity ใน Shear layer ที่ขอบของชั้นบันไดจะเพิ่มขึ้น ทำให้ Shear layer โตเร็วขึ้น ดังนั้นระยะ Reattachment จึงหดสั้นลง

จากการศึกษาการไหลภายในห้องและการไหลผ่าน BFS นี้พบว่าจะมีบริเวณการไหลพื้นฐานที่สำคัญบริเวณหนึ่ง คือบริเวณ Shear layer หรือ Mixing layer ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิด



จากการที่ของไหลภายใน 2 บริเวณที่อยู่ติดกันมีความเร็วไม่เท่ากัน ประกอบกับเกิดความไม่เสถียรภาพแบบ Kelvin-Helmholtz จึงทำให้เกิด Spanwise vortex แบบ 2 มิติขึ้นในเวลาต่อมา ส่งผลให้ชั้นของไหลมีการเคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งที่ผ่านมานั้นมีผู้ศึกษาเกี่ยวกับเรื่องนี้เป็นจำนวนมากดังจะเห็นได้จากงานวิจัยของ Brown and Roshko (1974), Bernal and Roshko (1986), Lasheras and Choi (1988) และ David (1997) เป็นต้น

Brown and Roshko (1974) ศึกษาเกี่ยวกับผลของความหนาแน่นของของไหล และ Large scale structure ต่อลักษณะโครงสร้างของ Mixing layer ที่เกิดขึ้น โดยใช้ฮีเลียมและไนโตรเจนเป็นของไหลและทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วของของไหล ( $U_1/U_2$ ) เท่ากับ  $\sqrt{7}$  และ 7 โดยที่แต่ละค่าของ  $U_1/U_2$  นี้ได้ทำการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความหนาแน่น ( $\rho_1/\rho_2$ ) ต่างๆ ซึ่งการทดลองนี้ใช้ Density probe ในการวัดความหนาแน่นและใช้ Pitot-static probe รวมทั้ง Pitot probe ในการวัดค่าความดัน นอกจากนี้ได้ทำ Flow visualization โดยอาศัยเทคนิค Shadowgraph ด้วย จากผลการทดลองที่ได้พบว่าค่าอัตราส่วนความหนาแน่นของของไหลจะมีผลต่อมุมของการกระจายตัวของ Mixing layer น้อย แต่ในทางตรงข้าม Large scale structure จะมีผลต่อลักษณะโครงสร้างของ Mixing layer ที่ทุกๆค่าอัตราส่วนความหนาแน่นของของไหล ซึ่ง Large scale structure นี้จะส่งผลโดยตรงต่อการ Entrainment และการผสมของ Mixing layer กล่าวคือ Large scale structure จะช่วยกวาดเอาอากาศรอบข้างเข้าไปผสมกับอากาศภายใน Mixing layer ได้มากขึ้นทำให้การผสมดีขึ้น

นอกจากนี้สำหรับ Compressible mixing layer ที่การไหลของของไหลชั้นหนึ่งเป็นการไหลที่มีความเร็วแบบเหนือเสียง (Supersonic flow) นั้นพบว่าจะมี Growth rate ที่น้อยกว่า Subsonic mixing layer โดยเดิมทีนั้นสันนิษฐานว่าเกิดจากผลของอัตราส่วนความหนาแน่น แต่จากงานวิจัยของ Brown and Roshko (1974) นี้ซึ่งพบว่า Subsonic mixing layer ที่มีอัตราส่วนความหนาแน่นต่างกันนั้นจะมี Growth rate ที่ไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้ข้อสรุปใหม่ว่าการลดลงของ Growth rate ของ Compressible mixing layer นี้จะไม่ขึ้นกับผลของอัตราส่วนความหนาแน่นของของไหลเลยแต่จะขึ้นกับผลของการอัดตัวได้ (Compressibility effects) ของของไหลแทน

Bernal and Roshko (1986) ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะและการเคลื่อนที่ของ Streamwise streak ที่เกิดขึ้นภายใน Mixing layer รวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่าง Streamwise streak ต่ออัตราการโต (Growth rate) และการผสมภายใน Mixing layer แบบ 3 มิติ ซึ่งทำการทดลองภายในอุโมงค์ลมและอุโมงค์น้ำโดยทำการวัดค่าเฉลี่ยและค่า rms ของการ Fluctuation ของค่าความเข้มข้นโดยการใช้ Concentration probe นอกจากนี้ยังทำ Flow visualization ภายในอุโมงค์ลมโดยอาศัยเทคนิค Shadowgraph และ Schlieren รวมทั้งการใช้เทคนิค Laser induced fluorescence ภายในอุโมงค์น้ำ สำหรับของไหลที่ใช้ได้แก่ อากาศ, น้ำ, ไนโตรเจน

และฮิลเลียม จากผลการทดลองพบว่า Secondary structures (ซึ่งในที่นี้คือ Streamwise vortex) นั้นเกิดจากความไม่มีเสถียรภาพของ Spanwise vortex โดยความไม่มีเสถียรภาพนี้ขึ้นกับค่า Critical Reynolds number และค่าความยาวคลื่นในแนว Spanwise และพบว่าขนาดของ Secondary structures ในแนว Spanwise นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางในแนวการไหล รวมทั้งพบว่า Streamwise counter-rotating vortices นั้นเป็นส่วนหนึ่งของเส้น Vortex line (Streamwise streak) ที่เกิดขึ้นในบริเวณ Braid region ซึ่งอยู่ระหว่าง Spanwise vortex 2 ลูกที่อยู่ติดกัน โดย Vortex line นี้จะเข้าไปถึงบริเวณชั้นของไหลความเร็วสูงซึ่งอยู่ด้านบนของ Spanwise vortex ที่อยู่ด้านหน้าและบริเวณชั้นของไหลความเร็วต่ำซึ่งอยู่ด้านล่างของ Spanwise vortex ที่ตามมา ดังรูปที่ 2.8 นอกจากนี้ยังพบว่า Secondary structures ที่เกิดขึ้นนี้จะช่วยในการดึงเอาของไหลรอบข้างเข้าไปผสมกับของไหลบริเวณใจกลางแกนของ Spanwise vortex ได้มากขึ้นจึงทำให้การผสมดีขึ้น

ต่อมา Lasheras and Choi (1988) ศึกษาเกี่ยวกับ Plane free shear layer แบบ 2 มิติที่โดนรบกวนจากสิ่งรบกวน (Perturbation) ที่มีลักษณะเป็นคลื่นตลอดความกว้างของปากทางออก Nozzle โดยวิเคราะห์จากลักษณะ Vorticity field และความไม่มีเสถียรภาพแบบ 3 มิติที่นำไปสู่การเกิด Streamwise vortex ขึ้นใน Shear layer โดยใช้ข้อมูลน้ำในการทำการทดลองและใช้แผ่น Splitter plate แบบต่างๆทั้งหมด 5 แบบในการทำให้เกิดการไหลแยกออกเป็น 2 ชั้นที่มีการไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar) ที่มีความเร็วแตกต่างกันคือ 3.4 และ 1.5 เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่ง Reynolds number มีค่าเท่ากับ 45 โดย Reynolds number นี้คิดจากค่าแตกต่างความเร็วของการไหลทั้ง 2 ชั้นและค่าความหนาโมเมนตัม (Momentum thickness) ที่บริเวณปลาย Splitter plate นอกจากนี้ได้ทำ Flow visualization โดยการใช้เทคนิคต่างๆ 3 เทคนิคได้แก่ Laser induced fluorescence (LIF), Direct interface visualization (DIV) และ Spotlight induced fluorescence สำหรับรายละเอียดของเทคนิค DIV นั้นสามารถดูได้จากงานของ Lasheras et al. (1986) จากผลการทดลองที่ได้พบว่าสำหรับการไหลแบบ Shear layer ปกตินั้นในตอนต้นจะเกิดความไม่มีเสถียรภาพแบบ Kelvin-Helmholtz ขึ้นซึ่งทำให้เกิด Spanwise vortex แบบ 2 มิติขึ้น หลังจากนั้นที่บริเวณ Braid region ซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่ระหว่าง Spanwise vortex 2 ลูกที่อยู่ติดกันนั้นจะมี Positive strain เกิดขึ้นอันเนื่องมาจาก Spanwise vortex คู่ดังกล่าวจึงทำให้เกิด Vortex tubes ขึ้นโดยที่แกนของ Vortex tubes เหล่านี้จะมีทิศทางเดียวกับทิศทางของ Positive strain ที่มีค่าสูงสุด ซึ่งในการทดลองนี้ทิศทางของ Positive strain ที่มีค่าสูงสุดนั้นมีทิศทางเดียวกับการไหลจึงเรียก Vortex tubes เหล่านี้ว่า Streamwise vortex แต่อย่างไรก็ตาม Spanwise vortex ก็ยังคงมีลักษณะเป็นแบบ 2 มิติอยู่

สำหรับผลของการใช้สิ่งรบกวนที่มีรูปร่างเป็นรูปคลื่นจะทำให้ Spanwise vortex ที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะเป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นเท่ากับความยาวคลื่นของสิ่งรบกวนนั้นแต่จะมีเฟสต่างกันอยู่  $180^\circ$  ยกเว้นกรณีที่ใช้สิ่งรบกวนแบบ Corrugated indented splitter plate ชนิด



"180° Out-of-phase" ที่มีขนาดแอมพลิจูดมากพอ (ในที่นี้คือมากกว่าหรือเท่ากับ 3 มิลลิเมตร) ซึ่งจะทำให้ได้เฟสตรงกัน และผลของ Interaction ระหว่าง Spanwise และ Streamwise vortex ที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้เกิดบริเวณที่มี Vorticity field อันซับซ้อนซึ่งนำไปสู่การเกิดปรากฏการณ์ต่างๆที่บริเวณระหว่าง Spanwise vortex ได้ เช่นปรากฏการณ์ Pairing, Tearing และ Amalgamation นอกจากนี้จะพบว่าทิศทางของสิ่งรบกวนรูปคลื่นนี้จะมีผลต่อลักษณะของ Mixing layer มากกว่าผลจากความยาวคลื่น

David (1997) ทำการศึกษาเชิงตัวเลขโดยอาศัยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองการไหลของ Mixing layer แบบ 2 มิติที่อัดตัวไม่ได้ ซึ่งมีสมมติฐานว่าของไหลบริเวณรอบข้างที่ถือว่าเป็นบริเวณ Irrotational region นั้นจะถ่ายเทเข้ามาสู่บริเวณ Large scale structure โดยจะเริ่มจากจุด Stagnation point และถ่ายเทผ่านทางพื้นผิวหน้าสัมผัส (Contact surface) ระหว่างของไหลทั้ง 2 ชั้นที่อยู่ในบริเวณ Braid region ซึ่งจะพบว่าลักษณะของ Mixing layer ที่ได้จากแบบจำลองนี้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองของ Jimenez (1980) และผลที่ได้จากการคำนวณของ Chorin (1973) ที่ใช้หลักของ "Array of point vortices" โดยแบบจำลองนี้สามารถใช้ประมาณตำแหน่งและอัตราการถ่ายเทมวลของของไหลที่ไหลเข้าสู่ Large scale structure ใน Mixing layer แบบ 2 มิติได้เป็นอย่างดีและยังสามารถใช้ในการประมาณ Growth rate ของ Large scale structure ได้เป็นอย่างดีด้วยและจากผลการคำนวณพบว่า Mixing layer จะคงตัว (Saturated) เมื่อ Vortex เคลื่อนเข้ามาอยู่ชิดกัน ซึ่งก็คือการเกิด Interaction ระหว่าง Vortex ขึ้นนั่นเอง เช่นการเกิด Vortex pairing เป็นต้น

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า Streamwise vortex ที่เกิดขึ้นนี้สามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของ Mixing layer ได้เป็นอย่างดีซึ่งจะช่วยทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างของไหลทั้ง 2 ชั้นเพิ่มมากขึ้น และนำไปสู่การผสมผสานที่ดีระหว่างของไหลทั้ง 2 ชั้น

สำหรับวิธีที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมผสานระหว่างเจ็ทอากาศที่พุ่งออกมา กับอากาศบริเวณรอบข้างนั้นก็มิตัวกันหลายวิธีซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่

### 1. แบบ Passive control

เป็นวิธีในการควบคุมการไหลของของไหลโดยไม่อาศัยพลังงานจากภายนอก แต่จะใช้การเปลี่ยนแปลงลักษณะการไหลของของไหลเพื่อควบคุมการไหลของของไหลเอง เช่น การเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่บริเวณทางออกของช่องปล่อยอากาศ (ซึ่งจะเห็นได้จากงานวิจัยของ Sfeir (1976), Sforza and Stasi (1977), McGuirk and Rodi (1977), Bobba and Ghia (1979), Krothapalli et al. (1981), Han and Taghavi (1998) และ Gutmark and Grinstein (1999)) หรือการใช้อุปกรณ์บางอย่างติดอยู่ที่บริเวณปากทางออกของช่องปล่อยอากาศเพื่อช่วยในการ

เพิ่มการหมุนวนตามแนวการไหล (Streamwise vorticity) และเพิ่มพื้นที่หน้าตัดในการแลกเปลี่ยนของไหล เช่น การใช้ Tab, การใช้ Vane หรือการใช้ Lobed mixer-nozzle เป็นต้น ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยของ Bradbury and Khadem (1975), Zaman (1994), Reeder and Samimy (1996), Smith et al. (1997), Han and Taghavi (1998), Strickland et al. (1998) และ Bohl and Foss (1999)

## 2. แบบ Active control

วิธีนี้เป็นวิธีที่อาศัยพลังงานจากภายนอกในการควบคุมการไหลของของไหล เช่น การใช้ Actuator แบบต่างๆในการกระตุ้นเจ็ทที่ปล่อยออกมาดังจะเห็นได้จากงานวิจัยของ Ritchie and Seitzman (1998) หรือการใช้พลังงานเสียงในการกระตุ้นซึ่งจะดูได้จากงานวิจัยของ Becker and Massaro (1968), Zaman and Hussain (1980) และ Suwapaet et al. (1999)

ซึ่งรายละเอียดของงานวิจัยดังกล่าวที่สำคัญมีดังนี้

Krothapalli et al. (1981) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการไหลของอากาศแบบ Free jet ชนิดอัดตัวไม่ได้ที่มีหน้าตัดทางออก Nozzle เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $50 \times 3$  มิลลิเมตร<sup>2</sup> และความเร็วเฉลี่ยที่ตำแหน่งทางออก Nozzle เท่ากับ 60 เมตรต่อวินาที ซึ่งคิดเป็น Reynolds number ที่ขึ้นกับความกว้างของปากทางออก Nozzle ได้เท่ากับ 12,000 นอกจากนี้ที่ตำแหน่งทางออกของ Nozzle มีชั้นขอบเขตเป็นแบบ Laminar และมีระดับความปั่นป่วนต่ำ ในการศึกษาทำการวัดค่าความเร็วเฉลี่ยและค่า Turbulence shear stress โดยใช้ Hot-wire anemometer จากผลการทดลองพบว่าการไหลของ Free Jet ชนิดนี้นั้นสามารถแบ่งโดยดูจากการลดลงของค่ากำลังสองของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกนออกได้เป็น 3 บริเวณอันได้แก่ Potential core region, Two-dimensional-type region และ Axisymmetric-type region ดังรูปที่ 2.9 โดยบริเวณ Two-dimensional-type region จะเริ่มเกิดตั้งแต่ตำแหน่งที่ Shear layer ซึ่งแยกตัวออกจากขอบด้านยาวของ Nozzle ทั้ง 2 ด้านมาบรรจบกัน สำหรับการไหลภายในบริเวณนี้นั้นเป็นแบบ 2 มิติและความเร็วจะลดลงในอัตราที่คล้ายกับ Planar Jet และสำหรับบริเวณ Axisymmetric-type region จะเป็นบริเวณที่อยู่ต่อจากบริเวณ Two-dimensional-type region โดยเริ่มเกิดตั้งแต่ตำแหน่งที่ Shear layer ซึ่งแยกตัวออกจากขอบด้านสั้นของ Nozzle ทั้ง 2 ด้านมาบรรจบกัน สำหรับความเร็วของการไหลภายในบริเวณนี้นั้นจะลดลงในอัตราที่คล้ายกับ Axisymmetric Jet

นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะการไหลของ Free Jet ที่มีหน้าตัดทางออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้านี้นั้นจะขึ้นกับ Aspect Ratio, ลักษณะของรูปร่างความเร็ว, ระดับ Turbulence intensity และ Reynolds number ที่บริเวณทางออก Nozzle รวมทั้งรูปร่างที่บริเวณทางเข้าของ Nozzle และสภาวะของของไหลบริเวณรอบข้างของเจ็ทที่พุ่งออกมา ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ

Sfeir (1976) และ Sforza and Stasi (1977) รวมทั้งผลการคำนวณของ McGuirk and Rodi (1977) และ Bobba and Ghia (1979)

Han and Taghavi (1998) ทำการศึกษาเชิงตัวเลขเกี่ยวกับผลของรูปร่างที่บริเวณทางออกของ Nozzle และผลของชั้นขอบเขตแบบหมุนควง (Boundary layer swirl) ต่อลักษณะของ Subsonic jet ที่เกิดขึ้นพร้อมทั้งเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยในการศึกษานี้ นั้นใช้ "PROTEUS" Computer code และใช้หน้าตัดทางออกของเจ็ททั้งหมด 2 แบบ คือ แบบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มี Aspect ratio เท่ากับ 2.8 และแบบรูปรอยบาก (Notched nozzle) โดยทั้ง 2 แบบนี้จะทำการติด Vane ที่บริเวณปากทางออกของ Nozzle ด้วยเพื่อวัดผลของชั้นขอบเขตแบบหมุนควง ซึ่งจากผลการคำนวณพบว่าชั้นขอบเขตแบบหมุนควงที่บริเวณปากทางออกของ Nozzle นี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผสมที่บริเวณ Near field ได้ โดยที่หน้าตัดทางออก Nozzle รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีชั้นขอบเขตแบบหมุนควงนั้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผสมได้มากที่สุด และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองของงานวิจัยอื่นพบว่ามี ความสอดคล้องกัน

Bradbury and Khadem (1975) ศึกษาลักษณะการเติบโตของเจ็ท (Jet Development) เปรียบเทียบกันระหว่าง Free Jet กับเจ็ทที่มีการติดตั้ง Tab ที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $1/16$  เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Nozzle จำนวนต่างๆกันที่บริเวณขอบของ Nozzle โดยหน้าตัดทางออกของ Nozzle เป็นรูปวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 8 นิ้ว สำหรับของไหลที่ใช้คืออากาศ และทำการทดลองที่ Reynolds number เท่ากับ  $6 \times 10^5$  ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ Pitot-static probe ในการวัดความเร็วเฉลี่ยภายในบริเวณเจ็ท และใช้ Pitch-and-yaw probe แบบ 5 รูในการหาทิศทางของการไหล สำหรับความเร็วรอบบริเวณเจ็ทซึ่งใช้ในการหา Entrainment rate ของเจ็ทนั้นวัดโดยใช้ Pulsed-wire anemometer จากผลการทดลองพบว่า ความหนาของชั้นขอบเขตและระดับความเป็นเทอร์บูเรนต์ของเจ็ทที่บริเวณทางออกของ Nozzle รวมทั้ง Nozzle convergence นั้นจะส่งผลต่อการเติบโตของเจ็ทน้อยมากเมื่อเทียบกับผลของการใช้ Tab รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยเฉพาะการใช้ Tab จำนวน 2 Tab ติดตั้งที่บริเวณทางออกของ Nozzle ในลักษณะที่อยู่ตรงข้ามกันนั้นจะส่งผลต่อการเติบโตของเจ็ทมากที่สุด กล่าวคือ ทำให้ความยาว Potential core ของเจ็ทสั้นลง, ค่า Centerline turbulent intensity ของเจ็ทเพิ่มขึ้นและช่วยเพิ่ม Entrainment rate ของเจ็ทได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ Tab จำนวน 2 Tab นี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผสมได้ดีที่สุด อีกทั้งยังช่วยลด Jet noise ได้ ทั้งนี้เนื่องจากการติดตั้ง Tab นั้นจะช่วยป้องกันการเกิดโครงสร้างที่เรียกว่า "Vortex Rings" หรือ "Puff" ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด Jet noise

สำหรับสาเหตุที่ทำให้การติด Tab ช่วยเพิ่มการผสมได้นั้นเนื่องจากการติด Tab จะทำให้มุมการไหลของเจ็ทเปลี่ยนไปจึงส่งผลให้หน้าตัดของเจ็ทเปลี่ยนรูปไป ซึ่งการเปลี่ยนรูปไป

ของหน้าตัดเจ็ทนี้จะช่วยเพิ่มการดึงอากาศจากภายนอกให้เข้าไปผสมกับอากาศภายในเจ็ทได้มากยิ่งขึ้น และจากการศึกษาในเวลาต่อมาพบว่า Tab แต่ละอันจะทำให้เกิด Streamwise Vortices คู่หนึ่งที่มีทิศทางการหมุนสวนทางกัน (Counter-rotating streamwise vortices) ซึ่งเป็นสาเหตุในการทำให้หน้าตัดของเจ็ทเปลี่ยนรูปไปและช่วยเพิ่มการผสมของเจ็ทได้

ต่อมา Reeder and Samimy (1996) ได้ทำการศึกษาเจ็ทน้ำความเร็วต่ำที่มีการติดตั้ง Tab รูปสามเหลี่ยมบริเวณปากทางออกของ Nozzle โดยทำการทดลองในอุโมงค์น้ำที่มี Contraction ratio เท่ากับ 3:1 และหน้าตัดทางออกของ Contraction เป็นรูปวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ยาว 1.5 เซนติเมตร โดยความเร็วที่ตำแหน่งกลางเจ็ท (Jet core velocity) มีค่าเท่ากับ 0.16 เมตรต่อวินาที และ Tab สามเหลี่ยมที่ใช้มีฐานยาว 0.28D ปลาย Tab อยู่ห่างจากผนัง Contraction เท่ากับ 0.1D โดยการติดตั้ง Tab นี้มีทั้งหมด 2 แบบ คือ แบบ Delta tabs (Pitch angle =  $135^\circ$ ) และแบบ Inverted delta tabs (Pitch angle =  $45^\circ$ ) ดังรูปที่ 2.10

ในการทดลองนี้นั้นทำการวัดความเร็วด้วย LDV และทำ Flow visualization โดยใช้เทคนิค Laser-induced fluorescence ของ Fluorescein dye และ PLIF ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้พบว่าการใช้ Tab รูปสามเหลี่ยมกับเจ็ทน้ำที่มีความเร็วต่ำนี้จะทำให้รูปร่างของเจ็ทเปลี่ยนแปลงไปเป็นอย่างมาก โดย Tab สามเหลี่ยมแต่ละอันจะทำให้เกิด Counter-rotating streamwise vortices ที่มีกำลังสูง รวมทั้งทำให้ Reynold stress มีค่าเพิ่มขึ้นจึงทำให้สามารถดึงเอาของไหลจากภายนอกมาผสมกับของไหลภายในเจ็ทได้มากขึ้นและยังพบว่ามี Streamwise vortices ชุดที่ 2 ที่มีกำลังต่ำกว่าและมีลักษณะคล้าย Horseshoe vortex เกิดขึ้นที่บริเวณใกล้ๆ Tab ซึ่งช่วยทำให้ Mixing layer มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ Tab นอกจากนี้สำหรับ Inverted delta tabs นั้นพบว่าจะทำให้เกิด Streamwise vortices ชุดที่ 3 ขึ้นที่บริเวณปลายยอดของ Tab ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Zaman et al. (1994) ที่ใช้การทำ Flow visualization แล้วพบว่า Inverted delta tabs นี้จะทำให้เกิด Streamwise vortices อีกคู่หนึ่งที่มีทิศทางการหมุนตรงข้ามกับ Streamwise vortices ที่เกิดจาก Tab รูปสามเหลี่ยมชนิด Delta tabs ซึ่งจะช่วยในการดึงเอาของไหลจากบริเวณกึ่งกลางเจ็ทไปผสมกับของไหลรอบข้างได้มากขึ้น

Belovich and Samimy (1996) ศึกษาการผสมผสานของเจ็ทอากาศที่ไหลผ่าน Lobed mixer-nozzle ที่มีลักษณะการไหลเป็นแบบ Coaxial jet โดยมีหน้าตัดเจ็ทด้านในเป็นแบบลูกคลื่น (Lobe) ชนิดต่างๆ (ดังรูปที่ 2.12) และทำการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความเร็วภายในต่อภายนอกทั้งหมด 3 ค่า คือ 3:1, 1:1 และ 1:3 ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ LDV ในการวัดความเร็วทั้ง 3 ทิศทาง และใช้ Tobacco smoke ในการทำ Flow visualization จากผลการทดลองโดยรวมพบว่า Lobed mixer-nozzle จะทำให้เกิด Streamwise vorticity ที่มีกำลังสูง ประกอบกับการที่ Streamwise vorticity เหล่านี้มี Interaction กับ Large-scale structure ที่เกิดขึ้นอันเนื่อง



มาจากความไม่มีเสถียรภาพแบบ Kelvin – Helmholtz จึงทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผสมผสานของเจ็ทได้เป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมผสานของ Lobed mixer-nozzle นั้นขึ้นกับค่าอัตราส่วนความเร็วภายในต่อภายนอกด้วย โดยกรณีที่ความเร็วภายในมากกว่าความเร็วภายนอก (3:1) นั้นพบว่าลักษณะการไหลจะคล้ายกับ Single jet ซึ่งการผสมผสานจะเกิดจากอิทธิพลของ Interaction ระหว่าง Streamwise vorticity และความไม่มีเสถียรภาพแบบ Kelvin-Helmholtz สำหรับกรณีที่ความเร็วภายในเท่ากับความเร็วภายนอก (1:1) นั้นพบว่าการผสมผสานจะเกิดจากอิทธิพลของ Streamwise vorticity เพียงอย่างเดียว และสำหรับกรณีที่ความเร็วภายในน้อยกว่าความเร็วภายนอก (1:3) พบว่าลักษณะการไหลจะคล้ายกับ Wake โดย Streamwise vorticity ที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กและสลายตัวไปอย่างรวดเร็ว และในกรณีนี้การไหลของเจ็ทด้านนอกรวมทั้ง Interaction ระหว่างเจ็ทด้านนอกกับ Ambient air จะมีอิทธิพลต่อการไหลของเจ็ทด้านในด้วย

Smith et al. (1997) ศึกษาการผสมที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) กับอากาศโดยเปรียบเทียบการใช้ Injector ที่สร้างจากอลูมิเนียมทั้งหมด 3 แบบ ซึ่งเป็นแบบ Straight slot injector 1 อันและเป็นแบบ Lobed fuel injector 2 อัน ดังรูปที่ 2.13 โดยลักษณะการไหลผ่าน Injector เหล่านี้เป็นแบบ Coaxial jet ที่มี  $\text{CO}_2$  และอากาศเป็นของไหล ในการทดลองนี้นั้นทำการแปรเปลี่ยนค่าความเร็วของ  $\text{CO}_2$  และอากาศต่าง ๆ กัน ซึ่งทำการวัดความเร็วโดยใช้ Hot-wire anemometer และวัดความหนาโมเมนตัม (Momentum thickness) โดยใช้ Pitot probe รวมทั้งทำ Flow visualization โดยใช้เทคนิค PLIF จากผลการทดลองพบว่า Lobed fuel injector จะทำให้เกิด Streamwise vortices ขึ้นซึ่งช่วยเพิ่มการผสมผสานในระดับโมเลกุลระหว่างเชื้อเพลิง (ในที่นี้คือ  $\text{CO}_2$ ) กับอากาศได้เป็นอย่างดี รวมทั้งทำให้ที่บริเวณใกล้ๆ Lobed fuel injector นั้น (บริเวณ Near field) มีค่า Strain rate ( $D_{ij}$ ) ที่สูงขึ้นซึ่งช่วยชะลอการจุดระเบิดที่บริเวณดังกล่าวได้

Strickland et al. (1998) ได้ทำการจำลองการไหลผ่าน Lobed fuel injector ที่มีลักษณะเหมือนกับงานวิจัยของ Smith et al. (1997) เพื่อศึกษาการไหลและลักษณะของการผสมที่เกิดขึ้นโดยเป็นการศึกษาเชิงตัวเลขที่ใช้ระเบียบวิธี Vortex element modeling และทำการคำนวณที่  $Re_\lambda$  เท่ากับ 5,842 โดยที่  $\lambda$  คือความยาวคาบของ Lobed fuel injector ซึ่งจากผลการคำนวณที่ได้พบว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการผสมผสานระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่าง Amplitude ต่อความยาวคาบ, มุมบาน ( $\alpha$ ) และรูปร่างของ Lobed fuel injector โดยการลดลงของอัตราส่วนระหว่าง Amplitude ต่อความยาวคาบหรือการเพิ่มมุมบานของ Lobed fuel injector จะมีผลทำให้ Streamwise vortices มีความรุนแรงมากขึ้นซึ่งจะส่งผลให้การผสมผสานดีขึ้น และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Smith et al. (1997) พบว่าผลที่ได้จากการคำนวณค่อนข้างสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง

Ritchie and Seitzman (1998) ทำการศึกษาในเชิง Active control เกี่ยวกับการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ โดยใช้ตัวกระตุ้น (Actuator) แบบ Zero net-mass-flux jet ทั้งหมด 9 ชุดที่ติดตั้งอยู่โดยรอบชุด Concentric jet ที่มี Inner jet เป็นเจ็ทของอากาศบริสุทธิ์ที่มีความเร็ว 10 เมตรต่อวินาทีและมี Outer jet เป็นเจ็ทของอากาศผสมกับ Acetone ที่มีความเร็ว 2.5 เมตรต่อวินาที สำหรับ Actuator jet มีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 8 เมตรต่อวินาที ซึ่งในการทดลองนี้ทำการทดลองทั้งหมด 5 กรณีเพื่อเปรียบเทียบผลของการใช้การกระตุ้นแบบต่างๆโดยใช้ Hot-film anemometer และ Hot-wire anemometer ในการวัดความเร็วและ Power spectra ตามลำดับพร้อมทั้งทำ Flow visualization โดยอาศัยเทคนิค PLIF ที่ทำการใส่ Acetone ที่บริเวณ Outer jet (Acetone PLIF) จากผลการทดลองที่ได้พบว่าการกระตุ้นทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองนี้จะช่วยเพิ่มการผสมระหว่างเชื้อเพลิง (ในที่นี้คือ Acetone) กับอากาศได้แต่ก็จะแตกต่างกันออกไปตามชนิดของการกระตุ้น ซึ่งการกระตุ้นแบบสมมาตรแต่ไม่ต่อเนื่อง (Symmetric and pulsing) จะช่วยในการสร้าง Large scale structure เป็นอย่างมากจึงทำให้ประสิทธิภาพการผสมดีที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าการกระตุ้นแบบไม่สมมาตรสามารถใช้ควบคุมการกระจายตัวตามแนวเส้นรอบวงของเชื้อเพลิงทั้งในระยะใกล้และไกลออกไปจากปากทางออกของเจ็ทได้ด้วย

Bohl and Foss (1999) ทำการศึกษาผลของการใช้ Tab รูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่ติดตั้งบริเวณขอบด้านบนของหน้าตัดทางออกของเจ็ททั้งในกรณีที่ใช้เพียง Primary tab และกรณีที่ใช้ Primary และ Secondary tabs รวมกัน โดย Primary และ Secondary Tabs มีความยาวด้าน (b) ด้านละ 200 และ 100 มิลลิเมตรตามลำดับ สำหรับ Primary tab นั้นจะติดตั้งที่บริเวณตรงกลางด้านบนของหน้าตัดทางออกของเจ็ทโดยให้ปลาย Tab พุ่งเข้าไปภายในเจ็ทซึ่งทำมุม  $45^\circ$  กับแนวการไหล ( $\theta_p = 45^\circ$ ) ในขณะที่ Secondary tabs ซึ่งมีทั้งหมด 2 Tabs นั้นจะติดตั้งอยู่ข้างๆ Primary tab ข้างละ 1 Tab โดยมุมที่ติดตั้ง ( $\theta_s$ ) นั้นจะแปรเปลี่ยนไปตามการทดลอง ดังรูปที่ 2.14 ในการทดลองนี้กำหนดให้ความเร็วเฉลี่ยของ Free jet ที่ปากทางออกนั้นเท่ากับ 10.5 เมตรต่อวินาที ( $Re_b = 1.4 \times 10^5$ ) โดยมีความหนาของชั้นขอบเขต ( $\delta$ ), Displacement thickness ( $\delta_d$ ) และความหนาโมเมนตัม ( $\theta$ ) มีค่าเท่ากับ 3, 1.27 และ 0.52 มิลลิเมตรตามลำดับ และทำการวัดความดันและความเร็วโดยใช้ Pressure transducer และ Hot-wire anemometer ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าการติด Tab รูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่บริเวณทางออกของเจ็ทจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผสม (Convective transport-mixing) ของเจ็ทที่บริเวณ Near field เป็นอย่างมาก โดยเฉพาะกรณีที่ใช้ Primary และ Secondary Tabs ที่ติดตั้งโดยให้ปลายของ Primary tab ยื่นเข้าไปภายในเจ็ทและทำมุม  $45^\circ$  กับแนวการไหลในขณะที่ปลายของ Secondary tabs นั้นยื่นออกไปที่บริเวณอากาศรอบข้างโดยทำมุม  $-40^\circ$  กับแนวการไหลนั้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของเจ็ทที่บริเวณ Near field ได้มากที่สุด ทั้งนี้เพราะ



Secondary tabs จะทำให้รูปร่างของ Mixing layer ต่างไปจากกรณีที่ใช้ Primary tab เพียงอย่างเดียวจึงทำให้สามารถดึงเอาอากาศรอบข้างเข้ามาผสมได้มากยิ่งขึ้น

สำหรับรายละเอียดของงานวิจัยต่างๆที่ผ่านมานี้ได้สรุปและแสดงไว้ในตารางที่ 2.1-2.4 ตามลำดับ

## 2.2 ความเป็นมาของวิทยานิพนธ์

จากการศึกษางานวิจัยต่างๆที่ผ่านมา จะพบว่าการไหลของอากาศภายในห้องที่มีการระบายอากาศ ซึ่งมีช่องปล่อยอากาศเข้าอยู่สูงติดเพดานด้านหนึ่งและมีช่องระบายอากาศออกอยู่ด้านล่างของผนังฝั่งตรงข้ามนั้น จะประกอบด้วยบริเวณที่สำคัญ 3 บริเวณ ได้แก่

1. บริเวณที่มีการไหลแบบ Wall jet
2. บริเวณ Mixing layer (หรือ Shear layer)
3. บริเวณการไหลหมุนวน (Recirculating region)

ซึ่งในงานประยุกต์โดยทั่วไป จะพบว่า ลักษณะการกระจายตัวของอากาศภายในห้องนั้นไม่ค่อยสม่ำเสมอเท่าที่ควร ประกอบกับพบว่า ภายในห้องปรับอากาศทั่วไปนั้นจะมีบางบริเวณที่มีอุณหภูมิแตกต่างไปจากบริเวณส่วนใหญ่ภายในห้อง กล่าวคือ มีบางบริเวณภายในห้องที่ร้อนและเย็นกว่าปกติ ซึ่งสาเหตุมาจากการที่การกระจายตัวและการผสมของเจ็ทที่พ่นเข้าไปภายในห้องไม่ทั่วถึงและดีพอ ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของเจ็ทอากาศที่พ่นเข้าไปนี้ จะช่วยให้การกระจายตัวของอากาศภายในห้องนั้นสม่ำเสมอขึ้น ซึ่งจะทำให้คนภายในห้องรู้สึกสบายขึ้นได้

ในแง่นี้ได้มีผู้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของ Free jet พบว่า การเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของ Free jet นี้มีหลายวิธีการ อันได้แก่ การปรับเปลี่ยนรูปร่างทางออกของเจ็ท หรือการใช้พลังงานจากภายนอกเข้ามาช่วยเพิ่มการผสมของเจ็ท เป็นต้น แต่วิธีการที่น่าจะเหมาะสมสำหรับการเพิ่มการผสมของเจ็ทอากาศภายในห้องนั้น คือ การปรับเปลี่ยนรูปร่างทางออกของช่องปล่อยอากาศเข้า โดยการใช้ Lobe ติดตั้งที่บริเวณปากทางออกของเจ็ท ทั้งนี้เพราะเสียค่าใช้จ่ายน้อยและติดตั้งสะดวก รวมทั้งไม่ต้องมีอุปกรณ์ในการควบคุม ในแง่นี้จากผลการศึกษา Free jet ของ Smith et al. (1997) และ Strickland et al. (1998) ซึ่งศึกษาการไหลแบบ Coaxial jet ผ่าน Lobe พบว่าพารามิเตอร์หลัก 3 ตัวที่จะมีผลต่อความสามารถของ Lobe ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของเจ็ท คือ อัตราส่วนระหว่าง Amplitude ต่อความยาวคาบ, มุมบาน( $\alpha$ ) และรูปร่างของ Lobed nozzle

อย่างไรก็ตามจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ถึงแม้จะมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของ Free jet โดยใช้การปรับเปลี่ยนรูปร่างทางออกของปากเจ็ทดังกล่าวข้างต้น แต่เท่าที่ผู้วิจัยศึกษามาพบว่า ยังไม่มีการศึกษาวิจัยถึงผลของการปรับเปลี่ยนรูปร่างทางออกของช่องปล่อยอากาศเข้าต่อประสิทธิภาพการผสมที่เกิดขึ้นภายในห้องที่มีการระบายอากาศ ซึ่งเจ็ทอากาศที่ออกมาจากช่องปล่อยอากาศเข้าภายในห้องที่มีการระบายอากาศนี้ จะมีลักษณะหนึ่งที่คล้ายคลึงกับ Free jet กล่าวคือ เป็นต้นกำเนิดของบริเวณการไหลที่มีโมเมนตัมสูงกว่าบริเวณรอบข้าง อย่างไรก็ตาม ก็จะมีข้อแตกต่างจาก Free jet ที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการที่หนึ่ง เจ็ทที่ออกมาจากช่องปล่อยอากาศเข้านี้ จะมีผลของเพดานห้องเข้ามาเกี่ยวข้อง หรืออีกนัยหนึ่ง มีลักษณะเป็น Wall jet ไม่ใช่ Free jet นั้นเอง และที่สำคัญในประการที่สอง ก็คือ เจ็ทที่ออกมาจากช่องปล่อยอากาศเข้าในห้องที่มีการระบายอากาศนี้ จะมีผลของผนังด้านท้ายมาขวางการไหลของเจ็ท ในอีกแง่มุมหนึ่ง เท่าที่ผู้วิจัยศึกษามาพบว่า ยังมีการศึกษาถึงผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่อลักษณะการไหลภายในห้องที่มีการระบายอากาศน้อย ดังนั้นการศึกษาถึงผลของการปรับเปลี่ยนรูปร่างทางออกของช่องปล่อยอากาศเข้า โดยการใช้ Lobed nozzle รูปทรงปิรามิดที่มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ กันนี้ (ซึ่งในที่นี้ได้แก่ ความยาวคาบ และระยะห่างระหว่าง Lobe โดยที่คงค่าความลึกและแอมพลิจูดไว้) ต่อลักษณะการผสมและการกระจายตัวของอากาศภายในห้องที่มีการระบายอากาศ รวมทั้งผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่อลักษณะการไหลภายในห้องที่เกิดขึ้นนั้น จึงมีความน่าสนใจในเชิงวิชาการ และมีความสำคัญรวมทั้งศักยภาพในเชิงประยุกต์เป็นอย่างยิ่ง จึงเป็นที่มาของงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3 ความรู้พื้นฐาน

#### 3.1 การไหลผ่าน Lobed nozzle (รูปทรงปิรามิด)

การไหลของของไหลผ่าน Lobed nozzle รูปทรงปิรามิดนี้จะทำให้เกิด Streamwise vortices ( $\omega_x$ ) ขึ้นที่บริเวณด้านข้างของ Lobed nozzle ทั้ง 2 ด้านดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 โดย Streamwise vortices ทั้ง 2 นี้จะมีทิศทางการหมุนตรงข้ามกัน ดังนั้นจึงเรียกว่า Counter-rotating streamwise vortices ซึ่งสามารถอธิบายกระบวนการเกิด Streamwise vortices เหล่านี้ได้ดังนี้

เมื่อพิจารณาการไหลแบบ 2 มิติที่บริเวณใกล้ปากทางออกของ Contraction ทางด้าน Upstream จะพบว่ามีความแตกต่าง (Gradient) ของความเร็ว Streamwise ในแนว Traverse ( $\partial u/\partial y$ ) เกิดขึ้นเท่านั้นเนื่องจากการที่ได้รับอิทธิพลจากชั้นขอบเขตที่เกิดขึ้นบริเวณผนังด้านบนและด้านล่างของ Contraction ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด Spanwise vortices ขึ้น ต่อมาเมื่อการไหลไหลมาชน Lobed nozzle ที่บริเวณปากทางออกของ Contraction ก็จะทำให้เกิดความแตกต่างของความเร็ว Streamwise ในแนว Spanwise ( $\partial u/\partial z$ ) ขึ้น (ดังรูปที่ 3.3) จึงทำให้การไหลที่ไหลผ่าน Lobed nozzle นี้มี Streamwise vortices เกิดขึ้นได้ ซึ่งจะเกิดขึ้นทั้ง 2 ด้านของ Lobed nozzle และ Streamwise vortices ทั้ง 2 นี้จะมีทิศทางการหมุนที่ตรงข้ามกัน ซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้จาก "Vorticity equation"

#### 3.2 สมการ Vorticity

สมการ Vorticity สามารถเขียนได้เป็น

$$\underbrace{\frac{D\bar{\omega}}{Dt}} = \underbrace{\bar{\omega} \cdot \bar{\nabla} \bar{u}} + \underbrace{\nu \bar{\nabla}^2 \bar{\omega}} \quad (3.1)$$

"Rate of change of particle vorticity"

"Rate of deformation of vortex lines (Vortex Turning / Stretching)"

"Net rate of viscous diffusion of  $\bar{\omega}$ "

- $\frac{D\bar{\omega}}{Dt}$  แสดงถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงของ Vorticity ทั้งหมดของอนุภาคของของไหล

- $\bar{\omega} \cdot \nabla \bar{u}$  แสดงถึง อัตราการเปลี่ยนแปลง Vorticity เนื่องจากการเกิด Deformation ของ Vortex tube อันเป็นผลมาจากการเกิด Deformation ของ Velocity field ซึ่งเทอมนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ 1) Vortex stretching และ 2) Vortex turning ปรากฏการณ์การเกิดการเปลี่ยนแปลง  $\bar{\omega}$  เนื่องจากเทอมนี้มีลักษณะเป็นปรากฏการณ์ทาง Inviscid และเป็นแบบ 3 มิติ กล่าวคือ ไม่ต้องอาศัย Viscosity และเกิดขึ้นในการไหลแบบ 3 มิติเท่านั้น

- $\nu \nabla^2 \bar{\omega}$  แสดงถึง อัตราการเปลี่ยนแปลง Vorticity เนื่องจากการเกิด Diffusion ซึ่งเทอมนี้เป็นเทอม Viscous ที่จะพบเฉพาะในการไหลที่มีแรงเสียดทานเท่านั้น โดยจะอาศัยกระบวนการ Diffusion ในการกระจาย Vorticity เหล่านี้ภายในการไหล

จากที่มาของ "Vorticity equation" นี้จะเห็นได้ว่าการไหลที่อัดตัวไม่ได้และมีความหนาแน่นคงที่นั้น แรงเนื่องจากความดัน (Pressure force) และแรงโน้มถ่วง (Gravity force) จะไม่มีผลกับการเกิด Vorticity โดยตรง ทั้งนี้เนื่องจาก Vorticity นั้นเป็นค่าที่แสดงถึงการหมุนแบบ Solid-body แต่แรงเนื่องจากความดันและแรงโน้มถ่วงนั้นจะกระทำผ่านจุดศูนย์กลางมวลจึงทำให้ไม่สามารถสร้างการหมุนจากแรงเหล่านี้ได้ ในทางตรงกันข้ามแรงหนืด (Viscous force) นั้นจะกระทำในลักษณะเฉือน (Shear) ที่บริเวณผิวของอนุภาคและถ้าหากเกิดความไม่สมดุลของแรงนี้ขึ้นจะทำให้เกิดการหมุนขึ้นได้ อย่างไรก็ตามผลของความดันและแรงโน้มถ่วงจะทำให้เกิด  $\nabla \bar{u}$  ขึ้นได้จึงมีผลต่อการเกิด  $\bar{\omega}$  ในทางอ้อม

เนื่องจากการไหลที่บริเวณทางออกของ Contraction ในกรณีที่ไม่ใช่ Lobed nozzle ของงานวิจัยนี้นั้นมีลักษณะเป็นแบบ 2 มิติและอัดตัวไม่ได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาเฉพาะ Streamwise vorticity ( $\omega_x$ ) จะได้ว่า

$$\frac{D\omega_x}{Dt} = \cancel{\omega_x \frac{\partial u}{\partial x}} + \cancel{\omega_y \frac{\partial u}{\partial y}} + \cancel{\omega_z \frac{\partial u}{\partial z}} + \nu \nabla^2 \omega_x = 0 \quad (3.2)$$

จากสมการ (3.2) จะเห็นได้ว่าการไหลแบบ 2 มิติ ซึ่งในตอนเริ่มต้นไม่มี Streamwise vorticity นั้นจะยังคงไม่มี Streamwise vorticity ต่อไป เนื่องจาก  $\frac{D\omega_x}{Dt} = 0$  ตลอดเวลา จึงทำให้ได้ว่าการไหลในกรณีที่ไม่ใช่ Lobed nozzle นี้ดำเนินต่อไปก็ยังคงไม่มี Streamwise vorticity เกิดขึ้น

ต่อมาพิจารณาการไหลที่บริเวณทางออกของ Contraction ในกรณีที่ใช้ Lobed nozzle ซึ่งจะมีลักษณะเป็นแบบ 3 มิติ และอัดตัวไม่ได้ เมื่อพิจารณาเฉพาะ Streamwise vorticity จะได้ว่า

$$\frac{D\omega_x}{Dt} = \phi_x \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \phi_y \frac{\partial \omega_x}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial \omega_x}{\partial z} + \nu \nabla^2 \omega_x = \omega_z \frac{\partial \omega_x}{\partial z} \quad (3.3)$$

จากสมการ (3.3) จะเห็นได้ว่าในกรณีที่ใช้ Lobed nozzle นี้  $\frac{D\omega_x}{Dt} \neq 0$  เนื่องจากมี Gradient ของ Streamwise velocity ในแนว Spanwise เกิดขึ้น ( $\frac{\partial u}{\partial z} \neq 0$ ) อันเนื่องจากรูปร่างของ Lobed nozzle ที่ใช้ จึงทำให้สามารถเกิด Streamwise vorticity ( $\omega_x$ ) ขึ้นภายในการไหลได้จากการปรับเปลี่ยนทิศทางของ Spanwise vorticity ( $\omega_z$ ) ด้วย  $\frac{\partial u}{\partial z}$  นี้ นั่นเอง



## บทที่ 4

### ชุดทดลองและการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับผลของ Lobed nozzle และพารามิเตอร์ต่างๆของ Lobed nozzle รวมทั้งขนาดของช่องระบายอากาศออกด้านท้ายห้องที่มีต่อลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศภายในห้อง ซึ่งชุดทดลองที่ใช้ประกอบด้วย อุโมงค์ลม (Wind tunnel) ที่มีส่วนทำความร้อน (Heating section) อยู่ภายใน, ห้องทดลอง (Test section) และ Lobed nozzle จำนวน 8 ชุด ที่มีค่าความยาวคาบของ Lobe และระยะห่างระหว่าง Lobe ต่างๆกัน โดยทำการวัดค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆภายในห้องเพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในห้อง ซึ่งรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

#### 4.1 ชุดทดลอง

##### 4.1.1 อุโมงค์ลม (Wind tunnel)

งานวิจัยนี้ทำการทดลองในอุโมงค์ลมที่ใช้พัดลม (Centrifugal blower) ขนาด 3 แรงม้า, หน้าตัด Settling chamber ขนาด 50x50 เซนติเมตร<sup>2</sup>, Contraction แบบ 2 มิติที่มีค่า Area ratio เท่ากับ 12.5 และขนาดหน้าตัดทางออกเท่ากับ 4x50 เซนติเมตร<sup>2</sup> รวมทั้ง Test section ขนาด 50x50x100 เซนติเมตร<sup>3</sup> ที่มีช่องปล่อยอากาศเข้าขนาดเดียวกับหน้าตัดทางออกของ Contraction และทำการติดตั้ง Lobed nozzle ที่บริเวณปากทางออกของช่องปล่อยอากาศนี้ โดยรูปที่ 4.1 เป็นรูป Schematic drawing แสดงส่วนประกอบต่างๆของอุโมงค์ลมและรูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายของอุโมงค์ลมตามลำดับ

เริ่มต้นจากอากาศจะถูกดูดเข้ามายังพัดลม (แสดงดังรูปที่ 4.3) และไหลผ่านไปทางท่อยาง (Rubber duct) เพื่อลดความสั่นสะเทือนอันเกิดจากพัดลมและผ่านต่อไปยัง Gate valve และชุด Orifice (ที่มีค่า  $\beta = 0.54$ ) เพื่อใช้ในการควบคุมอัตราการไหลของอากาศภายในระบบ หลังจากนั้นอากาศจะไหลผ่านต่อไปยังอุโมงค์ลม โดยเริ่มจากการไหลผ่านชุด Screens-mesh 4 ที่ทำจากเส้นลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.58 มิลลิเมตร จำนวน 3 Screens โดยมีระยะห่างระหว่าง Screen เท่ากับ 15 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อกระจายการไหลของอากาศให้เต็มพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ลม และปรับสภาพการไหลของอากาศให้มีความสม่ำเสมอ (Uniform) ในระดับหนึ่ง ก่อนที่จะผ่านไปยังส่วนทำความร้อน (Heating section) เพื่อทำการให้ความร้อนกับอากาศ โดยใช้ Variac ขนาด 10 kVA ในการปรับอุณหภูมิอากาศ จากนั้นอากาศร้อนที่ได้จะไหลผ่านชุด Flow straightener ในส่วน Settling chamber ซึ่งประกอบด้วย Honeycomb, ชุด Screens-mesh 16 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดเท่ากับ 0.24 มิลลิเมตร จำนวน 4 Screens และ Screen-mesh 30 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดเท่ากับ 0.17



มิลลิเมตร จำนวน 1 Screen โดยมีระยะห่างระหว่างแต่ละ Screen เท่ากับ 15 เซนติเมตร เพื่อจัดเรียงการไหลของอากาศร้อนที่มีความปั่นป่วนในระดับหนึ่งอันเกิดจาก Blower และ Heater ให้ลดน้อยลง โดย Honeycomb ซึ่งช่วยลดการไหลแบบหมุนวน (Swirling flow) ของอากาศนั้นจะสร้างจากท่อทองเหลืองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในประมาณ 17 มิลลิเมตร หนา 0.45 มิลลิเมตร และยาว 150 มิลลิเมตร หลังจากนั้นไปอากาศร้อนที่มีความเร็วต่ำนี้จะถูกเร่งให้มีความเร็วสูงขึ้นเมื่อผ่านเข้าไปยัง Contraction แบบ 2 มิติที่มี Area ratio เท่ากับ 12.5 : 1 (แสดงดังรูปที่ 4.4) โดยหน้าตัดทางออกของ Contraction เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 4x50 เซนติเมตร<sup>2</sup> ซึ่งทำให้ลักษณะการไหลของอากาศร้อนที่บริเวณทางออกของ Contraction มีลักษณะเป็นแบบเจ็ทก่อนที่จะถูกส่งต่อเข้าไปยัง Test section ที่ทำจากอะคลิลิกใสเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป โดยอากาศที่ออกมาจาก Contraction นี้จะมีลักษณะการไหลเป็นแบบ Uniform flow ซึ่งจะมีความเร็วสูงสุดประมาณ 10 เมตรต่อวินาที

#### 4.1.2 ส่วนทำความร้อน (Heating section)

ส่วนทำความร้อนนี้ (ดังรูปที่ 4.5) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศก่อนที่จะไหลผ่านไปยังห้องทดลอง โดยใช้ Variac ขนาด 10 kVA (ดังรูปที่ 4.6) ในการปรับอุณหภูมิของอากาศ ซึ่งส่วนนี้จะติดตั้งอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของส่วน Settling chamber โดยภายในส่วนทำความร้อนนี้ได้ทำการติดตั้ง Heater ชนิด U type แบบมีฟिन ขนาด 1.5 kW จำนวน 4 ชุด และทำการหุ้มด้วยฉนวนชนิดแผ่นใยหิน (Rockwool) ที่ภายนอกเพื่อช่วยลดการสูญเสียพลังงาน สำหรับแรงดันไฟฟ้าที่ Heater ใช้นั้นมีค่าประมาณ 150 Volts ซึ่งคิดเป็นค่าพลังงานทางไฟฟ้าได้ประมาณ 2.8 kW

#### 4.1.3 ห้องทดลอง (Test section)

ในส่วนของห้องทดลองนี้เป็นแบบจำลองของ Ventilated chamber (ดังรูปที่ 4.7) ที่มีความกว้าง (W) 50 เซนติเมตร ยาว (L) 100 เซนติเมตร และสูง (H) 50 เซนติเมตร ทำจากแผ่น Acrylic ใสที่มีความหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร โดยมีช่องปล่อยอากาศเข้า (Supply air) ที่บริเวณด้านบนของห้องเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 4x50 เซนติเมตร<sup>2</sup> และช่องระบายอากาศออก (Exhaust air) ที่ด้านล่างของห้องของผนังฝั่งตรงข้ามเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเช่นกัน โดยมีความกว้างเท่ากับ 50 เซนติเมตร ซึ่งเท่ากับความกว้างของห้อง และสามารถปรับเปลี่ยนขนาดความสูง (t) ได้ สำหรับผนังทุกด้านนั้นจะยึดเข้าหากันโดยใช้อะลูมิเนียมฉากขนาด 25x25 มิลลิเมตร<sup>2</sup> ที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร ในส่วนหน้าแปลนของห้องทดลองนี้ที่เชื่อมต่อกับส่วน Contraction ก็ทำจากอะลูมิเนียมฉากขนาดดังกล่าวเช่นกัน และเมื่อประกอบทุกส่วนเข้าด้วยกันแล้วได้ทำการอุดรอยรั่วด้วยซิลิโคนและทำการปรับพื้นผิวที่บริเวณรอยต่อให้เรียบ

สำหรับที่บริเวณผนังด้านบนได้ทำการเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการสอดเทอร์โมคัพเปิล (ชนิด K) วัดอุณหภูมิ โดยเจาะรูที่ระยะ  $x$  เท่ากับ 6, 36, 68 และ 96 เซนติเมตรตามลำดับ (คิดเป็น 1.5, 9, 17 และ 24 เท่าของความสูงของช่องปล่อยอากาศตามลำดับ) ในแต่ละระนาบ ซึ่งมีทั้งหมด 5 ระนาบ ตามแนวแกน  $y$  ดังรูปที่ 4.8 นอกจากนี้ในแต่ละระนาบยังติดตั้ง Pressure taps ที่ตำแหน่ง  $x$  เท่ากับ  $-2$  เซนติเมตร โดยใช้ท่อทองเหลืองที่มีความยาวประมาณ 1 นิ้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเท่ากับ 2 และ 3.2 มิลลิเมตรตามลำดับ เพื่อใช้ในการหาค่าแตกต่างของความดันสถิตที่ตำแหน่งก่อนถึง Lobe เทียบกับความดันบรรยากาศด้วย

#### 4.1.4 Lobed nozzle

Lobed nozzle ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะคล้ายกับปิรามิด และที่ทุกหน้าตัดมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมคล้าย ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ซึ่ง Lobed nozzle นี้ทำจากแผ่นเหล็กหนา 1.0 มิลลิเมตรและทำการเชื่อมกับแผ่นเหล็กขนาด  $5 \times 50$  เซนติเมตร<sup>2</sup> ที่มีความหนาเท่ากันเพื่อใช้ในการติดตั้งที่บริเวณปากทางออกของช่องปล่อยอากาศ และทำการอุดรอยรั่วด้วยสีโป้วสำหรับพารามิเตอร์ของ Lobed nozzle ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.10 นั้นได้แก่ แอมพลิจูด (A), ความยาวคาบ (T), ระยะห่างระหว่าง Lobe (G) และค่าความลึก (B) โดยค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะมีความสัมพันธ์กับค่าความสูงของช่องปล่อยอากาศของห้องทดลอง (h) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งค่าเหล่านี้ได้มาจากการศึกษาเบื้องต้นโดยการใช้เทคนิค Smoke-wire flow visualization สำหรับค่าความลึก (B) และ ค่าแอมพลิจูด (A) ในงานวิจัยนี้นั้นใช้เป็นค่าคงที่คือเท่ากับ 1 และ 2 เท่าของค่าความสูงของช่องปล่อยอากาศของห้องทดลองตามลำดับ

สำหรับการติดตั้ง Lobed nozzle ที่บริเวณปากทางออกของช่องปล่อยอากาศนั้นนั้นได้ทำการติดตั้งในแนวตั้งโดยให้บริเวณขอบล่างของช่องปล่อยอากาศอยู่ในระดับเดียวกับบริเวณกึ่งกลาง Lobe ดังรูปที่ 4.11

## 4.2 ผลการเปรียบเทียบชุดทดลอง

ในส่วนของการเปรียบเทียบ (Calibration) ชุดทดลองนี้ ได้ทำขึ้นหลังจากสร้างชุดทดลองเสร็จเรียบร้อยแล้วซึ่งประกอบด้วยการทดลอง 2 ส่วน อันได้แก่ การทดลองเพื่อดูความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ย และการวัดความหนาของชั้น Boundary layer ที่บริเวณหน้าตัดทางออกของ Contraction (ในที่นี้ทำการทดลองขณะที่ยังไม่ประกอบห้องทดลองเข้ากับ Contraction) โดยการใช้ Pitot probe ที่ทำขึ้นใช้เองในห้องปฏิบัติการซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 4.6

สำหรับการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วเฉลี่ย ซึ่งทำที่ความเร็ว Freestream เฉลี่ย 7.8 เมตรต่อวินาที นั้นได้ทำการวัดเป็นเมตริกซ์ขนาด  $5 \times 11$  จุดตั้งรูปที่ 4.12 โดยมีระยะห่างแต่ละจุดในแนว Traverse และแนว Spanwise เท่ากับ 1 และ 5 เซนติเมตรตามลำดับ และมีความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการวัดไม่เกิน  $\pm 1$  มิลลิเมตร ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยที่ได้มีความสม่ำเสมอในระดับที่น่าพอใจ กล่าวคือความเร็วนอกชั้นขอบเขตจะมีค่าเท่ากับ 7.9 เมตรต่อวินาที และมีความไม่สม่ำเสมอของความเร็วไม่เกิน  $\pm 1.2\%$  ของความเร็ว Freestream เฉลี่ย ดังแสดงในรูปที่ 4.13

สำหรับการวัดความหนาของชั้น Boundary layer ที่บริเวณหน้าตัดทางออกของ Contraction นั้น ทำที่ความเร็ว Freestream เฉลี่ยเท่ากับ 7.4 เมตรต่อวินาที และทำการวัดที่ตำแหน่งต่างๆดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการวัดไม่เกิน  $\pm 1$  มิลลิเมตร. โดยการวัดความหนาของชั้น Boundary layer นั้นดูจากค่าความเร็วซึ่งหาได้จากการวัด Total pressure ตามตำแหน่งต่างๆ และถือว่า Static pressure มีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ ซึ่งจากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่าความหนาของชั้น Boundary layer ที่สามารถระบุได้โดยพิจารณาจากค่าความเร็วอากาศที่เริ่มจะคงที่นั้นมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งที่ 1 ประมาณ 3 มิลลิเมตร แต่ความหนาของ Boundary layer โดยเฉลี่ยแล้วมีค่าประมาณ 2 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5 % ของค่าความสูงของปากทางออก Contraction

### 4.3 พารามิเตอร์ของการทดลอง

สำหรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆของ Lobed nozzle ที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้แก่ แอมพลิจูด (A), ความยาวคาบ (T), ระยะห่างระหว่าง Lobe (G) และค่าความลึก (B) โดยค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะกำหนดให้สัมพันธ์กับค่าความสูงของช่องช่องปล่อยอากาศของห้องทดลอง (h) ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 4 cm ดังแสดงในตารางที่ 4.1

นอกจากนี้การทดลองของ Lobed nozzle แต่ละชุดนั้นได้ทำการทดลองในห้องทดลองที่มีขนาดของช่องระบายอากาศออก (t) ทั้งหมด 6 ค่า ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และเพื่อให้การเรียกชื่อกรณีการทดลองสะดวกจึงกำหนดสัญลักษณ์ของการทดลองคือ LATG-x.xx โดยชื่อ Lobed nozzle LATG นั้น A, T และ G จะหมายถึง แอมพลิจูด, ความยาวคาบ และระยะห่างระหว่าง Lobe ที่เป็นจำนวนเท่าของค่าความสูง (h) ของช่องปล่อยอากาศเข้าของห้องทดลองตามลำดับ และสำหรับ -x.xx (หรือในบางครั้งอาจใช้ PX.XX แทน) หมายถึง อัตราส่วนของพื้นที่ช่องระบายอากาศออกต่อพื้นที่ของผนังด้านท้ายห้องทั้งหมด ยกตัวอย่างเช่น L241-0.50 หมายถึง กรณีที่ใช้ Lobe ที่มีค่าแอมพลิจูด, ความยาวคาบ และระยะห่างระหว่าง Lobe เท่ากับ 2h, 4h และ 1h ตามลำดับและมีอัตราส่วนของขนาดช่องระบายอากาศออกต่อขนาดผนังท้ายห้องเท่ากับ 0.50

#### 4.4 การวัดอุณหภูมิ

การวัดอุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆภายในห้องทดลองนั้นใช้ Probe ซึ่งทำจาก Thermocouple type K ยี่ห้อ OMEGA รุ่น TT-K-24SLE ที่มีช่วงอ่านค่าอุณหภูมิตั้งแต่ 0-1250 °C สอดเข้าไปในท่อทองเหลืองยาว 70 เซนติเมตร ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเท่ากับ 4 และ 4.8 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยให้ปลาย Thermocouple ที่ใช้วัดอุณหภูมินั้นอยู่เลยออกมาจากปลายท่อทองเหลือง 6 มิลลิเมตรและใส่ซิลิโคนอยู่ระหว่าง Thermocouple และท่อทองเหลืองเพื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อนอันเนื่องมาจากท่อทองเหลือง สำหรับตัวอ่านค่าอุณหภูมินั้นใช้ตัวอ่านค่าอุณหภูมียี่ห้อ RKC รุ่น C100FK02-M\*GN ซึ่งอ่านค่าอุณหภูมิได้ในช่วง 0-400°C และอ่านได้ละเอียด 1°C โดยรูปที่ 4.16 แสดง Probe และตัวอ่านค่าอุณหภูมิตั้งใช้ในการทดลองนี้ สำหรับรูปที่ 4.17 นั้นแสดงถึงการวัดอุณหภูมิภายในห้องทดลองโดยการใช้ Probe และตัวอ่านค่าอุณหภูมิตั้งกล่าว

นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบชุดวัดอุณหภูมินี้กับเครื่องวัดอุณหภูมิมาตรฐานทั้งหมด 2 ครั้งเป็นระยะเวลาห่างกัน 8 เดือน พบว่าค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดนี้ทั้ง 2 ครั้งสอดคล้องกันเป็นอย่างมาก โดยมีความเบี่ยงเบนประมาณ 2 % ดังแสดงในภาคผนวก ก

สำหรับการวัดอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมนั้นใช้ Thermometer ที่มีช่วงอ่านค่าอุณหภูมิ 0 - 100°C และมีความละเอียด 1°C

#### 4.5 การวัดความดันสถิต (Static pressure)

ในการทดลองนี้ได้ทำการวัดความดันสถิตทั้งหมด 2 ตำแหน่ง คือที่ตำแหน่งก่อนทางเข้า Lobed nozzle ( $x = -2$  เซนติเมตร) และที่ตำแหน่ง Orifice โดยการใช้ท่อทองเหลืองที่มีความยาวประมาณ 1 นิ้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเท่ากับ 2 และ 3.2 มิลลิเมตรตามลำดับ เสียบผ่านรูบนผนังชุดทดลองและปรับแต่งผิวภายในชุดทดลองให้เรียบ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 4.5.1 การวัดความดันสถิตที่ตำแหน่งก่อนทางเข้า Lobed nozzle

ก่อนการทดลองวัดอุณหภูมิตั้งในแต่ละกรณีจะทำการวัดความดันตกคร่อม Lobed nozzle ซึ่งหาได้จากการวัดความดันสถิตที่ตำแหน่งก่อนทางเข้า Lobed nozzle เทียบกับความดันบรรยากาศ คือที่ตำแหน่ง  $x = -2$  เซนติเมตร หรือ 0.5 เท่าของความสูงของช่องปล่อยอากาศของห้องทดลอง โดยใช้ Pressure transducer ชนิด Differential ยี่ห้อ OMEGA รุ่น PX653-0.25BD5V ที่มีช่วงอ่านค่าความดัน  $\pm 0.25$  นิ้วน้ำ, แรงดันไฟฟ้าขาออก 1-5 Volts (DC) และมีความผิดพลาด (Error) เท่ากับ  $\pm 0.5\%$  Full scale สำหรับตัวอ่านค่า (Read out) นั้นใช้เป็น



Multimeter ที่สามารถหาค่าเฉลี่ยโดยเวลาได้ ซึ่งรูปที่ 4.18 และ 4.19 นั้นแสดงถึง Pressure transducer และตัวอ่านค่านี้ ตามลำดับ

#### 4.5.2 การวัดความดันสถิตที่ตำแหน่ง Orifice

ในการวัดความดันสถิตตกร้อม Orifice ที่มีค่า  $\beta = 0.54$  ( $\beta$  คืออัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Orifice และท่อที่อากาศไหล) เพื่อใช้ในการหาค่าอัตราการไหลทั้งหมดที่เข้าสู่ห้องทดลองนั้น ทำการวัดที่ระยะ  $1D$  และ  $0.5D$  ที่ตำแหน่งก่อนและหลัง Orifice ตามลำดับโดย  $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ต่ออยู่กับ Orifice สำหรับตัวอ่านค่าความดันนั้นใช้ Inclined manometer ที่มีช่วงอ่านค่าความดัน 0-250 มิลลิเมตรน้ำ โดยในช่วง 0-50 มิลลิเมตรน้ำ สามารถอ่านค่าได้ละเอียด 0.2 มิลลิเมตรน้ำ และช่วง 50-250 มิลลิเมตรน้ำนั้นสามารถอ่านค่าได้ละเอียด 2 มิลลิเมตรน้ำ ซึ่งในการทดลองนี้นั้นใช้ทั้งสองช่วงความดัน สำหรับ Orifice และ Inclined manometer นี้แสดงดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ

#### 4.6 การวัดความดันรวม (Total pressure)

การวัดความดันรวมในงานวิจัยนี้นั้นใช้ในการทดลองทั้งหมด 2 ส่วนคือ การทดลองเพื่อดูความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ย และการวัดความหนาของชั้น Boundary layer ที่บริเวณหน้าตัดทางออกของ Contraction ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2

สำหรับการวัดความดันรวมนั้นใช้ Pitot probe ที่ทำขึ้นใช้เองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งหัว Probe ทำจากเข็มฉีดยาที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.8 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1.2 มิลลิเมตร โดยหัว Probe นี้มีความยาวประมาณ 25 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน สำหรับก้าน Probe ทำจากท่อสแตนเลสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเท่ากับ 3 และ 4 มิลลิเมตรตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.22 นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบ Pitot probe นี้กับ Pitot-static probe มาตรฐานแล้วพบว่าให้ผลการวัดที่สอดคล้องกัน

#### 4.7 สัมประสิทธิ์ที่ใช้บ่งบอกการกระจายตัวของอุณหภูมิ

ในการทดลองนี้ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการกระจายตัวหรือการผสมของอากาศภายในห้องทดลองโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ, สัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความกว้าง, สัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยโดยบริเวณ, สัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยโดยรวม และสัมประสิทธิ์ความดันสถิตเฉลี่ย โดยแต่ละค่าสัมประสิทธิ์จะนิยามดังต่อไปนี้

#### 4.7.1 สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (Temperature coefficient, $C_T$ )

ซึ่งนิยามเป็น

$$C_T = \frac{T - T_{ref}}{T_J - T_{ref}} \quad (4.7.1)$$

โดย

- $C_T$  คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆในห้องทดลอง
- $T$  คือ อุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆในห้องทดลองที่ทำการวัด ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_{ref}$  คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมขณะทำการทดลอง ( $^{\circ}\text{C}$ ) ซึ่งในกรณีนี้คืออุณหภูมิบรรยากาศ (ในการทดลองนี้  $T_{ref}$  มีค่าอยู่ในช่วง  $28 - 32^{\circ}\text{C}$  โดยในการทดลองหนึ่งๆนั้น  $T_{ref}$  จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปประมาณ  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ )
- $T_J$  คือ อุณหภูมิที่ตำแหน่ง Centerline ของเจ็ทอากาศ ณ ตำแหน่งทางเข้าของห้องทดลอง ( $^{\circ}\text{C}$ ) (ในการทดลองนี้  $T_J$  มีค่าอยู่ในช่วง  $66 - 71^{\circ}\text{C}$  โดยในการทดลองหนึ่งๆนั้น  $T_J$  จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปประมาณ  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ )

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจึงหมายถึง อุณหภูมิ(ส่วนเกิน)ในรูปตัวแปรไร้มิติ ซึ่งบ่งบอกถึงพลังงานความร้อน (Thermal energy) ตามตำแหน่งต่างๆภายในห้องทดลอง

#### 4.7.2 สัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความกว้าง (Spanwise averaged temperature coefficient, $C_{TS}$ )

ซึ่งนิยามเป็น

$$C_{TS} = \frac{1}{V_S} \int_{V_S} C_T dV \quad (4.7.2)$$

โดย

- $C_{TS}$  คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความกว้างของห้องทดลอง
- $C_T$  คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆภายในห้องทดลอง
- $V_S$  คือ ปริมาตรของบริเวณตลอดความกว้างของห้องทดลอง



ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความกว้าง จึงหมายถึง ค่าอุณหภูมิ(ส่วนเกิน)เฉลี่ยโดยปริมาตรตลอดความกว้างของห้องทดลอง ซึ่งในการทดลองนี้จะมีทั้งหมด 5 จุดในการหาค่าเฉลี่ย

#### 4.7.3 สัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยโดยบริเวณ (Zone averaged temperature coefficient, $C_{TZ}$ )

ซึ่งนิยามเป็น

$$C_{TZ} = \frac{1}{V_Z} \int_{V_Z} C_T dV \quad (4.7.3)$$

โดย

$C_{TZ}$  คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยตามโซนต่างๆภายในห้องทดลอง

$C_T$  คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆภายในห้องทดลอง

$V_Z$  คือ ปริมาตรของบริเวณที่สนใจภายในห้องทดลอง

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยโดยบริเวณ จึงหมายถึง ค่าอุณหภูมิ(ส่วนเกิน)เฉลี่ยโดยปริมาตรตามโซนต่างๆทั้งหมด 8 โซนภายในห้องทดลอง โดยการจัดโซนนี้แสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งในโซนที่ 1-4 มีจำนวนจุดวัดทั้งหมด 45 จุดในแต่ละโซน สำหรับโซนที่ 5-8 นั้นมีจำนวนจุดวัดทั้งหมด 20 จุดในแต่ละโซน

#### 4.7.4 สัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยโดยรวม (Total averaged temperature coefficient, $C_{TT}$ )

ซึ่งนิยามเป็น

$$C_{TT} = \frac{1}{V_T} \int_{V_T} C_T dV \quad (4.7.4)$$

โดย

$C_{TT}$  คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยโดยรวมภายในห้องทดลอง

$C_T$  คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆในห้องทดลอง

$V_T$  คือ ปริมาตรโดยรวมทั้งหมดของห้องทดลอง

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉลี่ยโดยรวม จึงหมายถึง ค่าเฉลี่ยโดยปริมาตรของ อุณหภูมิ(ส่วนเกิน)หรือพลังงานความร้อนโดยรวมทั้งหมดภายในห้องทดลอง ซึ่งประกอบด้วย จุดวัดทั้งหมด 260 จุด กระจายตามที่แสดงในรูปที่ 4.8

#### 4.7.5 สัมประสิทธิ์ความดันสถิตเฉลี่ย (Average static pressure coefficient, $C_p$ )

ซึ่งนิยามเป็น

$$C_p = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \left( \frac{P_1 - P_{atm}}{q_1} \right) dA \quad (4.7.5)$$

โดย

$C_p$  คือ สัมประสิทธิ์ความดันสถิตเฉลี่ย

$P_1$  คือ ความดันสถิตที่ตำแหน่งก่อนทางเข้าห้องทดลอง (ที่  $x = -2$  เซนติเมตร)

$P_{atm}$  คือ ความดันบรรยากาศ

$q_1$  คือ ความดันจลน์ที่ตำแหน่งก่อนทางเข้าห้องทดลอง (ที่  $x = -2$  เซนติเมตร)

$A_1$  คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของช่องปล่อยอากาศเข้า

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความดันสถิตเฉลี่ย จึงหมายถึง ค่าเฉลี่ยโดยพื้นที่ของค่าแตกต่าง ระหว่างความดันสถิตที่ตำแหน่งก่อนทางเข้าห้องทดลอง (ที่  $x = -2$  เซนติเมตร) กับความดัน บรรยากาศเทียบกับความดันจลน์ ซึ่งในการทดลองนี้จะมีทั้งหมด 5 จุดในการหาค่าเฉลี่ย ดังรูปที่ 4.11(ค) หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าเฉลี่ยของความดันสถิตตกคร่อมห้องเทียบกับความดันบรรยากาศ ที่ตำแหน่งดังกล่าว ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความดันตกคร่อมห้องที่เกิดขึ้น

#### 4.8 สภาวะของการทดลองและความคลาดเคลื่อน

ในทุกกรณีการทดลองซึ่งต้องทำการวัดอุณหภูมิตั้งแต่ 5 ระบายนั้น อุณหภูมิของเจ็ท อากาศที่บริเวณช่องปล่อยอากาศเข้าในตำแหน่ง Centerline จะมีค่าอยู่ในช่วง  $66-71^\circ\text{C}$  ซึ่งใน แต่ละการทดลองนั้นจะมีค่าแปรเปลี่ยนไปประมาณ  $\pm 1^\circ\text{C}$  โดยใช้ Variac และ Thermocouple ในการควบคุมและวัดอุณหภูมินี้ตามลำดับ สำหรับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมในการทดลอง จะมีค่าอยู่ใน ช่วง  $28-32^\circ\text{C}$  โดยในการทดลองหนึ่งๆจะมีค่าแปรเปลี่ยนไปประมาณ  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  ซึ่งในการอ่านค่า อุณหภูมินี้ใช้ Thermometer ในการอ่านค่า

สำหรับความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทที่บริเวณช่องปล่อยอากาศเข้านั้นใช้ทั้งหมด 2 ค่าคือ 0.5 และ 4.4 เมตรต่อวินาที หรือมี Reynolds number ที่นิยามด้วยความสูงของช่องปล่อยอากาศเข้า ( $Re_h$ ) เท่ากับ 1,000 และ 8,800 ซึ่งคิดเป็นอัตราการไหลได้เท่ากับ 0.01 และ 0.09 ลูกบาศก์เมตร

ต่อวินาทีตามลำดับ โดยใช้ Gate valve และ Orifice ที่บริเวณทางออกของ Blower ในการควบคุมอัตราการไหลนี้ ซึ่งในกรณีที่ศึกษาถึงผลของ Lobed nozzle และขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้องนั้นจะใช้ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.5 เมตรต่อวินาที ในขณะที่เมื่อศึกษาถึงผลของความเร็วเฉลี่ยและขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้องนั้นจะใช้ทั้งความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.5 และ 4.4 เมตรต่อวินาที



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของ Lobed nozzle แบบต่างๆ และความเร็วของอากาศบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้า ที่มีต่อลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่เกิดขึ้นภายในห้องทดลอง โดยจะศึกษาในลักษณะที่ควบคู่ไปกับผลของขนาดช่องระบายอากาศออกที่บริเวณท้ายห้อง ซึ่งในที่นี้อุณหภูมิของเจ็ทอากาศร้อนที่บริเวณทางเข้าห้องและของสิ่งแวดล้อมในทุการทดลอง จะมีค่าประมาณ  $66-71\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $28-32\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยในแต่ละการทดลองนั้น จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปประมาณ  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ

สำหรับในส่วนของการทดลองนั้น แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก อันได้แก่

1. ผลกระทบของขนาดช่องระบายอากาศออกที่บริเวณท้ายห้องต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้อง ในกรณีความเร็วบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้ามีค่าสูง ( $U_j = 4.4\text{ m/s}$ )
2. ผลกระทบของความเร็วอากาศควบคู่กับขนาดของช่องระบายอากาศออกที่บริเวณท้ายห้องต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้อง ในกรณีความเร็วบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้ามีค่าสูง ( $U_j = 4.4\text{ m/s}$ ) และต่ำ ( $U_j = 0.5\text{ m/s}$ )
3. ผลกระทบของการใช้ Lobed nozzle ควบคู่กับขนาดของช่องระบายอากาศออกที่บริเวณท้ายห้องต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้อง ในกรณีความเร็วบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้ามีค่าต่ำ ( $U_j = 0.5\text{ m/s}$ )

โดยผลการทดลองนี้จะแสดงอยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิต่างๆ และภาพ Flow visualization ที่แสดงถึงลักษณะการกระจายตัวของอากาศที่เกิดขึ้นภายในห้อง รวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์ความดันลด ที่แสดงถึงค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นจาก Lobed nozzle แบบต่างๆ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆเหล่านี้ รวมทั้งค่า Uncertainty ของทุกพารามิเตอร์นั้น ได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.1-5.24 และ 5.25 ตามลำดับ

#### 5.1 ผลกระทบของขนาดช่องระบายอากาศออกที่บริเวณท้ายห้องต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้อง ในกรณีความเร็วบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้ามีค่าสูง ( $U_j = 4.4\text{ m/s}$ )

การทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบของขนาดช่องระบายอากาศออกที่บริเวณท้ายห้อง ต่อลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่เกิดขึ้นตามบริเวณต่างๆภายในห้อง โดยความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทอากาศร้อนที่บริเวณทางเข้ามีค่าเท่ากับ 4.4 เมตรต่อวินาที

( $U_j = 4.4 \text{ m/s}$ ) ซึ่งในที่นี้จะใช้พารามิเตอร์  $t/H$  หรือ  $PX.XX$  เมื่อ  $X.XX$  คือ อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่อพื้นที่ผนังท้ายห้องทั้งหมด ยกตัวอย่างเช่น P0.84 หรือ  $t/H = 0.84$  จะหมายถึง กรณีที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่อพื้นที่ผนังท้ายห้องทั้งหมดเท่ากับ 0.84 หรือ 84% เป็นต้น

สำหรับสภาวะที่ใช้ทำการทดลองนี้ ได้แก่ P1.00(กรณีเปิดหมด), P0.92, P0.84, P0.76, P0.50, P0.16 และ P0.08 โดยที่ในกรณี P1.00, P0.92, P0.76, P0.50 และ P0.08 นั้น ทำการวัดอุณหภูมิในแนว Spanwise ทั้งหมด 3 ตำแหน่งคือที่  $y$  เท่ากับ -10.5, 0 และ 10.5 เซนติเมตร (ระบบแกนพิกัดแสดงในรูป 4.8(ก)) แต่สำหรับที่ P0.84 และ P0.16 นั้น ทำการวัดที่ตำแหน่ง Center plane ( $y$  เท่ากับ 0) เพียงตำแหน่งเดียวเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากผลของ 5 กรณีแรกพบว่าการไหลภายในห้องค่อนข้างเป็นแบบ 2 มิติ (ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 5.1.4) ดังนั้น 2 กรณีหลังนี้ (P0.84 และ P0.16) ซึ่งเป็นกรณีที่ทำการเพิ่มเติม จึงทำการวัดเพียงที่ตำแหน่ง Center plane เท่านั้น

สำหรับผลการทดลองในส่วนนี้ เป็นผลที่ได้จากการวัดอุณหภูมิ ซึ่งจะแสดงอยู่ในรูปของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยโดยรวม ( $C_{TT}$ ), สัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยโดยบริเวณ ( $C_{TZ}$ ), สัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความกว้าง ( $C_{TS}$ ) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ ( $C_T$ ) โดยค่าของสัมประสิทธิ์เหล่านี้จะแสดงถึง ลักษณะการกระจายตัวของอากาศร้อนที่เกิดขึ้นภายในห้อง ในรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป

### 5.1.1 สัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยโดยรวม ( $C_{TT}$ )

ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยโดยรวม ( $C_{TT}$ ) นี้เป็นค่าที่แสดงถึง ค่าอุณหภูมิ(ส่วนเกิน)เฉลี่ยโดยรวมทั้งหมดภายในห้อง ดังสมการที่ 4.7.4 ดังนั้นหากกรณีใดมีค่า  $C_{TT}$  มาก จะหมายถึง ในกรณีนั้นๆสามารถดึงเอาพลังงานความร้อนจากเจ็ทอากาศร้อนเข้าไปสะสมภายในห้องได้มาก

กราฟรูปที่ 5.1 แสดงผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่อค่าอุณหภูมิเฉลี่ยโดยรวมของทุกกรณี โดยแสดงอยู่ในรูปของค่า  $C_{TT}$  ของการไหลภายในห้องเทียบกับขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง ( $t/H$ ) โดยกรณีที่ขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่าน้อยจะอยู่ทางซ้ายมือ ( $t/H$  มีค่าใกล้ 0) และกรณีที่มีค่ามากจะอยู่ทางขวามือ ( $t/H$  มีค่าใกล้ 1.0) ซึ่งในทุกกรณีการทดลองจะมีค่า Uncertainty ของ  $C_{TT}$  ไม่เกิน  $\pm 0.04$

จากกราฟพบว่า  $C_{TT}$  จะมีค่าขึ้นอยู่กับ  $t/H$  โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงที่  $t/H$  ลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.76 และจะมีค่าประมาณคงที่ในช่วงที่  $t/H$  มีค่าน้อยกว่า 0.76 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่อยๆปิดผนังท้ายห้องลงมา จากกรณีที่เปิดผนังท้ายห้องทั้งหมด จนถึงกรณีที่มีอัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายเท่ากับ 0.76 นั้น จะส่งผลต่อค่าอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งหมดภายในห้องเป็นอย่างมาก โดยจะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่หากทำการปิดผนังลงมา มากกว่านั้นแล้วจะส่งผลต่อค่าอุณหภูมิเฉลี่ยน้อยมาก โดยอุณหภูมิเฉลี่ยจะมีค่าประมาณคงที่



หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ในช่วงการปิดนี้  $C_{TT}$  จะไม่ขึ้นกับ  $t/H$  ซึ่งกรณีที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายมีค่าเท่ากับ 0.76 นั้น คือกรณีที่ทำการปิดผนังด้านท้ายลงมาเท่ากับ  $\delta$  โดย  $\delta$  คือความหนาของเจ็ทที่ตำแหน่งท้ายห้องในกรณีที่เปิดผนังด้านท้ายห้องทั้งหมด ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในกราฟรูปที่ 5.13

จากผลการทดลองในส่วน  $C_{TT}$  นี้สามารถสรุปได้ว่า 1) เมื่อทำการปิดผนังท้ายห้องลงมาจากกรณีเปิดหมด จนถึงกรณีปิดน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $\delta$  แล้ว จะทำให้ค่า  $C_{TT}$  เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามขนาดการปิด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง  $C_{TT}$  จะขึ้นกับขนาดการปิด สำหรับการปิดในช่วงที่น้อยกว่า  $\delta$  2) แต่หากทำการปิดผนังท้ายห้องลงมามากกว่า  $\delta$  แล้ว จะไม่ทำให้ค่า  $C_{TT}$  เปลี่ยนแปลงตามขนาดการปิดมากนัก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง  $C_{TT}$  จะไม่ขึ้นกับขนาดการปิด สำหรับการปิดในช่วงที่มากกว่า  $\delta$

### 5.1.2 สัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉลี่ยโดยบริเวณ ( $C_{TZ}$ )

เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉลี่ยโดยรวมนั้น เป็นค่าที่แสดงถึงอุณหภูมิ(ส่วนเกิน)เฉลี่ยทั้งหมดภายในห้อง จึงไม่สามารถบ่งบอกถึงลักษณะการกระจายของอุณหภูมิตามบริเวณต่างๆภายในห้องได้ ดังนั้นจึงทำการหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉลี่ยโดยบริเวณ ( $C_{TZ}$ ) ขึ้นมา ซึ่ง  $C_{TZ}$  นี้แสดงถึงค่าอุณหภูมิ(ส่วนเกิน)เฉลี่ยในแต่ละบริเวณภายในห้อง ดังสมการที่ 4.7.3 หากบริเวณใดมีค่า  $C_{TZ}$  มาก ก็แสดงว่าเจ็ทอากาศร้อนที่พ่นออกมานั้น สามารถเข้าไปสู่บริเวณดังกล่าวได้มาก จึงส่งผลให้บริเวณนั้นมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่สูงขึ้น สำหรับการแบ่งบริเวณภายในห้องออกเป็นโซนต่างๆทั้งหมด 8 โซนนั้น แสดงในรูปที่ 4.8 (ข)

กราฟรูปที่ 5.2 แสดงผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้อง ต่อค่าอุณหภูมิจเฉลี่ยในแต่ละบริเวณภายในห้อง โดยแสดงอยู่ในรูปของค่า  $C_{TZ}$  เทียบกับขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง ( $t/H$ ) ซึ่งในทุกกรณีการทดลองนั้นจะมีค่า Uncertainty ของ  $C_{TZ}$  ไม่เกิน  $\pm 0.04$

จากกราฟพบว่า ลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TZ}$  เทียบกับ  $t/H$  ในโซนด้านบน (โซน 1-4) และด้านล่าง (โซน 5-8) นั้น คล้ายคลึงกับลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TT}$  ที่ผ่านมากล่าวคือ จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงการปิดที่น้อยกว่า  $\delta$  ( $t/H$  ลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.76) และจะมีค่าประมาณคงที่ในช่วงการปิดที่มากกว่า  $\delta$  ( $t/H$  มีค่าน้อยกว่า 0.76) อย่างไรก็ตาม ในช่วงการปิดที่น้อยกว่า  $\delta$  นั้นพบว่า ค่า  $C_{TZ}$  ในโซนด้านบนของห้อง (โซน 1-4) จะมีค่าสูงกว่าในโซนล่าง ที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากเจ็ทอากาศร้อนนั้น ถูกปล่อยจากทางออกบริเวณผนังห้องด้านบนโดยตรง จึงทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยในโซนด้านบนมีค่าสูงกว่า นอกเหนือจากนั้นพบว่า ที่บริเวณด้านบนของห้อง จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า  $C_{TZ}$  เมื่อขนาดช่องเปิดลดลงที่น้อยกว่าบริเวณด้านล่างของห้อง (โซน 5-8) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจ

เมื่อเทียบกับขนาดของช่องเปิดที่บริเวณด้านบนของห้อง จะมีค่าต่ำกว่าที่บริเวณด้านล่างของห้อง แต่สำหรับในช่วงการปิดที่มากกว่า  $\delta$  แล้วนั้น พบว่าทั้งสองบริเวณต่างก็มีค่า  $C_{TZ}$  ประมาณคงที่ที่เท่ากัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิเฉลี่ยทั้งสองบริเวณนี้ แทบจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของช่องระบายอากาศออกในช่วงการปิดดังกล่าวเลย

ดังนั้นจากผลการทดลองในส่วนของ  $C_{TZ}$  นี้จึงสรุปได้ว่า 1)เมื่อทำการปิดผนังท้ายห้องลงมาจากกรณีเปิดหมดจนถึงกรณีการปิดน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $\delta$  แล้ว จะทำให้  $C_{TZ}$  เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทั้งในบริเวณโซนด้านบนและด้านล่าง โดยในโซนด้านบนนั้นจะมีค่า  $C_{TZ}$  มากกว่าโซนด้านล่าง แต่ในโซนด้านล่างนั้นจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของ  $C_{TZ}$  มากกว่าโซนด้านบน 2)ในทางตรงกันข้าม หากทำการปิดผนังท้ายห้องลงมามากกว่า  $\delta$  แล้ว  $C_{TZ}$  ทั้งในโซนด้านบนและด้านล่าง จะมีค่าประมาณคงที่ที่เท่ากัน โดยไม่ขึ้นกับขนาดการปิด

### 5.1.3 สัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความกว้าง ( $C_{TS}$ )

ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความกว้าง ( $C_{TS}$ ) นี้ เป็นค่าที่แสดงถึงค่าอุณหภูมิ (ส่วนเกิน)เฉลี่ยตลอดความกว้างของห้องทดลอง ที่ตำแหน่งต่างๆภายในห้อง (ที่ตำแหน่ง  $x$  และ  $z$  ใดๆ ในรูปที่ 4.8(ก)) ซึ่งได้มาจากการนำค่าอุณหภูมิในรูปไร้มิติ  $C_T$  ที่วัดได้ในแต่ละระนาบทั้งหมด 3 ระนาบตลอดความกว้างของห้องทดลอง (ที่  $y$  เท่ากับ  $-10.5$ ,  $0$ , และ  $10.5$  cm) มาทำการหาค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธีการ Volume average ดังสมการที่ 4.7.2 ซึ่งในทุกกรณีการทดลองจะมีค่า Uncertainty ของ  $C_{TS}$  ไม่เกิน  $\pm 0.04$

กราฟรูปที่ 5.3 แสดงผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่อลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ที่บริเวณต่างๆ ตามแนว Streamwise โดยในแต่ละกราฟจะมีเส้นแนวระดับที่ตำแหน่ง  $z/H = 0.4$  แสดงขอบเขตระหว่างโซนด้านบนและด้านล่าง จากผลการทดลองพบว่า โดยภาพรวมแล้ว ที่ทุกตำแหน่ง  $x/L$  จะมีลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ที่บริเวณด้านล่างของห้องที่ค่อนข้างสม่ำเสมอตามแนวความสูงกว่าที่บริเวณด้านบนของห้อง

เมื่อพิจารณาผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่อค่า  $C_{TS}$  ที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.04$  จะพบว่า ในช่วงที่  $t/H$  มีค่าลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.76 ซึ่งก็คือช่วงที่ทำการปิดผนังท้ายห้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $\delta$  นั้น (กรณีเครื่องหมายโปร่งในกราฟ) ค่า  $C_{TS}$  ที่ระดับความสูงเดียวกันจะมีค่าแตกต่างกันเป็นอย่างมาก ในทางตรงกันข้าม เมื่อปิดผนังท้ายห้องมากกว่า  $\delta$  แล้ว ( $t/H$  น้อยกว่า 0.76, กรณีเครื่องหมายทึบในกราฟ)  $C_{TS}$  จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยเฉพาะที่บริเวณด้านล่างของห้อง ดังจะเห็นได้จาก ความแตกต่างของค่า  $C_{TS}$  บนเส้น A-A ดังแสดงในกราฟ ในช่วงกรณี P1.00 จนถึง P0.76 นั้นจะมีความแตกต่างกันมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในช่วงกรณี P0.76 จนถึง P0.08 เป็นต้น

สำหรับที่ตำแหน่ง  $x/L$  อื่นๆก็ให้ผลในลักษณะเดียวกัน ทั้งนี้ที่บริเวณด้านบนของห้องในตำแหน่ง  $x/L$  เท่ากับ 0.68 และ 0.96 นั้น จะมีบางกรณีที่ไม่ได้วัดอุณหภูมิละเอียดเหมือนกับที่ตำแหน่ง  $x/L$  อื่นๆ ยกตัวอย่างเช่น กรณี P1.00, P0.92 และ P0.76 เป็นต้น ดังนั้นในที่นี้จึงแสดงด้วยเส้นประในกราฟ

นอกจากนั้นเป็นที่น่าสังเกตว่า ที่ตำแหน่ง  $x/L$  เท่ากับ 0.68 จะมีลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ตั้งแต่กรณี P0.84 จนถึงกรณี P0.08 ที่มีลักษณะเว้าคล้ายท้องช้าง กล่าวคือ ค่า  $C_{TS}$  ที่บริเวณระดับตอนกลางของห้อง จะมีค่าต่ำกว่าที่บริเวณด้านบนและด้านล่างซึ่งอยู่ใกล้กับพื้นห้อง สันนิษฐานว่าเป็นเพราะ Wall jet ที่มีอุณหภูมิและความเร็วสูง ที่พุ่งออกมาจากช่องปล่อยอากาศเข้าบริเวณเพดานห้องนั้น จะมีโมเมนตัมมากพอที่เมื่อไหลไปปะทะกับผนังท้ายห้องอย่างรุนแรงแล้ว จะถูกหักเหทิศทางไหล โดยไหลไต่ดิ่งลงมาตามผนังท้ายห้อง ซึ่งจะมีลักษณะเป็น Wall jet ร้อนเช่นกัน และเมื่อ Wall jet ร้อนบนผนังท้ายห้องไหลพันขอบผนัง ก็จะมีโมเมนตัมในทิศทางเดิม คือทิศทางดิ่งลงสู่พื้นมากพอที่จะไหลปะทะกับพื้นห้อง ก่อให้เกิดลักษณะของ Impinging jet และเมื่อ Impinging jet นี้ปะทะพื้นห้องแล้ว จะทำให้เจ็ทอากาศร้อนบางส่วนไหลออกนอกห้องที่บริเวณช่องระบายอากาศออก และจะมีเจ็ทอากาศบางส่วนที่ไหลย้อนกลับเข้าไปภายในห้องเกิดเป็นลักษณะ Wall jet ร้อนขึ้นที่บริเวณพื้นห้องเช่นกัน ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิที่บริเวณผนังเพดานห้อง ผนังด้านท้ายห้อง และบริเวณผนังพื้นห้อง มีค่าสูงกว่าที่บริเวณตอนกลางของห้องและเกิดเป็นลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นแบบท้องช้าง และแบบสมมาตรโดยไม่ขึ้นกับขนาดการปิดในช่วงตั้งแต่กรณี P0.84 จนถึงกรณี P0.08 ซึ่งจากเหตุการณ์ดังกล่าวนี้ แสดงให้เห็นถึงการไหลลักษณะ Recirculation ที่เกิดขึ้นภายในห้อง ดังแสดงในรูปที่ 5.4

กราฟรูปที่ 5.5 แสดงการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ตามแนวความสูงของห้อง ( $z/H$ ) ที่แต่ละตำแหน่ง  $x/L$  เมื่อช่องเปิดท้ายห้องมีขนาดต่างๆกัน พบว่าที่ขนาดช่องเปิดหนึ่งๆนั้น เมื่อระยะตามแนว Streamwise เพิ่มขึ้นจะทำให้  $C_{TS\max}$  ซึ่งนิยามเป็นค่าสูงสุดของ  $C_{TS}$  ตลอดแนวความสูงของห้องที่ตำแหน่ง  $x/L$  ใดๆนั้นมียาลดลง และทำให้ที่บริเวณตอนกลางและด้านล่างของห้องมีค่า  $C_{TS}$  สูงขึ้น

เมื่อพิจารณาการปิดผนังท้ายห้องลงมาจากกรณี P0.76 จนถึง P0.08 นั้น ค่า  $C_{TS}$  ของกรณีการปิดท้ายห้องใดๆ (เปรียบเทียบในกราฟย่อยเดียวกัน) จะมีค่าประมาณคงที่หรือสม่ำเสมอตลอดแนวความยาวและความสูงของห้อง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีการปิดในช่วงดังกล่าว (เปรียบเทียบแต่ละกราฟย่อย จากกรณี P0.76 จนถึง P0.08) จะพบว่าค่า  $C_{TS}$  ที่มีความสม่ำเสมอตลอดแนวความยาวและความสูงนี้ จะมีค่าประมาณเท่ากันหรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.7–0.9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ระดับตอนกลางและตอนล่างของห้องจะมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งห้อง อันเนื่องจากการมี Recirculation ที่รุนแรงและมีขนาดใหญ่เกิดขึ้นดังกล่าว

จากผลการทดลองในส่วนของ  $C_{TS}$  นี้จึงสรุปได้ว่า ที่ความเร็วของอากาศนี้ ( $U_j = 4.4 \text{ m/s}$ ) 1)โดยภาพรวมแล้ว การกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ที่บริเวณด้านล่างของห้องจะมีความสม่ำเสมอตลอดแนวความสูงมากกว่าด้านบน 2)ที่ตำแหน่ง  $x/L$  ใดๆ การปิดผนังท้ายห้องจะมีผลต่อค่า  $C_{TS}$  เฉพาะในช่วงการปิดที่น้อยกว่า  $\delta$  โดยการปิดมากขึ้นจะทำให้  $C_{TS}$  มีค่าเพิ่มขึ้น 3)แต่หากปิดผนังท้ายห้องลงมามากกว่า  $\delta$  แล้ว  $C_{TS}$  จะมีค่าประมาณคงที่โดยไม่ขึ้นกับขนาดการปิด 4)การปิดผนังท้ายห้องลงมาในระดับหนึ่ง (ในกรณีนี้ปิดลงมามากกว่าเท่ากับกรณี P0.84) จะก่อให้เกิดการไหลแบบ Recirculation ขึ้นภายในห้อง โดยจะเกิด Wall jet อย่างต่อเนื่องตามผนังห้อง จากผนังด้านบนมายังผนังท้ายห้อง ลงสู่พื้นห้องแล้วไหลย้อนกลับเข้าไปในห้อง เป็นผลทำให้เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิตามความสูงที่มีลักษณะเป็นแบบทอ้งข้างขึ้น ที่ช่วงระยะ  $x/L$  หนึ่งด้านครึ่งท้ายห้อง (ในกรณีนี้ที่  $x/L = 0.68$ , ดูกราฟรูปที่ 5.3) 5)โดยทั่วไปแล้วเมื่อปิดผนังท้ายห้องลงมามากกว่า  $\delta$  แล้ว จะเกิด Recirculation ที่รุนแรงขึ้นภายในห้อง ทำให้อุณหภูมิภายในห้องโดยเฉพาะที่บริเวณด้านล่างนั้น ค่อนข้างจะสม่ำเสมอตลอดความยาวและความสูงของห้อง

#### 5.1.4 สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ ( $C_T$ )

ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ ( $C_T$ ) เป็นค่าอุณหภูมิในรูปแบบตัวแปรไร้มิติ ที่แสดงถึงค่าอุณหภูมิ (ส่วนเกิน)ที่แต่ละตำแหน่งภายในห้องในรูปของสัดส่วนของอุณหภูมิแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของเจ็ท ณ ตำแหน่งทางเข้าของห้องทดลอง ( $T_j$ ) และอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมขณะทำการทดลอง ( $T_{ref}$ ) ดังสมการที่ 4.7.1 ซึ่งในทุกกรณีการทดลองจะมีค่า Uncertainty ของ  $C_T$  ไม่เกิน  $\pm 0.04$

กราฟรูปที่ 5.6 แสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตามแนว Spanwise ที่อัตราส่วนของช่องเปิดด้านท้ายห้องต่างๆ คือ P1.00, P0.92, P0.76, P0.50, และ P0.08 โดยในที่นี้ตำแหน่งตามแนว Spanwise ที่ทำการวัด มีทั้งหมด 3 ตำแหน่ง คือ ที่  $y$  เท่ากับ  $-10.5$ ,  $0$ , และ  $10.5 \text{ cm}$

จากผลการทดลองพบว่า ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องมีลักษณะค่อนข้างเป็นแบบ 2 มิติ กล่าวคือ มีความสม่ำเสมอตลอดแนว Spanwise ที่ทุกขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง ดังจะเห็นได้จากการที่เส้นกราฟในแต่ละรูปค่อนข้างจะซ้อนทับกัน

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของ  $C_T$  ที่ตำแหน่ง  $x/L$  ใดๆ ขณะทำการปิดผนังท้ายห้องลงมากขึ้น (มองจากบนลงล่าง) ในช่วงเปิดหมดจนถึงปิดน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $\delta$  พบว่า การกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตามความสูงของห้องจะมีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้น โดยอุณหภูมิทางด้านล่างจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม สำหรับช่วงที่ปิดผนังด้านท้ายลงมามากกว่า  $\delta$  นั้นพบว่า แทบจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตามแนวความสูงเลย กล่าวคือ  $C_T$  จะมีค่าประมาณคงที่ตลอดความสูงของห้อง ที่เป็นดังนั้นก็เนื่องจากการเกิด Recirculation ขึ้นภายในห้องนั้น จะส่งผลให้อุณหภูมิมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดแนวความสูงของห้อง อย่างไรก็ตามสังเกตได้ว่าเมื่อปิดผนังมากขึ้นในช่วงนี้  $C_T$  ที่สม่ำเสมอ นั้น จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย



นอกจากนั้น เมื่อพิจารณาที่กรณีการเปิดผนังท้ายห้องหนึ่งๆ นั้น (มองจากซ้ายไปขวา) จะพบว่า ในช่วงการปิดผนังท้ายห้องน้อยกว่า  $\delta$  นั้น การกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตามแนวความสูงของห้องจะมีการเปลี่ยนแปลงตามทิศทางการไหล โดยอุณหภูมิทางด้านล่างจะสูงขึ้นเมื่อ  $x/L$  มากขึ้น ในทางตรงข้าม ในช่วงการปิดผนังท้ายห้องที่มากกว่า  $\delta$  จะมีการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตามแนวความสูงของห้องที่มีการเปลี่ยนแปลงตามทิศทางการไหลที่น้อยกว่า โดยลักษณะการกระจายของ  $C_T$  ตามความสูงนั้น จะเริ่มจากลักษณะที่ค่อนข้างสม่ำเสมอที่  $x/L = 0.04$  แล้วเป็นลักษณะแบบท้องช้างในช่วงกลางของห้อง ( $x/L = 0.36$  ถึง  $0.68$ ) และเริ่มกลับสู่ลักษณะสม่ำเสมอหรือท้องช้างกลับด้านอีกครั้งที่บริเวณปลายห้อง ( $x/L = 0.96$ )

กราฟรูปที่ 5.7 เป็นการแสดงผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่อค่า  $C_{T \max}$  ที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่างๆตามแนว Streamwise โดยในที่นี้พิจารณาเฉพาะที่ตำแหน่ง Center plane ( $y = 0$ ) เท่านั้น เนื่องจากการไหลมีลักษณะเป็นแบบ 2 มิติ จากผลการทดลองพบว่า ในช่วงที่ทำการปิดผนังท้ายห้องลงมาน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $\delta$  นั้น (คือช่วงที่  $t/H$  ลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.76) จะพบว่าค่า  $C_{T \max}$  นี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อ  $t/H$  มีค่าลดลง โดยเฉพาะที่ตำแหน่งท้ายห้อง ( $x/L$  เท่ากับ 0.68 และ 0.96) แต่สำหรับในช่วงที่ปิดผนังเกินกว่า  $\delta$  นั้น (คือช่วง  $t/H$  น้อยกว่า 0.76) ค่า  $C_{T \max}$  ที่ทุกขนาดช่องเปิด จะมีค่าประมาณคงที่ที่ทุกตำแหน่ง  $x/L$

จากผลการทดลองในส่วนของ  $C_T$  นี้จึงสรุปได้ว่า 1)ลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ที่ทุกขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้อง ค่อนข้างเป็นแบบ 2 มิติ 2)ในช่วงการปิดน้อยกว่า  $\delta$  พบว่า ที่ตำแหน่ง  $x/L$  ใดๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของ  $C_T$  ตามแนวความสูงมาก โดย  $C_T$  ที่ด้านล่างของห้องจะมีค่ามากขึ้น เมื่อขนาดการปิดมากขึ้น 3)ในทางตรงข้าม ในช่วงการปิดที่มากกว่า  $\delta$  เนื่องจากการเกิด Recirculation ทำให้อุณหภูมิภายในห้องค่อนข้างสม่ำเสมอตามความสูงและตามความยาวของห้อง จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของ  $C_T$  ตามความสูงมากนัก แม้ว่า จะทำการปิดมากขึ้นก็ตาม 4)เช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของ  $C_T$  ตามทิศทางการไหลที่ขนาดช่องเปิดใดๆ พบว่า จะมีการเปลี่ยนแปลงของ  $C_T$  ตามแนวความสูงมากเฉพาะในช่วงการปิดที่น้อยกว่า  $\delta$  5)ค่า  $C_{T \max}$  ที่ตำแหน่งต่างๆตามแนว Streamwise มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อ  $t/H$  มีค่าลดลงในช่วง 1.00 จนถึง 0.76 (ช่วง  $\delta$ ) และ 6)จะมีค่าประมาณคงที่โดยไม่ขึ้นกับขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง สำหรับในช่วงที่  $t/H$  มีค่าน้อยกว่า 0.76

จากการศึกษาผลกระทบของขนาดช่องระบายอากาศออกที่บริเวณท้ายห้องต่อลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นภายในห้องนี้ สามารถสรุปได้ว่า 1)การไหลภายในห้องค่อนข้างเป็นแบบ 2 มิติ ที่ทุกขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง 2)เมื่อทำการปิดผนังท้ายห้องลงมาน้อยกว่าหรือเท่ากับ ความหนาของ Wall jet ( $\delta$ ) แล้ว จะทำให้ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องแตก



ต่างกันเป็นอย่างมากระหว่างแต่ละขนาดช่องเปิด โดยเฉพาะที่บริเวณด้านล่างของห้อง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องจะขึ้นกับขนาดช่องเปิดในช่วงนี้ 3) แต่หากทำการปิดผนังลงมามากกว่าความหนาของ Wall jet แล้ว จะไม่ทำให้ลักษณะการไหลแตกต่างกันมากนัก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องจะไม่ขึ้นกับขนาดช่องเปิดในช่วงนี้ ทั้งนี้เพราะ 4) การปิดผนังด้านท้ายห้องลงมามากกว่าหรือเท่ากับความหนาของ Wall jet นั้น จะสามารถกั้นเจ็ทอากาศที่ถูกปล่อยออกมาได้เกือบทั้งหมด จึงทำให้อากาศที่ถูกปิดกั้นนั้นเกิดการไหลย้อนกลับเข้าไปภายในห้อง ส่งผลให้เกิดการไหลลักษณะ Recirculation ขึ้นภายในห้อง ดังนั้นหากทำการปิดผนังลงมามากกว่าความหนาของ Wall jet แล้ว ก็จะไม่ส่งผลหรือแทบจะไม่ส่งผลต่อลักษณะการไหลภายในห้องดังกล่าวเลย 5) ในทางตรงกันข้าม ถ้าปิดผนังลงมาในช่วงที่น้อยกว่าความหนาของ Wall jet แล้ว จะสามารถกั้นเจ็ทอากาศได้เพียงบางส่วน โดยความหนาของเจ็ทที่ถูกปิดกั้นนั้นจะขึ้นกับขนาดความสูงของผนังที่ปิดลงมา จึงทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเปลี่ยนไปตามขนาดความสูงของผนังที่ปิดลงมา

## 5.2 ผลกระทบของความเร็วอากาศควบคู่กับขนาดของช่องระบายอากาศออกที่บริเวณท้ายห้องต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้อง ในกรณีความเร็วบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้ามีค่าสูง ( $U_j = 4.4 \text{ m/s}$ ) และต่ำ ( $U_j = 0.5 \text{ m/s}$ )

การทดลองในส่วนนี้ เป็นการศึกษาผลกระทบของความเร็วเฉลี่ยที่บริเวณช่องปล่อยอากาศเข้า ( $U_j$ ) และขนาดของช่องระบายอากาศออกด้านท้ายห้อง ที่มีต่อลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศตามบริเวณต่างๆภายในห้อง โดยค่าความเร็วเฉลี่ยที่ใช้ทำการทดลองนี้มีทั้งหมด 2 ค่า ได้แก่ 0.5 และ 4.4 เมตรต่อวินาที และเมื่อนำมาคิดเป็นค่า Time scale,  $\tau$  ซึ่งนิยามเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างระยะทางการไหลของเจ็ทซึ่งมีค่าเท่ากับความยาวของห้องต่อความเร็วที่ทางออกของเจ็ท แล้วจะมีค่าเท่ากับ 2.0 และ 0.2 วินาทีตามลำดับ ซึ่งค่า  $\tau$  นี้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงระยะเวลา (Time scale) ที่อนุภาคของของไหลใช้ในการเดินทางจากบริเวณต้นห้องจนถึงท้ายห้อง และเพื่อให้เห็นภาพทางฟิสิกส์ชัดเจนยิ่งขึ้น ในบางครั้งจะใช้คำว่า “กรณีความเร็วต่ำ” และ “กรณีความเร็วสูง” แทนกรณี  $U_j$  เท่ากับ 0.5 และ 4.4 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ

สำหรับสภาวะที่ใช้ทำการทดลองในกรณีความเร็วเฉลี่ย 0.5 เมตรต่อวินาทีนั้นได้แก่ P1.00, P0.84, P0.68, P0.50, P0.24 และ P0.08 โดยตำแหน่งที่ใช้วัดอุณหภูมิในแนว Spanwise นั้น มีด้วยกันทั้งหมด 5 ตำแหน่ง คือที่  $y$  เท่ากับ -21.0, -10.5, 0, 10.5 และ 21.0 เซนติเมตรตามลำดับ สำหรับกรณีที่ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 4.4 เมตรต่อวินาทีนั้น จะเหมือนกับในหัวข้อที่ 5.1 ที่ผ่านมา

## 5.2.1 สัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉลี่ยโดยรวม ( $C_{TT}$ )

การทดลองส่วนนี้เป็นการดูผลของความเร็วเฉลี่ยที่บริเวณปากทางเข้า ต่ออุณหภูมิจเฉลี่ยโดยรวมภายในห้องที่แต่ละขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง

กราฟรูปที่ 5.8 แสดงผลของความเร็วเฉลี่ยที่บริเวณปากทางเข้า และขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้อง ที่มีต่อค่าอุณหภูมิจเฉลี่ยโดยรวมที่เกิดขึ้น โดยแสดงอยู่ในรูปของค่า  $C_{TT}$  เทียบกับขนาด  $t/H$  ที่  $U_j$  เท่ากับ 0.5 และ 4.4 เมตรต่อวินาที ซึ่งในทุกกรณีการทดลอง จะมีค่า Uncertainty ของ  $C_{TT}$  ไม่เกิน  $\pm 0.04$

จากกราฟพบว่า ในกรณีความเร็วต่ำนั้น ( $U_j = 0.5 \text{ m/s}$ ) เมื่อ  $t/H$  มีค่าลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.08 จะทำให้  $C_{TT}$  มีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะที่ค่อนข้างเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งแตกต่างไปจากกรณีความเร็วสูง ( $U_j = 4.4 \text{ m/s}$ ) ในกราฟรูปที่ 5.1 (นำมาเปรียบเทียบในกราฟรูปที่ 5.8 นี้) ที่พบว่า ค่า  $C_{TT}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณแบบเชิงเส้นเฉพาะในช่วงที่  $t/H$  มีค่าลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.76 หรือในช่วงการปิดผนังท้ายห้องที่น้อยกว่า  $\delta$  เท่านั้น

นอกจากนี้จะพบว่า ในกรณีความเร็วต่ำนั้นจะมีค่า  $C_{TT}$  ที่ต่ำกว่ากรณีความเร็วสูงที่ทุกค่าของ  $t/H$  ยกเว้นที่  $t/H = 1.0$  ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่ได้ปิดผนังท้ายห้องเลย ซึ่งทั้งสองกรณีต่างก็มีค่า  $C_{TT}$  ประมาณเท่ากันที่ประมาณเท่ากับ 0.2

จากการหาค่าความหนาของเจ็ท ( $\delta$ ) ที่ตำแหน่งท้ายห้อง ของกรณีที่ไม่ได้ปิดผนังท้ายห้องเลย โดยการดูจากค่า  $C_T / C_{T_{max}}$  ของทั้งกรณีความเร็วต่ำและสูงนั้น (ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในกราฟรูปที่ 5.13) พบว่า กรณีที่ทำการปิดผนังด้านท้ายลงมาอยู่ในช่วง  $\delta$  ของกรณีความเร็วสูง ( $\delta_H$ ) นั่นคือ กรณีที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องอยู่ในช่วง 0.76 จนถึง 0.68 และสำหรับกรณีความเร็วต่ำ ( $\delta_L$ ) นั่นก็คือ กรณีที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องอยู่ในช่วง 0.84 จนถึง 0.76

ดังนั้นจากผลการทดลองในส่วน  $C_{TT}$  นี้ จึงสรุปได้ว่า 1)กรณีความเร็วต่ำจะมีค่า  $C_{TT}$  แตกต่างจากกรณีความเร็วสูง โดยที่ในกรณีความเร็วต่ำนั้น  $C_{TT}$  จะมีค่าต่ำกว่ากรณีความเร็วสูง ที่ทุกขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง ยกเว้นกรณีที่เปิดผนังท้ายห้องทั้งหมด ซึ่งทั้งสองความเร็วจะมีค่า  $C_{TT}$  ประมาณเท่ากัน 2)กรณีความเร็วต่ำจะมีค่า  $C_{TT}$  เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตลอดช่วงการปิด แม้ว่าจะปิดลงมาเกิน  $\delta_L$  แล้วก็ตาม ในทางตรงกันข้าม 3)กรณีความเร็วสูงจะมีค่า  $C_{TT}$  เพิ่มขึ้นเฉพาะช่วงการปิดที่น้อยกว่า  $\delta_H$  เท่านั้น แต่เมื่อปิดเกิน  $\delta_H$  แล้ว  $C_{TT}$  จะมีค่าคงที่โดยไม่ขึ้นกับขนาดการปิด

### 5.2.2 สัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนโดยบริเวณ ( $C_{TZ}$ )

ส่วนนี้เป็นการแสดงผลของความเร็วเฉลี่ยที่บริเวณช่องปล่อยอากาศเข้าต่อค่าอุณหภูมิจนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นตามบริเวณต่างๆภายในห้อง โดยการสังเกตจากค่า  $C_{TZ}$  ที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณภายในห้อง

กราฟรูปที่ 5.9 แสดงผลของความเร็วเฉลี่ยที่บริเวณช่องปล่อยอากาศเข้าต่อค่าอุณหภูมิจนเฉลี่ยในแต่ละบริเวณที่โซนด้านบน (โซน 1-4) และด้านล่าง (โซน 5-8) ของห้อง โดยแสดงอยู่ในรูปของค่า  $C_{TZ}$  ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่างๆกัน จะพบว่าที่บริเวณด้านบนของห้องนั้น การเปลี่ยนแปลงของค่า  $C_{TZ}$  เทียบกับขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องในกรณีความเร็วต่ำจะมีลักษณะที่คล้ายกับในกรณีความเร็วสูง กล่าวคือ ที่ทั้งสองความเร็วนี้เมื่อทำการปิดผนังด้านท้ายห้องลงมาในช่วงความหนาของเจ็ท ( $\delta$ ) จะทำให้  $C_{TZ}$  มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อทำการปิดผนังด้านท้ายห้องลงมามากกว่า  $\delta$  แล้ว  $C_{TZ}$  จะมีค่าประมาณคงที่

ในทางตรงกันข้าม สำหรับที่บริเวณด้านล่างของห้อง จะพบว่า ในกรณีความเร็วต่ำจะมีลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิจนที่แตกต่างไปจากกรณีความเร็วสูง โดยที่บริเวณด้านล่างของกรณีความเร็วสูงนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่า  $C_{TZ}$  เทียบกับขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องคล้ายกับที่บริเวณด้านบน ในขณะที่บริเวณด้านล่างของกรณีความเร็วต่ำนั้น  $C_{TZ}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นแบบประมาณเชิงเส้นตลอดช่วงการปิด จากกรณีเปิดหมดจนถึงกรณีปิดเกือบหมด

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการเปลี่ยนแปลง  $C_{TZ}$  เทียบกับขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง ของกรณีความเร็วต่ำและสูง จะพบว่า 1)ที่บริเวณด้านบนของห้อง ทั้งสองกรณีความเร็วจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า  $C_{TZ}$  ที่ไม่แตกต่างกัน กล่าวคือในช่วงที่ทำการปิดผนังท้ายห้องลงมาน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $\delta$  นั้น ค่า  $C_{TZ}$  ของทั้งสองความเร็วจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดช่องเปิดมีค่าลดลง แต่เมื่อทำการปิดผนังลงมามากกว่า  $\delta$  แล้วค่า  $C_{TZ}$  ของทั้งสองความเร็วจะมีค่าประมาณคงที่ 2)ในทางตรงกันข้าม ที่บริเวณด้านล่างของห้องนั้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า  $C_{TZ}$  ของกรณีความเร็วต่ำและสูงจะแตกต่างกันโดย ในกรณีความเร็วต่ำจะมีค่า  $C_{TZ}$  เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อขนาดช่องเปิดมีค่าลดลง แต่ในทางตรงข้าม ในกรณีความเร็วสูงนั้น  $C_{TZ}$  จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายกับที่บริเวณด้านบน

จากผลการทดลองที่ได้สนับสนุนฐานว่า ในกรณีความเร็วสูงนั้น Wall jet ร้อนที่มีความเร็วสูง ที่พุ่งออกมาจากช่องปล่อยอากาศเข้าบริเวณเพดานห้องจะมีโมเมนตัมมากพอที่เมื่อไหลไปปะทะกับผนังท้ายห้องอย่างรุนแรงแล้ว จะถูกหักเหทิศทางไหล โดยไหลไต่ดิ่งลงมาตามผนังท้ายห้อง ซึ่งจะมีลักษณะเป็น Wall jet ร้อนเช่นกัน และเมื่อ Wall jet ร้อนบนผนังท้ายห้องไหลพันขอบผนัง ก็จะมีโมเมนตัมในทิศทางเดิม คือทิศทางดิ่งลงสู่พื้นมากพอที่จะไหลปะทะกับพื้นห้อง ก่อให้เกิดลักษณะของ Impinging jet และเมื่อ Impinging jet นี้ปะทะพื้นห้องแล้ว จะทำให้เจ็ทอากาศร้อนบางส่วนไหลออกนอกห้องที่บริเวณช่องระบายอากาศออก และจะมีเจ็ทอากาศ

บางส่วนที่ไหลย้อนกลับเข้าไปภายในห้องเกิดเป็นลักษณะ Wall jet ร้อนขึ้นที่บริเวณพื้นห้อง เช่นกัน ส่งผลให้เกิดการไหลลักษณะ Recirculation ที่รุนแรงขึ้นภายในห้อง (รูปที่ 5.10(ก)) จึงทำให้อุณหภูมิภายในห้องไม่แตกต่างกันมากนัก ไม่ว่าจะทำการปิดผนังด้านท้ายลงมามากกว่า  $\delta_H$  เท่าไรก็ตาม แต่ในทางตรงกันข้าม ในกรณีความเร็วต่ำนั้นเจ็ทอากาศร้อนที่พุ่งออกมาจากช่องปล่อยจะมีโมเมนตัมน้อย จึงไม่เกิดการชนปะทะกับผนังด้านท้ายอย่างรุนแรงนัก แต่เจ็ทจะค่อยๆไหลโค้งตัวต่ำลงมา และไหลลอดใต้ผนังด้านท้ายออกไปได้ ดังรูปที่ 5.10(ข) ดังนั้นการปิดผนังด้านท้ายห้องลงมาเกินกว่า  $\delta_L$  นี้ จึงส่งผลให้ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องจะยังคงแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับขนาดผนังท้ายห้องที่ปิดลงมา

### 5.2.3 สัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความกว้าง ( $C_{TS}$ )

ผลการทดลองส่วนนี้ เป็นการแสดงผลของความเร็วเฉลี่ยที่บริเวณปากทางเข้าและขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้องต่อค่าอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความกว้างของห้องที่เกิดขึ้นตามตำแหน่ง  $x/L$  ต่างๆภายในห้อง โดยในทุกกรณีการทดลองนั้นจะมีค่า Uncertainty ของ  $C_{TS}$  ไม่เกิน  $\pm 0.04$

กราฟรูปที่ 5.11 แสดงการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ตามแนวความสูงของห้อง ( $z/H$ ) ที่แต่ละตำแหน่ง  $x/L$  และแต่ละขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้องในของกรณีความเร็วต่ำ (เปรียบเทียบกับผลการทดลองของกรณีความเร็วสูงในกราฟรูปที่ 5.5) โดยค่า  $C_{TS}$  ในกรณีนี้นั้น ได้จากการหาค่าเฉลี่ยผลการวัดอุณหภูมิทั้งหมด 5 ระบาย อันได้แก่ ที่  $y = -21.0, -10.5, 0, 10.5,$  และ  $21.0$  cm ดังแสดงในรูปที่ 4.8(ก)

จากผลการทดลองพบว่า ที่ขนาดช่องเปิดหนึ่งๆนั้นเมื่อระยะ  $x/L$  เพิ่มขึ้น จะทำให้  $C_{TS \max}$  มีค่าลดลง และตำแหน่งที่เกิดค่า  $C_{TS \max}$  ที่ทุกตำแหน่ง  $x/L$  นั้นจะลดต่ำลงด้วย (ยกเว้นที่ P1.00 ซึ่งตำแหน่งที่เกิดค่า  $C_{TS \max}$  นั้นจะอยู่ที่ระดับประมาณเดียวกัน)

เมื่อเปรียบเทียบที่ขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน (เปรียบเทียบแต่ละกราฟย่อย) โดยพิจารณาจากกรณีเปิดหมด (P1.00) จนถึงกรณีที่ปิดผนังท้ายห้องเกือบหมด (P0.08) จะพบว่าค่า  $C_{TS}$  ที่ระดับตอนกลางและด้านล่างของห้องจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่กรณี P1.00 จนถึง P0.08 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในกรณีความเร็วต่ำนี้ แม้จะทำการปิดผนังท้ายห้องลงมาเกินความหนาของเจ็ทแล้วก็ตาม ก็ยังคงทำให้การกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ตามแนวความสูงของห้องแตกต่างกันออกไปที่แต่ละขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้อง (เปรียบเทียบกับกราฟรูปที่ 5.5)

จากการเปรียบเทียบกราฟรูปที่ 5.5 และ 5.11 จะพบว่า กรณีความเร็วสูง ลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  จะมีความสม่ำเสมอตามแนวความสูงของห้องมากกว่าในกรณีความเร็วต่ำ โดยเฉพาะเมื่อทำการปิดผนังด้านท้ายลงมามากกว่า  $\delta_H$  เป็นต้นไป



จากผลการทดลองในส่วนของ  $C_{TS}$  นี้จึงสรุปได้ว่า 1) ในช่วงที่ทำการปิดผนังท้ายห้องลงมา น้อยกว่าหรือเท่ากับความหนาของเจ็ทนั้น ทั้งในกรณีความเร็วต่ำและสูง ต่างก็มีลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ที่ไม่สม่ำเสมอตามแนวความสูงของห้องประมาณกัน ที่ทุกระยะ  $x/L$  2) แต่ในช่วงที่ทำการปิดผนังลงมามากกว่าความหนาของเจ็ทแล้วนั้น กรณีความเร็วต่ำจะมีความสม่ำเสมอของค่า  $C_{TS}$  ตามแนวความสูงของห้อง ที่น้อยกว่ากรณีความเร็วสูงอย่างเห็นได้ชัด ที่ทุกระยะ  $x/L$  โดยเฉพาะที่ระดับตอนกลางและด้านล่างของห้อง สันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากการที่ในกรณีความเร็วต่ำนั้น ไม่เกิดหรือเกิด Recirculation ที่ไม่รุนแรงเท่ากับในกรณีความเร็วสูง จึงทำให้ไม่มีกระบวนการถ่ายเทแบบนำพาความร้อนจากเจ็ทกระจายเข้าสู่ห้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 5.2.4 สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ ( $C_T$ )

ผลการทดลองส่วนนี้เป็นการแสดงผลของความเร็วเฉลี่ยที่บริเวณปากทางเข้า และขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง ที่มีต่อค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นตามจุดต่างๆภายในห้อง โดยสังเกตจากค่า  $C_T$  ที่เกิดขึ้นตามจุดต่างๆภายในห้อง ซึ่งในทุกกรณีการทดลองนั้นจะมีค่า Uncertainty ของ  $C_T$  ไม่เกิน  $\pm 0.04$

กราฟรูปที่ 5.12 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนว Spanwise ในรูปตัวแปรไร้มิติ  $C_T$  ที่บริเวณต่างๆภายในห้องของกรณี  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$  เมื่อขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่าต่างๆกัน จากผลการทดลองพบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องที่ทุกกรณีช่องเปิดนั้น จะมีลักษณะเป็นแบบ 2 มิติ โดยสังเกตได้จาก การที่อุณหภูมิมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดแนวความกว้างของห้อง ทำให้เส้นกราฟที่แต่ละตำแหน่ง  $y$  นั้นค่อนข้างจะซ้อนทับกันสนิท ในทุกๆกราฟย่อย

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในกรณี  $U_j = 4.4 \text{ m/s}$  (กราฟรูปที่ 5.6) จะพบว่าโดยภาพรวมแล้วลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$  จะมีความเป็น 2 มิติมากกว่าที่  $U_j = 4.4 \text{ m/s}$  ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองที่ P0.76, P0.50 และ P0.08 ของกรณี  $U_j = 4.4 \text{ m/s}$  ซึ่งมีค่าอุณหภูมิที่แต่ละตำแหน่ง  $y$  นั้นแตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณี  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$  ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ การไหลในกรณี  $U_j = 4.4 \text{ m/s}$  นี้มีระดับความปั่นป่วนที่สูงกว่าในกรณี  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$

เนื่องจากจะเห็นได้ว่า ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องที่ความเร็วเฉลี่ยทั้ง 2 ค่านี้ จะมีลักษณะค่อนข้างเป็นแบบ 2 มิติ ดังนั้นในผลการทดลองส่วนถัดไปของหัวข้อนี้จึงพิจารณาเฉพาะที่ตำแหน่ง Center plane (ที่  $y = 0$ ) เท่านั้น

กราฟรูปที่ 5.13 เปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในรูป  $C_T/C_{T_{\max}}$  ที่ตำแหน่ง Center plane ของกรณี  $U_j$  เท่ากับ 0.5 และ 4.4 เมตรต่อวินาที เมื่ออัตราส่วนของ



ขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องที่ค่าเท่ากับ 1.00 จะพบว่า ความหนาของ Wall jet ( $\delta$ ) ที่ตำแหน่งท้ายห้อง ( $x/L = 0.96$ ) ของกรณี  $U_j$  เท่ากับ 0.5 และ 4.4 เมตรต่อวินาที มีค่าประมาณอยู่ในช่วง 2h-3h และ 3h-4h ( $z/H$  เท่ากับ 0.16-0.24 และ 0.24-0.32) ตามลำดับ (เมื่อ h คือความกว้างของช่องปล่อยอากาศเข้าที่มีขนาดเท่ากับ 4 เซนติเมตร) โดยในที่นี้ถือว่าความหนาของ Wall jet คือระยะที่วัดจากเพดานห้องลงมาถึงระดับที่มีค่า  $C_T/C_{T\max}$  เท่ากับ 0.6 โดยประมาณ สำหรับสาเหตุที่กำหนดให้ความหนาของ Wall jet ในที่นี้เป็นมีค่าเป็นช่วง ก็เนื่องจากความละเอียดในการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งดังกล่าวนี้มีค่าเท่ากับ 2h นั้นเอง ดังแสดงในรูปที่ 4.8(ก)

ดังนั้นกรณีที่ทำให้การปิดผนังด้านท้ายลงมาเท่ากับ  $\delta$  ที่ความเร็วเฉลี่ย 0.5 และ 4.4 เมตรต่อวินาทีนั้นก็คือ กรณีที่ทำให้การปิดผนังด้านท้ายลงมาจากเพดานในช่วง 2h-3h และ 3h-4h ตามลำดับ ซึ่งตรงกับกรณีที่ทำให้การเปิดผนังด้านท้ายห้องในช่วง 10.5h-9.5h และ 9.5h-8.5h ซึ่งนั่นก็คือช่วงกรณี P0.84-P0.76 และ P0.76-P0.68 ตามลำดับ

กราฟรูปที่ 5.14 เป็นการเปรียบเทียบผลของความเร็วเฉลี่ยที่บริเวณช่องปล่อยอากาศเข้าและขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง โดยดูจากลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศในตำแหน่ง Center plane ที่  $x/L$  ต่างๆ ซึ่งผลการทดลองในที่นี้จะแสดงอยู่ในรูปของค่า  $C_T$  ที่ระดับความสูง  $z/H$  ต่างๆกัน

จากผลการทดลองพบว่า ในกรณีความเร็วสูง ( $U_j = 4.4 \text{ m/s}$ ) เมื่อทำการปิดผนังท้ายห้องลงมาน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $\delta_H$  (P1.00-P0.76) จะมีลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่แต่ละขนาดช่องเปิดแตกต่างกันเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอุณหภูมิที่บริเวณตอนกลางและตอนล่างของห้อง แต่เมื่อทำการปิดผนังลงมามากกว่า  $\delta_H$  แล้ว (P0.76-P0.08) ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่แต่ละขนาดช่องเปิดจะแตกต่างกันน้อยกว่า ดังจะเห็นได้จากความแตกต่างของค่า  $C_T$  บนเส้น C-C ที่  $x/L = 0.04$  ในช่วง P1.00 ถึง P0.76 นั้น จะมีความแตกต่างกันมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในช่วงกรณี P0.76 จนถึง P0.08 เป็นต้น

ในทางตรงกันข้ามสำหรับกรณีความเร็วต่ำนั้น ( $U_j = 0.5 \text{ m/s}$ ) พบว่าลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่แต่ละขนาดช่องเปิดนั้น จะยังคงแตกต่างกันแม้ว่าจะทำการปิดผนังด้านท้ายห้องลงมามากกว่า  $\delta_L$  แล้วก็ตาม ซึ่งสังเกตได้จากค่า  $C_T$  บนเส้น B-B ที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่กรณี P1.00 จนถึง P0.08

นอกจากนี้ในกรณีความเร็วสูงนั้นจะสังเกตเห็นการเกิด Recirculation ที่รุนแรงขึ้นภายในห้องตั้งแต่กรณี P0.84 จนถึงกรณี P0.08 โดยสังเกตได้จาก ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ ที่ตำแหน่ง  $x/L$  เท่ากับ 0.68 ซึ่งมีลักษณะเว้าคล้ายท้องช้าง กล่าวคือ ค่า  $C_T$  ที่บริเวณระดับตอนกลางของห้องจะมีค่าต่ำกว่าที่บริเวณด้านบนและบริเวณใกล้กับพื้นห้อง ซึ่งแตกต่างไปจากกรณีความเร็วต่ำที่ไม่พบปรากฏการณ์ลักษณะดังกล่าว ที่เป็นเช่นนี้เพราะในกรณีความเร็วสูงนั้น Wall jet ที่มีอุณหภูมิและความเร็วสูง ที่พุ่งออกมาจากช่องปล่อยอากาศเข้าบริเวณเพดานห้องนั้น จะมีโมเมนตัมมากพอที่เมื่อไหลไปปะทะกับผนังท้ายห้องอย่างรุนแรง

แล้วจะถูกหักเหทิศทางการไหล โดยไหลไต่ดิ่งลงมาตามผนังท้ายห้อง ซึ่งจะมีลักษณะเป็น Wall jet ร้อนเช่นกัน และเมื่อ Wall jet ร้อนบนผนังท้ายห้องไหลพันขอบผนังก็จะมีโมเมนตัมในทิศทางเดิมคือทิศทางดิ่งลงสู่พื้นมากพอที่จะไหลลงปะทะกับพื้นห้อง ก่อให้เกิดลักษณะของ Impinging jet และเมื่อ Impinging jet นี้ปะทะพื้นห้องแล้ว จะทำให้เจ็ทอากาศร้อนบางส่วนไหลออกนอกห้องที่บริเวณช่องระบายอากาศออก และจะมีเจ็ทอากาศบางส่วนที่ไหลย้อนกลับเข้าไปภายในห้องเกิดเป็นลักษณะ Wall jet ร้อนขึ้นที่บริเวณพื้นห้องเช่นกัน ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิที่บริเวณผนังเพดานห้อง ผนังด้านท้ายห้อง และบริเวณผนังพื้นห้อง มีค่าสูงกว่าที่บริเวณตอนกลางของห้องและเกิดเป็นลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นแบบท้องช้าง และแบบสมมาตรโดยไม่ขึ้นกับขนาดการปิดเมื่อทำการปิดเกินค่า  $\delta_H$  ดังกล่าว ในทางตรงกันข้าม เนื่องจากในกรณีความเร็วต่ำมีโมเมนตัมน้อยกว่า จึงทำให้ได้รับอิทธิพลของ Adverse pressure gradient อันเนื่องจากการปิดผนังด้านท้าย มากกว่าในกรณีความเร็วสูง และเจ็ทสามารถหักเหทิศทางการไหลลอดไปทางช่องระบายอากาศออกที่อยู่ใต้ผนังท้ายห้องนี้ได้ง่ายกว่าเมื่อขนาดการปิดน้อย และยากขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อขนาดการปิดมากขึ้น จึงส่งผลให้ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิต่างกันตามการเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องเปิด

กราฟรูปที่ 5.15 เป็นการเปรียบเทียบผลของความเร็วเฉลี่ยบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้า โดยพิจารณาจากลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่ง  $x/L$  ต่างๆกันในบริเวณ Center plane เมื่อขนาดช่องเปิดท้ายห้องมีค่าเท่ากับ P0.08, P0.50, P0.84 และ P1.00 ตามลำดับ โดยแสดงอยู่ในรูปของค่า  $C_T$  ที่ระดับความสูง  $z/H$  ต่างๆภายในห้อง

พบว่าที่ P1.00 นั้น (กราฟแถวบนสุด) การกระจายตัวของอุณหภูมิในกรณีความเร็วต่ำและสูงจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน แต่แตกต่างกันตรงที่กรณีความเร็วสูงนั้นจะมีอัตราการลดลงตามแนวการไหลของค่าอุณหภูมิสูงสุด ( $C_{Tmax}$ ) ที่มากกว่ากรณีความเร็วต่ำ (มองกราฟจากซ้ายไปขวา) และที่บริเวณท้ายห้องในตำแหน่ง  $x/L = 0.96$  นั้น จะเห็นได้ว่าในกรณีความเร็วสูงจะมีความหนาของ Wall jet ที่มากกว่าในกรณีความเร็วต่ำ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในกราฟรูปที่ 5.13

ที่ P0.84 จะพบว่าอุณหภูมิที่บริเวณตอนกลางและด้านล่างของห้องในกรณีความเร็วสูงนั้นจะมีค่ามากกว่ากรณีความเร็วต่ำเป็นอย่างมากดังจะเห็นได้จากความแตกต่างของค่า  $C_T$  ที่เกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าว สำหรับค่า  $C_{Tmax}$  ที่แต่ละตำแหน่ง  $x/L$  นั้น พบว่าในกรณีความเร็วสูงจะมีค่าประมาณเท่ากับกรณีความเร็วต่ำเฉพาะที่บริเวณต้นห้อง ( $x/L = 0.06$  และ  $0.36$ ) แต่ที่บริเวณท้ายห้อง ( $x/L$  เท่ากับ  $0.68$  และ  $0.96$ ) นั้นกรณีความเร็วสูงจะมีค่าน้อยกว่ากรณีความเร็วต่ำ โดยเฉพาะที่  $x/L$  เท่ากับ  $0.68$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในกรณีความเร็วสูงนั้น ค่า  $C_{Tmax}$  จะลดลงอย่างรวดเร็วตามแนวการไหล จนทำให้มีค่าต่ำกว่ากรณีความเร็วต่ำ ที่บริเวณท้ายห้อง ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะ ในกรณีความเร็วสูงนั้นเจ็ทสามารถดึงเอาอากาศรอบข้างเข้ามาผสมได้ดีกว่า อันเนื่องจากผลของความปั่นป่วนที่มีมากกว่าในกรณีความเร็วต่ำนั่นเอง

สำหรับที่ P0.50 นั้น กรณีความเร็วสูงจะมีค่าอุณหภูมิสูงกว่ากรณีความเร็วต่ำทั้งที่บริเวณด้านบนและด้านล่างของห้อง รวมทั้งจะมีค่าอุณหภูมิสูงสุดมากกว่าในกรณีความเร็วต่ำที่ทุกระยะ  $x/L$  ด้วย นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า กรณีความเร็วสูงนั้นจะมีลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ระดับตอนกลางและด้านล่างของห้องที่สม่ำเสมอกว่าในกรณีความเร็วต่ำ

สำหรับที่ P0.08 นั้น พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่ P0.50 แต่แตกต่างกันที่กรณีความเร็วสูงจะมีค่าอุณหภูมิสูงสุดที่แต่ละตำแหน่ง  $x/L$  นั้นประมาณเท่ากับหรือน้อยกว่าความเร็วต่ำ รวมทั้งจะเห็นได้ว่า ความแตกต่างของอุณหภูมิที่บริเวณด้านล่างของห้องของทั้ง 2 ความเร็ว นั้นลดน้อยลงกว่าที่ P0.50 เนื่องจากอุณหภูมิในกรณีความเร็วต่ำที่ขนาดช่องเปิดนี้มีค่าสูงขึ้น

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ที่ทุกอัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายยกเว้นกรณีที่ไม่ได้ปิดผนังท้ายห้องเลย P1.00 นั้น กรณีความเร็วสูงจะมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่บริเวณด้านล่างของห้องสูง และค่อนข้างสม่ำเสมอกว่ากรณีความเร็วต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ที่กรณีความเร็วสูงนั้นเกิด Recirculation ที่มีกำลังสูงกว่าในกรณีความเร็วต่ำ จึงส่งผลให้มีลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิดังกล่าว

กราฟรูปที่ 5.16 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง  $x/L$  ต่างๆกันในบริเวณ Center plane เมื่อขนาดช่องเปิดด้านท้ายมีค่าต่างๆกันของทั้งสองกรณีความเร็ว พบว่าลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวตั้ง (แกน  $z$ ) ที่ทุกตำแหน่ง  $x/L$  ของกรณีความเร็วสูง จะมีความสม่ำเสมอมากกว่าในกรณีความเร็วต่ำ ยกเว้นที่ P1.00 ซึ่งทั้ง 2 ความเร็วนี้มีลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากที่ P1.00 นั้นเป็นกรณีเปิดผนังท้ายห้องทั้งหมด จึงทำให้การไหลที่ความเร็วทั้งสองต่างก็มีลักษณะเป็นแบบกึ่ง Wall jet ทั้งคู่ ในขณะที่เมื่อเริ่มมีการปิดผนังท้ายห้องลงมา ก็จะเริ่มมี Recirculation เกิดขึ้น ซึ่งกำลังของการไหลแบบ Recirculation นี้ จะขึ้นอยู่กับความเร็วของเจ็ทที่พุ่งออกมา จึงทำให้  $C_T$ -profile ที่ความเร็วทั้งสองแตกต่างกันดังกล่าว

อย่างไรก็ตามจะพบว่า ที่ความเร็วทั้งสองนี้ เมื่อระยะในแนวการไหล (ระยะ  $x$ ) เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าอุณหภูมิสูงสุด ( $C_{T\max}$ ) ลดลง และทำให้ตำแหน่งที่เกิดค่าอุณหภูมิสูงสุดนั้นลดต่ำลงด้วย โดยเฉพาะในกรณีที่ขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่าน้อยๆ ที่เป็นดังนี้สันนิษฐานว่า การปิดผนังท้ายห้องนั้น ทำให้เกิด Adverse pressure gradient ตามแนวการไหล ดังนั้น Wall jet ที่เกิดขึ้นบริเวณเพดานห้องจะโค้งและขยายตัวลงทางด้านล่างของห้อง ทำให้ตำแหน่งการเกิด  $C_{T\max}$  ลดต่ำลง ลักษณะนี้จะเห็นได้ชัดเจนมากกว่าในกรณีความเร็วต่ำ เนื่องจากในกรณีความเร็วต่ำนี้ มีโมเมนตัมตามแนวการไหลที่น้อยกว่า ดังนั้น การเบี่ยงเบนทิศทางจึงเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าดังแสดงในรูปที่ 5.17

กราฟรูปที่ 5.18 เป็นการเปรียบเทียบผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่อค่าอุณหภูมิสูงสุด ( $C_{T\max}$ ) ที่แต่ละตำแหน่งตามแนวการไหล ในบริเวณ Center plane เมื่อความเร็วเฉลี่ย

บริเวณช่องปล่อยอากาศเข้ามีค่าเท่ากับ 0.5 และ 4.4 เมตรต่อวินาที พบว่าในช่วงที่ทำการปิดผนังด้านท้ายลงมาน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $\delta$  นั้น ( $t/H$  ในช่วง 1.00 จนถึง 0.80 ในกรณีความเร็วต่ำ และ 1.00 จนถึง 0.75 ในกรณีความเร็วสูง โดยประมาณ) พบว่าในกรณีความเร็วสูงจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า  $C_{T\max}$  ต่อค่า  $t/H$  มากกว่าในกรณีความเร็วต่ำ โดยค่า  $C_{T\max}$  ที่ทั้งสองความเร็วนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ  $t/H$  มีค่าลดลง โดยเฉพาะที่ตำแหน่งท้ายห้อง ( $x/L = 0.68$  และ 0.96) สำหรับในช่วงที่ปิดผนังลงมากเกินกว่า  $\delta$  นั้น ค่า  $C_{T\max}$  ที่ทุกตำแหน่ง  $x/L$  จะมีค่าประมาณคงที่โดยไม่ขึ้นกับขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง

สำหรับกราฟรูปที่ 5.19 เป็นการดูผลของระยะ  $x/L$  ต่อค่า  $C_{T\max}$  ในตำแหน่ง Center plane ที่แต่ละขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง เมื่อความเร็วเฉลี่ยบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้ามีค่าเท่ากับ 0.5 และ 4.4 เมตรต่อวินาที

พบว่าทั้งในกรณีความเร็วต่ำและสูงนั้น ค่า  $C_{T\max}$  ที่บริเวณตอนกลางและด้านท้ายของห้อง ( $x/L = 0.36, 0.68$  และ 0.96) จะขึ้นอยู่กับขนาดของช่องระบายอากาศออกในช่วงที่ทำการปิดผนังท้ายห้องลงมาน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $\delta$  เช่นเดียวกับที่พบในกราฟรูปที่ 5.18 โดยในกรณี  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$  นั้น ค่า  $C_{T\max}$  ที่แต่ละตำแหน่ง  $x/L$  โดยเฉพาะที่  $x/L = 0.68$  และ 0.96 นั้นจะมีค่าแตกต่างกันเป็นอย่างมากในช่วงที่  $t/H$  ลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.84 เมื่อเปรียบเทียบกับความแตกต่างที่เกิดขึ้นในช่วง  $t/H$  มีค่าน้อยกว่า 0.84 สำหรับของกรณี  $U_j = 4.4 \text{ m/s}$  นั้นก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกันในช่วง  $t/H$  จาก 1.00 ถึง 0.76

นอกจากนี้ยังพบว่า ในกรณีที่ไม่ได้ปิดผนังท้ายห้องเลยนั้น ( $t/H=1.00$ ) กรณีความเร็วสูงจะมีอัตราการลดลงของค่า  $C_{T\max}$  ตามแนวการไหล มากกว่ากรณีความเร็วต่ำ อย่างไรก็ตาม ค่า  $C_{T\max}$  ของความเร็วทั้งสองนี้ จะมีค่าลดลงเมื่อระยะ  $x/L$  เพิ่มมากขึ้น ที่ทุกขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ที่ความเร็วทั้งสองนี้ เมื่อระยะตามแนวการไหลเพิ่มขึ้น จะทำให้เจ็ทอากาศร้อนสามารถดึงเอาอากาศรอบข้างเข้ามาผสมได้มากยิ่งขึ้น จึงส่งผลให้  $C_{T\max}$  มีค่าลดลงดังกล่าว

จากผลการทดลองในส่วนของ  $C_T$  นี้จึงสรุปได้ว่า 1)การกระจายตัวของค่า  $C_T$  ของทั้งกรณีความเร็วต่ำและสูงนั้น มีลักษณะเป็นแบบ 2 มิติ คือ มีความสม่ำเสมอตลอดแนวความกว้างของห้อง 2)กรณีความเร็วสูง จะมีลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตามแนวความสูง (แกน  $z$ ) และตามแนวความยาวของห้อง (แกน  $x$ ) ที่สม่ำเสมอว่าในกรณีความเร็วต่ำ ที่ทุกขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้อง ยกเว้นที่ P1.00 ซึ่งทั้ง 2 ความเร็วมีลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไม่แตกต่างกันมากนัก 3)ในช่วงที่ปิดผนังด้านท้ายลงมาน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $\delta$  นั้น ค่า  $C_{T\max}$  ที่บริเวณกลางห้องและท้ายห้อง ( $x/L = 0.36, 0.68$  และ 0.96) ของกรณีความเร็วสูงจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่สูงกว่ากรณีความเร็วต่ำ เมื่อขนาดช่องเปิดท้ายห้องมีค่าลดลง 4)ในกรณีที่ไม่ได้ปิดผนัง



ท้ายห้องเลยนั้น ( $t/H=1.00$ ) กรณีความเร็วสูงจะมีอัตราการลดลงของค่า  $C_{T \max}$  ตามแนวการไหล มากกว่ากรณีความเร็วต่ำ

จากการศึกษาผลกระทบของความเร็วอากาศควบคู่กับขนาดของช่องระบายอากาศออกที่บริเวณท้ายห้อง สำหรับกรณีที่ไม่ใช่ Lobed nozzle นี้สามารถสรุปได้ว่า 1) ทั้งในกรณีความเร็วต่ำและสูง การไหลภายในห้องค่อนข้างเป็นแบบ 2 มิติที่ทุกขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง 2) กรณีความเร็วสูงจะมีค่า  $C_{TT}$  ที่สูงกว่ากรณีความเร็วต่ำ ที่ทุกขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง ยกเว้นกรณีที่ไม่ได้ปิดผนังท้ายห้องเลย ซึ่งทั้งสองความเร็วจะมีค่า  $C_{TT}$  ประมาณเท่ากัน 3) กรณีความเร็วสูง จะมีลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวความสูง (แกน z) และตามแนวความยาวของห้อง (แกน x) ที่สม่ำเสมอกว่าในกรณีความเร็วต่ำ ที่ทุกขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง ยกเว้นกรณีที่ไม่ได้ปิดผนังท้ายห้องเลย ซึ่งทั้ง 2 ความเร็วมีลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไม่แตกต่างกันมากนัก 4) ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละโซนที่บริเวณด้านบนของห้อง เมื่อทำการปิดผนังท้ายห้องลงมาเกินกว่า  $\delta$  นั้น จะไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วที่บริเวณช่องปล่อยอากาศเข้า 5) ในทางตรงข้าม ที่บริเวณด้านล่างของห้องเมื่อทำการปิดผนังท้ายห้องลงมาเกินกว่า  $\delta$  นั้น ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละโซนจะขึ้นอยู่กับความเร็วที่บริเวณช่องปล่อยอากาศเข้า โดยหากเป็นกรณีความเร็วสูง ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจะไม่ขึ้นกับขนาดของช่องเปิดด้านท้าย แต่หากเป็นกรณีความเร็วต่ำ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละโซนจะแปรผกผันแบบเชิงเส้นกับขนาดช่องเปิดด้านท้าย 6) สำหรับการปิดผนังด้านท้ายในช่วงที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ  $\delta$  นั้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับขนาดของช่องเปิดท้ายห้องที่ความเร็วทั้งสองนั้น ต่างก็ขึ้นอยู่กับขนาดของช่องเปิดท้ายห้องทั้งสิ้น โดยค่า  $C_{TT}$  และ  $C_{TZ}$  ทั้งที่บริเวณด้านบนและด้านล่างของห้อง จะมีค่าเพิ่มขึ้นแบบประมาณเชิงเส้นเมื่อขนาดช่องเปิดมีค่าลดลง 7) ทั้งกรณีความเร็วต่ำและสูงนั้น เมื่อระยะตามแนวการไหลเพิ่มขึ้น จะทำให้  $C_T$ -profile มีความเต็มรูปลงมาทางด้านล่างของห้องมากยิ่งขึ้น ( $C_T$ -profile ปานขึ้น) 8) รวมทั้งเมื่อขนาดช่องเปิดท้ายห้องมีค่าลดลง ทั้งสองกรณีความเร็วต่างก็จะมี  $C_T$ -profile ที่ปานขึ้นด้วย โดยที่ช่องเปิดหนึ่งๆนั้น กรณีความเร็วสูงจะมี  $C_T$ -profile ที่ปานกว่ากรณีความเร็วต่ำ โดยเฉพาะเมื่อขนาดช่องเปิดท้ายห้องมีค่าน้อยกว่า  $P0.84$  ลงมา อันเนื่องจากการเกิด Recirculation ที่มีกำลังรุนแรง และขนาดใหญ่กว่ากรณีความเร็วต่ำ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะ 9) ลักษณะและขนาดของการไหลแบบ Recirculation ที่เกิดขึ้นภายในห้อง จะขึ้นอยู่กับความเร็วของอากาศบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้า โดยในกรณีความเร็วสูง ( $U_j = 4.4 \text{ m/s}$ ) จะเกิด Recirculation ที่มีกำลังสูง และขนาดใหญ่กว่ากรณีความเร็วต่ำ ( $U_j = 0.5 \text{ m/s}$ ) เนื่องจากเจ็ทอากาศในกรณีความเร็วสูงจะมีโมเมนตัมมากกว่ากรณีความเร็วต่ำ ซึ่งเมื่อปะทะกับผนังท้ายห้องแล้วจะเกิดการไหลย้อนกลับเข้าไปภายในห้องอย่างรุนแรงกว่า จึงทำให้เกิดการไหลแบบ Recirculation ที่มีกำลังรุนแรง และขนาดใหญ่กว่ากรณีความเร็วต่ำ ส่งผลให้  $C_T$ -profile ของกรณีความเร็วสูงนั้นปานกว่า หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ มีความเต็มรูปลงมาทางด้านล่างมากกว่ากรณีความเร็วต่ำ



### 5.3 ผลกระทบของการใช้ Lobed nozzle ควบคุมกับขนาดของช่องระบายอากาศออกที่บริเวณท้ายห้องต่อการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในห้อง ในกรณีความเร็วบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้ามีค่าต่ำ ( $U_j = 0.5 \text{ m/s}$ )

การทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบของการใช้ Lobed nozzle ที่บริเวณปากทางออกของช่องปล่อยอากาศเข้าต่อลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันอากาศตามบริเวณต่างๆภายในห้อง โดยทำการแปรเปลี่ยนขนาดของช่องระบายอากาศออกด้านท้ายห้องต่างๆกัน ซึ่งค่าความเร็วเฉลี่ยที่บริเวณทางเข้าห้องของการทดลองส่วนนี้นั้นมีค่าเท่ากับ 0.5 เมตรต่อวินาที ( $U_j = 0.5 \text{ m/s}$ ) สำหรับ Lobed nozzle ที่ใช้ติดบริเวณปากทางออกของช่องปล่อยอากาศเข้านี้มีด้วยกันทั้งหมด 8 แบบ โดยแบ่งออกเป็น 2 ชุดที่มีค่าความยาวคาบ (T) แตกต่างกันได้แก่ ชุด L22X และ L24X ซึ่งในแต่ละชุดนั้นประกอบด้วย Lobed nozzle ทั้งหมด 4 แบบที่มีค่าระยะห่าง (G) แตกต่างกันได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

สำหรับผลการทดลองในส่วนนี้นั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนย่อย ได้แก่ ผลจากการทำ Flow visualization และผลที่ได้จากการวัดอนุภาคน้ำมัน ซึ่งผลที่ได้จากการวัดอนุภาคน้ำมันนี้จะแสดงอยู่ในรูปของพารามิเตอร์ต่างๆ คือ  $C_{TT}$ ,  $C_{TZ}$ ,  $C_{TS}$  และ  $C_T$  โดยค่าของสัมประสิทธิ์เหล่านี้จะแสดงถึงความสามารถของ Lobed nozzle แต่ละแบบในการกระจายอากาศร้อนที่ถูกปล่อยเข้าไปยังห้องทดลอง นอกจากนี้ยังมีผลของการสูญเสียความดันอันเนื่องจากการใช้ Lobed nozzle ซึ่งแสดงถึงพลังงานที่สูญเสียไปอันเนื่องจากการไหลผ่าน Lobed nozzle นี้ และเพื่อความกระชับในการอธิบายผลการทดลอง ในที่นี้จึงใช้สัญลักษณ์ LN แทนคำว่า Lobed nozzle

สำหรับการวัดค่าอนุภาคน้ำมันในตำแหน่งต้นห้อง ของการทดลองส่วนนี้นั้น จะทำการวัดที่ตำแหน่ง  $x/L$  เท่ากับ 0.06 ซึ่งแตกต่างจากการทดลองในส่วนที่ผ่านมา ที่ทำการวัดที่ตำแหน่ง  $x/L$  เท่ากับ 0.04 เนื่องจากเมื่อมีการใช้ LN แล้วจะทำให้ไม่สามารถทำการวัดอนุภาคน้ำมันที่ตำแหน่ง  $x/L$  เท่ากับ 0.04 ได้ ดังนั้นจึงเปลี่ยนไปทำการวัดที่ตำแหน่ง  $x/L$  เท่ากับ 0.06 แทน

#### ผลการทำ Flow visualization

การทดลองในส่วนนี้ ดังแสดงในรูปที่ 5.20 - 5.23 เป็นการทดลองอย่างคร่าวๆ (Qualitative) เพื่อให้เห็นถึงการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นจริงภายในห้องของกรณีที่ใช้และไม่ใช้ LN โดยอาศัยเทคนิค Smoke-wire flow visualization ที่วางเส้นลวดนิโครมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.13 มิลลิเมตร ไว้ที่ระดับกึ่งกลางของปากทางออกของเจ็ท ( $z = 0.5h$ ) ยกเว้นในรูปที่ 5.23 ซึ่งวางเส้นลวดไว้ในแนวตั้ง สำหรับเจ็ทอากาศที่ใช้ นั้น เป็นเจ็ทอากาศที่อนุภาคน้ำมันห้องซึ่งแตกต่างจากการทดลองในส่วนของการวัดอนุภาคน้ำมันที่ใช้ เจ็ทอากาศร้อนปล่อยเข้าสู่ห้องทดลองแทน

สำหรับผลจากการทำ Flow visualization นี้ ถึงแม้จะเป็นผลที่แสดงให้เห็นการไหลเพียงพอสังเขปเท่านั้น แต่ก็สามารถแสดงให้เห็นถึงแนวความคิดหลักของการไหลผ่าน LN ที่

เกิดขึ้นจริง รวมทั้งใช้เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ LN ได้เป็นอย่างดี โดยในที่นี้จะแสดงเฉพาะกรณี L224 และ L240 เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ LN (L000) ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องเท่ากับ 1.00, 0.24 และ 0.08 เท่านั้น เนื่องจากในผลการวัดอุณหภูมินั้น (ดังจะแสดงในส่วนของผลการวัดอุณหภูมิต่อไป) พบว่ากรณี L224 และ L240 เป็นกรณีที่สามารถกระจายอากาศได้ดีที่สุดสำหรับ LN ในชุด L22X และ L24X ตามลำดับ สำหรับรูปในส่วนนี้ทั้งหมดนั้นได้มาจากการ Capture จากภาพถ่ายวิดีโอที่ช่วงเวลาประมาณเดียวกันทั้งหมดนับจากเริ่มมีควัน โดยรูปที่ 5.20 - 5.22 เป็นรูปแสดงภาพด้านข้าง (Side view) ของการไหลในกรณี P1.00, P0.24 และ P0.08 ตามลำดับ สำหรับรูปที่ 5.23 เป็นรูปแสดงภาพด้านท้าย (End view) ของการไหลทั้ง 3 กรณีที่ตำแหน่งใกล้กับทางออกของช่องปล่อยอากาศเข้า

รูปที่ 5.20 เป็นรูปแสดงภาพด้านข้างของการไหล ในกรณีที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องเท่ากับ 1.00 (P1.00) พบว่า การไหลแบบเจ็ทที่ผนังด้านบนในกรณีที่ใช้ LN นั้น (ทั้ง L224 และ L240) จะมี Growth rate ที่สูงกว่ากรณีที่ไม่ใช้ LN เล็กน้อย ซึ่งสังเกตได้จากความหนาของเจ็ทที่เพิ่มขึ้นในตำแหน่งท้ายห้อง นอกจากนี้ยังสังเกตพบว่าทิศทางของเจ็ทที่ตำแหน่งใกล้กับ LN ทั้งสองนั้นมีทิศทางพุ่งเข้าสู่บริเวณด้านล่างของห้องมากกว่ากรณี L000

รูปที่ 5.21 และ 5.22 เป็นรูปแสดงภาพด้านข้างของการไหล ในกรณีที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องเท่ากับ 0.24 และ 0.08 (P0.24 และ P0.08) ตามลำดับ โดยทั้งสองรูปนี้เป็นภาพในขณะที่เจ็ทอากาศกำลังพุ่งเข้าชนผนังท้ายห้อง ซึ่งจะพบว่าเจ็ทที่ตำแหน่งท้ายห้องในกรณีที่ใช้ LN ทั้งสองนั้น มีทิศทางพุ่งเข้าสู่บริเวณด้านล่างของห้องมากกว่ากรณีที่ไม่ใช้ LN มาก โดยเฉพาะที่ P0.08

รูปที่ 5.23 เป็นรูปแสดงภาพด้านท้ายที่ตำแหน่งใกล้ทางออกของช่องปล่อยอากาศเข้าของการไหลในกรณี L000, L224 และ L240 ซึ่งทั้ง 3 กรณีนี้ทำที่ P1.00 ทั้งหมด จะพบว่าในกรณี L224 และ L240 จะมีการไหลแบบหมุนควงเกิดขึ้น ในขณะที่กรณี L000 นั้นจะไม่พบเห็นการไหลลักษณะดังกล่าว ซึ่งแสดงให้เห็นถึง Streamwise vortex ที่เกิดขึ้นอันเนื่องจากการไหลผ่าน LN ทั้งสองแบบนี้

จากผลการทำ Flow visualization ทั้งหมดสรุปได้ว่า การใช้ LN ทั้งสองแบบจะทำให้เกิด Streamwise vortex ขึ้นภายในการไหล ทำให้สามารถกระจายอากาศจากเจ็ทเข้าสู่บริเวณด้านล่างของห้องได้ดีกว่ากรณีที่ไม่ใช้ LN

อย่างไรก็ตาม ภาพที่ได้นี้อาจให้ผลที่แตกต่างไปจากผลการวัดอุณหภูมิเล็กน้อย กล่าวคือ จากภาพพบว่า L240 น่าจะกระจายเจ็ทอากาศได้ประมาณเท่ากับหรือดีกว่า L224 ซึ่งต่างไปจากผลการวัดอุณหภูมิในหัวข้อถัดไป ที่พบว่า L224 จะกระจายเจ็ทอากาศได้ประมาณเท่า

กับหรือดีกว่า L240 แต่ทั้งนี้ก็มีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือ การทำ Flow visualization นี้เป็นเทคนิคที่ใช้สัญลักษณ์การไหลเพียงคร่าวๆเท่านั้น กล่าวคือควันที่ได้ในแต่ละกรณีนั้นอาจมีความเข้มข้นไม่เท่ากัน รวมทั้งเวลาที่ใช้ในการ Capture ภาพนั้นอาจแตกต่างกันไปบ้าง อย่างไรก็ตามจากผลการทำ Flow visualization นี้ก็แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการไหลผ่าน LN นี้จะทำให้เกิด Streamwise vortex ขึ้น ซึ่งช่วยทำให้เจ็ทมีการกระจายตัวอย่างทั่วถึงมากยิ่งขึ้น

## ผลการวัดอุณหภูมิ

### 5.3.1 สัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยโดยรวม ( $C_{TT}$ )

การทดลองส่วนนี้เป็นการดูผลของการใช้ LN แบบต่างๆที่บริเวณปากทางเข้า ต่อค่าอุณหภูมิเฉลี่ยโดยรวมภายในห้อง ที่แต่ละขนาดของช่องเปิดด้านท้าย โดยอาศัยการสังเกตจากค่า  $C_{TT}$  ที่เกิดขึ้นในแต่ละขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง

กราฟรูปที่ 5.24 แสดงผลของการใช้ LN ทุกกรณีและผลของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้อง ที่มีต่อค่าอุณหภูมิเฉลี่ยโดยรวมที่เกิดขึ้น โดยแสดงอยู่ในรูปของค่า  $C_{TT}$  เทียบกับขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง ( $t/H$ ) ซึ่งกรณีที่ขนาดช่องเปิดด้านท้ายมีค่าน้อยนั้น จะอยู่ทางซ้ายมือ ( $t/H$  มีค่าใกล้ 0) และกรณีที่มีค่ามาก จะอยู่ทางขวามือ ( $t/H$  มีค่าใกล้ 1.0) โดยในทุกกรณีการทดลองนี้จะมีค่า Uncertainty ของค่า  $C_{TT}$  ไม่เกิน  $\pm 0.04$

จากกราฟพบว่า การใช้ LN ทุกแบบจะทำให้  $C_{TT}$  มีค่าประมาณเท่ากับหรือสูงกว่ากรณีที่ไม่วาง LN (L000) ที่ทุกขนาดช่องเปิด โดยในช่วงที่  $t/H$  มีค่าลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.24 นั้น LN จะทำให้  $C_{TT}$  มีค่าประมาณเท่ากับหรือสูงกว่ากรณี L000 เพียงเล็กน้อย ซึ่งค่า  $C_{TT}$  ของทุกกรณีในช่วงนี้จะมีค่าแปรผกผันแบบประมาณเชิงเส้นกับขนาดของ  $t/H$  แต่สำหรับในช่วงที่  $t/H$  มีค่าน้อยกว่า 0.24 นั้นพบว่า  $C_{TT}$  จะมีค่าสูงขึ้นกว่ากรณี L000 อย่างเห็นได้ชัด

นอกจากนี้ยังพบว่า กรณี L224 จะทำให้ค่า  $C_{TT}$  มีค่าสูงสุดที่ทุกขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง โดยเมื่อ  $t/H$  มีค่าลดลง  $C_{TT}$  ของกรณีนี้จะมีค่าสูงขึ้นกว่าของกรณี L000 มากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะที่  $t/H$  เท่ากับ 0.08 นั้น ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของกรณี L224 จะมีค่าสูงกว่ากรณี L000 มากที่สุด โดยความแตกต่างของค่า  $C_{TT}$  นี้ ( $\Delta C_{TT}$ ) มีค่าประมาณเท่ากับ 0.1 หรือ 10 % ของค่าแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของเจ็ทและอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ( $T_j - T_{ref}$ ) ซึ่งคิดเป็นค่าอุณหภูมิได้เท่ากับ  $4^\circ\text{C}$

### ผลของระยะห่างระหว่าง Lobe (G)

กราฟรูปที่ 5.25 แสดงผลของระยะห่างระหว่าง Lobe และขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้องที่มีต่อค่า  $C_{TT}$  ของ LN ในแต่ละชุด (ชุด L22X และ L24X)

จากกราฟ พิจารณาการใช้ LN ในชุด L22X ซึ่งมีความยาวคาบเท่ากับ 2h (รูปที่ 5.25(ก)) จะพบว่า ในช่วงที่  $t/H$  มีค่าลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.24 นั้น การใช้ L22X ทุกแบบจะทำให้ได้ค่า  $C_{TT}$  ประมาณเท่ากับกรณี L000 แต่สำหรับในช่วงที่  $t/H$  มีค่าน้อยกว่า 0.24 แล้ว LN ที่มีระยะห่างเท่ากับ 4h (L224) จะมีค่า  $C_{TT}$  สูงกว่ากรณีที่ไม่ได้ใช้ LN มากที่สุด โดยเฉพาะที่  $t/H$  เท่ากับ 0.08 นั้นค่าอนุกรมเฉลี่ยของกรณี L224 จะมีค่าสูงกว่ากรณี L000 มากที่สุด

สำหรับการใช้ LN ในชุด L24X ซึ่งมีความยาวคาบเท่ากับ 4h นั้น (รูปที่ 5.25(ข)) พบว่า ในช่วงที่  $t/H$  มีค่าลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.24 การใช้ L24X ทุกแบบก็จะทำให้ได้ค่า  $C_{TT}$  ประมาณเท่ากับกรณี L000 เช่นเดียวกับชุด L22X แต่สำหรับในช่วงที่  $t/H$  มีค่าน้อยกว่า 0.24 แล้ว LN ที่มีระยะห่างเท่ากับ 0 และ 2h (L240 และ L242) จะมีค่า  $C_{TT}$  สูงกว่ากรณีที่ไม่ได้ใช้ LN มากที่สุด โดยเฉพาะที่  $t/H$  เท่ากับ 0.08

จากการพิจารณา LN ทั้ง 2 ชุดนี้จะเห็นได้ว่า ระยะห่างระหว่าง Lobe จะมีผลต่อค่า  $C_{TT}$  แบบไม่เชิงเส้น กล่าวคือ ระยะห่างระหว่าง Lobe มากหรือน้อย ไม่ได้ทำให้ค่า  $C_{TT}$  เพิ่มขึ้นในสัดส่วนเดียวกัน โดย LN ในชุด L22X ที่ช่วยทำให้  $C_{TT}$  มีค่าสูงกว่ากรณี L000 มากที่สุด คือ L224 และสำหรับ LN ในชุด L24X นั้นก็คือ L240 และ L242 ตามลำดับ โดยเฉพาะในช่วงที่ขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่าน้อย ( $t/H$  น้อยกว่า 0.24)

### ผลของความยาวคาบ (T)

กราฟรูปที่ 5.26 แสดงผลของความยาวคาบของ LN ต่อค่า  $C_{TT}$  ที่เกิดขึ้น พบว่าที่ G เท่ากับ 0 และ 2h นั้น LN ที่มีความยาวคาบทั้ง 2 ค่า ( $T = 2h$  และ  $4h$ ) จะให้ค่า  $C_{TT}$  ประมาณเท่ากัน โดยจะมีค่าประมาณเท่ากับหรือสูงกว่ากรณี L000 เพียงเล็กน้อยในช่วงที่  $t/H$  มีค่าลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.24 และจะมีค่าสูงกว่ากรณี L000 อย่างชัดเจนในช่วงที่  $t/H$  มีค่าน้อยกว่า 0.24

สำหรับกรณีที่ G เท่ากับ 1h และ 4h นั้น ในช่วงที่  $t/H$  มีค่าลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.24 จะให้ผลเช่นเดียวกับกรณีที่ G เท่ากับ 0 และ 2h ในขณะที่ ในช่วงที่  $t/H$  มีค่าน้อยกว่า 0.24 นั้น พบว่า LN ที่มีความยาวคาบเท่ากับ 2h จะให้ค่า  $C_{TT}$  สูงกว่ากรณีที่มีความยาวคาบเท่ากับ 4h ซึ่งทั้ง 2 กรณีนี้ต่างก็มีค่าสูงกว่ากรณี L000 ทั้งสิ้น

จะเห็นได้ว่าความยาวคาบของ LN จะมีผลต่อค่า  $C_{TT}$  โดยเฉพาะเมื่อขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่าน้อย ( $t/H$  น้อยกว่า 0.24) โดย LN ที่มีความยาวคาบเท่ากับ 2h นั้น มีแนวโน้มจะทำให้ได้ค่า  $C_{TT}$  ที่สูงกว่าหรือเท่ากับกรณีที่มีความยาวคาบเท่ากับ 4h ที่ทุกระยะห่างระหว่าง Lobe

จากผลการทดลองในส่วนของ  $C_{TT}$  นี้ ทำให้สรุปได้ว่า 1) LN จะมีผลต่อค่า  $C_{TT}$  เพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ใช้ LN ในช่วงที่ขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่ามาก (ช่วงที่



$t/H$  มีค่าลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.24) แต่ในทางตรงกันข้าม 2) LN จะมีผลทำให้  $C_{TT}$  มีค่าสูงขึ้นกว่ากรณีที่ไม่ได้ใช้ LN อย่างเห็นได้ชัด เมื่อขนาดช่องเปิดมีค่าลดลง ( $t/H$  น้อยกว่า 0.24) นอกจากนี้ยังพบว่า 3)กรณี L224 จะให้ค่า  $C_{TT}$  สูงกว่ากรณีที่ไม่ได้ใช้ LN มากที่สุดในชุด L22X ในขณะที่กรณี L240 นั้นจะให้ค่า  $C_{TT}$  สูงกว่ากรณีที่ไม่ได้ใช้ LN มากที่สุดสำหรับชุด L24X และ 4)เมื่อเปรียบเทียบการใช้ LN ทั้ง 2 ชุดแล้วก็จะพบว่า L224 จะให้ค่า  $C_{TT}$  สูงสุดในบรรดา LN ทั้งหมด โดยเฉพาะที่ขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่าน้อยๆ ซึ่งจะเห็นได้จาก ที่ P0.08 นั้น L224 จะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยทั้งห้อง สูงขึ้นกว่ากรณีที่ไม่ใช้ LN ประมาณ 10% ของค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งทางเข้าห้องและอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

นอกเหนือจากนั้น 5)โดยรวมแล้วอาจกล่าวได้ว่า LN ที่มีความยาวคาบเท่ากับ 2h (L22X) จะให้ค่า  $C_{TT}$  ที่สูงกว่า LN ที่มีความยาวคาบเท่ากับ 4h (L24X) และ 6)จากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า  $C_{TT}$  เมื่อระยะห่างระหว่าง Lobe และความยาวคาบแปรเปลี่ยนไปนั้น พบว่า  $C_{TT}$  จะขึ้นอยู่กับ ค่าระยะห่างระหว่าง Lobe และความยาวคาบแบบไม่เชิงเส้น หรืออีกนัยหนึ่งคือ ค่าระยะห่างระหว่าง Lobe และความยาวคาบจะมีผลต่อค่า  $C_{TT}$  ในลักษณะที่ควบคู่กันไป (Couple)

สำหรับสาเหตุที่ทำให้ค่า  $C_{TT}$  ขึ้นอยู่กับ ค่าระยะห่างระหว่าง Lobe และความยาวคาบแบบไม่เชิงเส้นนี้ สันนิษฐานว่าเป็นผลมาจาก การไหลผ่าน LN และการไหลภายในห้องที่เป็นแบบไม่เชิงเส้น รวมทั้งอาจมี Interaction ระหว่าง Vortex ที่ถูกสร้างขึ้นแตกต่างกันที่ระยะห่างและความยาวคาบของ LN ที่ต่างกัน

### 5.3.2 สัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยโดยบริเวณ ( $C_{TZ}$ )

การทดลองในส่วนนี้เป็นการดูผลของการใช้ LN แบบต่างๆที่บริเวณปากทางเข้า ต่อลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศภายในห้อง ที่แต่ละขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง โดยการสังเกตจากค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณภายในห้อง ซึ่งมีทั้งหมด 8 บริเวณ ดังแสดงในรูปที่ 4.8(ข)

กราฟรูปที่ 5.27 (ดูกราฟรูปที่ 5.28-5.29 และ 5.30-5.33 ประกอบ) แสดงการเปรียบเทียบค่า  $C_{TZ}$  ของการใช้ LN แต่ละแบบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ใช้ LN โดยแสดงอยู่ในรูปของค่า  $C_{TZ}$  ตามโซนต่างๆภายในห้อง เทียบกับขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้องที่แปรเปลี่ยนไป จากกราฟพบว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า  $C_{TZ}$  ตามการเปลี่ยนแปลงของค่า  $t/H$  ระหว่างกรณีที่ใช้และไม่ใช้ LN นั้น จะมีลักษณะคล้ายคลึงกันในแต่ละโซน โดยในที่นี้จะพิจารณาแบ่งออกเป็น 2 โซน ได้แก่ โซนด้านบน (โซน 1-4) และโซนด้านล่าง (โซน 5-8)

ที่โซนด้านบน พบว่า การใช้ LN ทุกแบบจะทำให้ได้ค่า  $C_{TZ}$  ที่ค่า  $t/H$  ต่างๆ ในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ จะมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่ได้ใช้ LN เล็กน้อยตั้งแต่บริเวณ โซน 1 จน



ถึง โชน 3 และกลับมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ไม่ได้ใช้ LN ที่บริเวณ โชน 4 สำหรับผลของการใช้ LN หนึ่งๆที่ขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆนั้น พบว่าจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีที่ไม่ได้ใช้ LN กล่าวคือ เมื่อ  $t/H$  ลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.68 นั้น  $C_{TZ}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณแบบเชิงเส้น แต่เมื่อ  $t/H$  ลดลงมากกว่า 0.68 แล้วจะพบว่า  $C_{TZ}$  มีค่าประมาณคงที่

เป็นที่น่าสังเกตว่าที่  $t/H = 0.68$  นั้นคือกรณีที่ผนังด้านท้ายห้องปิดลงมามากกว่าช่วงความหนาของเจ็ท ( $\delta$ ) เล็กน้อย (จากกราฟรูปที่ 5.13 พบว่า ความหนาของเจ็ท ในกรณี  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$  จะมีค่าประมาณ 2h-3h ซึ่งตรงกับกรณีที่  $t/H$  มีค่าอยู่ในช่วง 0.84-0.76 ตามลำดับ) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ทั้งในกรณีที่ใช้และไม่ใช้ LN นั้น การปิดผนังลงมาในช่วงการปิดที่น้อยกว่าหรือประมาณเท่ากับ ความหนาของเจ็ทจะมีผลต่อค่า  $C_{TZ}$  ที่บริเวณด้านบนของห้องเป็นอย่างมาก แต่หากปิดผนังลงมามากกว่าความหนาของเจ็ทแล้วนั้น การปิดผนังด้านท้ายห้องจะไม่มีผลต่อค่า  $C_{TZ}$  มากนัก

เมื่อพิจารณาที่บริเวณโชนด้านล่างของห้อง (โชน 5-8) พบว่า การใช้ LN ทุกแบบก็จะทำให้ได้ค่า  $C_{TZ}$  ที่ค่า  $t/H$  ต่างๆ ในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ จะมีค่าประมาณเท่ากับกรณีที่ไม่ได้ใช้ LN ในช่วงที่  $t/H$  มีค่าลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.24 และจะมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่ได้ใช้ LN เฉพาะในช่วงที่  $t/H$  มีค่าน้อยกว่า 0.24 และเมื่อเปรียบเทียบผลของการใช้ LN แบบต่างๆด้วยกัน จะพบว่า ในช่วงที่  $t/H$  มีค่าน้อยกว่า 0.24 นั้น กรณี L224 จะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยที่บริเวณด้านล่างห้องนี้มีค่าสูงขึ้นกว่ากรณี L000 มากที่สุด สำหรับผลของการใช้ LN แต่ละแบบที่ขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆนั้น พบว่าจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีที่ไม่ได้ใช้ LN (ดังที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 5.2.2) กล่าวคือ แม้ว่าจะทำการปิดผนังท้ายห้องลงมามากกว่า  $\delta$  แล้วก็ตาม  $C_{TZ}$  ก็ยังคงเปลี่ยนแปลงไป โดยการเปลี่ยนแปลงนี้จะประมาณเป็นแบบเชิงเส้น ในช่วงที่อัตราส่วนของช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่าตั้งแต่ 0.24 จนถึง 0.84 หรือคิดเป็น 60 % ของขนาดช่องเปิดท้ายห้องทั้งหมด

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่า  $C_{TZ}$  ในช่วงที่  $t/H$  มีค่าน้อยกว่า 0.24 ตั้งแต่บริเวณ โชน 1 ไปยัง โชน 8 ของการใช้ LN ทุกกรณีเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ใช้ LN จะพบว่า เมื่ออากาศไหลจากโชน 1 ไปยังโชน 4 นั้นค่า  $C_{TZ}$  ของการใช้ LN ทุกกรณีที่บริเวณด้านบนห้องจะค่อยๆลดลง จากที่มีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่ได้ใช้ LN ที่บริเวณโชน 1 จนมีค่าต่ำกว่ากรณีที่ไม่ได้ใช้ LN ที่บริเวณโชน 4 และเมื่ออากาศไหลต่อไปยังด้านล่างที่บริเวณโชน 5 จะพบสิ่งที่น่าสนใจคือ ค่า  $C_{TZ}$  ของการใช้ LN ทุกกรณีจะกลับมามีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่ได้ใช้ LN อีกครั้ง และก็จะค่อยๆลดลงจากบริเวณโชน 5 ไปยังโชน 8 โดยที่บริเวณโชน 5 จนถึงโชน 8 นี้ ค่า  $C_{TZ}$  ของการใช้ LN ทุกกรณี ก็ยังคงมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่ได้ใช้ LN ลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดังกล่าวนี้ จะสามารถเห็นได้ชัดเจนในกราฟรูปที่ 5.28-5.33

จากเหตุการณ์ดังกล่าวนี้ จึงกล่าวได้ว่า การใช้ LN ทุกแบบจะทำให้เจ็ทอากาศกระจายตัวออกจากโชนด้านบนลงสู่โชนด้านล่างของห้องได้ดีกว่ากรณีที่ไม่ใช้ LN ที่เป็นดังนี้สันนิษฐานว่าน่าจะมาจากการที่ LN เหล่านี้จะช่วยทำให้เกิด Streamwise vortex ขึ้นภายในการไหล ซึ่ง Streamwise vortex นี้จะดึงเอาอากาศรอบข้างเข้ามาผสมได้ดี จึงทำให้เจ็ทในกรณีที่ใช้ LN มี

อุณหภูมิตามแนวทิศทางการไหลที่บริเวณด้านบน (โซน 1-4) ลดลงเร็วกว่าเจ็ทในกรณีไม่ใช้ LN และยังมีผลทำให้เจ็ทโตเร็วขึ้น และมีความหนาแน่นรวมทั้งทำให้แกนเจ็ทโค้งต่ำลงมากขึ้น ดังแสดงในภาพ Flow visualization ในหัวข้อที่ผ่านมา เป็นผลทำให้  $C_{TZ}$  ที่บริเวณโซน 5 ของกรณีใช้ LN มีค่ามากกว่าของกรณีไม่ใช้ LN

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่า  $C_{TZ}$  ที่  $t/H = 0.08$  ของทุกกรณี จากบริเวณโซน 1 ไปยังโซน 4 จะพบว่าค่า  $C_{TZ}$  ที่บริเวณด้านบนห้องนี้จะค่อยๆลดลงเมื่ออากาศไหลจากโซน 1 ไปยังโซน 4 (ดังลูกศรชี้) และเมื่ออากาศไหลต่อไปยังด้านล่าง ค่า  $C_{TZ}$  ก็ค่อยๆลดลงจากโซน 5 ไปยัง โซน 8 ซึ่งการลดลงอย่างต่อเนื่องของค่า  $C_{TZ}$  จากบริเวณโซน 1 ไปยังโซน 4 และต่อไปยังโซน 5 ถึงโซน 8 นี้เป็นเครื่องบ่งชี้ว่าเกิด Recirculation ขึ้นภายในห้องในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจากบนลงล่าง

### ผลของระยะห่างระหว่าง Lobe (G)

กราฟรูปที่ 5.28 แสดงผลของระยะห่างระหว่าง Lobe ต่อค่า  $C_{TZ}$  ในแต่ละบริเวณ โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการใส่ LN ในชุด L22X กับกรณี L000 จากผลการทดลองพบว่า ที่บริเวณด้านบนของห้อง การใส่ L22X ทุกแบบจะทำให้ได้ค่า  $C_{TZ}$  ที่ค่า  $t/H$  ต่างๆ ในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ จะมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่ได้ใส่ LN เล็กน้อยตั้งแต่บริเวณ โซน 1 จนถึง โซน 3 และกลับมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ไม่ได้ใส่ LN ที่บริเวณ โซน 4

สำหรับที่บริเวณด้านล่างของห้อง จะพบว่า ในช่วงที่  $t/H$  มีค่าลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.24 นั้น L22X ทุกแบบจะมีค่า  $C_{TZ}$  ประมาณเท่ากับกรณี L000 ที่ทุกๆโซนภายในห้อง แต่สำหรับในช่วงที่  $t/H$  มีค่าน้อยกว่า 0.24 นั้นพบว่า กรณี L224 จะมีค่า  $C_{TZ}$  สูงขึ้นกว่ากรณี L000 มากที่สุด

ดังนั้นจากการเปรียบเทียบการใส่ LN ในชุด L22X นี้จึงกล่าวได้ว่า L224 จะทำให้อุณหภูมิของอากาศภายในห้อง สูงกว่ากรณีที่ไม่ได้ใส่ LN มากที่สุด โดยเฉพาะในช่วงที่  $t/H$  มีค่าลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.24

กราฟรูปที่ 5.29 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างการใส่ LN ในชุด L24X กับกรณี L000 ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่า  $C_{TZ}$  เทียบกับค่า  $t/H$  ตามโซนต่างๆภายในห้อง จากการใส่ L24X นี้ก็จะให้ผลเช่นเดียวกับ L22X โดยในช่วงที่  $t/H$  มีค่าลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.24 นั้น L240 จะทำให้ค่า  $C_{TZ}$  บริเวณด้านล่างสูงขึ้นกว่ากรณี L000 มากที่สุด

จากการพิจารณา LN ทั้ง 2 ชุดจะเห็นได้ว่า ระยะห่างระหว่าง Lobe จะมีผลต่อค่า  $C_{TZ}$  แบบไม่เชิงเส้น เช่น เกี่ยวกับกรณีผลต่อค่า  $C_{TZ}$  กล่าวคือ ระยะห่างระหว่าง Lobe มากหรือน้อยไม่ได้ทำให้  $C_{TZ}$  เพิ่มขึ้นในสัดส่วนเดียวกัน นอกจากนั้นเมื่อขนาดช่องเปิดท้ายห้องมีค่าน้อย

( $t/H$  น้อยกว่า 0.24) พบว่า L224 และ L240 จะทำให้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่โซนด้านล่างของห้อง สูงขึ้นกว่ากรณี L000 มากที่สุดในแต่ละชุด LN

### ผลของความยาวคาบ (T)

กราฟรูปที่ 5.30, 5.31, 5.32 และ 5.33 เป็นการเปรียบเทียบผลของความยาวคาบของ Lobe ต่อค่า  $C_{TZ}$  ที่เกิดขึ้นทั้ง 8 บริเวณเทียบกับขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องที่แปรเปลี่ยนไป โดยพิจารณาที่ค่าระยะห่างระหว่าง Lobe (G) เท่ากับ 0, 1h, 2h และ 4h ตามลำดับ

จากกราฟรูปที่ 5.30 ซึ่งเป็นการพิจารณาที่ G เท่ากับ 0 นั้นพบว่า LN ที่มีคาบเท่ากับ 2h และ 4h โดยทั่วไปแล้วจะทำให้ได้  $C_{TZ}$  ประมาณเท่ากันในทุกบริเวณยกเว้นเพียงที่บริเวณโซน 1 ซึ่ง LN ที่มีคาบเท่ากับ 4h จะทำให้ได้ค่า  $C_{TZ}$  สูงกว่ากรณีที่มีคาบเท่ากับ 2h เล็กน้อย ที่ทุกขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะลักษณะการไหลในโซน 1 ยังมีลักษณะเป็น 3 มิติอยู่มาก กอปรกับลักษณะตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิคงที่เมื่อเทียบกับห้องทดลอง แต่จะไม่คงที่เมื่อเทียบกับตำแหน่งของ LN ดังรูปที่ 4.11(ค)

สำหรับที่ G เท่ากับ 1h ในกราฟรูปที่ 5.31 พบว่า ที่บริเวณโซน 1 นั้น LN ที่มีคาบเท่ากับ 2h จะให้ค่า  $C_{TZ}$  สูงกว่ากรณีที่มีคาบเท่ากับ 4h ที่ทุกค่าของ  $t/H$  แต่เมื่อการไหลดำเนินต่อไปยังโซน 2, 3 และ 4 จะพบว่า ความแตกต่างระหว่างกรณีที่มีคาบเท่ากับ 2h และ 4h จะค่อยๆ ลดลงจนที่บริเวณโซน 4 นั้นพบว่ากรณีที่มีคาบเท่ากับ 2h จะมีค่า  $C_{TZ}$  ต่ำกว่ากรณีที่มีคาบเท่ากับ 4h โดยเฉพาะในช่วงที่  $t/H$  มีค่าน้อยกว่า 0.24 ซึ่งกรณีที่มีคาบเท่ากับ 4h นี้จะมีค่าประมาณเท่ากับกรณี L000 ที่เป็นดังนี้อธิบายได้จากการที่เจ็ทในกรณีที่มีคาบเท่ากับ 2h นั้นกระจายตัวออกและดึงอากาศรอบข้างมาผสมได้เร็วกว่า จึงทำให้อุณหภูมิลดลงเร็วกว่า และเมื่อพิจารณาที่บริเวณด้านล่างของห้อง (โซน 5-8) จะพบว่ากรณีที่มีคาบเท่ากับ 2h นั้นยังคงมีค่า  $C_{TZ}$  ที่สูงกว่ากรณีที่มีคาบเท่ากับ 4h โดยเฉพาะในช่วงที่  $t/H$  มีค่าน้อยกว่า 0.24 ซึ่งก็น่าจะแสดงว่าเจ็ทร้อนในกรณีที่มีคาบเท่ากับ 2h นั้นกระจายตัวออกสู่บริเวณบริเวณด้านล่างของห้องได้ดีกว่า ทำให้อุณหภูมิด้านล่างสูงกว่า

จากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า  $C_{TZ}$  จากบริเวณโซน 1-4, โซน 4-5 และต่อไปยังโซน 5-8 ของกรณี L221 เมื่อเทียบกับกรณี L241 นี้จึงเป็นเครื่องบ่งชี้ว่าเจ็ทในกรณี L221 มีการกระจายและโค้งตัวลงได้ดีกว่า L241 ดังกล่าวข้างต้น

กราฟรูปที่ 5.32 แสดงการเปรียบเทียบผลของความยาวคาบในกรณี G เท่ากับ 2h จะพบว่า ที่บริเวณด้านบนของห้อง (โซน 1-4) จะมีลักษณะเดียวกับในกรณี G เท่ากับ 1h ยกเว้นบริเวณโซน 4 ที่กรณี G เท่ากับ 2h นั้นจะให้ค่า  $C_{TZ}$  ประมาณเท่ากัน ทั้งกรณี T เท่ากับ

2h และ 4h (L222 และ L242) แต่สำหรับที่บริเวณด้านล่างของห้อง (โซน 5-8) จะพบว่าได้ผลที่ตรงกันข้ามกับกรณี G เท่ากับ 1h กล่าวคือ ในช่วงที่  $t/H$  มีค่าน้อยกว่า 0.24 นั้น LN ที่มีคาบเท่ากับ 4h จะทำให้ได้ค่า  $C_{TZ}$  ประมาณเท่ากับหรือสูงกว่ากรณีที่มีคาบเท่ากับ 2h เล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเจ็ทในกรณี L241 อาจกระจายตัวและโค้งลงได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม ในช่วงที่  $t/H$  มีค่าลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.24 นั้น ทั้ง 2 กรณี ก็ยังคงมีค่าประมาณเท่ากัน ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันไปจากกรณี L000 มากนัก

กราฟในรูปที่ 5.33 แสดงการเปรียบเทียบผลของความยาวคาบในกรณีที่ G เท่ากับ 4h จะพบว่าที่บริเวณโซน 1 และ 4 นั้นกรณีที่มีคาบเท่ากับ 2h (L224) จะทำให้ได้ค่า  $C_{TZ}$  ประมาณเท่ากับกรณีที่มีคาบเท่ากับ 4h (L244) โดยที่โซน 1 นั้น ทั้งสองกรณีต่างก็ทำให้ได้ค่า  $C_{TZ}$  สูงกว่ากรณี L000 ที่ทุกค่าของ  $t/H$  แต่สำหรับโซน 4 นั้น ทั้งสองกรณีต่างก็ทำให้ได้ค่า  $C_{TZ}$  ประมาณเท่ากับกรณี L000 ที่ทุกค่าของ  $t/H$  และสำหรับที่บริเวณโซน 2 และ 3 นั้น จะพบว่ากรณี L224 ทำให้ได้ค่า  $C_{TZ}$  สูงกว่ากรณี L244 ที่ทุกค่าของ  $t/H$

สำหรับที่บริเวณโซน 5-8 จะพบว่า ในช่วงที่  $t/H$  มีค่าลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.24 นั้น ทั้ง 2 กรณีจะมีค่าประมาณเท่ากันซึ่งสูงกว่ากรณี L000 เล็กน้อย แต่เมื่อ  $t/H$  มีค่าน้อยกว่า 0.24 แล้ว กรณี L224 จะมีค่า  $C_{TZ}$  ที่สูงกว่ากรณี L244 อย่างชัดเจน

จากผลการทดลองในส่วนของ  $C_{TZ}$  นี้จะพบว่า 1)ค่าความยาวคาบและระยะห่างระหว่าง Lobe ต่างก็ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิที่แต่ละบริเวณภายในห้องทั้งสิ้น โดยจะส่งผลในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นและควบคู่กันไป 2)เมื่ออัตราส่วนของช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่ามาก คือจาก 1.00 จนถึง 0.24 LN จะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยที่บริเวณด้านล่างของห้องมีค่าประมาณเท่ากับหรือสูงกว่ากรณีที่ไม่ใช่ LN เล็กน้อย แต่ 3)เมื่ออัตราส่วนของช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่าน้อยกว่า 0.24 โดยเฉพาะที่ 0.08 นั้น LN ทั้ง 2 ชุด จะส่งผลให้อุณหภูมิที่บริเวณท้ายห้องด้านบน (โซน 4) มีค่าต่ำกว่ากรณีที่ไม่ใช่ LN ในขณะที่บริเวณด้านล่าง (โซน 5-8) มีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่ใช่ LN 4)จากการเปรียบเทียบการใช้ LN ชุด L22X และ L24X กับกรณี L000 จะพบว่า L224 และ L240 จะทำให้อุณหภูมิของอากาศภายในห้องโดยเฉพาะที่ด้านล่าง สูงกว่ากรณี L000 มากที่สุดในแต่ละชุด

### 5.3.3 สัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความกว้าง ( $C_{TS}$ )

การทดลองในส่วนนี้เป็นการดูผลของการใช้ LN แบบต่างๆ ต่อลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศภายในห้อง ที่แต่ละขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง โดยการดูจากค่า  $C_{TS}$  ที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณภายในห้อง



กราฟรูปที่ 5.34 (ดูกราฟรูปที่ 5.37-5.40 ประกอบ) เป็นการเปรียบเทียบผลของการใช้ LN ในชุด L22X กับกรณี L000 โดยดูจากลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ที่ตำแหน่ง  $x/L$  และขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่างๆกัน โดยในที่นี้แสดงอยู่ในรูปของค่า  $C_{TS}$  ที่ระดับความสูง  $z/H$  ต่างๆกัน จะพบว่า เมื่ออัตราส่วนของช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่าลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.50 (P1.00, P0.84, P0.68 และ P0.50) นั้น ลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ที่ทุกตำแหน่งภายในห้อง ของการใช้ LN ชุด L22X นี้ จะไม่แตกต่างไปจากกรณี กรณี L000 มากนัก (ดังจะเห็นได้จากการที่เส้นกราฟเกือบจะทับกันสนิทในแต่ละกราฟ) เมื่อเทียบกับในกรณีที่อัตราส่วนของช่องเปิดด้านท้ายมีค่าน้อยกว่า 24% (P0.24 และ P0.08) ที่พบว่าการใช้ LN ในชุด L22X จะทำให้อุณหภูมิที่บริเวณตอนกลางและตอนล่างของห้องมีค่าสูงขึ้น แต่อุณหภูมิที่บริเวณด้านบนกลับมีค่าต่ำลง ซึ่งสังเกตได้จากค่า  $C_{TS}$  ที่บริเวณใต้จุด  $C_{TS \max}$  ของกรณี L22X ทุกแบบ จะมีค่าสูงกว่ากรณีของ L000 ในขณะที่บริเวณเหนือจุด  $C_{TS \max}$  กลับมีค่าต่ำกว่ากรณี L000 โดยเฉพาะที่ตำแหน่งท้ายห้อง ( $x/L$  เท่ากับ 0.96) และจะเห็นได้จากการที่รูปร่างการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  จากการใช้ LN ชุด L22X นั้น จะโค้งต่ำลงและชันมากขึ้นกว่ากรณี L000 อีกทั้งตำแหน่งที่เกิดค่า  $C_{TS \max}$  นั้น จะลดต่ำลงมาที่บริเวณด้านล่างห้องด้วย (ดังลูกศรชี้) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการกระจายตัวของอากาศร้อนจากด้านบนลงมาสู่ด้านล่างของห้องมากกว่ากรณี L000 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในแต่ละกรณี จะเห็นได้ชัดเจนขึ้นในกราฟรูปที่ 5.37-5.40

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการใช้ LN ในชุด L22X ด้วยกันนี้ พบว่าโดยรวมแล้วกรณี L224 จะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยที่บริเวณระดับกลางห้อง และด้านล่างของห้องมีค่าสูงขึ้นมากที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้ LN ในชุด L22X นั้น L224 จะสามารถช่วยในการกระจายอากาศที่พ่นออกมาเข้าสู่บริเวณระดับตอนกลางและด้านล่างของห้องได้ดีที่สุด ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากการที่ L224 นี้มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมต่อการสร้าง Streamwise vortex ทำให้เจ็ทอากาศร้อนขยายตัวเร็วขึ้นและโค้งลงสู่บริเวณด้านล่างของห้องมากขึ้นกว่ากรณีอื่นนั่นเอง

กราฟรูปที่ 5.35 (ดูกราฟรูปที่ 5.41-5.44 ประกอบ) เป็นการเปรียบเทียบผลของการใช้ LN ในชุด L24X กับกรณี L000 จะเห็นได้ว่า ผลการทดลองที่ได้เป็นทำนองเดียวกับ LN ในชุด L22X โดยที่ L240 จะเป็น LN ที่สามารถกระจายอากาศเข้าสู่บริเวณระดับตอนกลางและด้านล่างของห้องได้ดีที่สุด

กราฟรูปที่ 5.36 แสดงผลของการใช้ LN ต่อค่า  $C_{TS \max}$  ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของค่า  $C_{TS \max}$  ที่ระยะ  $x/L$  ต่างๆกัน โดยค่า  $C_{TS \max}$  ที่ตำแหน่ง  $x/L$  ไตงั้นหมายถึง ค่าสูงสุดของค่าอุณหภูมิเฉลี่ย  $C_{TS}$  ตลอดความสูงของห้องที่ตำแหน่ง  $x/L$  นั้นๆ จากกราฟพบว่า ค่า  $C_{TS \max}$  จะมีค่าลดลงเมื่อระยะ  $x/L$  เพิ่มขึ้น ทั้งในกรณีที่ใช้และไม่ใช้ LN ยกเว้นที่ระยะ  $x/L$  เท่ากับ 0.06 จนถึง 0.36 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่า  $C_{TS \max}$  นี้ จะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละ LN โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง  $x/L$  เท่ากับ 0.06 ซึ่งเป็น



บริเวณที่อยู่ใกล้กับ LN มากที่สุด ทั้งนี้เป็นเพราะลักษณะการไหลที่ไหลผ่าน LN มานั้น จะมีลักษณะเป็นแบบ 3 มิติที่บริเวณใกล้ๆกับ LN เหล่านั้น อันเนื่องมาจากรูปร่างและตำแหน่งของ Lobe และตำแหน่งสัมพัทธ์ของจุดที่ทำการวัดอุณหภูมิตลอดความกว้างของห้องซึ่งมีเพียง 5 จุดเท่านั้น ดังรูปที่ 4.11 (ค)

ข้อที่น่าสังเกตจากกราฟรูปที่ 5.36 นี้ก็คือ  $C_{TS \max}$  ของกรณี P1.00 ที่ตำแหน่ง  $x/L$  เท่ากับ 0.36 ขึ้นไป จะมีค่าต่ำกว่ากรณีช่องเปิดอื่นๆทุกกรณี และจะมีอัตราการลดลงของ  $C_{TS \max}$  ตามทิศทางการไหลโดยเฉลี่ย สูงกว่ากรณีช่องเปิดอื่นๆทุกกรณีเช่นกัน

กราฟรูปที่ 5.37–5.44 เป็นการเปรียบเทียบผลการใช้ LN แต่ละแบบเทียบกับกรณี L000 โดยดูจากค่า  $C_{TS}$  ที่ตำแหน่ง  $x/L$  และอัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน พบว่า เมื่อขนาดช่องเปิดลดลง (มองจากบนลงล่าง) การใช้ LN ในทุกกรณีนั้น จะทำให้ตำแหน่งที่เกิดค่า  $C_{TS \max}$  ลดต่ำลงมาทางด้านล่างเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ LN โดยเฉพาะที่บริเวณท้ายห้อง ( $x/L$  เท่ากับ 0.68 และ 0.96) ซึ่งสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนที่ตำแหน่ง  $x/L$  เท่ากับ 0.96 นอกจากนี้พบว่า ที่ตำแหน่ง  $x/L$  เท่ากับ 0.96 นั้น เมื่ออัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่าน้อยกว่า 0.50 (ที่ P0.24 และ P0.08) การใช้ LN จะทำให้ลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ที่ระดับความสูงตอนกลางของห้องสม่ำเสมอลงมาทางด้านล่างมากยิ่งขึ้น เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ LN และเมื่อเทียบกับกรณีที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.50 ดังจะเห็นได้จากการที่กราฟของกรณีที่ใช้ LN ปานกลางทางด้านล่างมากกว่ากรณีที่ไม่ใช้ LN และกรณีที่มีขนาดช่องเปิดมีค่าน้อย ปานกลางทางด้านล่างมากกว่ากรณีที่มีขนาดช่องเปิดมีค่ามาก ทั้งนี้จะมาจาก การที่เจ็ทในกรณีที่ใช้ LN มีการขยายตัวหนาและโค้งลงมาทางด้านล่างมากกว่า สำหรับรายละเอียดของการใช้ LN แต่ละแบบเทียบกับกรณี L000 นั้นมีดังต่อไปนี้

กราฟรูปที่ 5.37 แสดงผลการเปรียบเทียบกรณี L220 กับกรณี L000 พบว่า ในช่วงที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.50 (P1.00, P0.84, P0.68 และ P0.50) จะมีลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ในกรณี L220 ไม่แตกต่างไปจากกรณี L000 มากนัก ในทางตรงข้าม ในช่วงที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องมีค่าน้อยกว่า 0.50 นั้น (P0.24 และ P0.08) จะพบว่ากรณี L220 จะให้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่บริเวณด้านล่างของห้องสูงกว่ากรณี L000 รวมทั้งจะทำให้ลักษณะการกระจายตัวตามความสูงของอุณหภูมิสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น

กราฟรูปที่ 5.38 เป็นการเปรียบเทียบกรณี L221 กับกรณี L000 พบว่าลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ของทั้งสองกรณี จะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ในช่วงที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้อง มีค่าลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.68 (P1.00, P0.84 และ P0.68) สำหรับในช่วงที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องมีค่าน้อยกว่า 0.50 นั้น พบว่ากรณี L221 จะมีค่า

อุณหภูมิเฉลี่ยที่บริเวณด้านล่างของห้องสูงกว่ากรณี L000 ตลอดความยาวห้อง (ตั้งแต่  $x/L$  เท่ากับ 0.06 จนถึง 0.96) อีกทั้งลักษณะรูปร่างของการกระจายตัวของอุณหภูมิจะสม่ำเสมอและโค้งลงมากขึ้น โดยเฉพาะทางด้านท้ายห้อง

กราฟรูปที่ 5.39 เป็นการเปรียบเทียบกรณี L222 กับกรณี L000 พบว่า ในช่วงที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้อง มีค่าลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.68 นั้น ผลที่ได้จากกรณี L222 จะแตกต่างไปจากกรณี L000 เพียงเล็กน้อย แต่สำหรับในช่วงที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องมีค่าน้อยกว่า 0.50 นั้น จะพบว่า L222 จะทำให้ค่า  $C_{TS}$  ในบริเวณที่อยู่ต่ำกว่าตำแหน่งที่เกิดค่า  $C_{TS \max}$  นั้นมีค่าสูงกว่าในกรณี L000 ที่ทุกตำแหน่ง  $x/L$

กราฟรูปที่ 5.40 เป็นการเปรียบเทียบค่า  $C_{TS}$  ที่เกิดจากกรณี L224 และ L000 ซึ่งพบว่าที่ P1.00 และ P0.84 นั้น กรณี L224 จะไม่แตกต่างไปจากกรณี L000 มากนัก แต่สำหรับในช่วงที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.68 จะพบว่า L224 จะมีลักษณะที่ต่างไปจากกรณี L000 โดยที่ P0.68 และ P0.50 นั้น จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง  $x/L$  เท่ากับ 0.06 และ 0.36 ของกรณี L224 นั้นจะมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ระดับกลางห้องสูงขึ้นกว่ากรณี L000 ในขณะที่ P0.24 และ P0.08 นั้น จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ระดับกลางห้องและพื้นห้อง สูงกว่ากรณี L000 ตั้งแต่ต้นห้องจนถึงท้ายห้อง

ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบ LN ในชุด L22X แล้วพบว่า L224 จะมีผลทำให้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยระดับกลางห้องและพื้นห้อง สูงกว่ากรณี L000 ที่อัตราส่วนช่องเปิดตั้งแต่ P0.68 ลงมา เมื่อเทียบกับ LN อื่น ซึ่งมีผลนี้เพียงแค่ประมาณที่อัตราส่วนช่องเปิด ตั้งแต่ P0.50 ลงมา

กราฟรูปที่ 5.41-5.44 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  เมื่อใช้ LN ในชุด L24X เทียบกับกรณี L000 โดยกราฟรูปที่ 5.41 แสดงผลการทดลองในกรณี L240 เปรียบเทียบกับกรณี L000 พบว่า ที่ทุกๆอัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องนั้นที่บริเวณด้านบนซึ่งอยู่เหนือตำแหน่งที่เกิดค่า  $C_{TS \max}$  นั้นจะมีค่า  $C_{TS}$  ที่ต่ำกว่ากรณี L000 ที่ทุกตำแหน่ง  $x/L$  แสดงให้เห็นว่ามีการกระจายตัวของอุณหภูมิก่อมาจากบริเวณด้านบน ลงสู่ด้านล่าง นอกจากนี้ยังพบว่า ในช่วงที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องมีค่าน้อยกว่า 0.68 นั้น L240 จะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยที่บริเวณระดับกลางห้องและด้านล่างของห้องมีค่าสูงกว่ากรณี L000 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า L240 สามารถทำให้เจ็ทอากาศร้อนที่พ่นออกมามีทิศทางโค้งลงมาสู่บริเวณระดับกลางห้องและด้านล่างของห้องได้มากกว่ากรณี L000 ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนมากขึ้นที่ P0.24 และ P0.08 ในบริเวณท้ายห้อง ( $x/L$  เท่ากับ 0.96) ซึ่งจะมีตำแหน่งที่เกิดค่า  $C_{TS \max}$  อยู่ในระดับที่ต่ำกว่ากรณี L000 อย่างชัดเจน

กราฟรูปที่ 5.42 เป็นการเปรียบเทียบค่า  $C_{TS}$  ของกรณี L241 เทียบกับกรณี L000 จะพบว่าที่ทุกอัตราส่วนของช่องเปิดด้านท้ายห้องนั้นกรณี L241 จะแตกต่างไปจากกรณี L000 เพียงเล็กน้อย ยกเว้นที่ตำแหน่งต้นห้องด้านบน ( $x/L$  เท่ากับ 0.06 และ  $z/H$  น้อยกว่า 0.4) เท่านั้นที่กรณี L241 จะมีค่า  $C_{TS\max}$  ต่ำกว่ากรณี L000 อันน่าจะมีสาเหตุมาจาก การไหลในบริเวณนี้มีลักษณะเป็นแบบ 3 มิติมาก รวมทั้งตำแหน่งสัมพัทธ์ของจุดที่ทำการวัดอุณหภูมิดังกล่าวข้างต้น

กราฟรูปที่ 5.43 และ 5.44 แสดงผลของกรณี L242 และ L244 เทียบกับกรณี L000 ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าทั้งสองกรณีนี้ ต่างก็ทำให้ค่า  $C_{TS}$  ที่บริเวณระดับกลางห้องและด้านล่างของห้องสูงกว่ากรณี L000 ตั้งแต่บริเวณต้นห้องจนถึงท้ายห้อง สำหรับในช่วงที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องมีค่าน้อยกว่า 0.24

ดังนั้นจากการเปรียบเทียบการใช้ LN แต่ละแบบกับกรณี L000 โดยการดูจากค่าอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความกว้าง ( $C_{TS}$ ) นี้จะพบว่า 1) โดยทั่วไปแล้วเมื่ออัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.24 (P0.24 และ P0.08) LN ทุกแบบ จะทำให้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความกว้างที่บริเวณด้านล่างของห้องสูงกว่า และที่บริเวณด้านบนของห้องต่ำกว่ากรณีที่ไม่ใช้ LN เป็นผลทำให้ ลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  มีความสม่ำเสมอตามแนวความสูงของห้องมากกว่า ดังจะเห็นได้จากรูปร่างการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ในกรณีที่ใช้ LN ทั้ง 2 ชุดนั้น จะโค้งต่ำลงและชันมากขึ้นกว่ากรณีที่ไม่ใช้ LN อย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะที่ตำแหน่งท้ายห้อง ( $x/L$  เท่ากับ 0.96) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการกระจายตัวของอากาศร้อนจากด้านบนลงมาสู่ด้านล่างของห้องมากกว่านั่นเอง และ 2) เมื่อเปรียบเทียบ LN ภายในชุด L22X และ L24X พบว่า L224 และ L240 จะทำให้ค่า  $C_{TS}$  ที่บริเวณด้านล่างของห้องมีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่ใช้ LN มากที่สุดตามลำดับ

### 5.3.4 สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ ( $C_T$ )

สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ ( $C_T$ ) นี้เป็นค่าอุณหภูมิในรูปตัวแปรไร้มิติที่แสดงถึงค่าอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งภายในห้องที่คำนึงถึงผลของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง Centerline ของเจ็ทอากาศ ณ ตำแหน่งทางเข้าของห้องทดลอง ( $T_j$ ) และอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมขณะทำการทดลอง ( $T_{ref}$ ) ดังสมการที่ 4.7.1 ดังนั้นลักษณะการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมินี้ จึงแสดงถึงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในห้องได้เป็นอย่างดี โดยหากที่ตำแหน่งใดมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิต่ำก็แสดงว่าที่ตำแหน่งนั้นจะมีค่าอุณหภูมิที่สูงนั่นเอง ซึ่งกราฟรูปที่ 5.45-5.53 แสดงการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตามแนว Spanwise ในกรณีที่ไม่ใช้ LN และใช้ LN แบบต่างๆ กันตามลำดับ โดยในทุกกรณีการทดลองนั้น จะมีค่า Uncertainty ของ  $C_T$  ไม่เกิน  $\pm 0.04$

กราฟรูปที่ 5.45 แสดงการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตามแนว Spanwise ที่บริเวณต่างๆ ภายในห้องของกรณีที่ไม่ใช้ LN (L000) เมื่อ  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$  โดยแสดงอยู่ในรูปของค่า  $C_T$  ที่ระดับความสูง  $z/H$  ต่างๆ กัน

เป็นที่น่าสังเกตว่า ผลการทดลองในกราฟนี้จะแตกต่างไปจากกราฟรูปที่ 5.12 เล็กน้อย เนื่องจากตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่บริเวณต้นห้องไม่เหมือนกัน โดยในกราฟรูปที่ 5.12 จะทำการวัดที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.04$  ในขณะที่ในกราฟนี้ จะทำการวัดที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.06$  อันเนื่องมาจาก เมื่อมีการใช้ LN แล้วจะทำให้ไม่สามารถทำการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.04$  ได้

จากผลการทดลองพบว่า ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทุกค่าอัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องนั้นค่อนข้างจะมีลักษณะเป็นแบบ 2 มิติ ดังจะเห็นได้จากการที่เส้นกราฟแต่ละเส้นเกือบจะซ้อนทับกันสนิท และเมื่ออากาศไหลจากบริเวณต้นห้องไปยังด้านท้ายห้องนั้น (มองจากซ้ายไปขวา) จะพบว่าค่าอุณหภูมิสูงสุดจะมีค่าลดลงพร้อมทั้งบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงจะขยายบริเวณกว้างขึ้นจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของห้อง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง  $x/L$  เดียวกันจะพบว่าเมื่ออัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่าลดลง (มองจากบนลงล่าง) จะทำให้อุณหภูมิที่บริเวณด้านล่างของห้อง มีค่าเข้าใกล้ที่บริเวณด้านบนมากยิ่งขึ้น รวมทั้งทำให้อุณหภูมิกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้นตามแนวความสูงของห้อง

กราฟรูปที่ 5.46 แสดงการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตามแนว Spanwise ในกรณี L220 ซึ่งจะพบว่าที่ทุกอัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องนั้นจะมีลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่บริเวณต้นห้องด้านบน (โซน 1,  $x/L = 0.06$ ) เป็นแบบ 3 มิติ ดังจะเห็นได้จากการที่เส้นกราฟทั้ง 5 เส้นไม่ซ้อนทับกัน อย่างไรก็ตามที่ด้านล่างจะค่อนข้างเป็นแบบ 2 มิติ และเมื่อการไหลดำเนินต่อไป (มองจากซ้ายไปขวา) จะพบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิกอากาศจะเข้าสู่การไหลแบบ 2 มิติอย่างรวดเร็ว กล่าวคือผลของความ เป็น 3 มิติของการไหลอันเนื่องจากการไหลผ่าน Lobe นี้จะลดลงเมื่อการไหลอยู่ห่างจากปากทางออกของช่องพ่นอากาศ (หรืออีกนัยหนึ่งคืออยู่ห่างจาก Lobe) มากขึ้น

กราฟรูปที่ 5.47 แสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตามแนว Spanwise ในกรณี L221 พบว่ามีลักษณะคล้ายกับของกรณี L220 แต่จะแตกต่างกันตรงที่กรณี L221 นี้จะมีลักษณะการไหลที่ค่อนข้างจะเป็นแบบ 2 มิติมากกว่ากรณี L220 ที่บริเวณต้นห้อง สำหรับกราฟรูปที่ 5.48 แสดงผลในกรณี L222 พบว่า โดยภาพรวมแล้ว จะมีลักษณะการไหลที่ค่อนข้างเป็นแบบ 2 มิติ เช่นกัน

กราฟรูปที่ 5.49 แสดงผลของกรณี L224 พบว่าจะมีลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิลักษณะคล้ายกับในกรณี L220 กล่าวคือ จะมีลักษณะการไหลเป็นแบบ 3 มิติ ที่บริเวณตอนต้นห้องและจะมีลักษณะการไหลเป็นแบบ 2 มิติอย่างรวดเร็วเมื่อการไหลดำเนินต่อไปยังด้านท้าย



ห้อง รวมทั้งจะสังเกตเห็นว่าที่ตำแหน่ง  $x/L$  เท่ากับ 0.36 ของกรณี L224 นั้นจะยังคงมีลักษณะการไหลแบบ 3 มิติอยู่เมื่อเทียบกับกรณี L220 โดยที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.06$  และ 0.36 ของกรณี L224 นี้มีลักษณะการไหลเป็นแบบ 3 มิติอันเนื่องจากการไหลที่ตำแหน่ง  $y$  เท่ากับ  $-10.5$  และ  $10.5$  cm นั้นแตกต่างไปจากการไหลที่ตำแหน่ง  $y$  อื่นๆ

กราฟรูปที่ 5.50-5.53 แสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตามแนว Spanwise ของการใช้ LN ในชุด L24X โดยกราฟรูปที่ 5.50 แสดงผลการทดลองในกรณี L240 จะพบว่าที่บริเวณตอนต้นของห้อง ( $x/L = 0.06$  และ 0.36) นั้นจะมีลักษณะการไหลเป็นแบบ 3 มิติ โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.06$  ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าที่ตำแหน่ง  $y = 0$  นั้นจะแตกต่างไปจากที่ตำแหน่ง  $y$  อื่นๆ โดยมีค่า  $C_{T_{max}}$  น้อยกว่าที่ตำแหน่ง  $y$  อื่นๆ แต่เมื่อการไหลดำเนินต่อไปยังด้านท้ายห้อง จะพบว่าความเป็น 3 มิติของการไหลนี้จะค่อยๆ ลดลง และเข้าใกล้สู่สภาวะแบบ 2 มิติมากขึ้นที่บริเวณด้านท้ายห้อง ( $x/L = 0.68$  และ 0.96)

สำหรับกราฟรูปที่ 5.51 และ 5.52 ซึ่งแสดงผลของกรณี L241 และ L242 นั้นจะมีลักษณะเช่นเดียวกับในกรณี L240 แต่แตกต่างกันตรงที่ตำแหน่ง  $y = -10.5$  และ  $10.5$  cm ที่  $x/L = 0.06$  และ 0.36 นั้น จะมีค่าอุณหภูมิที่ด้านบนของห้องแตกต่างไปจากที่ตำแหน่ง  $y$  อื่นๆ โดยจะมีค่าอุณหภูมิต่ำกว่าที่ตำแหน่ง  $y$  อื่นๆ อันเนื่องจากผลของรูปร่าง L241 และ L242 รวมทั้งตำแหน่งที่ใช้วัดค่าอุณหภูมิตามแนว Spanwise ด้วย แต่สำหรับที่ตำแหน่งไกลออกไปนั้น ( $x/L = 0.68$  และ 0.96) ผลของ L241 และ L242 นี้ก็จะลดลงจนทำให้การไหลมีลักษณะเข้าสู่แบบ 2 มิติมากขึ้น

กราฟรูปที่ 5.53 แสดงผลสำหรับกรณี L244 จะพบว่า มีลักษณะที่ค่อนข้างเป็นแบบ 2 มิติ แต่ที่น่าสังเกตคือที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.36$  และ 0.68 นั้น เมื่ออัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่าตั้งแต่ 0.24 ขึ้นไปจะพบว่าที่ตำแหน่ง  $y$  เท่ากับ 0 นั้นจะมีค่าอุณหภูมิต่างไปจากที่ตำแหน่ง  $y$  อื่นๆ โดยจะมีค่า  $C_{T_{max}}$  ที่สูงกว่าที่ตำแหน่ง  $y$  อื่นๆ ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะที่ตำแหน่ง  $y$  เท่ากับ 0 นั้นเจ็ทอากาศร้อนพุ่งออกมาโดยตรง ดังลักษณะตำแหน่งการวัดในรูปที่ 4.11(ค)

จากผลการทดลองในส่วนของ  $C_T$  ทั้งหมดที่ผ่านมานี้ประกอบกับผลการทดลองในส่วนของ  $C_{TT}$ ,  $C_{TZ}$  และ  $C_{TS}$  ในหัวข้อที่ผ่านมา จะพบว่า L224 มีแนวโน้มที่จะทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องดีขึ้นมากที่สุด กล่าวคือทำให้อุณหภูมิที่บริเวณระดับตอนกลางและด้านล่างของห้องสูงขึ้น ในขณะที่บริเวณด้านบนนั้นมีอุณหภูมิประมาณเท่ากับหรือต่ำกว่ากรณี L000 เล็กน้อย



### การเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_T$ ระหว่างกรณี L224 และ L000

กราฟรูปที่ 5.54 เป็นการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตามแนว Spanwise ของกรณี L224 และ L000 ที่อัตราส่วนของช่องเปิดท้ายห้องบางค่า ซึ่งได้แก่ P1.00, P0.68 และ P0.08 จะพบว่าที่ P1.00 นั้นกรณี L224 จะแตกต่างไปจากกรณี L000 ไม่มากนัก แต่เมื่ออัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่าลดลงจนถึง 0.08 (P0.08) จะพบว่ากรณี L224 จะแตกต่างจากกรณี L000 มากยิ่งขึ้น โดยค่าอุณหภูมิที่บริเวณใกล้พื้นห้องในกรณี L224 จะมีค่าสูงกว่าในกรณี L000 ที่ทุกตำแหน่ง  $x/L$  รวมทั้งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.96$  นั้นกรณี L224 จะมีค่า  $C_{T\max}$  เกิดขึ้นที่บริเวณด้านล่างของห้อง ในขณะที่กรณี L000 จะมีค่า  $C_{T\max}$  เกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนของห้อง (เมื่อเทียบกับเส้นแนวระดับที่  $z/H = 0.4$ ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า L224 สามารถทำให้เจ็ทอากาศร้อนโค้งตัวลงสู่บริเวณพื้นห้องได้มากกว่าโดยเฉพาะในกรณีที่ขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่าน้อยๆ

### การเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_T$ ระหว่างกรณี L240 และ L000

กราฟรูปที่ 5.55 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างกรณี L240 และ L000 จะพบว่า โดยภาพรวมแล้วก็ให้ผลเช่นเดียวกับกรณี L224 กล่าวคือ ที่ตำแหน่ง  $x/L = 0.96$  เมื่อขนาดช่องเปิดท้ายห้องมีค่าน้อยนั้น (P0.08) กรณี L240 จะทำให้รูปร่างการกระจายตัวของค่า  $C_T$  มีความบิดงทางด้านล่างของห้องและมีค่า  $C_{T\max}$  เกิดขึ้นที่บริเวณด้านล่างของห้อง ในขณะที่กรณี L000 จะมีค่า  $C_{T\max}$  เกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนของห้อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า L240 สามารถทำให้เจ็ทอากาศร้อนโค้งตัวลงสู่บริเวณพื้นห้องได้มากกว่ากรณีที่ไม่ใช้ LN โดยเฉพาะในกรณีที่ขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่าน้อยๆ

จากผลการทดลองในส่วนของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ ( $C_T$ ) นี้จึงสรุปได้ว่า 1) การใช้ LN ติดตั้งที่บริเวณปากทางออกของช่องปล่อยอากาศเข้านี้ จะส่งผลให้ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่บริเวณใกล้ๆ กับ LN นั้นมีลักษณะเป็นแบบ 3 มิติ แต่เมื่อการไหลดำเนินต่อไปยังด้านท้ายห้องจะพบว่าความเป็น 3 มิตินี้จะค่อยๆลดลงจนมีลักษณะเป็นแบบ 2 มิติอย่างค่อนข้างรวดเร็วที่บริเวณท้ายห้อง 2) LN จะช่วยทำให้อากาศที่ถูกปล่อยออกมาที่ไหลเข้าสู่บริเวณตอนกลางและด้านล่างของห้องมากยิ่งขึ้น เมื่อเทียบกรณีที่ไม่มี LN โดยสังเกตได้จากการที่บริเวณตอนกลางและด้านล่างของห้องในกรณีที่ใช้ LN นั้น จะมีค่า  $C_T$  สูงกว่ากรณีที่ไม่มี LN โดยเฉพาะที่ตำแหน่งท้ายห้อง ( $x/L = 0.68$  และ  $0.96$ ) ของกรณีที่อัตราส่วนของช่องเปิดด้านท้ายมีค่าน้อยกว่า 0.24

จากการศึกษาผลกระทบของการใช้ Lobed nozzle ควบคู่กับขนาดของช่องระบายอากาศออกที่บริเวณท้ายห้อง สรุปได้ว่า 1)จากผลการทำ Flow visualization พบว่า การใช้ LN รูปทรงปิรามิดจะทำให้เกิด Streamwise vortex ขึ้นภายในการไหล ซึ่งช่วยเพิ่มการผสมระหว่างเจ็ทกับอากาศรอบข้างได้ดียิ่งขึ้น และ 2)เมื่อนำ LN นี้มาติดตั้งที่บริเวณปากทางออกของช่องปล่อยอากาศเข้าภายในห้องที่มีการระบายอากาศ จะพบว่า ในช่วงที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่าลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.24 นั้น การใช้ LN จะทำให้ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศภายในห้องไม่แตกต่างไปจากกรณีที่ไม่ใช้ LN มากนัก 3)แต่สำหรับในช่วงที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดมีค่าน้อยกว่า 0.24 แล้วจะพบว่า LN จะทำให้ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้อง สม่ำเสมอทั่วทั้งห้องมากยิ่งขึ้นกว่ากรณีที่ไม่ใช้ LN เป็นอย่างมาก 4)โดยผลของ LN จะทำให้ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ ( $C_T$ ) มีรูปร่างป้านลงทางด้านล่างอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะในบริเวณท้ายห้อง นอกจากนี้ยังพบว่า 5)LN ในชุด L22X และ L24X ที่ช่วยทำให้อากาศภายในห้องมีการกระจายตัวอย่างทั่วถึงมากที่สุด ได้แก่ L224 และ L240 ตามลำดับ และ 6)จาก LN ทั้งหมดที่พิจารณาในที่นี้จะพบว่า L224 จะช่วยทำให้อากาศภายในห้องมีการกระจายตัวอย่างทั่วถึงมากที่สุด

#### ผลของการใช้ Lobed nozzle ต่อการสูญเสียความดัน

การทดลองในส่วนนี้ เป็นการหาค่าความดันตกคร่อมที่เกิดจากการใช้ LN แบบต่างๆ เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ใช้ LN แต่เนื่องจากความดันตกคร่อมที่วัดในตำแหน่งก่อนและหลัง LN นั้นมีค่าน้อยมาก (น้อยกว่า 0.06 มิลลิเมตรน้ำ) ซึ่งไม่สามารถวัดด้วยอุปกรณ์ที่มีอยู่ได้ จึงได้เปลี่ยนไปทำการวัดค่า  $P_1 - P_{atm}$  แทน โดย  $P_1$  คือ ค่าความดันสถิตที่ตำแหน่ง  $x = -2$  cm ซึ่งเป็นตำแหน่งก่อนถึง LN และ  $P_{atm}$  คือ ความดันบรรยากาศภายนอกห้องทดลอง โดยในที่นี้ได้ทำการวัดค่า  $P_1 - P_{atm}$  ทั้งหมด 5 ตำแหน่งตลอดแนว Spanwise ( $y = -21.0, -10.5, 0, 10.5$  และ  $21.0$  cm) แล้วทำการหาค่าเฉลี่ยด้วยวิธีการ Area average สำหรับค่าความเร็วเฉลี่ยบริเวณช่องปล่อยเข้าที่ใช้ที่นั่น ( $U_j$ ) มีทั้งหมด 2 ค่า ได้แก่ 1.6 และ 2.0 m/s

กราฟรูปที่ 5.56 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าความดันตกคร่อมที่เกิดจากการใช้ LN แบบต่างๆ เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ใช้ LN ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่างๆกัน โดยแสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $P_1 - P_{atm}$  กับค่าความเร็วเฉลี่ยบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้าต่างๆกัน สำหรับกราฟรูปที่ 5.57 นั้น เป็นผลการทดลองเดียวกัน แต่แสดงค่าความดันตกคร่อมที่อยู่ในรูปของ  $C_p$  ซึ่งนิยามโดยสมการที่ 4.7.5

จากผลการทดลองพบว่า ค่าความดันตกคร่อมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อช่องเปิดด้านท้ายห้องมีขนาดลดลง แต่เนื่องจากค่าความดันตกคร่อม  $P_1 - P_{atm}$  ที่วัดได้ในกรณี P1.00, P0.84, P0.68, P0.50 และบางส่วนของกรณี P0.24 นั้นอยู่ในช่วงของความผิดพลาดของเครื่องมือวัด ( $\pm 0.06$

มิลลิเมตรน้ำ) ดังแสดงด้วยแถบเส้นตรงในกราฟรูปที่ 5.56 ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะที่ P0.08 ซึ่งจะพบว่า ค่า  $P_1 - P_{atm}$  นี้มีแนวโน้มที่จะแปรผันตามกำลังสองของค่าความเร็วเฉลี่ยที่บริเวณช่องปล่อยอากาศเข้า โดยดูได้จากกราฟที่  $C_p$  มีค่าคงที่ในกราฟรูปที่ 5.57 และจากกราฟทั้งสองนี้จะพบว่ากรณี L240 นั้นมีแนวโน้มที่จะมีค่าความดันตกคร่อมมากที่สุดที่ทุกขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะกรณี L240 เป็นตัวอย่าง

กราฟรูปที่ 5.58 และ 5.59 แสดงค่าความดันตกคร่อมของกรณี L240 เทียบกับกรณี L000 โดยอยู่ในรูปของค่า  $P_1 - P_{atm}$  และค่า  $C_p$  ตามลำดับ พบว่าค่าความดันตกคร่อมในกรณี L240 นี้จะมีค่ามากกว่ากรณี L000 ที่ทุกขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง (แม้ว่าที่บางกรณีจะอยู่ในช่วงของความผิดพลาดก็ตาม) และจะพบว่าค่าความดันตกคร่อมที่อยู่ในรูปของ  $P_1 - P_{atm}$  ของทั้งกรณี L240 และ L000 นั้นมีแนวโน้มที่จะแปรผันตามค่ากำลังสองของความเร็วเฉลี่ยที่บริเวณช่องปล่อยอากาศเข้า โดยในกรณี L240 นี้จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $P_1 - P_{atm}$  และ  $U_j$  ดังสมการในกราฟรูปที่ 5.58

อย่างไรก็ตามจากกราฟในรูปที่ 5.58 และ 5.59 นี้จะพบว่า ทั้งกรณี L240 และ L000 นั้น จะมีค่าความดันตกคร่อมลดลงเมื่ออัตราส่วนของช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่าเพิ่มขึ้น โดยพบว่า ที่ P1.00 จนถึง P0.24 นั้น ค่าความดันตกคร่อมของทั้งสองกรณี จะแตกต่างกันน้อยกว่าเมื่อเทียบกับค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างกรณี P0.24 จนถึง P0.08 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความดันตกคร่อมนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเมื่ออัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่าน้อยกว่า 0.24 และเมื่อพิจารณาค่าความดันตกคร่อมในรูปของค่า  $C_p$  ดังกราฟรูปที่ 5.59 จะพบว่าที่ความเร็วสูงนั้น ค่า  $C_p$  มีแนวโน้มที่จะคงที่ โดยค่า  $C_p$  สูงสุด ( $C_{pmax}$ ) นั้น จะเกิดในกรณี L240 ที่ P0.08 โดยมีค่าประมาณเท่ากับ 1.5 หรือกล่าวได้ว่าค่าความดันตกคร่อมของ L240 ที่เทียบกับความดันบรรยากาศภายนอกห้อง จะมีค่าประมาณ 1.5 เท่าของค่าความดันจลน์ ในขณะที่ความดันตกคร่อมสูงสุดของกรณี L000 นั้นมีค่าประมาณ 1.3 เท่าของค่าความดันจลน์ ซึ่งคิดเป็นค่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 15% อันเนื่องมาจากการใช้ LN นี้

กราฟรูปที่ 5.60 เป็นการดูผลของ Blockage effect ( $B_w$ ) ที่มีต่อค่า  $C_p$  โดยในที่นี้ได้นิยามเทอม  $B_w$  ไว้ดังนี้

$$B_w = \frac{nA_{\perp}}{A_1}$$

เมื่อ  $n$  คือ จำนวนของ Lobe ที่ขวางการไหลอยู่,  $A_{\perp}$  คือ พื้นที่ตั้งฉากกับการไหลของ Lobe ในส่วนที่ขวางการไหลบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้า และ  $A_1$  คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของช่องปล่อยอากาศเข้า ดังนั้นค่า  $B_w$  นี้จึงแสดงถึงค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ที่ขวางการไหลทั้งหมดของ Lobe เทียบกับพื้นที่การไหลทั้งหมดของช่องปล่อยอากาศเข้า ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่า

หากของไหลไหลผ่านสิ่งกีดขวางใด ที่มีพื้นที่ขวางการไหลมากกว่ารวมทั้งมีรูปร่างที่ต้านการไหลสูงแล้ว (มี Projected area และ Drag coefficient มาก) จะทำให้เกิดแรงต้านมาก พร้อมทั้งการไหลนั้นจะสูญเสียโมเมนตัมมากตามไปด้วย ซึ่งส่งผลให้การไหลผ่านสิ่งกีดขวางนั้นๆ เกิดการสูญเสียพลังงานเป็นอย่างมากตามมา สำหรับค่า  $B_w$  ของ LN แต่ละแบบนั้นแสดงไว้ในตารางที่ 5.24 จากกราฟรูปที่ 5.60 นี้ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C_p$  กับค่า  $B_w$  ของ LN แบบต่างๆ รวมทั้งกรณีที่ไม่ได้ใช้ LN ด้วย (ดังแสดงด้วยเส้นประ) โดยมีค่า Uncertainty =  $\pm 0.4$  และ  $\pm 0.3$  ในกรณี  $U_j = 1.6$  และ  $2.0$  m/s ตามลำดับ ซึ่งแม้ว่าผลการทดลองในแต่ละกรณีนั้น จะอยู่ในช่วงของ Uncertainty นี้ก็ตาม แต่จะพบว่า LN ทั้ง 2 ชุดนั้นมีแนวโน้มที่มีค่า  $C_p$  มากกว่ากรณี L000 ทั้งสิ้น โดยที่ LN ในชุด L22X และ L24X ซึ่งมีค่า  $C_p$  ประมาณคงที่ที่ทุกๆค่าของ  $B_w$  นั้น จะมีค่าสูงกว่ากรณี L000 ประมาณ 5 และ 15 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ (ทั้งที่  $U_j = 1.6$  และ  $2.0$  m/s) โดย L224 ซึ่งมีค่า  $B_w$  เท่ากับ 0.08 นั้นจะทำให้เกิดค่า  $C_p$  เท่ากับ 1.35 ในขณะที่ L240 ซึ่งมีค่า  $B_w$  เท่ากับ 0.24 นั้นจะทำให้เกิดค่า  $C_p$  เท่ากับ 1.50

เป็นที่น่าสังเกตว่า ถึงแม้  $B_w$  ของ LN แต่ละชุด จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่า  $C_p$  ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงการสูญเสียโมเมนตัมนั้น ยังคงมีค่าประมาณคงที่ แทนที่จะมีค่าเพิ่มขึ้น จึงแสดงให้เห็นว่าค่า  $C_p$  ไม่น่าจะขึ้นอยู่กับค่า  $B_w$  เพียงอย่างเดียว แต่น่าจะขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่นอีกด้วย ซึ่งได้แก่ลักษณะรูปร่างของ Lobe ในการต้านการไหลหรือค่า  $C_D$  (Drag coefficient) นั้นเอง นอกจากนี้หากพิจารณาที่ค่า  $B_w$  หนึ่งๆจะพบว่า กรณี L24X จะทำให้เกิดค่าความดันตกคร่อมที่มากกว่ากรณี L22X ทั้งที่  $U_j = 1.6$  และ  $2.0$  m/s ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะ กรณี L24X นั้นมีรูปร่างที่ต้านการไหลมากกว่ากรณี L22X นั้นเอง

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า 1) LN ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะทำให้เกิดความดันตกคร่อมในระดับหนึ่ง กล่าวคือ LN ในชุด L22X และ L24X จะทำให้มีค่าความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ไม่ได้ใช้ LN ประมาณ 5% และ 15% ตามลำดับ โดย 2) L224 ซึ่งมีค่า  $B_w$  เท่ากับ 0.08 นั้นจะทำให้เกิดค่า  $C_p$  เท่ากับ 1.35 ในขณะที่ L240 ซึ่งมีค่า  $B_w$  เท่ากับ 0.24 นั้นจะทำให้เกิดค่า  $C_p$  เท่ากับ 1.50 และจะเห็นได้ว่า 3) ค่าความดันตกคร่อม หรือพลังงานสูญเสียที่เกิดจากการไหลผ่าน LN นี้ จะขึ้นอยู่กับค่าพื้นที่ที่ขวางการไหล ( $B_w$ ) และลักษณะรูปร่างที่ต้านการไหล ( $C_D$ ) ของ LN นั้นๆ นอกจากนี้ยังพบว่า 4) LN ที่มีความยาวคาบมากกว่า จะมีแนวโน้มทำให้เกิดค่าความดันตกคร่อมที่มากกว่าตามไปด้วย



## บทที่ 6

### อภิปรายและสรุปผลการทดลอง

#### 6.1 อภิปรายผลการทดลอง

เนื่องจากการวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการกระจายตัวของอากาศร้อนภายในห้องที่มีการระบายอากาศ ซึ่งหากนำแนวคิดที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปใช้กับงานทางด้านห้องปรับอากาศที่ใช้อากาศเย็นแทนนั้น สันนิษฐานว่าจะยังคงให้ผลในเชิงคุณลักษณะ (Qualitative) ที่ไม่แตกต่างไปจากงานวิจัยนี้นัก เนื่องจากลักษณะการไหลของอากาศภายในห้องนั้นจะได้รับอิทธิพลส่วนใหญ่จากกระบวนการพา (Convection) และแรงลอยตัว (Buoyancy force) ซึ่งอิทธิพลจากกระบวนการพานั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศเท่าใดนัก แต่จะขึ้นอยู่กับความเร็วของอากาศเป็นส่วนใหญ่ ในทางตรงกันข้าม อิทธิพลจากแรงลอยตัวนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศจึงทำให้เกิดความแตกต่างขึ้นระหว่างการใช้อากาศร้อนและอากาศเย็น กล่าวคือ ถ้าเป็นกรณีที่ใช้อากาศร้อนดังเช่นในงานวิจัยนี้นั้น แรงลอยตัวของอากาศจะมีทิศทางพุ่งขึ้น จึงทำให้การไหลของอากาศร้อนมีแนวโน้มลอยสูงขึ้น แต่สำหรับกรณีที่ใช้อากาศเย็นนั้น แรงลอยตัวของอากาศจะมีทิศทางพุ่งต่ำลงสู่พื้นห้อง จึงทำให้การไหลของอากาศเย็นมีแนวโน้มลอยต่ำลงมากกว่าอากาศร้อน สำหรับผลของการใช้ Lobed nozzle รูปทรงปิรามิดนี้ซึ่งช่วยทำให้เกิด Large-scale streamwise vortices ขึ้นภายในการไหลนั้น จะช่วยเพิ่มการพาความร้อนในทิศทางที่พุ่งต่ำลงสู่พื้นห้องมากยิ่งขึ้น ดังนั้นหากนำ Lobed nozzle นี้ไปใช้กับอากาศเย็น สันนิษฐานว่าผลที่ได้จะไม่แตกต่างไปจากงานวิจัยนี้นัก และหากคำนึงถึงการกระจายตัวของอากาศเย็นภายในห้องปรับอากาศที่บริเวณตอนกลางและด้านล่างของห้องเป็นหลักแล้ว การใช้ Lobed nozzle กับอากาศเย็นนี้น่าจะทำให้การกระจายตัวของอากาศเย็นที่บริเวณดังกล่าวมีความสม่ำเสมอมากขึ้นกว่ากรณีที่ไม่ได้ใช้ Lobed nozzle อันเนื่องจาก Large-scale streamwise vortices ที่เกิดขึ้นจากการไหลผ่าน Lobed nozzle รวมทั้งการไหลของอากาศเย็นที่มีแนวโน้มลอยต่ำลงสู่พื้นห้องมากกว่าอากาศร้อนนั่นเอง

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกระจายอากาศของ Lobed nozzle รูปทรงปิรามิดนี้ กับหน้ากากแอร์ชนิดตะแกรง (Grill-type nozzle) ที่ใช้กับเครื่องปรับอากาศทั่วไป ภายใต้เงื่อนไขที่ว่าหน้ากากแอร์ถูกปรับให้มีทิศทางเดียวกันหมดนั้น การไหลของอากาศผ่านหน้ากากแอร์นี้จึงคล้ายกับการไหลในกรณี L000 ของงานวิจัยนี้ซึ่งมีลักษณะเป็นเจ็ทธรรมดา พบว่าอากาศที่พุ่งออกมาจะเกิดการฟุ้งกระจาย (Diffusion) ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหลหลัก (Mean jet direction) ที่น้อยกว่ากรณีที่ใช้ Lobed nozzle ดังจะเห็นได้จากความหนาของเจ็ทและลักษณะรูปร่างอุณหภูมิของกรณี L000 ที่มีความสม่ำเสมอน้อยกว่ากรณีที่ใช้ Lobed nozzle ดังนั้น หากคำนึงถึงการฟุ้งกระจายของอากาศที่พุ่งออกมาเป็นหลักแล้ว การใช้ Lobed



nozzle น่าจะให้การกระจายอากาศเย็นที่สม่ำเสมอกว่า แต่อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบนี้ก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆอย่าง เช่น ขนาดของห้องที่ใช้, รูปแบบการไหลของอากาศที่ต้องการจริงหรือความเร็วของอากาศที่พ่นออกมา เป็นต้น

นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบ Lobed nozzle กับหน้ากากของเครื่องปรับอากาศทั่วไปซึ่งมีลักษณะเป็นตะแกรง (Grill) ในแง่ของความดันตกคร่อมนั้น สันนิษฐานว่า Lobed nozzle น่าจะมีค่าความดันตกคร่อมที่น้อยกว่าหน้ากากของเครื่องปรับอากาศ อันเนื่องจากหน้ากากของเครื่องปรับอากาศทั่วไปนั้น มีค่า Blockage effect ( $B_w$ ) ประมาณ 0.5 ซึ่งมีค่าสูงกว่า Lobed nozzle ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถึง 2 เท่า (เมื่อเปรียบเทียบกับ Lobed nozzle ที่มีค่า  $B_w$  สูงสุด)

จากการที่พบว่า Lobed nozzle นั้นจะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยทั้งห้องสูงขึ้นมากกว่า และสามารถกระจายเจ็ทอากาศร้อนไปทั่วห้องได้ดีกว่า เมื่ออัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่าน้อยๆ โดยในที่นี้คือ  $t/H$  มีค่าน้อยกว่า 0.24 (P0.24 และ P0.08) ทั้งนี้จะเป็นเพราะการที่ขนาดของผนังด้านท้ายห้องที่ขวางการไหลของเจ็ทอากาศอยู่มีค่ามาก ซึ่งจะก่อให้เกิดความดันย้อนกลับ (Adverse pressure gradient) ที่มีค่ามากตามไปด้วย และส่งผลให้ Large-scale streamwise vortices ที่เกิดขึ้นเกิดการขยายตัว (Core expansion) มากขึ้นอันเนื่องจากความดันย้อนกลับที่เพิ่มขึ้นนี้ จึงทำให้เจ็ทอากาศร้อนที่ถูกพ่นออกมานั้นสามารถผสมกับอากาศด้านล่างห้องได้มากขึ้น และส่งผลให้อุณหภูมิอากาศบริเวณด้านล่างของห้องนี้มีค่าสูงขึ้นในกรณีดังกล่าว

ดังนั้นหากนำ Lobed nozzle นี้ไปใช้กับงานทางด้านห้องปรับอากาศ ซึ่งมีค่าอัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องน้อยกว่า 0.08 นั้น ก็น่าที่จะทำให้ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องนั้นสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น กล่าวคือ จะทำให้อุณหภูมิที่บริเวณตอนกลางและด้านล่างของห้องสูงขึ้นสำหรับในกรณีที่ใช้เจ็ทอากาศร้อน และในทางกลับกัน ก็จะทำให้อุณหภูมิที่บริเวณตอนกลางและด้านล่างของห้องต่ำลง สำหรับกรณีที่ใช้เจ็ทอากาศเย็น

สำหรับกรณีที่นำ Lobed nozzle นี้ไปใช้กับระบบหัวจ่ายเชื้อเพลิงหรืออากาศภายในห้องเผาไหม้ เปรียบเทียบกับการใช้แผ่น Vane ที่ใช้ปรับทิศทางการไหลของอากาศหรือน้ำมันเชื้อเพลิง โดยพิจารณาในกรณีที่มีค่า Blockage เท่ากัน คาดว่า Lobed nozzle น่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้ดีกว่าเนื่องจาก Lobed nozzle จะทำให้เกิด Streamwise vortex ขึ้นภายในการไหล ซึ่งจะช่วยให้การดึงเอาอากาศรอบข้างเข้าไปผสมได้ดีกว่าแผ่น Vane ที่ทำหน้าที่เพียงเปลี่ยนทิศทางการไหลของอากาศหรือน้ำมันเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้เท่านั้น

นอกจากนี้สำหรับความหนาของ Wall jet ที่ตำแหน่งท้ายห้อง ( $\delta$ ) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ซึ่งนิยามเป็นระยะที่วัดจากเพดานห้องลงมาถึงระดับความสูงที่มีค่า  $C_T/C_{Tmax} = 0.6$  นั้น เป็นการนิยามแบบสังเขป โดยพยายามให้ครอบคลุมความหนาส่วนใหญ่ของ Wall jet เท่านั้น อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองนี้พบว่า เมื่อพิจารณาถึงฟิสิกส์ของการไหลสำหรับช่วงที่ทำการปิด

ผนังท้ายห้องลงมามากกว่า  $\delta$  นั้น ในกรณีความเร็วสูง Wall jet ที่เพดานห้องจะมีโมเมนตัมมาก จึงไม่สามารถหลบหลีกผนังด้านท้ายแล้วไหลลอดใต้ผนังออกไปได้ แต่จะพุ่งปะทะกับผนังด้านท้ายอย่างรุนแรงแล้วยังคงไหลเป็น Wall jet ที่มีโมเมนตัมสูง ใต้ห้องลงมาตามผนังด้านท้าย ในทางตรงกันข้ามในกรณีความเร็วต่ำนั้น เจ็ทจะมีโมเมนตัมไม่มากพอ จึงสามารถหักเหเปลี่ยนทิศทาง แล้วไหลลอดใต้ผนังด้านท้ายออกสู่ภายนอกได้ง่ายกว่า ถึงแม้จะทำการปิดผนังท้ายห้องลงมาที่ระดับต่างๆ ดังนั้นจึงเห็นได้ว่า นิยามของ  $\delta$  ที่เหมาะสมควรจะนิยามจากโมเมนตัมของเจ็ทจากเพดานห้องลงมา ดังนั้นจึงเสนอให้ใช้นิยาม  $\delta_\alpha$  จากตัวแปรไร้มิติของโมเมนตัมฟลักซ์  $M(\delta_\alpha)$  โดย  $M(\delta_\alpha)$  นิยามเป็น

$$M(\delta_\alpha) = \frac{1}{\rho U_j^2 h} \int_0^{\delta_\alpha} \rho u^2 dy'$$

โดยคิดที่ตำแหน่งท้ายห้อง ( $x/L = 1.00$ ) ในกรณีเปิดผนังท้ายห้องทั้งหมด โดย  $y'$  คือ ระยะตามแนวตั้งที่วัดจากเพดานห้องลงมา จะเห็นได้ว่า  $M(\delta_\alpha)$  เป็นสัดส่วนของโมเมนตัมฟลักซ์ของ Wall jet จากระยะ  $y' = 0$  (ตำแหน่งเพดานห้อง) ถึง  $y' = \delta_\alpha$  ต่อโมเมนตัมฟลักซ์ของอากาศที่ทางเข้า ซึ่งตัวห้อย  $\alpha$  คือค่าของสัดส่วนนี้ ตัวอย่างเช่น

$$M(\delta_{0.8}) = \frac{1}{\rho U_j^2 h} \int_0^{\delta_{0.8}} \rho u^2 dy' = 0.8$$

โดยจากผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องนี้ชี้ให้เห็นว่า  $\delta_\alpha$  ควรจะครอบคลุมโมเมนตัมส่วนใหญ่ของเจ็ท แต่ค่าอัตราส่วน  $\alpha$  ที่แน่นอนที่จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะจากช่วงที่อุณหภูมิเฉลี่ยขึ้นอยู่กับขนาดของช่องเปิด จนถึงช่วงที่อุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าคงที่ในกรณีความเร็วต่างๆจะเป็นเท่าไรนั้น จะต้องมีการศึกษาในเรื่องการกระจายตัวของความเร็วต่อไป แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการวัดรูปร่างความเร็วจึงทำให้ไม่สามารถวัดค่า  $\alpha$  และ  $\delta_\alpha$  ที่แน่นอนนี้ได้ อย่างไรก็ตาม ผลสรุปที่ได้จากงานวิจัยนี้ไม่น่าจะขึ้นอยู่กับค่า  $\delta_\alpha$  ที่แน่นอนมากนัก เนื่องจากผลการทำ Flow visualization และผลการวัดอุณหภูมิทำให้สันนิษฐานได้ว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของ  $\delta$  ที่ใช้ในที่นี้จากค่า  $\delta_\alpha$  น่าจะมีค่าน้อยกว่าช่วงการปิดผนังด้านท้ายจาก  $\delta$  ที่ใช้ในการทดลอง จนถึงระยะปิดเกือบหมดคือ P0.24 มาก

## 6.2 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่เกิดขึ้นภายในห้องที่มีการระบายอากาศ โดยศึกษาถึงผลของการใช้ Lobed nozzle, ผลของความเร็วอากาศที่บริเวณช่องปล่อยอากาศเข้า และผลของขนาดช่องระบายอากาศออกที่บริเวณท้ายห้อง โดยจะพิจารณาใน

แง่ของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิต่างๆ อันได้แก่ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉลี่ยโดยรวม ( $C_{TT}$ ), สัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉลี่ยโดยบริเวณ ( $C_{TZ}$ ), สัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉลี่ยตลอดความกว้าง ( $C_{TS}$ ) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจ ( $C_T$ ) ซึ่งสามารถสรุปสาระสำคัญได้ดังนี้

จากการศึกษา ผลกระทบของความเร็วอากาศที่บริเวณช่องปล่อยอากาศเข้า และขนาดของช่องระบายอากาศออกที่บริเวณท้ายห้อง ต่อลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นภายในห้อง พบว่า

1) ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉลี่ยโดยรวม ( $C_{TT}$ ) นั้น กรณีความเร็วสูง ( $U_j = 4.4 \text{ m/s}$ ) จะมีค่า  $C_{TT}$  ที่สูงกว่ากรณีความเร็วต่ำ ( $U_j = 0.5 \text{ m/s}$ ) ที่ทุกขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง ยกเว้นกรณีที่ไม่ได้ปิดผนังท้ายห้องเลย ซึ่งทั้งสองความเร็วจะมีค่า  $C_{TT}$  ประมาณเท่ากัน และที่สำคัญ ในกรณีความเร็วสูงนั้น เมื่อทำการปิดผนังท้ายห้องลงมาในช่วงที่น้อยกว่าหรือเท่ากับความหนาของเจ็ท ( $\delta$ ) แล้ว  $C_{TT}$  จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามขนาดของช่องเปิดด้านท้ายห้อง โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดช่องเปิดมีค่าน้อยลง สำหรับในช่วงที่ปิดผนังท้ายห้องลงมาเกิน  $\delta$  นั้น  $C_{TT}$  จะมีค่าประมาณคงที่ แม้ว่าขนาดช่องเปิดจะมีค่าน้อยลงก็ตาม หรืออีกนัยหนึ่งกล่าวได้ว่า  $C_{TT}$  จะขึ้นอยู่กับขนาดของช่องเปิด เมื่อขนาดช่องเปิดอยู่ในช่วง ตั้งแต่กรณีที่ไม่ได้ปิดผนังท้ายห้องเลย จนถึงกรณีที่ปิดผนังท้ายห้องลงมาเท่ากับ  $\delta$  แต่จะไม่ขึ้นอยู่กับช่องเปิดเมื่อทำการปิดผนังท้ายห้องลงมาต่ำกว่า  $\delta$  ในทางตรงกันข้าม กรณีความเร็วต่ำ จะมีค่า  $C_{TT}$  เปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องตลอด แม้ว่าจะทำการปิดผนังลงมาเกินกว่า  $\delta$  แล้วก็ตาม หรืออีกนัยหนึ่ง  $C_{TT}$  จะขึ้นอยู่กับขนาดช่องเปิดตลอดช่วงการเปิด จากกรณีที่เปิดผนังท้ายห้องทั้งหมดจนถึงกรณีที่ปิดเกือบหมด

สาเหตุที่การเปลี่ยนแปลง  $C_{TT}$  ตามขนาดช่องเปิดเป็นดังนี้นี้เป็นเพราะ ในกรณีความเร็วสูง Wall jet ที่มีอุณหภูมิจและความเร็วสูงที่พุ่งออกจากช่องปล่อยอากาศเข้าบริเวณเพดานห้องนั้น จะมีโมเมนตัมมากพอที่เมื่อไหลไปปะทะกับผนังท้ายห้องที่ปิดลงมาต่ำกว่าหรือเท่ากับ  $\delta$  อย่างรุนแรงแล้ว จะถูกหักเหทิศทางและไหลใต้ตั้งลงมาตามผนังท้ายห้องในลักษณะที่เป็น Wall jet ร้อนเช่นกัน ซึ่งต่อมา Wall jet ร้อนที่ยังคงมีโมเมนตัมมากนี้ จะพุ่งลงสู่ด้านล่างและปะทะกับพื้นห้องอย่างรุนแรงในลักษณะของ Impinging jet ซึ่งจะทำให้เจ็ทอากาศร้อนบางส่วนไหลออกนอกห้องที่บริเวณช่องระบายอากาศออก และจะมีเจ็ทอากาศร้อนบางส่วนที่ไหลย้อนกลับเข้าไปภายในห้องเกิดเป็นลักษณะ Wall jet ร้อนขึ้นที่บริเวณพื้นห้อง ซึ่งจากเหตุการณ์ดังกล่าวนี้ แสดงให้เห็นถึงการไหลลักษณะ Recirculation ที่เกิดขึ้นภายในห้อง แต่ในทางตรงกันข้าม การปิดผนังท้ายห้องลงมาต่ำกว่าหรือเท่ากับ  $\delta$  ในกรณีความเร็วต่ำนั้น จะไม่สามารถกั้นเจ็ทอากาศร้อนที่ถูกปล่อยออกมาได้ทั้งหมด อันเนื่องจากการที่เจ็ทร้อนมีโมเมนตัมไม่มากพอจึงทำให้ถูกเปลี่ยนทิศทางได้ง่ายอันเนื่องจาก Adverse pressure gradient ที่เกิดขึ้นจากการปิดผนัง และส่งผลให้เจ็ทอากาศร้อนส่วนใหญ่ลอดผนังด้านท้ายออกสู่ภายนอกได้ ดังนั้นลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิจภายในห้อง จึงยังคงแตกต่างกันแม้ว่าจะทำการปิดผนังด้านท้ายห้องลงมาต่ำกว่า  $\delta$  แล้วก็ตาม

2) ในแง่สัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนโดยบริเวณ ( $C_{TZ}$ ) จะพบว่า เมื่อทำการปิดผนังทำยห้องลงมาน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $\delta$  แล้ว จะทำให้การเปลี่ยนแปลงของค่า  $C_{TZ}$  เทียบกับขนาดช่องเปิดด้านทำย แปรผกผันแบบเชิงเส้นกับขนาดของช่องเปิด ทั้งในกรณีความเร็วสูงและความเร็วต่ำ ในทางตรงกันข้าม หากทำการปิดผนังทำยห้องลงมามากกว่า  $\delta$  แล้ว ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า  $C_{TZ}$  เทียบกับขนาดช่องเปิดด้านทำยจะขึ้นอยู่กับ ค่าความเร็วอากาศที่บริเวณช่องปล่อยอากาศเข้าและตำแหน่งภายในห้อง โดยกรณีความเร็วสูง ค่า  $C_{TZ}$  จะมีค่าประมาณคงที่โดยไม่ขึ้นกับขนาดของช่องเปิด ทั้งด้านบน (โซน 1-4) และด้านล่าง (โซน 5-8) ของห้อง แต่สำหรับกรณีความเร็วต่ำ จะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ระหว่างที่บริเวณด้านบนและด้านล่างของห้อง ซึ่งที่บริเวณด้านบน  $C_{TZ}$  จะมีค่าประมาณคงที่ที่ทุกขนาดช่องเปิด แต่ที่บริเวณด้านล่างนั้น จะมีค่าเพิ่มขึ้นแบบประมาณเชิงเส้น เมื่อขนาดช่องเปิดมีค่าลดลง

3) ในแง่ของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนตลอดความกว้าง ( $C_{TS}$ ) นั้นพบว่า ในช่วงที่ทำการปิดผนังทำยห้องลงมาน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $\delta$  นั้น (ดูรูปที่ 5.5 และ 5.11 ประกอบ) ทั้งในกรณีความเร็วสูงและต่ำ ต่างก็มีลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ที่ไม่สม่ำเสมอตามแนวความสูงของห้องประมาณกัน ที่ทุกระยะ  $x/L$  แต่สำหรับในช่วงที่ทำการปิดผนังลงมามากกว่า  $\delta$  แล้วนั้น กรณีความเร็วสูงจะมีความสม่ำเสมอของค่า  $C_{TS}$  ตามแนวความสูงของห้องที่มากกว่ากรณีความเร็วต่ำอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะที่ระดับตอนกลางและด้านล่างของห้อง ที่ทุกระยะ  $x/L$  ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากการที่ในกรณีความเร็วต่ำนั้น ไม่เกิดหรือเกิด Recirculation ที่ไม่รุนแรงเท่ากับในกรณีความเร็วสูง จึงทำให้ไม่มีกระบวนการถ่ายเทแบบนำพาความร้อนจากเจ็ทกระจายเข้าสู่ห้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4) ในแง่ของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจน ( $C_T$ ) จะพบว่า การกระจายตัวของค่า  $C_T$  ที่ทุกขนาดช่องเปิดด้านทำยห้อง ของทั้งกรณีความเร็วต่ำและสูงนั้น มีลักษณะเป็นแบบ 2 มิติ โดยกรณีความเร็วสูง จะมีลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตามแนวความสูงของห้อง (แกน  $z$ ) ที่สม่ำเสมอกว่าในกรณีความเร็วต่ำ ที่ทุกตำแหน่งตามแนวความยาวของห้อง และทุก ๆ ขนาดช่องเปิดด้านทำยห้อง ยกเว้นในกรณีที่เปิดผนังด้านทำยห้องทั้งหมด ซึ่งทั้ง 2 ความเร็วนี้ มีลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิจนที่ไม่แตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้ ทั้งในกรณีความเร็วสูงและต่ำ นั้น ค่า  $C_{T \max}$  ที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวความยาวของห้อง จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อทำการปิดผนังทำยห้องลงมาน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $\delta$  แต่จะมีค่าประมาณคงที่ โดยไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของช่องเปิดด้านทำยห้อง ในช่วงที่ทำการปิดผนังทำยห้องลงมามากกว่า  $\delta$

5) ลักษณะและขนาดของการไหลแบบ Recirculation ที่เกิดขึ้นภายในห้อง จะขึ้นอยู่กับความเร็วของอากาศบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้า โดยในกรณีความเร็วสูง ( $U_j = 4.4 \text{ m/s}$ ) จะเกิด Recirculation ที่มีกำลังรุนแรง และขนาดใหญ่กว่ากรณีความเร็วต่ำ ( $U_j = 0.5 \text{ m/s}$ ) เนื่องจากเจ็ทอากาศในกรณีความเร็วสูงจะมีโมเมนตัมมากกว่ากรณีความเร็วต่ำ ซึ่งเมื่อปะทะกับผนังทำยห้องแล้วจะเกิดการไหลย้อนกลับเข้าไปภายในห้องอย่างรุนแรงกว่า จึงทำให้เกิดการไหลแบบ Recirculation ที่มีกำลังรุนแรง และขนาดใหญ่กว่ากรณีความเร็วต่ำดังกล่าว ส่งผลให้



$C_T$ -profile ของกรณีความเร็วสูงนั้นปานกว่า หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ มีความเต็มรูปลงมาทางด้านล่างมากกว่ากรณีความเร็วต่ำ

6) เนื่องจากจะเห็นได้ว่าลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้อง จะขึ้นอยู่กับความเร็วของอากาศที่บริเวณช่องปล่อยอากาศเข้าเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงเสนอให้ใช้ค่า  $\tau$  (Time scale) ซึ่งเป็นค่าคุณลักษณะของเวลา ที่นิยามเป็นเวลาทีอนุภาคของอากาศต้องใช้ในการเดินทางจากปลายปากช่องอากาศเข้าไปยังผนังฝั่งตรงข้ามด้านท้ายห้อง เป็นตัวกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยตามขนาดของช่องระบายอากาศและความเร็วของอากาศ โดยในที่นี้จะมีค่า  $\tau$  สำหรับกรณีความเร็วสูง ( $U_j = 4.4 \text{ m/s}$ ) และต่ำ ( $U_j = 0.5 \text{ m/s}$ ) เท่ากับ 0.2 และ 2.0 วินาที ตามลำดับ

สำหรับการศึกษา ผลกระทบของการใช้ Lobed nozzle (LN) และขนาดของช่องระบายอากาศออกที่บริเวณท้ายห้อง ต่อลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นภายในห้อง จะพบว่า

1) ในแง่ของผลการไหลพอสังเขป (Qualitative) ที่ได้จากการทำ Smoke-wire flow visualization พบว่า การใช้ LN ทั้งสองแบบ (ชุด L22X และ L24X) จะทำให้เกิด Streamwise vortex ขึ้นภายในการไหล ทำให้สามารถกระจายอากาศเข้าสู่บริเวณด้านล่างของห้องได้ดีกว่ากรณีที่ไม่ใช้ LN เนื่องจาก Streamwise vortex ที่เกิดขึ้นจาก LN นั้น จะช่วยในการดึงเอาอากาศรอบข้างเข้ามาผสมได้ดียิ่งขึ้น จึงทำให้เจ็ทอากาศที่พุ่งออกมา นั้น มีความหนามากขึ้นและกระจายตัวเข้าสู่บริเวณด้านล่างของห้องได้ดียิ่งขึ้น

2) ในแง่ของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยโดยรวม ( $C_{TT}$ ) นั้นสรุปได้ว่า LN จะมีผลต่อค่า  $C_{TT}$  เพียงเล็กน้อยหรือแทบไม่มีเลย เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ใช้ LN ในช่วงที่ขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่ามาก (ช่วงที่  $t/H$  มีค่าลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.24) แต่จะมีผลทำให้  $C_{TT}$  มีค่าสูงขึ้นกว่ากรณีที่ไม่ได้ใช้ LN อย่างเห็นได้ชัด เมื่อขนาดช่องเปิดมีค่าน้อย ( $t/H$  น้อยกว่า 0.24)

ที่ทุกขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องนั้น กรณี L224 จะให้ค่า  $C_{TT}$  สูงกว่ากรณีที่ไม่ได้ใช้ LN มากที่สุดในชุด L22X ในขณะที่กรณี L240 นั้นจะให้ค่า  $C_{TT}$  สูงกว่ากรณีที่ไม่ได้ใช้ LN มากที่สุดสำหรับชุด L24X และเมื่อเปรียบเทียบการใช้ LN ทั้ง 2 ชุดแล้วก็จะพบว่า L224 จะให้ค่า  $C_{TT}$  สูงสุดในบรรดา LN ทั้งหมด โดยเฉพาะที่ขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่าน้อยๆ โดยที่ P0.08 นั้น L224 จะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยทั้งห้อง สูงขึ้นกว่ากรณีที่ไม่ใช้ LN ประมาณ 10% ของค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งทางเข้าห้องและอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

นอกเหนือจากนั้น โดยรวมแล้วพบว่า  $C_{TT}$  จะมีค่าขึ้นอยู่กับ ระยะห่างระหว่าง Lobe และความยาวคาบแบบไม่เชิงเส้น หรืออีกนัยหนึ่งคือ ค่าระยะห่างระหว่าง Lobe และความยาวคาบจะมีผลต่อค่า  $C_{TT}$  ในลักษณะที่ควบคู่กันไป (Couple)

สำหรับสาเหตุที่ทำให้ค่า  $C_{TT}$  ขึ้นอยู่กับ ค่าระยะห่างระหว่าง Lobe และความยาวคาบแบบไม่เชิงเส้นนี้ สันนิษฐานว่าเป็นผลมาจาก การไหลผ่าน LN และการไหลภายในห้องที่เป็น



แบบไม่เชิงเส้น การเกิด Vortex ที่มี Strength ต่างกันที่ความยาวคาบและระยะห่างระหว่าง Lobe ต่างๆกัน รวมทั้งอาจมี Interaction ระหว่าง Vortex ที่ถูกสร้างขึ้นต่างกันที่ระยะห่างและความยาวคาบของ LN ที่แตกต่างกัน

3) ในแง่สัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยโดยบริเวณ ( $C_{TZ}$ ) จะพบว่า เมื่ออัตราส่วนของช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่าลดลงจาก 1.00 จนถึง 0.24 นั้น LN จะทำให้ค่า  $C_{TZ}$  ในแต่ละบริเวณมีค่าประมาณเท่ากับหรือสูงกว่ากรณีที่ไม่ใช้ LN เล็กน้อย ในทุกบริเวณ แต่ในช่วงที่อัตราส่วนของช่องเปิดด้านท้ายห้องมีค่าน้อยกว่า 0.24 โดยเฉพาะที่ 0.08 นั้น LN จะทำให้เจ็ทอากาศกระจายตัวและดึงอากาศรอบข้างเข้ามาผสมได้ดีกว่ากรณีที่ไม่ใช้ LN เป็นอย่างมาก ทำให้เจ็ทมีความหนาและโค้งตัวลงสู่ด้านล่างมากขึ้น จึงส่งผลให้อุณหภูมิที่บริเวณท้ายห้องด้านบน (โซน 4) มีค่าต่ำกว่ากรณีที่ไม่ใช้ LN ในขณะที่บริเวณด้านล่าง (โซน 5-8) กลับมีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่ใช้ LN และจากการเปรียบเทียบการใช้ LN ชุด L22X และ L24X กับกรณี L000 จะพบว่า L224 และ L240 จะทำให้อุณหภูมิอากาศภายในห้องที่แต่ละโซน สูงกว่ากรณี L000 มากที่สุดในแต่ละชุด และถ้าเปรียบเทียบ LN ทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะพบว่า L224 จะทำให้ได้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องสูงที่สุด โดยเฉพาะที่บริเวณด้านล่างของห้องนั้น L224 จะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงขึ้นกว่ากรณีที่ไม่ใช้ LN ประมาณ 10% ของค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งทางเข้าห้องและอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

สำหรับผลของค่าระยะห่างระหว่าง Lobe และความยาวคาบ ที่มีต่อค่า  $C_{TZ}$  นั้นพบว่า ทั้งสองพารามิเตอร์นี้ ต่างก็ส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TZ}$  ที่แต่ละบริเวณภายในห้องในลักษณะเช่นเดียวกับ  $C_{TT}$  กล่าวคือ จะส่งผลในลักษณะที่ควบคู่กันไป

4) ในแง่ของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความกว้าง ( $C_{TS}$ ) นั้นพบว่า LN ทุกแบบ จะทำให้ค่า  $C_{TS}$  ที่บริเวณระดับตอนกลางและด้านล่างของห้องสูงขึ้นกว่ากรณี L000 ในขณะที่บริเวณด้านบนกลับมีค่าต่ำลง กล่าวคือ ลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  มีความสม่ำเสมอตามแนวความสูงของห้อง มากกว่ากรณีที่ไม่ได้ใช้ LN ดังจะเห็นได้จากรูปร่างการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ของการใช้ LN ทั้ง 2 ชุดนั้น จะโค้งต่ำลงและมีความเต็มรูปลงมาทางด้านล่างมากขึ้นกว่ากรณี L000 อย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะที่ตำแหน่งท้ายห้อง ( $x/L = 0.96$ ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของอากาศร้อนจากด้านบนลงมาสู่ด้านล่างของห้องมากกว่ากรณี L000 รวมทั้งเจ็ทอากาศร้อนมีความหนาเพิ่มขึ้น และมีทิศทางโค้งลงสู่ด้านล่างมากกว่ากรณี L000 ด้วย

เมื่อเปรียบเทียบผลของ LN ภายในชุด L22X และ L24X กับกรณี L000 ต่อค่า  $C_{TS}$  นี้ ก็ยังคงพบว่า L224 และ L240 จะทำให้ค่า  $C_{TS}$  ที่บริเวณตอนกลางและด้านล่างของห้องมีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่ใช้ LN มากที่สุดตามลำดับ

5) ในแง่ของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ ( $C_T$ ) นั้นพบว่า การใช้ LN ติดตั้งที่บริเวณปากทางออกของช่องปล่อยอากาศเข้านี้ จะส่งผลให้ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่บริเวณใกล้ๆกับ LN นั้นมีลักษณะเป็นแบบ 3 มิติ แต่เมื่อการไหลดำเนินต่อไปยังด้านท้ายห้อง จะพบว่า ความเป็น 3 มิตินี้จะค่อยๆลดลงและเข้าสู่ลักษณะแบบ 2 มิติที่บริเวณท้ายห้อง และจะเห็นได้

ว่า LN นี้ จะช่วยทำให้อากาศที่ถูกปล่อยออกมานั้นไหลเข้าสู่บริเวณตอนกลางและด้านล่างของห้องมากยิ่งขึ้น เมื่อเทียบกรณีที่ไม่ใช้ LN โดยสังเกตได้จาก การที่บริเวณตอนกลางและด้านล่างของห้องในกรณีที่ใช้ LN นั้น จะมีค่า  $C_T$  สูงกว่ากรณีที่ไม่ใช้ LN โดยเฉพาะที่ตำแหน่งท้ายห้อง ( $x/L = 0.68$  และ  $0.96$ ) ของกรณีที่อยู่ตรงส่วนของช่องเปิดด้านท้ายมีค่าน้อยกว่า 0.24

6) ในแง่ของผลของการใช้ Lobed nozzle ต่อการสูญเสียความดัน พบว่า LN ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะทำให้เกิดความดันตกคร่อมในระดับหนึ่ง กล่าวคือ LN ในชุด L22X และ L24X จะทำให้มีค่าความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ไม่ได้ใช้ LN สูงสุดประมาณ 5% และ 15% ตามลำดับ โดย L224 ซึ่งมีค่า  $B_w$  เท่ากับ 0.08 นั้นจะทำให้เกิดค่า  $C_p$  เท่ากับ 1.35 ในขณะที่ L240 ซึ่งมีค่า  $B_w$  เท่ากับ 0.24 นั้นจะทำให้เกิดค่า  $C_p$  เท่ากับ 1.50 และจะเห็นได้ว่าค่าความดันตกคร่อม หรือพลังงานสูญเสียที่เกิดจากการไหลผ่าน LN นั้น จะขึ้นอยู่กับค่าพื้นที่ที่ขวางการไหล ( $B_w$ ) และลักษณะรูปร่างที่ต้านการไหล ( $C_D$ ) ของ LN นั้นๆ นอกจากนี้ยังพบว่า LN ที่มีความยาวคาบมากกว่า จะมีแนวโน้มทำให้เกิดค่าความดันตกคร่อมที่มากกว่าตามไปด้วย

### 6.3 ข้อเสนอแนะของงานวิจัยในอนาคต

จากผลงานวิจัยนี้พบว่า Lobed nozzle รูปทรงปิรามิด สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของอากาศภายในห้อง และเพิ่มความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องได้ในระดับหนึ่ง โดยประสิทธิภาพการผสมนี้จะขึ้นอยู่กับทั้งค่าความยาวคาบ และระยะห่างระหว่าง Lobed nozzle ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ทั้ง 2 ค่าที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจเกี่ยวกับผลของพารามิเตอร์อื่นๆ ของ Lobed nozzle ที่ยังไม่ได้ทำการศึกษางานวิจัยนี้ ยกตัวอย่าง เช่น แอมพลิจูด (A) และค่าความลึก (B) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามการใช้ Lobed nozzle ที่มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะต้องคำนึงถึงการสูญเสียพลังงานที่อยู่ในรูปของการสูญเสียความดันเนื่องจากการไหลผ่าน Lobed nozzle นี้ รวมทั้งลักษณะของ Vortex interaction ที่เกิดขึ้นด้วย โดยแนวทางในการศึกษานั้น น่าจะมุ่งเน้นที่รูปร่างของ Lobe ในการสร้าง Streamwise vortex ที่มีกำลังสูงและมีขนาดใหญ่ขึ้นภายในการไหล

นอกจากนี้อาจจะศึกษาถึงผลของ Lobed nozzle ที่ติดตั้งบริเวณปากทางออกของเจ็ท โดยที่ไม่มีห้อง เพื่อให้เข้าใจคุณลักษณะพื้นฐานของ Lobe มากขึ้นและเพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบหัวฉีด (Injector) ต่างๆได้

นอกเหนือจากนั้นงานวิจัยในอนาคต อาจจะทำการศึกษาถึงผลของความเร็วอากาศบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้าที่ไหลผ่าน Lobed nozzle หนึ่งๆ ต่อลักษณะการกระจายตัวของอากาศและประสิทธิภาพการผสมของอากาศที่เกิดขึ้นภายในห้อง เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ต่อกับงานทางด้านห้องปรับอากาศและการระบายอากาศหรือห้องเผาไหม้ตามโรงงานอุตสาหกรรมในขอบเขตที่กว้างขวางมากยิ่งขึ้น



## ประมวลตาราง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงรายละเอียดและผลการศึกษการไหลภายในห้องที่มีการระบายอากาศที่ผ่านมาในอดีต

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
1	Nielsen et al. (1978)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ใช้แบบจำลองของห้องซึ่งมีความสูง (H) 89.3 mm ยาว(L) 3H และกว้าง (W) 1H ช่องปล่อยอากาศเข้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าอยู่สูงติดเพดานมีความสูง (h) 0.056H กว้าง(w) 0.5H และ 1H ส่วนช่องระบายอากาศออกมีความสูง(t) 0.16H และกว้าง 1H ติดตั้งอยู่ที่บริเวณด้านล่างของผนังฝั่งตรงข้ามกับช่องปล่อยอากาศเข้า</li> <li>ใช้ Plane contraction ซึ่งมี Area ratio = 2 ในการสร้างเจ็ทอากาศเข้าสู่ห้องที่มีการระบายอากาศนี้</li> <li>ใช้ Laser-doppler anemometry (LDA) วัดค่าความเร็วเฉลี่ย และความเร็ว rms</li> <li>ใช้โปรแกรม TEACH ที่อาศัย k-ε model และเขียนโดยระเบียบวิธี Finite volume ในการคำนวณ</li> </ul>	อากาศ	ทำการทดลองที่ Reynolds number ( $Re_h$ ) ตั้งแต่ 5,000-10,000 และเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร็วที่คำนวณได้กับที่ได้จากการทดลอง	<ul style="list-style-type: none"> <li>Normalized velocity profile ไม่ขึ้นกับค่า Reynolds number ของเจ็ทที่พ่นออกมาจากช่องพ่นอากาศในช่วงค่าที่ทำการทดลองคือ 5,000-10,000</li> <li>ค่า Maximum reverse velocity จะแปรผันโดยตรงกับขนาดพื้นที่หน้าตัดของช่องพ่นอากาศและแปรผกผันกับ Inlet angle ของเจ็ทและความยาวห้อง</li> <li>ห้องที่มีความยาวมากกว่าจะทำให้เกิดการไหลของอากาศแบบ Unsteady flow ได้ง่ายกว่าห้องที่มีความยาวน้อยกว่า</li> <li>ค่าความเร็วที่คำนวณได้จากโปรแกรม TEACH กับที่ได้จากการทดลองมีความใกล้เคียงกันในระดับที่นำไปใช้กับงานออกแบบได้</li> </ul>

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
2	Gosman et al. (1980)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ใช้แบบจำลองของห้องซึ่งมีขนาดต่างๆดังนี้ <math>H = 89.3</math> mm, <math>L/H = 3.0</math>, <math>W/H = 1.0</math>, <math>h/H = 0.1</math>, <math>w/H = 0.1</math> และ <math>t/H = 0.16</math></li> <li>● ที่บริเวณช่องพ่นอากาศมีลักษณะเป็นท่อตรงยาว 270 mm ที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (<math>h = w</math>)</li> <li>● ใช้ Laser-doppler anemometer ในการวัดความเร็วอากาศ</li> <li>● ใช้ k-<math>\epsilon</math> model ในการคำนวณโดยอาศัยระเบียบวิธี Finite volume</li> </ul>	อากาศ	ทำการทดลองที่ Reynolds number ( $Re_h$ ) เท่ากับ 9,000 และเปรียบเทียบระหว่างค่าต่างๆที่คำนวณได้กับที่ได้จากการทดลอง	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ค่า Maximum reverse velocity ในบริเวณ Recirculation region จะแปรผันโดยตรงกับขนาดพื้นที่หน้าตัดของช่องพ่นอากาศแต่จะไม่ขึ้นกับรูปร่างหน้าตัดของช่องพ่นอากาศนั้น</li> <li>● ค่าต่างๆที่คำนวณได้จาก k-<math>\epsilon</math> model จะแตกต่างไปจากค่าที่ได้จากการทดลองไม่เกิน <math>\pm 5\%</math></li> </ul>



ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
3	Davidson (1996)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ทำการศึกษาลักษณะการไหลของอากาศภายในห้องที่มีการระบายอากาศด้วย LES โดยเปรียบเทียบผลระหว่างการใช้ Smagorinsky model ของ Smagorinsky (1963) กับ Dynamic model ของ Germano (1991)</li> <li>ลักษณะของห้องที่ศึกษามีความสูง(H)เท่ากับ 3 m, ยาว(L)เท่ากับ 3H และกว้าง(W)เท่ากับ 1H มีช่องปล่อยอากาศเข้า(h)สูงเท่ากับ 0.056H และช่องระบายอากาศออก(t)สูงเท่ากับ 0.16H โดยช่องปล่อยอากาศเข้าอยู่สูงติดเพดานที่ผนังด้านหนึ่ง และช่องระบายอากาศออกอยู่ติดกับพื้นที่ผนังฝั่งตรงข้าม</li> </ul>	อากาศ	<ul style="list-style-type: none"> <li>อากาศที่ช่องปล่อยอากาศเข้ามีความเร็วเฉลี่ย (<math>U_{in}</math>) เท่ากับ 0.455 m/s (ค่า <math>Re_h</math> ประมาณ 4,300) ที่อุณหภูมิ 20 °C</li> <li>ผลการคำนวณที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับผลจากการวัดด้วย LDA ของ Restivo (1979)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ค่าความเร็วเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณ แสดงลักษณะที่สอดคล้องกับผลจากการทดลองของ Restivo (1979)</li> <li>การไหลที่เกิดขึ้นภายในห้องมีลักษณะเป็น Wall jet ที่บริเวณใกล้กับเพดาน นอกจากนี้ยังเกิดลักษณะของ Recirculation flow ในบริเวณตอนกลางของห้อง และมีลักษณะของ Secondary recirculation region ที่บริเวณมุมขวาบน และมุมซ้ายล่างของห้อง โดยมีทิศทางที่ตรงข้ามกับ Main recirculation ที่บริเวณตอนกลางของห้อง</li> <li>จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จาก Smagorinsky model กับ Dynamics model พบว่าผลที่ได้จาก Smagorinsky model ขึ้นกับค่าคงที่ของ Model (C) มาก ดังนั้น Dynamics model จึงเหมาะสมกับการคำนวณมากกว่า</li> <li>เวลาที่ใช้ในการคำนวณประมาณ 80 % ใช้ในการแก้สมการของความดันที่อยู่ในรูปของ Poisson Equation</li> </ul>

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
4	Peng et al. (1997)	ทำการศึกษาเชิงตัวเลขโดยการศึกษาและพัฒนา Low-Reynolds-number $k-\omega$ model เพื่อทำนายการไหลหมุนวนในการไหลผ่าน BFS และ Confined ventilation enclosure (ดังแสดงในรูปที่ 2.3) โดยเพิ่มเทอมของ Turbulence cross diffusion ลงในสมการการถ่ายเทของ $\omega$	อากาศ	การไหลผ่าน BFS และ Confined ventilation enclosure	ผลการคำนวณที่ได้จาก Turbulence model ที่พัฒนาขึ้น ใกล้เคียงกับผลจากการทดลองของ Restivo (1979) มากกว่าโมเดลอื่นๆที่นำมาเปรียบเทียบกัน

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงรายละเอียดและผลการศึกษาการไหลผ่าน BFS ที่ผ่านมานในอดีต

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
1	Bradshaw and Wong (1972)	ทำการศึกษเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลหมุนวนที่เกิดจากการไหลผ่าน BFS หรือชั้นบันได โดยเน้นการศึกษาที่บริเวณหลังจุด Impingement หรือที่เรียกว่า บริเวณของการปรับตัวเข้าสู่สภาวะสมดุล (Relaxation region)	อากาศ	ลักษณะของ BFS ที่ใช้ในการศึกษามีอัตราส่วนระหว่างช่องทางออกต่อช่องทางเข้า (Expansion ratio) เท่ากับ 1.25	<ul style="list-style-type: none"> <li>จากการศึกษาพบว่าที่บริเวณของการปรับตัวเข้าสู่สภาวะสมดุลนั้นลักษณะของชั้นขอบเขตที่เกิดขึ้นจะต่างไปจากชั้นขอบเขตธรรมดา หลังจากนั้นจึงค่อยๆปรับตัวเข้าสู่สภาวะสมดุลอย่างช้าๆโดยใช้ระยะทางประมาณ 30 เท่าของความสูงของชั้นบันได</li> <li>จากการวัดพบว่า Recirculation region มีความยาวประมาณ 6 เท่าของความสูงของชั้นบันได</li> </ul>
2	Armaly et al. (1983)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ทำศึกษาการไหลผ่าน BFS โดยทำการทดลอง และการคำนวณทางทฤษฎี</li> <li>BFS ที่ใช้ในการศึกษานี้มีอัตราส่วนระหว่างความสูงของช่องทางไหลออกต่อความสูงของช่องทางไหลเข้า (Expansion ratio, ER) ประมาณ 1.94</li> </ul>	อากาศ	มี Reynolds number ( $Re_h$ โดย $h$ เป็นความสูงของช่องทางเข้า) ตั้งแต่ 70 ถึง 8,000 ซึ่งครอบคลุมช่วงการไหลตั้งแต่ Laminar, Transitional จนถึง Turbulent flow โดยการไหลที่ทางเข้ามีลักษณะเป็น Fully developed flow	<ul style="list-style-type: none"> <li>เมื่อ <math>Re_h</math> น้อยกว่า 1,200 การไหลมีลักษณะเป็นแบบ Laminar flow โดยความยาวของ Recirculation region ต่อความสูงของชั้นบันได (<math>X_r/S</math>) มีลักษณะเป็นฟังก์ชันของ <math>Re_h</math> แบบไม่เชิงเส้น</li> <li>เมื่อ <math>Re_h</math> อยู่ในช่วง 1,200 ถึง 6,600 การไหลมีลักษณะเป็น Transitional flow โดยระยะ <math>X_r/S</math> จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อ <math>Re_h</math> เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผล</li> </ul>

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
		<ul style="list-style-type: none"> <li>ทำการวัดค่าความเร็วเฉลี่ยด้วย LDA</li> </ul>			<p>จากการเกิด Velocity fluctuation ขึ้นในการไหล</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>เมื่อ <math>Re_h</math> มากกว่า 6,600 การไหลจะเป็นแบบ Turbulent flow และมีระยะ <math>X_r/S</math> คงที่ที่ประมาณ 8 แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการศึกษาของ Brederode and Bradshaw (1972) และ Moss et al. (1979) พบว่า <math>X_r/S</math> นอกจากจะเป็นฟังก์ชันของ <math>Re_h</math> แล้วยังเป็นฟังก์ชันของ Expansion ratio ด้วย</li> </ul>
3	Otugen (1991)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ทำการศึกษาถึงผลของ Expansion ratio ของ BFS ที่มีต่อลักษณะการไหลหมุนวนและระยะ Reattachment ในการไหลผ่าน BFS ซึ่ง Expansion ratio ในที่นี้เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างความสูงของชั้นบันไดต่อความสูงของช่องทางไหลเข้า</li> <li>ทำการวัดค่าความเร็วเฉลี่ยและ Turbulence intensity ด้วย LDA</li> </ul>	อากาศ	<ul style="list-style-type: none"> <li>ทดลองแปรเปลี่ยนค่าของ ER ไปทั้งหมด 3 ค่าคือ 0.5, 1.0 และ 2.13 ด้วยการเปลี่ยนความสูงของชั้นบันได แต่คงค่าของพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ</li> <li>คงค่า <math>Re_h</math> ไว้ที่ 16,600 ตลอดทุกกรณีการทดลอง</li> </ul>	เมื่อเพิ่มขนาดของ ER แล้วจะทำให้ระดับของ Turbulence intensity ใน Shear layer ที่ขอบของชั้นบันไดมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ Shear layer โตเร็วขึ้น จึงส่งผลให้ระยะ Reattachment หดสั้นลง

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงรายละเอียดและผลการศึกษาเกี่ยวกับ Mixing layer (หรือ Shear layer) ที่ผ่านมานในอดีต

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
1	Brown and Roshko (1974)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ทำการทดลองในอุโมงลมที่ใช้สำหรับศึกษาเรื่อง Mixing layer โดยเฉพาะ</li> <li>หน้าตัดทางออกของ Nozzle ของของไหลทั้ง 2 ชนิดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด <math>4 \times 1</math> นิ้ว<sup>2</sup></li> <li>ใช้ Wedge-shaped splitter plate ที่มีความหนาบริเวณปลาย Plate เท่ากับ 0.002 นิ้ว ในการแยกของไหลออกเป็น 2 ชั้น</li> <li>ใช้ Pitot-static probe และ Pitot probe ในการวัดความดัน</li> <li>ใช้ Density probe ในการวัดความหนาแน่น</li> <li>ทำ Flow visualization โดยใช้เทคนิค Shadowgraph</li> </ul>	ฮีเลียม และไนโตรเจน	<ul style="list-style-type: none"> <li>ที่บริเวณปลาย Splitter plate มี Momentum Thickness เท่ากับ 0.001 นิ้ว</li> <li>ทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วของของไหล (<math>U_1/U_2</math>) เท่ากับ <math>\sqrt{7}</math> และ 7 และที่แต่ละค่าของ <math>U_1/U_2</math> นี้ทำการทดลองที่ค่าอัตราส่วนของความหนาแน่น (<math>\rho_1/\rho_2</math>) ต่างๆ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>อัตราส่วนความหนาแน่นของของไหลจะมีผลต่อมุมของการกระจายตัว (Spreading angle) ของ Mixing layer น้อย</li> <li>Large scale structures จะมีผลต่อลักษณะโครงสร้างของ Mixing layer ที่ทุกๆค่าของอัตราส่วนความหนาแน่นของของไหล</li> <li>สำหรับ Mixing layer ที่การไหลชั้นหนึ่งเป็นการไหลแบบเหนือเสียง (Supersonic flow) อัตราการโต (Growth rate) ของ Mixing layer จะไม่ขึ้นกับผลของความหนาแน่นของของไหลเลยแต่จะขึ้นกับผลของการอัดตัวได้ของของไหล (Compressibility effect)</li> <li>Large scale structures จะส่งผลต่อการ Entrainment และการผสมของ Mixing layer กล่าวคือ Large scale structures จะช่วยกวาดเอาอากาศรอบข้างเข้าไปผสมกับอากาศภายใน Mixing layer ได้มากขึ้นทำให้การผสมดีขึ้น</li> </ul>



ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
2	Bernal and Roshko (1986)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ใช้อุโมงค์ลมและอุโมงค์น้ำ</li> <li>● อุโมงค์ลมที่ใช้ประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญอันได้แก่ Stagnation section, Contraction และ Test section โดย Stagnation section ที่ใช้ในการลดระดับเทอร์บูเรนซ์นั้น ประกอบด้วย โฟม, Perforated plate, Honeycomb และ Screen ชนิดละเอียด สำหรับ Contraction เป็นแบบ 2 มิติที่มี Area ratio เท่ากับ 4:1 และ Test section มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด <math>5 \times 10 \text{ cm}^2</math> ยาว 25 cm โดยมีแผ่น Partition ที่ระดับกึ่งกลาง Test section แบ่งการไหลออกเป็น 2 ชั้น</li> <li>● ใช้ Concentration probe 2 อัน และ Pitot-static probe 1 อัน ในการวัดค่าเฉลี่ยและค่า rms ของการ Fluctuation ของค่าความเข้มข้น</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● อากาศ</li> <li>● น้ำ</li> <li>● ไนโตรเจนและฮีเลียม</li> </ul>	ทุกการทดลองนั้นที่บริเวณปลายของแผ่น Partition มีชั้นขอบเขตเป็นแบบ Laminar	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Secondary structures (Streamwise vortex) เกิดจากความไม่เสถียรภาพของ Spanwise vortex ซึ่งความไม่เสถียรภาพนี้ขึ้นกับค่า Critical Reynolds number และค่าความยาวคลื่นในแนว Spanwise</li> <li>● ขนาดของ Secondary structures ในแนว Spanwise จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางในแนวการไหล</li> <li>● Streamwise counter-rotating vortices นั้นเป็นส่วนหนึ่งของเส้น Vortex line ที่เกิดขึ้นในบริเวณ Braid Region ซึ่งอยู่ระหว่าง Spanwise vortex 2 ลูกที่อยู่ติดกัน โดย Vortex line นี้จะเข้าไปถึงบริเวณชั้นของไหลความเร็วสูงที่อยู่ด้านบนของ Spanwise vortex ที่อยู่ด้านหน้า และบริเวณชั้นของไหลความเร็วต่ำที่อยู่ด้านล่างของ Spanwise vortex ที่ตามมา</li> <li>● Secondary structures ที่เกิดขึ้นจะช่วยให้การดึงเอาของไหลรอบข้างเข้าไปผสมกับของไหลบริเวณ</li> </ul>

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
		<ul style="list-style-type: none"> <li>● ทำ Flow visualization ภายในอุโมงค์ลม โดยอาศัยเทคนิค Shadowgraph และ Schlieren</li> <li>● สำหรับอุโมงค์น้ำใช้สำหรับทำ Flow visualization โดยอาศัยเทคนิค Laser-induced fluorescence</li> </ul>			<p>ตรงกลางของแกน Spanwise vortex ได้มากขึ้น ทำให้การผสมดีขึ้น</p>

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สมภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
3	Lasheras and Choi (1988)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ใช้อุโมงค์น้ำแบบ Closed loop ที่มี Settling chamber ยาว 80 cm ซึ่งภายในใส่ฟองน้ำ, Honeycomb และ Screen ละเอียดอยู่เพื่อใช้ในการสร้างการไหลแบบ Laminar สำหรับการไหลแบบ Laminar สำหรับการ Contraction เป็น แบบ 3 มิติ มีความยาว 40 cm โดยมี Contraction ratio เท่ากับ 9:1 และใช้แผ่น Splitter plate แบบต่าง ๆ ในการทำให้เกิดการไหลแยกออกเป็น 2 ชั้น</li> <li>Test section ยาว 200 cm โดยมีขนาดหน้าตัด <math>9 \times 25 \text{ cm}^2</math> ทำให้การไหลในแต่ละชั้นมี Aspect ratio ประมาณ 5:1 และทำความเร็วได้ตั้งแต่ 0.5-15 cm/s</li> <li>เป็นการศึกษาเชิง Qualitative ที่ใช้การทำ Flow visualization โดยอาศัยทั้งหมด 3 เทคนิค คือ DIV (Direct interface visualization), การใช้ LIF ( Laser induced</li> </ul>	น้ำ	<ul style="list-style-type: none"> <li>การไหลพื้นฐานที่ใช้เปรียบเทียบในการทดลองนี้เป็น Free shear layer แบบ 2 มิติ ที่สร้างจากชั้นการไหลแบบ Laminar ทั้ง 2 ชั้นที่มีความเร็วต่างกันกล่าวคือชั้นของไหลด้านบนมีความเร็วเฉลี่ย 3.4 เซนติเมตรต่อวินาที และชั้นของไหลด้านล่างมีความเร็วเฉลี่ย 1.5 cm/s ตลอดความกว้าง</li> <li>ที่บริเวณปลาย Splitter plate (ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นในการเกิด Shear layer ) ของการไหลชั้นบนและล่างมีความหนาของชั้นขอบเขตเท่ากับ 6 และ 9 mm ตามลำดับ สำหรับ Momentum thickness มีค่าเท่ากับ 1.2 และ 0.8 mm ตามลำดับ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>การไหลแบบ Mixing layer ธรรมดาพบว่าความไม่มีเสถียรภาพ แบบ Kelvin-Helmholtz จะทำให้เกิด Spanwise Vortex แบบ 2 มิติ</li> <li>มี Vortex tubes เกิดขึ้นที่บริเวณระหว่าง Spanwise vortex 2 ลูก (Braid region) เพราะจากการที่มี Positive strain เกิดขึ้นอันเนื่องมาจาก Spanwise vortex คู่ดังกล่าว โดยที่แกนของ Vortex tubes เหล่านี้จะมีทิศทางเดียวกับทิศของ Positive strain ที่มีค่าสูงสุด (ซึ่งทิศทางของ Positive strain ที่มีค่าสูงสุดมีทิศทางเดียวกับการไหลเราจึงเรียก Vortex tubes เหล่านี้ว่า Streamwise vortex) แต่ Spanwise vortex ที่เกิดขึ้นก็ยังคงมีลักษณะเป็นแบบ 2 มิติอยู่</li> <li>การใช้ Perturbation ที่มีรูปร่างเป็นคลื่นจะทำให้ Spanwise vortex ที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะเป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นเท่ากับความยาวคลื่นของ Perturbation แต่จะมีเฟสต่างกัน <math>180^\circ</math> ยกเว้นกรณีที่ใช้ Corrugated indented splitter plate ชนิด 180 Out-of-phase ที่มีแอมพลิจูดมากพอ (ในที่นี้คือ <math>\geq 3\text{mm}</math>) ซึ่งจะทำให้ได้เฟสตรงกันและพบว่าที่</li> </ul>

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
		Fluorescence) และการใช้ Spotlight induced fluorescence		<ul style="list-style-type: none"> <li>● Reynolds number ที่คิดจากค่าแตกต่างของความเร็วการไหลทั้ง 2 ชั้นและค่า Momentum thickness ที่บริเวณปลาย Splitter plate นั้นมีค่าเท่ากับ 45</li> <li>● ใช้แผ่น Splitter plate ทั้งหมด 4 แบบที่เป็น Perturbation นอกเหนือจากแบบพื้นฐาน ซึ่งทั้ง 4 แบบนี้มีรูปร่างเป็นคลื่นตลอดความกว้างของปากทางออก Nozzle โดยมีความยาวคลื่น(<math>\lambda</math>) และค่าแอมพลิจูด (A) ต่างๆกัน</li> </ul>	<p>บริเวณใกล้กับ Splitter plate นั้นจะไม่มี Interaction ระหว่าง Spanwise และ Streamwise vortex เกิดขึ้นดังจะเห็นได้จากการที่ Spanwise vortex ยังคงมีลักษณะเป็นแบบ 2 มิติอยู่แต่ในทางตรงข้ามที่บริเวณไกลออกไปตามแนวการไหลจะมี Interaction ระหว่าง Spanwise และ Streamwise vortex เกิดขึ้นทำให้เกิดบริเวณที่มี Vorticity field อันซับซ้อนซึ่งจะนำไปสู่การเกิดปรากฏการณ์ต่างๆที่บริเวณระหว่าง Spanwise vortex ได้ เช่น การเกิด Pairing, Tearing และ Amalgamation</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● สำหรับ Perturbation แบบคลื่นนี้ทิศทาง (Orientation) จะมีผลต่อลักษณะการไหลของ Mixing layer มากกว่าผลจากความยาวคลื่น</li> </ul>

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สถานะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
4	David (1997)	เป็นการจำลองการไหลของ Mixing layers แบบ 2 มิติที่อัดตัวไม่ได้โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมา	-	มีสมมติฐานว่าของไหลที่บริเวณรอบข้าง ซึ่งถือว่าเป็นบริเวณ Irrotational region นั้นจะถ่ายเทเข้ามาสู่บริเวณ Large scale structure โดยเริ่มถ่ายเทจากจุด Stagnation point และถ่ายเทผ่านทางพื้นผิวหน้าสัมผัส (Contact surface) ระหว่างของไหลทั้ง 2 ชั้นที่อยู่ในบริเวณ Braid region	<ul style="list-style-type: none"> <li>● แบบจำลองนี้สามารถใช้ประมาณตำแหน่งและอัตราที่มวลของของไหลรอบข้างไหลเข้าสู่ Large scale structure ใน Mixing layer แบบ 2 มิติได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถใช้ประมาณ Growth rate ของ Large scale structure ได้ด้วย</li> <li>● ลักษณะของ Mixing layer ที่ได้จากการจำลองโดยแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองของ Jimenez (1980) และที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขซึ่งใช้หลักการของ “Array of point vortices” โดย Chorin (1973)</li> <li>● จากผลการคำนวณพบว่า Mixing layer จะคงตัว (Saturated) เมื่อ Vortex เคลื่อนเข้ามาอยู่ชิดกัน ซึ่งก็คือการเกิด Interaction ระหว่าง Vortex ขึ้น เช่น การเกิด Vortex pairing เป็นต้น</li> </ul>



ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงรายละเอียดและผลการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมผสานของเจ็ทที่ผ่านมาในอดีต

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
1	Krothapalli et al. (1981)	<ul style="list-style-type: none"> <li>เป็นการทดลองในอุโมงค์ลมที่มีหน้าตัดทางออกของ Nozzle เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด <math>50 \times 3 \text{ mm}^2</math> (โดยมี Aspect Ratio เท่ากับ 16.7)</li> <li>ใช้ Hot-wire anemometer วัดความเร็ว</li> <li>ทำการวัดความเร็วเฉลี่ยและ Turbulence shear stress</li> </ul>	อากาศ	<ul style="list-style-type: none"> <li>ความเร็วเฉลี่ยที่ตำแหน่งทางออก Nozzle เท่ากับ <math>60 \text{ m/s}</math> ซึ่งคิดเป็น Reynolds number ที่ขึ้นกับความกว้างของปากทางออก Nozzle ได้เท่ากับ <math>1.2 \times 10^4</math></li> <li>ที่ตำแหน่งทางออกของ Nozzle มีระดับความเป็นเทอร์บูเรนท์ต่ำและที่ผนังมีชั้นขอบเขตแบบ Laminar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>การไหลของเจ็ทที่พุ่งออกจาก Nozzle ที่มีหน้าตัดทางออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า นั้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 บริเวณ ได้แก่ Potential core region, Two-dimensional type region และ Axisymmetric-type region</li> <li>Two-dimensional type region ซึ่งถือว่าการไหลภายในบริเวณนี้เป็นแบบ 2 มิติและความเร็วจะลดลงในอัตราที่คล้ายกับ Planar jet จะเริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่ตำแหน่งที่ Shear layer ซึ่งแยกตัวออกจากขอบด้านยาวของ Nozzle ทั้ง 2 ด้านมาบรรจบกัน</li> <li>Axisymmetric-type region ซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่ต่อจาก Two-dimensional type region และความเร็วของการไหลภายในบริเวณนี้จะลดลงในอัตราที่คล้ายกับ Axisymmetric jet นั้นจะเริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่ตำแหน่งที่ Shear layer ซึ่งแยกตัวออกจากขอบด้านสั้นของ Nozzle ทั้ง 2 ด้านมาบรรจบกัน</li> </ul>

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สมภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
2	Bradbury and Khadem (1975)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● เป็นการทดลองโดยใช้ Free jet ที่มีหน้าตัดทางออกของ Nozzle เป็นรูปวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางยาว 8 นิ้ว</li> <li>● Tab ที่ใช้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความยาวด้านละ 1/16 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ Nozzle ซึ่งติดตั้งอยู่ที่บริเวณขอบของ Nozzle</li> <li>● ใช้ Pitot-static probe ในการวัดความเร็วเฉลี่ยภายในบริเวณเจ็ท และใช้ Pitch-and-yaw probe แบบ 5 รู ในการหาทิศทางการไหล</li> <li>● ใช้ Pulsed-wire anemometer ในการวัดความเร็วนอกบริเวณเจ็ท เพื่อใช้หา Entrainment rate ของเจ็ท</li> </ul>	อากาศ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ทำการทดลองที่ Reynolds number เท่ากับ <math>6 \times 10^5</math></li> <li>● ความเร็วเฉลี่ยที่บริเวณทางออกของ Nozzle มีความสม่ำเสมอยกเว้นที่บริเวณชั้นขอบเขตของการไหลที่ผนังของ Nozzle และมีระดับความเป็นเทอร์บูเรนท์ 0.5 เปอร์เซนต์</li> </ul>	<p>ความหนาของชั้นขอบเขตและระดับความเป็นเทอร์บูเรนท์ของเจ็ทที่บริเวณทางออกของ Nozzle รวมทั้ง Nozzle Convergence นั้นจะส่งผลต่ออัตราการเติบโตของเจ็ทน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลของการใช้ Tab รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยเฉพาะการใช้ Tab จำนวน 2 Tab ติดตั้งบริเวณขอบของ Nozzle ในลักษณะที่วางตรงข้ามกันนั้นจะส่งผลต่อการเติบโตของเจ็ทมากที่สุด กล่าวคือ ทำให้ความยาวของ Potential core ของเจ็ทสั้นลง, Centerline turbulent intensity ของเจ็ทเพิ่มขึ้น และช่วยการเพิ่มการ Entrainment ของเจ็ทได้ ซึ่งแสดงว่าการใช้ Tab จำนวน 2 Tabs นี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของ เจ็ท กับอากาศรอบข้างได้ดีที่สุด</p>

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
3	Belovich and Samimy (1996)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● เป็นการไหลใน Coaxial jet ที่มี Inner jet ไหลผ่าน Lobed-mixer nozzle ที่มี Ramp angle, <math>\alpha = 20^\circ</math> โดยมีพื้นที่หน้าตัดประมาณ <math>450 \text{ mm}^2</math></li> <li>● Contraction มี Area ratio = 7.44:1 โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางขาออก = 63.5 mm</li> <li>● ใช้ LDV ในการวัดความเร็ว</li> <li>● ใช้ Tobacco smoke ในการทำ Flow visualization</li> </ul>	อากาศ	ทำการทดลองที่ค่าอัตราส่วนความเร็วภายในต่อภายนอก 3 ค่า ได้แก่ 3:1, 1:1 และ 1:3	<ul style="list-style-type: none"> <li>● การผสมผสานจะดีขึ้นเมื่อมีการหมุนวนตามทิศทางการไหลและ Large-scale structure อันเกิดจากความไม่เสถียรภาพแบบ Kelvin-Helmholtz ของการไหลเพิ่มขึ้น</li> <li>● กรณีอัตราส่วนความเร็วภายใน:ภายนอกเป็น 3:1 พบว่าการผสมผสานจะเกิดจากอิทธิพลของ Streamwise vortex และความไม่เสถียรภาพแบบ Kelvin-Helmholtz</li> <li>● กรณีอัตราส่วนความเร็วภายใน:ภายนอกเป็น 1:1 พบว่าการผสมผสานจะเกิดจากอิทธิพลของ Streamwise vortex เพียงอย่างเดียว</li> <li>● กรณีอัตราส่วนความเร็วภายใน:ภายนอกเป็น 1:3 พบว่าการผสมผสานจะเกิดจากอิทธิพลของการไหลของเจ็ทด้านนอกและอิทธิพลของ Ambient air</li> </ul>

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สมภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
4	Reeder and Samimy (1996)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ใช้อุโมงค์น้ำที่มี Contraction ratio 3 : 1 โดยหน้าตัดทางออกของ Contraction เป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 1.5 cm</li> <li>เจ็ทน้ำนี้จะไหลอยู่ภายในถังเก็บน้ำที่ยาว 91 cm, กว้าง 37 cm และสูง 38 cm โดยถังเก็บน้ำนี้ทำจากพลาสติกใสเพื่อใช้ในการทำ Flow visualization</li> <li>ตำแหน่งศูนย์กลางเจ็ทจะอยู่สูงจากพื้น 8.5 D และอยู่ห่างจากผนังด้านข้างทั้งสองประมาณ 12 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของเจ็ท</li> <li>ใช้ LDV ที่สามารถวัดความเร็วใน 2 ทิศทางได้ในการวัดความเร็ว</li> <li>ทำ Flow visualization โดยใช้เทคนิค Laser-induced fluorescence และ PLIF (Planar Laser-Induced Fluorescence)</li> </ul>	น้ำ	<ul style="list-style-type: none"> <li>ทำการทดลองที่ <math>Re_D = 1,950</math> และ <math>4,160</math> แล้วเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ใช้และไม่ใช้ Tab</li> <li>ใช้ Tab รูปสามเหลี่ยมที่มีฐานยาว <math>0.28D</math> และสูง <math>0.1D</math> โดยมี Pitch Angle เท่ากับ <math>45^\circ</math> และ <math>135^\circ</math></li> <li>เป็นการทดลองเจ็ทที่ความเร็วต่ำ (Jet core velocity, <math>U_j = 0.16</math> m/s) เมื่อเทียบกับการทดลองก่อนๆ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>การใช้ Tab รูปสามเหลี่ยมกับเจ็ทที่มีความเร็วต่ำจะทำให้รูปร่างของเจ็ทเปลี่ยนแปลงไปและทำให้ Reynolds stress มีค่าเพิ่มขึ้นจึงสามารถดึงเอาของไหลภายนอกเข้ามาผสมกับของไหลภายในเจ็ทได้มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผสมดีขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองอื่นซึ่งใช้เจ็ทที่มีความเร็วสูง</li> <li>Tab สามเหลี่ยมแต่ละอันที่ใช้กับเจ็ทที่มีความเร็วต่ำนี้จะทำให้เกิด Counter-rotating streamwise vortices ที่มีกำลังสูงทำให้เจ็ทที่ติด Tab นี้สามารถดึงเอาของไหลภายนอกมาผสมได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้เกิด Streamwise vortices ชุดที่ 2 ที่มีกำลังต่ำกว่าซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ Horseshoe Vortex ที่บริเวณใกล้ๆ Tab ซึ่งไม่พบในเจ็ทที่มีความเร็วสูง (ทั้งนี้อาจเป็นเพราะชั้นขอบเขตที่ปากทางออกของ Nozzle ในกรณีเจ็ทความเร็วสูงนั้นบางกว่าในกรณีเจ็ทความเร็วต่ำ)</li> <li>สำหรับ Tab สามเหลี่ยมที่ติดตั้งแบบมี Pitch angle เท่ากับ <math>45^\circ</math> (Inverted delta tabs) นั้นจะทำให้เกิด Streamwise vortices ชุดที่ 3 ขึ้นที่บริเวณปลายยอดของ Tab</li> </ul>

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สมภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
5	Smith et al. (1997)	<ul style="list-style-type: none"> <li>เป็นการทดลองในอุโมงค์ลมความเร็วต่ำที่มี Contraction ratio เท่ากับ 4:1 และ Test section มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 9.5 cm</li> <li>ใช้ Injector ที่สร้างจากอลูมิเนียมทั้งหมด 3 แบบ โดยเป็นแบบ Lobed injector 2 อัน และเป็นแบบ Straight slot injector 1 อัน</li> <li>เป็นการไหลลักษณะ Coaxial jet โดยของไหลที่ใช้เป็น Inner jet คือ CO<sub>2</sub> และใช้อากาศเป็น Outer jet</li> <li>ใช้เทคนิค Acetone-PLIF ในการทำ Flow visualization และใช้กล้อง CCD ในการถ่ายภาพ</li> <li>ใช้ Pitot probe ในการวัดความหนาโมเมนต์ และใช้ Hot-wire anemometer ในการวัดความเร็ว</li> </ul>	CO <sub>2</sub> และ อากาศ	แต่ละ Injector นั้นจะทำการทดลองทั้งหมด 3 สมภาวะซึ่งแต่ละสมภาวะการทดลองนั้นจะมีค่าความเร็วของ CO <sub>2</sub> และ อากาศแตกต่างกันออกไป	Lobed injector เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยทำให้เกิด Streamwise vorticity ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผสมในระดับโมเลกุลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศได้ รวมทั้งทำให้เกิดบริเวณที่มีค่า Strain rate ที่สูงในบริเวณ Near field ซึ่งจะช่วยให้การจุดระเบิด (Ignition) ในบริเวณดังกล่าวได้



ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สถานะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
6	Han and Taghavi (1998)	เป็นการศึกษาเชิงตัวเลขเกี่ยวกับผลของรูปร่างที่บริเวณทางออกของ Nozzle และผลของชั้นขอบเขตแบบหมุนควง (Boundary layer swirl) ต่อลักษณะของ Subsonic jet ที่เกิดขึ้นพร้อมทั้งเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยในการศึกษานี้ใช้ "PROTEUS" Computer code	-	เป็นการทดลองเกี่ยวกับ Subsonic jet ที่ใช้หน้าตัดทางออกของเจ็ททั้งหมด 2 แบบ คือ แบบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มี Aspect ratio เท่ากับ 2.8 และแบบรูปรอยบาก (Notched nozzle) โดยทั้ง 2 แบบนี้จะทำการติด Vane ที่บริเวณปากทางออกของ Nozzle ด้วยเพื่อคิดผลของชั้นขอบเขตแบบหมุนควง (Swirl boundary layer)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ชั้นขอบเขตแบบหมุนควงที่บริเวณปากทางออกของ Nozzle จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของ Subsonic jet ที่บริเวณ Near field ได้ โดยที่หน้าตัดทางออก Nozzle รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีชั้นขอบเขตแบบหมุนควงนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผสมได้มากที่สุด</li> <li>● เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองของงานวิจัยอื่นพบว่ามีความสอดคล้องกัน</li> </ul>

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สมภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
7	Ritchie and Seitzman (1998)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ใช้ชุดทดลอง Concentric jet ในแนวตั้งที่มีหน้าตัดเป็นวงกลมโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเท่ากับ 0.625 และ 1 นิ้วตามลำดับ ซึ่งหน้าตัดทางออกของ Inner jet จะอยู่ต่ำกว่าหน้าตัดทางออกของ Outer jet เท่ากับ 0.2 นิ้ว</li> <li>● มีชุด Actuator ทั้งหมด 9 ชุดติดตั้งอยู่โดยรอบ Outer jet โดยเป็น Actuator ชนิด Zero net-mass-flux jet actuator ที่มีพื้นที่หน้าตัดทางออกเท่ากับ 4 mm<sup>2</sup></li> <li>● ใช้ Hot-film anemometer ในการวัดความเร็วและใช้ Hot-wire anemometer ในการวัด Power spectra</li> <li>● ทำ Flow visualization โดยใช้เทคนิค PLIF ที่ทำการใส่ Acetone ที่บริเวณ Outer jet (Acetone PLIF)</li> </ul>	อากาศ และ Acetone	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ความเร็ว Inner และ Outer jet เท่ากับ 10 และ 2.5 m/s ตามลำดับ สำหรับความเร็วสูงสุดของ Actuator jet เท่ากับ 8 m/s</li> <li>● ทำการทดลองทั้งหมด 5 กรณีได้แก่ <ol style="list-style-type: none"> <li>1. เจ็ทปกติ</li> <li>2. ใช้การกระตุ้นแบบสมมาตรและต่อเนื่องคือใช้ Actuator ทุกชุดตลอดการทดลอง</li> <li>3. ใช้การกระตุ้นแบบสมมาตรแต่ไม่ต่อเนื่องคือใช้ Actuator ทุกชุดแบบ Pulse</li> <li>4. ทำการกระตุ้นแบบไม่สมมาตรแต่ต่อเนื่องคือใช้ Actuator เพียง 6 ชุดตลอดการทดลองในลักษณะที่ไม่สมมาตรรอบแกน</li> <li>5. เหมือนกับกรณีที่ 4 แต่ทำให้ Actuator หมุนรอบแกนด้วย</li> </ol> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● การกระตุ้นที่ใช้ในการทดลองนี้ทั้งหมดช่วยเพิ่มการผสมระหว่างเชื้อเพลิง (ในที่นี้คือ Acetone) กับอากาศได้ แต่ก็แตกต่างกันออกไปตามแต่ละชนิดของการกระตุ้น</li> <li>● การกระตุ้นแบบสมมาตรแต่ไม่ต่อเนื่อง (Symmetric and pulsing) จะช่วยในการสร้าง Large scale structures ทำให้ประสิทธิภาพการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศดีขึ้นเป็นอย่างมาก</li> <li>● การกระตุ้นแบบไม่สมมาตรสามารถใช้ควบคุมการกระจายตัวตามแนวเส้นรอบวงของ Acetone ทั้งในระยะใกล้และไกลไปจากปากทางออกของเจ็ทได้</li> </ul>

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
8	Strickland et al. (1998)	<ul style="list-style-type: none"> <li>เป็นการศึกษาเชิงตัวเลขที่ใช้ระเบียบวิธี Vortex element modeling มาศึกษารูปแบบการไหลและลักษณะการผสมที่เกิดจากการไหลผ่าน Lobed injector</li> <li>Lobed injector ที่ใช้มีลักษณะเหมือนกับของ Smith et al. (1997)</li> </ul>	ในที่นี่สนใจเฉพาะอัตราส่วนของความเข้มข้นของของไหล 2 ชนิด	<ul style="list-style-type: none"> <li>ทำการคำนวณที่ <math>Re_\lambda = 5,842</math> (<math>\lambda</math> คือ ความยาวคาบของ Lobe)</li> <li>ค่าครึ่งหนึ่งของมุมบาน (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>8.8^\circ</math> และ <math>20^\circ</math> โดยที่อัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดต่อความยาวคาบ (<math>y_m/\lambda</math>) เท่ากับ 0.3 และ 0.97 ตามลำดับ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ผลที่ได้จากการคำนวณค่อนข้างสอดคล้องกับผลการทดลองของ Smith et al. (1997)</li> <li>ผลจากการศึกษาพบว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเพิ่มการผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงประกอบด้วย <ol style="list-style-type: none"> <li>อัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดต่อความยาวคาบ (<math>y_m/\lambda</math>)</li> <li>มุมบานของ Lobe (<math>2\alpha</math>)</li> <li>รูปร่างของ Lobe</li> </ol> </li> </ul> <p>โดยการลดลงของอัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดต่อความยาวคาบของ Lobe หรือการเพิ่มมุมบานของ Lobe มีผลทำให้ Streamwise vorticity มีความรุนแรงมากขึ้นซึ่งจะช่วยเพิ่มการผสมได้</p>

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
9	Bohl and Foss (1999)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● เป็นการทดลองภายในอุโมงค์ลมที่มีหน้าตัดทางออกของ Contraction เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 61x61 cm<sup>2</sup> และทำการติด Tab ที่บริเวณขอบด้านบนของหน้าตัดทางออกของเจ็ท (ดังรูปที่ 2.14) โดย Primary tab นั้นติดตั้งที่บริเวณตรงกลางและให้ปลาย Tab พุ่งเข้าไปภายในเจ็ทโดยทำมุม 45° กับแนวการไหล (<math>\theta_p = 45^\circ</math>) สำหรับ Secondary tabs ซึ่งมีทั้งหมด 2 Tabs นั้นจะติดอยู่ข้าง Primary tab ข้างละ 1 Tab โดยมุมที่ติดตั้ง (<math>\theta_s</math>) นั้นจะแปรเปลี่ยนไปตามการทดลอง</li> <li>● Primary และ Secondary tabs ซึ่งทำจากแผ่นอลูมิเนียมหนา 3 mm นั้นเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีความยาวด้าน(b) 200 และ 100 mm ตามลำดับ</li> <li>● ใช้ Hot-wire anemometer และ Pressure transducer ในการวัดความเร็วและความดันตามลำดับ</li> </ul>	อากาศ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ความเร็วเฉลี่ยของ Free jet ที่ปากทางออกมีค่าเท่ากับ 10.5 m/s ซึ่งคิดเป็นค่า Reynolds number (<math>Re_b</math>) ได้เท่ากับ <math>1.4 \times 10^5</math></li> <li>● ความหนาชั้นขอบเขต(<math>\delta</math>), Displacement thickness(<math>\delta_d</math>) และความหนาโมเมนตัม (<math>\theta</math>) ที่บริเวณทางออกของเจ็ท มีค่าเท่ากับ 3, 1.27 และ 0.52 mm ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็น 0.015, 0.0064 และ 0.0026 เท่าของความยาวด้านของ Primary tab</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● การติด Tab รูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่บริเวณทางออกของเจ็ทจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผสม (Convective transport-mixing) ของเจ็ทที่บริเวณ Near field เป็นอย่างมาก</li> <li>● กรณีที่ใช้ Primary และ Secondary Tabs ที่ติดตั้งโดยให้ปลายของ Primary tab ยื่นเข้าไปภายในเจ็ทและทำมุม 45° กับแนวการไหลในขณะที่ปลายของ Secondary tabs นั้นยื่นออกไปที่บริเวณอากาศรอบข้างโดยทำมุม -40° กับแนวการไหลนั้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของเจ็ทที่บริเวณ Near field ได้มากที่สุด ทั้งนี้เพราะ Secondary tabs จะทำให้รูปร่างของ Mixing layer ต่างไปจากกรณีที่ใช้ Primary tab เพียงอย่างเดียวจึงทำให้สามารถดึงเอาอากาศรอบข้างเข้ามาผสมได้มากยิ่งขึ้น</li> </ul>

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของ Lobed nozzle ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

Lobe configurations					
A, T, G, are measured in multiples of $h$ .					
Case	A	T	G	B	No. of lobes
L000	Base case (no lobe)				0
L220	2	2	0	1	6
L221	2	2	1	1	4
L222	2	2	2	1	3
L224	2	2	4	1	2
L240	2	4	0	1	3
L241	2	4	1	1	2
L242	2	4	2	1	2
L244	2	4	4	1	2

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้อง ( $t$ ) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

End-wall opening configurations			
$t$ is measured in multiples of $h$ .			
$U_J = 0.5 \text{ m/s}$			
$t$	$t/H$	$s/H$	Remark
12.5	1.00	0.00	fully open
10.5	0.84	0.16	$s/\delta \approx 1$
8.5	0.68	0.32	
6.25	0.50	0.50	half open
3.0	0.24	0.76	
1.0	0.08	0.92	min. open
$U_J = 4.4 \text{ m/s}$			
$t$	$t/H$	$s/H$	Remark
12.5	1.00	0.00	fully open
11.5	0.92	0.08	
10.5	0.84	0.16	
9.5	0.76	0.24	$s/\delta \approx 1$
6.25	0.50	0.50	half open
2.0	0.16	0.84	
1.0	0.08	0.92	min. open

หมายเหตุ :  $s$  คือ ความสูงของผนังด้านท้ายห้องที่ขวางการไหลอยู่ (End-wall size)  
 $\delta$  คือ ความหนาของ Wall jet ที่ตำแหน่งทางออกของห้องเมื่อทำการเปิด  
 ผนังด้านท้ายห้องทั้งหมด โดยมีค่าประมาณ  $2h-3h$  และ  $3h-4h$  สํา-  
 หรับกรณีที่  $U_J$  มีค่าเท่ากับ  $0.5$  และ  $4.4 \text{ m/s}$  ตามลำดับ



ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนเฉลี่ยโดยรวม ( $C_{TT}$ ) ของกรณี L000  
เมื่อ  $U_j = 4.4 \text{ m/s}$

<b>t/H</b>	<b>0.08</b>	<b>0.16</b>	<b>0.50</b>	<b>0.76</b>	<b>0.84</b>	<b>0.92</b>	<b>1.00</b>
$C_{TT}$	0.84	0.86	0.84	0.78	0.62	0.31	0.21

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนเฉลี่ยโดยบริเวณ ( $C_{TZ}$ ) ของกรณี L000  
เมื่อ  $U_j = 4.4 \text{ m/s}$

<b>Zone t/H</b>	<b>0.08</b>	<b>0.16</b>	<b>0.50</b>	<b>0.76</b>	<b>0.84</b>	<b>0.92</b>	<b>1.00</b>
<b>1</b>	0.84	0.86	0.84	0.78	0.69	0.43	0.37
<b>2</b>	0.86	0.86	0.85	0.80	0.67	0.50	0.44
<b>3</b>	0.85	0.86	0.83	0.80	0.66	0.51	0.46
<b>4</b>	0.81	0.82	0.81	0.80	0.71	0.58	0.48
<b>5</b>	0.89	0.91	0.89	0.82	0.68	0.31	0.09
<b>6</b>	0.84	0.86	0.85	0.77	0.57	0.19	0.06
<b>7</b>	0.84	0.86	0.84	0.76	0.55	0.17	0.04
<b>8</b>	0.80	0.82	0.80	0.72	0.54	0.16	0.03

ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนสูงสุด ( $C_{Tmax}$ ) ของกรณี L000 ที่ตำแหน่ง  
Center plane ( $y = 0$ ) เมื่อ  $U_j = 4.4 \text{ m/s}$

<b>x/L t/H</b>	<b>0.08</b>	<b>0.16</b>	<b>0.50</b>	<b>0.76</b>	<b>0.84</b>	<b>0.92</b>	<b>1.00</b>
<b>0.04</b>	0.95	1.00	1.06	1.03	1.00	0.97	1.00
<b>0.36</b>	0.87	0.92	1.00	0.92	0.89	0.77	0.77
<b>0.68</b>	0.82	0.92	0.94	0.89	0.73	0.69	0.61
<b>0.96</b>	0.85	0.92	0.94	0.89	0.76	0.64	0.50

ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนเฉลี่ยโดยเฉลี่ยรวม ( $C_{TT}$ ) เมื่อ  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$

LN \ t/H	0.08	0.24	0.50	0.68	0.84	1.00
L000	0.68	0.66	0.53	0.41	0.30	0.19
L220	0.73	0.70	0.54	0.42	0.29	0.21
L221	0.73	0.72	0.56	0.42	0.31	0.21
L222	0.71	0.69	0.55	0.41	0.29	0.19
L224	0.76	0.73	0.56	0.44	0.31	0.22
L240	0.73	0.69	0.54	0.42	0.29	0.20
L241	0.69	0.67	0.55	0.41	0.30	0.19
L242	0.73	0.69	0.54	0.42	0.30	0.22
L244	0.73	0.69	0.54	0.42	0.31	0.21

ตารางที่ 5.5 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนเฉลี่ยโดยบริเวณ ( $C_{TZ}$ ) ของกรณี L000  
เมื่อ  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$

Zone \ t/H	0.08	0.24	0.50	0.68	0.84	1.00
1	0.82	0.80	0.80	0.74	0.58	0.42
2	0.86	0.85	0.85	0.80	0.68	0.44
3	0.83	0.83	0.82	0.77	0.67	0.43
4	0.76	0.75	0.72	0.71	0.61	0.32
5	0.70	0.63	0.36	0.18	0.04	0.02
6	0.58	0.56	0.31	0.18	0.05	0.03
7	0.56	0.55	0.31	0.17	0.06	0.05
8	0.57	0.53	0.29	0.17	0.08	0.07

ตารางที่ 5.6 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนเฉลี่ยโดยบริเวณ ( $C_{TZ}$ ) ของกรณี L220  
เมื่อ  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$

Zone \ t/H	0.08	0.24	0.50	0.68	0.84	1.00
1	0.82	0.81	0.78	0.73	0.56	0.40
2	0.87	0.86	0.87	0.84	0.67	0.48
3	0.82	0.81	0.82	0.80	0.65	0.47
4	0.71	0.71	0.70	0.72	0.60	0.36
5	0.76	0.70	0.36	0.19	0.05	0.05
6	0.67	0.63	0.32	0.18	0.07	0.05
7	0.65	0.61	0.32	0.18	0.07	0.06
8	0.63	0.58	0.28	0.16	0.06	0.05

ตารางที่ 5.7 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนเฉลี่ยโดยบริเวณ ( $C_{TZ}$ ) ของกรณี L221  
เมื่อ  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$

Zone \ t/H	0.08	0.24	0.50	0.68	0.84	1.00
1	0.88	0.88	0.85	0.79	0.67	0.50
2	0.87	0.88	0.88	0.84	0.70	0.47
3	0.82	0.83	0.82	0.78	0.66	0.45
4	0.70	0.71	0.71	0.69	0.61	0.34
5	0.75	0.72	0.39	0.17	0.06	0.04
6	0.66	0.65	0.36	0.18	0.06	0.05
7	0.64	0.63	0.34	0.18	0.07	0.05
8	0.62	0.59	0.31	0.16	0.06	0.05

ตารางที่ 5.8 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนเฉลี่ยโดยบริเวณ ( $C_{TZ}$ ) ของกรณี L222  
เมื่อ  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$

Zone \ t/H	0.08	0.24	0.50	0.68	0.84	1.00
1	0.85	0.86	0.85	0.77	0.62	0.45
2	0.85	0.86	0.86	0.82	0.66	0.47
3	0.82	0.82	0.81	0.79	0.65	0.43
4	0.71	0.71	0.69	0.70	0.58	0.33
5	0.74	0.67	0.37	0.17	0.03	0.02
6	0.65	0.62	0.33	0.17	0.05	0.03
7	0.62	0.59	0.32	0.16	0.06	0.04
8	0.60	0.56	0.30	0.13	0.06	0.04

ตารางที่ 5.9 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนเฉลี่ยโดยบริเวณ ( $C_{TZ}$ ) ของกรณี L224  
เมื่อ  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$

Zone \ t/H	0.08	0.24	0.50	0.68	0.84	1.00
1	0.85	0.84	0.83	0.78	0.60	0.42
2	0.88	0.89	0.89	0.86	0.70	0.52
3	0.85	0.84	0.83	0.82	0.69	0.50
4	0.73	0.74	0.73	0.74	0.63	0.38
5	0.80	0.73	0.37	0.20	0.06	0.04
6	0.70	0.65	0.35	0.20	0.07	0.05
7	0.68	0.64	0.33	0.20	0.08	0.06
8	0.67	0.61	0.32	0.17	0.07	0.05

ตารางที่ 5.10 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนเฉลี่ยโดยบริเวณ ( $C_{TZ}$ ) ของกรณี L240  
เมื่อ  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$

Zone \ t/H	0.08	0.24	0.50	0.68	0.84	1.00
1	0.84	0.83	0.82	0.78	0.62	0.45
2	0.86	0.86	0.85	0.83	0.66	0.46
3	0.79	0.80	0.80	0.77	0.65	0.43
4	0.70	0.70	0.70	0.69	0.57	0.33
5	0.77	0.68	0.36	0.19	0.06	0.04
6	0.68	0.63	0.34	0.18	0.07	0.04
7	0.66	0.60	0.32	0.19	0.07	0.05
8	0.63	0.56	0.29	0.16	0.07	0.05

ตารางที่ 5.11 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนเฉลี่ยโดยบริเวณ ( $C_{TZ}$ ) ของกรณี L241  
เมื่อ  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$

Zone \ t/H	0.08	0.24	0.50	0.68	0.84	1.00
1	0.79	0.80	0.79	0.72	0.54	0.35
2	0.85	0.85	0.86	0.80	0.64	0.42
3	0.80	0.82	0.82	0.78	0.64	0.42
4	0.75	0.76	0.73	0.72	0.59	0.32
5	0.70	0.63	0.35	0.18	0.07	0.06
6	0.61	0.57	0.34	0.18	0.08	0.06
7	0.58	0.55	0.33	0.18	0.10	0.07
8	0.59	0.54	0.31	0.18	0.09	0.07

ตารางที่ 5.12 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนเฉลี่ยโดยบริเวณ ( $C_{TZ}$ ) ของกรณี L242  
เมื่อ  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$

Zone \ t/H	0.08	0.24	0.50	0.68	0.84	1.00
1	0.82	0.81	0.79	0.75	0.61	0.43
2	0.85	0.84	0.84	0.82	0.67	0.49
3	0.82	0.82	0.81	0.80	0.67	0.47
4	0.72	0.72	0.69	0.71	0.62	0.37
5	0.77	0.70	0.37	0.19	0.05	0.05
6	0.67	0.62	0.34	0.19	0.07	0.06
7	0.64	0.60	0.33	0.18	0.07	0.06
8	0.64	0.57	0.30	0.16	0.07	0.05

ตารางที่ 5.13 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนเฉลี่ยโดยบริเวณ ( $C_{TZ}$ ) ของกรณี L244  
เมื่อ  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$

Zone \ t/H	0.08	0.24	0.50	0.68	0.84	1.00
1	0.86	0.83	0.84	0.76	0.66	0.50
2	0.87	0.84	0.83	0.79	0.66	0.47
3	0.85	0.81	0.79	0.74	0.67	0.44
4	0.79	0.73	0.72	0.71	0.63	0.34
5	0.77	0.69	0.39	0.23	0.07	0.05
6	0.64	0.61	0.34	0.19	0.08	0.06
7	0.63	0.58	0.32	0.19	0.09	0.06
8	0.60	0.55	0.29	0.16	0.08	0.06

ตารางที่ 5.14 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนเฉลี่ยตลอดแนวความกว้างสูงสุด ( $C_{TS \max}$ )  
ของกรณี L000 เมื่อ  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$

x/L \ t/H	0.08	0.24	0.50	0.68	0.84	1.00
0.06	0.95	0.96	1.00	0.99	1.00	0.98
0.36	0.95	0.94	0.94	0.92	0.90	0.85
0.68	0.94	0.94	0.90	0.87	0.88	0.75
0.96	0.86	0.85	0.83	0.80	0.81	0.70

ตารางที่ 5.15 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนเฉลี่ยตลอดแนวความกว้างสูงสุด ( $C_{TS \max}$ )  
ของกรณี L220 เมื่อ  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$

x/L \ t/H	0.08	0.24	0.50	0.68	0.84	1.00
0.06	0.89	0.90	0.91	0.90	0.87	0.89
0.36	0.95	0.94	0.95	0.95	0.89	0.81
0.68	0.90	0.89	0.90	0.89	0.84	0.76
0.96	0.84	0.84	0.82	0.84	0.77	0.70



ตารางที่ 5.16 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนเฉลี่ยตลอดแนวความกว้างสูงสุด ( $C_{TS \max}$ ) ของกรณี L221 เมื่อ  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$

$x/L \backslash t/H$	0.08	0.24	0.50	0.68	0.84	1.00
0.06	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.36	0.96	0.99	0.97	0.92	0.93	0.82
0.68	0.91	0.92	0.91	0.87	0.86	0.77
0.96	0.85	0.88	0.85	0.83	0.80	0.71

ตารางที่ 5.17 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนเฉลี่ยตลอดแนวความกว้างสูงสุด ( $C_{TS \max}$ ) ของกรณี L222 เมื่อ  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$

$x/L \backslash t/H$	0.08	0.24	0.50	0.68	0.84	1.00
0.06	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	0.99
0.36	0.93	0.94	0.94	0.94	0.88	0.83
0.68	0.91	0.91	0.91	0.89	0.85	0.77
0.96	0.84	0.85	0.83	0.84	0.77	0.71

ตารางที่ 5.18 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนเฉลี่ยตลอดแนวความกว้างสูงสุด ( $C_{TS \max}$ ) ของกรณี L224 เมื่อ  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$

$x/L \backslash t/H$	0.08	0.24	0.50	0.68	0.84	1.00
0.06	0.92	0.92	0.93	0.91	0.91	0.90
0.36	0.97	0.97	0.98	0.97	0.92	0.86
0.68	0.93	0.92	0.93	0.92	0.88	0.80
0.96	0.89	0.88	0.85	0.89	0.81	0.75

ตารางที่ 5.19 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนเฉลี่ยตลอดแนวความกว้างสูงสุด ( $C_{TS \max}$ ) ของกรณี L240 เมื่อ  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$

$x/L \backslash t/H$	0.08	0.24	0.50	0.68	0.84	1.00
0.06	0.93	0.92	0.93	0.94	0.91	0.87
0.36	0.94	0.94	0.94	0.93	0.88	0.77
0.68	0.87	0.87	0.89	0.86	0.83	0.72
0.96	0.86	0.84	0.83	0.82	0.75	0.66

ตารางที่ 5.20 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนเฉลี่ยตลอดแนวความกว้างสูงสุด ( $C_{TS \max}$ ) ของกรณี L241 เมื่อ  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$

$x/L \backslash t/H$	0.08	0.24	0.50	0.68	0.84	1.00
0.06	0.85	0.87	0.86	0.86	0.85	0.71
0.36	0.93	0.95	0.94	0.91	0.89	0.82
0.68	0.87	0.92	0.89	0.87	0.83	0.76
0.96	0.85	0.86	0.83	0.79	0.79	0.70

ตารางที่ 5.21 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนเฉลี่ยตลอดแนวความกว้างสูงสุด ( $C_{TS \max}$ ) ของกรณี L242 เมื่อ  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$

$x/L \backslash t/H$	0.08	0.24	0.50	0.68	0.84	1.00
0.06	0.88	0.86	0.87	0.88	0.86	0.80
0.36	0.93	0.93	0.93	0.92	0.89	0.82
0.68	0.89	0.90	0.88	0.87	0.83	0.76
0.96	0.86	0.87	0.82	0.86	0.80	0.70

ตารางที่ 5.22 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนเฉลี่ยตลอดแนวความกว้างสูงสุด ( $C_{TS \max}$ ) ของกรณี L244 เมื่อ  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$

$x/L \backslash t/H$	0.08	0.24	0.50	0.68	0.84	1.00
0.06	0.99	1.00	1.00	0.99	1.00	0.99
0.36	0.94	0.92	0.92	0.90	0.87	0.81
0.68	0.95	0.89	0.88	0.84	0.84	0.74
0.96	0.90	0.86	0.84	0.82	0.78	0.67

ตารางที่ 5.23 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจนสูงสุด ( $C_{T \max}$ ) ของกรณี L000 ที่ตำแหน่ง Center plane ( $y = 0$ ) เมื่อ  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$

$x/L \backslash t/H$	0.08	0.24	0.50	0.68	0.84	1.00
0.04	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.36	0.95	0.92	0.92	0.92	0.89	0.82
0.68	0.95	0.92	0.87	0.87	0.87	0.71
0.96	0.84	0.82	0.79	0.84	0.79	0.66

ตารางที่ 5.24 ตารางแสดงค่า Blockage ratio ( $B_w$ ) ของทุกกรณี

LN	L000	L220	L221	L222	L224	L240	L241	L242	L244
$B_w$	0	0.24	0.16	0.12	0.08	0.24	0.16	0.16	0.16

ตารางที่ 5.25 ตารางแสดงค่า Uncertainty ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่แสดงถึงสมรรถนะของ Lobed nozzle

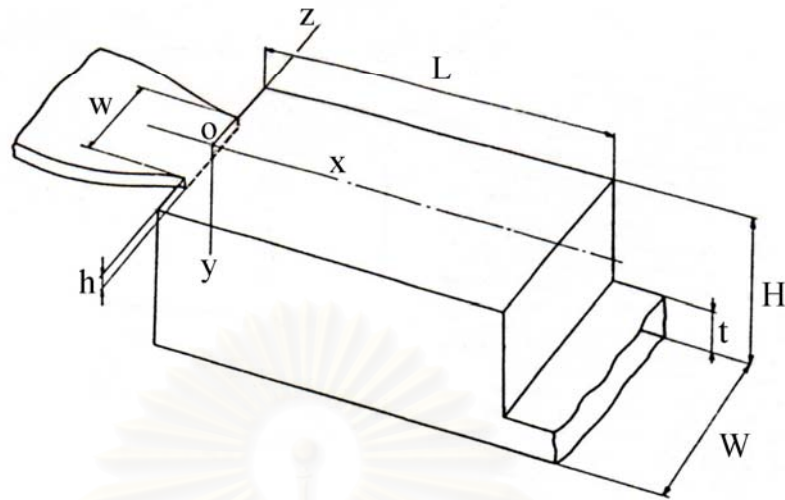
$C_{TT}$	$C_{TZ}$	$C_{TS}$	$C_T$	$C_{TSmax}$	$C_{Tmax}$	$P_1 - P_{atm}$ ( $mmH_2O$ )	$C_P$
0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06	0.44

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

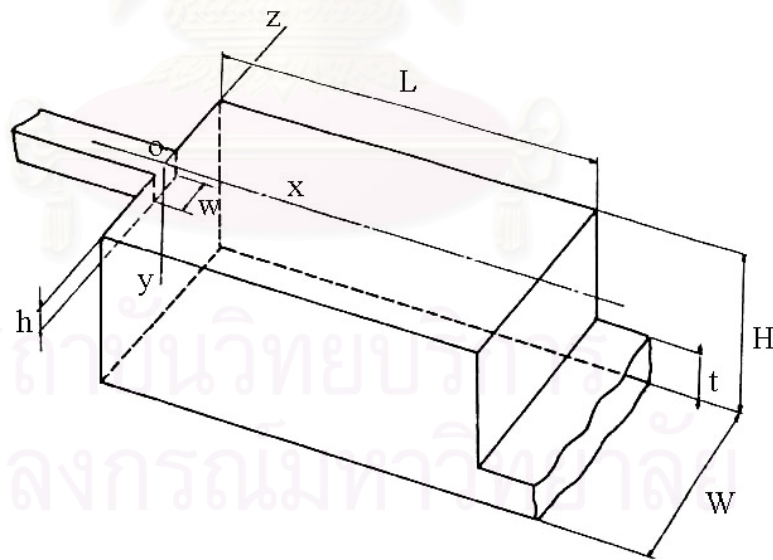


## ประมวลรูปภาพ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

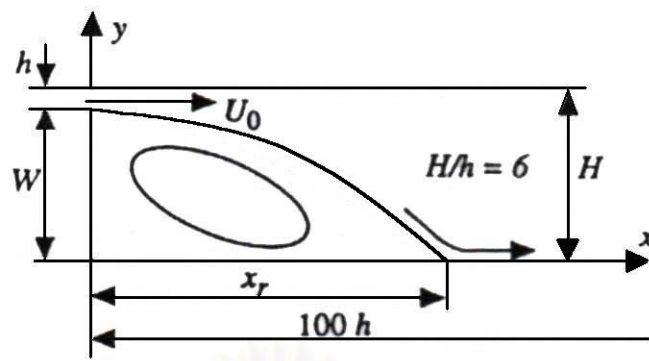


รูปที่ 2.1 ภาพแสดงแบบจำลองห้องที่ใช้ในการศึกษาของ Nielsen et al. (1978)

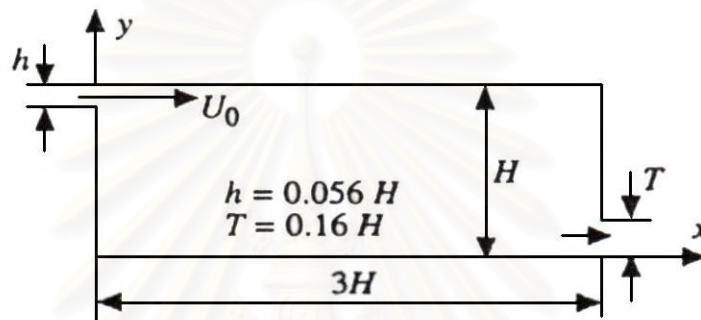


รูปที่ 2.2 ภาพแสดงแบบจำลองห้องที่ใช้ในการศึกษาของ Gosman et al. (1980)





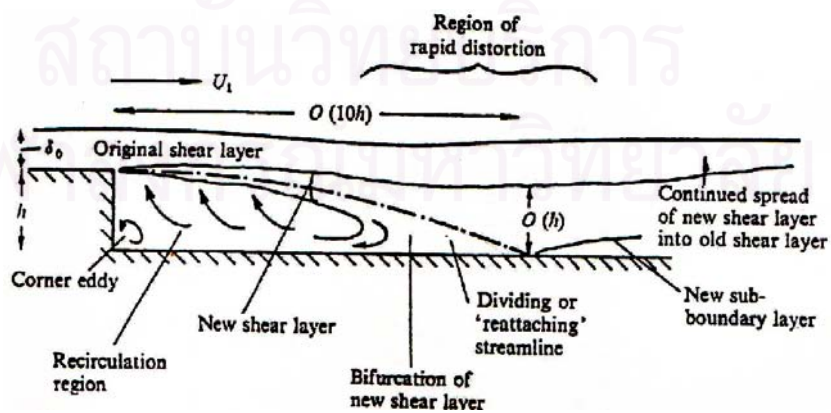
(ก)



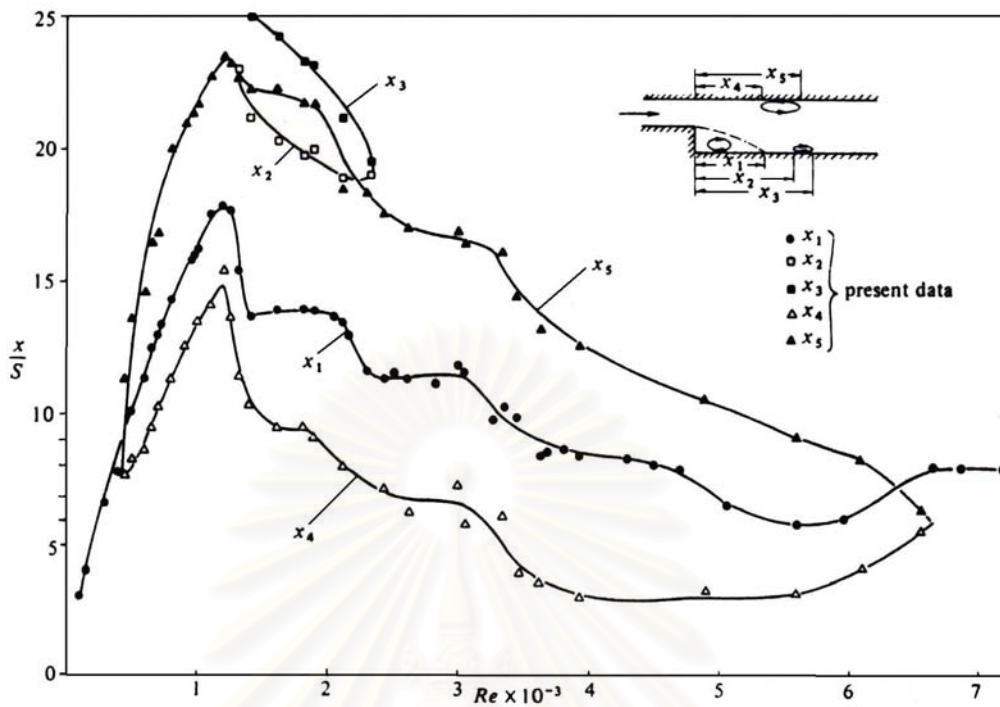
(ข)

รูปที่ 2.3 ภาพแสดงแบบลักษณะของ BFS และ Confined ventilation enclosure ในการศึกษาของ Peng et al. (1997) :

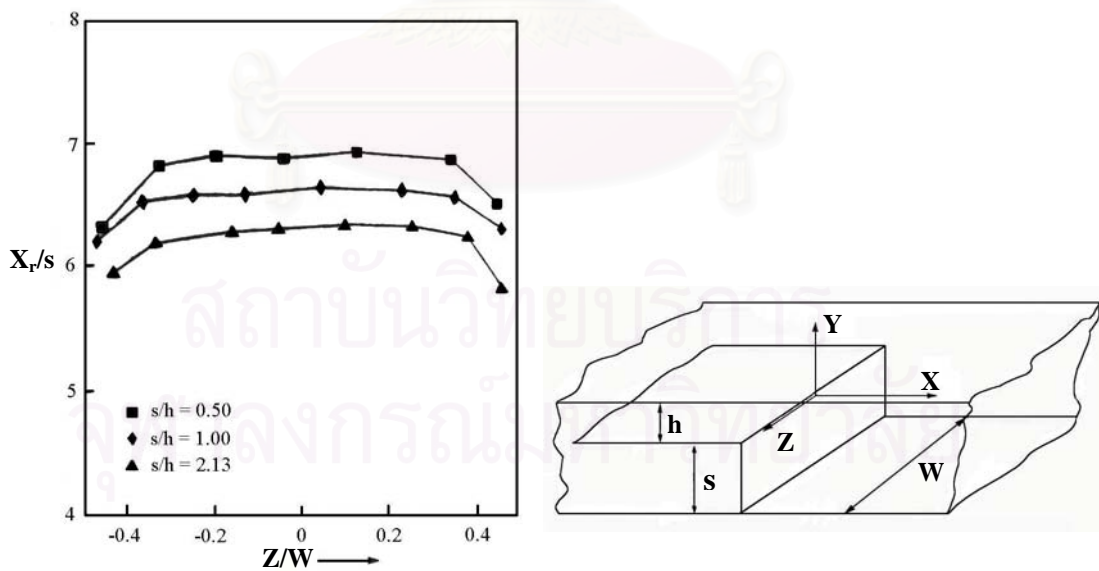
(ก) Backward facing step, (ข) Confined ventilation enclosure



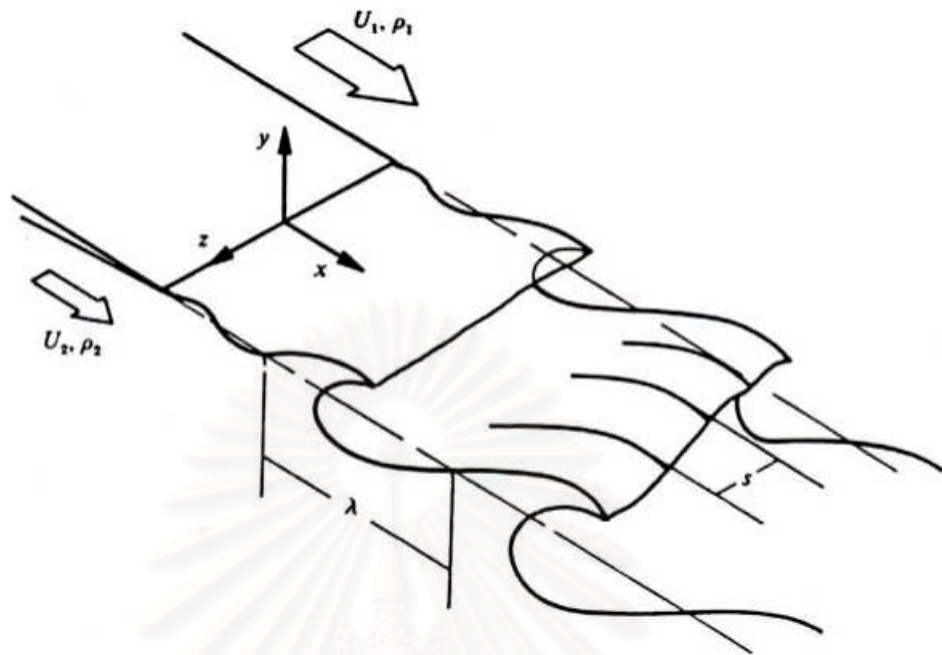
รูปที่ 2.4 ภาพแสดงลักษณะการไหลผ่าน Backward facing step (Bradshaw and Wong, 1972)



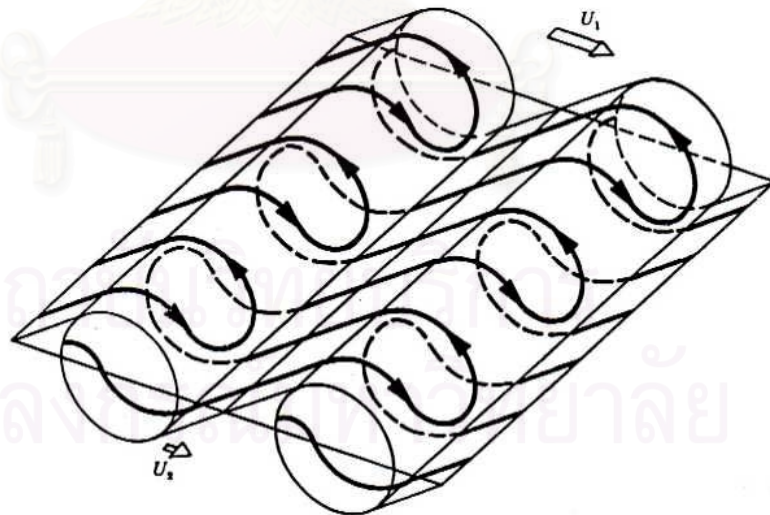
รูปที่ 2.5 ภาพแสดงผลการวัดระยะ Reattachment ของ Armaly et al. (1983)



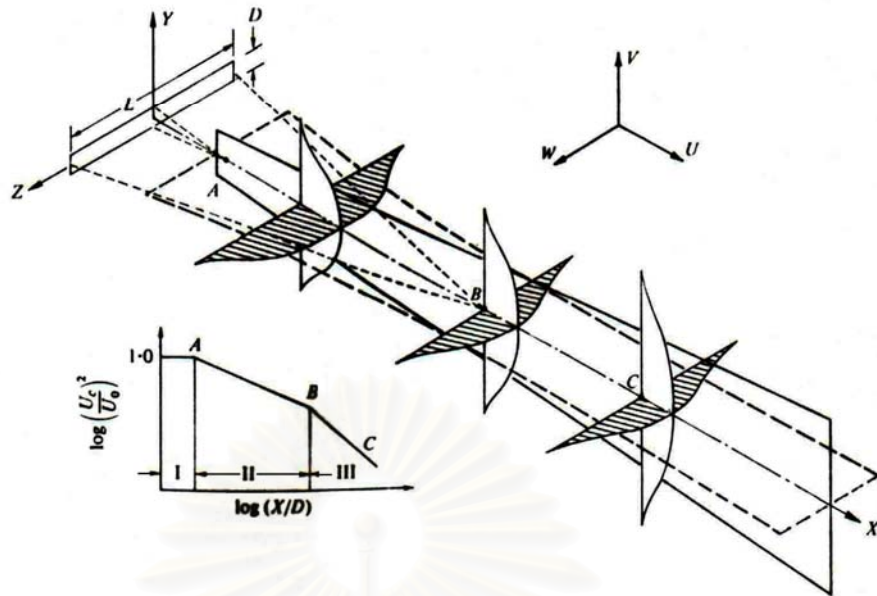
รูปที่ 2.6 แสดงผลของ Expansion ratio ต่อระยะ Reattachment และระบบแกนที่ใช้ในงานวิจัยของ Otugen (1991)



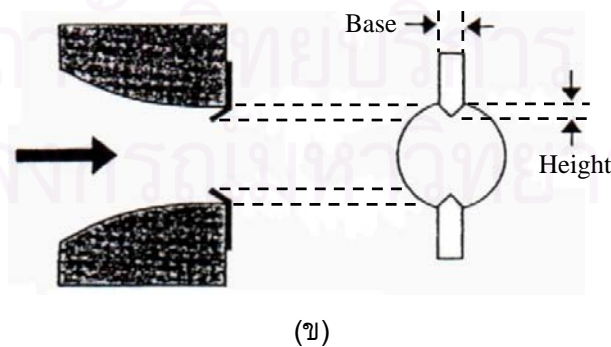
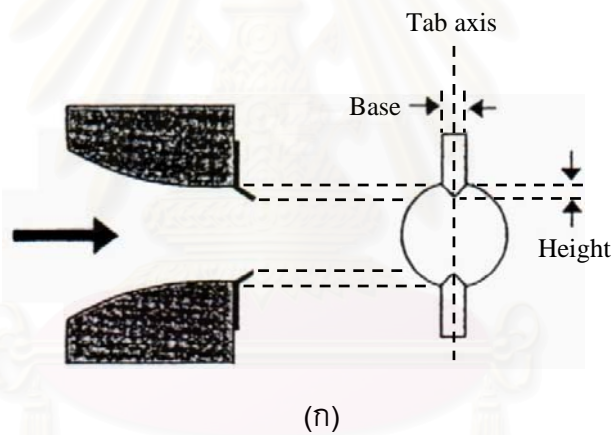
รูปที่ 2.7 ภาพแสดงลักษณะการไหลของ Mixing Layer (Bernal and Roshko, 1986)



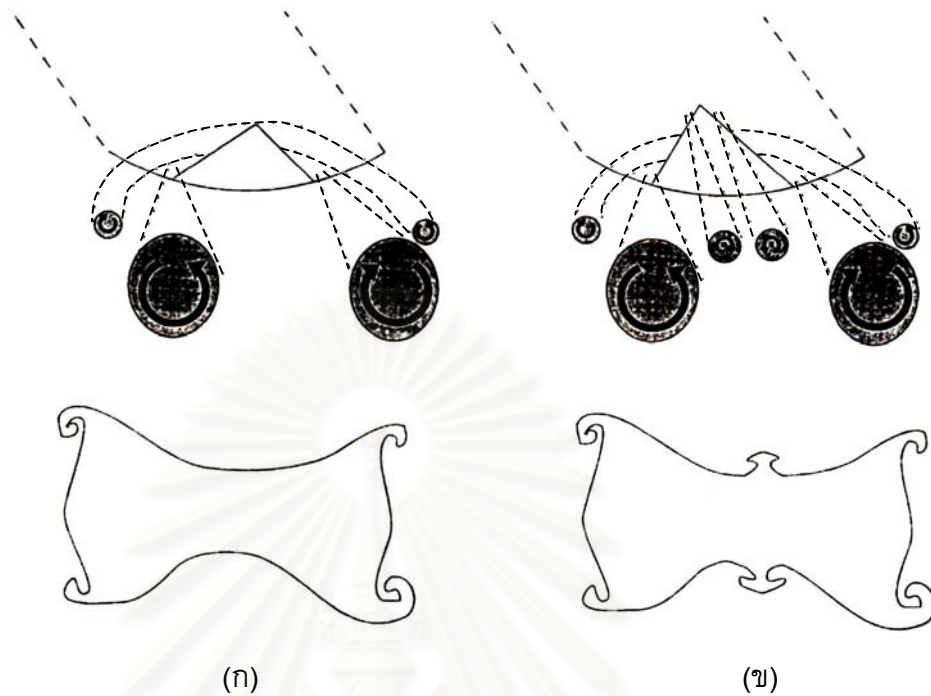
รูปที่ 2.8 ภาพแสดง Topology ของ Streamwise vortex line ที่เกิดขึ้นภายในบริเวณ Braid region (Bernal and Roshko, 1986)



รูปที่ 2.9 ภาพแสดงลักษณะการไหลของ Free Jet ที่มีหน้าตัดทางออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Krothapalli et al., 1981)



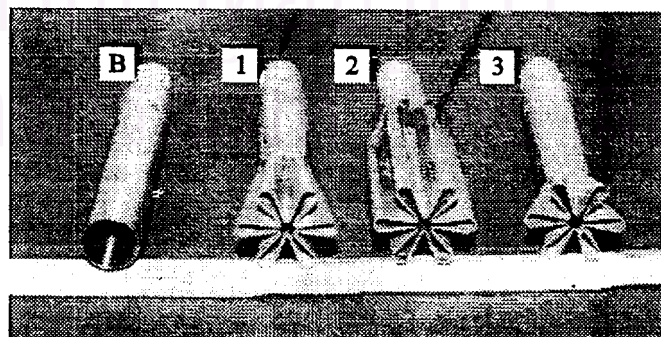
รูปที่ 2.10 ภาพแสดงลักษณะและการติดตั้ง Tab สามเหลี่ยมที่ใช้ในงานวิจัยของ Reeder and Samimy (1996)  
 (ก) แบบ Delta tabs (Pitch angle = 135°)  
 (ข) แบบ Inverted delta tabs (Pitch angle = 45°)



รูปที่ 2.11 ภาพแสดงลักษณะ Streamwise vorticity ที่เกิดจากการไหลผ่าน Tab สามเหลี่ยมที่ใช้ในงานวิจัยของ Reeder and Samimy (1996) โดยที่ภาพด้านบนแสดงลักษณะ Streamwise vorticity ที่เกิดจากการไหลผ่าน Tab สามเหลี่ยม 1 อัน และภาพด้านล่างแสดงหน้าตัดของเจ็ทที่ไหลผ่าน Tab สามเหลี่ยม 2 อันที่อยู่ตรงข้ามกัน

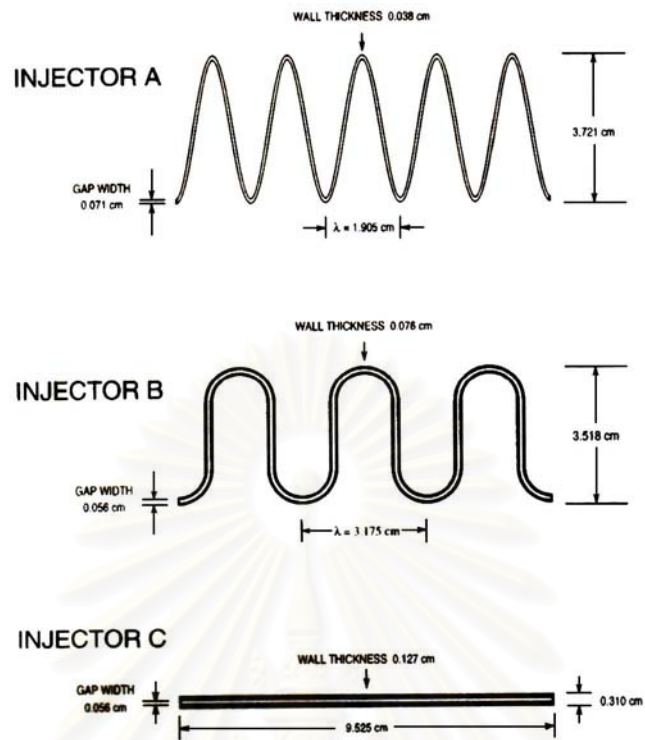
(ก) แบบ Delta tabs (Pitch angle =  $135^\circ$ )

(ข) แบบ Inverted delta tabs (Pitch angle =  $45^\circ$ )

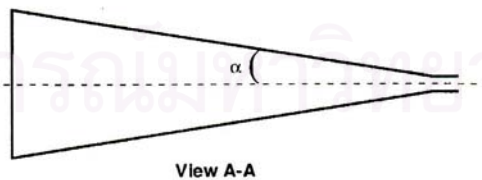
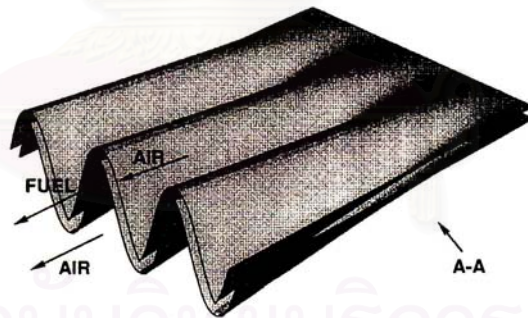


รูปที่ 2.12 ภาพแสดงรูปถ่ายของ Baseline nozzle และ Axisymmetric lobed mixer-nozzle ชนิดต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยของ Belovich and Samimy (1996)



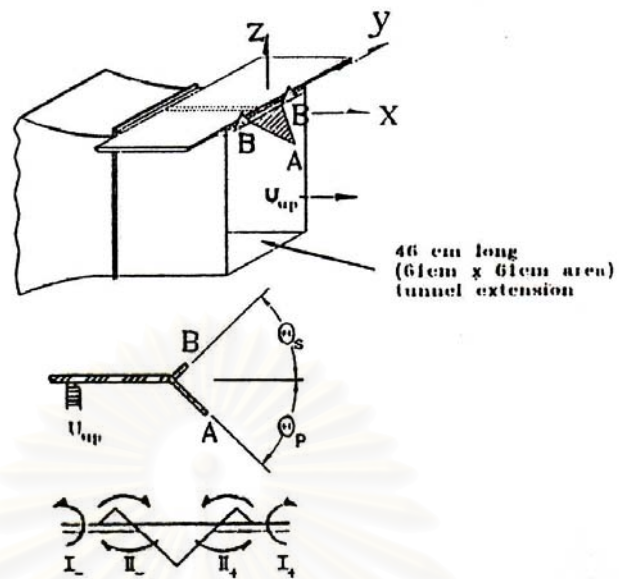


(ก)

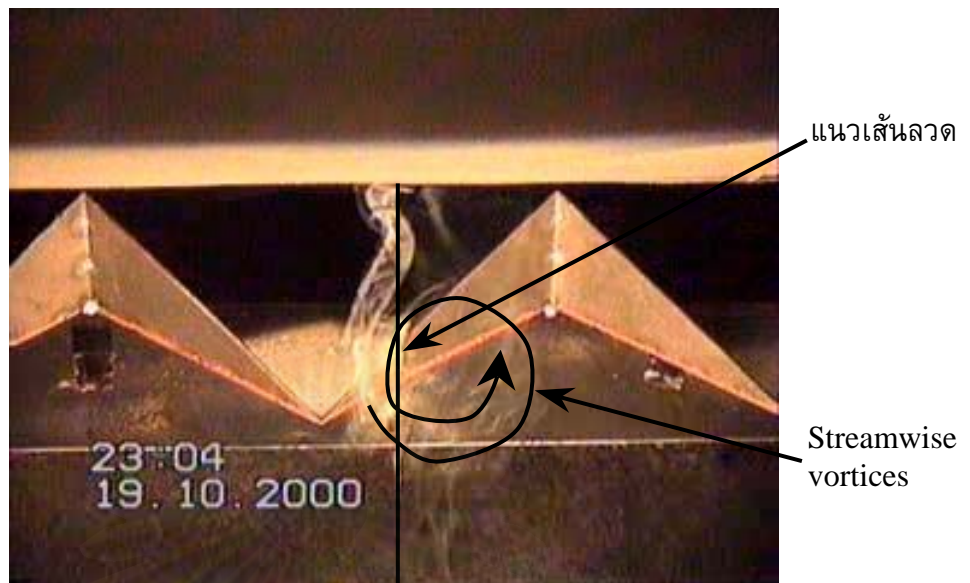


(ข)

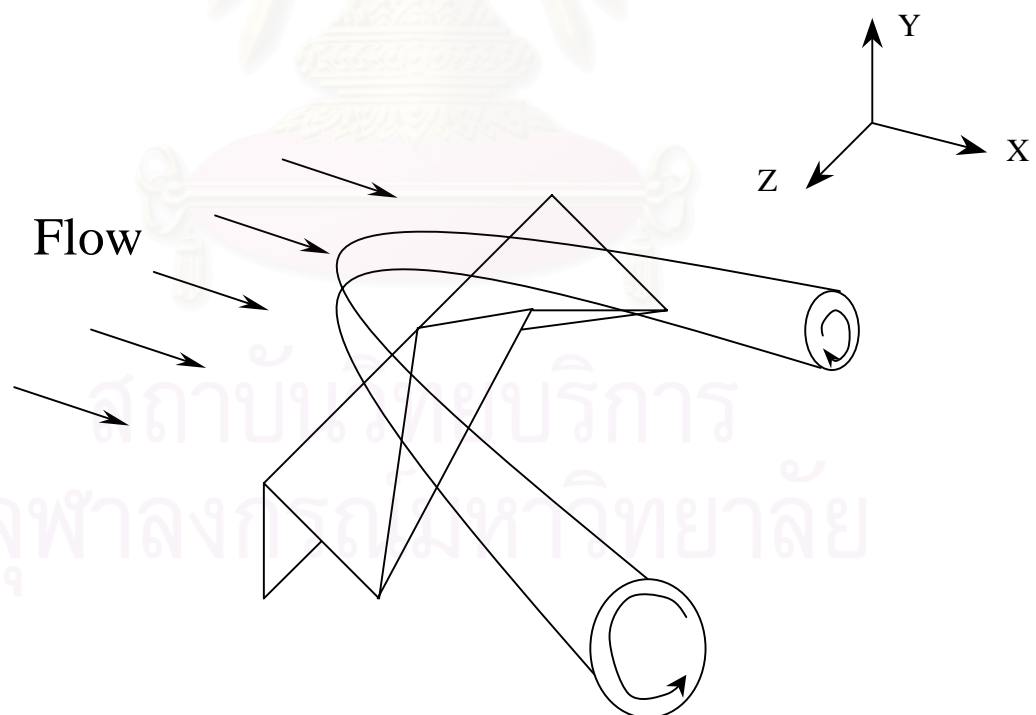
รูปที่ 2.13 ภาพแสดงลักษณะ Injector ต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยของ Smith et al. (1997)  
 (ก) ภาพแสดงรูปร่างที่บริเวณหน้าตัดทางออกของ Injector ทั้ง 3 แบบ  
 (ข) ภาพแสดงลักษณะรูปร่างของ Lobed injector



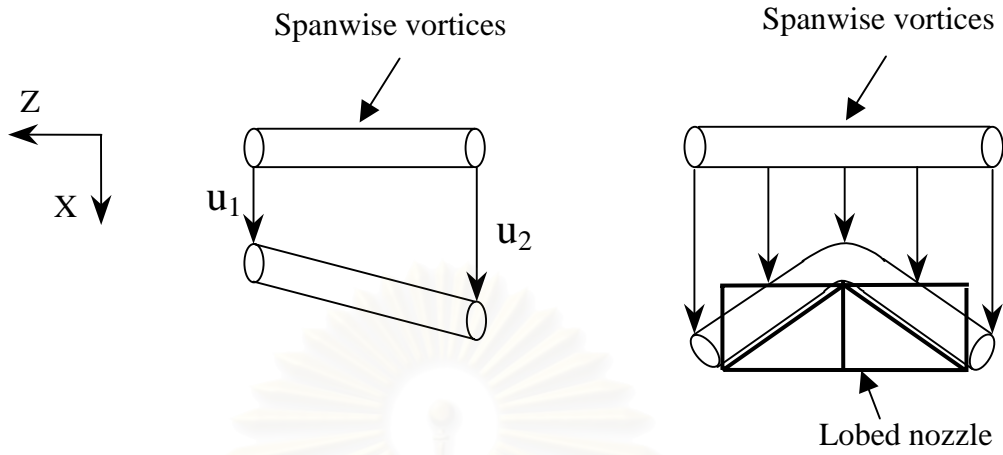
รูปที่ 2.14 ภาพแสดงลักษณะและการติดตั้ง Primary และ Secondary tab รูปสามเหลี่ยมที่ใช้ในงานวิจัยของ Bohl and Foss (1999)



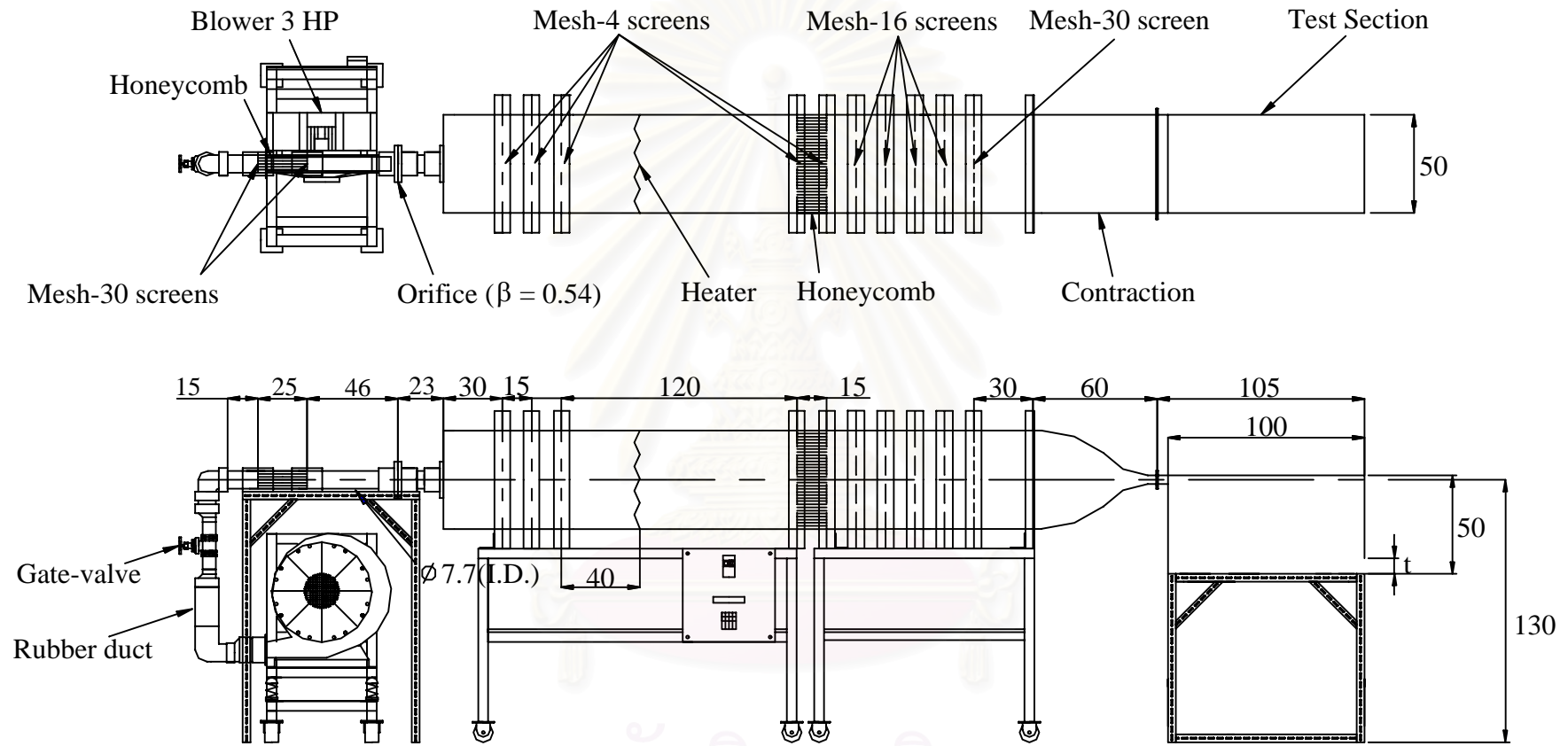
รูปที่ 3.1 ภาพแสดงรูปถ่ายของ Streamwise vortices ที่เกิดขึ้นจากการไหลผ่าน Lobed nozzle รูปทรงปิรามิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.2 ภาพแสดงรูปจำลองของ Counter-rotating streamwise vortices ที่เกิดขึ้นจากการไหลผ่าน Lobed nozzle รูปทรงปิรามิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.3 ภาพแสดงการเปลี่ยน Spanwise vortices ไปสู่ Streamwise vortices อันเนื่องจากการไหลผ่าน Lobed nozzle



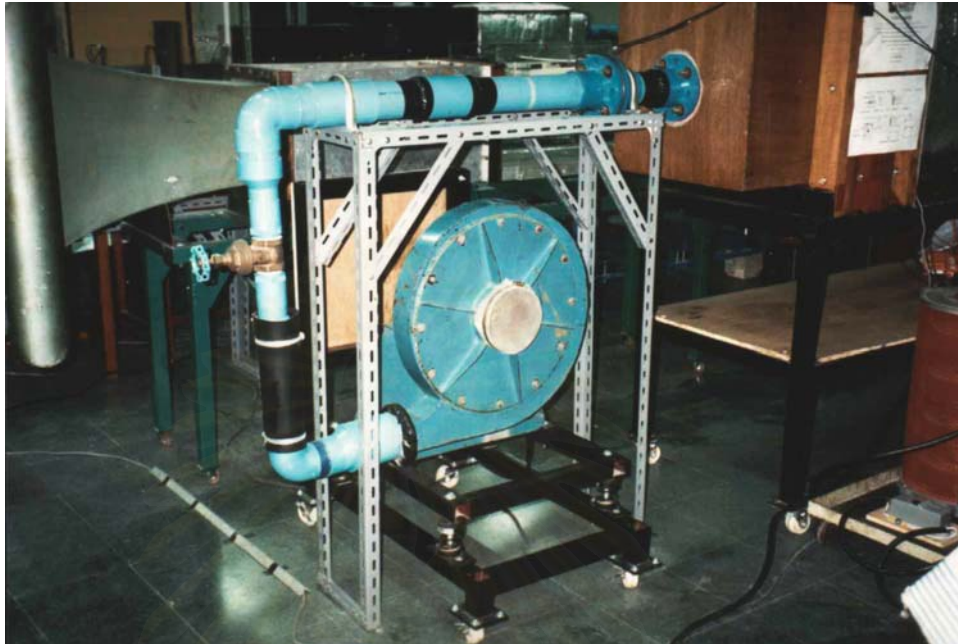
All dimensions are in cm unless specified

รูปที่ 4.1 ภาพแสดง Schematic drawing ของอุโมงค์ลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้





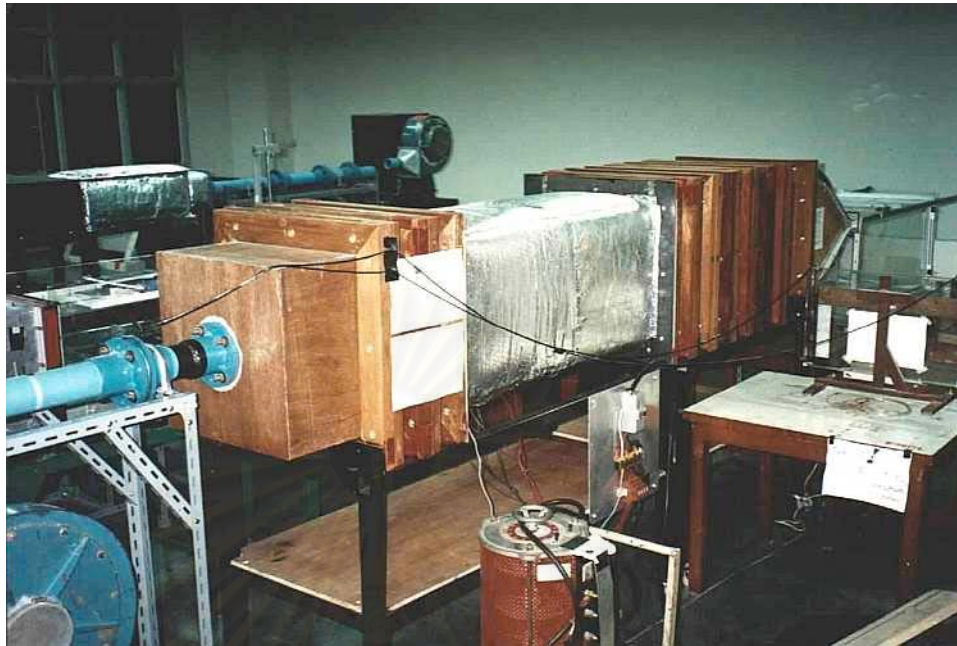
รูปที่ 4.2 รูปแสดงภาพถ่ายของอุโมงค์ลม



รูปที่ 4.3 ภาพแสดง Centrifugal blower



รูปที่ 4.4 ภาพแสดง Contraction และห้องทดลอง (Test section)

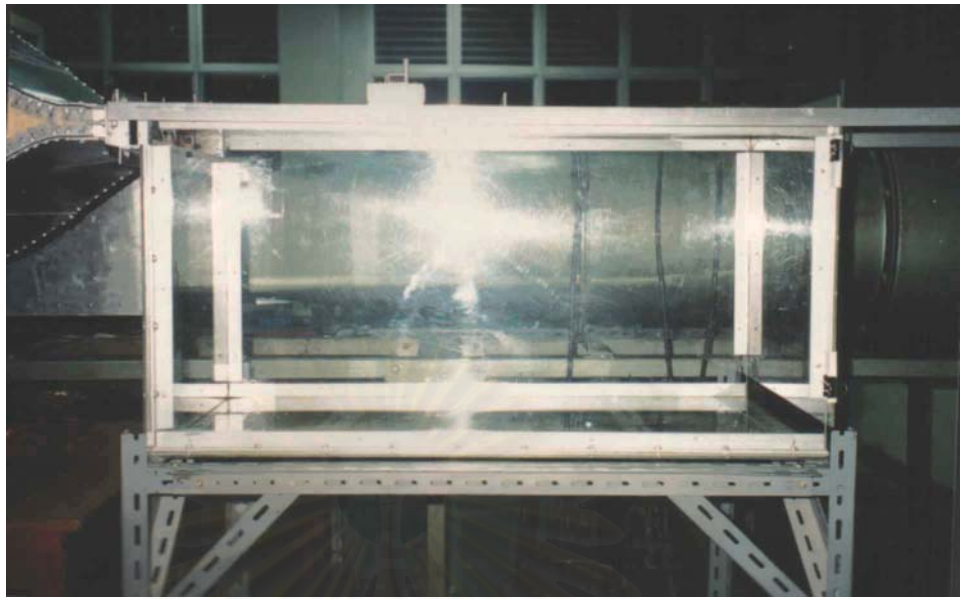


รูปที่ 4.5 ภาพแสดงส่วนทำความร้อน (Heating section) ที่ติดตั้งภายในอุโมงค์ลม



รูปที่ 4.6 ภาพแสดง Variac ขนาด 10 kVA ที่ใช้ในการปรับอุณหภูมิ



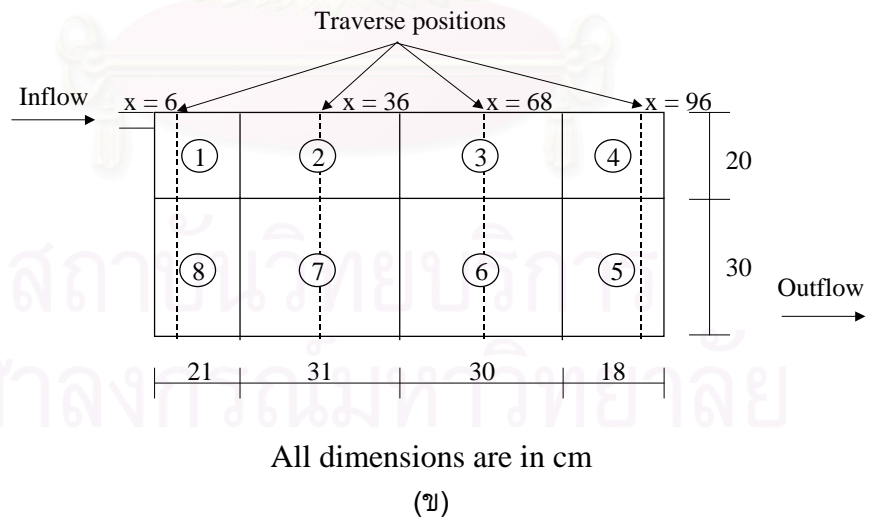
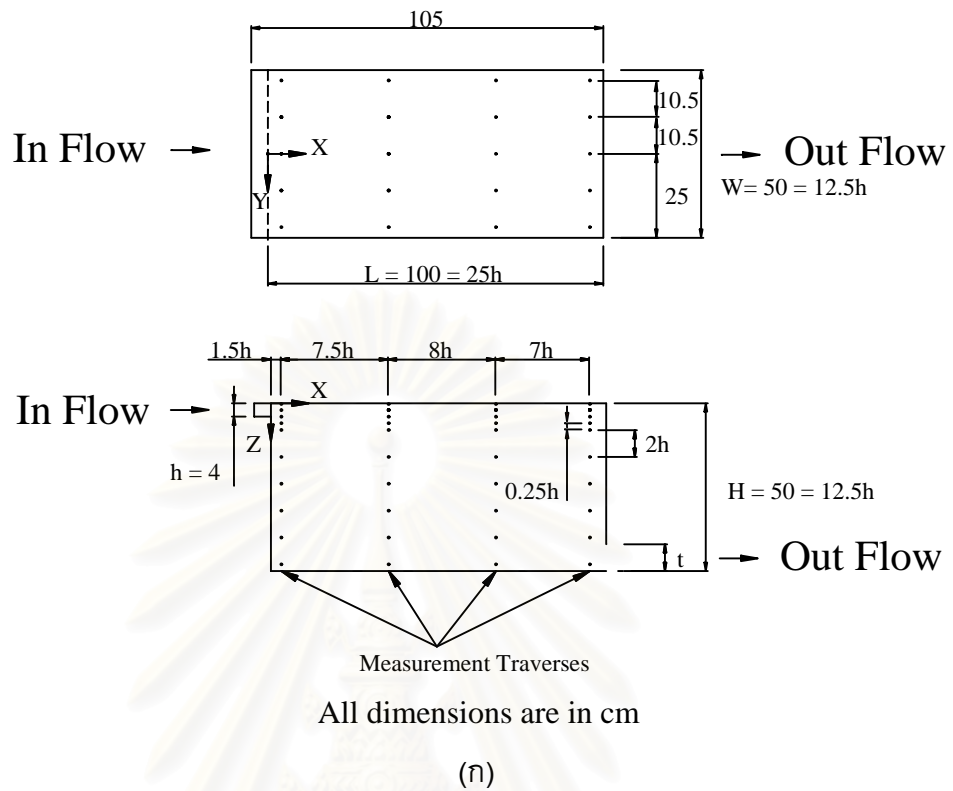


(ก)



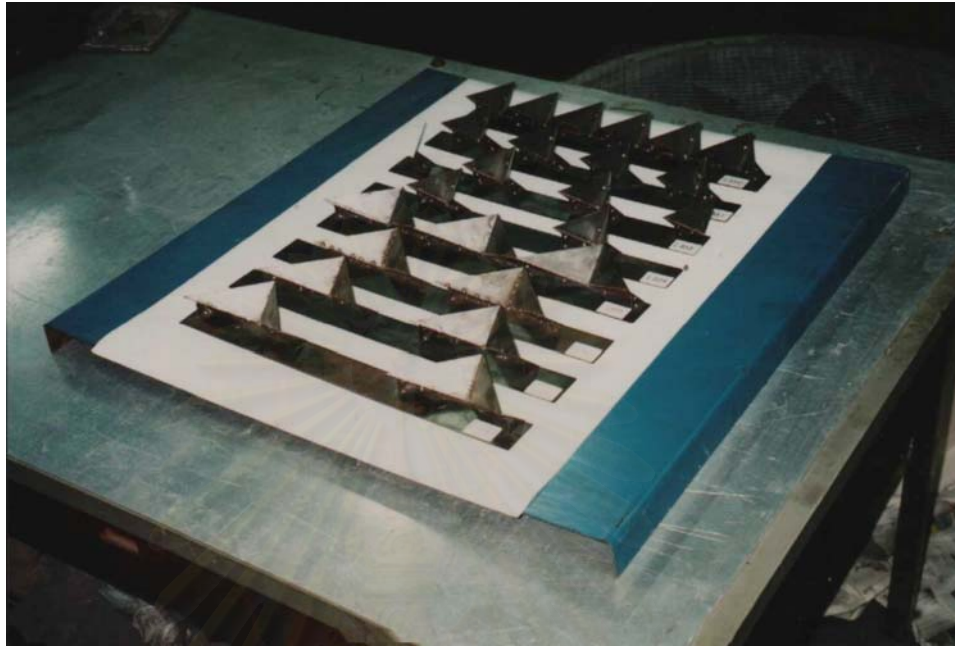
(ข)

รูปที่ 4.7 รูปแสดงภาพถ่ายห้องทดลอง (Test section) :  
(ก) ภาพด้านข้าง, (ข) ภาพด้านบน

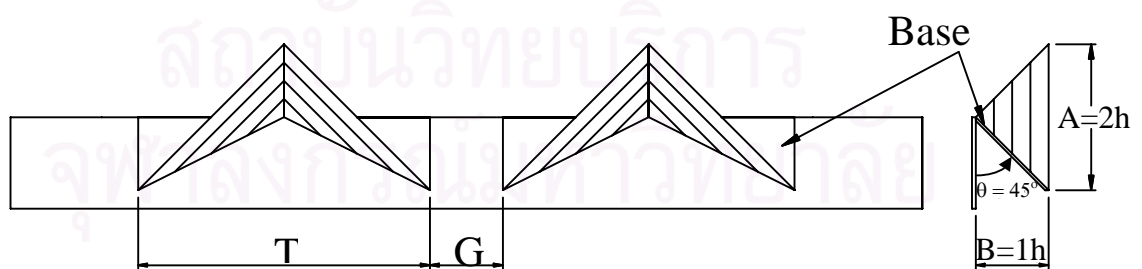


รูปที่ 4.8 ภาพแสดง Schematic drawing ของห้องทดลอง :  
 (ก) ตำแหน่งที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ,  
 (ข) การแบ่งบริเวณภายในห้องทดลองออกเป็น 8 โซน

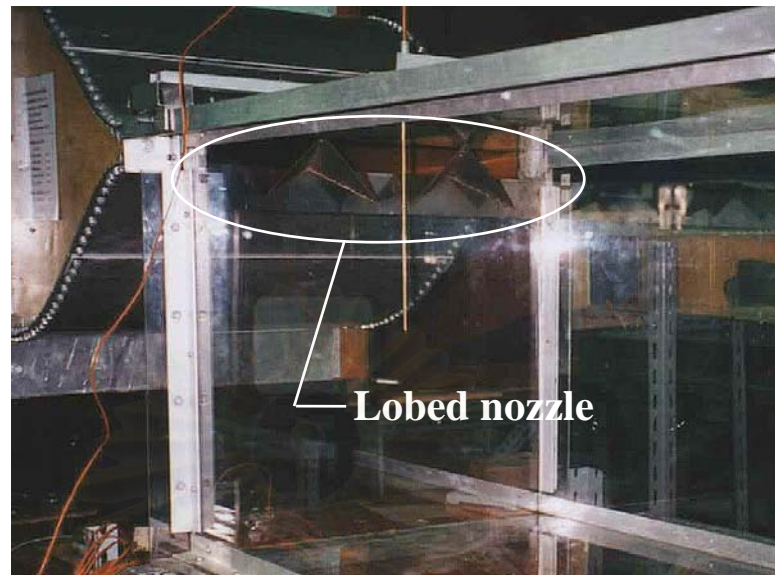




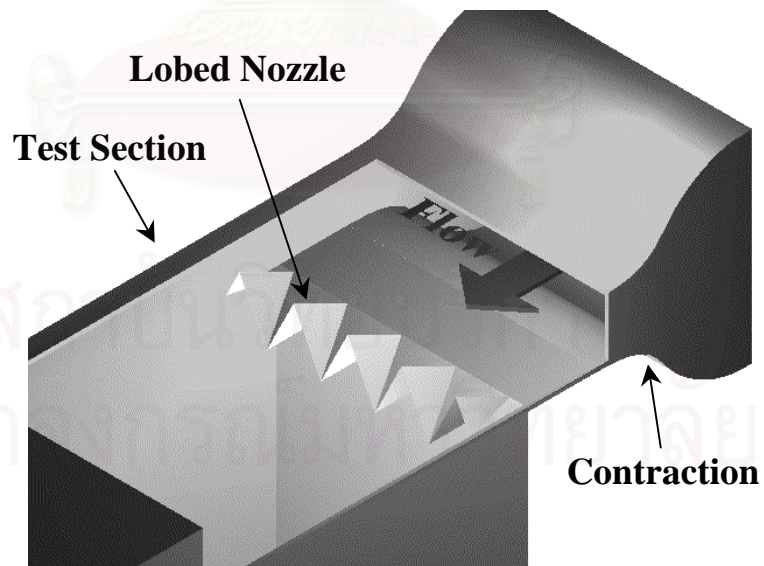
รูปที่ 4.9 ภาพแสดง Lobed nozzle แบบต่างๆซึ่งได้แก่ L220, L221, L222, L224, L240, L241, L242 และ L244 (เรียงลำดับจากบนลงล่าง)



รูปที่ 4.10 ภาพแสดงพารามิเตอร์ต่างๆของ Lobed nozzle

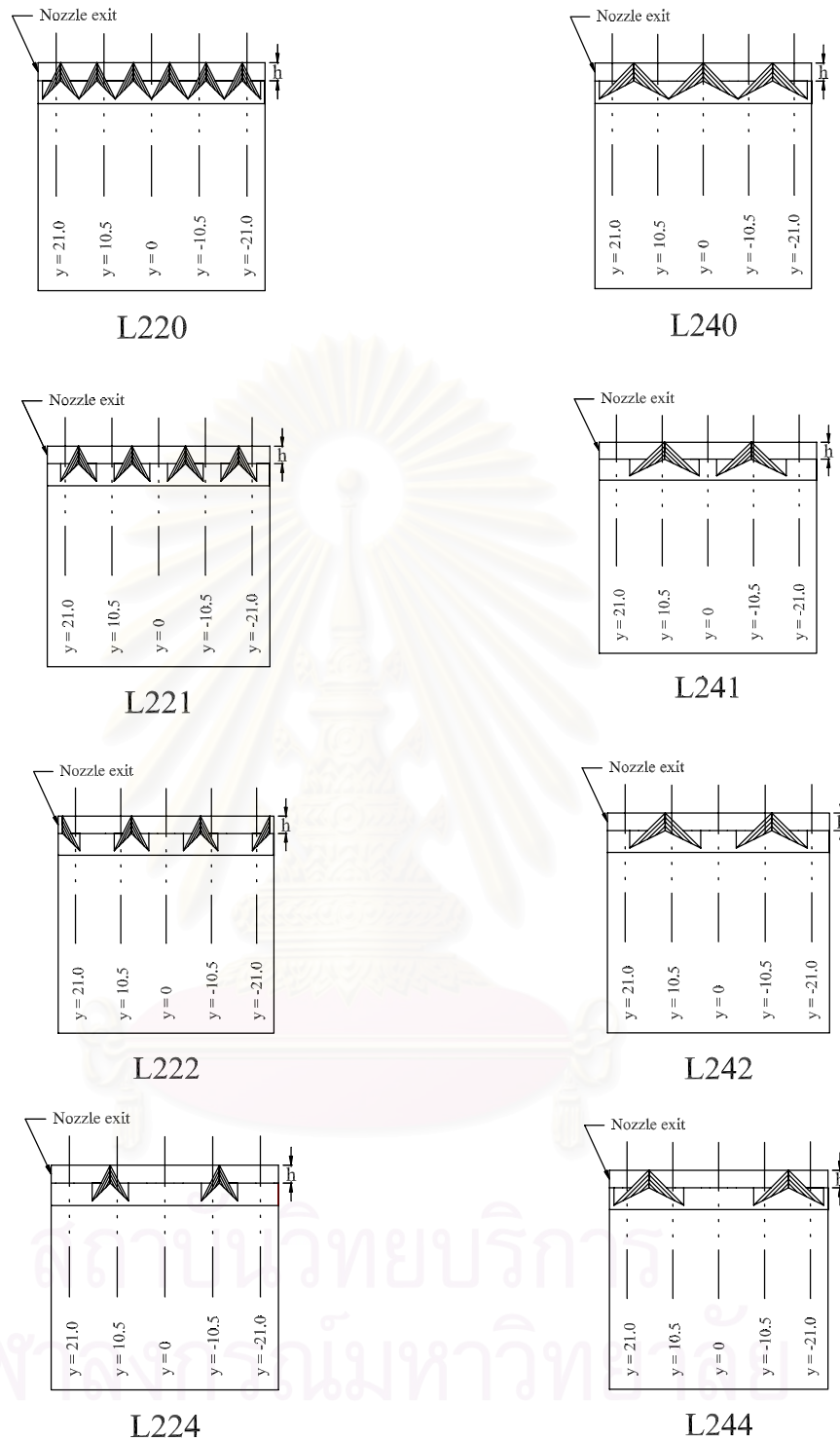


(ก)



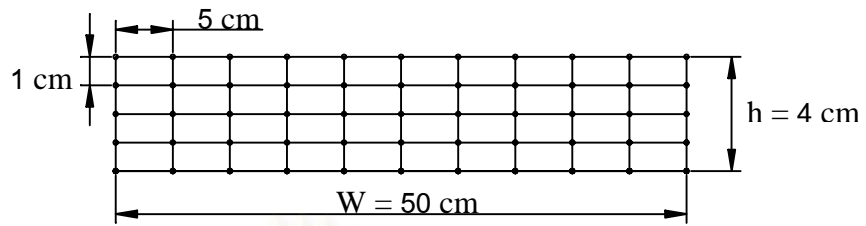
(ข)

รูปที่ 4.11 (ดูคำอธิบายหน้าถัดไป)



รูปที่ 4.11 ภาพแสดงการติดตั้ง Lobed nozzle ที่บริเวณปากทางเข้าของห้องทดลอง :

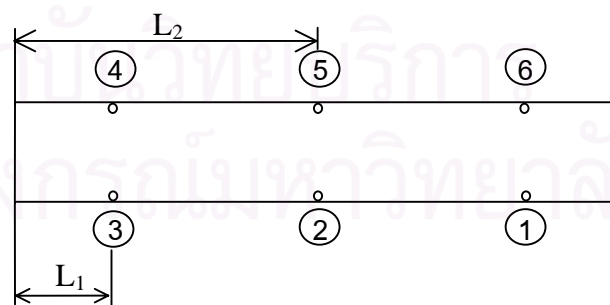
- (ก) ภาพถ่ายแสดงการติดตั้ง Lobed nozzle,
- (ข) รูป Schematic drawing แสดงการติดตั้ง Lobed nozzle,
- (ค) รูปแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและความดันสถิตเมื่อทำการติดตั้ง Lobed nozzle ในแต่ละกรณี



รูปที่ 4.12 ภาพแสดงตำแหน่งต่างๆที่ใช้วัดความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่บริเวณหน้าตัดทางออกของ Contraction ซึ่งมีขนาด  $4 \times 50$  เซนติเมตร<sup>2</sup>

7.4	7.8	7.7	7.5	7.7	7.8	7.9	7.7	7.7	7.7	6.3
7.4	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.7
7.4	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.0
7.5	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9
6.3	7.2	7.2	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.9	7.9	7.0

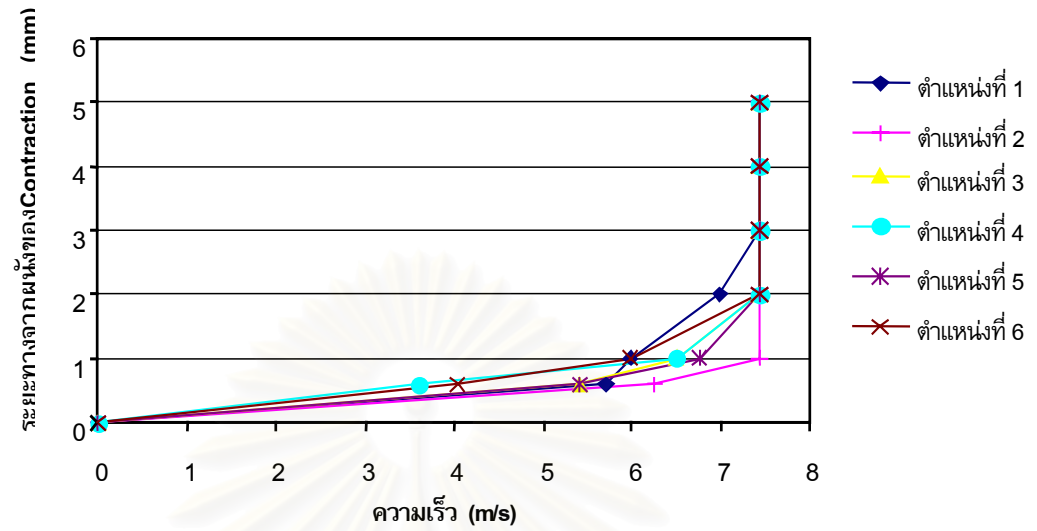
รูปที่ 4.13 ภาพแสดงการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่วัดได้ (m/s) ที่บริเวณหน้าตัดทางออกของ Contraction



$$L_1 = h = 4 \text{ cm}$$

$$L_2 = W/2 = 25 \text{ cm}$$

รูปที่ 4.14 ภาพแสดงตำแหน่งที่ใช้ในการวัดความหนาของชั้น Boundary Layer ที่บริเวณหน้าตัดทางออกของ Contraction

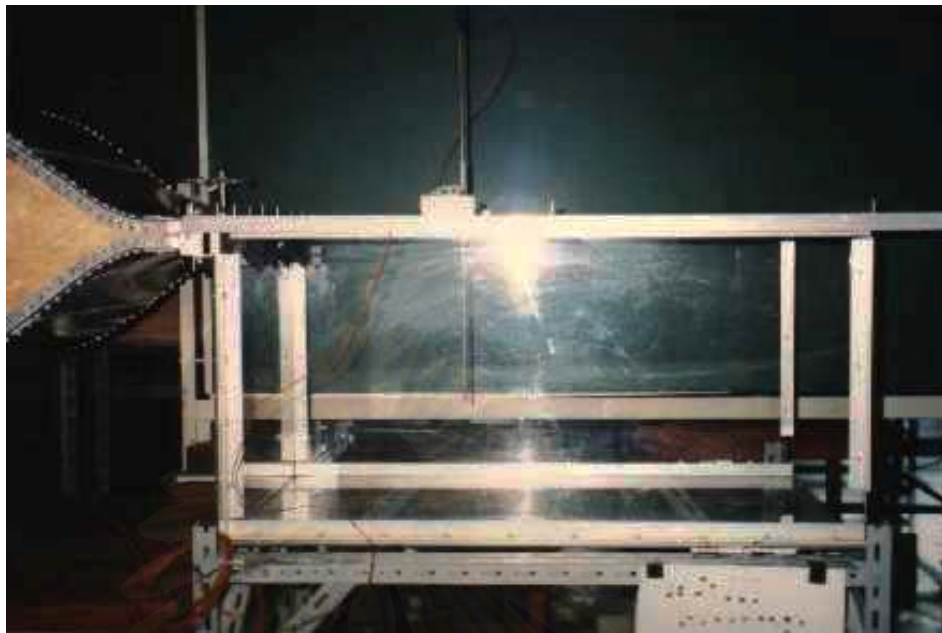


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลการวัด Boundary Layer ที่ปากทางออก Contraction

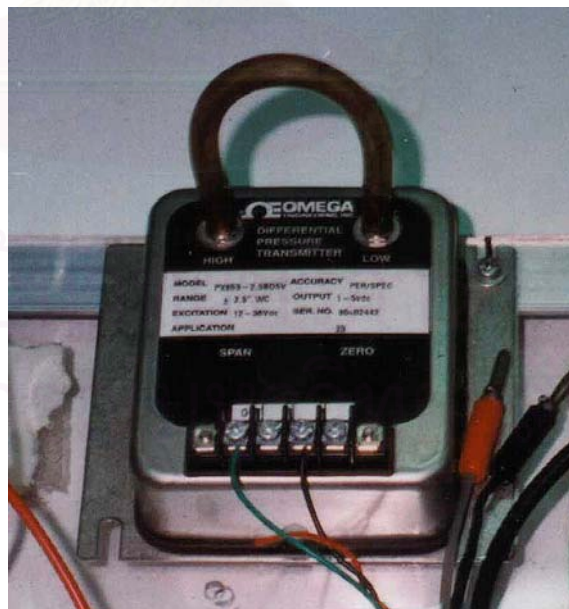


รูปที่ 4.16 ภาพแสดง Probe และตัวอ่านค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง





รูปที่ 4.17 ภาพแสดงการวัดอุณหภูมิกายในห้องทดลองโดยการยื่น Probe จากทางด้านบน



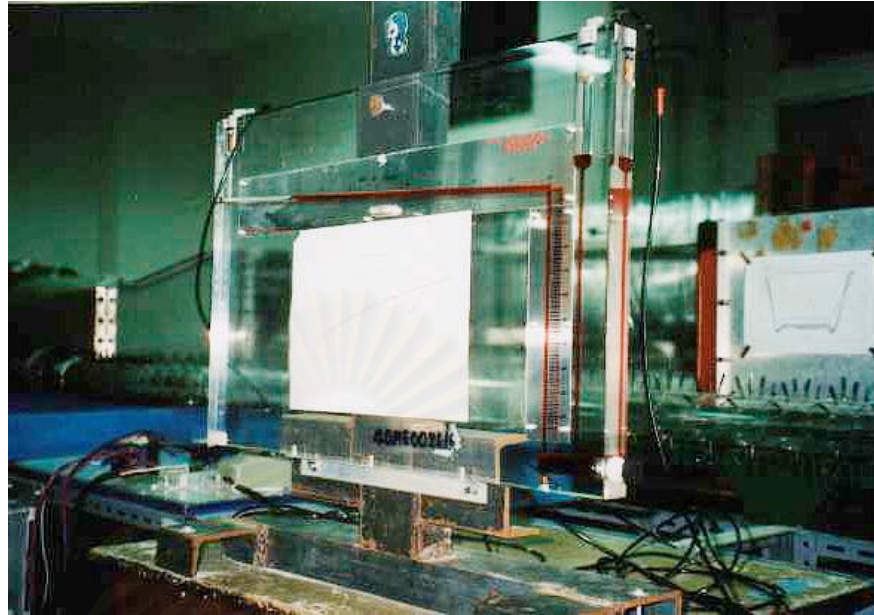
รูปที่ 4.18 ภาพแสดง Pressure transducer ที่ใช้ในการวัดความดันสถิตตกร้อม Lobed nozzle



รูปที่ 4.19 ภาพแสดงตัวอ่านค่า (Read out) ที่ใช้ในการวัดความดันสถิตตกคร่อม Lobed nozzle



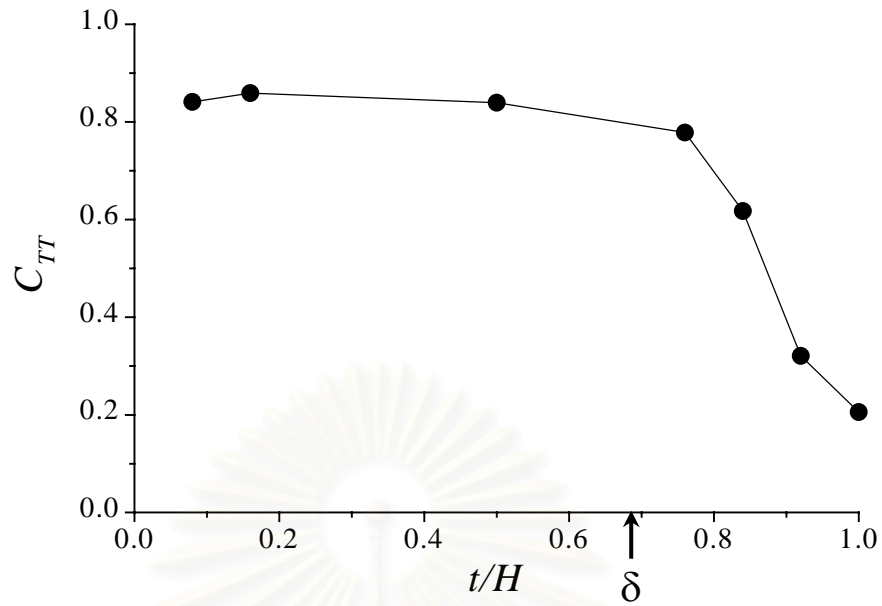
รูปที่ 4.20 ภาพแสดงชุด Orifice ที่ติดตั้งบริเวณทางเข้าของอุโมงค์ลม



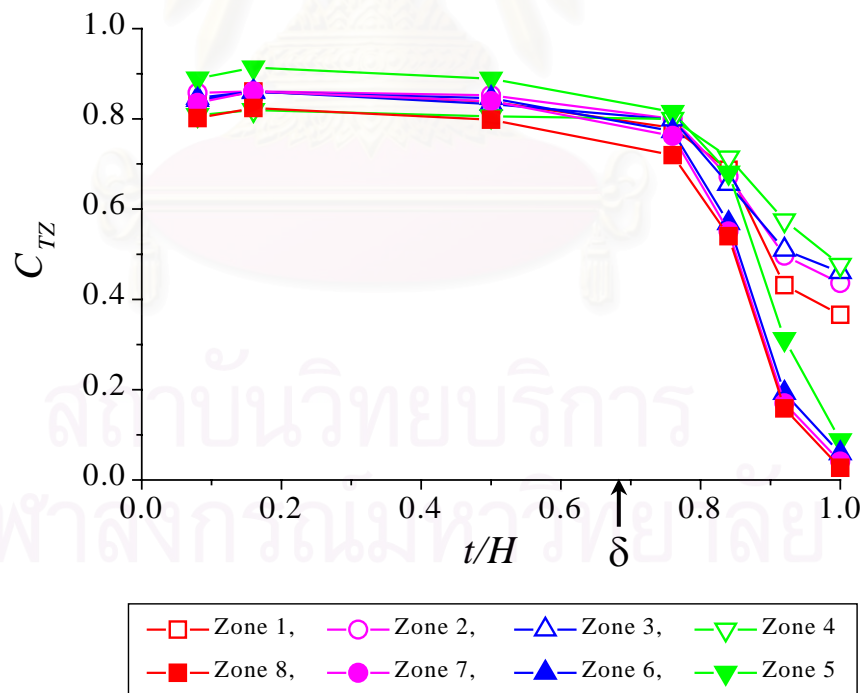
รูปที่ 4.21 ภาพแสดง Inclined manometer ที่ใช้ในการวัดความดันสถิต  
ตกร่อม Orifice



รูปที่ 4.22 ภาพแสดง Pitot probe ที่ใช้ในการวัดความดันรวม

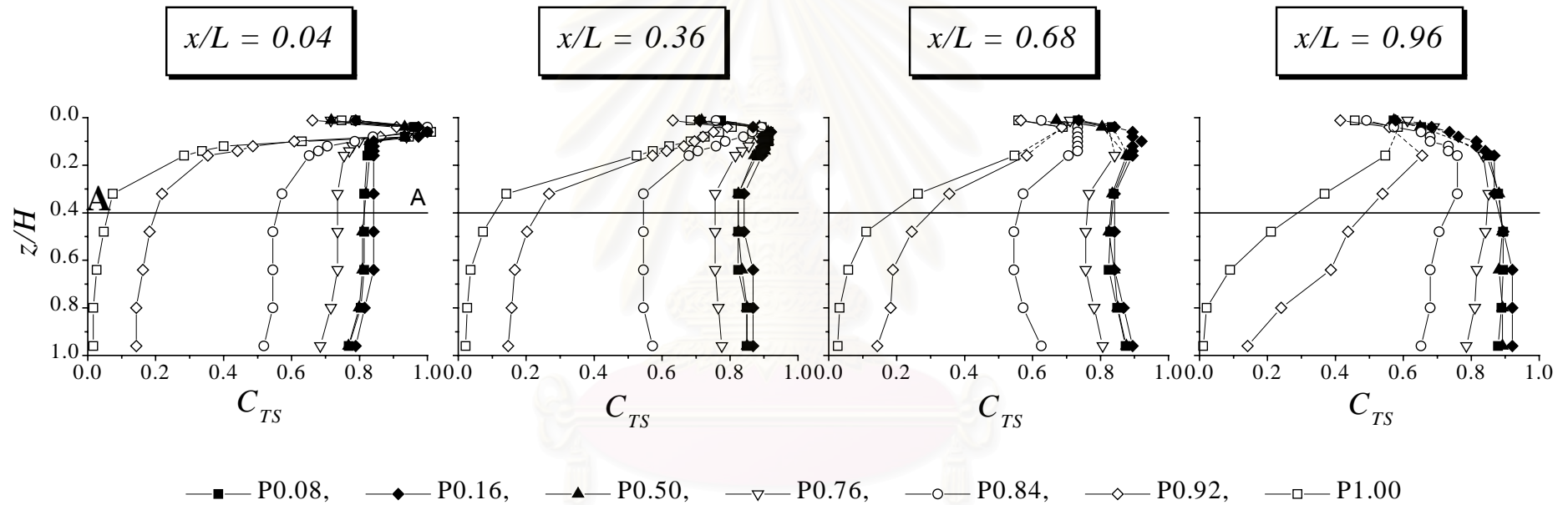


รูปที่ 5.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า  $C_{TT}$  ของกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน เมื่อ  $U_j = 4.4 \text{ m/s}$



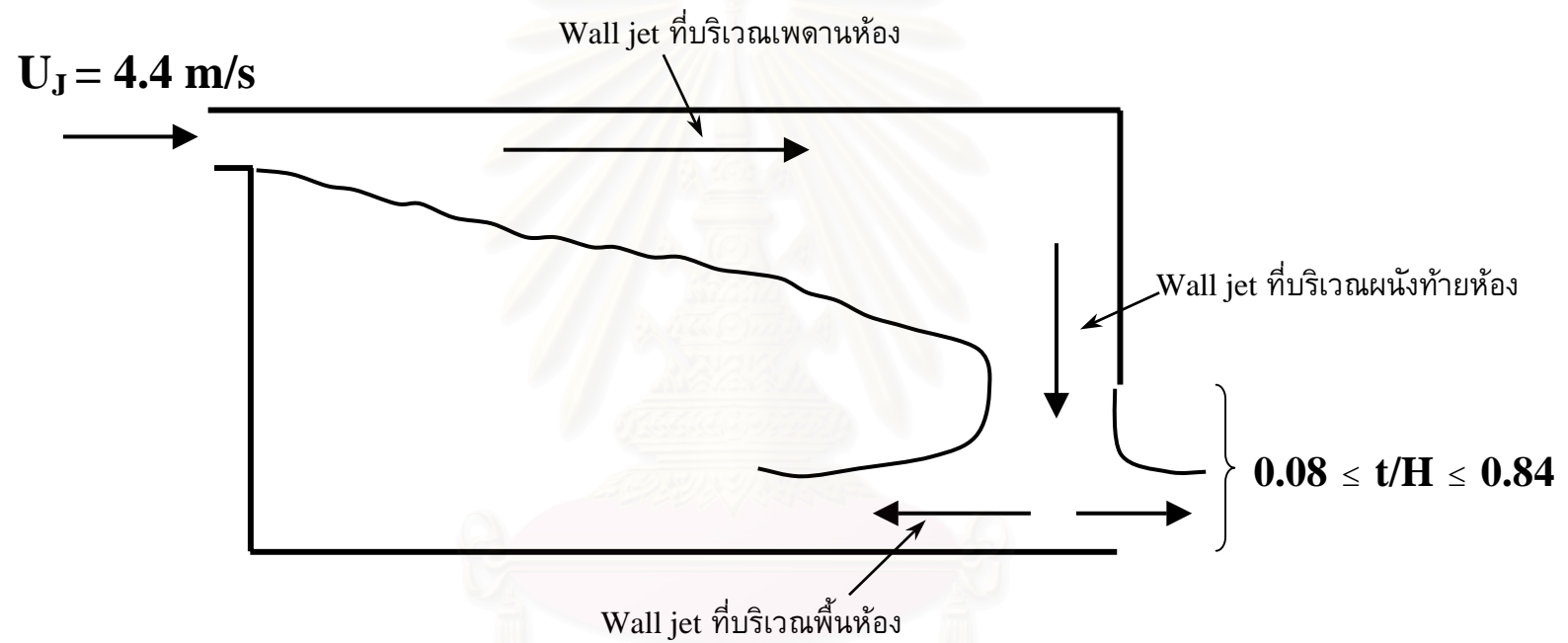
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า  $C_{TZ}$  ตามบริเวณต่างๆภายในห้องของกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน เมื่อ  $U_j = 4.4 \text{ m/s}$



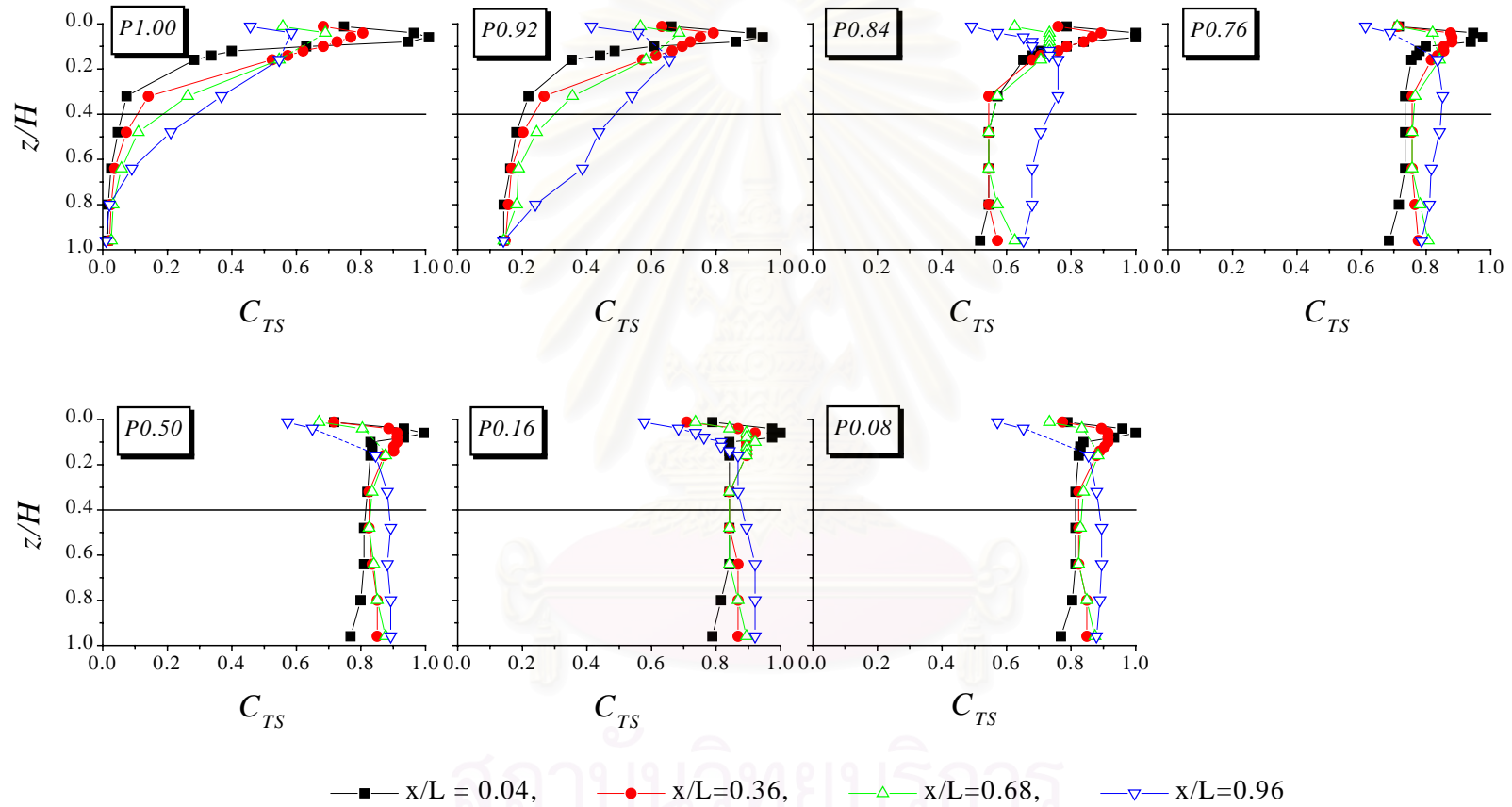


รูปที่ 5.3 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ของกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่างๆกัน ตามแนว Streamwise เมื่อ  $U_j = 4.4 \text{ m/s}$

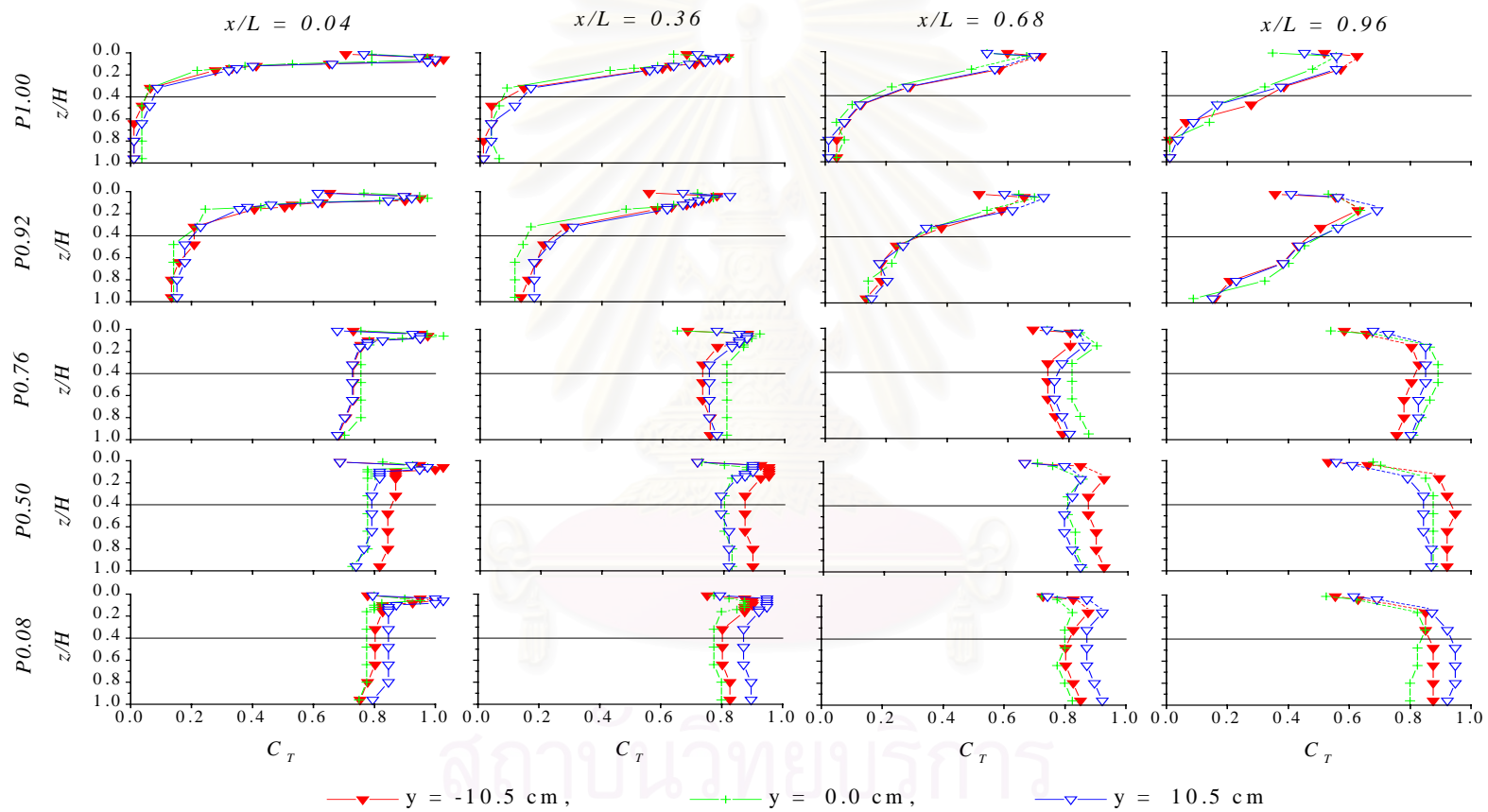




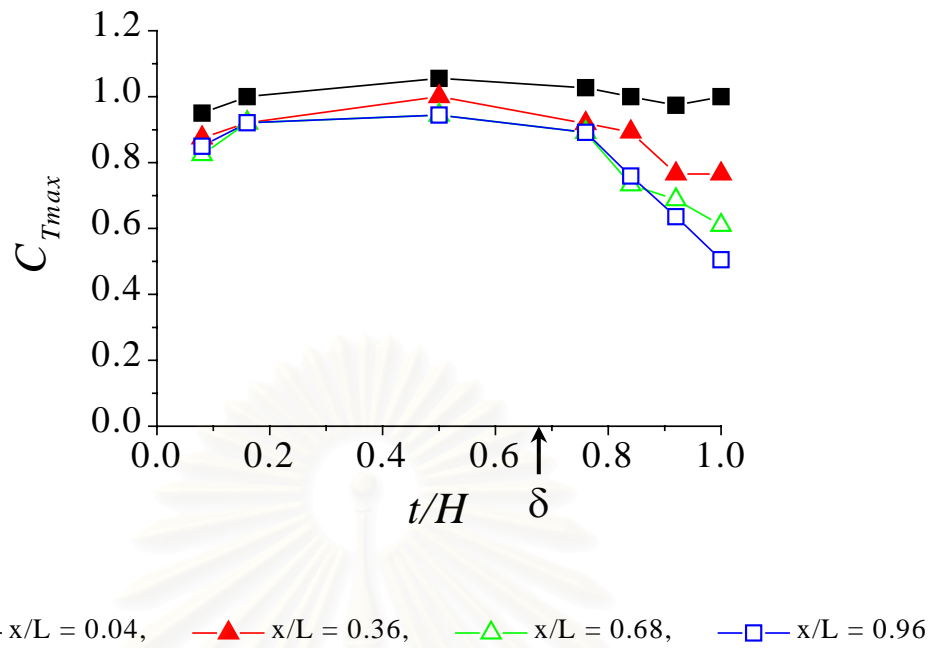
รูปที่ 5.4 รูปแสดงลักษณะ Recirculation ที่เกิดขึ้นในกรณี P0.84 จนถึงกรณี P0.08 เมื่อ  $U_J = 4.4 \text{ m/s}$



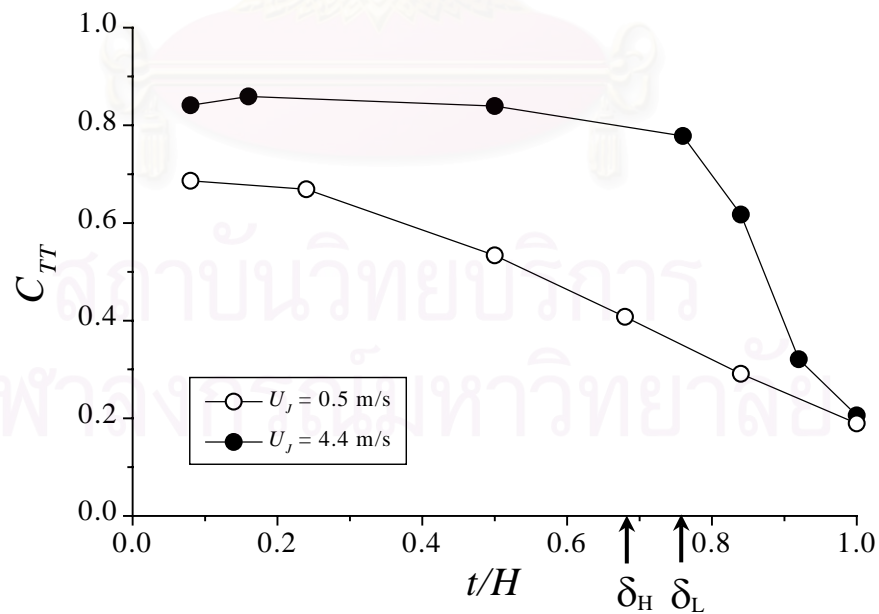
ปที่ 05.5 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ตามแนว Streamwise ของกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่างกัน เมื่อ  $U_j = 4.4 \text{ m/s}$



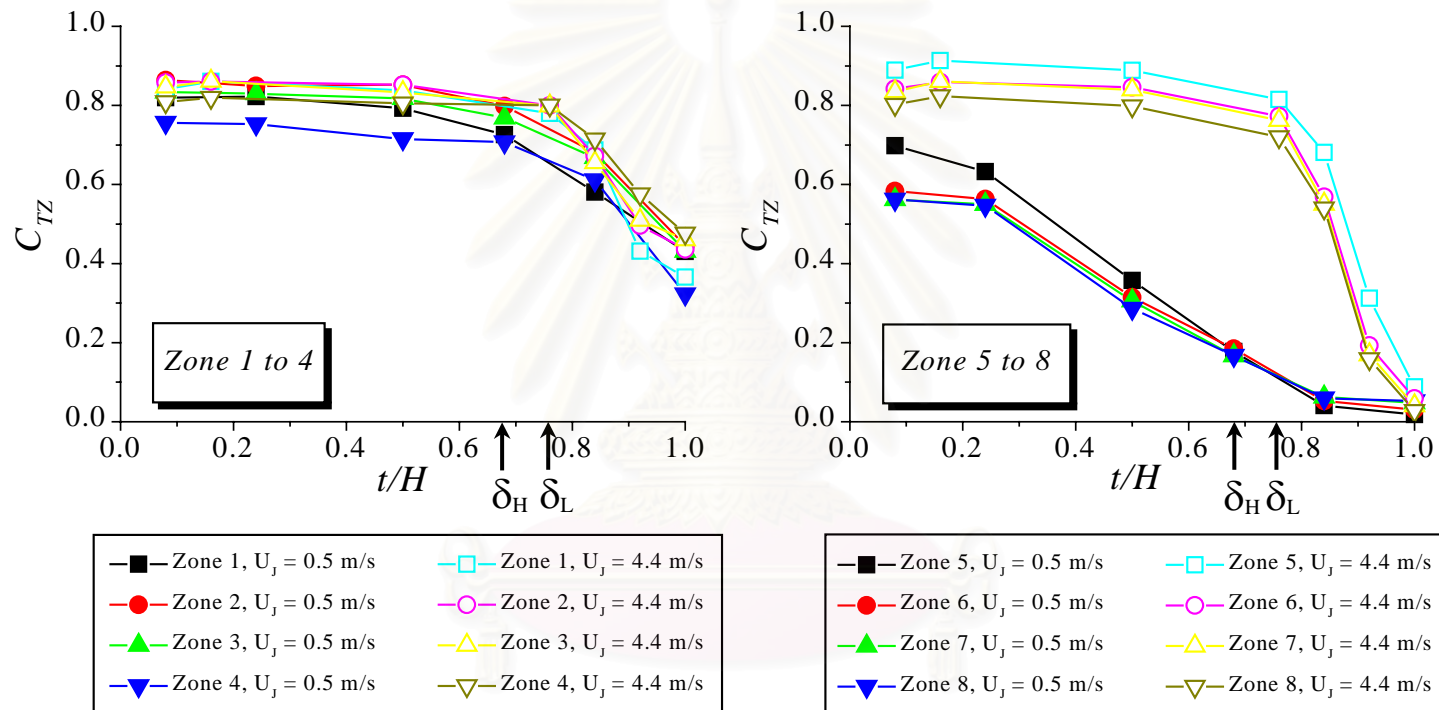
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L000 เมื่อ  $U_j = 4.4 \text{ m/s}$



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C_{Tmax}$  ที่ตำแหน่ง Center plane และอัตราส่วน of ขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้อง ในกรณี L000 เมื่อ  $U_j = 4.4 \text{ m/s}$

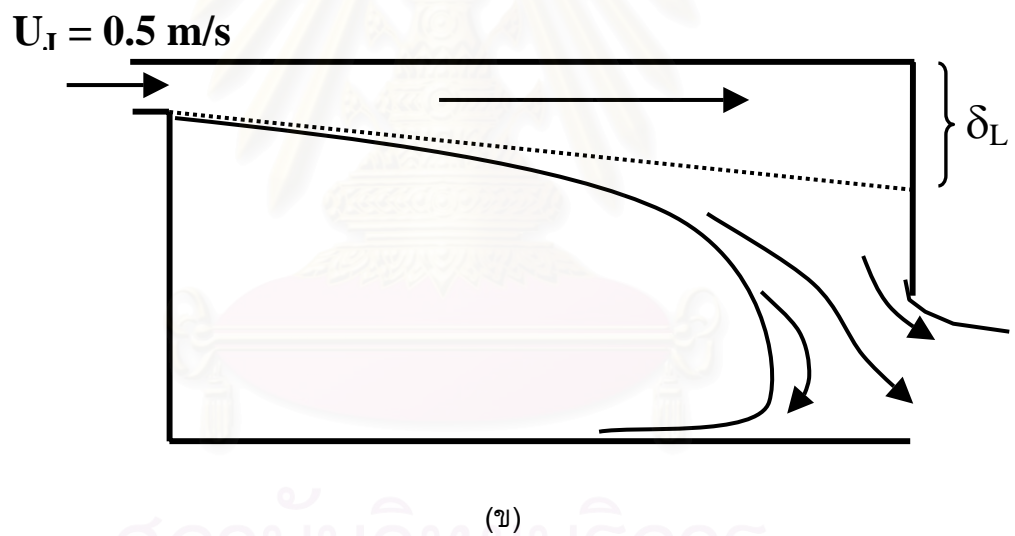
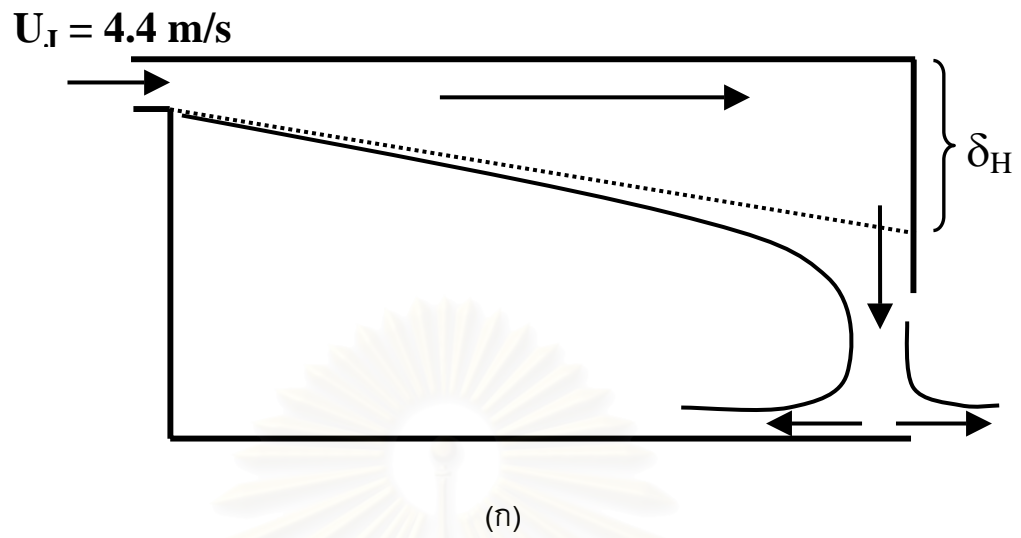


รูปที่ 5.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า  $C_{TT}$  ที่อัตราส่วน of ขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน เมื่อ  $U_j = 0.5$  และ  $4.4 \text{ m/s}$



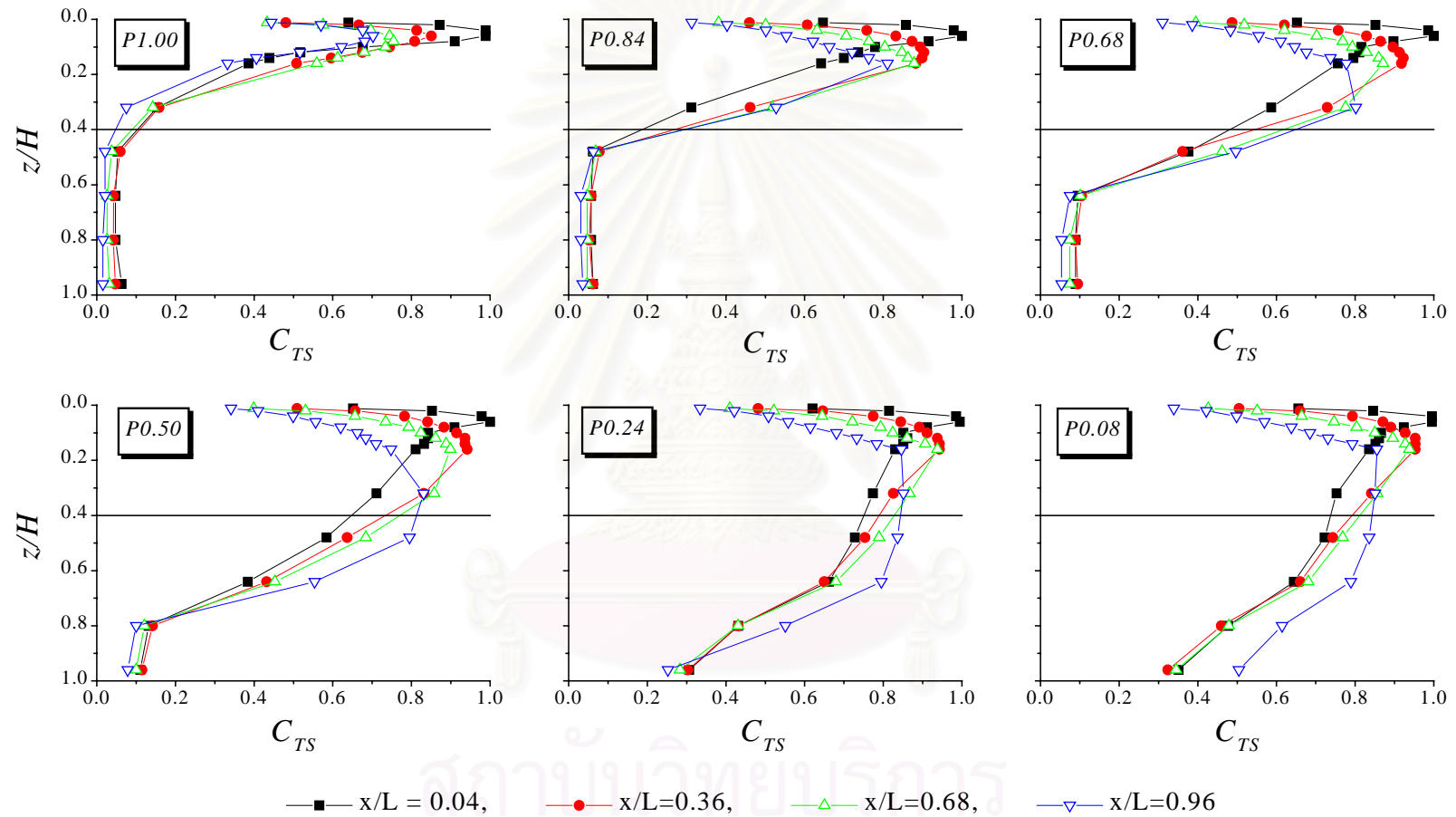
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงผลของความเร็วเฉลี่ยบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้าต่อลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TZ}$  ที่บริเวณด้านบนและด้านล่างของห้องในกรณี L000



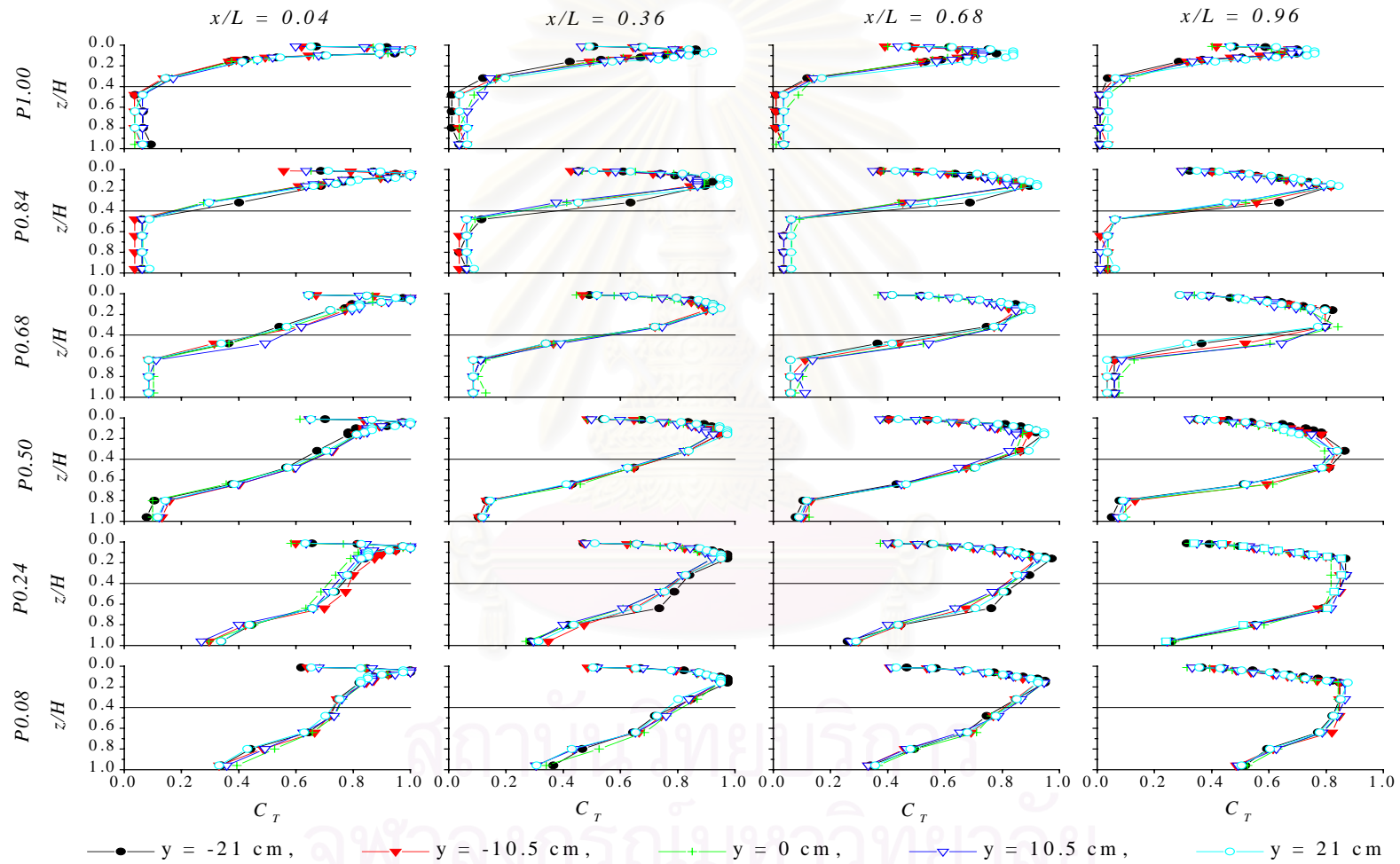


รูปที่ 5.10 รูปแสดงลักษณะการไหลของเจ็ทภายในห้องเมื่อทำการปิดผนังด้านท้ายห้องเกินกว่าความหนาของเจ็ท ( $\delta$ ):

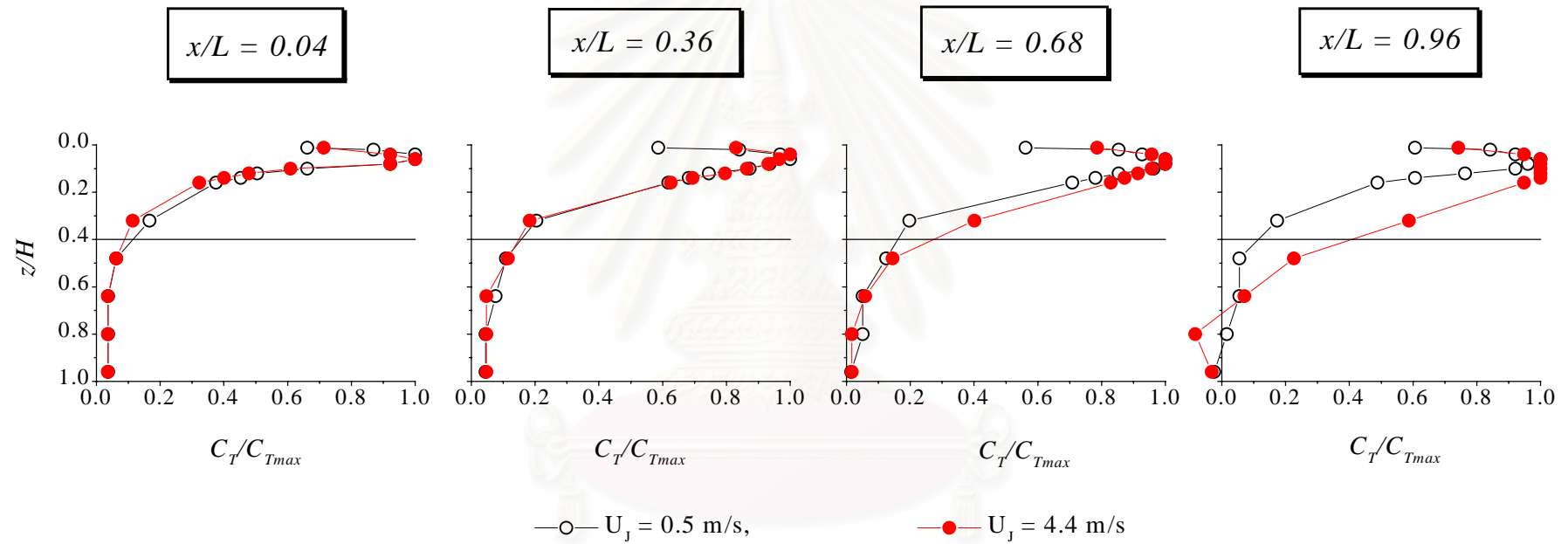
(ก) กรณีความเร็วสูง ( $U_j = 4.4 \text{ m/s}$ ) (ข) กรณีความเร็วต่ำ ( $U_j = 0.5 \text{ m/s}$ )



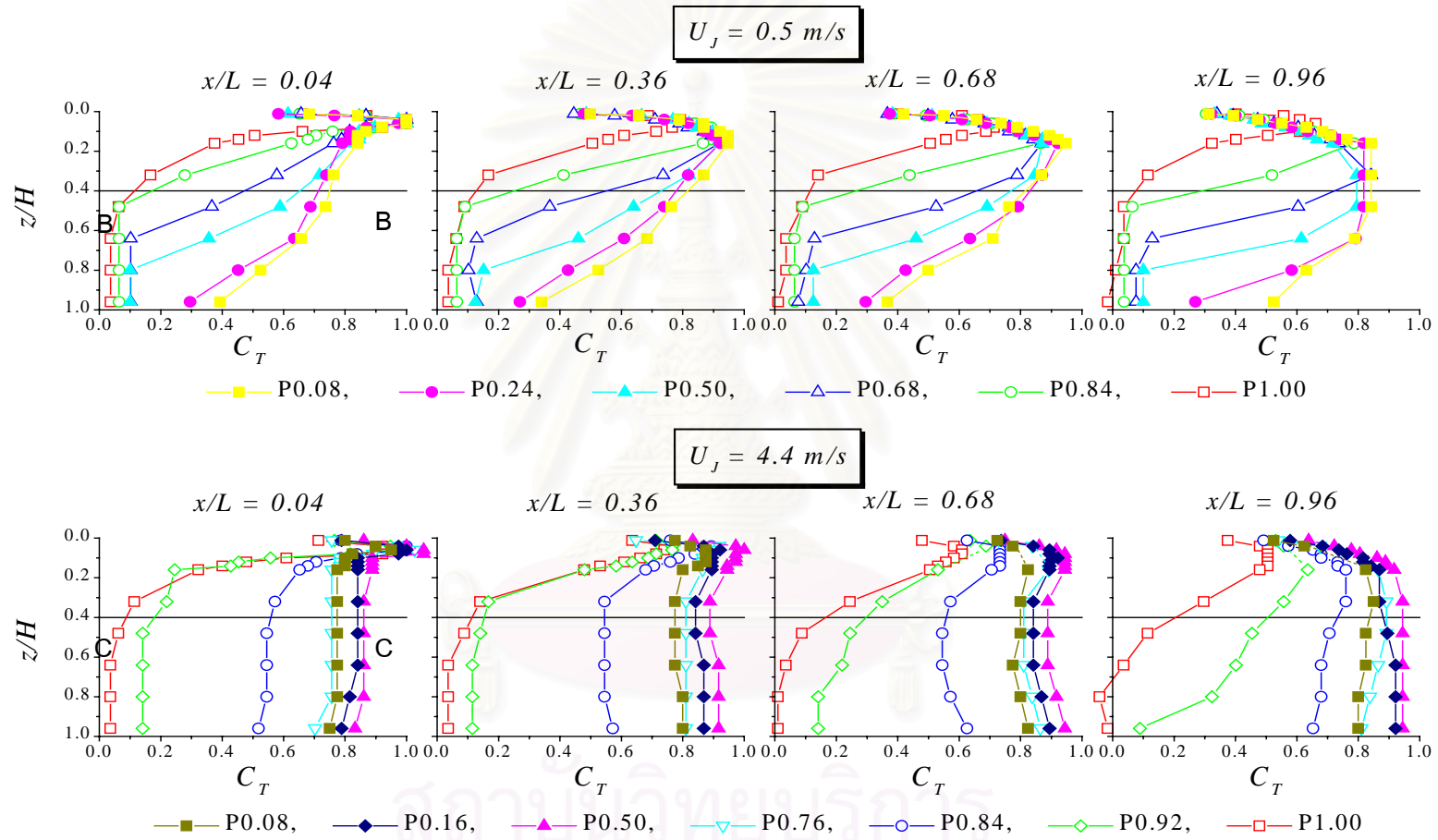
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ตามแนว Streamwise ของกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่างๆกัน เมื่อ  $U_j = 0.5 \text{ m/s}$



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L000 ที่  $U_j = 0.5$  m/s

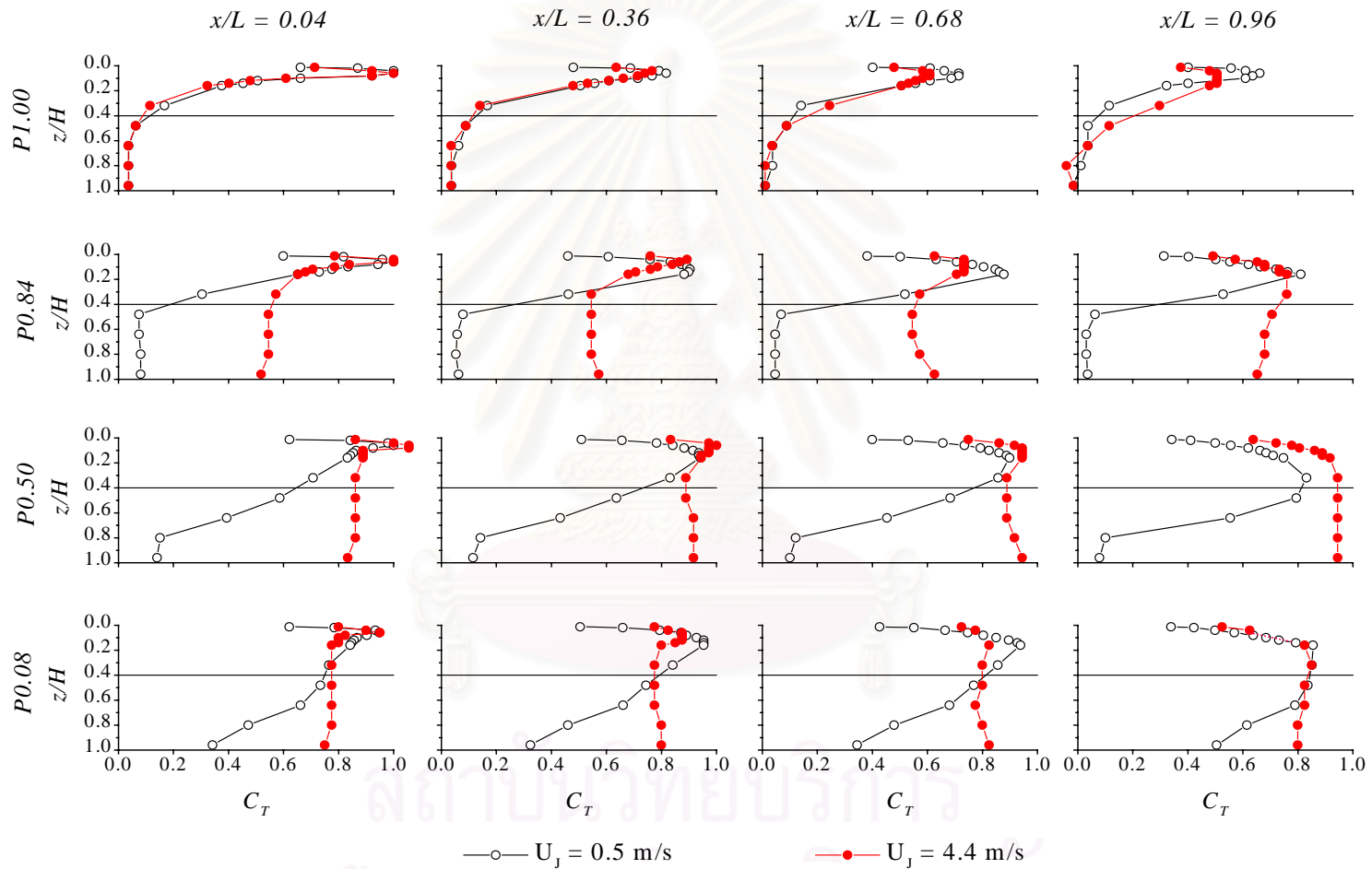


รูปที่ 5.13 กราฟแสดงผลของความเร็วเฉลี่ยบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้าต่อลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T/C_{Tmax}$  ตามบริเวณต่างๆ ภายในห้องที่ตำแหน่ง Center plane ( $y=0$ ) ในกรณี L000-1.00

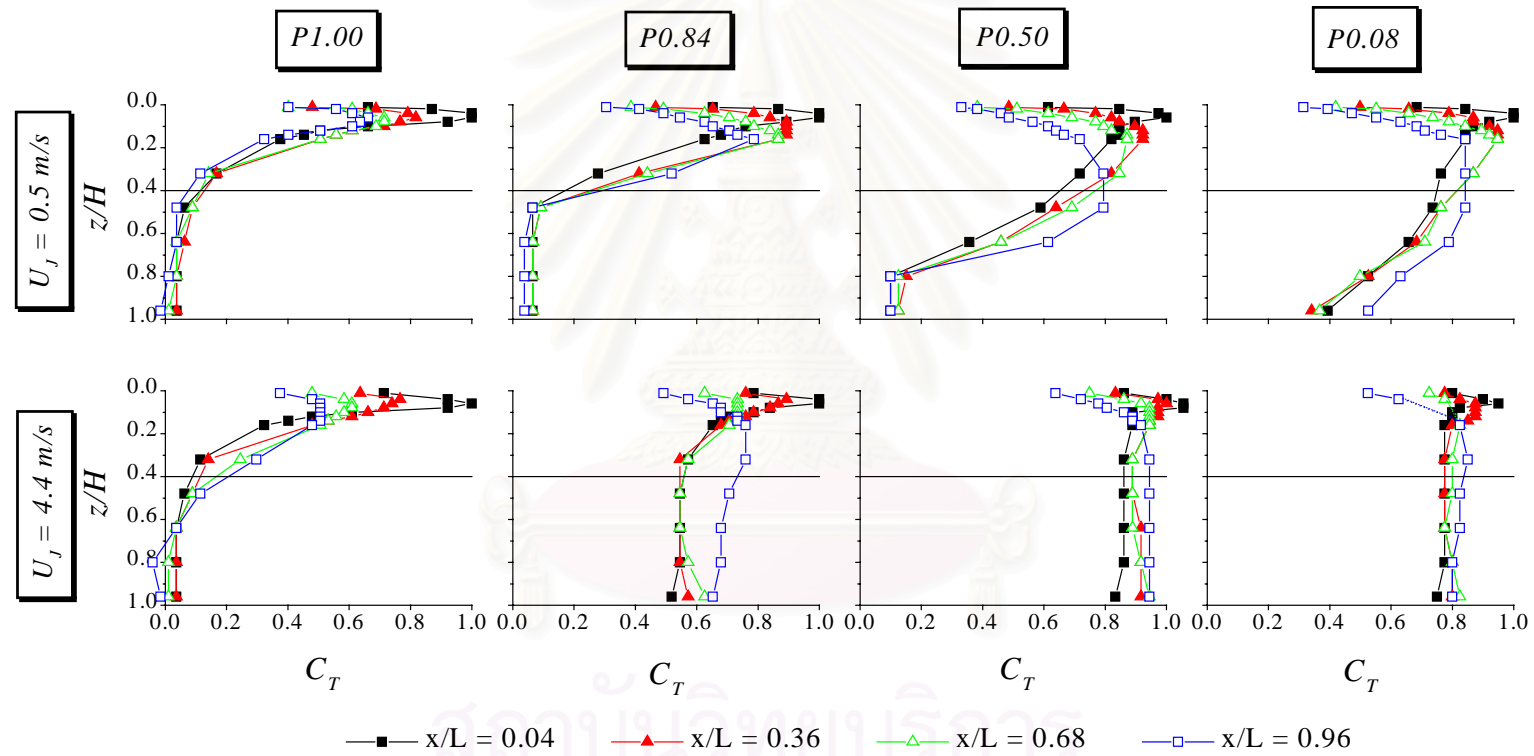


รูปที่ 5.14 กราฟแสดงผลกระทบของความเร็วเฉลี่ยบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้า ต่อลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ที่ตำแหน่ง Center plane ( $y=0$ ) ในกรณี L000

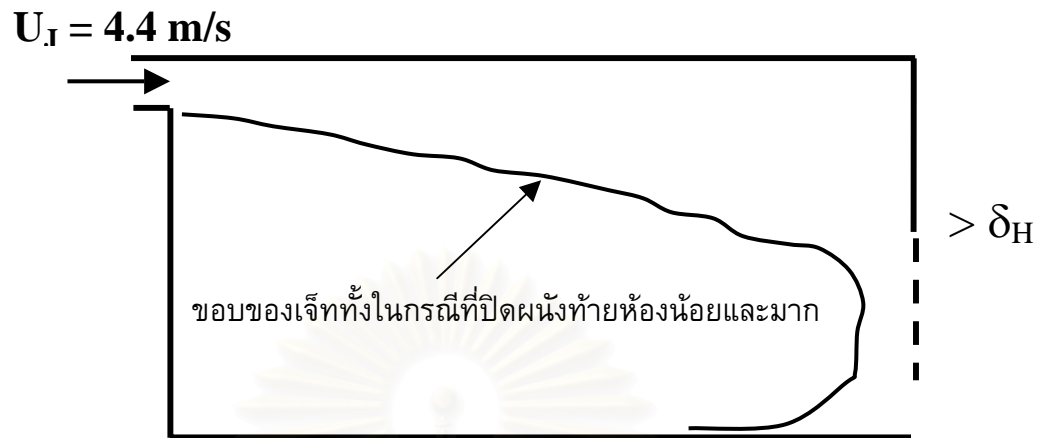




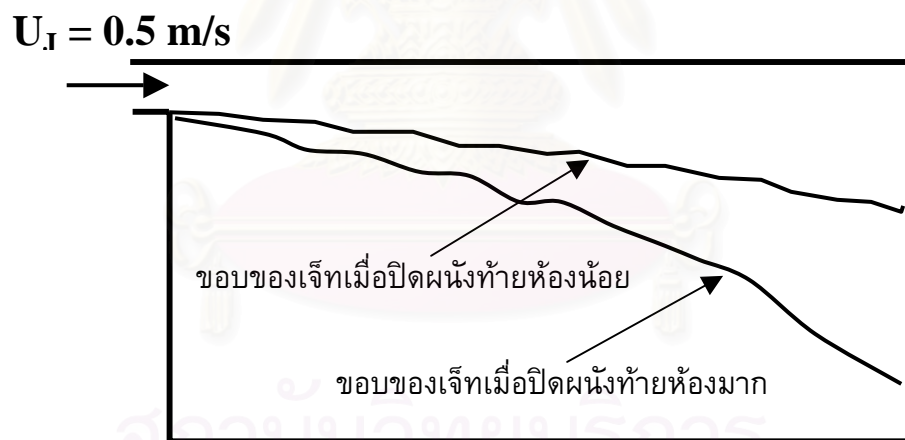
รูปที่ 5.15 กราฟแสดงผลกระทบของความเร็วเฉลี่ยบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้าต่อลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตามบริเวณต่างๆ ภายในห้องที่ตำแหน่ง Center plane ( $y=0$ ) ในกรณี L000



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตามบริเวณต่างๆภายในห้อง ที่ตำแหน่ง Center plane ( $y=0$ ) ในกรณี L000 ที่มีความเร็วเฉลี่ยบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้าต่ำและสูง

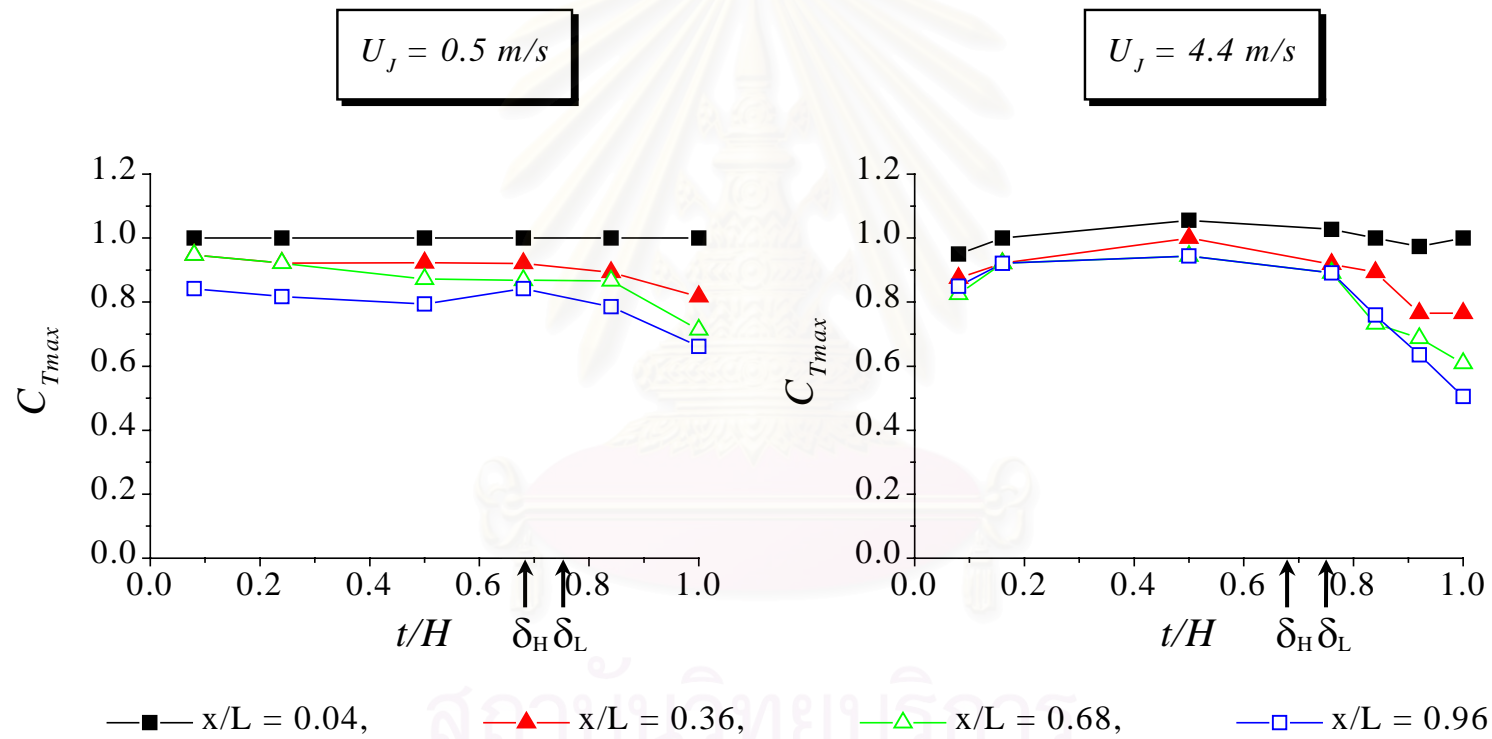


(ก)

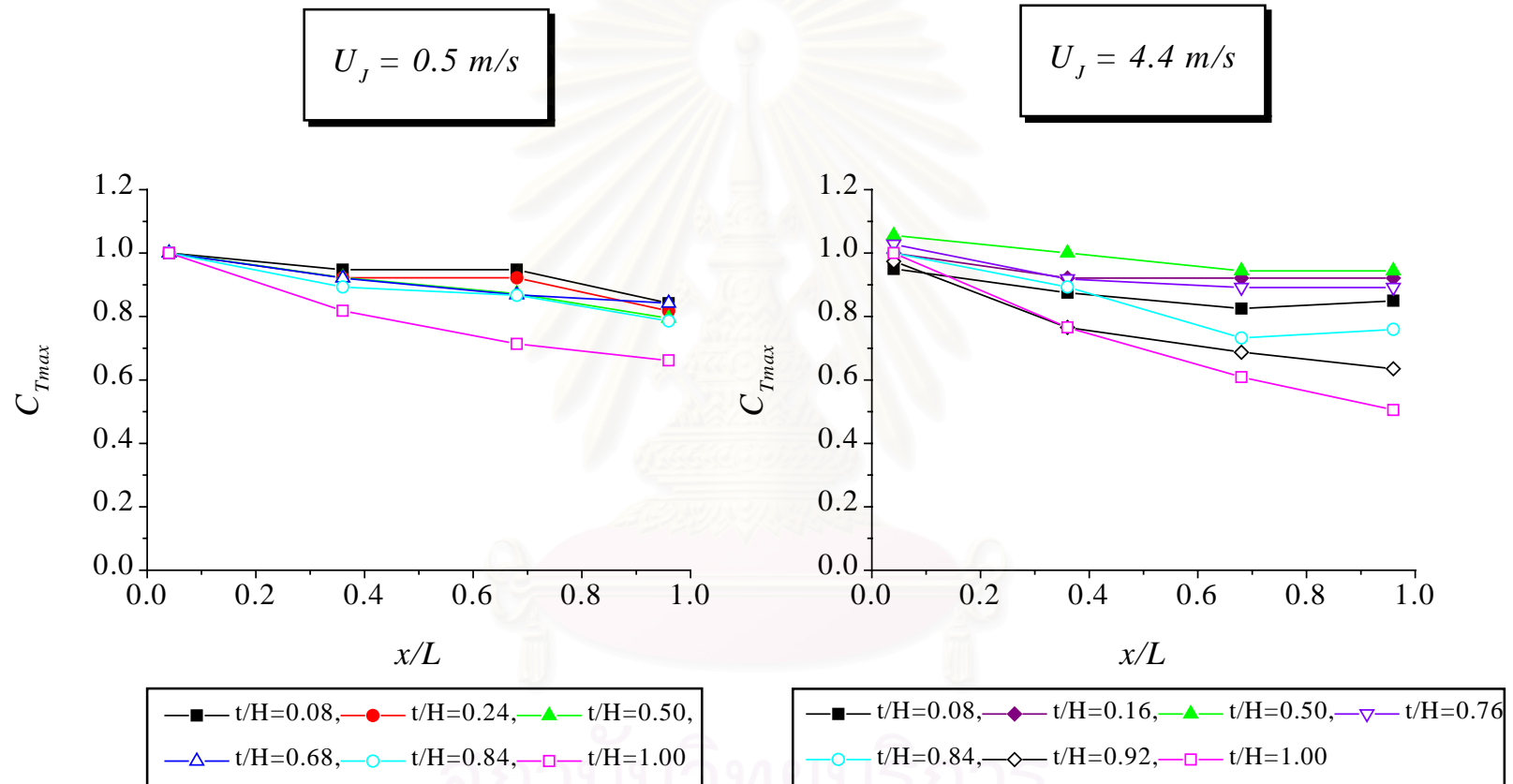


(ข)

รูปที่ 5.17 รูปแสดงลักษณะของเจ็ทภายในห้องเมื่อทำการปิดผนังด้านทำยขนาดต่างๆกัน :  
 (ก) กรณีความเร็วสูง ( $U_I = 4.4 \text{ m/s}$ ) (ข) กรณีความเร็วต่ำ ( $U_I = 0.5 \text{ m/s}$ )

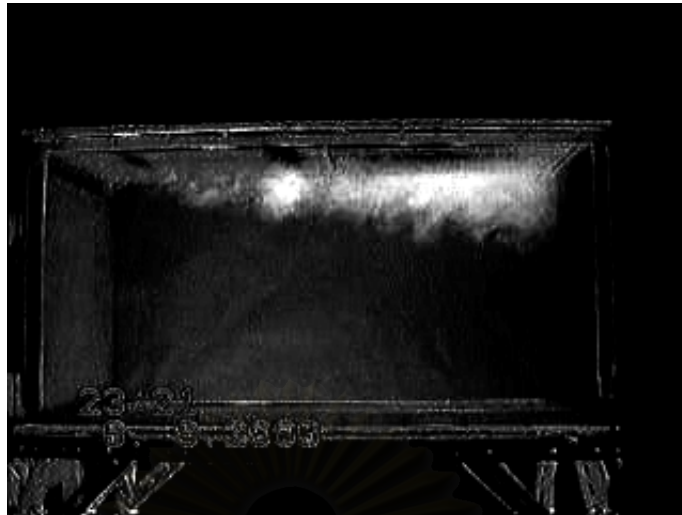


รูปที่ 5.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C_{Tmax}$  ที่ตำแหน่ง Center plane และอัตราส่วนของขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องในกรณี L000 ที่ความเร็วเฉลี่ยบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้าต่างๆกัน

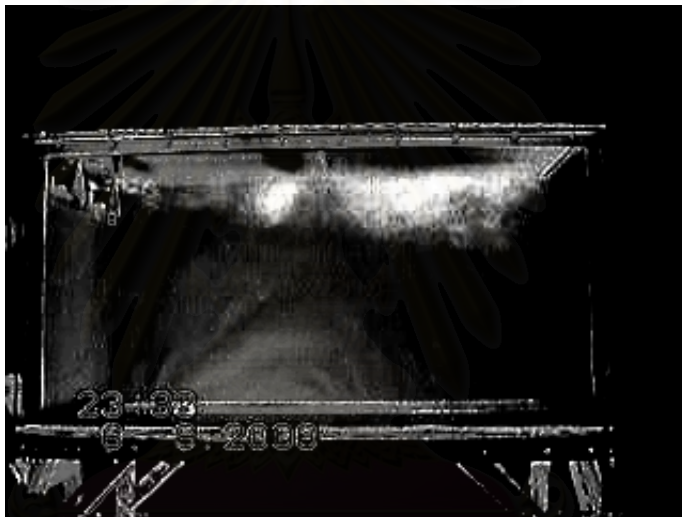


รูปที่ 5.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C_{Tmax}$  ที่ตำแหน่ง Center plane และระยะตามแนวการไหลในกรณี L000 ที่ความเร็วเฉลี่ยบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้าต่างกัน

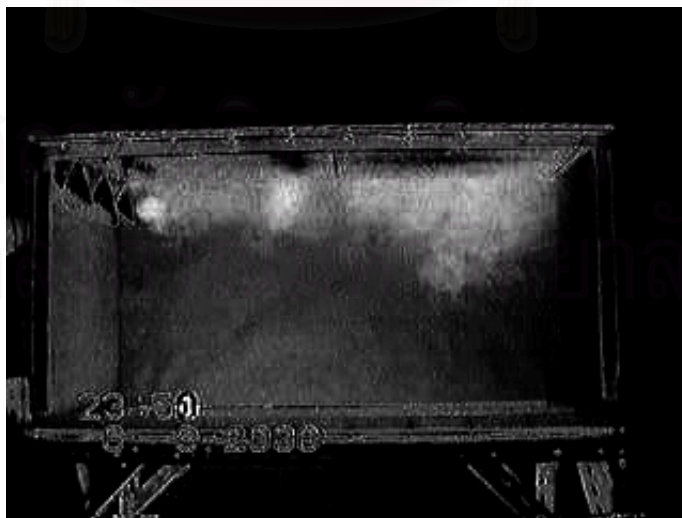




(ก)



(ข)

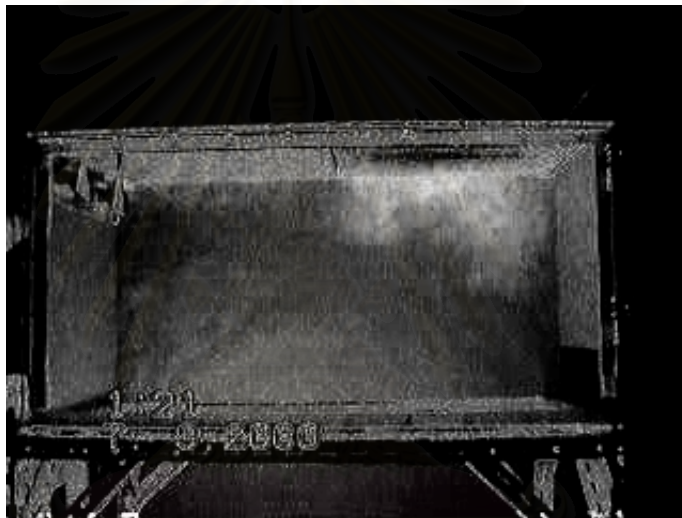


(ค)

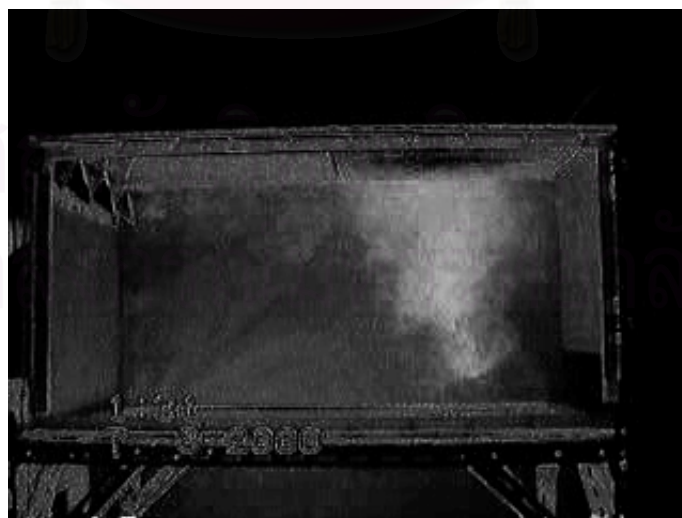
รูปที่ 5.20 ภาพแสดงการไหลในกรณี P1.00 :  
(ก) L000 (ข) L224 (ค) L240



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.21 ภาพแสดงการไหลในกรณี P0.24 :  
(ก) L000 (ข) L224 (ค) L240



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.22 ภาพแสดงการไหลในกรณี P0.08 :  
(ก) L000 (ข) L224 (ค) L240



(ก)

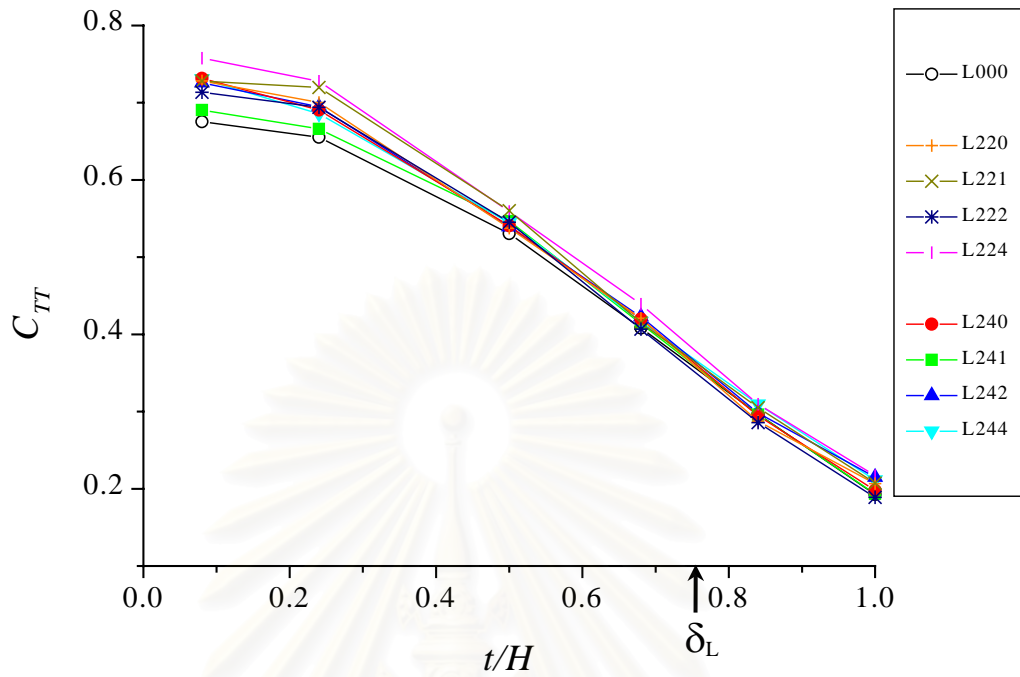


(ข)

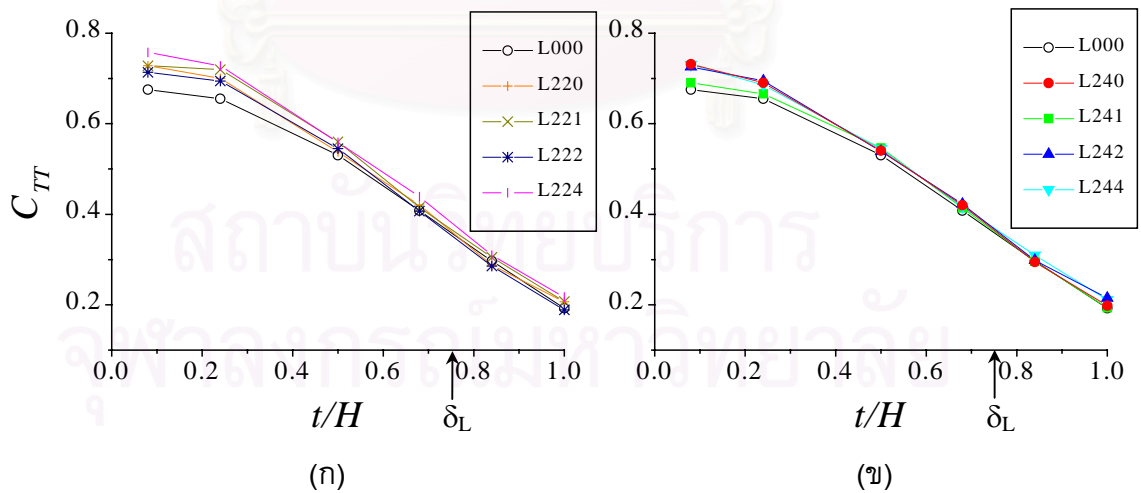


(ค)

รูปที่ 5.23 ภาพด้านท้าย (End view) แสดงการไหลของอากาศที่ตำแหน่ง  
ใกล้ปากทางออกของเจ็ท : (ก) L000 (ข) L224 (ค) L240

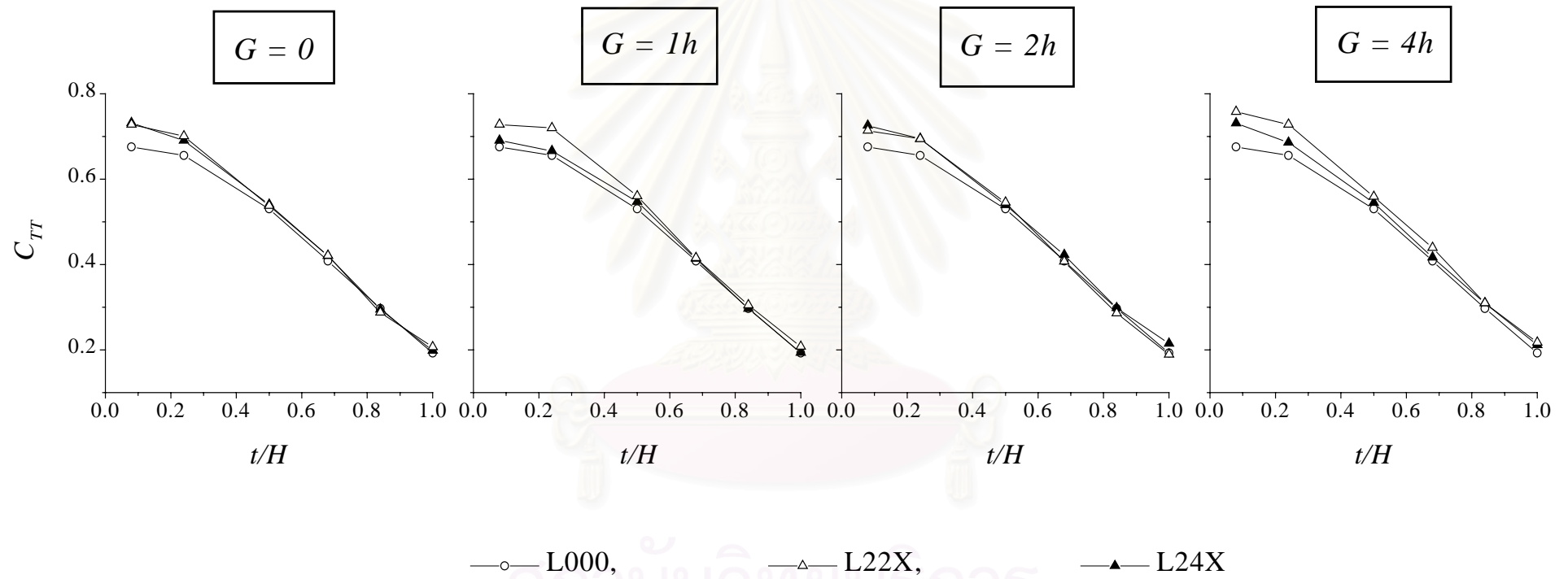


รูปที่ 5.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า  $C_{TT}$  ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆ กันของการใช้ Lobed nozzle แบบต่างๆ

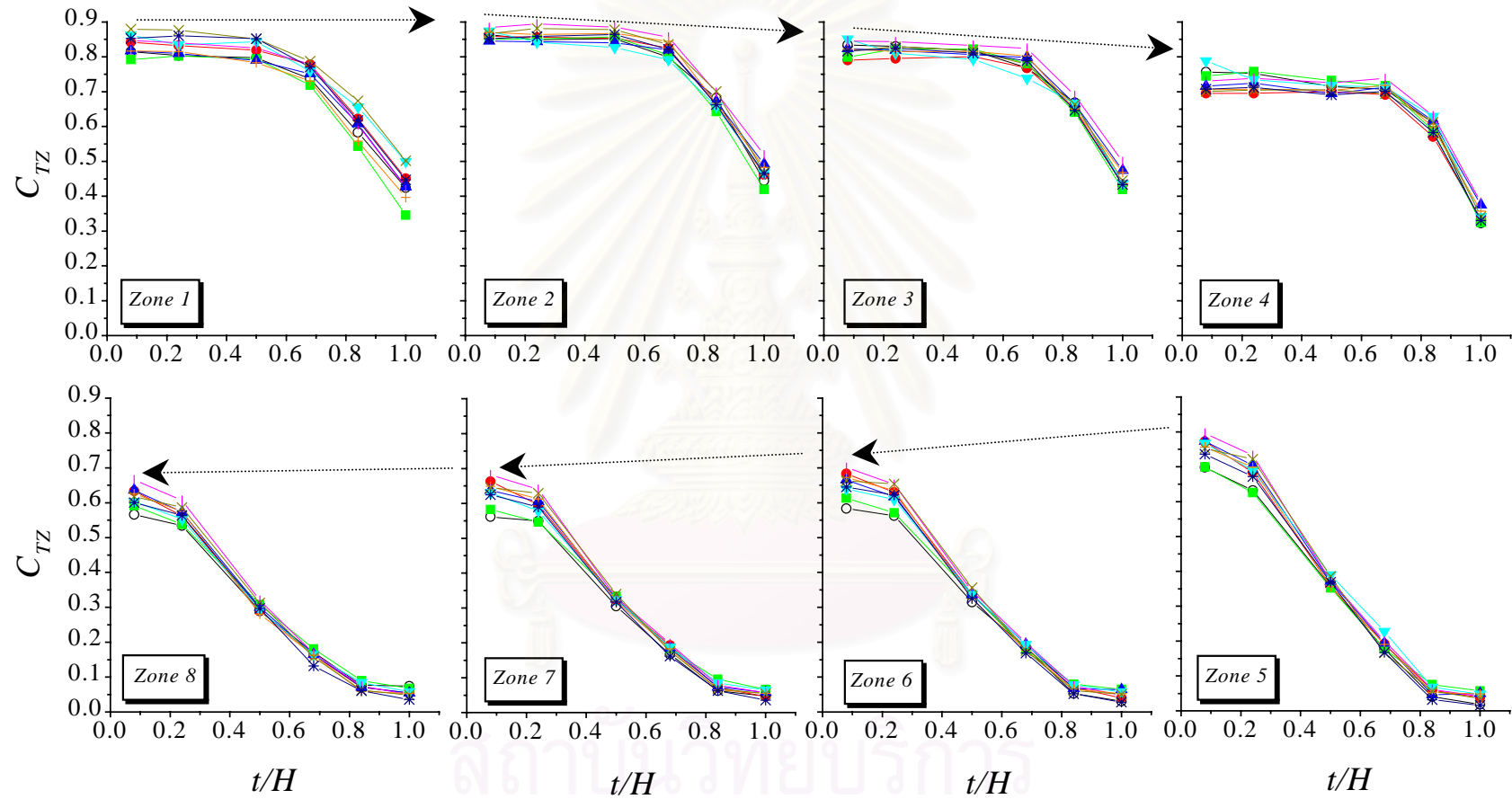


รูปที่ 5.25 กราฟแสดงผลกระทบของระยะห่างระหว่าง Lobe ต่อลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TT}$  ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆ กัน : ก) L22X ข) L24X



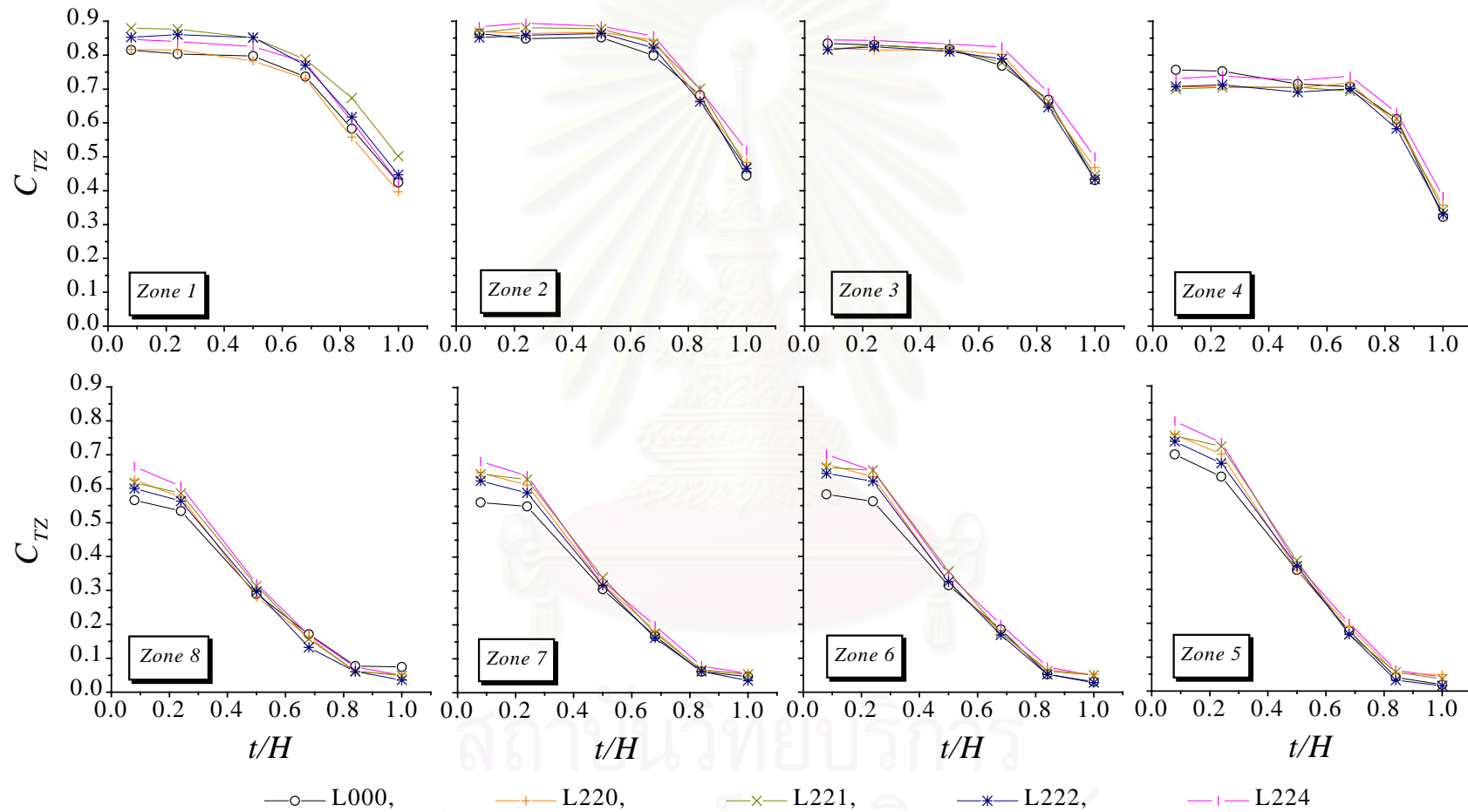


รูปที่ 5.26 กราฟแสดงผลกระทบของความยาวคาบของ Lobed nozzle ต่อลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TT}$  ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างกัน

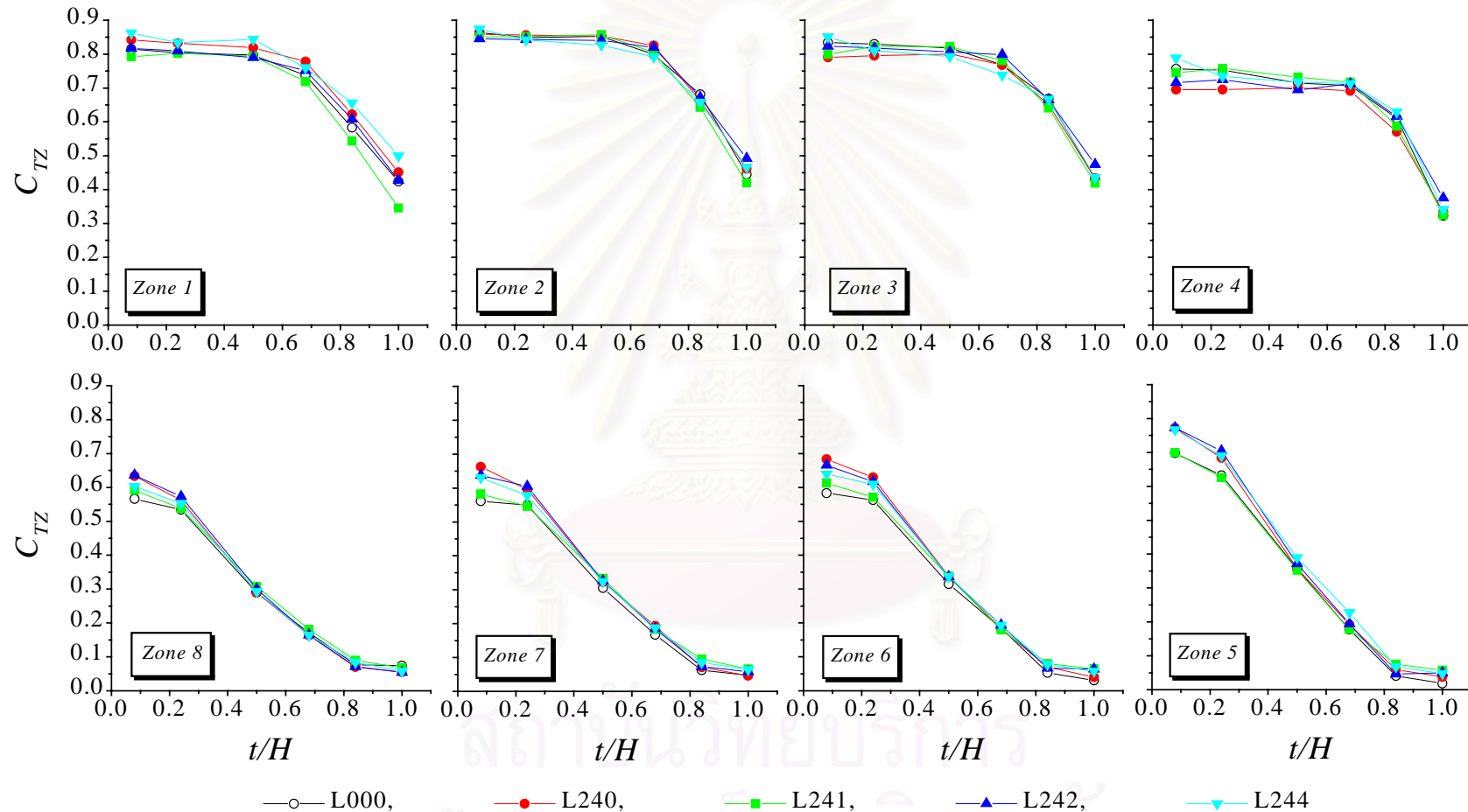


—○— L000, —□— L220, —×— L221, —\*— L222, —△— L224, —●— L240, —■— L241, —▲— L242, —▽— L244

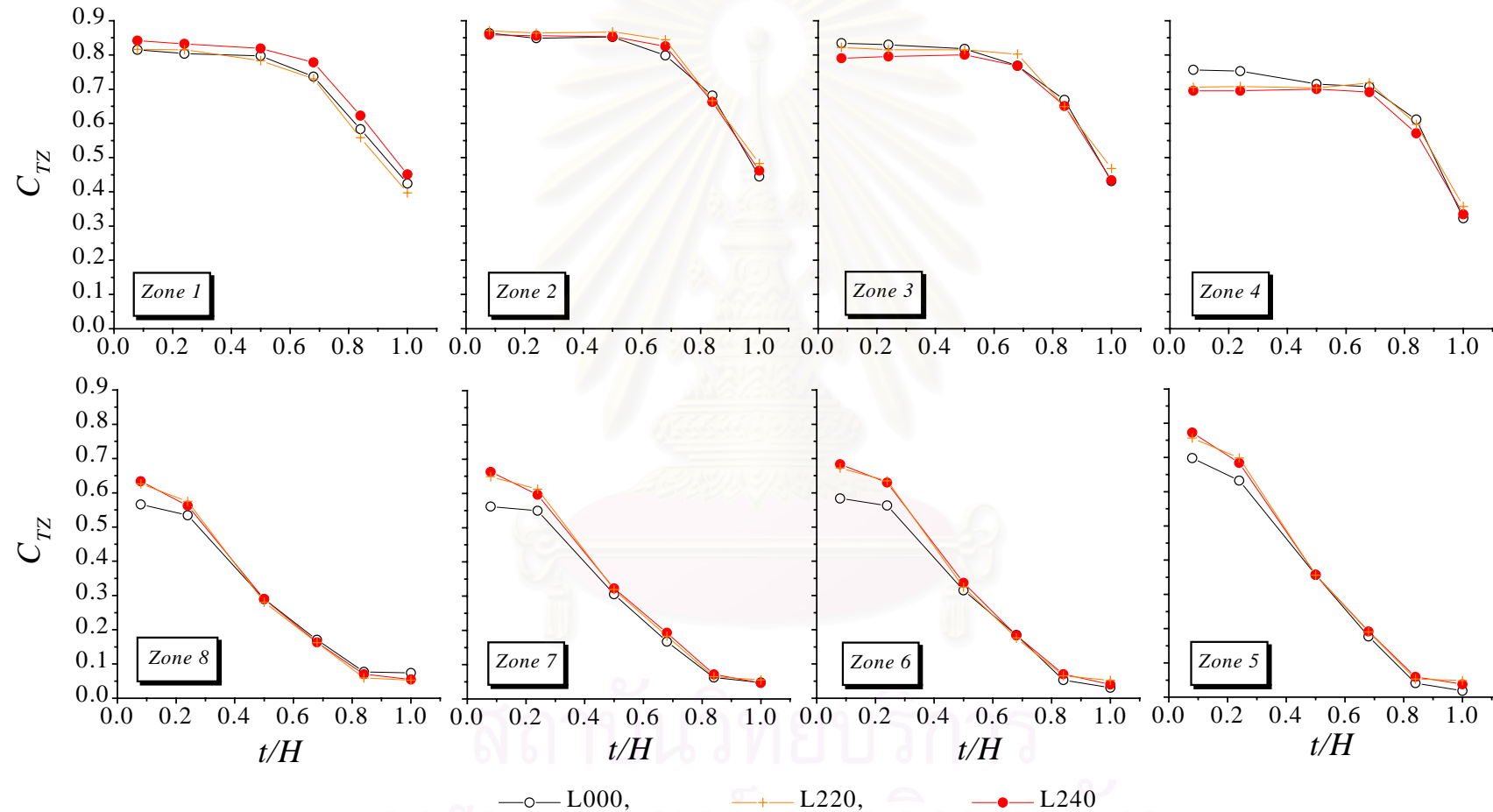
รูปที่ 5.27 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า  $C_{TZ}$  ตามบริเวณต่างๆภายในห้องของการใช้ Lobed nozzle แบบต่างๆที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน



รูปที่ 5.28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า  $C_{TZ}$  ตามบริเวณต่างๆภายในห้องของการใช้ Lobed nozzle ชุด L22X ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน

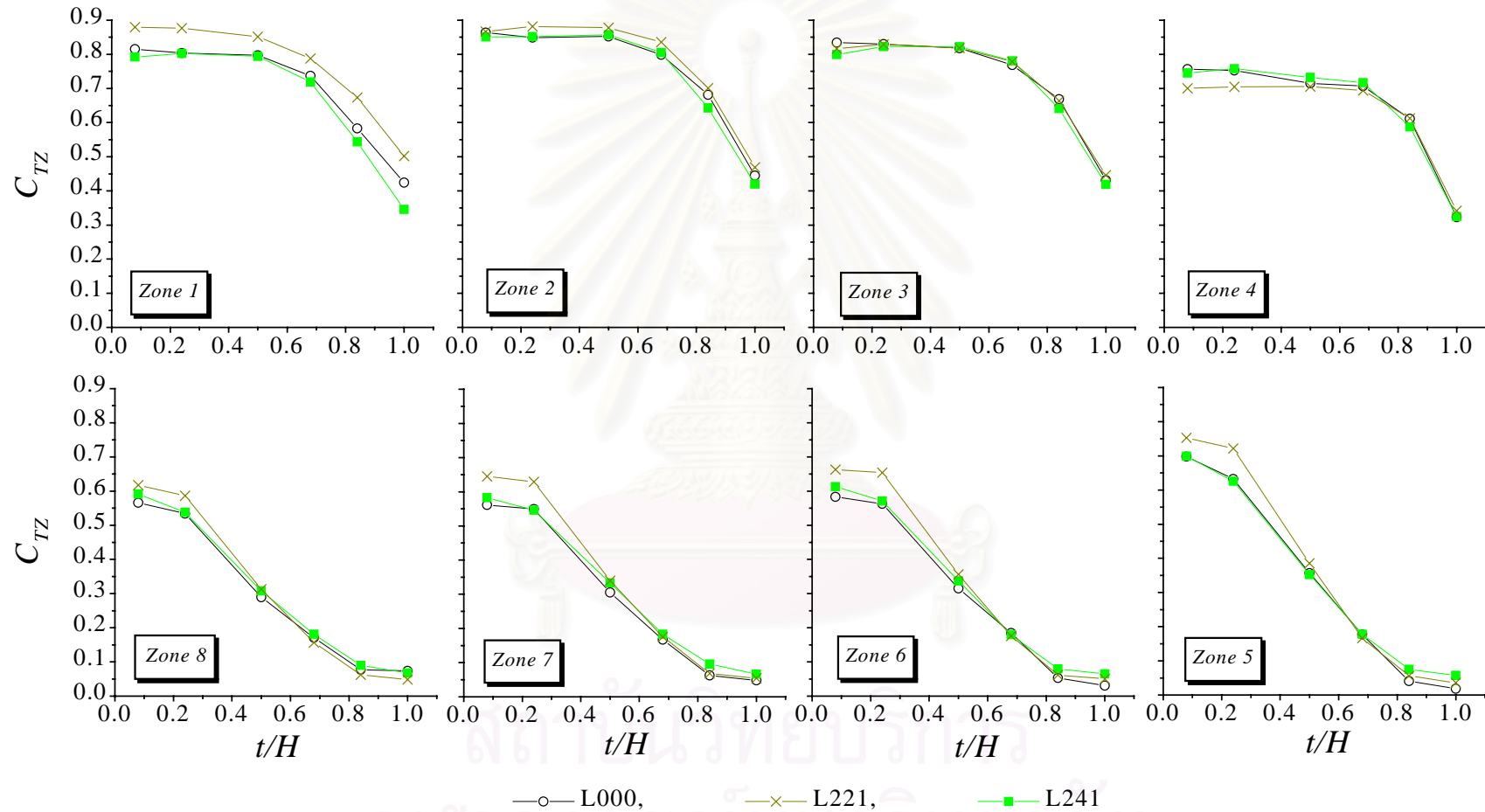


รูปที่ 5.29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า  $C_{TZ}$  ตามบริเวณต่างๆภายในห้องของการใช้ Lobed nozzle ชุด L24X ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน

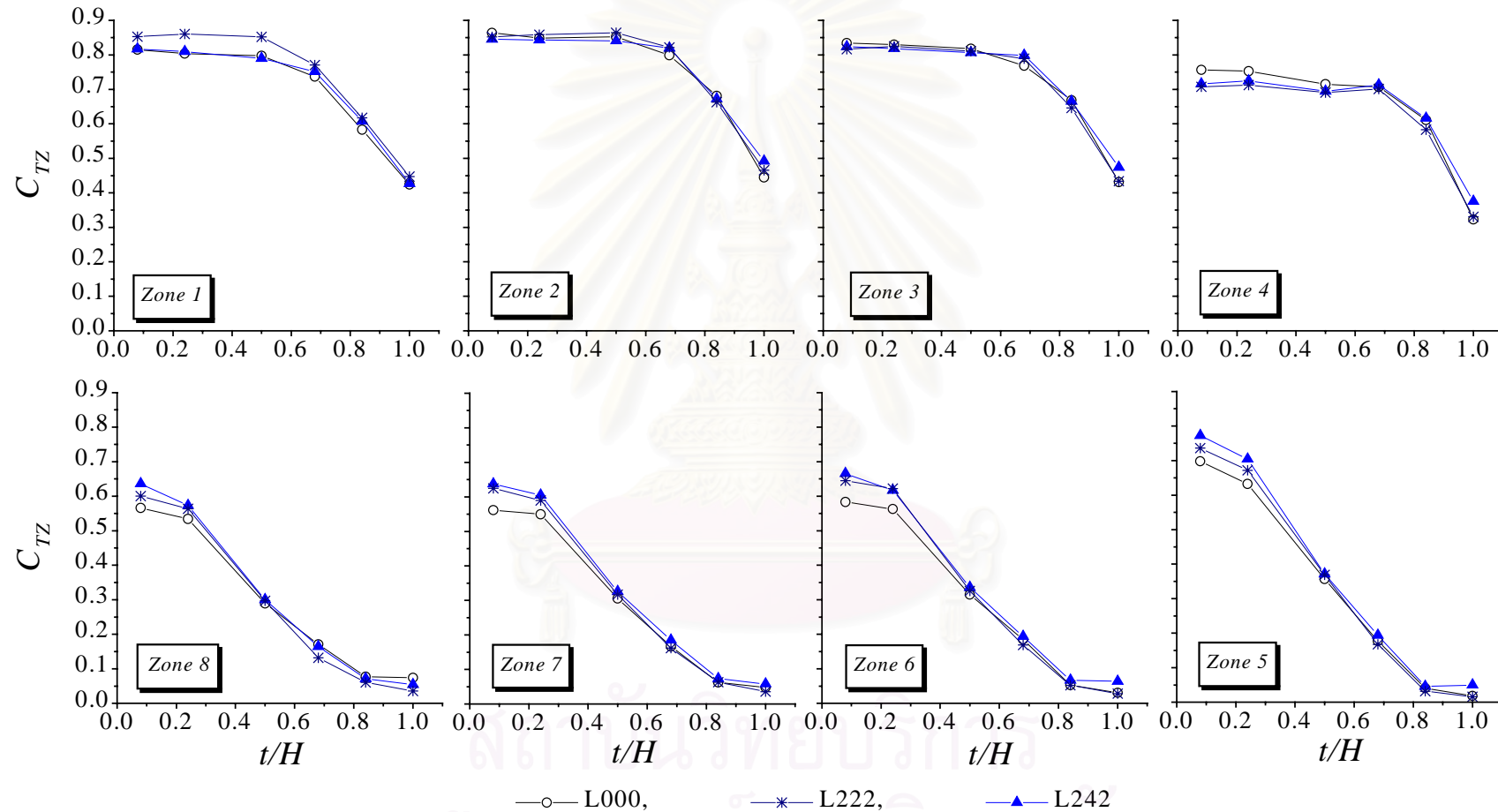


รูปที่ 5.30 กราฟแสดงผลของความยาวคาบของ Lobed nozzle ที่  $G = 0$  ที่มีต่อลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TZ}$  ตามบริเวณต่างๆภายในห้องที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน

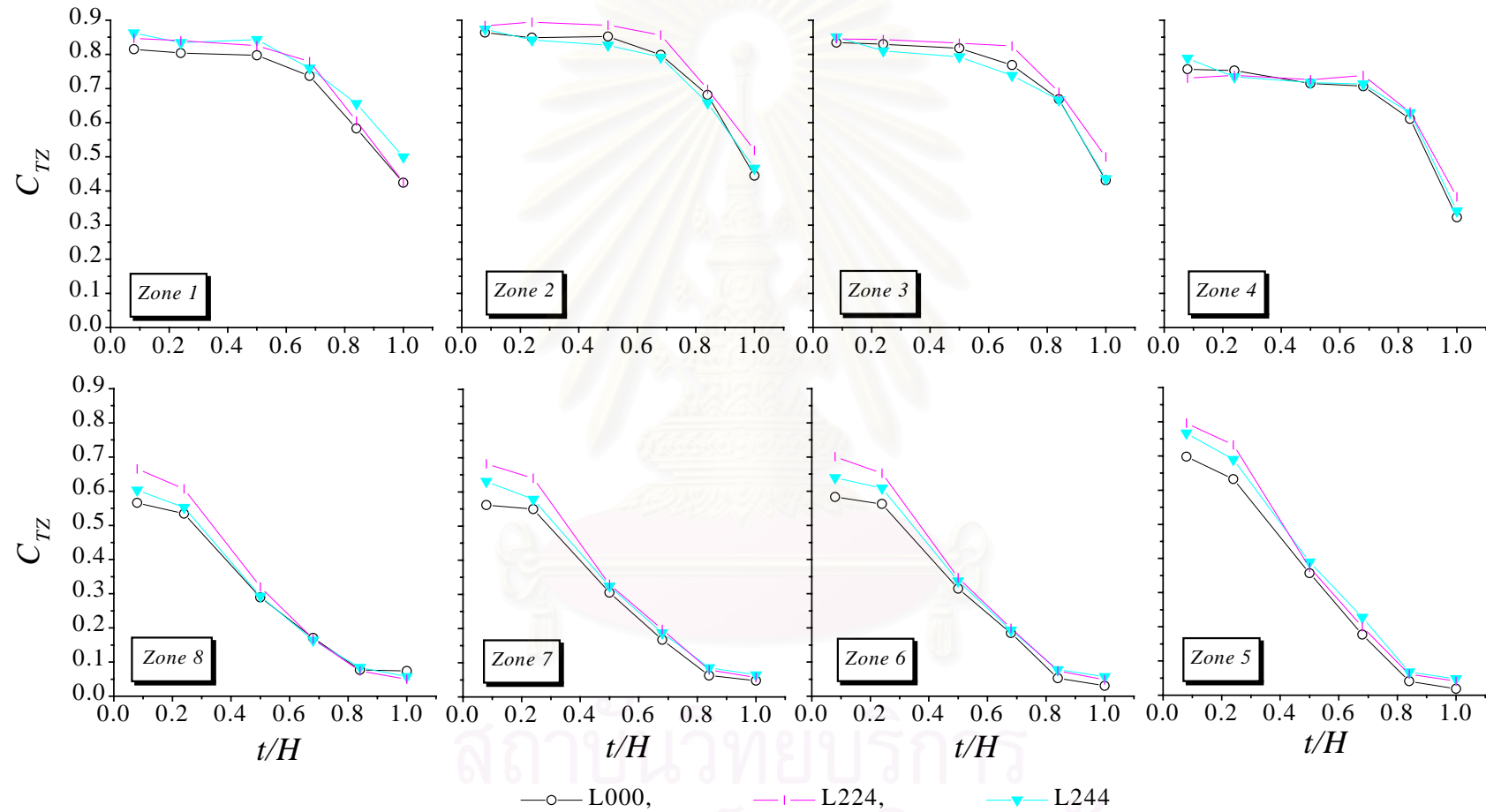




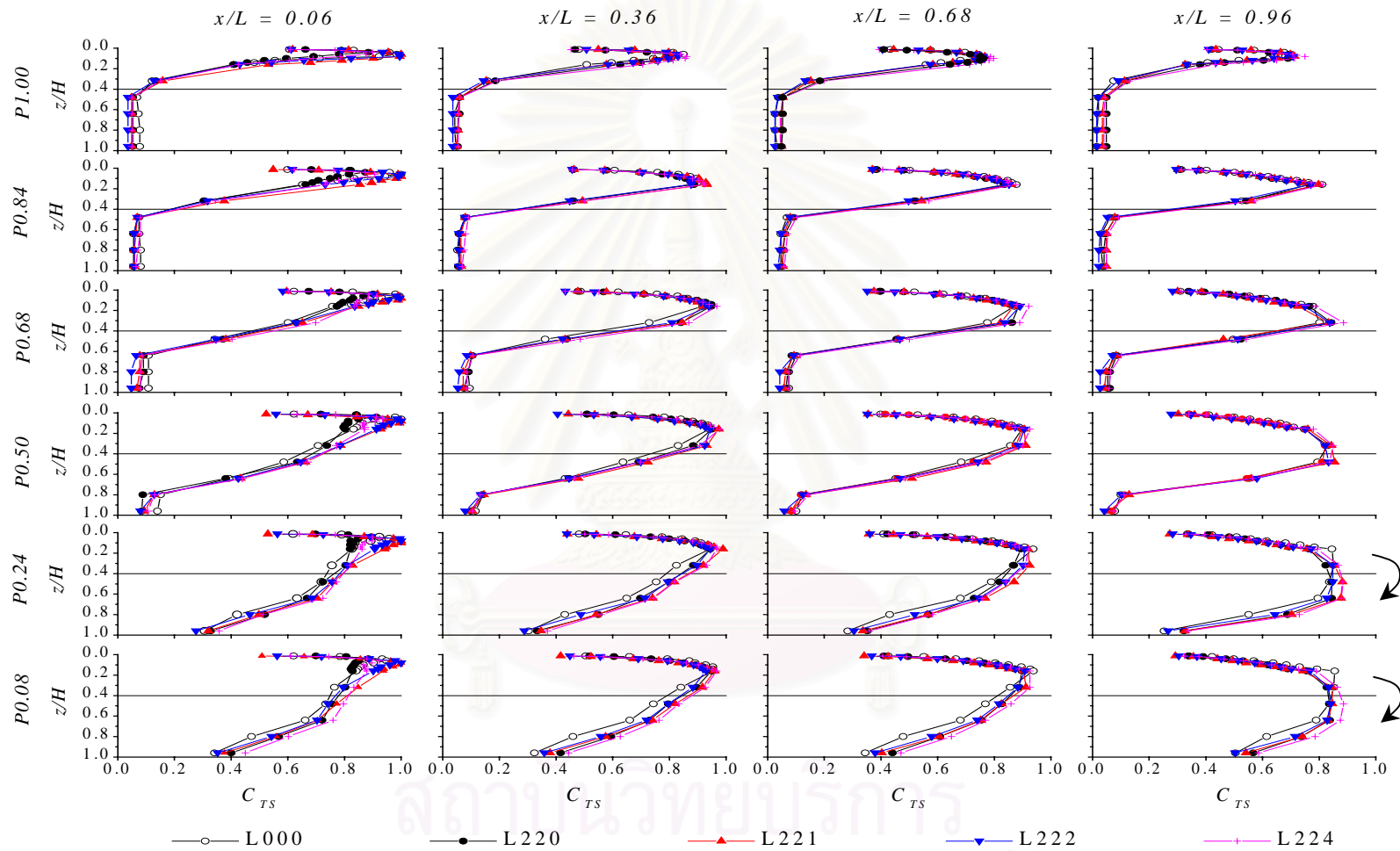
รูปที่ 5.31 กราฟแสดงผลของความยาวคาบของ Lobed nozzle ที่  $G = 1h$  ที่มีต่อลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TZ}$  ตามบริเวณต่างๆภายในห้องที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน



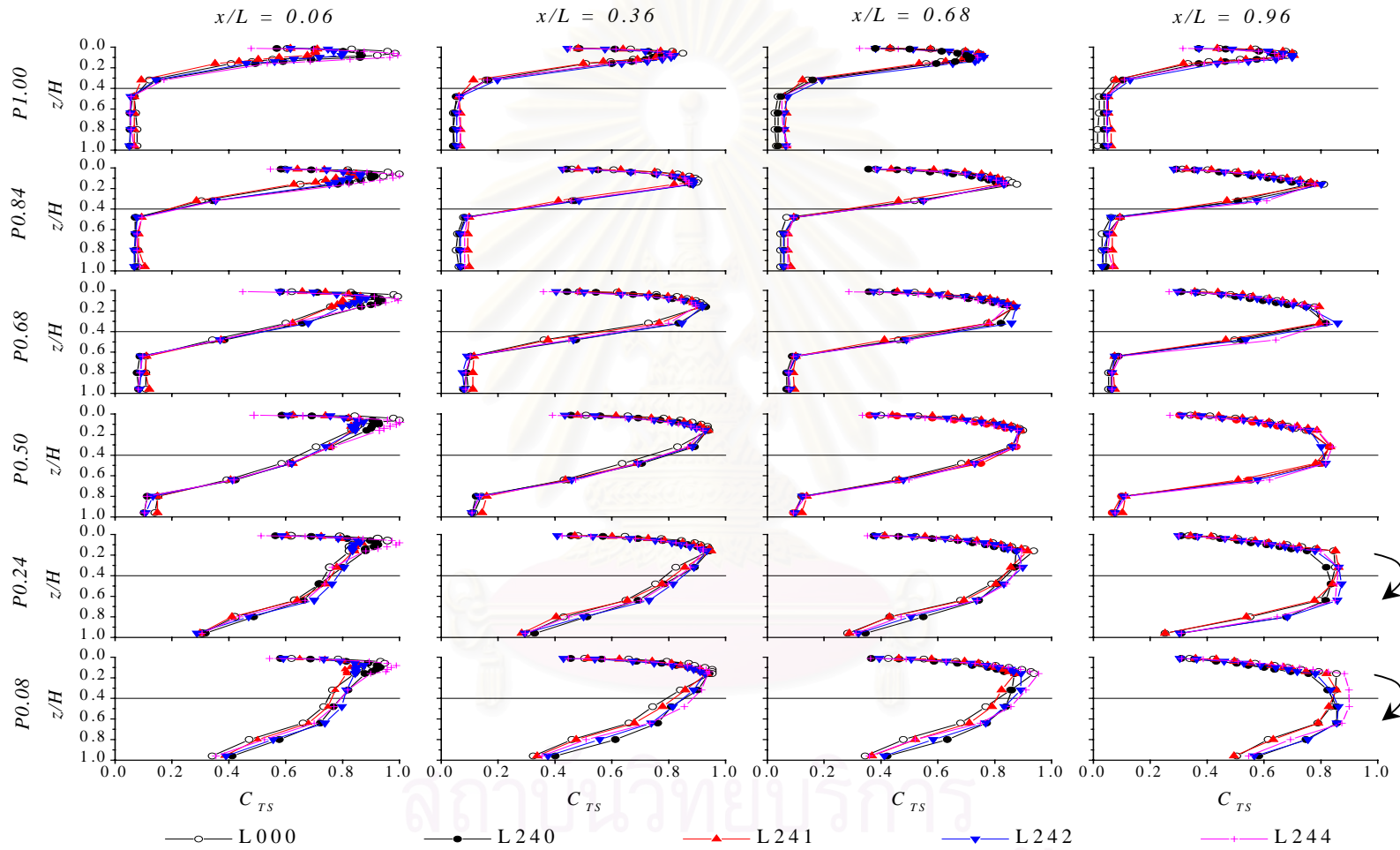
รูปที่ 5.32 กราฟแสดงผลของความยาวคาบของ Lobed nozzle ที่  $G = 2h$  ที่มีต่อลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TZ}$  ตามบริเวณต่างๆภายในห้องที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน



รูปที่ 5.33 กราฟแสดงผลของความยาวคาบของ Lobed nozzle ที่  $G = 4h$  ที่มีต่อลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TZ}$  ตามบริเวณต่างๆภายในห้องที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน

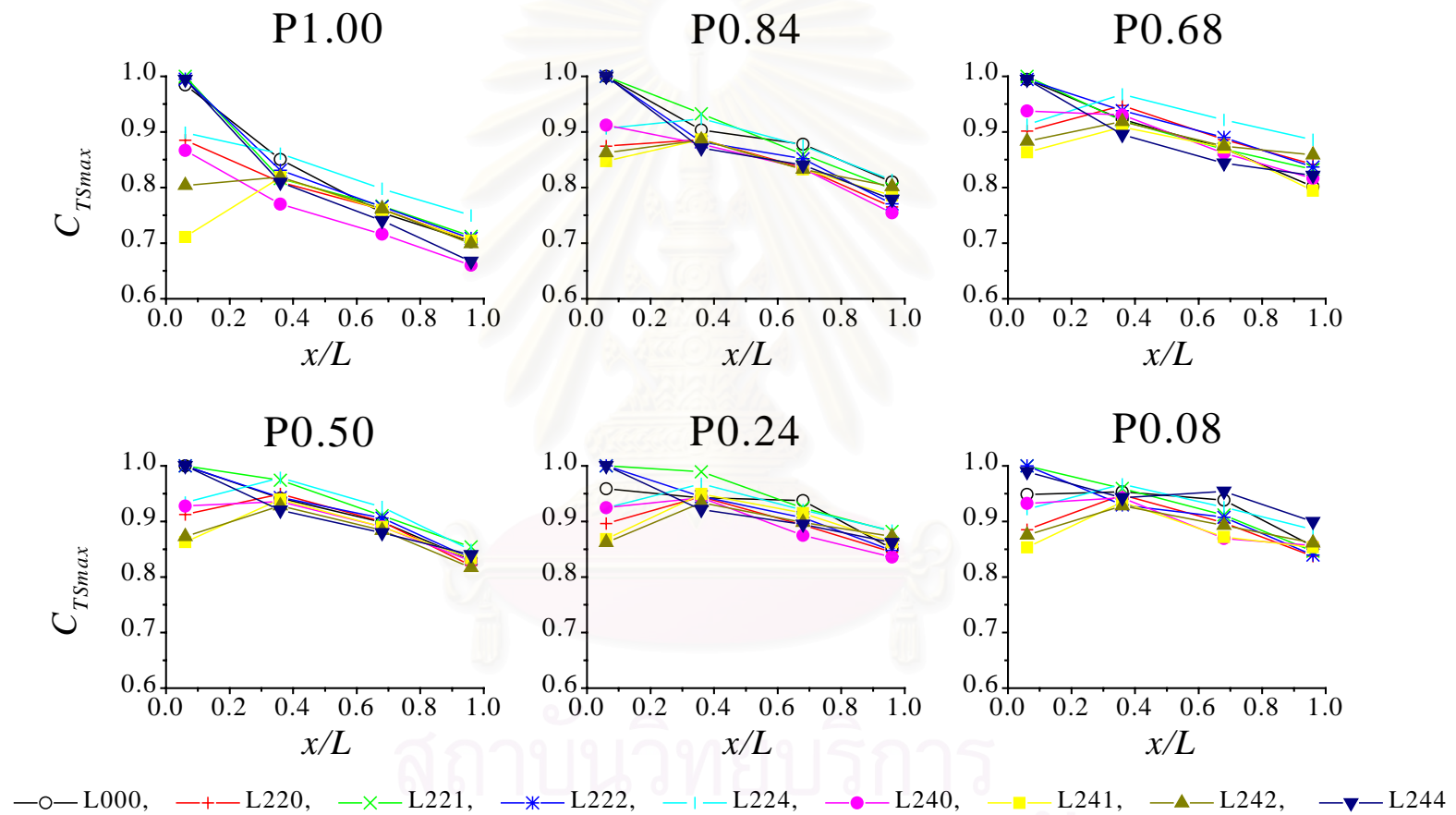


รูปที่ 5.34 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ตามบริเวณต่างๆภายในห้องของการใช้ LN ชุด L22X เทียบกับกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน

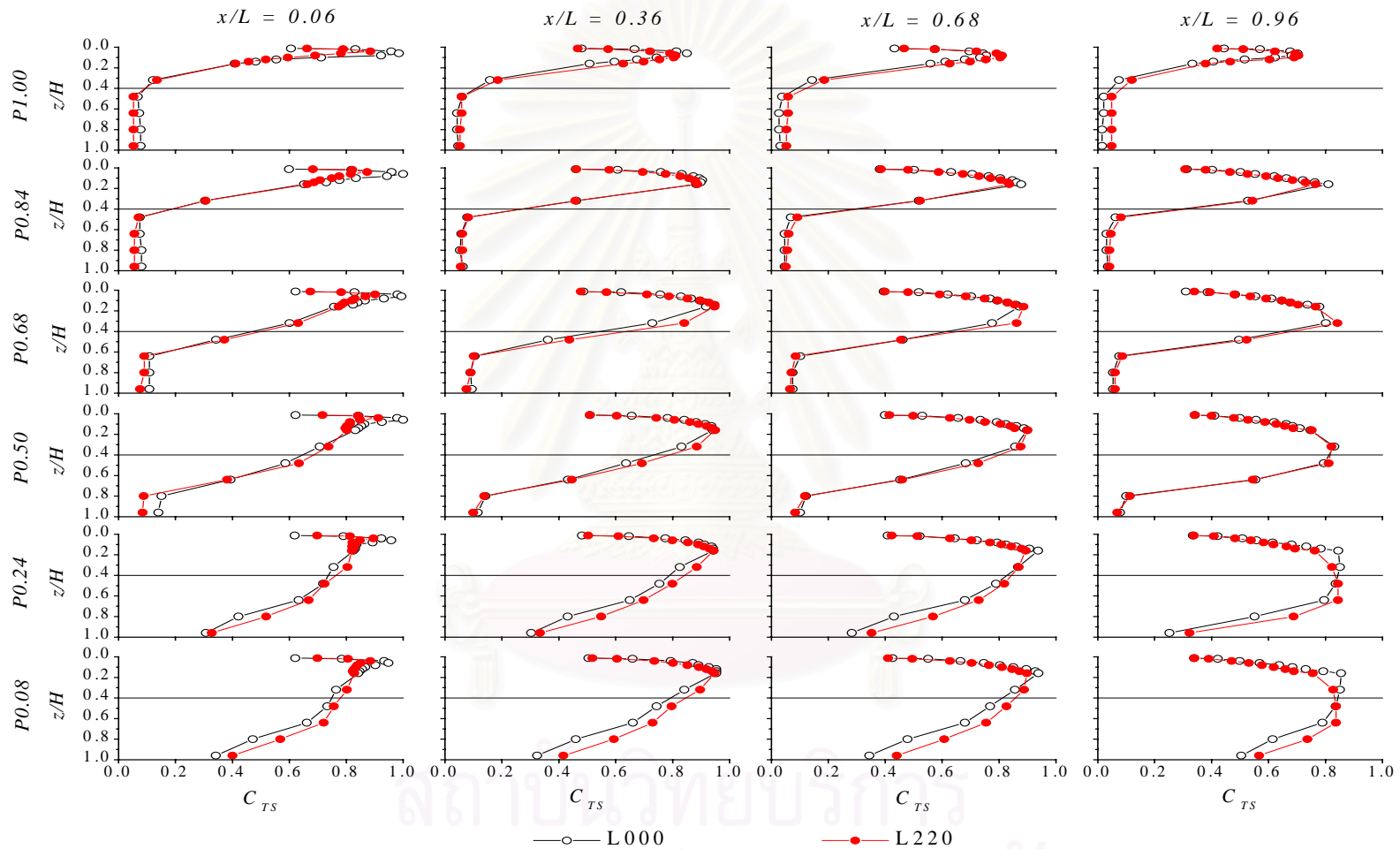


รูปที่ 5.35 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ตามบริเวณต่างๆภายในห้องของการใช้ LN ชุด L24X เทียบกับกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน

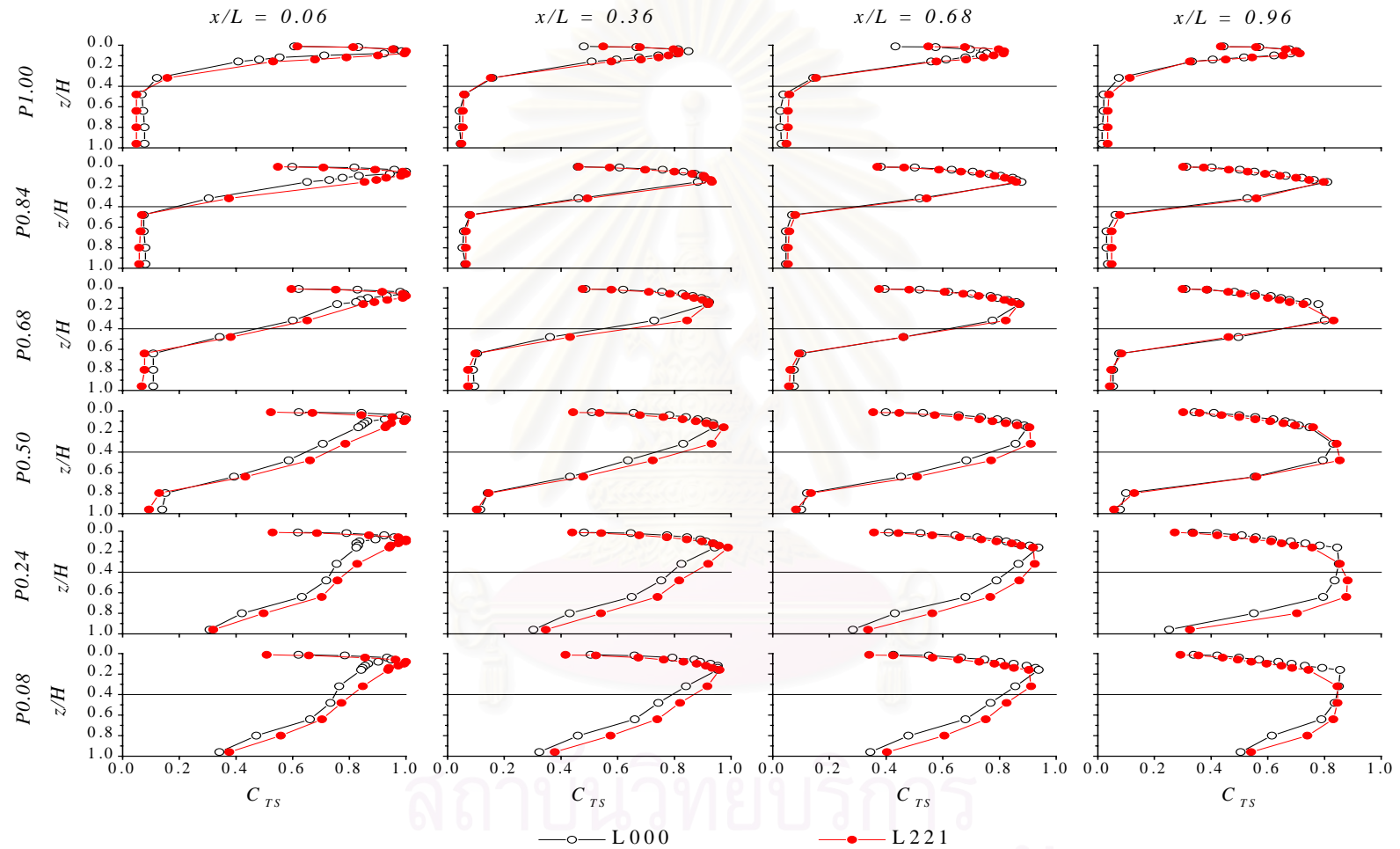




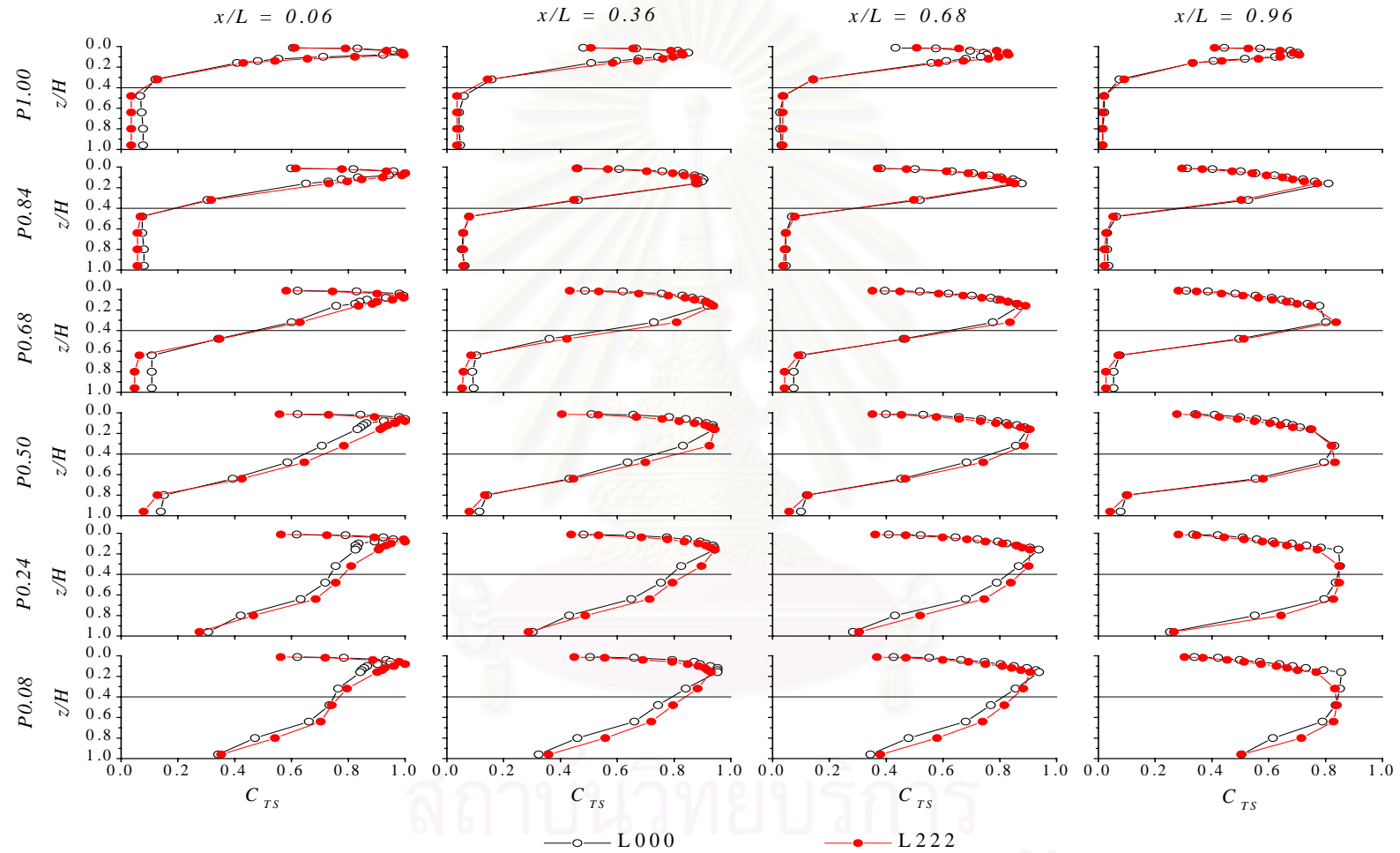
รูปที่ 5.36 กราฟแสดงผลของ Lobed nozzle ต่อค่า  $C_{TSmax}$  ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน



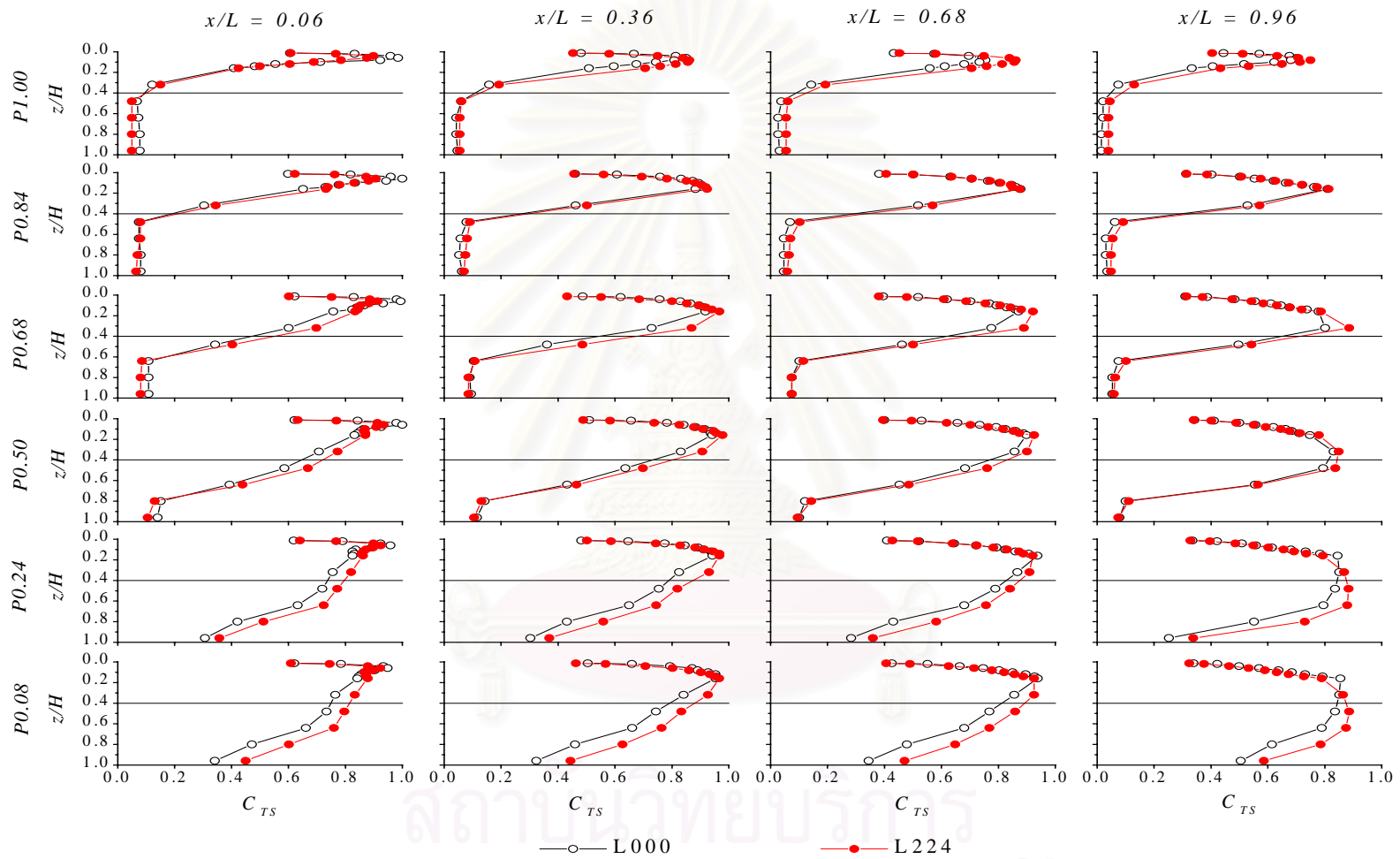
รูปที่ 5.37 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ตามบริเวณต่างๆภายในห้องของกรณี L220 เทียบกับกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน



รูปที่ 5.38 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ตามบริเวณต่างๆภายในห้องของกรณี L221 เทียบกับกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดทำห้องต่างๆกัน

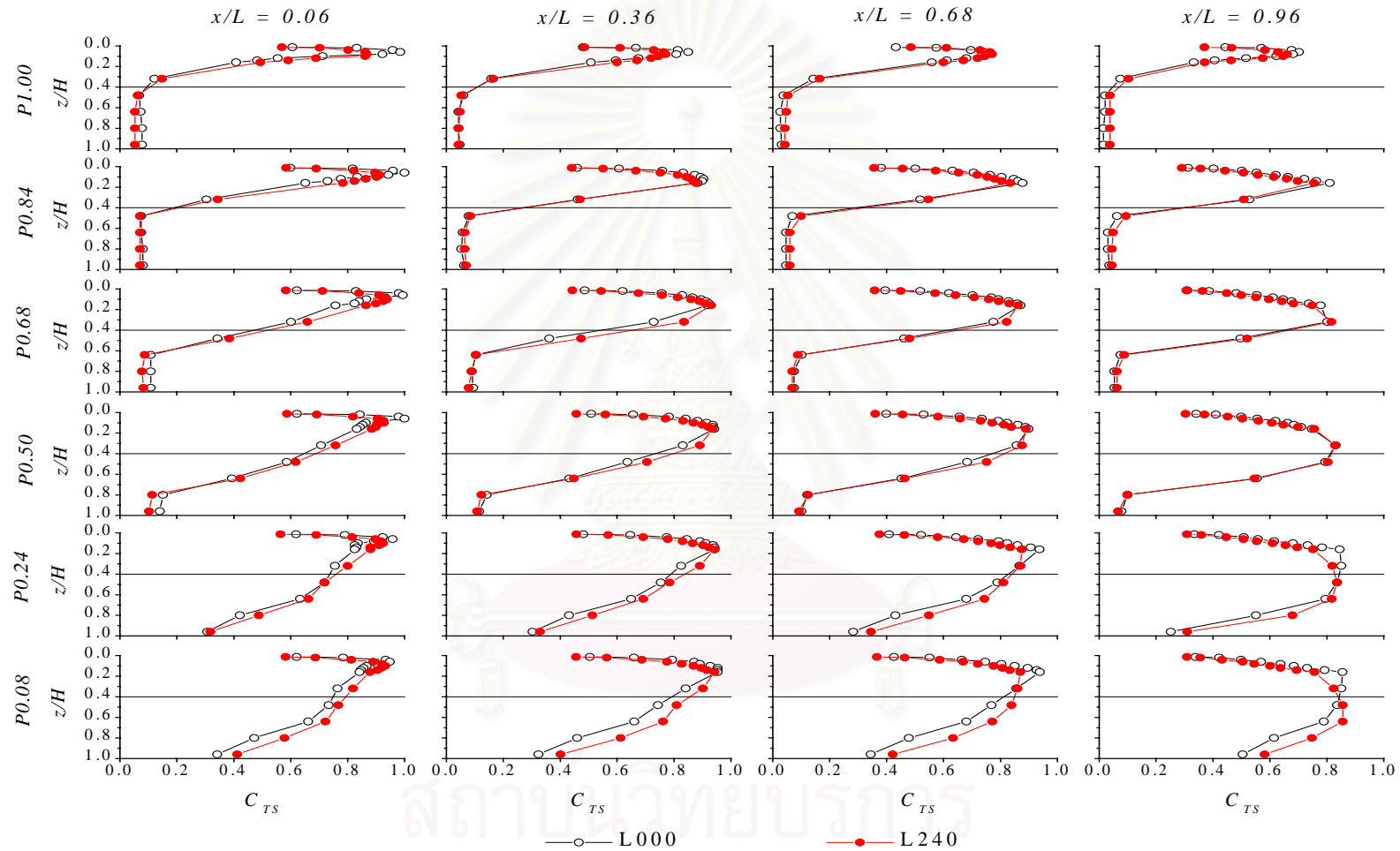


รูปที่ 5.39 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ตามบริเวณต่างๆภายในห้องของกรณี L222 เทียบกับกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน

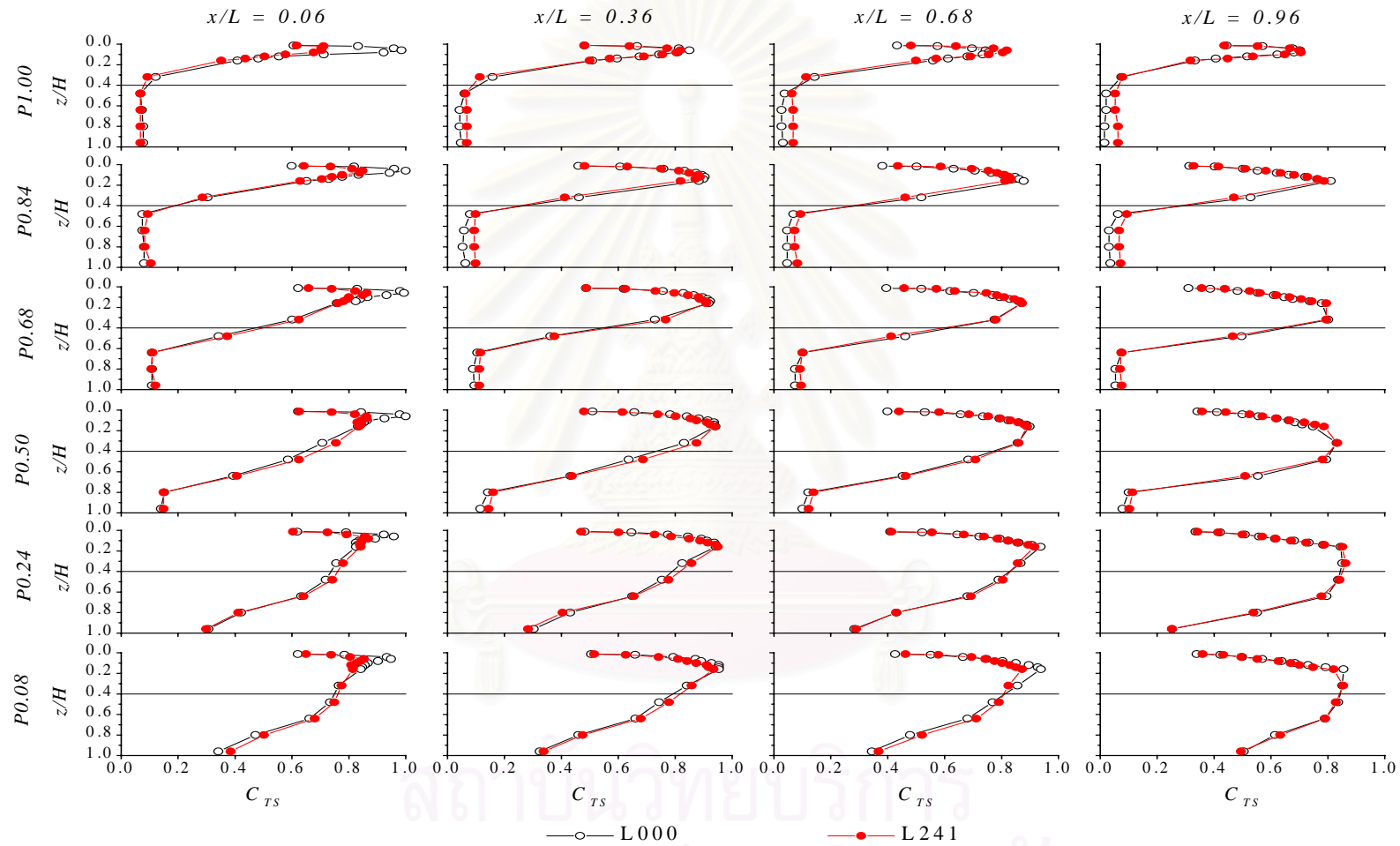


รูปที่ 5.40 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ตามบริเวณต่างๆภายในห้องของกรณี L224 เทียบกับกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดทำห้องต่างๆกัน

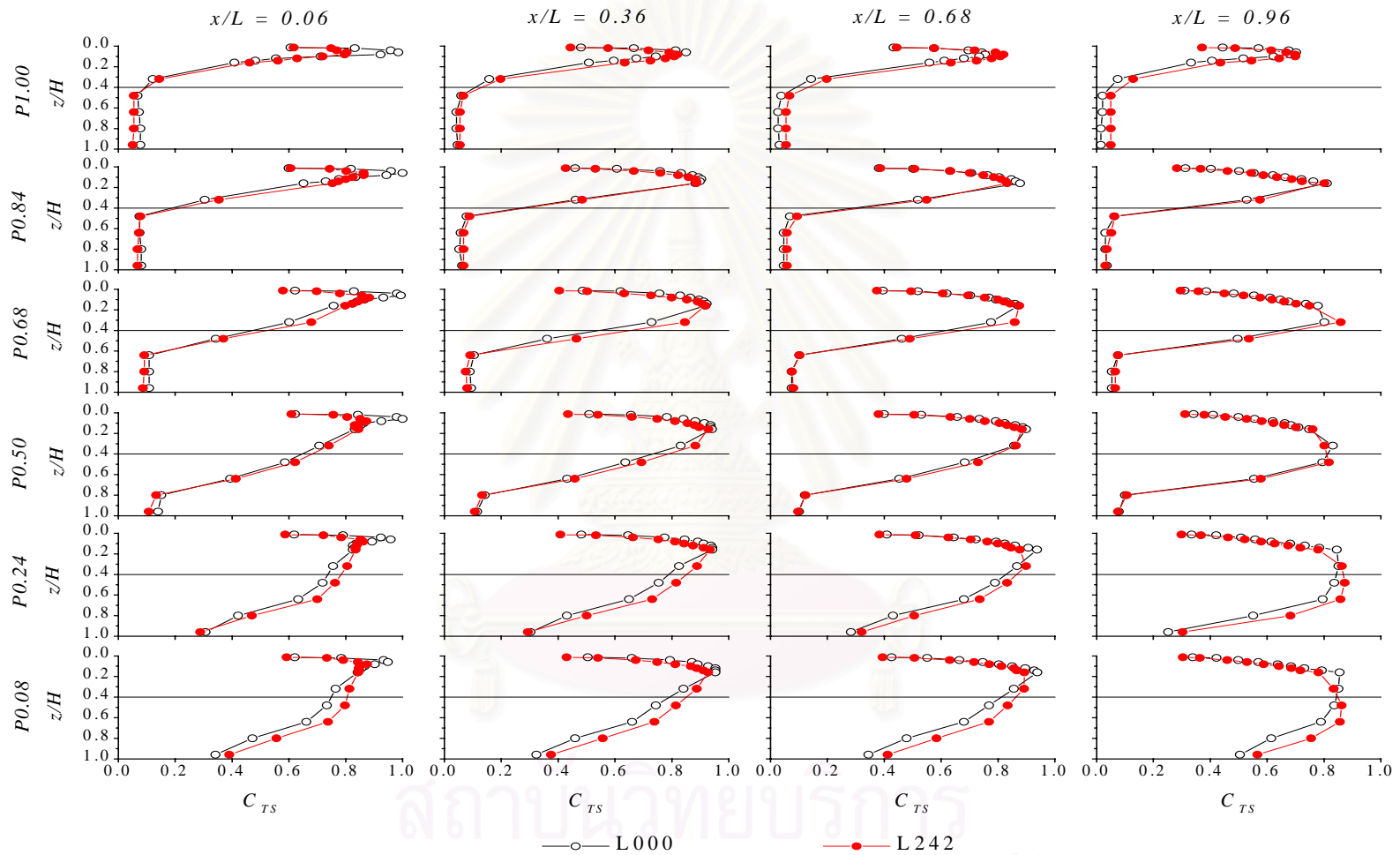




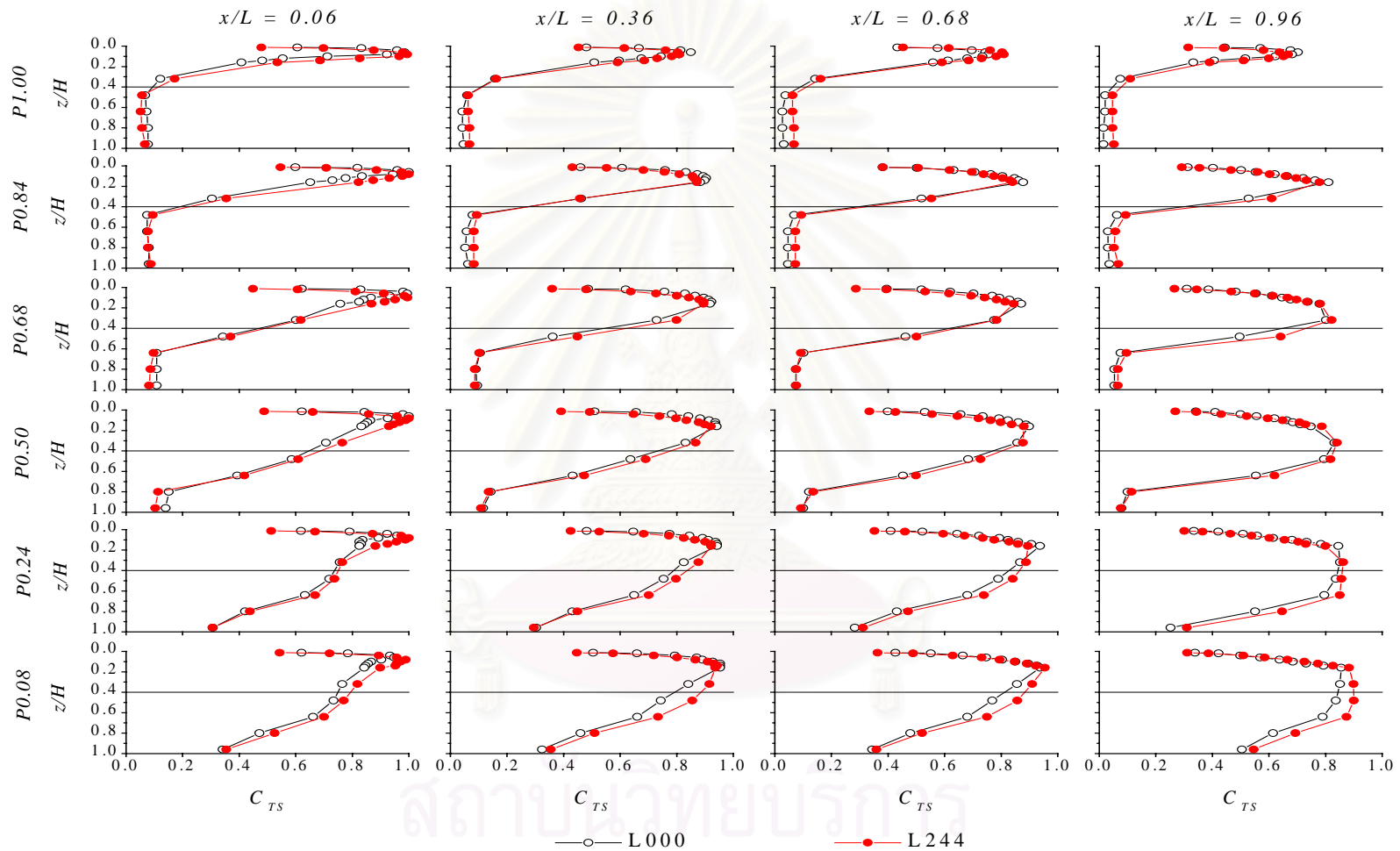
รูปที่ 5.41 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ตามบริเวณต่างๆภายในห้องของกรณี L240 เทียบกับกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน



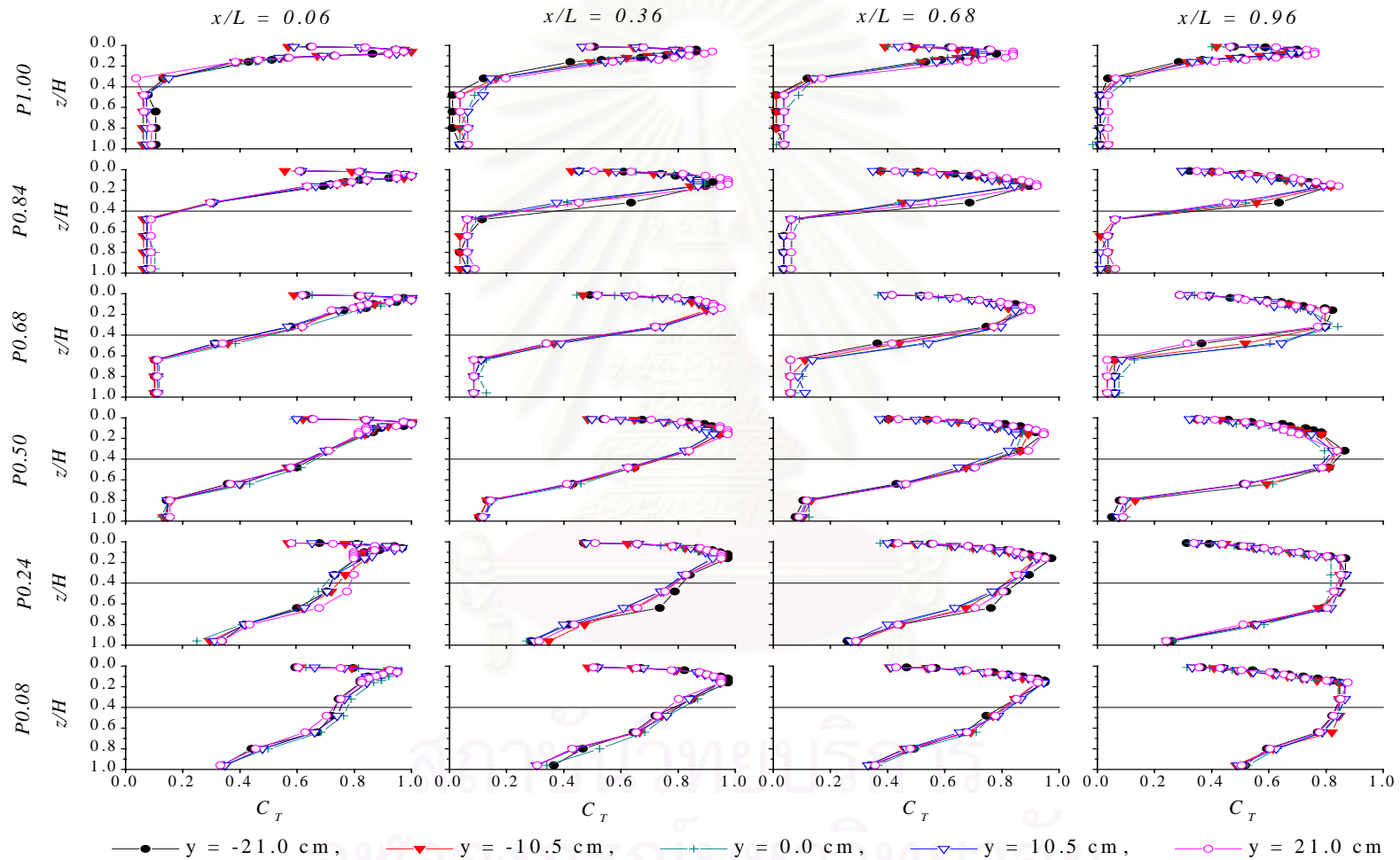
รูปที่ 5.42 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ตามบริเวณต่างๆภายในห้องของกรณี L241 เทียบกับกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน



รูปที่ 5.43 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ตามบริเวณต่างๆภายในห้องของกรณี L242 เทียบกับกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน

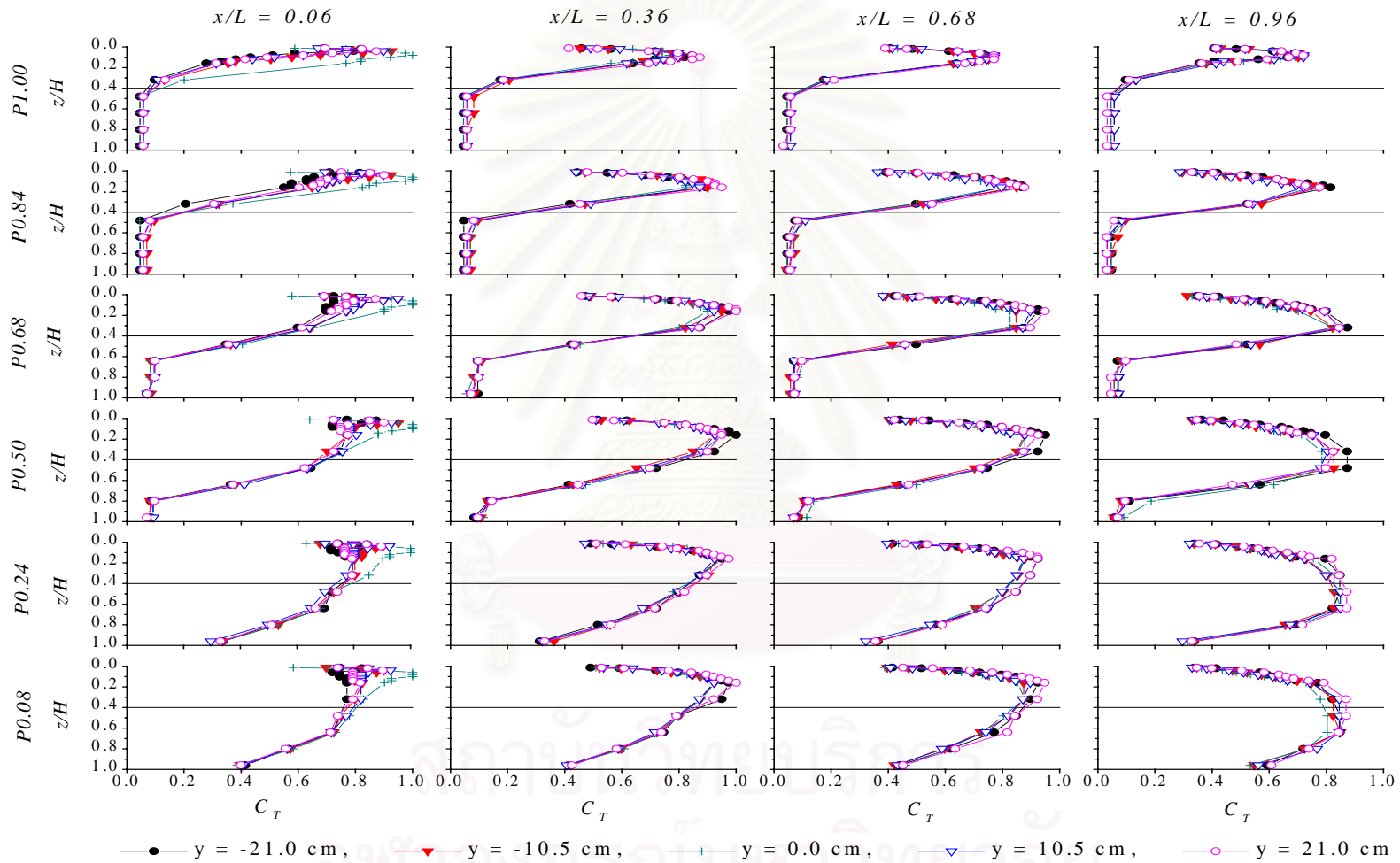


รูปที่ 5.44 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_{TS}$  ตามบริเวณต่างๆภายในห้องของกรณี L244 เทียบกับกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน

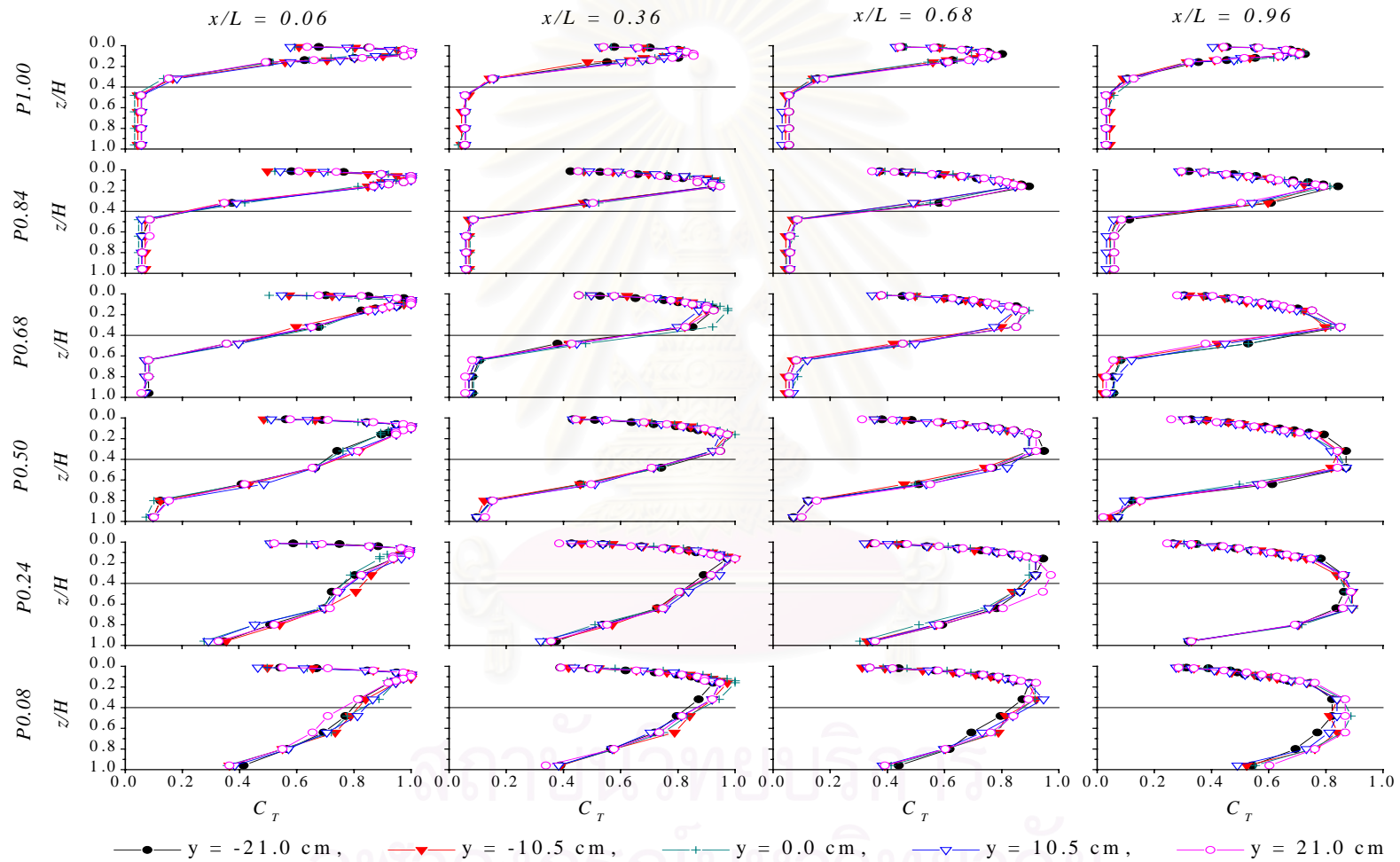


รูปที่ 5.45 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน

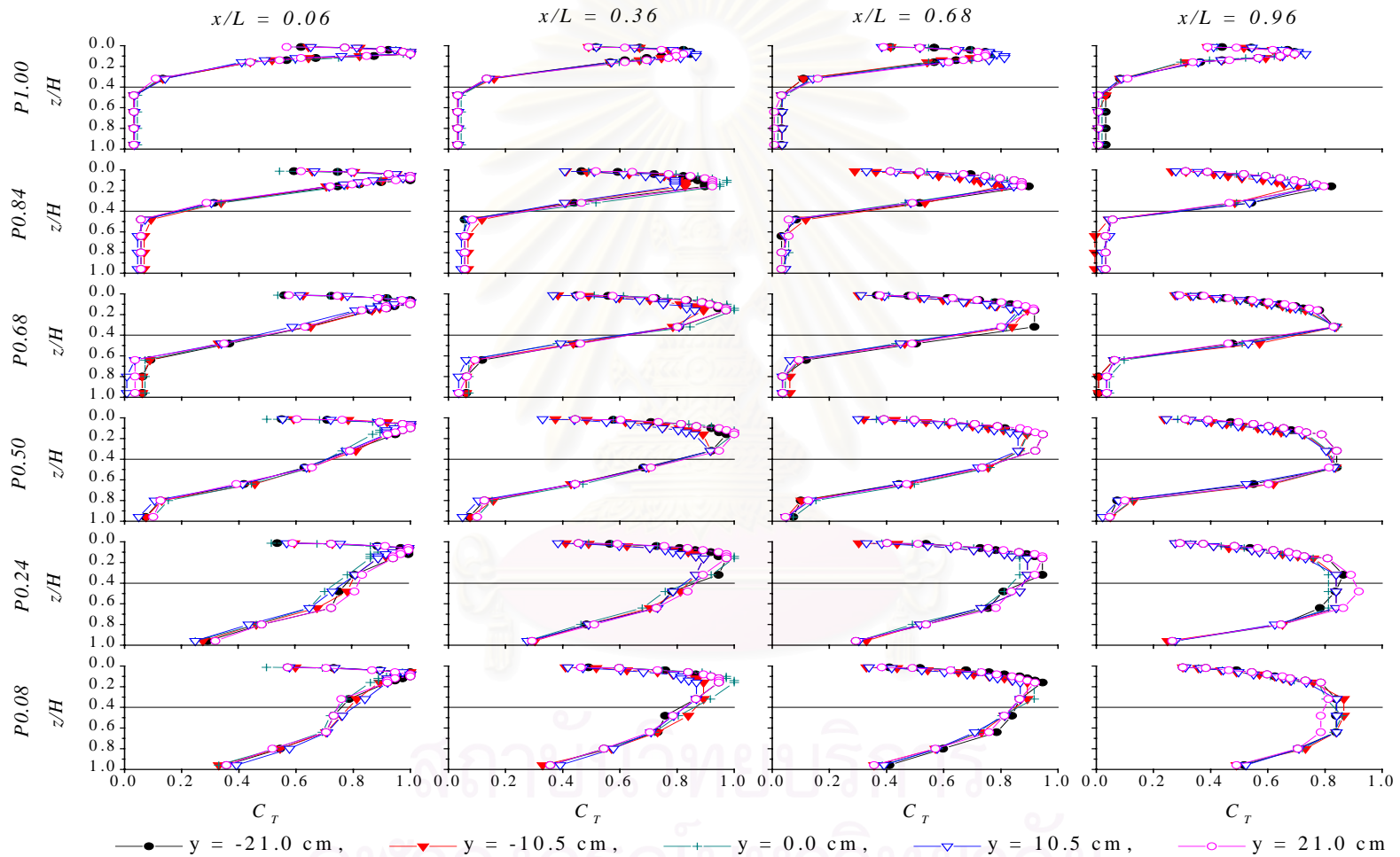




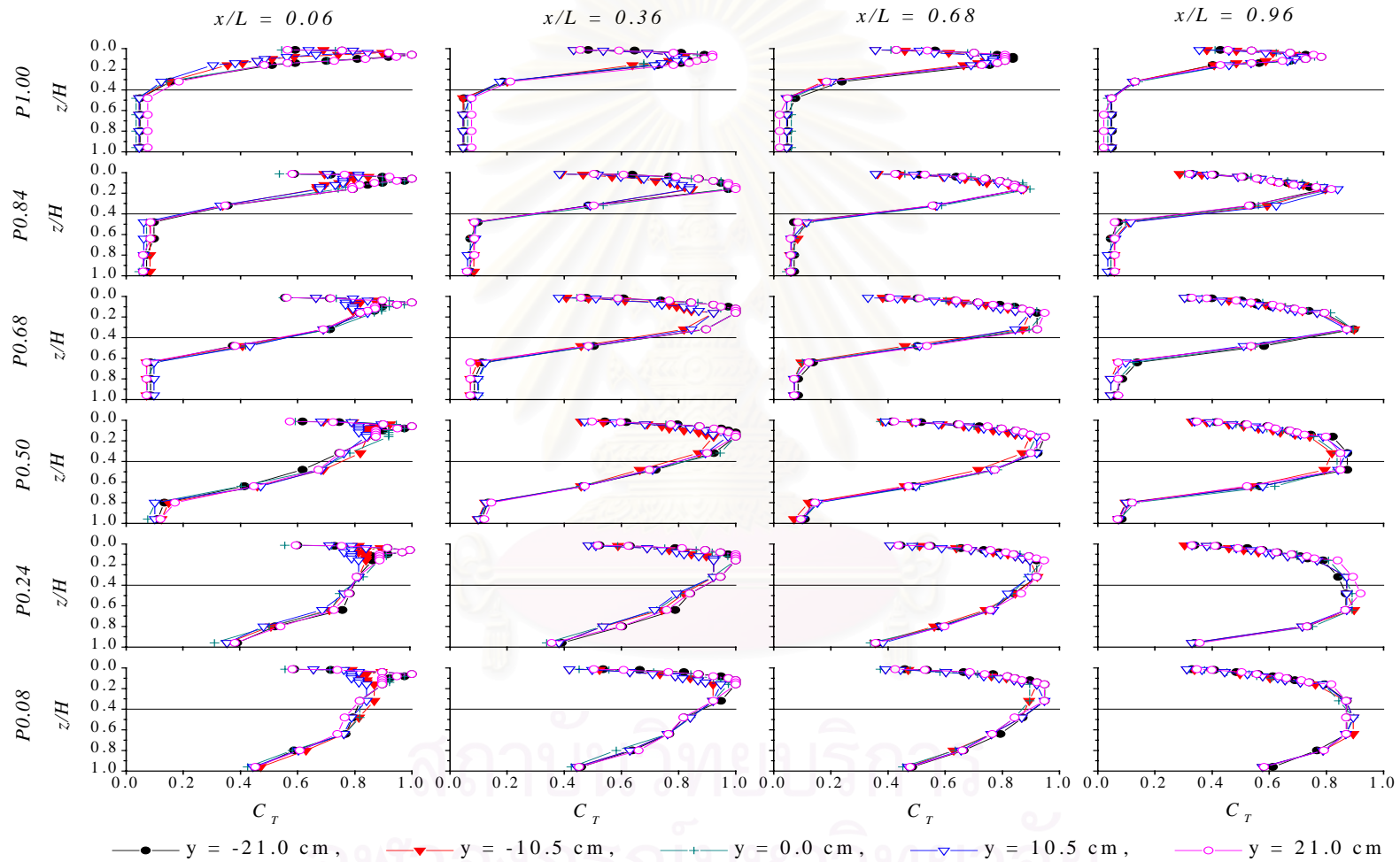
รูปที่ 5.46 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L220 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน



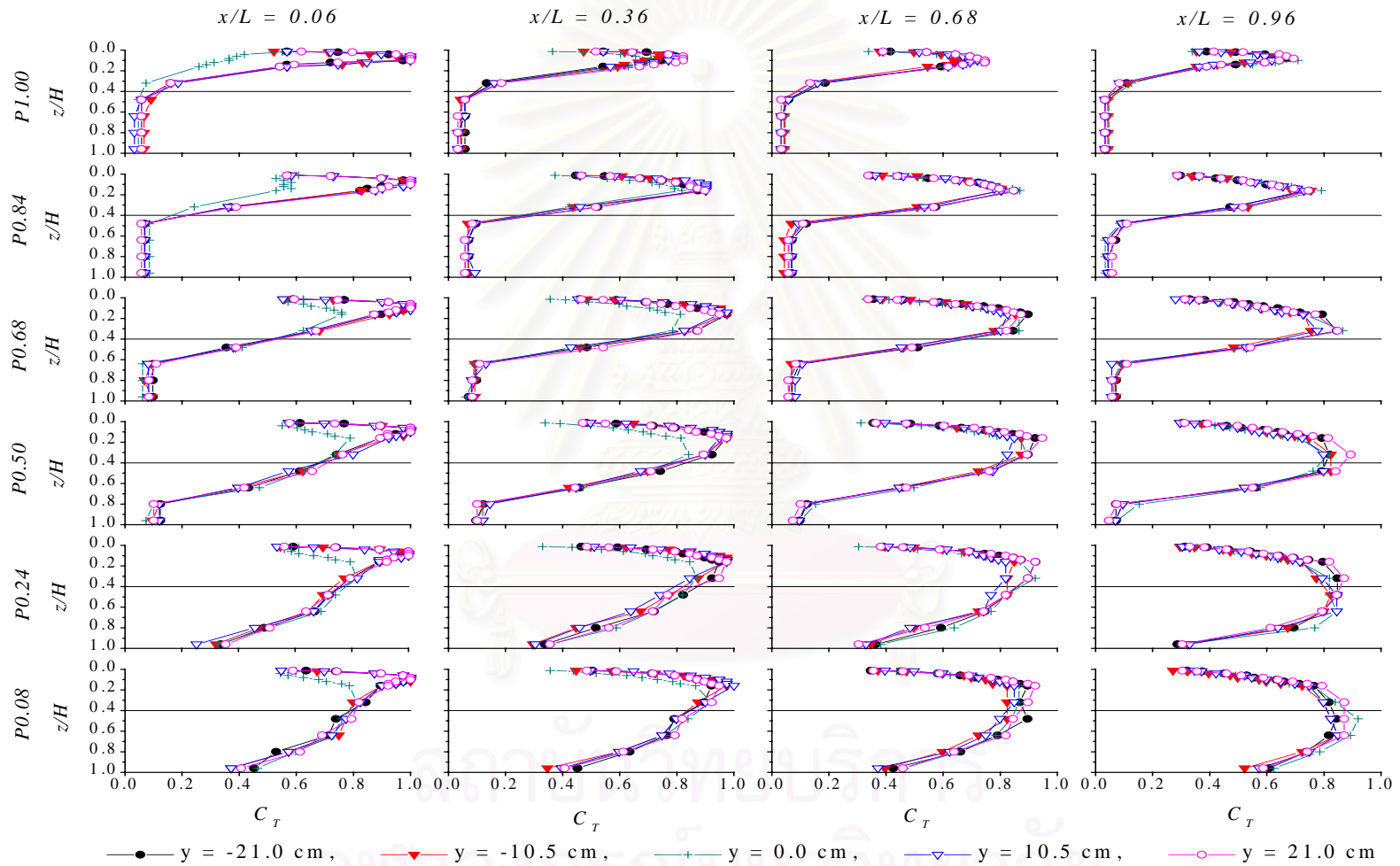
รูปที่ 5.47 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L221 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน



รูปที่ 5.48 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L222 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน

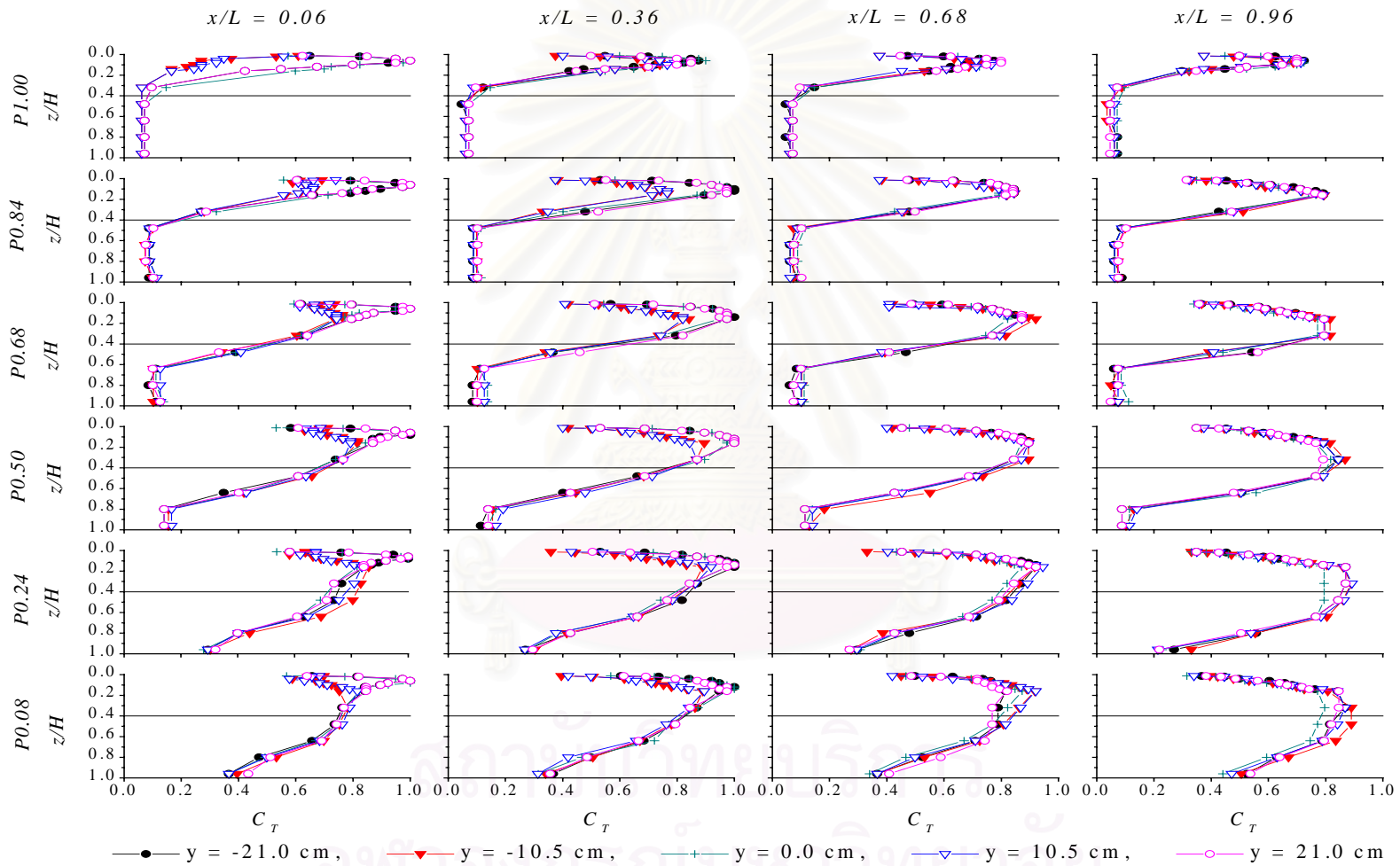


รูปที่ 5.49 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L224 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน

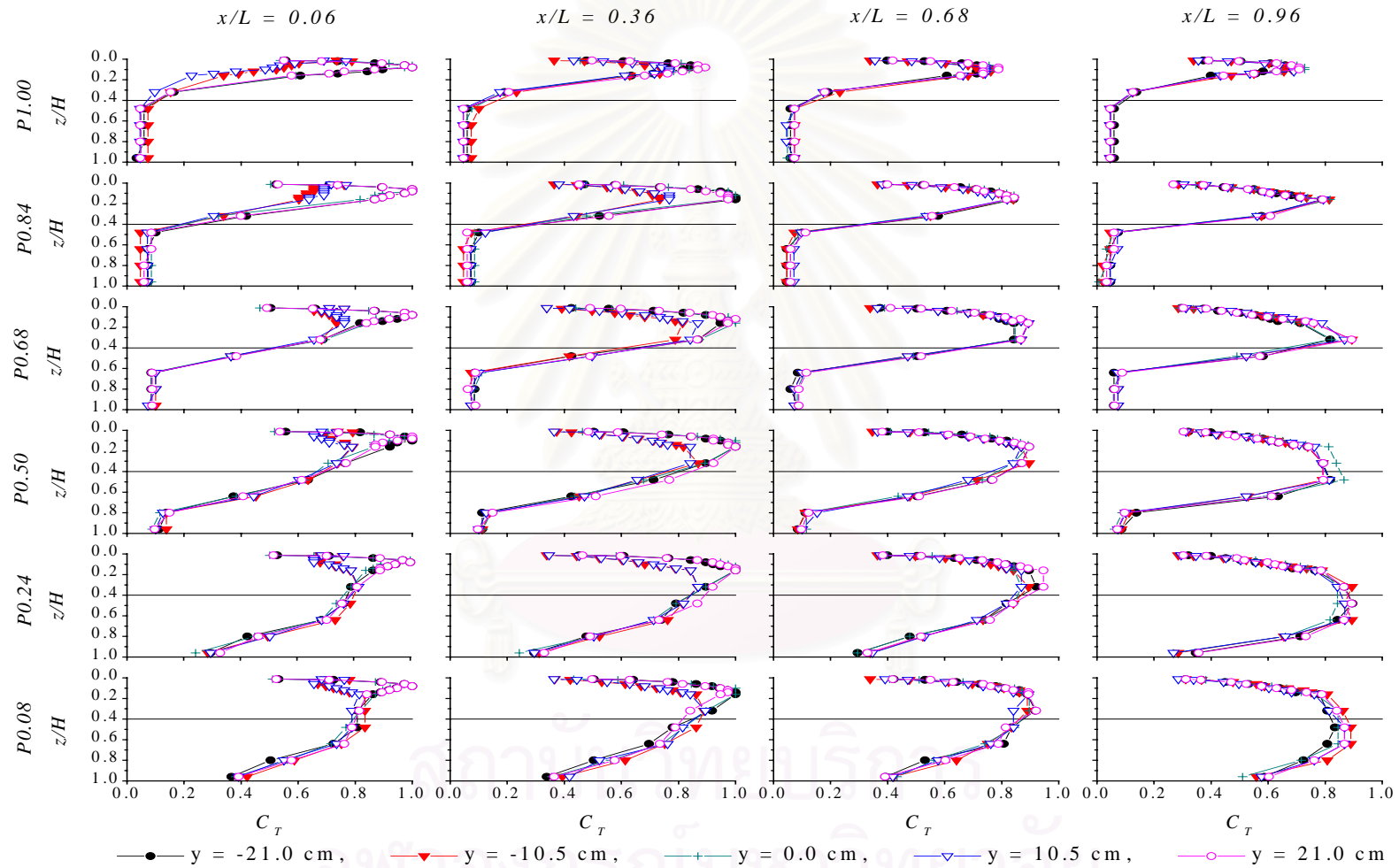


รูปที่ 5.50 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L240 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างกัน

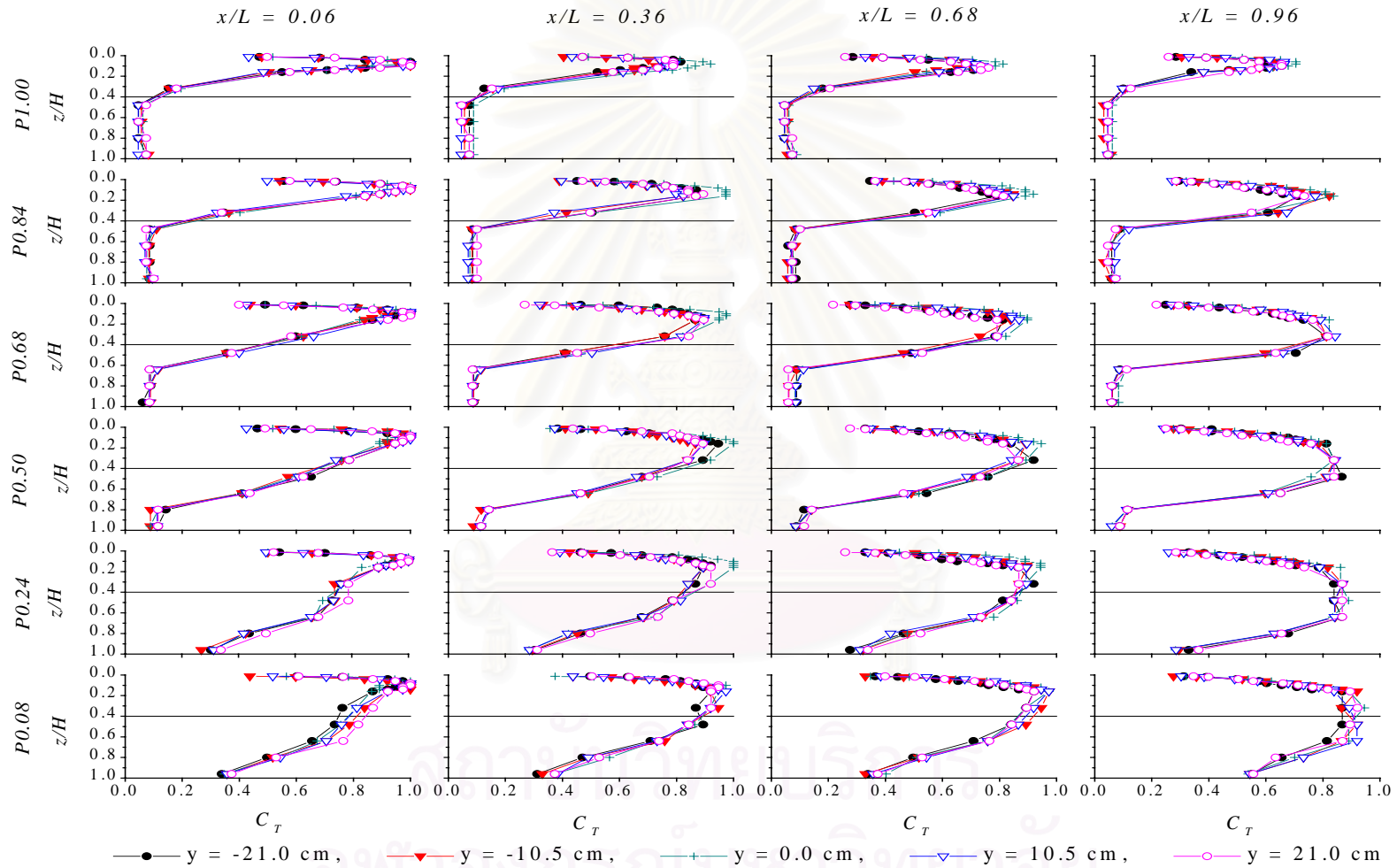




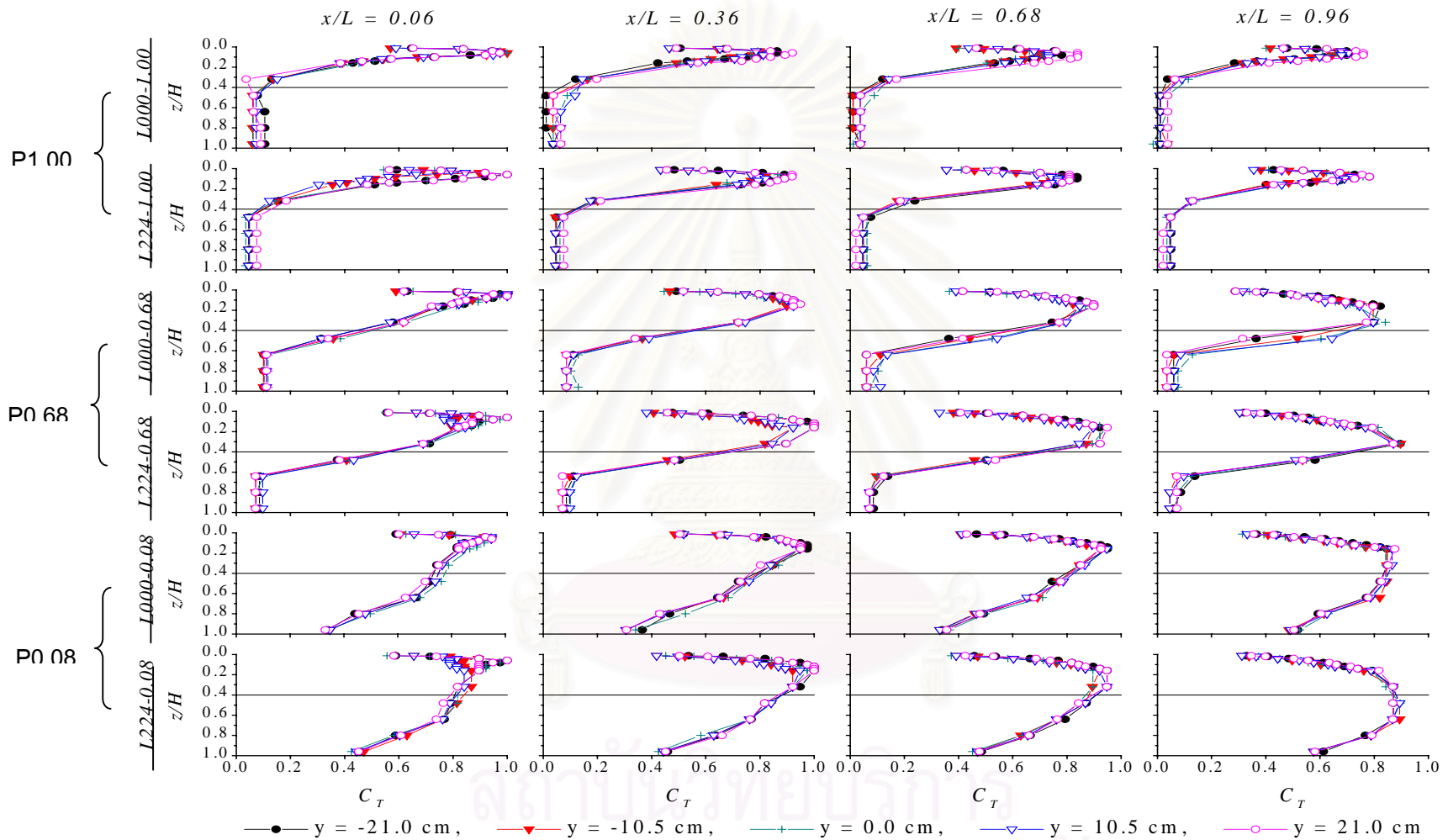
รูปที่ 5.51 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L241 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน



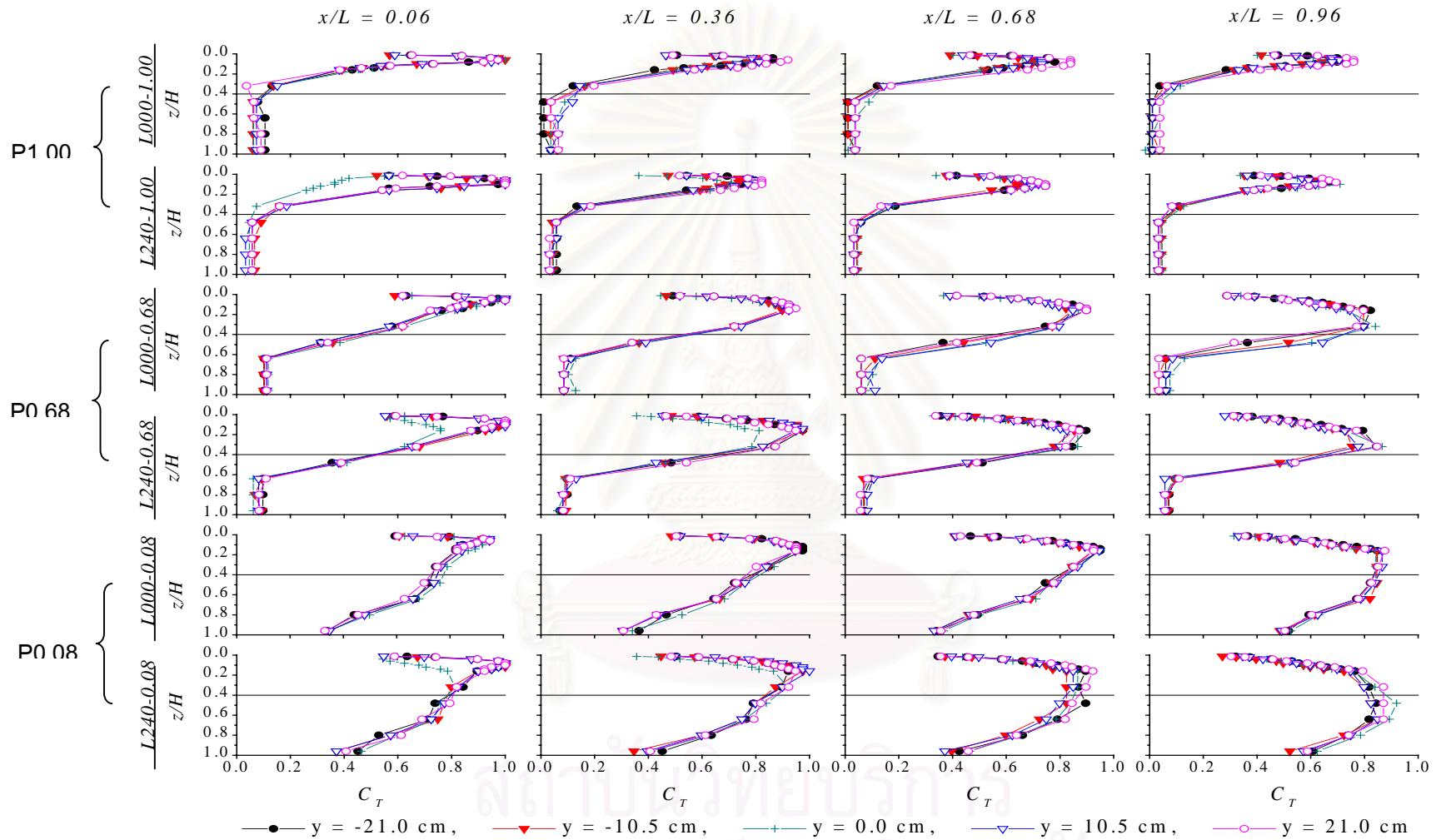
รูปที่ 5.52 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L242 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน



รูปที่ 5.53 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L244 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน

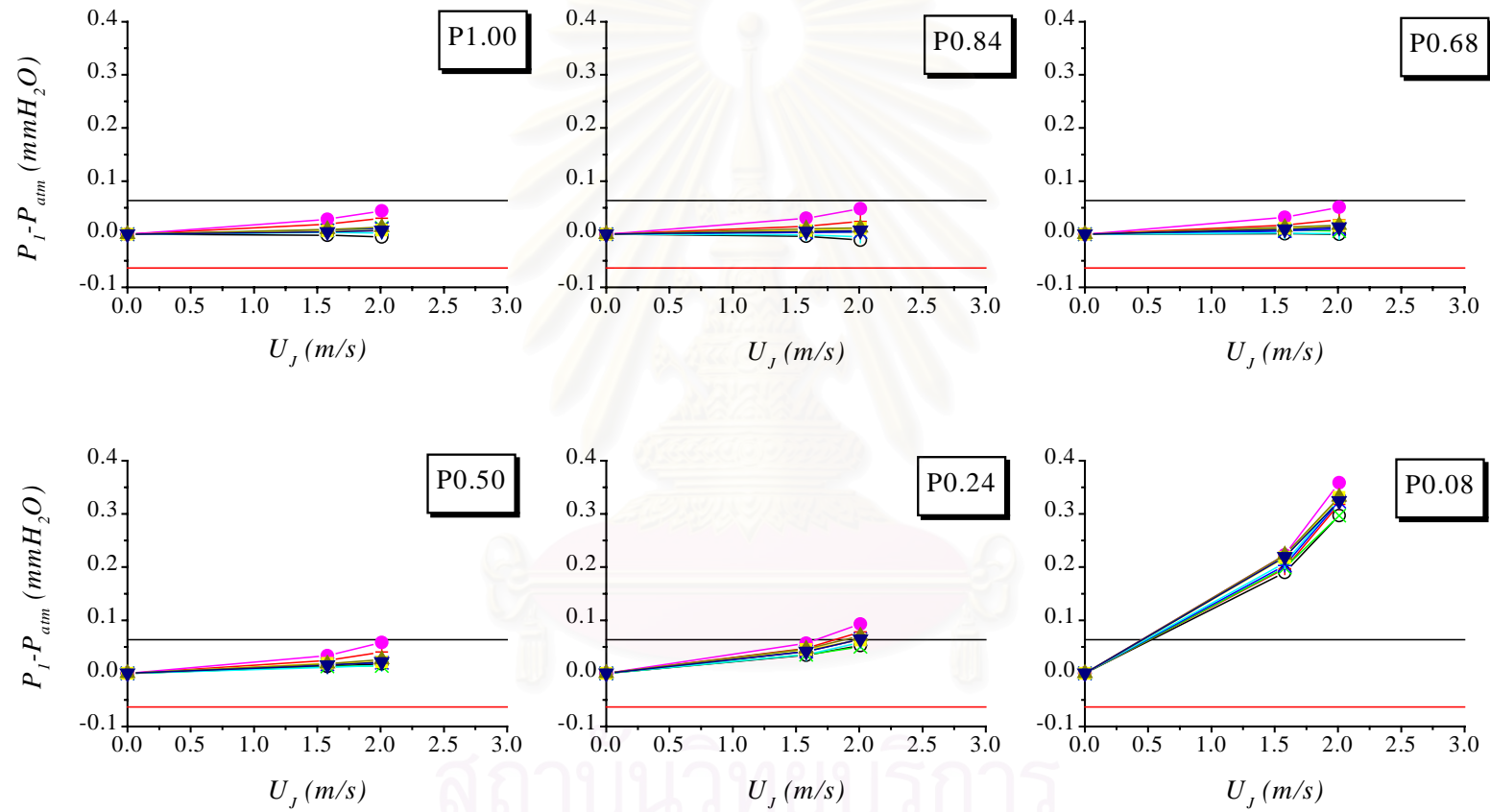


รูปที่ 5.54 กราฟเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L224 และ L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน



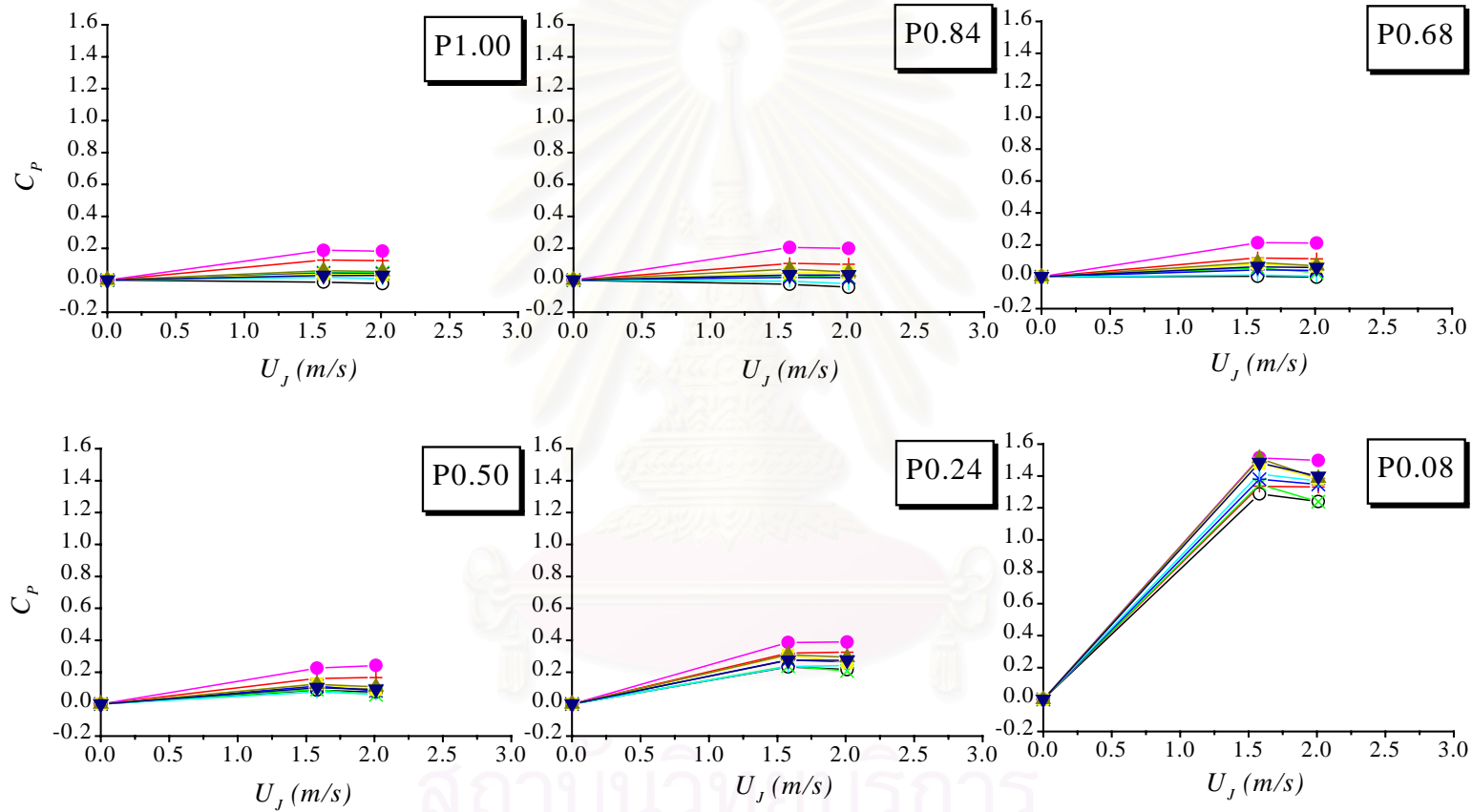
รูปที่ 5.55 กราฟเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของค่า  $C_T$  ตลอดแนว Spanwise ของกรณี L240 และ L000 ที่อัตราส่วนของขนาดช่องเปิดท้ายห้องต่างๆกัน





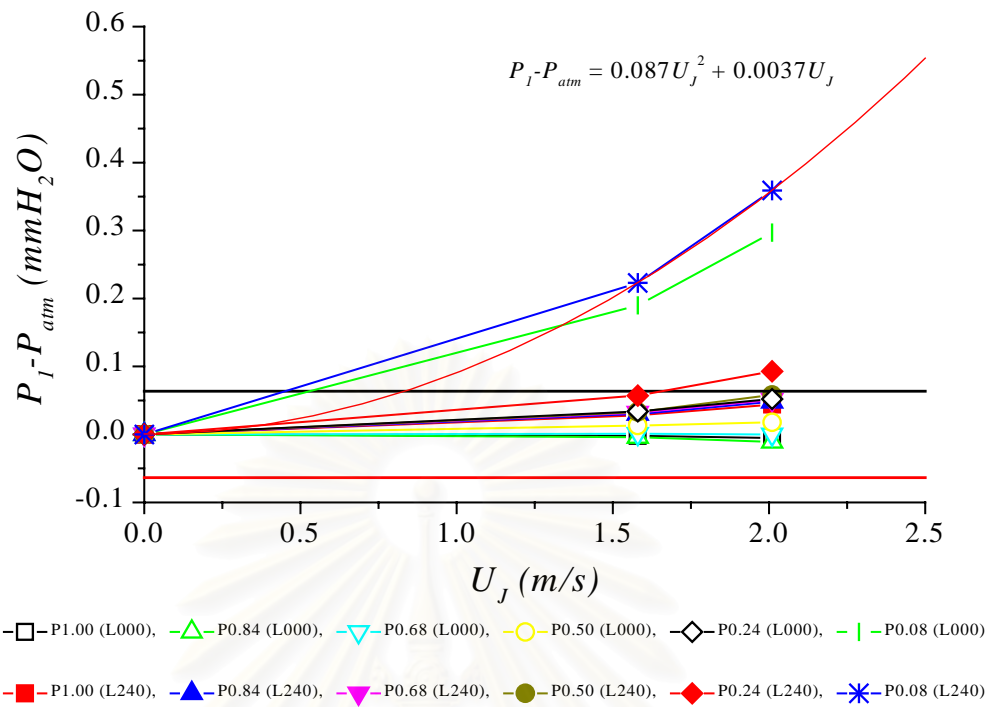
—○— L000, —+— L220, —x— L221, —\*— L222, —|— L224, —●— L240, —■— L241, —▲— L242, —▼— L244

รูปที่ 5.56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของ  $P_1 - P_{amb}$  และ  $U_j$  ของ Lobed nozzle ทุกแบบ ที่ขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่างๆกัน

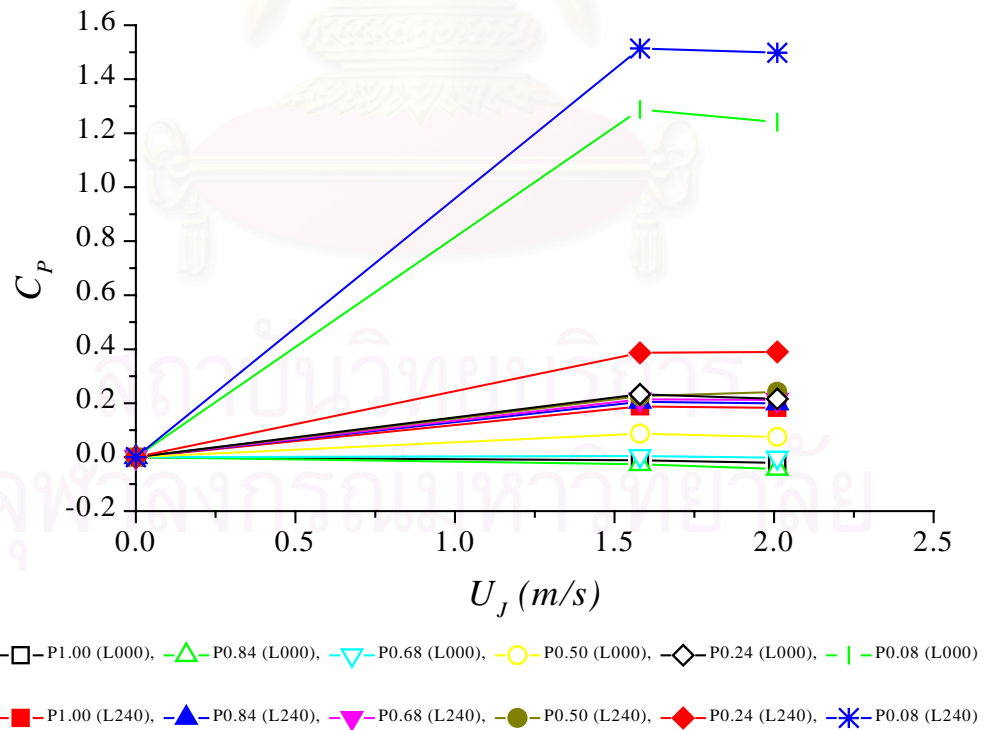


—○— L000, —+— L220, —×— L221, —\*— L222, —|— L224, —●— L240, —■— L241, —▲— L242, —▼— L244

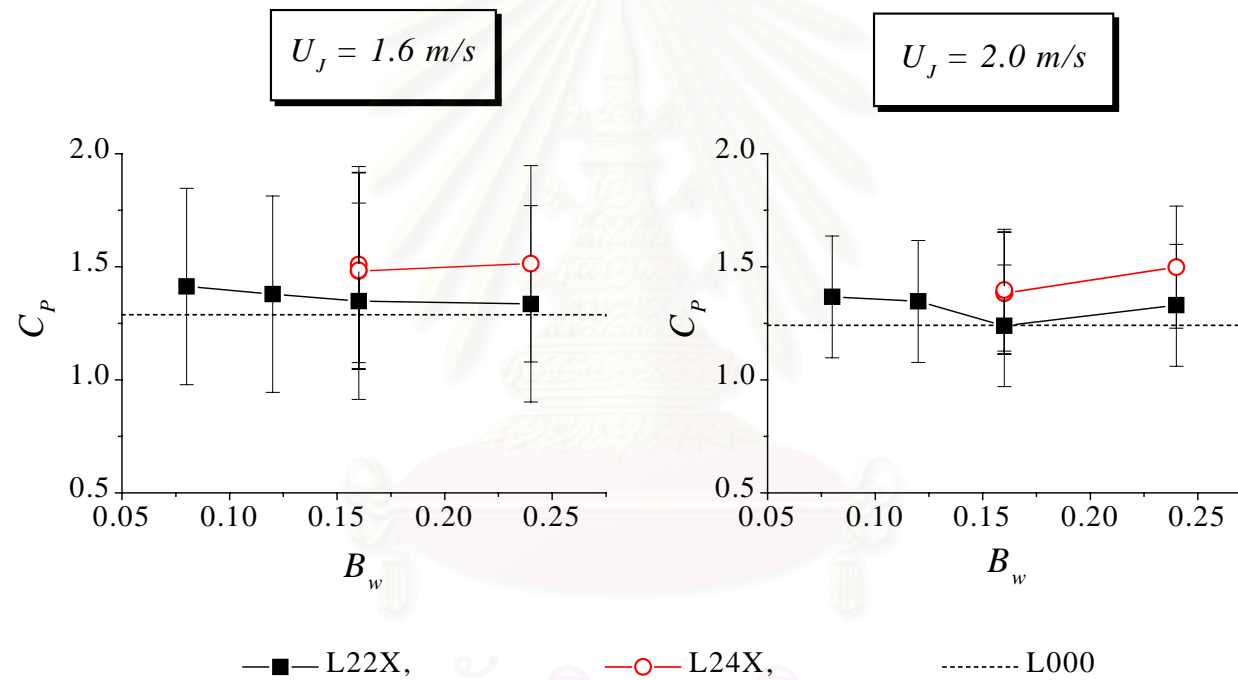
รูปที่ 5.57 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C_p$  และ  $U_j$  ของ Lobed nozzle ทุกแบบที่ขนาดช่องเปิดด้านท้ายห้องต่างๆกัน



รูปที่ 5.58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของ  $P_1 - P_{atm}$  และ  $U_j$  ของกรณี L240 เปรียบเทียบกับกรณี L000



รูปที่ 5.59 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ  $C_p$  และ  $U_j$  ของกรณี L240 เปรียบเทียบกับกรณี L000



รูปที่ 5.60 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C_p$  และ  $B_w$  ที่ความเร็วเฉลี่ยบริเวณช่องปล่อยอากาศเข้าต่างๆกันของ Lobed nozzle แบบต่างๆ

## รายการอ้างอิง

- Abbott, D.E., and Kline, S.J., (1962), "Experimental investigation of subsonic turbulent flow over single and double backward facing steps," *ASME Journal of Basic Engineering*, Vol. 84, pp. 317.
- Armaly, B.F., Durst, F., Periera, J.C.F., and Schonung, B., (1983), "Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 127, pp. 473-496.
- Becker, H.A., and Massaro, T.A., (1968), "Vortex evolution in a round jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 31, part 3, pp. 435-448.
- Belovich, V.M., and Samimy, M., (1996), "Mixing processes in a coaxial geometry with a central lobed mixer-nozzle," *AIAA Paper*, No. 96-0118, pp. 1-29.
- Bernal, L.P., and Roshko, A., (1986), "Streamwise vortex structure in plane mixing layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 170, pp. 499-525.
- Bobba, R.C., and Ghia, N., (1979), "A study of three dimensional compressible turbulent jets," *2<sup>nd</sup> Symp. on Turbulent Shear Flows, Imperial College, London*.
- Bohl, D.G., and Foss, J.F., (1999), "Near exit plane effects caused by primary and primary-plus-secondary tabs," *AIAA Journal*, Vol. 37, No. 2, February 1999, pp. 192-201.
- Bradbury, L.J.S., and Khadem, A.H., (1975), "The distortion of a jet by tabs," *J. Fluid Mech.*, Vol. 70, part 4, pp. 801-813.
- 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.
- Brown, G.L., and Roshko, A., (1974), "On density effects and large structure in turbulent mixing layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 64, pp. 775-816.
- Chorin, A.J., (1973), "Numerical study of slightly viscous flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 57, pp. 785.
- David, S.D.Y., (1997), "Growth of large scale structures in two-dimensional mixing layers," *Phys. Fluids*, Vol. 9, No. 7, July, pp. 2168-2170.
- Davidson, L., (1996), "Implementation of a large eddy simulation method applied to recirculating flow in a ventilated room," *Report*, ISSN 1395-7953 R9611, Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University.
- Fox, R.W., and McDonald, A.T., (1994), *Introduction to fluid mechanics*, 4<sup>th</sup>. ed., John Wiley & Sons.
- Germano, M., Piomelli, U., Moin, P., and Cabot, W.H., (1991), "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model," *Phys. Fluids A*, Vol. 3, pp. 1760-1765.
- Goldstein, R.J., Eriksen, V.L., Olsen, R.M., and Eckert, E.R.G., (1970), "Laminar separation, reattachment, and transition of the flow over a downstream-facing step," *ASME Journal of Basic Engineering*, Vol. 92, pp. 732.
- 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 of Fluids Engineering*, Vol. 102, pp. 316-323.



- Gosman, A.D., and Pun, W.M., (1974), "Calculation of recirculating flows," Lecture notes for the course entitled, Heat Transfer Section, Report HTS/74/2, Imperial College.
- Gutmark, E.J., and Grinstein, F.F., (1999), "Flow control with noncircular jets," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 31, pp. 239-272.
- Han, S., and Taghavi, R., (1998), "Computational study of subsonic jet evolution from different nozzle geometries," *AIAA Paper*, No. 98-16123.
- Jimenez, J., (1980), "On the visual growth of a turbulent mixing layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 96, pp. 447.
- Krothapalli, A., Baganoff, D., and Karamcheti, K., (1981), "On the mixing of a rectangular jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 107, pp. 201-220.
- Lasheras, J.C., Cho, J.S., and Maxworthy, T., (1986), "On the origin and evolution of streamwise vortical structures in a plane free shear-layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 172, pp. 123.
- Lasheras, J.C., and Choi, H., (1988), "Three-dimensional instability of a plane free shear layer : an experimental study of the formation and evolution of streamwise vortices," *J. Fluid Mech.*, Vol. 189, pp. 53-86.
- McGuirk, J.J., and Rodi, W., (1977), "The calculation of three-dimensional turbulent shear flows," *1<sup>st</sup> Symp. on Turbulent Shear Flows, Pennsylvania State University*.
- Moss, W.D., Baker, S., and Bradbury, L.J.S., (1979), "Measurement 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 of 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.
- Peng, S-H., Davidson, L., and Holmberg, S., (1997), "A modified low-Reynolds-number  $k-\omega$  model for recirculating flows," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol.119, pp. 867-875.
- Reeder, M.F., and Samimy, M., (1996), "The evolution of a jet with vortex-generating tabs : real-time visualization and quantitative measurements," *J. Fluid Mech.*, Vol. 311, pp. 73-118.
- Restivo, A., (1979), "Turbulent flow in ventilated rooms," *Ph.D.Thesis*, Mechanical Engineering Department, Imperial College of Science and Technology, University of London.
- Ritchie, B.D., and Seitzman, J.M., (1998), "Acetone fluorescence measurements of controlled fuel-air mixing," *AIAA Paper*, No. 98-0350.
- Sfeir, A.A., (1976), "The velocity and temperature fields of rectangular jets," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 19, pp. 1289-1297.
- Sforza, M.P., and Stasi, W., (1977), "Heated three-dimensional turbulent jets," *ASME Publication 77-WA / HT27*.
- Smagorinsky, J., (1963), "General circulation experiments with the primitive equations," *Monthly Weather Review*, Vol. 91, pp. 99-165.
- Smith, L.L., Majamaki, A.J., Lam, I.T., Delabroy, O., Karagozian, A.R., Marble, F.E., and Smith, O.I., (1997), "Mixing enhancement in a lobed injector," *Phys. Fluids*, Vol. 9, pp. 667.

- Stitsuwongkul, T., and Bunyajitradulya, A., (2000), "Temperature distribution inside a ventilated chamber : Effects of lobed nozzle, supply-air velocity, and end-wall opening," *Research and Development Journal of The Engineering Institute of Thailand*, Submitted.
- Strickland, J.H., Selerland, T., and Karagozian, A.R., (1998), "Numerical simulations of a lobed fuel injector," *Phys. Fluids*, Vol. 10, No. 11, November 1998, pp. 2950-2964.
- Suwapet, N., Pittayarungruangchai, E., Dharachandra, K., Stitsuwongkul, T., and Bunyajitradulya, A., (1999), "Smoke-wire visualization of an acoustically excited jet," *The 13<sup>th</sup> National Academic Seminar on Mechanical Engineering*, Vol. 2, pp. 57-68.
- White, F.M., (1991), *Viscous fluid flow*, 2<sup>nd</sup>. ed., McGraw-Hill.
- Wilcox, D.C., (1994), "Simulation of transition with a two-equation turbulence model," *AIAA Journal*, Vol. 32, pp. 247-255.
- Zaman, K.B.M.Q., (1994), "Effect of 'delta tabs' on mixing and axis switching in jets from asymmetric nozzles," *AIAA Paper*, No. 94-0186.
- Zaman, K.B.M.Q., and Hussain, A.K.M.F., (1980), "Vortex pairing in a circular jet under controlled excitation. : Part1. General jet response," *J. Fluid Mech.*, Vol. 101, Part 3, pp. 449-491.
- Zaman, K.B.M.Q., Reeder, M.F., and Samimy, M., (1994), "Control of an axisymmetric jet using vortex generators," *Phys. Fluids*, Vol. 6, pp. 778-793.



**ภาคผนวก**

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก การเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

ก่อนการทดลองในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องทำการเปรียบเทียบอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิกับเครื่องวัดอุณหภูมิมาตรฐานเป็นจำนวนทั้งสิ้น 2 ครั้ง โดยมีระยะเวลาห่างกันประมาณ 8 เดือน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

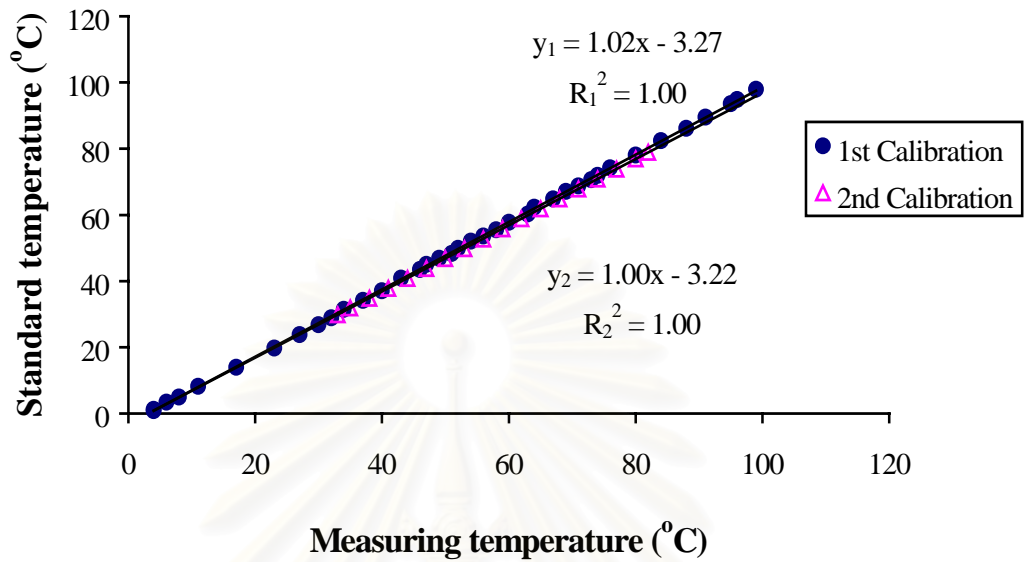
### การเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิครั้งที่ 1

เป็นการวัดอุณหภูมิของน้ำเทียบกับเครื่องวัดอุณหภูมิมาตรฐานที่สามารถอ่านค่าอุณหภูมิได้ในช่วง  $0-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  และมีความละเอียด  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งในการเปรียบเทียบนี้ได้ทำการวัดอุณหภูมิในช่วง  $0.8-97.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยทำการลดอุณหภูมิลงครั้งละ  $2-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยการใช้น้ำแข็งเติมลงไปในน้ำ จากผลการเปรียบเทียบพบว่าค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากอุปกรณ์ทั้ง 2 นั้นมีความสอดคล้องกัน โดยค่าอุณหภูมิที่ได้จากอุปกรณ์ที่ใช้วัดนั้นจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเครื่องวัดมาตรฐานประมาณ  $3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  อันเนื่องจาก Offset error ดังแสดงในกราฟรูปที่ ก.1

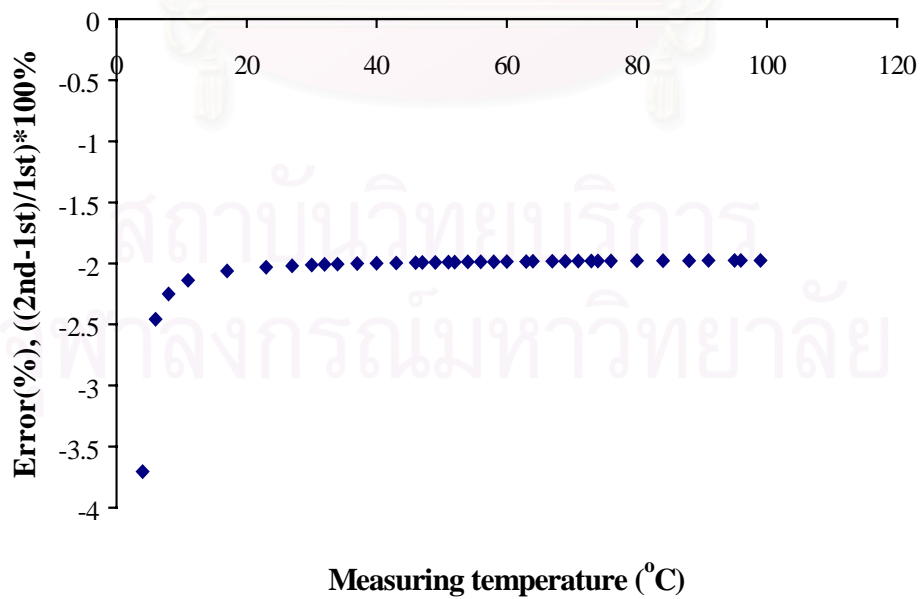
### การเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิครั้งที่ 2

การเปรียบเทียบครั้งนี้เป็นการวัดอุณหภูมิของน้ำเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานยี่ห้อ THOMAS SCIENTIFIC Co. จำนวน 2 ชุด ที่มีช่วงอ่านค่าอุณหภูมิเท่ากับ  $25-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $50-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยเทอร์โมมิเตอร์ทั้ง 2 นี้มีความละเอียด  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งในการเปรียบเทียบครั้งนี้ได้ทำการวัดอุณหภูมิของน้ำในช่วง  $29.8-78.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นครั้งละประมาณ  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  จากการใช้ Heater ที่ติดตั้งอยู่ภายในภาชนะที่บรรจุน้ำนั้น จากผลการเปรียบเทียบพบว่าค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากอุปกรณ์ทั้ง 2 นั้นยังคงสอดคล้องกัน โดยค่าอุณหภูมิที่ได้จากอุปกรณ์ที่ใช้วัดนั้นจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานประมาณ  $3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  อันเนื่องจาก Offset error ดังแสดงในกราฟรูปที่ ก.1

และเมื่อนำผลการเปรียบเทียบทั้ง 2 ครั้งนี้มาเปรียบเทียบกัน จะพบว่าค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิที่ใช้จะมีความเบี่ยงเบนไปประมาณ 2 % ดังกราฟรูปที่ ก.2 จึงกล่าวได้ว่าค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดนี้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือในระดับที่น่าพอใจ



รูปที่ ก.1 ผลการเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิทั้ง 2 ครั้ง



รูปที่ ก.2 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนจากการเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิทั้ง 2 ครั้ง

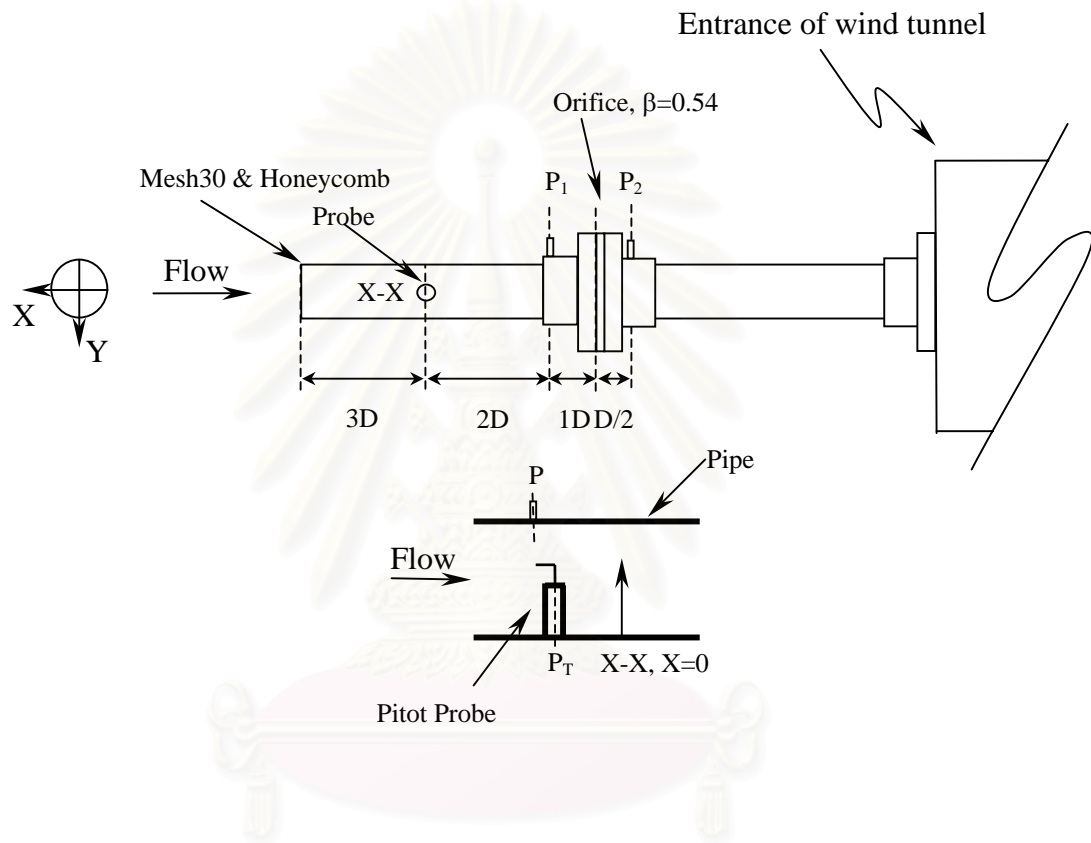


## ภาคผนวก ข

### การเปรียบเทียบอัตราการไหลผ่าน Orifice

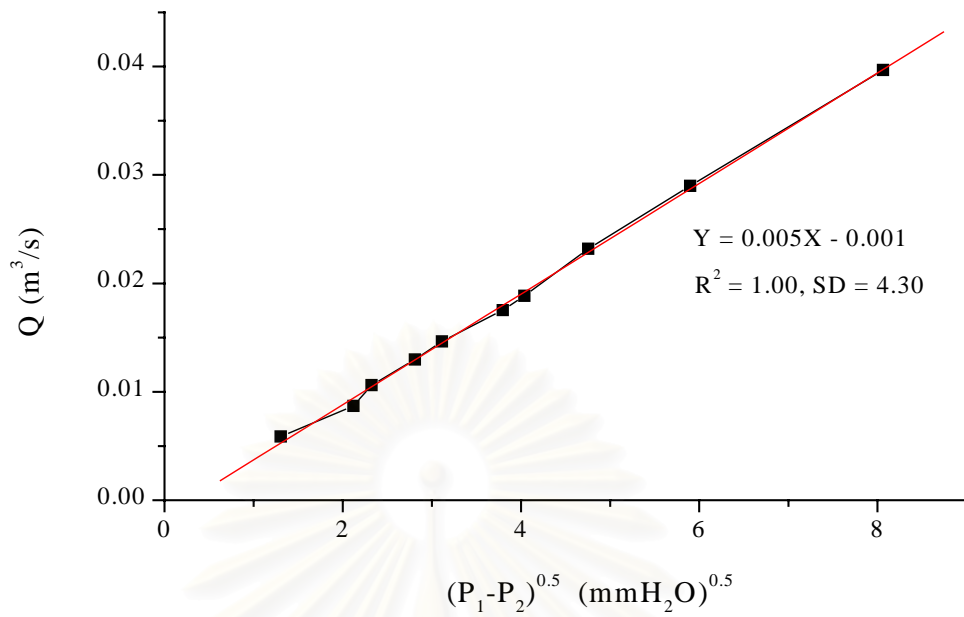
สำหรับการวัดอัตราการไหลที่เข้าสู่ห้องทดลองหรืออีกนัยหนึ่งก็คือ การหาค่าความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทอากาศที่เข้าสู่ห้องทดลองนั้น สามารถหาได้จากอัตราการไหลผ่าน Orifice ( $\beta = 0.54$ ) ซึ่งติดตั้งอยู่ที่บริเวณก่อนทางเข้าโมเมนต์ลม (ดังรูปที่ ข.1) โดยก่อนการทดลองนั้นได้ทำการเปรียบเทียบอัตราการไหลผ่าน Orifice นี้กับอัตราการไหลจริง ซึ่งอัตราการไหลผ่าน Orifice นั้นหาค่าจากความดันตกคร่อม Orifice ( $P_1-P_2$ ) และสำหรับอัตราการไหลจริงนั้นหาได้จากความเร็วที่มาจากความเร็วความดันรวมเทียบกับความดันสถิต ( $P_T-P$ ) ตามตำแหน่งต่างๆภายในท่อที่บริเวณก่อนทางเข้า Orifice ซึ่งอยู่ห่างออกไปเป็นระยะเท่ากับ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ แล้วนำค่าความเร็วที่ได้นี้มาคูณกับพื้นที่ในแต่ละตำแหน่งตามแนวเส้นรอบวงของท่อ ก็จะได้อัตราการไหลจริงดังกล่าว ซึ่งในที่นี้จะทำการวัดค่า ( $P_T-P$ ) ที่ Plane X-X ซึ่งอยู่ที่ระดับกึ่งกลางท่อ ดังแสดงในรูปที่ ข.1 โดยจะทำการวัดทุกๆระยะ 5 mm ที่บริเวณกลางท่อ และทุกๆระยะ 3 mm ที่บริเวณใกล้ผนังท่อ

ต่อมาหลังจากที่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า ( $P_1-P_2$ ) กับค่าอัตราการไหลจริงที่ผ่าน Orifice ได้แล้วก็จะสามารถหาอัตราการไหลของเจ็ทที่เข้าสู่ห้องทดลองได้ โดยอาศัยการใช้กฎการอนุรักษ์มวล สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการไหลของเจ็ทที่เข้าสู่ห้องทดลองนี้ ( $Q$ ) กับค่าความดันตกคร่อม Orifice ( $P_1-P_2$ ) รวมทั้งความเร็วเฉลี่ยของเจ็ท ( $U_j$ ) กับค่าความดันตกคร่อม Orifice นั้นนั้นแสดงดังกราฟรูปที่ ข.2 และ ข.3 ตามลำดับ

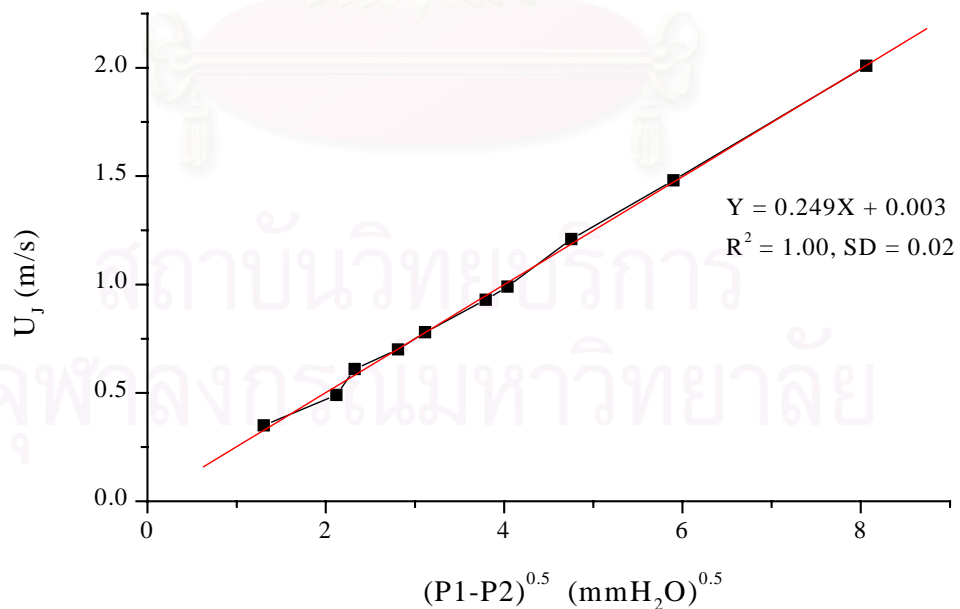


รูปที่ ข.1 ภาพ Schematic drawing แสดงการปรับเทียบอัตราการไหลผ่าน Orifice

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการไหลของเจ็ทที่เข้าสู่ห้องทดลองกับค่าความดันตกคร่อม Orifice



รูปที่ ข.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทที่เข้าสู่ห้องทดลองกับค่าความดันตกคร่อม Orifice

**ภาคผนวก ค**  
**การคำนวณค่าความไม่แน่นอน**

การวัดอุณหภูมิภายในห้องทดลองของงานวิจัยนี้ใช้ Probe ที่ทำจาก Thermocouple type K ยี่ห้อ OMEGA รุ่น TT-K-24SLE ที่สามารถอ่านค่าอุณหภูมิได้ในช่วง 0-1,250 °C ซึ่งมีความเบี่ยงเบนประมาณ 2 % และใช้ตัวอ่านค่าอุณหภูมียี่ห้อ RKC รุ่น C100FK02-M\*GN ที่สามารถอ่านค่าอุณหภูมิได้ในช่วง 0-400 °C และอ่านได้ละเอียด 1 °C

สำหรับการวัดอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ( $T_{ref}$ ) นั้นใช้ Thermometer ที่อ่านค่าอุณหภูมิได้ในช่วง 0-100 °C และมีความละเอียดเท่ากับ 1 °C ดังนั้นค่าที่แสดงไว้ในกราฟจึงมีความผิดพลาดดังนี้

1. การคำนวณค่า Uncertainty ของค่า  $C_T$

จากสมการ 
$$C_T = \frac{T - T_{ref}}{T_J - T_{ref}} = C_T(T, T_J, T_{ref})$$

โดยค่า  $T$  และ  $T_J$  นั้นมีความผิดพลาดเท่ากับค่าความละเอียดของตัวอ่านค่าอุณหภูมิ

ดังนั้น 
$$\omega_T = \omega_{T_J} = 1^\circ C$$

และค่า  $T_{ref}$  นั้นถือว่าอาจมีความผิดพลาดอันเกิดจากการอ่านค่าอุณหภูมิจาก Thermometer ผิดพลาดไป โดยในที่นี้กำหนดให้

$$\omega_{T_{ref}} = 0.5^\circ C$$

ดังนั้นจะได้ว่า

จาก 
$$\omega_{C_T} = \sqrt{\left(\frac{\partial C_T}{\partial T} \omega_T\right)^2 + \left(\frac{\partial C_T}{\partial T_J} \omega_{T_J}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_T}{\partial T_{ref}} \omega_{T_{ref}}\right)^2}$$

$$\therefore \omega_{C_T} = \sqrt{\left(\frac{1}{T_J - T_{ref}} \omega_T\right)^2 + \left(\frac{-(T - T_{ref})}{(T_J - T_{ref})^2} \omega_{T_J}\right)^2 + \left(\frac{-(T_J - T_{ref}) + (T - T_{ref})}{(T_J - T_{ref})^2} \omega_{T_{ref}}\right)^2}$$

ตัวอย่างการคำนวณกรณี L224-1.00 ที่ตำแหน่ง  $x = 0.06L$ ,  $y = 0$  และ  $z = 0.06H$  ซึ่งมีค่า  $T = 67.78 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_j = 67.78 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $T_{ref} = 30.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  จะได้ว่า

$$\omega_{C_T} = \sqrt{\left(\frac{1}{67.78 - 30.5} \times 1\right)^2 + \left(\frac{-(67.78 - 30.5)}{(67.78 - 30.5)^2} \times 1\right)^2 + \left(\frac{-(67.78 - 30.5) + (67.78 - 30.5)}{(67.78 - 30.5)^2} \times 0.5\right)^2}$$

ดังนั้น  $\omega_{C_T} = 0.037 \approx 0.04$

## 2. การคำนวณค่า Uncertainty ของค่า $C_{TS}$ , $C_{TZ}$ , $C_{TT}$ , $C_{T \max}$ และ $C_{TS \max}$

เนื่องจากค่า  $C_{TS}$ ,  $C_{TZ}$ ,  $C_{TT}$ ,  $C_{T \max}$  และ  $C_{TS \max}$  ได้มาจากการนำค่า  $C_T$  ตามบริเวณต่างๆ ภายในห้องมาทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์ กล่าวคือ นำค่า  $C_T$  มาหาค่าเฉลี่ยโดยปริมาตร หรือมาทำการหาค่าสูงสุด โดยไม่ได้ทำการวัดค่าเพิ่มเติมแต่อย่างใด ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าค่า Uncertainty ของค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ เหล่านี้ จะมีค่าเท่ากับค่า Uncertainty ของค่า  $C_T$  นั่นคือ

$$\omega_{C_{TS}} = \omega_{C_{TZ}} = \omega_{C_{TT}} = \omega_{C_{T \max}} = \omega_{C_{TS \max}} = \omega_{C_T} = 0.04$$

## 3. การคำนวณค่า Uncertainty ของค่า $P_1 - P_{atm}$

เนื่องจากการทดลองได้ทำการวัดค่า  $P_1 - P_{atm}$  โดยตรงจาก Pressure transducer ยี่ห้อ OMEGA รุ่น P\*653-0.25BD5V ที่มีช่วงอ่านค่าความดัน  $\pm 0.25$  นิ้วน้ำ, แรงดันไฟฟ้าขาออก 1-5 Volt(DC) และมีความผิดพลาดเท่ากับ  $\pm 0.5\%$  ดังนั้นค่า Uncertainty ของค่า  $P_1 - P_{atm}$  นี้จึงมีค่าเท่ากับค่าความละเอียดของ Pressure transducer กล่าวคือ

$$\begin{aligned} \omega_{(P_1 - P_{atm})} &= \left(\frac{0.5}{100}\right) \times (2 \times 0.25) = 0.0025 \text{ นิ้วน้ำ} \\ &= 0.0635 \text{ มิลลิเมตรน้ำ} \\ &\approx 0.06 \text{ มิลลิเมตรน้ำ} \end{aligned}$$

## 4. การคำนวณค่า Uncertainty ของค่า $C_p$

เนื่องจากค่า  $C_p$  เป็นค่าเฉลี่ยโดยพื้นที่ของค่า  $K_{LN}$  ซึ่ง  $K_{LN} = \frac{(P_1 - P_{atm})}{q_1}$  ดังนั้นค่า

Uncertainty ของค่า  $C_p$  จึงมีค่าเท่ากับค่า Uncertainty ของค่า  $K_{LN}$



โดย 
$$K_{LN} = \frac{(P_1 - P_{atm})}{q_1} = \frac{(P_1 - P_{atm})}{\frac{1}{2}\rho_a u_1^2}$$

$$K_{LN} = \frac{(P_1 - P_{atm})}{\frac{1}{2}\rho_a \left(\frac{Q_1}{A_{NZ}}\right)^2} \quad (ค.1)$$

เมื่อ  $\rho_a$  คือ ความหนาแน่นของเจ็ทอากาศ  
และ  $A_{NZ}$  คือ พื้นที่หน้าตัดทางออกของ Nozzle

จากสมการ (ค.1) จะได้ว่า

$$K_{LN} = \frac{(P_1 - P_{atm})}{\frac{1}{2}\rho_a \left( K_o A_o \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_a}} / A_{NZ} \right)^2} \quad (ค.2)$$

โดย  $K_o$  คือ ค่าคงที่ของ Orifice  
 $A_o$  คือ พื้นที่หน้าตัดการไหลของ Orifice  
 $\Delta P$  คือ ความแตกต่างความดันคร่อม Orifice (เท่ากับ  $P_1 - P_2$ )

จากสมการ (ค.2) จะได้ว่า

$$K_{LN} = \left( \frac{A_{NZ}}{K_o A_o} \right)^2 \frac{(P_1 - P_{atm})}{\Delta P}$$

เมื่อให้  $\Delta P_{LN} = P_1 - P_{atm}$  จึงได้ว่า

$$K_{LN} = \left( \frac{A_{NZ}}{K_o A_o} \right)^2 \frac{\Delta P_{LN}}{\Delta P}$$

$$\therefore K_{LN} = K_{LN}(\Delta P_{LN}, \Delta P)$$

จึงได้ว่า

$$\omega_{K_{LN}} = \sqrt{\left(\frac{\partial K_{LN}}{\partial \Delta P_{LN}} \omega_{\Delta P_{LN}}\right)^2 + \left(\frac{\partial K_{LN}}{\partial \Delta P} \omega_{\Delta P}\right)^2}$$

$$\therefore \omega_{K_{LN}} = \sqrt{\frac{1}{(\Delta P)^2} \left(\frac{A_{NZ}}{K_O A_O}\right)^4 (\omega_{\Delta P_{LN}})^2 + \frac{(\Delta P_{LN})^2}{(\Delta P)^4} \left(\frac{A_{NZ}}{K_O A_O}\right)^4 (\omega_{\Delta P})^2} \quad (ค.3)$$

โดย  $\omega_{\Delta P_{LN}} = 0.064 \text{ mmH}_2\text{O}$

และ  $\omega_{\Delta P} = \begin{cases} 0.2 \text{ mmH}_2\text{O} & \text{เมื่อ } \Delta P \text{ อยู่ในช่วง } 0-50 \text{ mmH}_2\text{O} \\ 2.0 \text{ mmH}_2\text{O} & \text{เมื่อ } \Delta P \text{ ตั้งแต่ } 50 \text{ mmH}_2\text{O} \text{ ขึ้นไป} \end{cases}$

ตัวอย่างการคำนวณกรณี L240-0.08 ที่ตำแหน่ง  $y = 0 \text{ cm}$  นั้น

- ที่  $U_j = 1.6 \text{ m/s}$  ซึ่งมี...

$$\Delta P_{LN} = 0.235 \text{ mmH}_2\text{O}, \Delta P = 40 \text{ mmH}_2\text{O}, \omega_{\Delta P_{LN}} = 0.064 \text{ mmH}_2\text{O},$$

$$\omega_{\Delta P} = 0.2 \text{ mmH}_2\text{O}, K_O = 0.7602, A_{NZ} = 200 \text{ cm}^2 \text{ และ } A_O = 15.9 \text{ cm}^2$$

เมื่อแทนค่าเหล่านี้ลงในสมการ (ค.3) จะได้ว่า

$$\omega_{K_{LN}} = 0.44$$

- ที่  $U_j = 2.0 \text{ m/s}$  ซึ่งมี...

$$\Delta P_{LN} = 0.381 \text{ mmH}_2\text{O}, \Delta P = 65 \text{ mmH}_2\text{O}, \omega_{\Delta P_{LN}} = 0.064 \text{ mmH}_2\text{O},$$

$$\omega_{\Delta P} = 2.0 \text{ mmH}_2\text{O}, K_O = 0.7614, A_{NZ} = 200 \text{ cm}^2 \text{ และ } A_O = 15.9 \text{ cm}^2$$

เมื่อแทนค่าเหล่านี้ลงในสมการ (ค.3) จะได้ว่า

$$\omega_{K_{LN}} = 0.27$$

ดังนั้นจึงได้ว่าค่า Uncertainty สูงสุดของค่า  $C_p$  มีค่าเท่ากับ 0.44 ซึ่งเกิดขึ้นที่  $U_j = 1.6 \text{ m/s}$

## ภาคผนวก ง

### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของโพรบวัดอุณหภูมิ

พิจารณารูปที่ ง.1 ซึ่งเป็นรูปแสดงการวัดอุณหภูมิโดยใช้ Thermocouple probe ที่ใช้ในการทดลองนี้ โดยมีสมมติฐานและสมการพื้นฐาน ดังนี้

- สมมติฐาน :
1. Steady in mean flow
  2. ไม่มีพลังงานสูญเสียตลอดความยาวของก้านโพรบเนื่องจากมีฉนวนกันความร้อนอยู่
  3. อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมมีค่าสม่ำเสมอ
  4. ปลายโพรบที่ใช้วัดอุณหภูมิมีรูปร่างเป็นทรงกลม (Sphere)

สมการพื้นฐาน : จากกฎอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่า

$$\begin{aligned}q_{conv} &= q_{cond} \\hA\Delta T &= kA\Delta T \\hA(T_F - T_P) &= \frac{kA}{L}(T_P - T_{ref}) \\ \frac{T_F - T_P}{T_P - T_{ref}} &= \frac{k}{hL} \\ &= \left(\frac{k}{hD}\right)\left(\frac{D}{L}\right) \\ \therefore \frac{T_F - T_P}{T_P - T_{ref}} &= \frac{1}{Nu}\left(\frac{D}{L}\right) \quad (ง.1)\end{aligned}$$

สำหรับอากาศที่  $U_J = 0.5 \text{ m/s}$  และ  $T_F = 70^\circ \text{C}$  จะได้ว่า

$$Pr = 0.706 \quad , \quad (Re)_{D_p} = \frac{U_J D_p}{\nu_a} = \frac{(0.5 \text{ m/s})(1 \times 10^{-3} \text{ m})}{(2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})} = 25$$

สำหรับอากาศที่  $U_J = 4.4 \text{ m/s}$  และ  $T_F = 70^\circ \text{C}$  จะได้ว่า

$$Pr = 0.706 \quad , \quad (Re)_{D_p} = \frac{U_J D_p}{\nu_a} = \frac{(4.4 \text{ m/s})(1 \times 10^{-3} \text{ m})}{(2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})} = 220$$

สำหรับการไหลผ่านปลายโพรบที่ใช้วัตถุกลมซึ่งในที่นี้ถือว่าเป็นทรงกลม (Sphere) นั้นจะได้ว่า

$$Nu_{m,sphere} \approx 2.0 + 0.3Pr^{1/3} Re^{3/5}$$

(จาก "Viscous fluid flow", White, 1991)

ที่  $U_j = 0.5$  m/s จะได้ว่า

$$\begin{aligned} Nu_{m,sphere} &\approx 2.0 + 0.3(0.706)^{1/3} (25)^{3/5} \\ &= 3.84 \end{aligned}$$

ที่  $U_j = 4.4$  m/s จะได้ว่า

$$\begin{aligned} Nu_{m,sphere} &\approx 2.0 + 0.3(0.706)^{1/3} (220)^{3/5} \\ &= 8.79 \end{aligned}$$

เมื่อ  $U_j = 0.5$  m/s : จากสมการที่ (ง.1) ที่  $D = D_p = 1 \times 10^{-3}$  m และ  $T_p - T_{ref} \approx 40^\circ C$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{T_F - T_P}{40} &= \frac{1}{3.84} \left( \frac{1 \times 10^{-3}}{L} \right) \\ T_F - T_P &= \frac{0.0104}{L} \end{aligned} \quad (ง.2)$$

เมื่อ  $L = 0.06$  m (ขณะวัตถุกลมที่จุดใกล้เพดานห้องที่สุด) จากสมการ (ง.2) จะได้ว่า

$$T_F - T_P = \frac{0.0104}{0.06} = 0.173^\circ C \quad \dots \dots \text{Max!}$$

เมื่อ  $L = 0.48$  m (ขณะวัตถุกลมที่จุดใกล้พื้นล่างที่สุด) จากสมการ (ง.2) จะได้ว่า

$$T_F - T_P = \frac{0.0104}{0.48} = 0.022^\circ C$$

เมื่อ  $U_j = 4.4$  m/s : จากสมการที่ (ง.1) ที่  $D = D_p = 1 \times 10^{-3}$  m และ  $T_p - T_{ref} \approx 40^\circ C$  จะได้ว่า

$$\frac{T_F - T_p}{40} = \frac{1}{8.79} \left( \frac{1 \times 10^{-3}}{L} \right)$$

$$T_F - T_p = \frac{0.0046}{L} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $L = 0.06 \text{ m}$  และจากสมการ (3.3) จะได้ว่า

$$T_F - T_p = \frac{0.0046}{0.06} = 0.077^\circ \text{C}$$

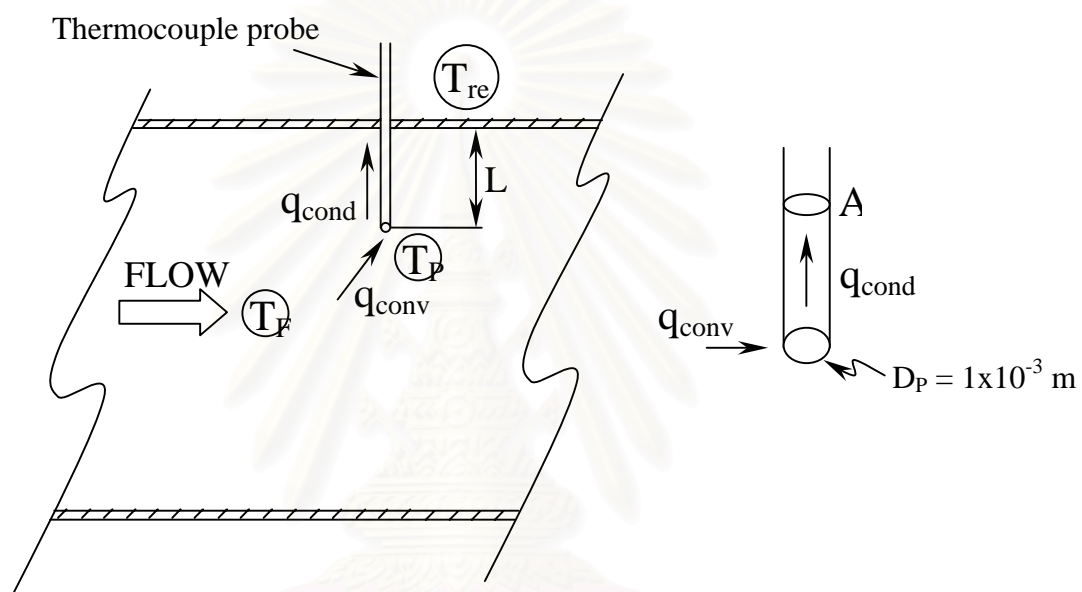
เมื่อ  $L = 0.48 \text{ m}$  และจากสมการ (3.3) จะได้ว่า

$$T_F - T_p = \frac{0.0046}{0.48} = 0.009^\circ \text{C}$$

จะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิที่วัดได้ ( $T_p$ ) จะแตกต่างกันไปจากค่าอุณหภูมิของอากาศจริง ( $T_F$ ) มากที่สุดในกรณีที่ความเร็วอากาศที่ช่องปล่อยอากาศเข้า ( $U_j$ ) นั้นมีค่าเท่ากับ  $0.5 \text{ m/s}$  ในขณะที่ทำการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งใกล้เพดานห้องที่สุด โดยค่าที่แตกต่างนี้มีค่าเท่ากับ  $0.173^\circ \text{C}$

อย่างไรก็ตามจะพบว่าค่าอุณหภูมิแตกต่างสูงสุดนี้ก็ยังคงมีค่าน้อยกว่าค่าความละเอียดของเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีค่าความละเอียดเท่ากับ  $1^\circ \text{C}$





รูปที่ ง.1 ภาพแสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาค่าความคลาดเคลื่อนของโพรบวัดอุณหภูมิ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียน

นาย ทศพล สถิตย์สูงศักดิ์กุล เกิดวันที่ 21 เมษายน พ.ศ. 2519 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย